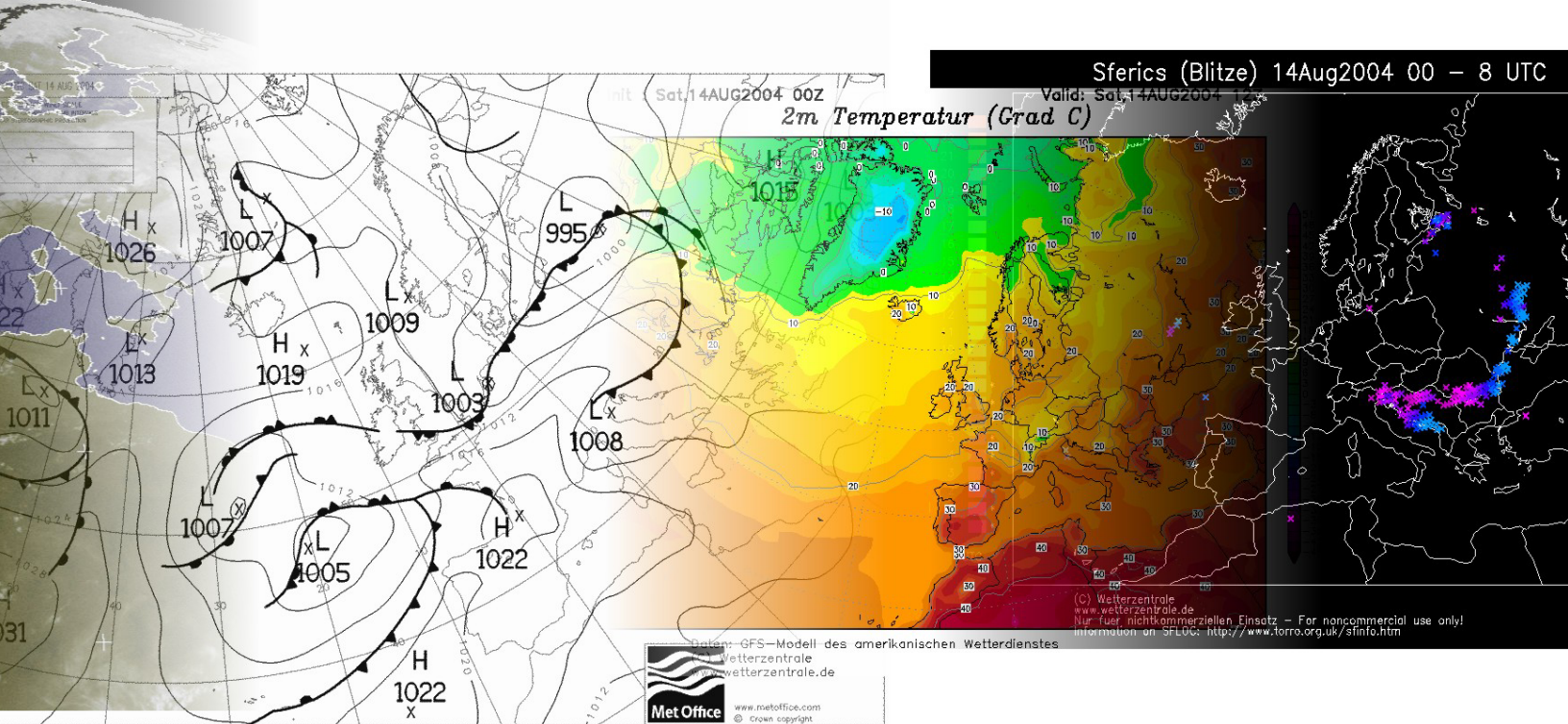


Luftgestützte Geofernerkundung mit leichten Messflugzeugen im 21. Jahrhundert

Versuch einer Ausgangspunktbestimmung über die
historische Analyse der ersten 100 Jahre Motorflug

14 AUG 2004 0830 TR2 D2



Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von:
Günther Winkler

Kiel 24.5.2005

Referent:Prof. H.R. Bork.....
KorreferentProf. O. Fränze.....
Tag der mündlichen Prüfung:13.06.2005.....
Zum Druck genehmigt: Kiel,21.11.2005.....
Der Dekan

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	3
2	ALLGEMEINE MODELLVORSTELLUNG ZUR TECHNOLOGIEFORTSCHRITTBILDEUNG.....	5
3	PROBLEMSTELLUNG UND THESEN.....	16
4	HISTORISCHE SYNOPSE: VON DEN ANFÄNGEN DER NAVIGATION BIS ZUM MODERNEN MESSFLUGZEUG.....	20
5	KURZE GENEALOGIE DER LUFTBILDFOTOGRAFIE UND LUFTBILDPHOTOGRAMMETRIE	108
5.1	GEOMETRISCHE PERSPEKTIVE IN KUNST UND WISSENSCHAFT.....	108
5.2	WICHTIGE MEILENSTEINE IN DER GESCHICHTE DER FOTOGRAFIE.....	113
5.3	DER VERBUND VON FLUGZEUG UND KAMERA.....	120
6	DER GLOBALE RAHMEN – BEGINN DER SATELLITENGESTÜTZTEN ERDBEOBACHTUNG, GEOPOLITISCHE ASPEKTE UND WACHSENDES GLOBALES UMWELTBEWUSSTSEIN.....	135
7	ANMERKUNGEN ZUM ENTWICKLUNGSSTAND DER GEOINFORMATIKINDUSTRIE	149
7.1	PRIMÄR AUSLÖSENDE FAKTOR: DIE ERSCHLIEßUNG KOMMERZIELLER SATELLITENMÄRKTE.....	149
7.2	VORBILD US-MARKT	153
7.3	EUROPÄISCHER STATUS QUO	156
7.4	EINFLUSSFAKTOR GEOINFORMATIK-SOFTWARE: GIS UND DIGITALE PHOTOGRAMMETRIE.....	179
8	ÜBERBLICK ZUR HISTORIE DER LUFTBILDARCHÄOLOGIE.....	186
9	DREH- UND ANGELPUNKT COMPUTER – GRUNDLEGENDE BETRACHTUNGEN ZUR ENTWICKLUNG VON HARD- UND SOFTWARE	200
9.1	ALLGEMEINE LEISTUNGSZUNAHME	200
9.2	PC-BASISARCHITEKTUR	201
9.3	DER EINFLUSS VON SOFTWARE AUF FLUGPLANUNG UND –FÜHRUNG: GPS UND MOVING MAP	212
9.3.1	<i>Ein Moving-Map-System auf PC-Basis: Beispiel "Flight Planner"</i>	<i>213</i>
9.3.2	<i>Ein hochminiaturisiertes Moving-Map-System auf PDA-Basis: Beispiel „PocketStrepla“</i>	<i>218</i>
10	SMALL FORMAT AERIAL PHOTOGRAPHY (SFAP) UND DESSEN TECHNISCHE GRUNDLAGEN	231
10.1	DIREKTE AUTOGEOREFERENZIERUNG – EINE TECHNOLOGISCHE MEILENSTEINENTWICKLUNG IN DER RAHMENBETRACHTUNG	245
10.2	PUNKTUELLE HÖCHSTLEISTUNG: DIE SERIENBILDFUNKTION VON DSLR-KAMERAS ZUR „BURST-MODE-BEFLIEGUNG“	264
10.3	COMPUTERGESTÜTZTE PRÄZISIONSFLUGFÜHRUNG ALS UNVERZICHTBARES HILFSMITTEL.....	273
10.4	GRUNDSÄTZLICHE FLIEGERISCHE UND LUFTRECHTLICHE ASPEKTE	278
10.5	ANDERE SENSORIK – ANDERE TRÄGERFLUGZEUGE.....	281
10.6	FERNERKUNDUNGS-LEISTUNGSKLASSEN (INNOVATIONSTUFEN).....	303
10.7	FERNERKUNDUNGS-METHODIK (INTEGRATIONSTUFEN)	309
11	POTENTIELLES ANWENDUNGSGEBIET KLIMAGEOGRAPHIE.....	314
12	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	322
13	GLOSSAR UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	338
14	EINHEITEN UND GRÖßEN.....	341
15	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	341
16	QUELLENACHWEIS.....	347

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit versucht, vor einer sehr detaillierten und breit angelegten historischen Analyse die Ausgangsbedingungen für den seit Anfang der 90er Jahre des 20. Jhs. einsetzenden kommerziellen Wiederaufschwung der luftgestützten Fernerkundung und einige sich abzeichnende Verschmelzungslinien innerhalb der Geoinformatik-Industrie herauszuarbeiten. Die genealogische Sicht folgt dem Motto „Wer in der Zukunft lesen will, muß in der Vergangenheit blättern.“ (André Malreaux). Sie umfasst die Themenbereiche Astronomie, Navigation (GPS, INS, Moving Map, Flugführungssysteme), Kartografie, PC-Geschichte, GIS, 3-D-Animation, Flugzeugtechnik und die Herauskristallisierung der Luft- und Raumfahrtindustrien sowie eine Abschätzung deren globaler Produktionsziffern über das erste Jahrhundert der Motorfliegerei im sportlichen, geschäftlichen und militärischen Umfeld. Die Fragen, die hierüber beantwortet werden, sind vielfältiger Natur: Sie beziehen sich auf die Art der künftig zu erwartenden Umweltmessflugzeuge, ihre prinzipiellen Basisausrüstungen und einige Belange der Prozessoptimierung in den Arbeitsabläufen während des Fluges und auf dem Boden. Es werden einige Wirtschaftlichkeitsüberlegungen und strukturelle Vergleichsbetrachtungen angestellt, die von der Drachenkamera bis zu militärischen Weltraumrüstungsprogrammen reichen, sowie eine internationale Aufstellung zur Beschaffenheit des Marktes geliefert, die eine Vorstellung von seiner Dynamik und der langfristigen Entwicklungsmechanik vermitteln sollen. Vor diesem Hintergrund wird die Analyse bis zur Forderung nach Multisensor-Konzepten für ein Umweltmonitoring ausgeweitet, wie sie sich bis kurz vor der Jahrtausendwende technisch noch nicht realisieren ließen. Es werden einige Anregungen dazu geliefert, wie man künftig einen umweltschonenden Messflugbetrieb mit zeitlich und räumlich hoher Auflösung in den Kulturlandschaften wirtschaftlich und emissionsarm realisieren wird. Die Gesamtdarstellung zielt darauf ab, die Begriffe Leistung, Qualität und Machbarkeit von Fernerkundungsflugzeugen auf eine neue Betrachtungsebene zu stellen. Ein essentielles Ergebnis der Arbeit ist die Erkenntnis, dass Umweltmessflugsysteme unabhängig von ihrer Bauart künftig auf identischen Grundfunktionalitäten aufbauen werden (Navigation, Flugführung, Sensorfernsteuerung). Der Impuls dafür entstammt einigen angloamerikanischen Entwicklungen der letzten 3 Jahrzehnte mit einigen prominenten Vertretern wie Graham, Read, Koh, Zsilinsky, Meyer, Heimes u. v. a. deren Arbeiten sich mit dem Begriff SFAP (Small Format Aerial Photography) zusammenfassen lassen.

Es wird versucht, den Leistungsbegriff zu isolieren und eine Synthese historisch entstandener Flugzeugverwendung herbeizuführen. Eine sich abzeichnende Hauptlinie dabei ruht auf der Beobachtung, dass man künftige Messflugzeuggenerationen für eine volldigitale, autogeoreferenzierte Photogrammetrie in einer Weise verwenden werden kann, wie sie sich schon sehr früh mit der Methode der Luftbildarchäologie herausgebildet hat.

Es wird betont, wie wichtig die kohärente Aus- und Weiterbildung, sowohl am Instrument Fernerkundungsflugzeug als auch am Forschungsgegenstand, unserer Kulturlandschaft selbst ist. Dabei wird hervorgehoben, wie unverzichtbar es künftig sein wird, Umwelteinrichtungen in einem gewissen Rahmen mit eigener Primärdatenerhebungskapazität auszustatten. Dieser Sichtweise liegt die Forderung zugrunde, sowohl die methodische Prozesskontrolle als auch den Kontakt zum Forschungsmedium Landschaft herzustellen, zu erhalten und dauerhaft zu festigen.

2 Allgemeine Modellvorstellung zur Technologiefortschreibung

Um technische Entwicklungs- und Anwendungspotentiale berücksichtigen und bei einer Entwicklung „from scratch“ ausschöpfen zu lernen, benötigt man eine Vorstellung darüber, wie diese Potentiale zustande kommen, an welche Einflussgrößen sie geknüpft sind und wie sie sich anhand der historischen Realität in zeitlicher Relation zueinander verhalten. Diese „Differentialdiagnostik“ (in direkter Anlehnung zum medizinischen Begriff) ist innerhalb der Technik beim Zusammenspiel von lediglich vier komplexen Maschinen- bzw. Bauelementgruppen bereits eine rein formal nicht mehr zu lösende Aufgabe. Oder anders ausgedrückt: Es existiert keine objektive „Auswahlmathematik“, die es erlauben würde, Instrumente fehlerfrei und ohne Expertenwissen nahtlos miteinander zu verknüpfen. Erheblich verschärft wird heute das Problem durch die zunehmende Integrations- und Leistungsdichte in unserer digitalen Infrastruktur. Interessant und beruhigend zugleich ist jedoch sich vor Augen zu halten, dass die enorme Steigerung in Leistung und Integration nicht zuletzt auf einem einzigen simplen Grundprinzip beruht: der konsequenten Anwendung des Prinzips vom Ersatzschaltbild in Verbindung mit linearer Extrapolation. Was bedeutet das? Man zerlegt ein zu lösendes technisches Problem in endliche Arbeitsschritte und Teilkomponenten (Module), die weitgehend unabhängig voneinander gelöst werden können. Die Arbeitsabläufe werden in Algorithmen für die einzelnen Module umgesetzt (d. h. physisch in entsprechende Form gebracht oder softwaretechnisch durch Programmierung gelöst). Ausschließlich hier wird höhere Mathematik und ein solides Fundament in theoretischen Konzepten in sämtlichen Ausprägungsformen benötigt. Dabei verständigt man sich in beliebig großen personellen Netzwerken prinzipiell im Black-Box-Modus, d. h. jede Personaleinheit weiß um die fachlichen Probleme des jeweiligen Nachbarn (Zuarbeiter oder Abnehmer) lediglich bis zur gemeinsamen Schnittstelle, der benötigten bzw. zu liefernden Input- oder Outputinformationen. Allgemein ausgedrückt basieren unsere gesamte Industrialisierung und jede beliebige moderne Maschine oder Apparat auf dieser Vorgehensweise. Das Zusammensetzen der Teilmodule zur Konstruktion einer komplexen Maschine kann man als „technische Integration“ auffassen (in direkter Analogie zum „Integrierten Schaltkreis“, kurz IC, durch den die Elektronik seit Mitte des 20. Jhs. eine enorme Beschleunigung erfahren hat). Die Komplexität dieser Anwendung hängt direkt ab von Anzahl und Leistungsfähigkeit der verwendeten Module. In Analogie zu den russischen Spielzeug-Stapelpuppen (Matroschkas) nenne ich diese Komplexität auch gerne „Stapeltiefe“, weil man sich systemanalytisch gedacht immer vor Augen führen sollte, woher die Module stammen, wie sie miteinander verknüpft sind und worin letztlich deren isolierter Systemzweck bei der Einzelbetrachtung besteht. Bis hierher ist die Welt hochlinear und bezüglich jeder Gruppe von schaffenden Ingenieuren relativ überschaubar. Interessant wird es erst, wenn man sich der Frage aussetzt, inwieweit sich Modulgruppen („integrierte Maschinen/Apparate“) rückwirkend wieder in andere Untergruppen zerlegen lassen, um so zu neuen Funktionalitäten des Gesamtsystems zu gelangen oder aber Systemeigenschaften durch Teilübertragung auf andere Anwendungsbereiche zu vererben. Diese Frage bezeichnet den mittlerweile riesigen Komplex des „Re-(verse) Engineering“. Auf industrieller Ebene gedacht bildet dies sowohl Grundlage für industrielle Modellpflege als auch sämtliche Neuweiterentwicklungen und Erschließung neuer Absatzmärkte. Das für wissenschaftliche Methodenforschung so wichtige Prinzip der Übertragbarkeit bedeutet also unter allen

Umständen die Frage nach dem „Definiertheitszustand“ der In- und Outputbeziehungen aller verwendeten Module.

Man muss sich lediglich die gewünschte Gesamtleistung in Abhängigkeit des Informationsflusses oder Energieflusses durch ein (technisches) System vor Augen führen, um die Einzelmodule miteinander in geeigneter Weise zu verketteten. Dies ist ohne Anpassung oder Kalibrierung nicht möglich. Das Prinzip selbst gilt jedoch universell und ist sowohl für mechanische Maschinen als auch für Softwareentwicklung anwendbar. Die Betrachtung in genormten Modulkategorien gewinnt darüber große Bedeutung, da hier die Schnittstellen in eineindeutiger Weise vorgegeben sind.

Jede beliebige technische Aufgabenstellung wird heute nach diesem Schema – ob bewusst oder unbewusst – unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen abgearbeitet. Ein sich allmählich abzeichnendes Problem dabei ist die Fülle an Funktionalitäten in integrierten Anwendungen, für deren Analyse der Schlüsselfunktionalitäten man einige Zeit benötigt (Expertenwissen!). Hierbei – und das ist wesentlich – kommt es darauf an, durch systematische Vergleichsbetrachtungen in einem Gesamtgefüge Strukturbrüche zu entdecken, Schlüsselmodule zu identifizieren und neu auf eigene Fragestellungen zu übertragen. Strukturbrüche zeichnen sich u.a. durch folgende Merkmale aus:

- Technologiesprünge (ungewöhnlich hohe Leistungssprünge im Rahmen gewohnter Theoriefortschreibung oder allgemein erwarteter Entwicklung)
- Durchdringungsrate (das Ausmaß und die Geschwindigkeit, mit der „neue“ Technologie gleichartige Anwendungsgebiete erobert)
- Neuerschließungsrate (die Geschwindigkeit, mit welcher bislang unbekannte Anwendungsbereiche erobert werden bzw. werden können)

Strukturbrüche lassen sich durch systemanalytische Vergleiche finden. Ich spreche in diesem Kontext von „strukturellen Vergleichen“. Eine standardisierte Methode, strukturelles Vergleichen in entsprechende Handlungsanleitungen umzusetzen, gibt es nur in sehr begrenztem Maße: Was funktioniert, lässt sich lediglich durch historische Vergleiche bzw. mit Hilfe eigener Experimente ermitteln. Hierbei spielen absolute Zahlenvergleiche eine grundlegendere Rolle als Trenddiskussionen, die an relative Vergleichsmaßstäbe geknüpft bleiben. Das anzustrebende Ziel jeder kausal-analytisch abzuleitenden wissenschaftlichen Fragestellung sollte daher stets in einer Quantifizierung (rationaler) Ordinaldaten sein, am besten unter Angabe eines absoluten Bezugspunktes („natürlicher Nullpunkt“) oder der jeweiligen Auflösungs-grenze einer Methode („Gültigkeitsbereich“).

Absolutbelege bergen in unserer heutigen mediendominierten Welt einen problematischen Kern in sich, da das verbrieft Expertenwissen einer empirischen Überprüfung aus Zeit- und Aufwandserwägungen in den allermeisten Fällen nicht mehr unmittelbar unterzogen werden kann. Auf der Individualebene betrachtet stellt dabei jede beliebige Art konstruktiven Schaffens im Rahmen technischer Entwicklung nur in einer einzigen Hinsicht ein Problem dar: Man muss in der Lage sein, „fremde“ Module auf ihre Wirksamkeit bzw. Aussagekraft hin zu untersuchen und zu verstehen. Auf Ebene einer Organisation jedoch fängt dieses „Übertragungsproblem“ an, relativ schnell kritisch zu werden, da es per se keinerlei Regeln, Auswahlkriterien oder katalogisierte Gefügestruktur dafür gibt, wie weit man als

Gruppenelement die Betrachtung auf verschiedene, soziologisch geprägte „Wirklichkeiten“ (Horizontal-Analyse) ausdehnt und bis zu welcher „Modulebene“ man vordringen (Vertikal-Analyse) kann oder möchte.

Einem weiteren Hindernis begegnet man immer dann, wenn bei einem kleineren Modulübertrag Anpassungen notwendig werden und Modulgrenzen zum Zwecke der Neudefinition überschritten werden müssen. In solchen Fällen ist es hilfreich die sich dabei ergebenden Vorteile zu quantifizieren: man bestimmt dabei den „Inneren Wert“ eines Systems.

In einer homogenen Gruppe, die sich denselben Zielen unterordnet, mag das bereits ein Balanceakt sein. Spätestens im – normalerweise anzutreffenden! – Falle inhomogener Gruppen mit unterschiedlichsten Teilorganisationsformen und -ausrichtungen, evtl. zudem räumlich getrennt, wird so ein „Modulübertrag“ zur handfesten Herausforderung.

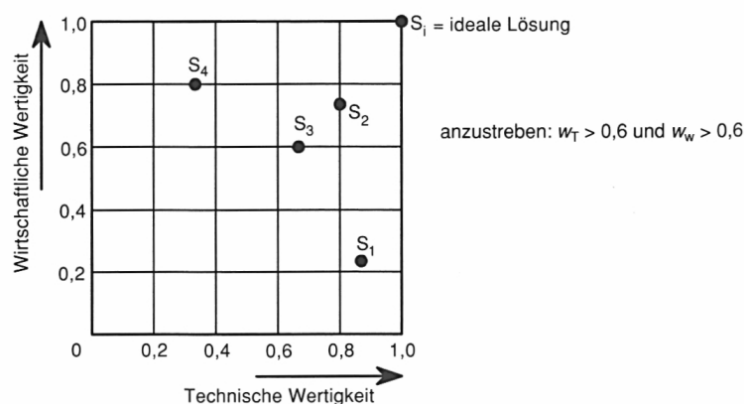


Fig. 1 Das angeführte Konzept vom „inneren Wert“ wird bei den Ingenieuren im sog. „technischen Stärke-Diagramm“ ausgedrückt: Der Punkt S_i ist die Ideallösung, um den sich die Aufmerksamkeit der Entwickler dreht. Dieser Punkt ist in den meisten Fällen bekannt oder kann zumindest erahnt werden („Grenze des Machbaren“; End-of-pipe; High-end etc.), S_1 ist das technisch hochwertige, jedoch teurere Produkt, S_4 ist das preiswerte Konkurrenzprodukt für den Massenmarkt und der Weg von S_3 nach S_2 die einzuschlagende Zielrichtung einer zukunftsfähigen Produktentwicklungsstrategie, da S_2 das wirtschaftlich ausbalancierte Produkt darstellt. In einer idealisierten und vereinfachten Welt bewegen sich demzufolge in rollenspezifischer Weise Unternehmen längs der Winkelhalbierenden des Koordinatenkreuzes in Richtung S_i , Wissenschaftler und Forschungsunternehmen y-achsenparallel in Richtung „Hochleistung“ nach rechts, und der Endkunde x-achsenparallel nach oben in Richtung „Preis-Leistungs-Optimum“; Abb. aus: (Conrad, 2004)

Innere Werte von Teilmodulen sind sehr schwer bestimmbar. Wer sich jedoch zutraut, die inneren Werte ganzer Systeme und Subsysteme zu analysieren, der gewinnt nach einiger Übungszeit einen unschätzbaren Vorteil: Er versteht die Gesamtmarktdynamik in all ihren zyklischen Ausprägungsformen, unabhängig von eigenen subjektiven Präferenzen oder Fremdmeinungen. Wie noch zu zeigen sein wird, gelingt es heutzutage nur noch bedingt, aus unterschiedlichen Perspektiven heraus zu einer Ableitung derselben inneren Werthierarchien zu gelangen. Unglücklicherweise bleibt nämlich trotz des röntgenähnlichen Durchleuchtens sämtlicher in Frage kommender Einflussparameter dabei das Auswahlproblem für die zu verwendenden Module erhalten. Geknüpft daran ist die „technische Maßstabsebene“, auf der man sich bewegen will, kann bzw. darf. Sinnvolle technische Entwicklungen setzen ein gewisses Augenmaß bei der Ausdimensionierung von integrierten Lösungen voraus. Die Bestimmung der Kosten-Leistungs- und Nutzen-Relation ist nur durch erfahrungsbasiertes Expertenwissen zu lösen – im Grunde genommen ein rein subjektiver Vorgang. Durch das Prinzip des Ersatzschaltbildes kann man jederzeit auf „fremdes“ Expertenwissen

zurückgreifen, indem man Fremdmodule überträgt. Im Prinzip ist dies heute in allen Lebensbereichen unumgänglich, jedoch ist eine kritische Größe bei der systemanalytischen Betrachtungsweise diejenige Überkapazität an Funktionalität, die man in fremdbürtigen Modulen bei der Übertragung ungewollt bzw. ungefragt mitgeliefert bekommt. Meistens sind daran nämlich weitere Regelkataloge („Randbedingungen“) gebunden, die oftmals zu unerwünschten Effekten oder Beschränkungen führen können.

Das Verständnis der fremdbürtigen Modulkapazität und der dabei zugrunde liegenden Entwicklungsstrategie ist eine der wesentlichen Zeit- und Aufwandsgrößen bei der Entwicklung „integrierter Lösungen“.

Den Prozess des Verstehens der Modulkapazitäten, die Verifikation der Handhabbarkeit, Übertragbarkeit und spezieller (unvorgesehener) Wechselwirkungen im eigenen Anwendungsumfeld nennt man „Reengineering“. Diese Vorgehensweise bestimmt heute den Entwicklungsalltag im Industriebereich maßgeblich. Das Zusammenfassen modularer Einheiten beruht letztlich auf nichts anderem als systematischer, extrapolativer Vergleichsanalyse mit empirisch-experimenteller Befundauswertung.

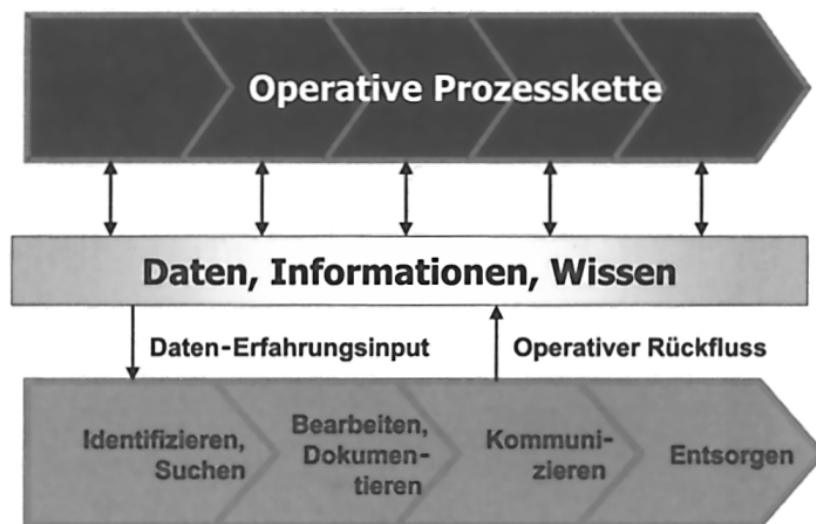


Fig. 2 „Wissensschöpfung erfolgt parallel zum operativen Geschäft.“ (aus einem Konstruktionstechnik-Handbuch; (Conrad, 2004))

Zweifelsohne werden heute einige Markttrends innerhalb der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik auf diesem Weg gefunden: z. B. Kombination von Mobiltelefon und Digitalkamera, Autoradio und Navigationssystem, DVD-Spieler und CD-Brenner in einem Gehäuse usw. – diese Auflistung könnte man beliebig verlängern. Die Komplexität von technischem Gerät lässt sich somit – analog zu den Bestimmungsschlüsseln in der Biologie – auch vereinfachend als Schar dichotomer Verzweigungsbäume auffassen.

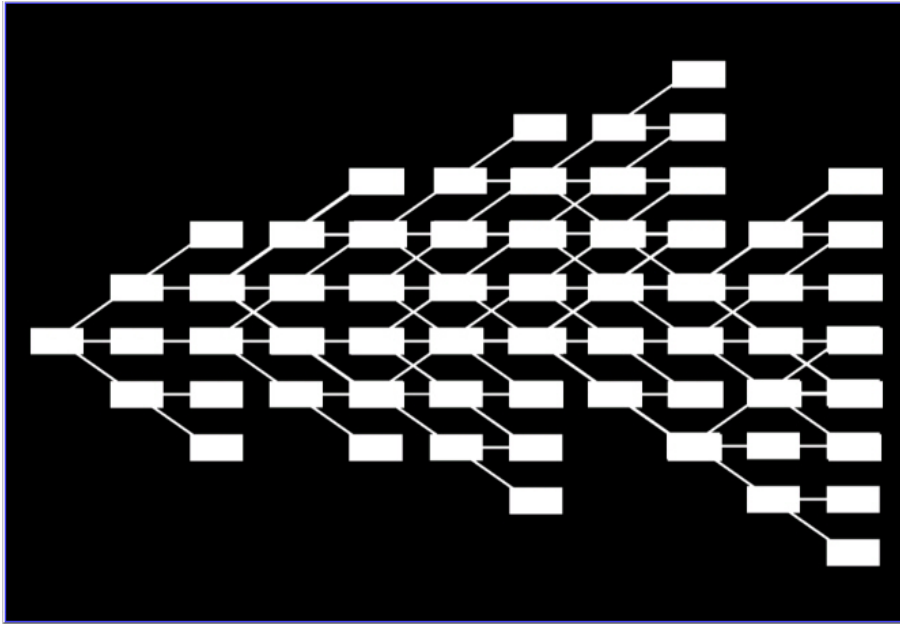


Fig. 3 Dichotomie der Technologieentwicklung

Aus zwei technischen Grundeinheiten A und B wird eine neue Anwendung für Einsatzzweck C abgeleitet. Dieses allgemeine Prinzip durchdringt unsere gesamte Technosphäre sowohl auf methodischer als auch (fertigungs-)technologischer Ebene – nur mit unterschiedlichen Ausprägungsgraden. Industrielles Reengineering wird heute zwar in großen organisatorischen Einheiten, jedoch meist über homogenen inhaltlichen Applikationsfeldern betrieben. Besondere Herausforderungen ergeben sich dann, wenn in Organisationseinheiten übergreifend gesteuert und modular regroupiert werden soll. Was passiert dabei? Der an sich technologisch übersichtliche, binäre Verzweigungsbaum von linearen Teilextrapolationsmöglichkeiten wird unübersichtlich, wenn unterschiedlicher Sprachgebrauch, andere Gewichtung oder (unternehmens-)kulturelle Unterschiede aufeinanderprallen. Kontextsensitive Teile des technologischen Gewebes werden in ihrem Gesamtzusammenhang durch Bedeutungsverschiebung verwischt oder aus strategischen Erwägungen heraus willkürlich verschleiert (durch Verschweigen oder Irreführung). Zu dieser archetypischen menschlichen Verhaltensweise gesellt sich ein natürliches – der Allgemeinheit zunehmend bedrohlicher erscheinendes – Phänomen: Obwohl die physikalisch-technischen Grundlagen der von Produktzyklus zu Produktzyklus „weitervererbten“ Eigenschaften im Einzelnen überschaubar und eindeutig nachvollziehbar sind, werden die Modulketten langsam aber sicher so lang, dass dem Einzelnen die historischen Haupteinflusskomponenten zumeist verborgen bleiben und sich die Modulabhängigkeiten einer eigenen Überprüfung und Bewertung selbst dann entziehen, obwohl eine eingehendere Analyse ausdrücklich angebracht oder erwünscht erscheint. Der Effekt tritt im Allgemeinen umso schärfer hervor, je weiter auseinander liegend die technisch-naturwissenschaftlichen Grunddisziplinen der verketteten Module erscheinen, oder anders ausgedrückt, je mehr „Dichotomien“ ineinander geschachtelt vor einem Betrachter als monolithischer Block liegen.

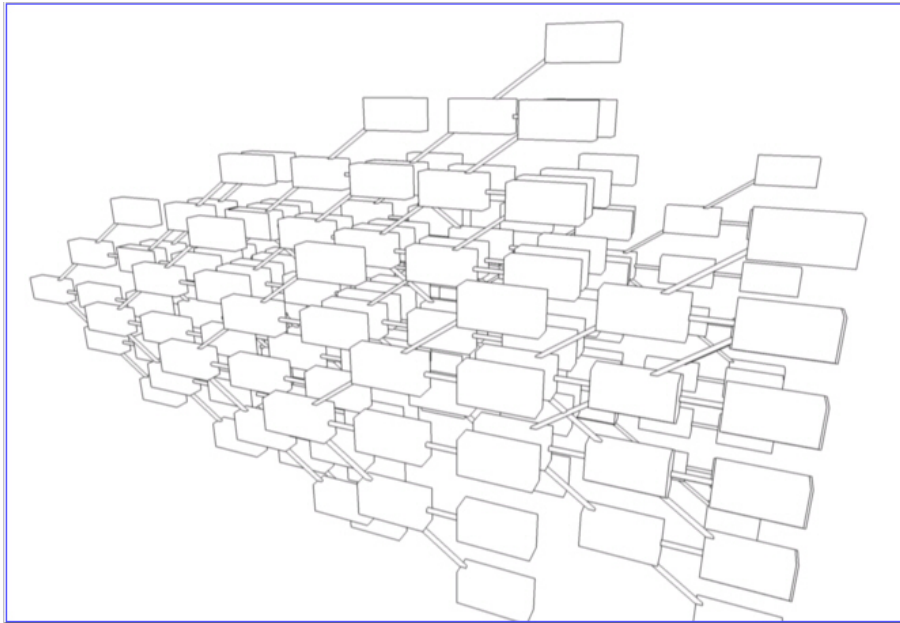
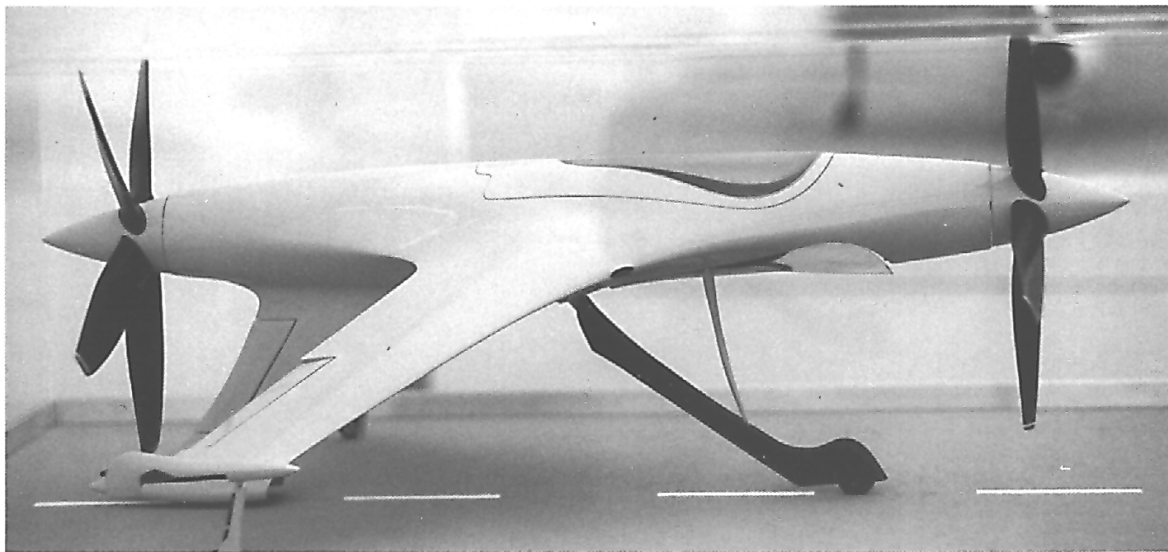


Fig. 4 Verschachtelung von Dichotomien zu „integrierten Anwendungen“ (Zeitstrahl nach rechts)

Um diese theoretischen Überlegungen ein Stück weit zu konkretisieren, diskutieren wir zum Abschluss dieses Einführungskapitels ein anschauliches konstruktiv-mechanisches Beispiel: es handelt sich dabei um eine Designstudie für ein Hochgeschwindigkeits-Propellerflugzeug. Der vorgestellte Entwurf stammt aus den späten Sechzigerjahren und aus der Feder des bekannten deutschen Industrie-Designers Luigi Colani. Anhand der nachfolgenden Abbildung sind einige Modulübertragungen zu identifizieren und es ist abzuschätzen, inwieweit ein solcher Entwurf Aussicht auf erfolgreiche Umsetzung verspricht. Die „C309“ (in direkter Anlehnung an die „Me209“ (Käsmann, 1999), einem der verbreiteten „Me109“ ähnlichen Propellerflugzeug, mit dem kurz vor Beginn des Zweiten Weltkrieges ein Geschwindigkeits-Weltrekord von 755,136 km/h aufgestellt worden war (1. Modulübertrag) „Pontresina“ von 1969 erinnert mit ihrem Zug- und Druckpropeller vom Entwurf her an das schwere deutsche Jagdflugzeug Do335* aus dem Jahre 1943 (2. Modulübertrag) und von der Flügelgeometrie an den britischen Hawker (BAe) Harrier-Senkrechtstarter aus dem Jahre 1966 (3. Modulübertrag). Fünfblatt-Propeller dagegen wurden auf diversen militärischen Einsatzflugzeugen der Nachkriegsära geflogen, z. B. der Hawker Typhoon, Supermarine Spitfire, Supermarine Spitful und Hawker SeaFury etc. (4. Modulübertrag).

* Wie die Modulüberträge zustande kommen, ist nicht immer so offensichtlich wie in diesem Fall: Weltweit gibt es nur sehr wenige Flugzeuge mit rumpfseitiger Anordnung von Zug- und Druckschraube. Spontan fallen nur die besagte Do335 „Pfeil“, sowie die Cessna 337 „Skymaster“ ein, wobei sich letztere als Hochdecker mit Gabelschwanz-Leitwerk für einen direkten geometrischen Vergleich disqualifiziert.



Colani C 309 (1969)

Fig. 5 Die C309 „Pontresina“ – ein Entwurf für ein winziges Hochgeschwindigkeitsflugzeug in ungewöhnlicher Pfeilform; aus: (Käsmann, 1999)

Zunächst erkennt man auf dem Foto ein Flugzeug mit einer sehr eleganten Linienführung, das „schnell“ aussieht: Der Rumpf-Flügelübergang ist sanft, die Pfeilung des Tragflügels ist sehr groß, die negative V-Stellung des Tragflügels verspricht hohe Rollgeschwindigkeiten um die Längsachse und die nahtlose Rumpf-Hauben-Linie ein Minimum an schädlichem Widerstand. Nur um jede Verirrung auszuschalten: Der rechte Propeller zeigt in Flugrichtung – das ist erkennbar an der Anordnung der Ruderflächen, die sich seit ihrer Erfindung stets im Windschatten von Tragflächen und Steuerflossen befinden. Es war vorgesehen, einen bäuchlings liegenden Piloten (5. Modulübertrag: auf dem Bauch oder Rücken liegende Piloten widerstehen dreimal höheren g-Belastungen als sitzende) in dem spindelförmigen Rumpf unterzubringen, der aus einem GFK-umkleideten Titanrohrgerüst bestehen sollte (6. Modulübertrag: Titan als „Wunderwerkstoff“ der zu jener Zeit aufkeimenden Raumfahrt-Industrie) und mit oben und unten bündig eingelassener Verglasung ausgestattet werden sollte. (Käsmann, 1999)

Die interessante Neuerung betrifft die Anordnung der Seitenleitwerksflosse nach unten, die zugleich als Hauptfahrwerksausleger fungiert – würde man das Flugzeug so bauen, könnte man wertvolles Strukturgewicht einsparen, da zwei wesentliche Funktionen in einem einzelnen, größeren Bauteil vereint würden (Fahrwerkseigenschaft und aerodynamische Richtungsstabilität). In Übereinstimmung mit einigen Düsenflugzeugen (z. B. Hawker Hunter, Supermarine Swift, Suchoj-7, MiG17, MiG19, F-101 „Voodoo“, F-104 „Starfighter“) sollte das Bugrad nach vorne eingeklappt werden (7. Modulübertrag), allerdings mit dem kleinen Unterschied, dass es vollständig ausgefahren nicht den typischen Winkel von 90° zum Flugzeugrumpf bildete, sondern länger mit einem eleganteren Winkel um die 45° ausgeführt war. Die Stützstrebe an diesem Bugfahrwerksausleger verrät im vorliegenden Bild, dass es sich hierbei um ein Modell oder aber wenigstens um eine Attrappe des Entwurfs handeln muss, denn es fehlen die sonst aus dem Flugzeugbau typischen Gelenkverbindungen, Hydraulikschläuche oder irgendetwas, das auf bewegliche Mechanik hindeutet. Dass der Ausleger einziehbar geplant ist, erkennt man an der kleinen Klappe auf der Rumpfunterseite, unter der das Bugrad verschwinden soll. Doch wie könnte man die C309

am Boden lenken? Es verbietet sich wegen der Flügelstützräder, das hintere Hauptfahrwerksrad anzulenken. Das vordere Rad jedoch erscheint ebenso wenig prädestiniert dafür zu sein, weil man die Steuerstangen für eine Radanlenkung quer durch den gesamten Ausleger führen müsste, was ihn entweder schwer, groß und/oder in seiner baulichen Ausführung zumindest aufwändig und damit teuer werden ließe. Die vergleichsweise großen Spaltabstände zwischen Rumpf und Haube sowie zwischen den Rudern und den (Trag- bzw. Steuer-)Flächen verstärken den Eindruck eines Modells, wobei nicht bekannt ist, in welchem Maßstab dieses Modell gebaut war. Die C309 sollte von zwei je 180-PS-leistenden NSU-Wankeltriebwerken angetrieben werden (Käsmann, 1999).

Wankeltriebwerke versprechen aufgrund ihrer allgemein schlankeren Bauform einen geringen Stirnwiderstand und tragen damit per se zu einer Verbesserung der stromlinienförmigen Auslegung eines Rumpfes bei. (8. Modulübertrag: ein innovatives und für damalige Verhältnisse sehr progressives Antriebskonzept). Jedoch ist es nach einer einfachen „Common-Sense“-Analyse einsehbar, dass im Falle der C309 das dieses Antriebskonzept den wesentlichen Anstoß zur Kritik liefert. Es sind keine ausreichend dimensionierten Ein- und Austrittsöffnungen für Kühlluft erkennbar. Der winzige Einlass an der Flächenwurzel dürfte keinesfalls für eine wirksame Kühlluftzufuhr ausreichen. Wo bliebe die im Rumpfinnenen erwärmte Luft? Die Propellerauslegung impliziert eine Fluggeschwindigkeit weit jenseits von 700-km/h, einem Fluggeschwindigkeitsbereich, in den nur Hochleistungspropellermaschinen vordringen können. Es ist allerdings unmöglich, Verbrennungsmotoren mit hohen Dauerdrehzahlen, die für solche Geschwindigkeiten notwendig wären, ohne erhebliche Frischluftzufuhr und Abführung der entstehenden Wärme zu betreiben.

Weiterhin lässt sich anhand der sichtbaren Haubenverglasung eine Abschätzung zur Größe des Rumpfes liefern. Bei GFK-Flugzeugen sind die Haubenverglasungen typischerweise etwa so lang wie der Oberkörper eines sitzenden oder liegenden Piloten. Bei der Pontresina muss der Pilot beim Einstieg seine liegende Haltung bei geöffneter Haube einnehmen können. Die Haube klappt ganz offensichtlich über ein hinten liegendes Scharnier nach vorne oben auf (9. Modulübertrag: Das erleichtert einen Haubennotabwurf.). Um also einen durchschnittlichen Menschen von 1,80 m Größe in diesen Rumpf hineinzubekommen, bedarf es schätzungsweise einer Rumpfeinstiegsöffnung von wenigstens 1,2 – 1,5 m Länge und 0,8 m Breite. Das wiederum bedeutet jedoch, dass der gezeigte Rumpf nicht wesentlich länger als 3,5 – 4,0 m lang sein dürfte und sich innerhalb dieser Rumpflänge also zwei mindestens 0,75 m lange Triebwerke in Reihe mit einem 1,80 m großen Menschen anordnen. Der Propellerkreisdurchmesser würde dann übliche 1,5 – 1,6 m betragen. Darüber hinaus müssten in dieser sequentiellen Anordnung noch ein komplettes Instrumentenbrett und alle notwendigen Steuerarmaturen Platz finden. Bei sehr gutem Willen kann man nun unterstellen, dass die Flügel einen Großteil der Benzintanks aufnehmen. Die Flügelspannweite, die man etwa mit 5 – 8 m veranschlagen könnte, wird sicherlich nicht über die gesamte Länge, sondern bis etwa zu den Querrudern mit Tanelementen ausgestattet sein – wobei die unterhalb der Triebwerke angeordneten Tanks für sich alleine betrachtet schon als konstruktiv unelegant eingestuft werden müssten. Es ist i. A. ungünstig, Treibstoffe entgegen der Schwerkraft zu den Triebwerken zu pumpen, da bei einem Ausfall der Pumpen die natürlich verfügbare Ansaugleistung eines laufenden Triebwerks zusätzlich behindert statt marginal unterstützt werden würde. Wenn wir nun vereinfachend annehmen, dass diese Tankkammern rechteckige Bauelemente in diesen Flügeln wären, dann ließe sich etwa ein Volumen pro Seite von etwa 1,5 m x 0,4 m x 0,1 m (L x B x H) annehmen, was 0,06 m³ oder 60 Liter pro Fläche entspricht. Wankeltriebwerke standen bislang in dem Ruf, leicht höhere

Verbrauchswerte aufzuweisen als konventionelle Kolbenriebwerke. Für schnelldrehende Hochgeschwindigkeits-Motoren dürfen wir gegen Ende der 60er Jahre mit Sicherheit 25 Liter/Flugstunde und mehr ansetzen. Das ergäbe im besten Falle 2,4 h Flugzeit abzüglich einer gewissen Reserve. Für ein zweimotoriges Flugzeug ist dies eine ungewöhnlich niedrige und auf den ersten Blick unwirtschaftlich erscheinende Flugdauer.

Wie verhält es sich mit der dynamischen Stabilität des Flugzeugs? Es fehlt augenscheinlich ein Höhenruder. Die (sinnvollerweise baugleichen) Triebwerke werden ganz vorne und ganz hinten im Rumpf liegen, weshalb hier ein gewisses Hebelgleichgewicht angenommen werden kann. Allerdings sieht der Flügel-Einstellwinkel zwischen Rumpf und der Profilhöhe der Tragfläche sehr klein aus – man kann sogar den Eindruck gewinnen, er sei leicht negativ. Nun liefern jedoch die meisten Tragflügelprofile ihre besten Auftriebswerte im Bereich um $12 - 15^\circ$ und leicht positive Einstellwinkel um $1-3^\circ$ sind die Regel. Es wäre also die Frage zu klären, ob und v. a. wie dieses Flugzeug überhaupt vom Boden abheben würde.

Wie würde umgekehrt eine Landung verlaufen? Zwar sieht es auf dem Bild erfreulicherweise so aus, als ob die drei hinteren Auflagepunkte fast auf derselben Linie lägen und die Propellerblattspitzen einen gewissen Schutz vor Bodenkontakt durch die Seitenleitwerksflosse genießen. Jedoch fehlen sowohl Landeklappen als auch auftriebserhöhende Anflughilfen, weshalb die Landegeschwindigkeit unangenehm hoch sein dürfte – für einen Strömungskörper dieser Formgebung schätzungsweise um die 170 bis knapp unter 200 km/h. Stellen wir uns dies einmal mit einem liegenden Piloten vor, der in einem flachen Bahnneigungsflug (also faktisch kopfüber, da er den Kopf nicht über das Niveau der oberen Rumpflinie anheben kann!) auf eine Landebahn mit dieser hohen Geschwindigkeit zusteuert. Das sanfte Aufsetzen dürfte sich schwierig gestalten, da der Pilot keine Seitenfenster zur Verfügung hat, um einen prüfenden Blick links und rechts zum Horizont zu richten, damit das Flugzeug ohne Querneigung aufsetzen kann. Gleichzeitig und dringlicher müsste der Pilot seine Flughöhe über Grund mitverfolgen, um sanft aufzusetzen zu können. Aufgrund seiner Lage im Rumpf ist beides zugleich nur schwerlich denkbar. Was würde weiterhin passieren, wenn das Fluggerät bei der Landung mit einem sog. Schiebeflugzustand (Flugzeuglängsachse und Bewegungsvektor verlaufen nicht parallel) Bodenkontakt erfahren würde? Würden die Flügelstützräder wegnicken?

Alles in allem kann man in erster Näherung und aufgrund nur eines einzigen Bildes mit nur spärlichen Zusatzangaben festhalten: Die Pontresina ist ein elegant aussehender, funktional jedoch sehr grober Entwurf, bei dem nach einem ersten näheren Hinsehen ohne eine einzige Zeile Konstruktionsanalytik und ohne einen einzigen experimentellen Befund erhebliche Zweifel an der Ausgewogenheit bzw. prinzipiellen Machbarkeit aufkommen. Das Flugzeug sieht gut aus, ist allerdings so wie auf diesem Bild dargestellt einfach nicht sicher genug steuerbar und damit flugfähig. Es erscheint angesichts der Kabinenauslegung weiterhin fraglich, ob eine Modellüberarbeitung eine deutliche Verbesserung in der ergonomischen Auslegung zulassen würde. Die wirtschaftlich-technische Wertigkeit der Maschine kann deshalb in erster Näherung als niedrig eingestuft werden. Der angestrebte Systemzweck (Geschwindigkeit) dürfte die damit verbundenen technischen Risiken bzw. designspezifischen Nachteile nicht aufwiegen. Die zugrunde gelegten Proportionen stimmen nicht mit dem Entwurfsziel überein.

Es verwundert daher nicht, dass dieses Flugzeug bislang nicht realisiert wurde und bis heute kein fliegender Prototyp davon existiert (Käsmann, 1999).

Das Beispiel wurde ausgewählt, um angesichts seines futuristischen, ungewohnten Anblicks zu demonstrieren, dass man durchaus einige wohlbekanntere Merkmale vorhandener Konstruktionen darin wieder zu entdecken – und damit direkt zu vergleichen – vermag. Außerdem kann daran exemplarisch „technisch-konstruktives Denken“ in einem Gesamtprojektrahmen aufgezeigt werden. Das Beispiel zeigt einerseits, dass Kritik und weiterführende neue Fragen bzw. Aspekte oft nahe beieinander liegen. Andererseits zeigt es auch die unvermeidbare Unschärfe von Grenzziehungen innerhalb der gedanklichen Kommunikation auf: die angesprochenen Modulüberträge ließen sich auch durchaus anders bewerten und zählen. Die einzig relevante Frage hierbei ist, wie rasch und zielsicher man zu einer praxistauglichen Modellvorstellung gelangt.

In allen technischen Konstruktionen lässt sich dennoch mittels dieser vergleichenden Betrachtungsweise wie in offenen Büchern lesen. Es ist keineswegs auszuschließen, dass ein Pontresina-ähnliches Flugzeug eines Tages fliegen könnte. Jedoch geht aus dem Gesagten und relativ simplen Überlegungen hervor, dass sich dies nur durch erhebliche strukturelle Verbesserungsmaßnahmen realisieren ließe. Die drei mit Abstand wichtigsten Bemühungen würden sich im vorliegenden Fall auf die aerodynamische Gesamtkonzeption, das Platzangebot im Rumpf und die ergonomische Unterbringung des Piloten zu richten haben.

Wie man anhand der geführten Diskussion sehen kann, rührt die Kritik an dem Entwurf daher, dass man Bekanntes aus einer irgendwie gearteten „Bibliothek“ an Faktenwissen und verketteter Überlegungen zieht, einzelnen beobachtbaren Details gegenüberstellt und jeweils kleine Effekt-Bilanzierungen darüber anstellt, weshalb man dabei von einem „schließenden Vergleichen“ sprechen könnte. Die resultierenden Betrachtungsschwerpunkte und zu bestimmenden Betrachtungsgrenzen sind zunächst relativ frei wählbar. Jedoch muss, um die Kritik in eine sachliche Form überführen zu können, der Prozess so eingerichtet werden, dass er iterativ auf quantifizierbare Betrachtungszustände hin konvergiert. Im besprochenen Beispiel würde man wahrscheinlich Ketten von 200 oder 500 Detailableitungen bilden, ehe man sich dazu entschließen würde, den Entwurf im Windkanal oder an einem fliegenden, technischen Modell auf eine empirische Basis zu stellen, sofern dies nach einer solchen eingehenderen Verfeinerungsanalyse dann noch als erstrebenswert erschiene.

Diese Methodik des Denkens mittels schließender, struktureller und iterativ beständig feiner herausziselierender Vergleiche lässt sich in der Tat auf nahezu alle Themengebiete übertragen. Der Historiker Hans Delbrück (1848 – 1929) nannte dieselbe Vorgehensweise „Sachkritik“ und verwendete sie als Geisteswissenschaftler zum Beginn des 20. Jh. für zahlreiche unorthodoxe Neubewertungen antiker Quellen der Geschichtsschreibung, wie dies von keinem anderen vor ihm bewerkstelligt wurde. „Ausgeprägtes Interesse an Zahlenangaben in der Geschichte“, seine „gelegentlich wilde Komparatistik“ und seine bis dahin nicht gesehene obsessive Leidenschaft und ein feines, natürliches Gespür dafür, bekannte Sachverhalte aus der jüngeren, besser verstandenen Vergangenheit und der persönlichen Erfahrung auf weit in der Historie zurückliegende Ereignisse (unter Berücksichtigung der sich stetig verändernden technischen Möglichkeiten) zu übertragen, führten dazu, einige unangefochtene historische Quellen – teils erheblich nach unten – zu korrigieren, so beispielsweise Herodot, Polybios, Livius und Cäsar. (H. Raulff im Vorwort zu Delbrück, 2003)

Ein neu hinzu(ge)kommen(d)es Phänomen unserer Zeit besteht darin, dass wir uns zunehmend mit Technik auseinanderzusetzen haben, die ihre Leistung auf eine nicht mehr direkt sichtbare mechanische oder beobachtbare Weise entfaltet – die Rede ist namentlich von

Software und ihrer Integration in eine gut erschlossene, mechanische Welt. Hier sind Nutzwert-Diskussionen im Sinne der oben beschriebenen technischen Stärke nicht mehr ganz so einfach zu führen.

3 Problemstellung und Thesen

Optische Fernerkundung ermöglicht durch ihre einzigartige geometrische Perspektive eine integrative Zusammenschau der Landschaft, ihrer Kompartimente und deren Einzelemente. Sie ist geeignet, landschaftliche Entwicklungszustände, deren räumliche Veränderungsmuster und (über die Kunst der Luftbildinterpretation) deren Dynamik auf einer Ebene zu erfassen, die jenseits der Möglichkeiten liegen, die einem Betrachter im Gelände zur Verfügung stehen. Optische Fernerkundung erschließt den perspektivisch sichtbaren Teil der Landschaft unmittelbar. Sie besitzt demzufolge für jemanden, der sich einen Überblick in einem Landschaftsausschnitt verschaffen möchte, mindestens den direkten Gebrauchswert von Geländeskizzen, leistet jedoch insofern mehr, als sie auf Informationsverluste durch Generalisierung verzichtet. Fernerkundung ermöglicht daher die Überführung von Landschaft in bildhafte Modelle eines wesentlichen Teils unserer umgebenden Wirklichkeit, nämlich der des Gesamtraumes. Photogrammetrie erlaubt die Überführung von Einzelluftbildern in geocodierte Form zu kartographischen Darstellungsäquivalenten (Orthophoto, Orthomosaik oder Luftbildplan). Die Beschränkungen der Zentralperspektive werden dabei mittels aufwändiger Berechnungen aufgehoben.

Das Thema Geocodierung gewinnt für alle Anwendungen größere Bedeutung, die in direktem Zusammenhang mit landschaftsbezogene Sachdatenerhebung bzw. -bearbeitung stehen, wie etwa Planung, Navigation oder Logistik. Geocodierung ist eine unverzichtbare Voraussetzung für digitale Weiterverarbeitung von Informationsebenen unterschiedlicher Herkunft in Geographischen Informationssystemen (GIS). Hybride GIS-Systeme, also Verschneidungen von Spaghetti-Topologien* mit Rasterebenen, erscheinen heute selbst für Einzelanwender allmählich in einem technisch sinnvollen, d.h. beherrschbaren, Rahmen realisierbar und ergeben damit eine methodische Zukunftsperspektive für die computerunterstützte Umweltforschung, da sie den Kern für jegliche Art von Umweltinformations- und Managementsystem bilden. Um Landschaftsobjekte zu detektieren oder zu klassifizieren, ist Geocodierung keineswegs notwendig. Deshalb werden Schräg- und Steil(einzel)aufnahmen auch weiterhin ihre zeitlose Berechtigung besitzen. Aber ihr Wert für die Ableitung quantifizierender Aussagen zur landschaftlichen Änderungsdynamik ist gegenüber geocodierten, digitalen Endprodukten naturgemäß stark eingeschränkt.

GIS-Integration von Fernerkundungsdaten ist deshalb eine unverzichtbare Grundforderung für zukunftsfähige Lösungen: Die Daten müssen verknüpfbar aufbereitet und gespeichert werden. Die problemlose EDV-gestützte Weiterverarbeitbarkeit überwiegt hier zu Recht das Verfügbarkeitskriterium bei weitem. Das entscheidende methodische Instrument für die Geocodierung von Luft- und Satellitenbildern ist die Photogrammetrie, deren technischer Bezugsrahmen seit einigen Jahren eine tief greifende Transformation von sehr aufwändigen opto- und feinmechanischen Präzisionswerkzeugen in der Gestalt tischgroßer Produktionsanlagen (photogrammetrische Stereoplotter) hin zu softwarebasierten Lösungen für PC-Arbeitsstationen erfährt (digitale Photogrammetrie oder Softcopy-Photogrammetrie).

* Stellen Sie sich vor, verschiedene Raumeinheiten mit einer Polygonzugbeschreibung oder Strecken (Topologie aus Knoten- und Kanten) sind auf einer einzelnen Ebene eines GIS dargestellt. Wenn Sie mehrere solcher Transparentfolien übereinander legen, so ergibt sich ein mitunter auf den ersten Blick evtl. ziemlich wirr erscheinendes Linienmuster, die „Spaghetti-Topologie“.

Photogrammetrie kann ohne Einschränkung als die Königsdisziplin der Fernerkundung bezeichnet werden, da sie allein in der Lage ist, eine weitgehende Parametrisierung des Raumes zu liefern. D. h., Luftbilddaten werden nicht nur in gebräuchliche Koordinatensysteme transformiert, sondern aus zweidimensionalen Bildern können mittels künstlichem stereoskopischen Sehen auch dreidimensionale Abbildungen des Beobachtungsgegenstandes erzeugt werden. Die Verallgemeinerung „Beobachtungsgegenstand“ wird deshalb betont, weil es im Rahmen der sog. Industrie-Photogrammetrie oder Nahbereichsphotogrammetrie möglich ist, dies auch mit Aufnahmen von beliebigen Körpern (Gebäude- und Anlagenrekonstruktion, Verschleißmessung an Bremsbelagoberflächen, Karosseriemodelle, Vermessung von Flugkörperbahnen etc.) über verschiedene Versuchsanordnungen (z. B. Mikroskopkamera, Fototheodolit etc.) zu erreichen.

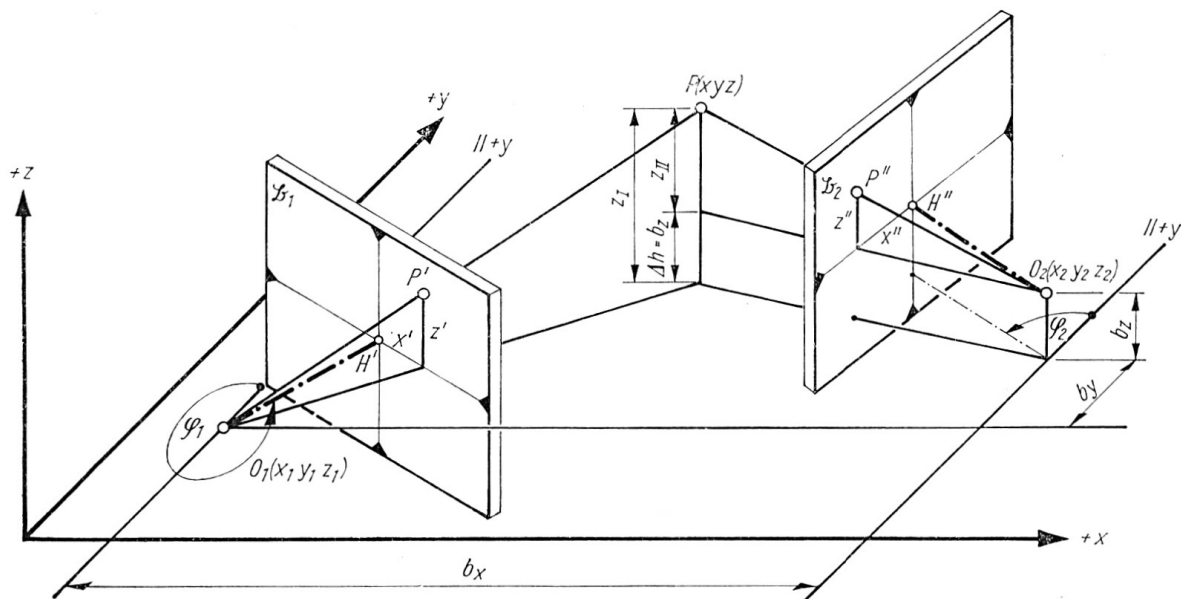


Fig. 6 Das geometrische Einschneiderverfahren in der Photogrammetrie; Prinzipdarstellung in (Rüger, Pietschner und Regensburger, 1987)

Für den Fall der rechnergestützten Bildauswertung bedeutet dies die Erzeugung von dreidimensionalen räumlichen Modellen, die beliebig skaliert, visualisiert und weiterverarbeitet werden können. Computer ermöglichen es somit, die Anwenderfreiheit im Umgang mit den erzielbaren Modellen in drastischer Weise zu erhöhen. Dabei tätigt heute der Digitalrechner jene Arbeiten auf analytischem Wege, die innerhalb von Fotografie und Photogrammetrie etwa ein Jahrhundert lang mit einem mechanischen Entzerrungsgerät durchgeführt wurden:

„Jeder Photoamateur kennt die *stürzenden Linien*, die entstehen, wenn man bei der Aufnahme die Kamera nicht genau senkrecht hält. Dieser störende Effekt beruht nicht auf einem Mangel der Kamera. Man kann sich davon überzeugen, wenn man an einem hohen Gebäude hinaufblickt, daß die Senkrechten aufeinander zulaufen, wie es nach den Sätzen der Zentralperspektive sein muß. In Wirklichkeit bemerkt man das kaum, nur auf der Photographie stört es. Bei der Herstellung des Positivs lassen sich die stürzenden Linien beseitigen. Im Vergrößerungsapparat wird ja das Negativbild einer Zentralprojektion unterworfen. Man legt das lichtempfindliche Papier schräg in den Strahlengang, so daß die Seite am tiefsten liegt, nach der die Linien *stürzen*. Nach

dieser Seite haben dann die Projektionsstrahlen einen weiteren Weg zurückzulegen, und das Bild wird auf dieser Seite stärker vergrößert. Das Entzerren spielt in der Photogrammetrie eine große Rolle, da die optische Achse der Kamera bei Luftaufnahmen oft nicht genau senkrecht steht. Es muß daher in einem Entzerrungsgerät eine Korrektur nach dem eben beschriebenen Prinzip vorgenommen werden.“ (Gellert et al., 1972)



Fig. 7 Beispiel für stürzende Linien, das Gebäude der FA Ökotechnik und Ökosystementwicklung des ÖZK an der CAU Kiel.

Die entscheidenden Fragen, die sich deshalb aus diesem bisher aufgespannten Gesamtrahmen ergeben lauten: Wie lange ist die Bearbeitungskette, um einen Teil der Landschaft in ein weiterverwendbares, dreidimensionales Modell auf dem Computer zu Analysezwecken zu verwandeln? Aus wie vielen Elementen bzw. Arbeitsschritten besteht diese Kette? Wie steht es um die Verfügbarkeit, Beschaff- und Finanzierbarkeit der Methode als solcher? Lohnt es sich, das Verfahren selbst anzuwenden? Welche Probleme lassen sich damit bearbeiten? Wo liegen die Verfahrensgrenzen?

Aus diesen einführenden Betrachtungen lassen sich nachfolgende Arbeitsthesen ableiten:

- Leistungsfähiges Umwelt- und Biomonitoring wird künftig im Wesentlichen EDV-gestützt (GIS-basiert) stattfinden.
- Fernerkundung ist im Laufe der letzten 100 Jahre zu einem aus der Geographie nicht mehr wegzudenkenden, methodischen Instrument geworden.
- Dreh- und Angelpunkt von Umweltmonitoringprojekten sind damit fernerkundungsbasierte Rasterdaten in hybriden GIS-Umgebungen.
- Die Photogrammetrie nimmt innerhalb der Fernerkundungsmethodik eine Schlüsselrolle ein (Königsdiziplin): Sie liefert 3-D-Parametrisierungen, wie sie für Fragestellungen aus der physischen Geographie benötigt werden (Orthofoto, DGM).
- Flugzeugfernerkundung ist flexibler als Satellitenfernerkundung und wird daher künftig unverzichtbar bleiben.
- Flugzeuggestützte, digitale Photogrammetrie ist dazu geeignet, künftig eine tragende Rolle für systematisches, umweltanalytisches Monitoring zu spielen.
- Die direkte Autogeoreferenzierung innerhalb eines volldigitalen photogrammetrischen Arbeitsgangs wird ein wesentliches Element bei der Operationalisierung von prozessbasierten Umweltbeobachtungsmethodologien darstellen.
- Heute bekannte Fernerkundungssysteme sind weder technisch noch operationell für zeitlich und räumlich höchstauflösende Umweltmonitoringaufgaben konzipiert bzw. in ausreichender Anzahl verfügbar.
- Der notwendige Gesamtaufwand für die Erfassung und die GIS-Integration von Fernerkundungsdaten bestimmt künftig entscheidend personelle Projektinfrastrukturen. Der heute in Umweltforschungseinrichtungen eingesetzte Energieaufwand für die Geocodierung lässt sich künftig erheblich eleganter einsetzen – es werden schätzungsweise weit mehr als 50 % der Ressourcen frei, die bislang durch komplizierte, aber letztlich eintönige Arbeitsprozesse gebunden sind!

- Erst die „direkte Autogeoreferenzierung“ mit volldigitalen, photogrammetrischen Luftbildaufnahmesystemen wird es überhaupt erst ermöglichen eine Vielzahl qualitativ neuer Fragestellungen zur Erhellung von landschaftsgenetischen Prozessen auf regionaler Ebene ökonomisch vertretbar anzugehen.
- Primärdatenerzeugende Systeme auf unterschiedlichsten technischen Maßstabsebenen liefern prinzipiell dieselben Datenstrukturen – entscheidend für ein verantwortungsbewusstes Umweltmonitoring auf Landschaftsebene ist daher einzig und allein die vollständige Kontrolle des (Roh-)Datenstroms auf institutioneller Ebene.
- Ab einem bestimmten Ausstattungsgrad bieten Luftbildaufnahmesysteme auf dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik eine Grundfunktionalität, die sie dafür prädestiniert, auch nicht-optische Fernerkundungsmethoden auf sich zu vereinigen.
- Miniaturisierung, Standardisierung und industrielle Komponenten-Optimierung greifen aus dem Massenmarkt in Nischenbereiche über und führen dort in ihrer Summe zu überproportionalem Leistungsgewinn, der systematisch untersucht, kontrollierbar genutzt, und v.a. aktiv mitgestaltet werden kann.

4 Historische Synopse: von den Anfängen der Navigation bis zum modernen Messflugzeug

Ein flugzeuggetragenes Luftbildaufnahmesystem besteht in seiner Gesamtheit im Wesentlichen aus vier Einzelkomponenten. Es sind dies:

- Fluggerät
- Sensorsystem
- Flugnavigations- bzw. Flugführungslösung (Avionik, Hard-/Software)
- bodengestützte Auswerte-Einheit (Hard-/Software)

Diese vier Säulen, auf denen ein solches System ruht, gilt es zu untersuchen.

Wie aus den Eingangsbetrachtungen bereits ersichtlich wird, ist eine isolierte historische Betrachtung zwar möglich, aber nicht angebracht, da es aufgrund der Stofffülle heute zunehmend darauf ankommt, die Schlüsselverfahren und -module in deren historischen Kontexten aufzuspüren, um deren praktische Verwertbarkeit und v. a. ihre Bedeutung für die derzeitige Entwicklung aufzuzeigen. Im Bereich interdisziplinären Arbeitens ist dies keine leicht zu lösende Aufgabe. Es bedarf also einer vereinfachenden Erörterung in der Zusammenschau vieler Einzelentwicklungen. Im Wesentlichen sind die folgenden Fakten weniger vom Standpunkt der höheren Geodäsie als vielmehr der praktischen Navigation her betrachtet. Außerdem wird dabei versucht jeweils einen historischen Anfangspunkt, einige Aussagen zum Entwicklungsverlauf und einige markante die derzeitige Situation prägende Ereignisse zu identifizieren.

Am Anfang stand die Himmelsbeobachtung. Gegenwärtig beginnen sich Hinweise zu verdichten, dass die Wurzeln der Astronomie bis in die jüngere Altsteinzeit (Kulturstufe Aurignacien, ca. 37 000 Jahre v. Chr.) zurückreichen (Meier, Zschweigert, 1997). Vor allem hellen Sternen kam anfänglich eine besondere Richt- und Zeitweiser-Funktion zu, wie etwa Arktur, Wega, Capella, Procyon, Atair, Antares, Pollux und Deneb (nach Müller, 1970 ebd.). Die Zeit- und Kalenderrechnung hat bereits zu Beginn der Jungsteinzeit (5500 v. d. Ztr.) einen hohen Stellenwert für die „Feinteilung des Jahres und zur Kontrolle des Jahreskalenders“ (ebd.). Zahlreiche archäologische Denkmäler werden als „Kalenderbauten“ ausgewiesen, wie beispielsweise Europas prominentestes (und größtes) prähistorisches Monument Stonehenge in Wiltshire/Südengland, dessen Bau auf ca. 3100 v. Chr. datiert wird. Wodurch, wann genau und wie die frühe Astronomie zur Navigation ausgebaut wurde, ist größtenteils noch ungeklärt.

Der Beginn der Schifffahrt datiert nach heutiger Erkenntnis auf etwa 4000 Jahre v. Chr. (Segelschiffe in Mesopotamien). Ab wann diese neolithische Schifffahrt astronomische Navigationsverfahren anwendete, wissen wir nicht. Bereits 2500 v. d. Ztr. finden wir regelmäßig verkehrende Handelsschiffe auf der 500-km-Distanz zwischen Kreta und Ägypten. Um 600 v. Chr. importierten die Phönizier auf dem Seeweg Zinn aus Cornwall. Herodot (500 - 424 v. Chr.) als Begründer der Geschichtsschreibung hat einen Bericht von einer phönizischen Flotte hinterlassen, die vom Roten Meer aus um 600 v. Chr. erstmalig

Afrika in Ost-West-Richtung umsegelte und nach drei Jahren Fahrt die Nilmündung von der Straße von Gibraltar her kommend erreichte. Sein Weltbild (Erde als Scheibe) wurde durch den Bericht der Seefahrer auf eine harte Probe gestellt, die die Sonne während zweier Reisejahre im Norden stehen gesehen hatten. Deutlich vor 1000 n. Chr. fuhren irische Seefahrer zu den Shetland-Inseln, den Färöern sowie Island – dabei legten sie jedes Mal Entfernungen von etwa 200 bis 300 Seemeilen über den offenen Atlantik zurück. Eine besonders weit herausragende Einzelleistung stellt um 400 n. Chr. die Entdeckung Hawaiis durch polynesischen Navigatoren von den Marquesas-Inseln aus dar: Die überbrückte Entfernung betrug 3 700 km. Als ebenso einzigartig ist die glückliche Wikinger-Irrfahrt von Leif Eriksson ab 1000 n. Chr. nach Nordamerika zu nennen – von ihm „Vinland“ getauft, wahrscheinlich Neuschottland. Sicher scheint nur, dass aufgrund fehlender navigatorischer Grundlagen bis ca. 1000 n. Chr. die Küstenschiffahrt dominierte. Diese spielte im Mittelmeerraum eine beachtliche Nahverkehrsrolle. Man segelte entlang der Küsten und orientierte sich anhand von Küstenformationen und zunehmend Leuchtfeuern.

Mit dem Aufstieg des Römischen Imperiums wandelte sich die frühe Seefahrt im gesamten Einzugsgebiet der antiken Hochkulturen durch systematische Erschließung und Ausweitung der Seehandelsrouten zu einer für damalige Verhältnisse großen Industrie: Rom alleine benötigte 80 000 Tonnen Weizen jährlich, welcher aus Ägypten herangeführt wurde. Diese ca. 240 Schiffsladungen konnten nur durch eine Getreideflotte von wenigstens 200 Schiffen transportiert werden. „Die Seefahrt beschränkte sich schon in römischer Zeit nicht mehr auf das Mittelmeer. Nach Entdeckung der Monsunwinde segelten von Myos Hormos jährlich 120 Schiffe im Flottenverband nach Indien und von Gades aus befuhren römische Schiffe den [küstennahen, Anm. d. V.] Atlantik. Gerade der Leuchtturm von La Coruña in Nordwestspanien bezeugt, dass die Schifffahrtsrouten im Atlantik stark frequentiert gewesen sind.“ (Hägermann und Schneider, 1997). Die Navigationsleistung einer Schiffsbesatzung zu jener Zeit erwuchs im Wesentlichen aus der Kenntnis der Haupthimmelsrichtungen, den vorherrschenden Winden und Meeresströmungen und einem mehr oder minder bekannten Küstenverlauf.

Für eine Navigation im heutigen Wortsinne sind während einer Reise jedoch unverzichtbar Standortbestimmungen vonnöten. Dies wiederum setzt ein navigatorisches Bezugssystem voraus, in dem Weg und Zeit äquivalent ineinander umgewandelt werden können. Es ist also eine Art von Navigationskarte erforderlich – eine verkleinerte, generalisierte, handhabbare (transportable), physische Repräsentation der Vorstellung von der Beschaffenheit des Raumes in seiner Ganzheit, seiner darin enthaltenen prägenden Landschaftsmerkmale und Objekte sowie deren Lagebeziehungen untereinander. Präzise und kurz formuliert lautet eine heute übliche Definition: Eine Karte ist ein maßstabsgetreues, verebnetes Bildzeichenmodell eines Landschaftsausschnitts. Um so ein Modell zu schaffen bedarf es der Kenntnis, wie die Landschaft räumlich gegliedert ist (z. B. Küstenform, -länge). Um sich derartige Landschaftsmerkmale erschließen zu können, bedarf es nicht nur einer beschreibenden Sprache, sondern auch einer formalen Konstruktionsmethode, mit anderen Worten mathematischer Prinzipien (z. B. Kreuzpeilung für einfache Ermittlung von Standlinien) und/oder eine kartographische (Abbildungs-)Lehre. Ebenso ist es erforderlich, die mathematischen Prinzipien der Eigenbewegung im Kartenmodell zu definieren. Und nicht zuletzt führt die Navigationsproblematik während mehrere Wochen oder gar Monate dauernder Seereisen letztlich zum Problem der Erdfigur selbst.

Von Jordanus Nemorarius, „dem Statiker“, und seinem Leben ist wenig bekannt; nur, dass er zwischen 1050 und 1350 lebte, am wahrscheinlichsten jedoch im 13. Jh. Aus zwei bedeutenderen Werken, die ihm zugeschrieben werden, geht hervor, dass er bereits wusste, dass ein stereographisch projizierter Kreis wieder in einen Kreis übergeht – was als bedeutender Beitrag auf dem Weg zur Erfindung von Globen und Atlanten betrachtet werden kann.

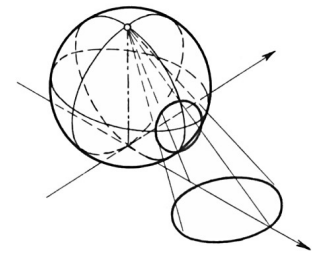


Fig. 8 Stereographische Projektion eines Kreises (Simonyi, 1986)

Der Kompass wurde erst um 1100 in China erfunden und gelangte gegen 1250 in den abendländischen Kulturkreis. Zusammen mit dem Schiffslog zur Geschwindigkeitsmessung (erfunden von Humphrey Cole, 1573) stellt er das erste brauchbare technische Hilfsmittel für eine effiziente Vermessung von Seewegen dar, um klassische kartographische „Routenaufnahmen“ zu schaffen. Die Kartographiegeschichte berichtet von der Fertigung von Küstenitineraren (Itinerarium), lat. = Wegeverzeichnis) mit Linien in allen Richtungen der Kompassrose.

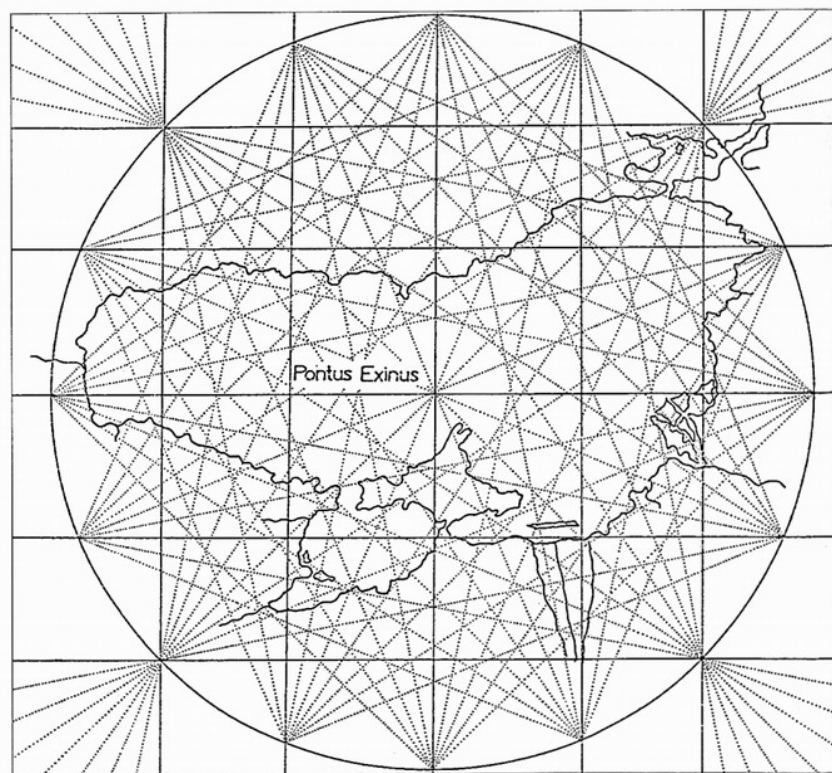


Fig. 9 Das Liniensystem einer Portolankarte des Schwarzen Meeres aus dem Jahre 1318, Nachzeichnung von Helmut Minow. Norden ist auf der Karte unten; in: (Meier and Zschweigert, 1997)

Diese Linien, auch Windstrahlen oder Rumben (engl. Rhumbines, daher: Rhumblineline-Navigation) genannt, bildeten die sog. Portolan-, Portolan- oder Kompasskarten. Auf ihnen fuhr man als Navigator in groben Himmelsrichtungen und korrigierte stetig die Effekte der Drift mittels Festlandbeobachtung bzw. ermittelte den Kursversatz nach Erreichen einer

„fremden“ Küste, bestimmte die ungefähre Position und setzte die Reise küstenparallel so lange fort, bis man den Zielhafen erblickte. Portulankarten fanden zwei Jahrhunderte lang Verwendung. Wer den Großteil dieser Karten in der erhaltenen Genauigkeit angefertigt hat, wissen wir heute nicht mehr, oder zumindest nicht genau genug. Interessanterweise wird berichtet, dass auf der Rückseite einer dieser Kartenblätter eine Notiz gefunden wurde, „die besagt, dass 28 alte Karten aus der Zeit Alexanders des Großen als Vorlage gedient hätten“. (H. Minow, 1994 in: Meier, 1997). Ist diese Notiz wahr, dann würden sich alleine auf dem Gebiet der Kartographie deren Anfänge um ca. 1700 Jahre in die Vergangenheit verschieben. Von den etwa 130 erhaltenen Portulankarten geht die älteste jedenfalls auf den genuanischen Petrus Vesconte im Jahre 1311 n. Chr. zurück. Sie markiert damit gleichzeitig den Beginn der modernen Kartographie. Pedro Nunes erfasste 1550 erstmals die wahre Bedeutung von Rumben (die navigatorisch aus deren Gebrauch heraus auch „Kursgleiche“ oder „Loxodrome“ (griech. „schiefer Weg“) genannt werden) als Kugelspirale oder Schraubenlinie (Spherical Helix). Die spiralförmige Kurslinie kommt durch die sog. Meridiankonvergenz (Zusammenlaufen der Längkreise in Richtung der Pole) zustande. Nunes missdeutete die Loxodromen jedoch fälschlich als kürzeste Verbindung zweier Orte auf der kugelförmigen Erdoberfläche, führte damit aber die Idee der Distanzoptimierung für eine Senkung der Reisezeit auf langen Fahrten ein. Die kürzeste Verbindungslinie zweier Punkte auf einer Kugel wird natürlich durch den Großkreis repräsentiert, der analytisch-geometrisch betrachtet als Schnittmenge einer Ebene durch den Mittelpunkt einer Kugel aufgefasst werden kann, die auch Start- und Zielort enthält.

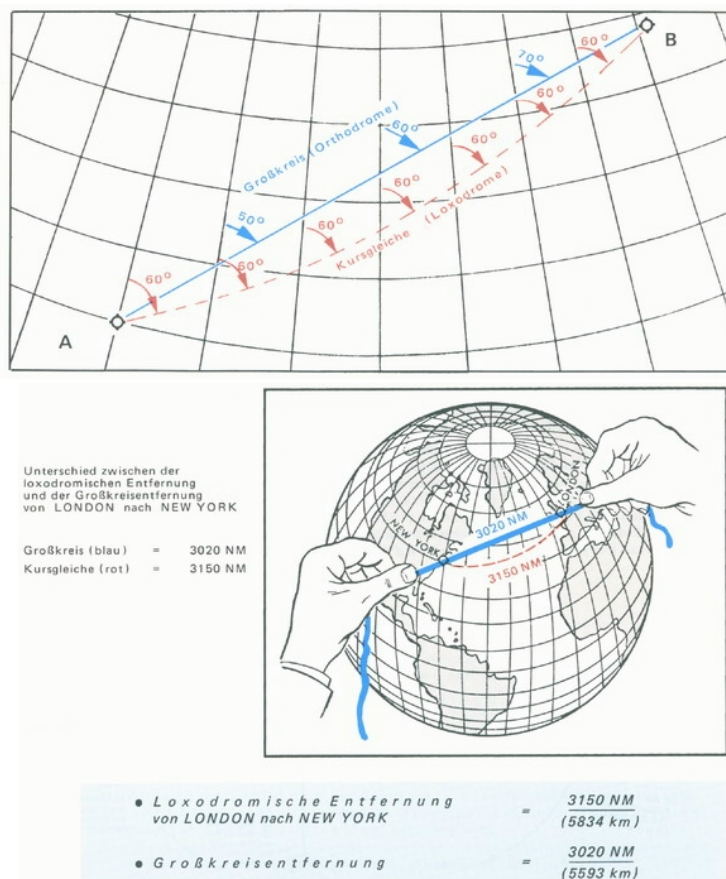


Fig. 10 Loxodrome und Großkreis (Kühr, 1995)

Hierbei sollte man sich vergegenwärtigen, dass Nunes noch kein vollständiger Globus vorgelegen haben wird, da der älteste erhaltene Globus der Neuzeit auf Martin Behaim in Nürnberg ins Jahr 1492 zurückgeht. Dies ist wahrscheinlich auch der Grund dafür, warum die Portulankarten mit dem Beginn des Zeitalters der Entdecker verschwanden: Ihre Genauigkeit – und damit ihr praktischer Nutzwert – sank mit sprunghaft zunehmenden Segelentfernungen über offene Ozeane drastisch.

Kommen wir noch einmal zurück an den Ursprung der „Navigationsfrage“: zur Ortsbestimmung. Im Wesentlichen verläuft jede Form der Navigation nach demselben Grundschemata ab. Ein Zielort der Reise mit geplanten Routenabschnitten sei dabei vorausgesetzt: Standort bestimmen, Kurs ermitteln, Kurs steuern und halten, Standort bestimmen, Soll-Ist-Vergleich, Kurskorrektur errechnen, neuen Kurs steuern usw. Da die Positionsmessung und mathematische Standortbestimmung über die letzten Jahrtausende hinweg nur zu beliebig selbst gewählten Zeitpunkten erfolgt und man den Rest der Reise praktisch „blind“ unterwegs ist, nennt man diese Navigationsmethode auch Koppelnavigation, im Sinne von „Ankoppeln“. Im Englischen wird sie – etwas anschaulicher – als „Dead Reckoning“ bezeichnet (wörtlich: „tote Berechnung“, meiner Auffassung nach durchaus mit „Totzeitberechnung“ gleichzusetzen).

Den geometrischen Ort einer Positionsbestimmung nennt man in der Fachsprache „Fix“. Man bewegt sich im Prinzip von einem Fix zum nächsten, indem man errechnete „Koppelorte“ (engl. „D. R. Position“) aneinander reiht und jeweils die sog. Abtrift ermittelt, und durch geeignete Kurskorrekturen ausgleicht.

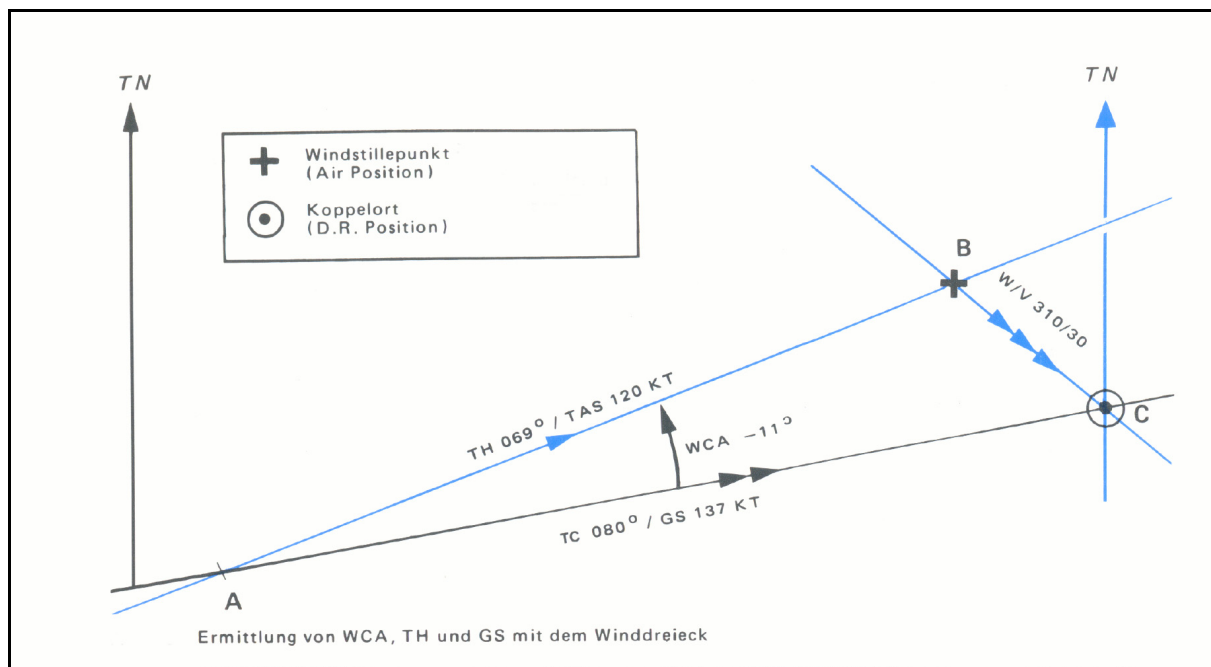


Fig. 11 Navigationsschema Winddreieck: Der Wind (w/v) muss durch einen Vorhaltewinkel (WCA: Wind-Correction-Angle) unter einem errechneten, rechtweisenden Steuerkurs (TH: TrueHeading) ausgeglichen werden, um über den resultierenden Grundkurs (TC: TrueCourse) die gewünschte Position zu erreichen. (TN: TrueNorth oder geographisch Nord. Berücksichtigt man magnetisch Nord, so wird das Schema komplizierter – siehe Fig. 173, S. 249) (Kühr, 1995)

Selbst im Zeitalter der Radionavigation (Funkeigen-/ Fremdpeilung) oder Radarnavigation ist das Winddreieck und das durch die Eigenheiten des Kompass entstehende „Allgemeine Kursschema“ von elementarer Bedeutung.

Es ist nun sehr interessant, sich zu vergegenwärtigen, wie man zu einem Fix gelangt und welche Genauigkeiten man dabei erhält. In einer pädagogisch wertvollen Darstellung zum Thema „Feldmessen und Kartographie“ wird angegeben, dass „...schon in der Zeit um 400 v. Chr. [...] ein griechischer Kapitän die geographische Breite von Marseille auf ein Zehntelsgrad genau [maß.“ – d. Verf.] (Fuhrer, 1998). Eine derartige Messung wurde mit dem Jakobsstab oder dem Astrolabium vollzogen.

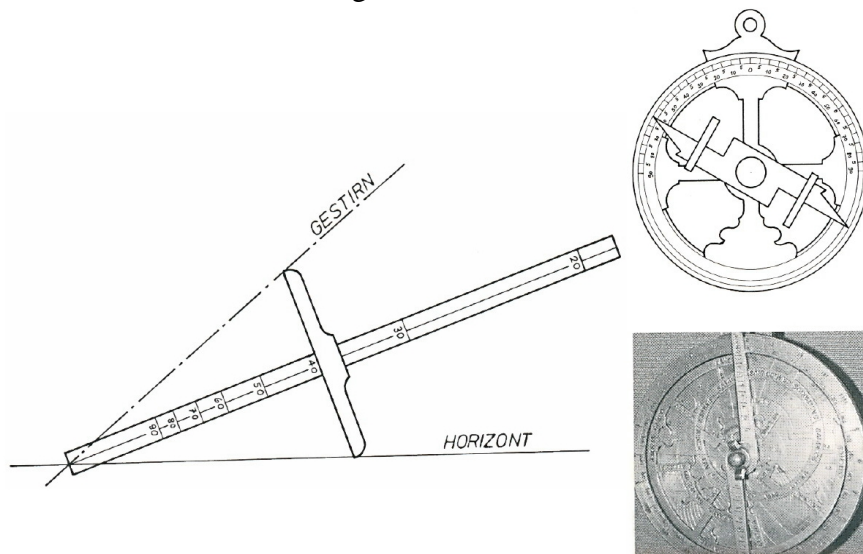
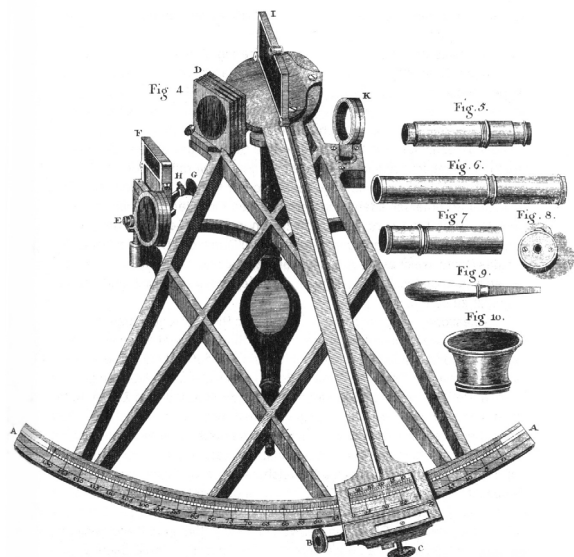


Fig. 12 Jakobsstab (links) und Astrolabium zur Sternhöhenmessung (r. o. / r. u.) (Fuhrer, 1998)

Letzteres war bis ins 16. Jh. in Gebrauch, ehe es vom Oktanten (ab 1731 unabhängig von John Hadley, England, und Thomas Godfrey, Philadelphia, erfunden) und schließlich vom Sextanten (ab der zweiten Hälfte des 18. Jh.) vollständig abgelöst wurde. Mit einem Sextanten konnten schließlich Genauigkeiten bis zu 10 Bogensekunden gemessen werden, die für eine Breitenkreisbestimmung von wenigen hundert Metern Ablage ausreichten.

Fig. 13 Hadleyscher Sextant (Adams, 1985)

V. a. der Jakobsstab ließ sich vorzüglich für die Seeschifffahrt einsetzen, da er preiswert herzustellen, robust und selbst auf See einfach zu reparieren oder ersetzen war. Dies ist der Grund dafür, warum dieses astronomische Instrument so lange im praktischen Gebrauch stand. 1594 gelang dem englischen Navigator John Davis übrigens eine entscheidende Verbesserung gegenüber der antiken Version des Geräts: Er veränderte den bis dahin üblichen „Cross-Staff“ (Kreuzgestell) zum „Back-Staff“, bei dem der Navigator nicht mehr gezwungen war, direkt in die Sonne zu blicken,



sondern während der Messung mit dem Rücken zu ihr stand.

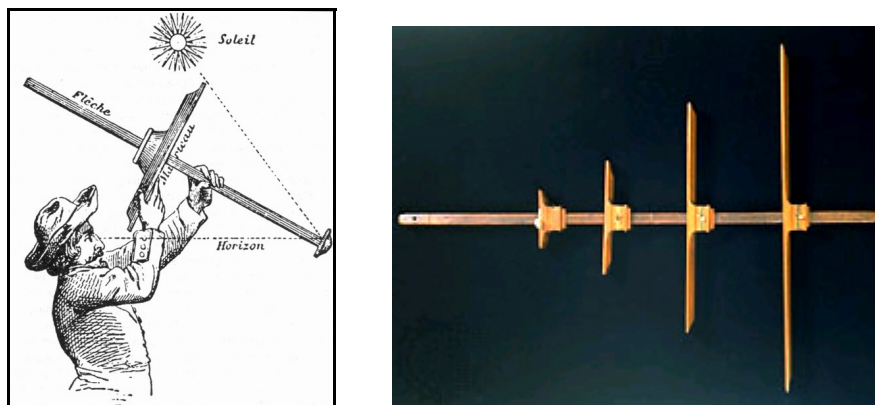


Fig. 14. Back-Staff (links) (Adams, 1985) und Cross-Staff (rechts) (Encyclopaedia Britannica, 2004)

Im Hinblick auf die frühen Anfänge ist es denkbar, dass mit Sternhöhenmessungen zunächst lediglich breitenkreisparallel gefahren wurde – dies lässt sich auch über reine Vergleichsbeobachtung und Jakobsstab oder ähnlichen Geräten bewerkstelligen. Mathematische oder kartographische Grundlagen sind dafür nicht zwingend erforderlich. Im Jahre 1617 schließlich arbeitete der schottische Mathematiker Lord John Napier of Merchiston (1550 - 1617, auch Neper genannt) an einer Erfindung, die die Navigation über 300 Jahrhunderte lang dominieren sollte: dem Logarithmus und technischen Hilfsmitteln zur Beschleunigung umfangreicher Berechnungen – Napiersche Stäbe, den Vorläufern der modernen Rechenschieber, die bis heute für navigatorische Zwecke als Rundinstrumente in Gebrauch sind (siehe unten). Zusammen mit dem in Oxford berufenen Geometrieprofessor Henry Briggs (1556 - 1630) führte er die dekadischen Logarithmen ein, die nach Napiers Tod 1624 in 14-stelliger Genauigkeit der Zahlen 1 - 20 000 und 90 000 - 100 000 veröffentlicht und später ergänzt wurden (Briggsche bzw. auch Zehnerlogarithmen).

In Fig. 15 ist der weltweite Standard-Navigationsrechner abgebildet, wie er seit Jahrzehnten unverändert als „ARISTO Aviat Nr. 617“ in einer Kunststoffausführung angeboten wird. Im englischen Sprachgebrauch wird der Aristo durchaus als „Flight Computer“ bezeichnet, obwohl es sich lediglich um einen logarithmischen Rechenschieber auf der Vorderseite und einem Windschieber als Rückseite handelt, der die graphische Lösung der Winddreiecksaufgabe erlaubt. Eine amerikanische Variante namens „E6-B“ besteht aus gebürstetem Aluminium.* Kurz erläutert bedeuten die Kennbuchstaben in den Abbildungen:

- a) Skalierung zur Einheiten-Umrechnung (Flüssigkeiten, Gewichte)
- b) Skalierung zur Einheiten-Umrechnung (Entfernungen, Geschwindigkeiten)
- c) Skalierung zur Einheiten-Umrechnung (Minutenskala)
- d) Skalierung zur Einheiten-Umrechnung (Stundenskala)
- k) konzentrische Kreisskala für Temperaturumrechnungen
- l) Gradeinteilung
- m) Drehbarer Innenring mit Kursrose (0 - 360°)
- n) mattierte, transparente Schreibfläche
- p) Drehzeiger mit 3 Windgeschwindigkeitsskalen
- q) 180° gegenläufige Kursrose zu (m) für Markierung der Windrichtung

* Scherzhaft nennen Piloten diese Rechenschieber auch „Whizwheel“ oder „Glücksrad“.

- o) Zweiseitiger Diagrammschieber mit konzentrischen Kreisbögen (Fluggeschwindigkeiten von wenigen Knoten bis nahe Schallgrenze) und radiale Strahlen für die Abtriften

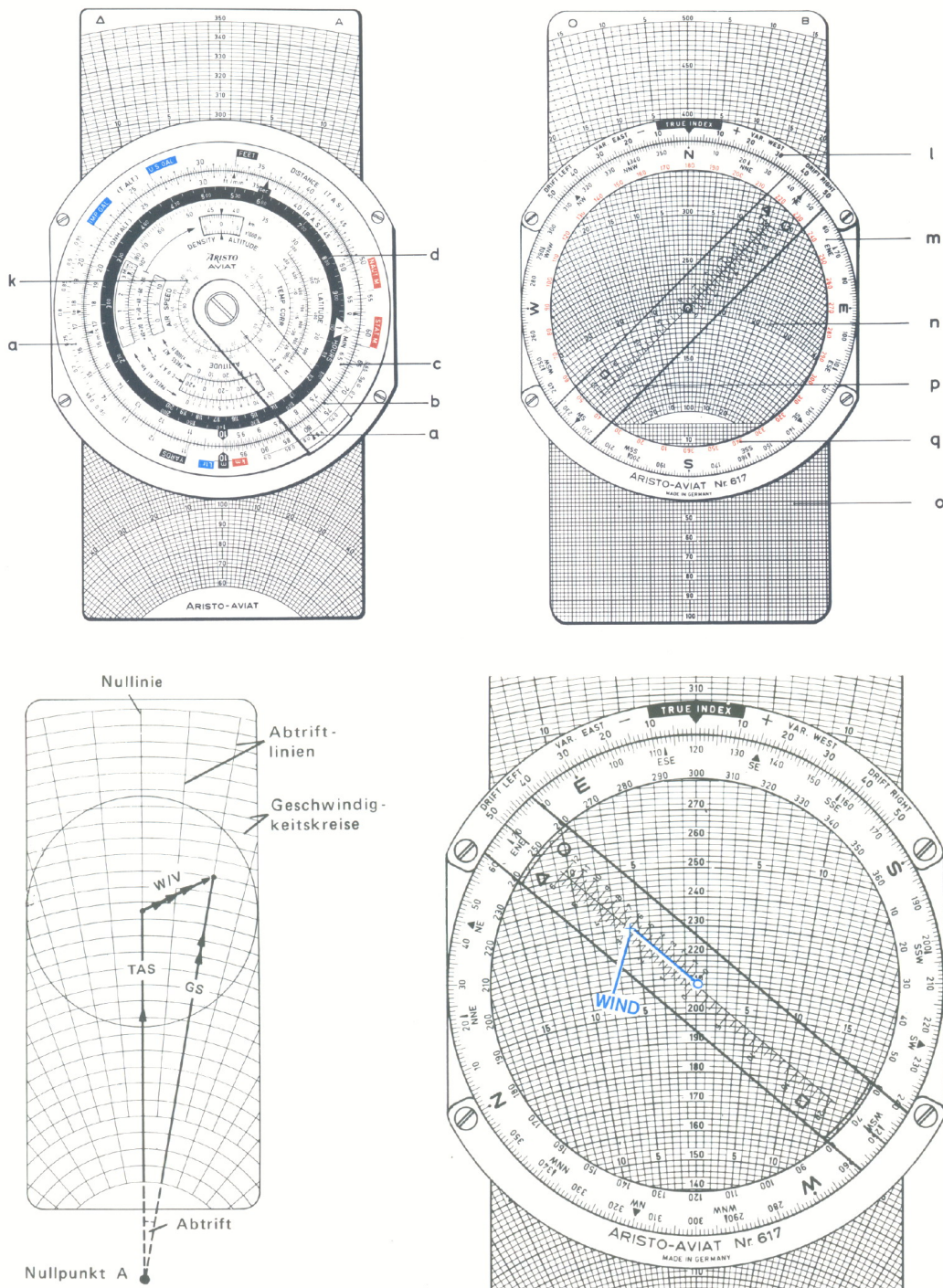


Fig. 15. Rechenschieber ARISTO Aviat Nr. 617 (Kühr, 1995)

Die Grundidee bei der Einführung von Logarithmen war simpel: Addition und Subtraktion lassen sich einfacher durchführen als Multiplikation und Division. Im Zeitalter des Taschenrechners ist es mitunter nicht ganz leicht zu verstehen, worin die Bedeutung von Logarithmen eigentlich liegt. Diese Bedeutung erschließt sich jedoch unmittelbar wenn man weiß, dass Logarithmentafeln und -stäbe die astronomische Ortsbestimmung an Bord eines

Schiffes von über einer Stunde Rechenzeit auf etwa 10 min reduziert haben! (Mankiewicz, 2000). Heute verfallen diese Vorteile des Logarithmus durch die ubiquitäre Verbreitung von Digitalrechnern zunehmend rascher in Bedeutungslosigkeit.

Die größere messtechnische Herausforderung war die Bestimmung der Zeit für die Längengradbestimmung. Seit 2679 v. Chr. verwendete man in China Sonnenuhren. Seit 1530 v. Chr. kannte man in Ägypten technisch ausgereifte Wasseruhren (Uhrenkonstruktion von Amenemhet für König Amenophis I.), sog. Klepshyden. (Koch, 1989) Die Sonnenuhr im europäischen Kulturkreis wurde nach derzeit herrschender Meinung „erst“ um 710 v. Chr. in Ägypten erfunden. Frühe Gewichts- und Pendeluhr waren für den Bordgebrauch aufgrund der Eigenbewegungen der Schiffe und von Temperaturunterschieden zu ungenau für präzise Astronomische Längengradbestimmungen. Das Problem wurde durch die Jahrhunderte hinweg so groß, dass sich schließlich 1714 – nach mehreren schweren Seeunglücken durch navigatorische Fehlleistungen – die englische Regierung dazu entschloss, 20 000 Pfund Preisgeld für denjenigen auszuloben, der eine Zeitmessapparatur konstruieren könne, die während einer 6-wöchigen Seereise Positionsbestimmungen mit maximal einem halben Grad Abweichung (30 Nautische Meilen) ermöglicht.

„Es gibt wenige Problemlagen in der Geschichte von Wissenschaft und Technik, bei denen wissenschaftliche Erkenntnis und technisches Können in ein ähnliches Verhältnis getreten sind wie beim Navigationsproblem, so wie es sich zu Beginn des 18. Jahrhunderts stellte. Selten ist zielbewusst, so ausdauernd und dennoch über einen langen Zeitraum hinweg ohne durchschlagenden Erfolg an der technischen Lösung eines Problems gearbeitet worden, das von den theoretischen Voraussetzungen her so klar zu durchschauen und dessen prinzipielle Lösung so einfach zu skizzieren war. Schon im Altertum wurde das aus Breitenkreisen und Meridianen bestehende Koordinatennetz entworfen ...“ (Adams, 1985).

Man kann heute rasch überprüfen, wie sich Angaben aus dem Gradnetz in Entfernungen umrechnen lassen: Mit bekanntem Erdradius von 6371 km lässt sich bei Annahme einer kugelförmigen Gestalt durch die Formel für den Kreisumfang $U = 2 \cdot \pi \cdot r$ die Länge des Äquators zu 40 030 km berechnen. Mit dem Dreisatz lässt sich ermitteln, wie groß die Entfernung zwischen zwei 1° auseinander liegender Meridiane ist:

$$\begin{array}{rcl} 360^\circ & \leftrightarrow & 40030 \text{ km} \\ 1^\circ & \leftrightarrow & x \text{ km} \\ x & = & 111,1 \text{ km} \\ & & ===== \end{array}$$

Die nautische Meile (NM) entspricht per Definition der Länge einer Bogenminute auf dem Äquator. In unserem Beispiel mit 6371 km Erdradius ergibt sich für eine Bogenminute $1^\circ = 60'$, also $\frac{111,1 \text{ km}}{60} = 1,852 \text{ km}$. Die NM wurde erst spät, nämlich im Jahre 1929, auf

1,852 km durch die Internationale Außerordentliche Hydrographische Konferenz in Monaco definitorisch festgelegt. In den USA wurde diese Festlegung sogar erst 1954 anerkannt. Vor jenem Jahr rechnete man mit der alten Nautischen-Meilen-Definition zu 6080 Fuß (ft) oder 1853,184 Meter, die auch in Großbritannien Gültigkeit besaß. Die NM ist für navigatorische

Zwecke sehr bequem handhabbar, da sie direkt aus dem Gradnetz der Erde abgeleitet ist und damit als Zeit-Entfernungs-Äquivalent die Umrechnung innerhalb beider Dimensionen gut unterstützt. Ausdruck dafür ist heute die Kennzeichnung von Luftfahrtskarten längs der Meridiane, wobei jeweils 1 Bogenminute bzw. 1 NM abgetragen wird.

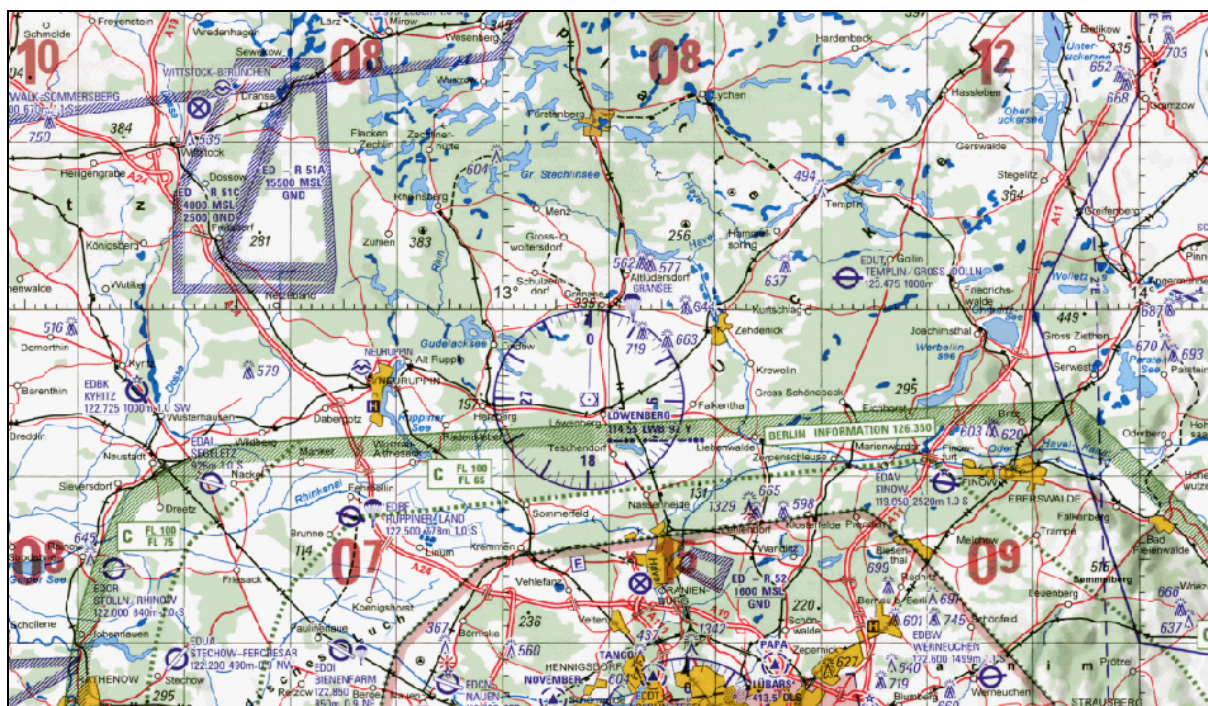


Fig. 16 Deutsche Flugkarte (gemäß ICAO-Richtlinien, Maßstab 1 : 500 000); der gewählte Ausschnitt zeigt den Nordrand von Berlin bis ca. 10 NM nördlich Fürstenberg und ist 60 NM breit; (Flugplanungssoftware FlightPlanner V.5.0; 2004)

Die Forderung, die für die Ganggenauigkeit einer solchen Uhr aufgestellt wurde, betrug 3 s d^{-1} – diese Präzision wurde zum Zeitpunkt der Ausschreibung noch nicht einmal von den besten, verfügbaren Pendeluhrn auf dem Festland erreicht! Die Lösung für diese Aufgabe wurde mit der Erfindung des Chronometers durch den Tischlersohn und Autodidakten John Harrison im Jahre 1735 vorgestellt. Es folgten mehrere, jeweils kleiner und genauer arbeitende Chronometer. Bis zum endgültig anerkannten Nachweis der Brauchbarkeit des Chronometers als Navigationsinstrument verging über ein Vierteljahrhundert. Auf einer Reise von England nach Jamaika wurde 1762 die Gangabweichung des berühmten „H4“ zu 5 s ermittelt. Das entspricht $1 \frac{1}{4}$ Bogenminuten Längenabweichung, wie man leicht durch Dreisatz nachrechnen kann:

Geg: Länge Sonntag: 24,0 h = 1440 min = 86400 s (zugrunde liegende Zeit: „mittlere Sonne“ – Stichwort: Zeitgleichung; siehe Erläuterungen in späteren Rechenbeispielen)

$$\begin{array}{lcl}
 86400 \text{ s} & \leftrightarrow & 360^\circ \quad | \text{ eine volle Erdumdrehung} \\
 5 \text{ s} & \leftrightarrow & x^\circ \\
 & \Rightarrow & x = 1^\circ 15' \\
 & & =====
 \end{array}$$

Wie das frühe navigatorische Wissen methodisch-instrumentell zeitlich ineinander verschmolzen wurde, ist heute durch die Geschichtsforschung nicht eindeutig geklärt. Für unsere Belange ist es bedeutsam, an dieser Stelle abschließend auf die Tatsache hinzuweisen, dass bei der technologischen Entwicklung der Seefahrt wenigstens 2000 Jahre lang im Prinzip hochseetüchtige Schiffe ohne mathematisch-messtechnisch begründete Navigationsverfahren betrieben wurden, oder – wie im Eingangskapitel allgemein erörtert – sich die instrumentelle Navigation in großen technologischen Sprüngen vollzogen hat. In der historischen Zusammenschau beliebiger Themen zur Technologieentwicklung ist es durchaus keine Seltenheit, mehrere Jahrhunderte ohne eindeutig und klar verfolgbare Linien gesicherten methodischen Wissens vorzufinden. Es ist eine Aufgabe der Wissenschaft, operationelle Brücken für unüberwindliche Probleme zu liefern. Als Beispiel dafür möge gelten, dass die Physiker trotz großer Erfolge in der technischen Optik bis heute keine genaue Erklärung dafür liefern können, warum Glas für Licht durchlässig ist (Menzel, 1995: Vorlesung Experimentalphysik, Universität Potsdam). Ebenso wichtig ist es, sich klar vor Augen zu führen, dass bis in die Gegenwart hinein die Navigation so gelehrt wird, wie sie bereits seit Verwendung des Jakobsstabs und der Logarithmen im Kern vorhanden war. Schiffs- und Flugnavigation gehen auf dieselben Wurzeln zurück und entsprechen sich in der Grundterminologie weitgehend.

Auch im Jetzeitalter lernt man während einer militärischen Flugausbildung noch immer, einen 2-strahligen Großraumjet bei 360 bzw. 420 kts mit dem oben dargestellten Rechenschieber innerhalb eines 3 NM breiten Luftraum-Korridors zu navigieren – und zwar basierend auf Addition und Subtraktion!* „Integrated Navigation“ werden während der Flugausbildung jene Abschnitte genannt, in denen man mittels Bordcomputer (basierend auf Doppler-Radar in Verbindung mit einer Trägheitsplattform, kurz INS), Radionavigationsinstrumenten, Radar und wenigstens 3 Missionszeituhren rechnerisch zu entscheiden hat, an welcher Stelle des Dead-Reckoning die zuverlässigsten Werte entstehen. Nicht selten werden dabei die „computergenauen“ Anzeigen verworfen, da sie durch Gangungenauigkeit (Kreisel drift! > 1 NM/h) oder aber Fehlbedienung (!) unbrauchbar werden. Eine entsprechende Neukalibrierung der laufenden Computer lässt sich nur durch Eigenpeilung mit Radar-Distanzmessungen bewerkstelligen. So ein Verfahren ist (bei Ausbildungsbeginn) relativ „zeitaufwändig“ (2 - 5 min) und damit nervlich äußerst belastend, falls ein nächster Turnpoint weniger als 15min vorausliegt und entsprechend vorbereitet werden will. Das Rezept für das Erreichen höchster Präzision besteht dabei in der systematischen Absicherung einfachster Rechengänge durch mehrere Kontrollrechnungen und Gegenproben. Selbst die aufwendigere Astronavigation wird in der Militärfliegerei noch immer gelehrt und angewendet (z. B. Langstreckentransportflugzeuge und strategische Bomber).

Aus einer geoinformationsrelevanten Sichtweise heraus lassen sich die historischen Verbindungslinien zwischen Astronomie, Geodäsie und Kartographie vereinfacht zusammenfassen: Die astronomische Ortsbestimmung bildet den Kern der Geodäsie, da sie als alleinige Methode in Frage kommt, „absolute“ Positionsbestimmungen durchzuführen. Für diese Positionsbestimmung ist eine große Anzahl von Beobachtungsdaten „vermessenener“ Himmelsobjekte (Ephemeriden) erforderlich, um darauf basierend eine Vorstellung zur Himmelsmechanik entwickeln zu können mit dem Ziel, exakte Kalenderberechnungen

* Darstellung beruht auf der praktischen Erfahrung des Verfassers.

durchzuführen. Die geodätischen Grundlagen unserer Welt beruhen somit im Wesentlichen auf einer Eingrenzung des Phänomens der Zeit. Erst 1474 wurden durch den deutschen Astronomen Regiomontanus einer der frühesten Ephemeriden-Tabellen aus systematischen Beobachtungen zusammengestellt und in Nürnberg veröffentlicht. Der früheste nationale Almanach (bebildertes, kalendarisch angelegtes Jahrbuch) „Connaissance du Temps“ von Jean Picard in Paris datiert auf das Jahr 1679 – vier Jahre nach der Gründung der Sternwarte von Greenwich – und bezieht sich direkt auf die Arbeiten Johannes Keplers von 1617.

Während einer astronomischen Positionsbestimmung ermittelt man sowohl geographische Breite als auch geographische Länge. Die Breite wird über eine Gestirnhöhenmessung, die Länge dagegen über eine Zeitmessung durchgeführt. Beide Messungen beruhen auf Zeit-/Winkeläquivalenten in definierten räumlichen Koordinatensystemen (kugelförmiges „Gradnetz“). Die Längengradmessung ist messtechnisch weitaus schwieriger als die Winkelmessung zur Sternhöhenbestimmung, wie wir bereits gesehen haben. Zur Veranschaulichung hierfür sind die folgenden beiden, auf heutige Terminologie adaptierte, Rechenbeispiele dienlich. Sie beschreiben astronomische Ortsbestimmungen für die nautische Navigation und entstammen einem Handbuch der Mathematik (Gellert et al., 1972):

BEISPIEL 1:

Navigationaufgabe:

Am 18.11. vormittags steht ein Schiff auf $\phi = 54^\circ 57' N$. Man beobachtet die Sonnenhöhe $h = 9^\circ 15'$. Das Schiffschronometer gibt UTC = 8h 58min 20s an, das nautische Jahrbuch $\delta = -19^\circ 12'$ und die Zeitgleichung +14min 50s. Auf welchem Meridian befindet sich das Schiff?

Im nautischen Dreieck Zenit Z - Pol P_N - Sonne S sind die drei Seiten bekannt:

$$\overline{ZS} = 90^\circ - h = 80^\circ 45'; \quad \overline{ZP_N} = 90^\circ - \phi = 35^\circ 03'; \quad \overline{SP_N} = 90^\circ - \delta = 109^\circ 12'.$$

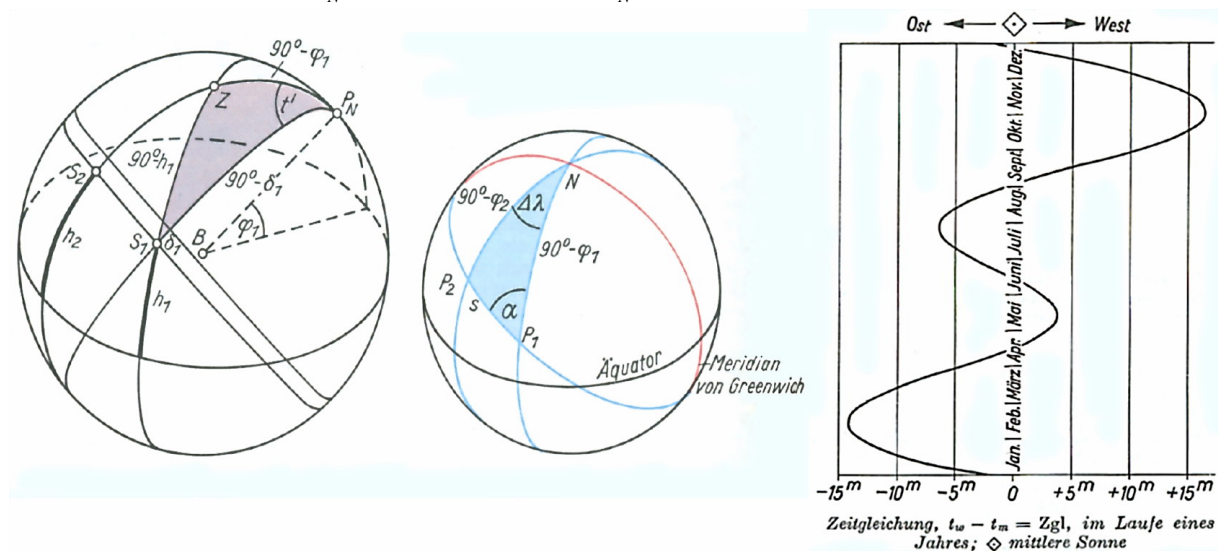


Fig. 17 Himmelskugel (links) und Erdkugel (rechts); ganz rechts: Zeitgleichung ZGL (schematische Darstellung des Zusammenhangs $t_m = t_w - ZGL$, der willkürlich eingeführten „mittleren Sonne“, die von der „wahren Sonne“ abweicht; Grund dafür: Erdbahn umkreist die Sonne nicht auf perfekter Kreisbahn, sondern auf einer Kepler-Ellipse, man verwendet daher die mittlere Sonne als Zeitgeber, um Äquidistanz bei der Bestimmung von Zeitintervallen in Zeit Bezugssystemen zu erreichen, z. B. UTC = GMT = Greenwich Meantime mit der Vereinfachung $24h = 360^\circ$)

Für die Ergänzung t' des Stundenwinkels zu 360° ergibt der Halbwinkelsatz:

$$\sin \frac{1}{2} \cdot t' = \sqrt{\frac{\sin(s - [90^\circ - \varphi]) \cdot \sin(s - [90^\circ - \delta])}{\sin[90^\circ - \varphi] \cdot \sin(90^\circ - \delta)}}$$

Nebenrechnung für die manuelle Lösung der Gleichung mittels logarithmischer und trigonometrischer Tafeln*:

Die Beobachtung fand 2h 30min 13s vor der Kulmination der wahren Sonne statt, also um 12h - 2h 30min 13s = 9h 29min 47s. Die mittlere Ortszeit beträgt aber 14min 50s weniger (Zeitgleichung!) oder 9h 14min 57s. Die Differenz gegen UTC ist

9h 14min 57s - 8h 58min 20s = 16min 37s

bzw. [16min 37s] : 4 = 4° 9' 15".

Dieser Wert entspricht dem gesuchten Meridian:

$\lambda = 4^\circ 9' 15''$

$90^\circ - h = 80^\circ 45'$		lg sin
$90^\circ - \varphi = 35^\circ 03'$	+	9,98950
$90^\circ - \delta = 109^\circ 12'$	+	8,76015
$2s = 225^\circ 00'$	-	8,74965
$s = 112^\circ 30'$	-	9,75913
$s - [90^\circ - \varphi] = 77^\circ 27'$	-	9,97515
$s - [90^\circ - \delta] = 3^\circ 18'$		9,01537
		9,50768
		$\frac{1}{2} \cdot t' = 18^\circ 46' 34''$
		$t' = 37^\circ 33' 8'' = 2 \text{ h } 30 \text{ min } 13 \text{ s}$

Ergebnis:

Das Schiff befindet sich in 54° 57' N und 4° 9' 15" O.

BEISPIEL 2:

Navigationaufgabe:

Auf einem im Stillen Ozean nördlich des Äquators fahrenden Schiff wird um 18h 50min (UTC) eine Sonnenhöhe von $h_1 = 21,7^\circ$ gemessen bei einer dem nautischen Jahrbuch entnommenen Deklination von $\delta_1 = -10,15^\circ$ der Sonne und einer Zeitgleichung ZGL = +15min 3s. Nach 15,2 NM Fahrt auf dem durch den Kurs N 67,5° W festgelegten Großkreis kulminiert die Sonne in der Höhe $h_2 = 35^\circ$ bei einer Deklination $\delta_2 = -10,21^\circ$ (vgl. Fig. 17). Welches sind die Koordinaten der Beobachtungsorte?

Für die Kulminationshöhe h_2 der Sonne gilt:

$$h_{\max} = h_2 = 90^\circ - \varphi_2 + \delta_2 \quad \text{oder} \quad \varphi_2 = 90^\circ + \delta_2 - h_2, \quad \text{d.h.} \quad \varphi_2 = 44,79^\circ$$

Auf der Erdoberfläche ergibt sich zwischen den beiden Beobachtungspunkten P_1 und P_2 sowie dem Nordpol N ein Kugeldreieck P_1NP_2 . Unter einem Kurswinkel $\alpha = 67,5^\circ$ in Punkt P_1 hat das Schiff

* Anmerkung zu den verwendeten Logarithmen: Obwohl die Logarithmen üblicherweise in Altgrad (Taschenrechner, oder kurz „TR“: DEG) angegeben wurden, wird man Unterschiede feststellen, falls man das Beispiel mittels TR nachrechnen wollte. Das liegt daran, dass es der Konvention entsprach, eine um 10 größere sogenannte Kennziffer anzugeben. Nehmen wir als Beispiel: $\lg \sin(77^\circ 27')$. Die Gesamtstrategie für die Berechnung dieser Formel entspricht im Wesentlichen einem termweisen Logarithmieren. Der Winkel muss dafür zunächst in Dezimalgrad umgewandelt werden, also $77^\circ + 27'/60 = 77,45^\circ$. Diesen Wert schlägt man in einer trigonometrischen Tabelle nach und erhält $\sin(77,45^\circ) = 0,9761$. Der Sinus lässt sich auch in der

Form $\frac{1}{10} \cdot 9,761$ schreiben. Wegen der Logarithmen-Gesetze $\lg \frac{a}{b} = \lg a - \lg b$ und

$\lg(a \cdot b) = \lg a + \lg b$ erhält man $\lg \frac{1}{10} + \lg 9,761$ oder $\lg 0,9761 = \lg 9,761 - 1$. Die Kennziffer in diesem

Beispiel lautet demnach -1. In einer vierstelligen Logarithmentafel schlägt man nun unter der Zeile der ersten beiden Ziffern der Zahl 9,761 (also 97) nach und entnimmt für die dritte Ziffer (hier 6) die Mantisse 9864. Die vierte Ziffer unseres Numerus 9,761 lautet 1. Dafür gibt es jedoch keine eigene Spalte. Die gesuchte Mantisse liegt daher zwischen der Spalte 6 mit der Mantisse 9864 und der Spalte 7, die 9899 angibt. Der richtige Wert für die gesuchte Mantisse muss aus der Tabelle linear interpoliert werden. Es ergibt sich 9895. Das Teilergebnis lautet daher 9,9895, wenn man die Kennziffer -1 unberücksichtigt lässt. Man erspart sich für aufwändigere Rechengänge die Bildung einiger Differenzen und man kommt etwas bequemer fast ausschließlich mit der Addition – und ohne TR – aus. Und dies seit Jahrhunderten.

zwischen den Beobachtungen $\overline{P_1P_2} = 15,2 \text{ NM} = 15,2 \cdot 1,852 \text{ km}$, also den Bogen $s = \frac{360 \cdot 15,2 \cdot 1,852}{2 \cdot \pi \cdot R} = 0,253^\circ$ zurückgelegt. Die Gegenseite $\overline{P_2N}$ zum Kurswinkel α ist

$90^\circ - \varphi_2 = 45,21^\circ$; nach dem Sinussatz findet man $\Delta\lambda$; $\sin \Delta\lambda = \frac{\sin(s) \cdot \sin(\alpha)}{\sin(90^\circ - \varphi_2)}$; man erhält $\Delta\lambda = 0,329^\circ$.

Im selben Dreieck ergibt die Nepersche Analogie 2 a) *:

$$\tan \frac{1}{2}(90^\circ - \varphi_1) = \frac{\tan \frac{1}{2}(90^\circ - \varphi_2 - s) \cdot \sin \frac{1}{2}(\alpha + \Delta\lambda)}{\sin \frac{1}{2}(\alpha \cdot \Delta\lambda)}, \text{ also } 90^\circ - \varphi_1 = 45,3^\circ, \text{ d.h. } \varphi_1 = 44,7^\circ.$$

Im nautischen Dreieck $ZP_N S_1$ der ersten Beobachtung sind die drei Seiten $\overline{ZS_1} = 90^\circ - h_1$, $\overline{ZP_N} = 90^\circ - \varphi_1$ und $\overline{P_N S_1} = 90^\circ - \delta_1$ bekannt; aus dem Seitenkosinussatz lässt sich daraus der den Stundenwinkel zu 360° ergänzende Winkel t' berechnen:

$$\cos t' = \frac{\sin h_1 - \sin \varphi_1 \cdot \sin \delta_1}{\cos \varphi_1 \cdot \cos \delta_1}; \text{ man erhält } t' = 45,13^\circ = 3,01 \text{ h} = 3 \text{ h } 0 \text{ min } 36 \text{ s}.$$

Zur ersten Beobachtung war es 12h – 3h 0min 36s oder 8h 59min 24s wahre Ortszeit oder 8h 44min 21s mittlere Ortszeit wegen $t_m = t_w - \text{ZGL}$. Gegen UTC beträgt die Zeitdifferenz 18h 50min – 8h 44min 21s = 10h 05min 39s oder 10,094h; die Längendifferenz ist demnach $10,094 \cdot 15^\circ = 151,41^\circ$. Dabei liegt Greenwich östlich von P_1 , die Länge von P_1 ist deshalb $\lambda_1 = 151,41^\circ \text{ W}$ und die von P_2 ist $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda = 151,74^\circ$.

Ergebnis:

Das Schiff befand sich zu den beiden Beobachtungszeitpunkten t_1 und t_2 in $P_1 = 44,70^\circ \text{ N } 151,41^\circ \text{ W}$ und $P_2 = 44,79^\circ \text{ N } 151,74^\circ \text{ W}$.

Man kann nun diese Ergebnisse durch mehrmaliges Nachrechnen prüfen. Eleganter jedoch sind Gegenproben, die auf unabhängigen Wegen durchgeführt werden. In unserer modernen Welt bieten sich dafür Software-Werkzeuge an, die Koordinatenrechnung beherrschen. Dies kann entweder auf rechnerisch-analytischem oder graphischem Weg erfolgen. Eine graphisch veranschaulichende Probe kann beispielsweise über ein Planungsprogramm für die Flugnavigation erfolgen:

* Die Nepersche Regel ist eine Zusammenfassung von in 10 Formeln enthaltenen trigonometrischen Beziehungen innerhalb rechtwinkliger, sphärischer Dreiecke. Die Neperschen Analogien dagegen wurden für die durchgängige Berechnung allgemeiner sphärischer Dreiecke mittels Logarithmen abgeleitet.

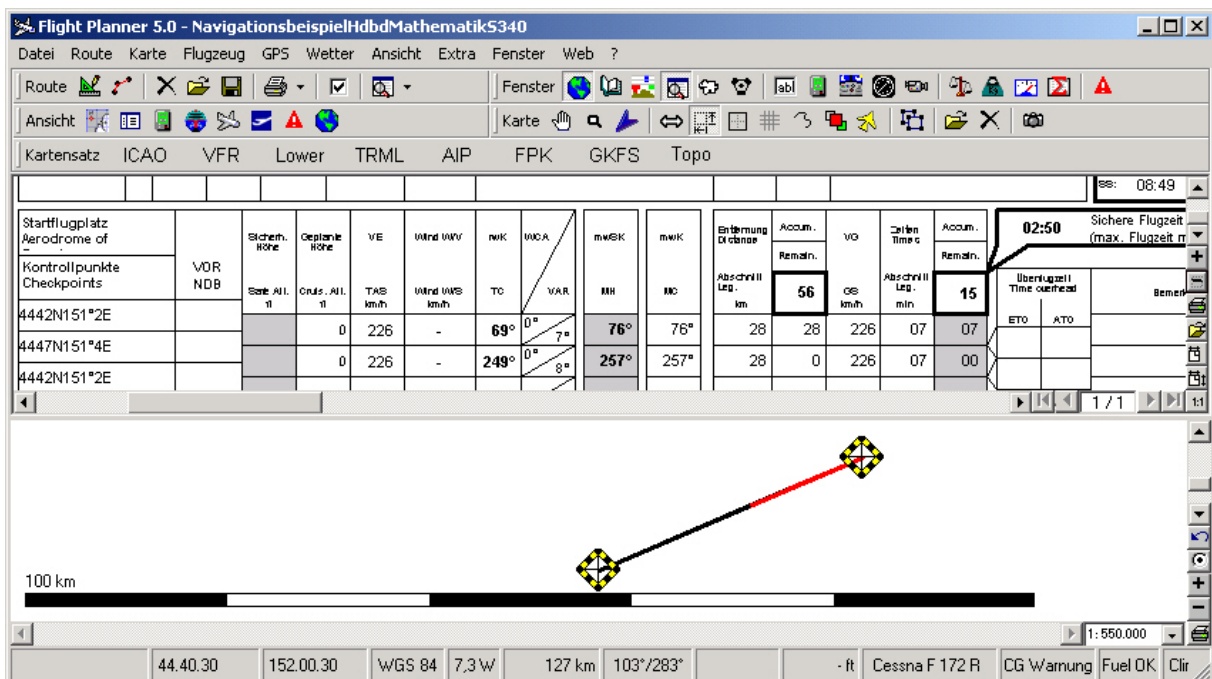


Fig. 18 Graphische Ergebniskontrolle mittels Flugplanungssoftware FlightPlanner 5.0 (nähere Erläuterung in späterem Kapitel); untere Fensterhälfte: Punkte P_1 und P_2 , (über Koordinaten eingegeben) mit dazwischenliegender Großkreisstrecke und Maßstabsbalken; obere Fensterhälfte: Flugdurchführungsplan (nach amtlichen Richtlinien), hier mit Entfernung 28 km und einem Azimut von 69° bzw. einem Gegenkurs von 249° , insgesamt also einer brauchbaren Übereinstimmung mit den Rechenergebnissen. Allerdings besteht ein grundlegender Unterschied: anstelle einer mathematisch perfekten Kugel wurde hier bereits auf einem Rotations-Ellipsoiden mit Projektion gerechnet (in diesem Fall: WGS84, der derzeit verbreitetste Standard für GPS-Navigation).*

Die Genauigkeiten der Ergebnisse lassen sich – je nach Anspruch – weit verbessern. Beispielsweise liefert ein von M. Neacsu (Coastal Oceanographics Inc., www.coastalo.com) vor einigen Jahren im Internet veröffentlichtes und aufwändig programmiertes MathCAD[†]-Dokument, das Koordinatenrechnung auf verschiedenen Rotations-Ellipsoiden in analytischer Weise beherrscht, folgende Resultate:

$$\text{Loxodrome } \overline{P_1P_2} = 27982,952 \text{ m}, \quad \text{Großkreisentfernung } \overline{P_1P_2} = 27982,933 \text{ m}$$

$$\text{Azimut } \angle NP_1P_2 = 68,943^\circ$$

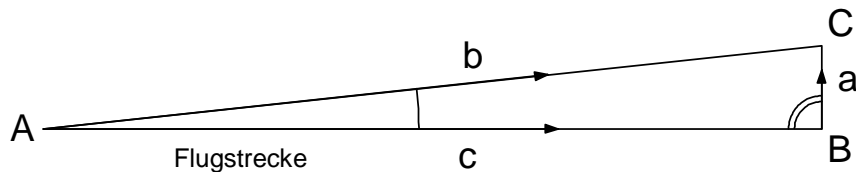
Die Längendifferenz von Loxodrome und Großkreis der Strecke $\overline{P_1P_2}$ beträgt über dieser kurzen Distanz hier exakt nur 19,158 mm. Die Gesamtdifferenz zwischen der Großkreis-Streckenentfernung auf einer perfekten Kugel und dem WGS84-Rotations-Ellipsoiden macht für die 15,2 NM lange Strecke ($15,2 \cdot 1852 \text{ m} = 28150,4 \text{ m}$) immerhin schon knapp 167,5 m aus.

* Anmerkung 1: Die Flughöhe wurde hier auf Null gesetzt, damit die Software die Steigzeit auf die gewünschte Flughöhe nicht berücksichtigt, sondern die reine Streckendurchschnittsgeschwindigkeit der angegebenen Reisegeschwindigkeit von hier 226 km/h (ca. 125 kts) ermittelt!

Anmerkung 2: Das Programm beherrscht die Koordinatenrechnung auch über Positionen, für die keine digitalen Kartenbestände verfügbar sind. Grund: Die Gesetze der Kugeltrigonometrie gelten für die gesamte Oberfläche des Rotationskörpers.

† Computeralgebrasystem mit Fähigkeit zur graphischen Notation mathematischer Ausdrücke.

Die Azimut-Differenz des Kurswinkels ergibt eine Größenordnung in der Ganggenauigkeit moderner Autopiloten: $68,9^\circ - 67,5^\circ = 1,4^\circ$ *. Die resultierende Abweichung wäre jedoch für Kurz- und Mittelstreckenentfernungen im praktischen Flugbetrieb voll tolerierbar, wie man schnell überprüfen kann:



In einem rechtwinkligen Dreieck ABC mit $\alpha = 1,4^\circ$ errechnet sich die Kursabweichung über die Länge der Gegenkathete a mit $a = \text{Flugstrecke} \cdot \tan \alpha$, z. B. für 100 NM: $a = 100 \text{ NM} \cdot \tan(1,4^\circ) = 2,44 \text{ NM}$, oder etwa 4,5 km. Das wäre für einen Flugbetrieb über den Ozean oder für den Flugverkehr im dünn besiedelten Binnenland unter normalen Umständen völlig ausreichend. Die angeführten Berechnungen und Ergebnisse sollen lediglich dazu dienen, einen grundlegenden Überblick zu gewähren, um einige im praktischen Gebrauch auftauchende Größenordnungen von Ergebnissen an den normalerweise nicht spürbaren Bruchkanten unterschiedlicher Verfahren zu verdeutlichen. In der Praxis wird die „Navigationsleistung“ natürlich nicht nur vom geometrischen Koppelort auf oder über der Erdoberfläche und der zu überbrückenden Distanz abhängen, sondern in einem wesentlichen Maße von den verwendeten Verfahren und v. a. der Sorgfalt bei der Bestimmung der Grunddaten für einen Fix. Schließlich bedeutet am Äquator jede Zeitsekunde Abweichung eine Erhöhung der Ortsunschärfe um 463 m!†

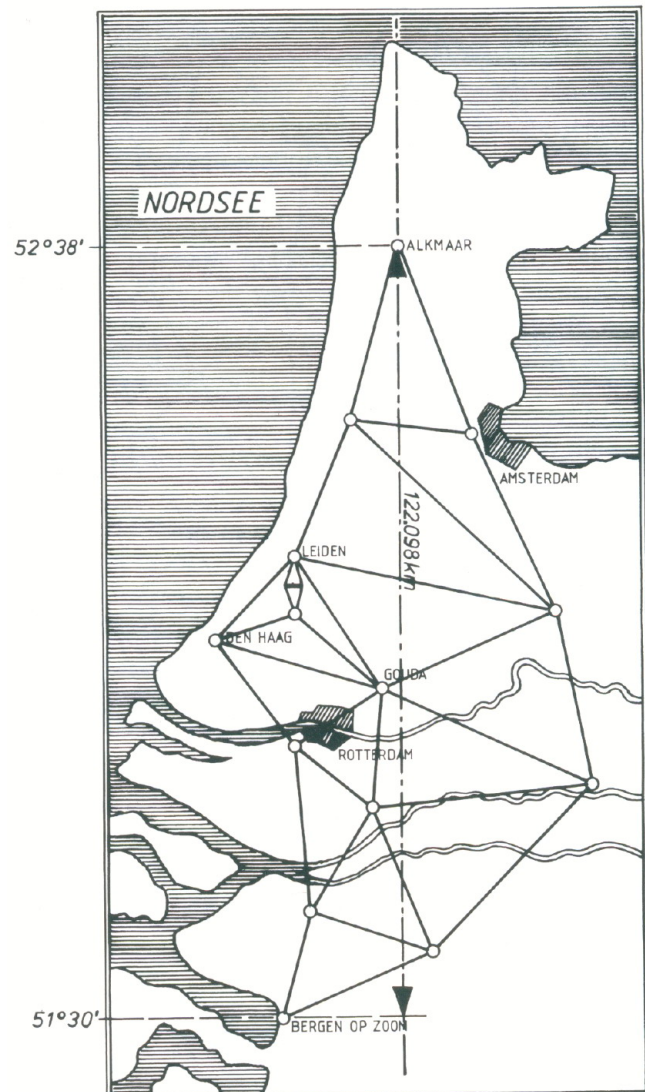
Präzise astronomische Ortsbestimmungen für geodätische Zwecke sind aus diesem Grunde aufwändiger und erfordern lange Messreihen, obwohl das Vorgehen prinzipiell identisch ist mit den im Rechenbeispiel vorgestellten Methoden. Daher gibt es eine vergleichsweise geringe Anzahl von – im wahrsten Sinne des Wortes – Ausgangspunkten für die Landesvermessung. Ziel der landesweiten, flächendeckenden Vermessung ist es, Lage und Höhe von Punkten der Erdoberfläche zu bestimmen. Dies geschieht von den Basispunkten der astronomischen Ortsbestimmung aus durch Triangulation (Dreiecksmessung: Winkel, Entfernung, Höhe). Dabei entsteht ein sog. „Basismessnetz“ (Messnetz 1. Ordnung).

* Ohne Autopiloten können bei rein manueller Steuerung und Kompassnavigation nur etwa $5 - 10^\circ$ Kursstreuung erreicht werden!

† Es gilt: $24\text{h} = 360^\circ$, $1\text{h} = 15^\circ$, $1\text{min} = 15'$, $1\text{s} = 15''$ und: 1 NM wird definiert als 1' auf dem Äquator (1NM = 1,852km). Daher: $1\text{s} = 0,25 \cdot 1,852 \text{ km} = 0,463 \text{ km}$.

Fig. 19 Messnetz 1. Ordnung; aus: (Fuhrer, 1998)

In Europa wurde das erste Basismessnetz 1614 für die Niederländische Gradmessnetz durch Willebrord Snellius geschaffen. Er war der Erste, der das Prinzip der Triangulation nach Frisius (holländischer Astronom, 16. Jh.) zum Standardverfahren der geodätischen Landesaufnahme erhob. Der Begriff Triangulation zielt dabei auf die Verwendung eines Dreiecksnetzes ab, dessen Dreieckspunkte durch Einmessen der Dreieckswinkel in ihrer Lage bestimmt werden. Das sog. Lagefestpunktfeld (weiteres Synonym für Basismessnetz) wird mittels eines „Basisvergrößerungsnetzes“ erzeugt: Man misst eine relativ kurze Distanz unter großem Aufwand so genau wie möglich und fügt mittels Kreuzpeilung von den Enden der Grundlinie aus beliebig viele Dreieckspunkte hinzu. In Deutschland entwickelte C. F. Gauss während der Hannöverschen Landesvermessung 1825 - 1845 die Ausgleichsrechnung mittels kleinster Fehlerquadrate, die heute für viele Anwendungen von zentraler Bedeutung geworden ist, bei denen eine große Anzahl von Beobachtungen vorliegen (Durchführung von Hauptmann Georg Wilhelm Müller, Friedrich Hartmann und Joseph Gauß; Berechnung der ca. 2600 trigonometrischen Punkte durch C. F. Gauß).



Im Zuge der Messnetzverdichtung kommt es bei der Landesvermessung durch Einmessen weiterer, kleinerer Dreiecke im Basisnetz zu Netzen höherer Ordnung. Ziel dabei ist, die Anzahl von Punkten mit verlässlicher Positionsgenauigkeit stetig zu erhöhen. Ein weiterer wissenschaftlicher Ansatz bestand historisch dabei, die sphärischen Dreiecke so lange durch Messnetzverdichtung zu verkleinern, bis sie in brauchbarer Näherung als ebene Dreiecke betrachtet werden können, um die aufwändigen Berechnungen der sphärischen Trigonometrie durch die leichter zu handhabende Trigonometrie der Ebene mit tolerierbarem Fehler ersetzen zu können.*

* Eine Ebene wird durch 3 Punkte im Raum, die nicht auf gerader Linie liegen, eindeutig bestimmt. Für die Eckpunkte eines sphärischen Dreiecks ABC können jedoch unendlich viele Kugeln angegeben werden, auf deren Oberfläche sich diese Punkte alle zugleich befinden. Mit wachsendem Radius R gehen dabei die gekrümmten Oberflächen der Kugeln stetig in eine einzige ebene Dreiecksfläche über. Insbesondere geht dabei die mit größer werdendem R die Winkelsumme des sphärischen Dreiecks in diejenige des ebenen Dreiecks über (180°). Der „sphärische Exzess“ gibt an, um wie viel die Winkelsumme des ebenen Dreiecks im

Fig. 20 Messnetz höherer Ordnung; aus (Gellert et al., 1972)

Genau Punktlagen führen zu exakten Karten. Karten wiederum sind unter historischen Gesichtspunkten betrachtet in zweierlei Hinsicht unverzichtbar: erstens zur wirtschaftlichen Erschließung des Raumes (Vorteile beim Ausbau und zur Sicherung von Handelswegen), zweitens zur Herstellung und Ausweitung militärstrategischer Macht. Die Dreiecksvermaschung spielt heute im GIS-Bereich in anderer Hinsicht eine zentrale Rolle: Sog. TINs (Triangulated Irregular Networks) eignen sich am besten für eine harmonische Geländeoberflächenmodellierung, da über eine beliebige Anzahl von Dreiecken das Relief gut angenähert dargestellt werden kann. In Bereichen mit hoher Reliefdynamik werden mehr kleinere Dreiecke verwendet als in relativ flachen, großflächigen Arealen, die sich mit nur wenigen Dreieckskanten ausdrücken lassen.

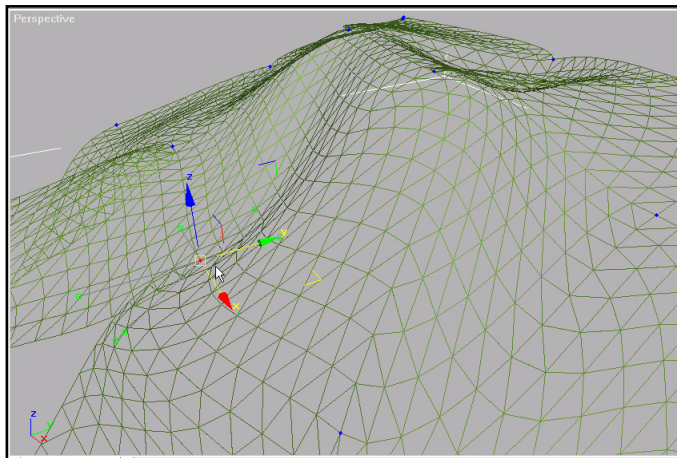
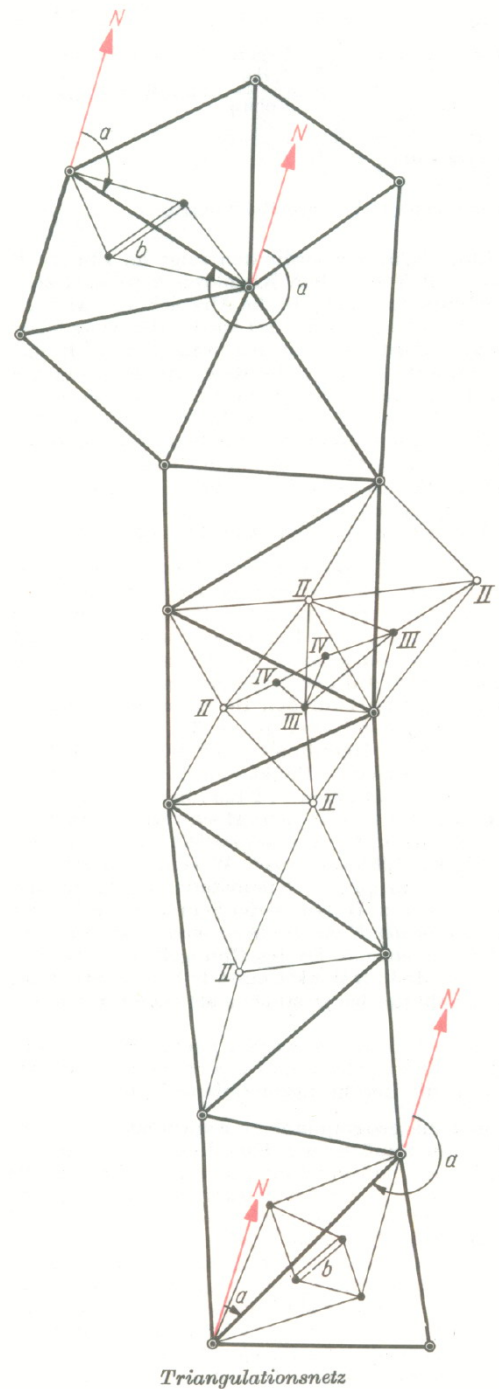


Fig. 21 Virtuelles Geländemodell; (hier: erstellt mit Animationssoftware „Cinema4D“ Ver. 6 CE, 2004)



allgemeinen Kugeldreieck überschritten wird: $\epsilon = \alpha + \beta + \gamma - 180^\circ$. Die Flächenabweichung beträgt:

$$\Delta F = \frac{\epsilon}{180^\circ} \cdot \pi \cdot r^2.$$

Es lassen sich nun Bedingungen dafür angeben, ab wann solche Dreiecke als eben gelten

können. Nach einem Satz von Legendre verdient ein Dreieck den Namen eben, wenn gilt: $\frac{\epsilon}{3} \approx 2,5''$; auf den

Erdmaßstab übertragen bedeutet dies eine Dreieckskantenlänge von

$$\epsilon \approx 2,5'' \cdot 3 = 7,5'', \quad \text{also } \frac{1852m}{60} \cdot 7,5 = 231,5m.$$

Das TIN-Konzept ist vor dem Hintergrund der Datenreduktion bedeutsam und im Multimedia-Bereich eng mit dem Begriff „Tesselierung“ verknüpft. Tesselierung ist das Überführen einer Spline-interpolierten 3-D-Oberflächen-Approximation in eine polygonale Zerlegung (Drei- oder Vierecke*), um die Oberflächen dem Rendering-Prozess zuführen zu können. Zu Beginn der 3-D-Software-Entwicklung zur Erzeugung Virtueller Welten (z. B. Special Effects für Film und Fernsehen) wurden dreidimensionale Objekte ausschließlich mit planaren Polygonen modelliert. Diese Vorgehensweise stößt jedoch bei der „Keyframe“-Animation (Begriff aus der Trickfilmindustrie: Festlegung von Schlüsselszenen im Drehbuch durch einen Chefzeichner und „Ausfüllen“ der Zwischensequenzen durch Arbeitsteilung beliebig vieler Zeichner) in Szenen mit mehreren zu bewegend Objekten schnell an praktische Grenzen, da bei einer Objektveränderung jeder einzelne beteiligte Polygonpunkt extra angefasst und modifiziert werden müsste (Beispiel: elastischer Stoß zweier Kugeln, von denen jede aus mehr als 100 Polygonecken besteht). Deshalb entstanden neben der polygonalen Modellierung zwei weitere Hauptverfahren: Bézier-Patches und NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). Der Effekt für den Enduser ist während des Modellierungsprozesses in beiden Fällen in etwa der Gleiche: Mit nur wenigen zu manipulierenden „Anfassern“ (sog. Handles) werden Modelle erzeugt und verändert, die sich durch perfekte Oberflächen auszeichnen und damit maßstabsunabhängige Kantenglätte und Oberflächengüten aufweisen.

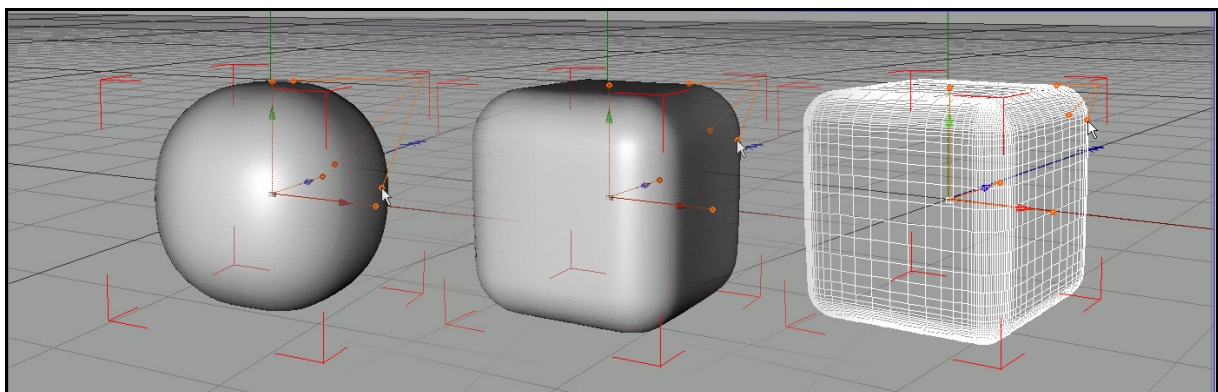


Fig. 22 Bildmontage aus drei Screendumps eines mit Hyper-NURBS modellierten Würfels – gegenüber einem Polygonmodell lässt sich ein Hyper-NURBS-Objekt mit nur wenigen Mausklicks (siehe Mauszeigerposition) in eine Kugel verwandeln, und umgekehrt zu einem Würfel mit echten Kanten. Gegenüber der üblichen Gouraud-Schattierung ist rechts das Drahtgittermodell dargestellt, und zwar mittels Backface-Culling, d. h. unter Ausblendung der Körperrückseiten (2004)

Diese Strukturen reduzieren trotz komplexester erreichbarer Modellgeometrien die dabei auftretenden Datenmengen, sind jedoch nicht für das direkte Weiterverarbeiten im Render-Prozess geeignet. Rendern bedeutet schlichtweg das Überführen einer dreidimensionalen Szene in ein zweidimensionales Rasterbild (Bitmap) unter Berücksichtigung von Schatten, Reflexionen, Transparenzen und weiterer Lichteffekte.

* Vierecke lassen sich schneller berechnen. Daher wird man innerhalb eines 3-D-Animationsprogramms nur ausnahmsweise „triangulieren“, d. h. in Dreiecksvermaschung umrechnen.

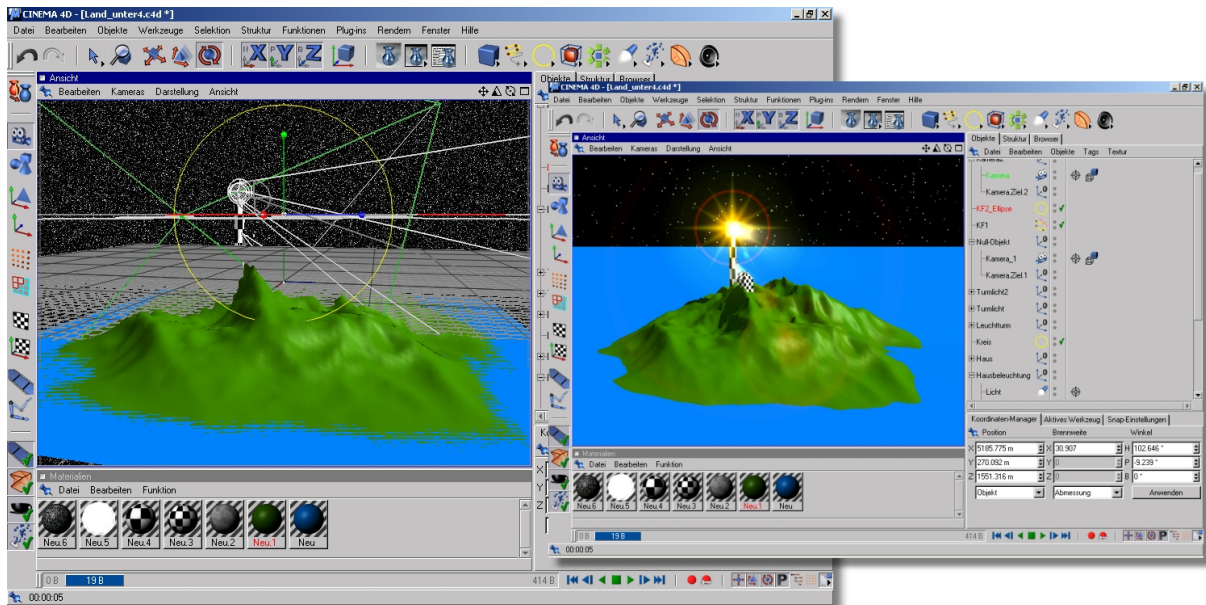


Fig. 23 Zwei Screenshot (Software: Cinema4D) desselben Frames (Nr.19) einer Animationssequenz – links in der Szenenbeschreibung, rechts gerendert. Das Beispiel besteht aus 414 Bildern und ergibt einen 16-Sekunden-Film: Dargestellt ist eine virtuelle Insel mit einem Leuchtturm darauf. Während der Wasserspiegel steigt und das Scheinwerferlicht des Leuchtturms kreist, umfliegt der Beobachter die Szenerie auf einer elliptischen Bahn. Dabei wird eine künstliche Tagesdynamik mit zwei Sonnenaufgängen simuliert.* (2004)

Die Modellierung der physikalischen Wechselwirkung von Licht und Materie (Reflexion, Brechung, Beugung, Streuung) ist besonders lehrreich.

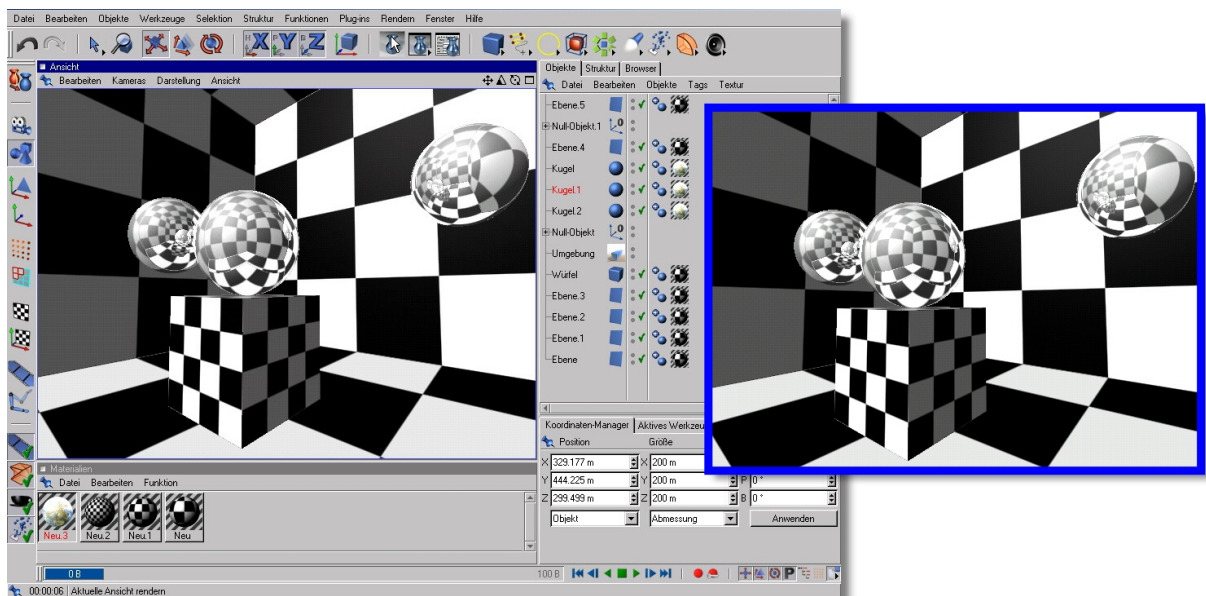


Fig. 24 Raytracing-Versuche; durch die „schwarzweiße-Phase“ gehen die meisten Animatoren während der Einarbeitung in 3-D-Animationssoftware. Im vorliegenden Beispiel ging es darum, die zwei schwebend gezeigten Chrom-Kugeln realistisch fallen zu lassen. (2004)

* Projektaufwand: ca. 1 Tag; Software-Einarbeitung: ca. 2 Wochen; Interesse gegenüber 3-D-Animation über 5 Jahre vorbereitend kumuliert.

Deshalb ist abzusehen, dass sich 3-D-Animationssoftware ihren Stellenwert in der Aus- und Weiterbildung erobern wird, da man über dieses Instrument der Visualisierung folgende Vorteile erzielen kann:

- Spielerische Heranführung an einen dynamischen Modellbegriff (sehr viele abgestufte Realismusgrade möglich)
- Entwicklung von Lernstrategien im Umgang mit komplexer Software
- Erzeugung intrinsischer Neugier durch Modellierung komplexer Vorgänge (Zeit-, Raum-, Bewegungsauflösung)
- Förderung des Gespürs für die Effizienz bzw. Wirtschaftlichkeit von Modellen
- Schulung analytischer Fähigkeiten im Verbund mit ästhetischer und kreativer Betätigung.

Schon heute können mit speziellen Plug-Ins für professionelle 3 D-Animationswerkzeuge Geländekoordinaten größerer Raumeinheiten (Hunderttausende bis Millionen von Koordinaten) auf handelsüblichen PCs eingelesen und dort weiterbearbeitet werden. Außerdem erlauben die Animationsprogramme ausnahmslos die Modellierung mit Weltkoordinaten über größere Skalenniveaus hinweg (z.B. Ångstroem bis Astronomische Einheiten). Es lohnt sich, in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass der Computer als universeller Programmautomat besonders in einer Hinsicht alle Wissenschaftsdisziplinen gleichermaßen revolutioniert hat: Ganz gleichgültig, ob es sich um astronomische, kartographische, navigatorische, maschinenbautechnische oder multimediale Aufgaben handelt – Computer sind hervorragend dazu geeignet, koordinatenbezogene Abbildungen und deren Transformationen zu berechnen und quasi in Echtzeit darzustellen.

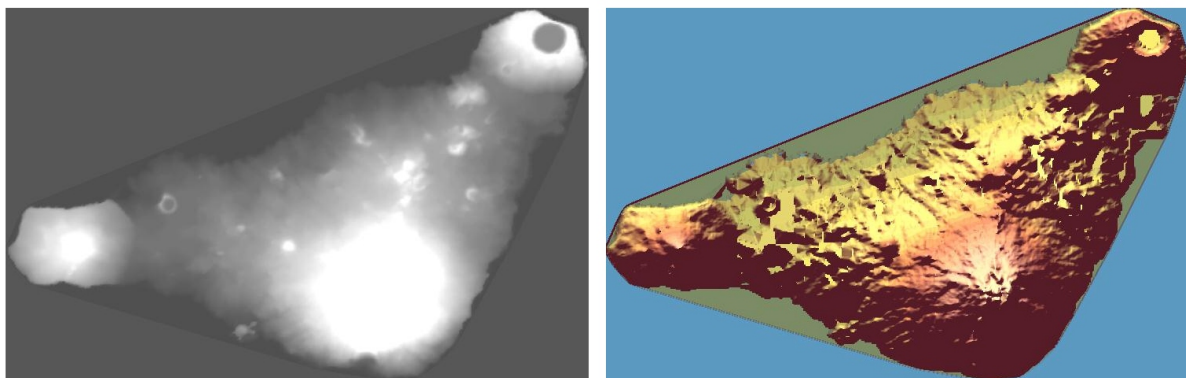
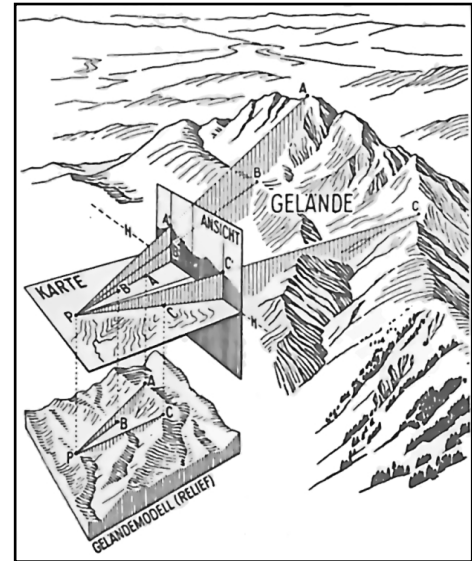


Fig. 25 Rapa Nui – die Osterinsel mit den 3 Inseln Schwerpunkten (v. l. n. r.) Poike, Maunga Terevaka und Rano Kau (links: DGM, rechts: Höhenschichtenkarte): erstellt mittels Bildschirmdigitalisierung von Isohypsen aus einer gescannten Trekking-Karte, M 1 : 32 000 (Aufwand: ca. 2 Wochen); 13,3 MB ASCII-Datei mit XYZ-Koordinaten, 351 708 Punkte; Import in Fernerkundungs-Auswertesoftware und Erzeugung eines Computermodells in 20 min. (Bearbeitung: K. Adam, ÖZK FA Ökotechnik)(2003)

“Computers can store immense amounts of data, and they greatly accelerate the speed at which complicated statistical and mathematical problems can be solved. They have become particularly valuable for their ability to handle such programs as those that measure spatial contiguity, spatial diffusion through time, and locational patterns, as well as for their use in network analysis, node accessibility indexes, map projections, and the display of cartographic data.” (Encyclopaedia Britannica, 2004)

Hervorzuheben sind dabei v. a. die Probleme der Perspektive, die Künstler und Mathematiker wenigstens drei Jahrhunderte lang gleichermaßen beschäftigten, wie wir an anderer Stelle noch etwas ausführlicher erörtern werden. Diese Prinzipien sind heute in vielen Softwarepaketen umgesetzt. Von dieser Warte her betrachtet – und dies gilt keineswegs nur für Multimediaprodukte – schmelzen unsere globalen Buchbestände in den Bibliotheken wie Schnee in der Sonne bezüglich der Umsetzungsrate in digitale Anwendungsformen (Software).

Fig. 26 Zusammenhang zwischen Gelände, Geländeansicht, Karte und Geländemodell; nach E. Imhoff, in: (Ogrissek, 1983)



Geodätische Probleme tauchen neben der Festlegung des Basisnetzes 1. bis n-ter Ordnung vor allem dann auf, wenn Netze unterschiedlicher Bezugspunkte zusammengeführt werden sollen. Bezugspunkte sind willkürlich festgelegte Nullhöhenmarken für das Landeshöhennetz (Höhenfestpunkte) und heißen fachsprachlich „Pegel“. Unübersichtlich wird dieses Grundproblem weiterhin durch die Fülle von existierenden Erdfigur-Konstruktionen, die auf definitorischen Unterschieden verschiedener Rotations-Ellipsoiden beruhen. Die Problematik der Koordinatentransformation (Koordinatenart/Datum/Rotations-Ellipsoid) ist heute ein Hauptzeit-/kostenfaktor beim Aufbau GIS-gestützter Datenbanken mit historischem Kartenmaterial. Sie rührt im Wesentlichen daher, dass notwendige Angaben bezüglich der verwendeten Koordinatensysteme nicht weitergegeben bzw. ermittelt werden. Ursache hierfür ist heute im universitären Umfeld die rasche Heranführung von Personal aus unterschiedlichsten Disziplinen an GIS-Software, wobei nicht selten einige grundlegende Zusammenhänge aus Kartographie oder Navigation unberücksichtigt bleiben. Resultat dieser Entwicklung sind GIS-Datenprodukte mit unzähligen handkorrigierten Ausgleichsvektoren zur Angleichung der Lagetreue unterschiedlicher Kartenebenen in einzelnen GIS-Layern, die man sich als eine Art transparenter Zeichenfolie vorstellen kann. Damit ergeben sich für die meisten Forschungsarbeiten zwei unangenehme Begleiterscheinungen: a) Bleibt nach einem Weggang des Bearbeiters eines Datensatzes dieser originäre Datensatz noch erhalten, so ist er häufig in sich nicht oder nur bedingt kohärent verfügbar und damit für einen Austausch mit anderen Disziplinen bzw. späteren Gebrauch und Ergänzung praktisch unbrauchbar und b) nicht alle höher aggregierten Datensätze mit mehreren Datenebenen sind mit denselben Fehlern behaftet. Damit ist die gesamte Arbeit von GIS-Experten bei der Integration von geocodiertem Material in gewisser Weise schwer durchschau- und damit nicht sehr gut planbar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich dieses Phänomen in den kommenden Dekaden abschwächen wird.

Ein konkretes und wichtiges Kernbeispiel hierzu (adaptiert aus: (Meckenstock und Wittke, 1998)) stellt die folgende Rechnung dar:

Was passiert mit einem waagrecht gemessenen Streckenzug von 3000 m Länge, der in einem Gebirge in 1500 m N. N. (Normalnull, d.h. Höhe über dem verwendeten Pegel) eingemessen

wurde und nun auf N. N. zurückgerechnet werden soll? Merke: in der Vermessungstechnik sind alle Messungen auf den Meeresspiegel bezogen, also auf Normal-Null (N. N.)!

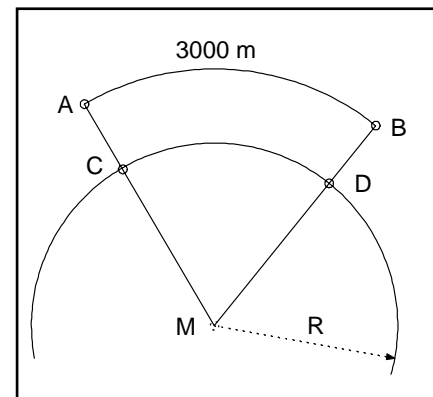
Geg.: $\overline{AB} = 3000 \text{ m}$, Erdradius $R = 6370 \text{ km}$

Ges.: Reduzierte Strecke \overline{CD}

Allg. gilt:

$$\frac{\overline{CD}}{R} = \frac{\overline{AB}}{R + \overline{DB}} \Leftrightarrow \frac{\overline{CD}}{6370 \cdot 10^3 \text{ m}} = \frac{3000 \text{ m}}{6370 \cdot 10^3 \text{ m} + 1500 \text{ m}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\overline{CD} = 2999,29 \text{ m}}}$$



Ergebnis:

Auf N. N. zurückgerechnet ist der in 1500 m Höhe mit 3000 m Länge bestimmte Streckenzug um 0,71 m kürzer.

Im kartographischen Kontext haben sich im historischen Verlauf verschiedene Arten von Kartennetzentwürfen (auch: -projektionen) herausgebildet, die für spezifische (Navigations-)Aufgaben unterschiedlich gut geeignet sind. Man möchte gleichermaßen Längen-, Winkel-, und Flächentreue erreichen, d. h. ohne Verzerrungen maßstäblich wiedergeben. Dies ist aufgrund der Kugelgestalt der Erde nicht möglich, da eine mathematisch definierbare Kugelabwicklung im Sinne einer eindeutigen Abbildung nicht existiert. Daher ist man gezwungen, mit geometrischen Grundkörpern geeignete Kompromisslösungen anzustreben. Im Wesentlichen beruht eine Kartenklassifizierung auf Art der gewählten Projektionsfläche (Kegel-, Zylinder-, Azimutalprojektion), der Lage des Projektionszentrums (geozentrisch, gnomonisch) und der zugrunde liegenden Koordinaten (nautische oder rechtwinklige Koordinaten).

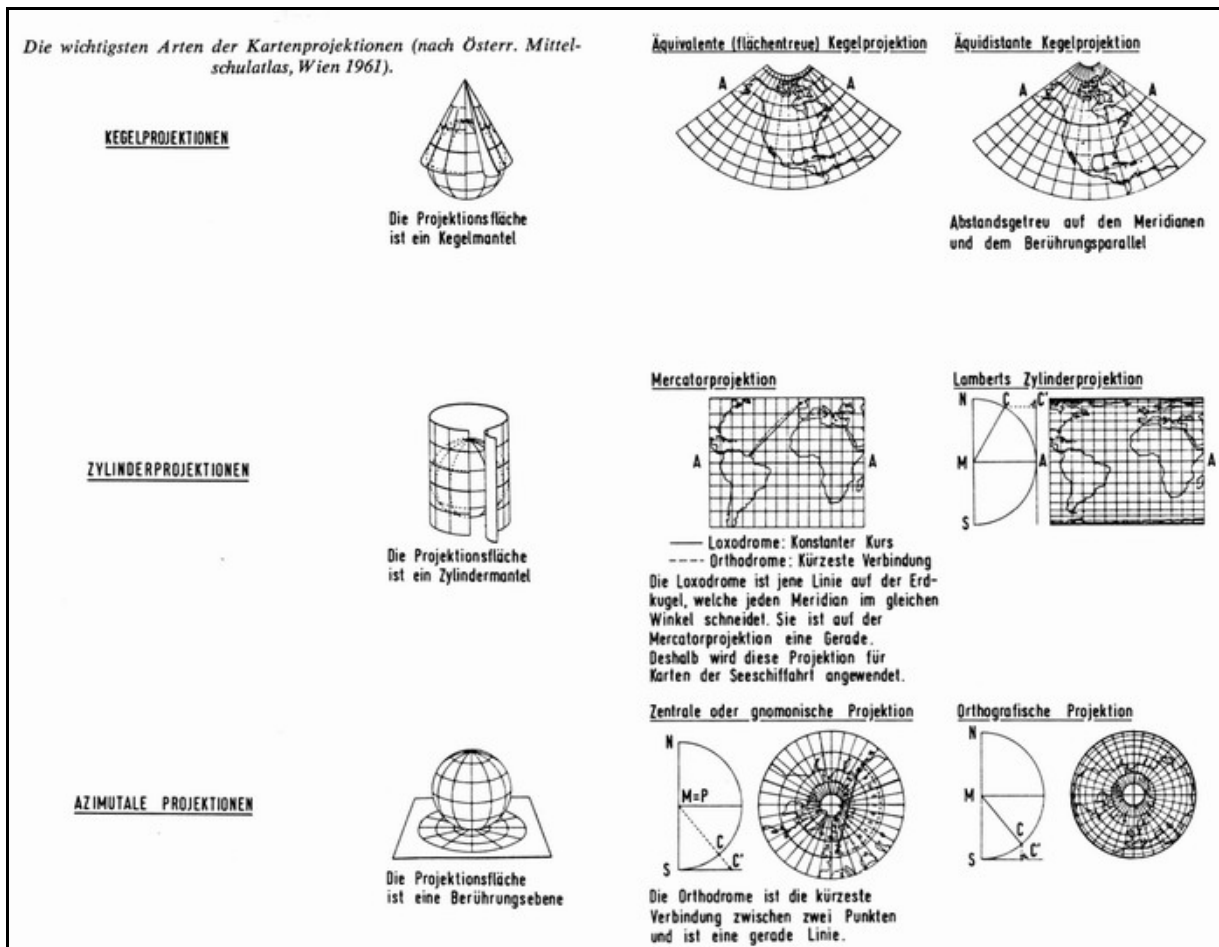
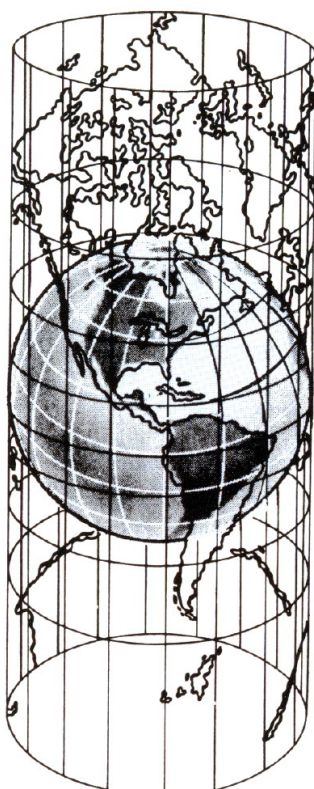


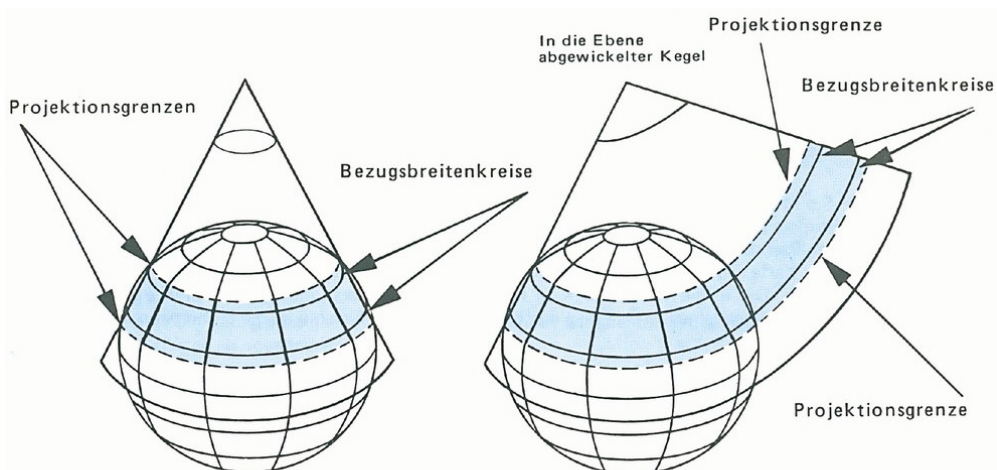
Fig. 27 Wesentliche Kartennetzentwürfe (Ritter und Strzygowski, 1970)



Der berühmteste Kartenentwurf ist die Weltkarte von Gerardus Mercator (flämisch Gerhard Kremer) aus dem Jahr 1569. Auf ihn geht auch der Begriff Atlas für eine Kartensammlung zurück, da es seine Gewohnheit war, den griechischen Titan Atlas mit der geschulterten Welt als Frontispiz auf dem Kartenwerk darzustellen.

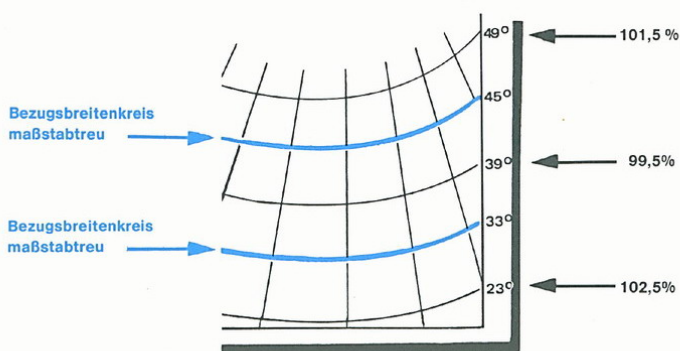
Fig. 28. Mercatorprojektion – besitzt der Projektionszylinder anstelle des Äquators einen Meridian als Berührungskreis (liegender Zylinder), spricht man von einer transversalen Mercatorprojektion; in: (Kühr, 1995a)

Ein weiteres Kartenprojektionsmodell geht auf den elsässer Mathematiker Johann Heinrich Lambert zurück (1728 - 1777), der auch als Erster die Irrationalität der Kreiszahl π bewies. Gemessen an heutigen Standards stellt die Lambertsche winkeltreue Schnittkegelprojektion mit zwei längentreuen Bezugsbreitenkreisen die brauchbarste – da genaueste – Kompromisslösung für navigatorische Zwecke in den mittleren Breiten dar:



Die winkeltreue Schnittkegelprojektion von LAMBERT mit zwei längentreuen Bezugsbreitenkreisen (standard parallels)

Über die beiden Bezugsbreitenkreise hinaus tritt eine Verzerrung auf und der Maßstab vergrößert sich. Die folgende Abbildung zeigt die - zwischen den Bezugsbreitenkreisen (standard parallels) sehr geringe! - Maßstababweichung auf einer LAMBERT-Schnittkegelkarte.



Maßstababweichung auf der LAMBERT-Schnittkegelkarte

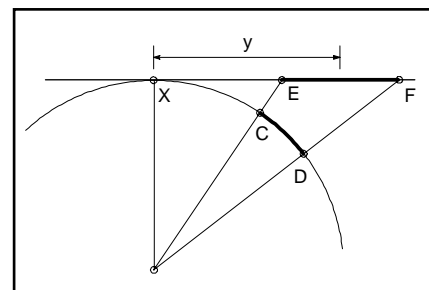
Fig. 29 Die Lambertsche Schnittkegelprojektion inkl. ihrer Maßstabs-Verzerrungen (Kühr, 1995a)

Die Verzerrungen, die sich durch Projektion in ebene Koordinatensysteme zwangsläufig ergeben, sind für die verschiedenen Projektionseigenschaften vorgegeben. Betrachten wir daher ein weiteres grundlegendes Rechenexempel – es bezieht sich auf das häufig verwendete Gauß-Krüger-Koordinatensystem (adaptiert aus: (Meckenstock und Wittke, 1998)):

Geg.: $\overline{CD} = S$, hier: $S = 2999,29 \text{ m}$; bezogen auf N. N.

(vgl. Aufgabe oben)*; mittlere Ordinate $Y = 100 \text{ km}$.

Im Gauß-Krüger-System wird eine projizierte Strecke vergrößert abgebildet, und zwar mit einer umso größeren Verzerrung, je weiter die Strecke \overline{CD} von dem Mittelmeridian, der X-Achse, entfernt liegt. Entscheidend ist also die mittlere Ordinate Y .



Ges.: $\overline{EF} = s$

* Grundsätzliches Prinzip: Geländebezeichnungen werden mit großen Variablen deklariert, Karten- oder Konstruktionskoordinaten mit kleinen! Die Ausnahmen bestätigen die Regel, wie man anhand der nachfolgenden Fig. 30 sieht, die aus der Feder von technischen Zeichnern stammt.

Allg. gilt:

$$r_s = \frac{Y^2}{2R^2} \cdot S \quad \text{Streckenreduktionsformel für das Gauß-Krüger-System, wobei}$$

r_s : Streckenreduktionslänge

$$r_s = \frac{(100 \cdot 10^3 \text{ m})^2}{2 \cdot (6370 \cdot 10^3 \text{ m})^2} \cdot 2999,29 \text{ m} = \underline{0,37 \text{ m}}$$

$$\overline{EF} = \overline{CD} + r_s = \underline{\underline{2999,66 \text{ m}}}$$

Ergebnis:

Unter Berücksichtigung der Streckenreduktion, die im Gauß-Krüger-System die Höhenreduktion teilweise wieder aufhebt, wurde aus der ursprünglichen Streckenlänge 3000 m in 1500 m über N. N. eine wahre Strecke von 2999,66 m Länge.

Man kann, wie aus der nachfolgenden Darstellung hervorgeht, Navigations- und Kartenprojektionsprobleme auch auf vollständig graphischem Wege konstruieren. Dies ist heute jedoch nur noch insoweit gerechtfertigt, als es hilft, das Verständnis für die Zusammenhänge zu wecken oder auszubauen.

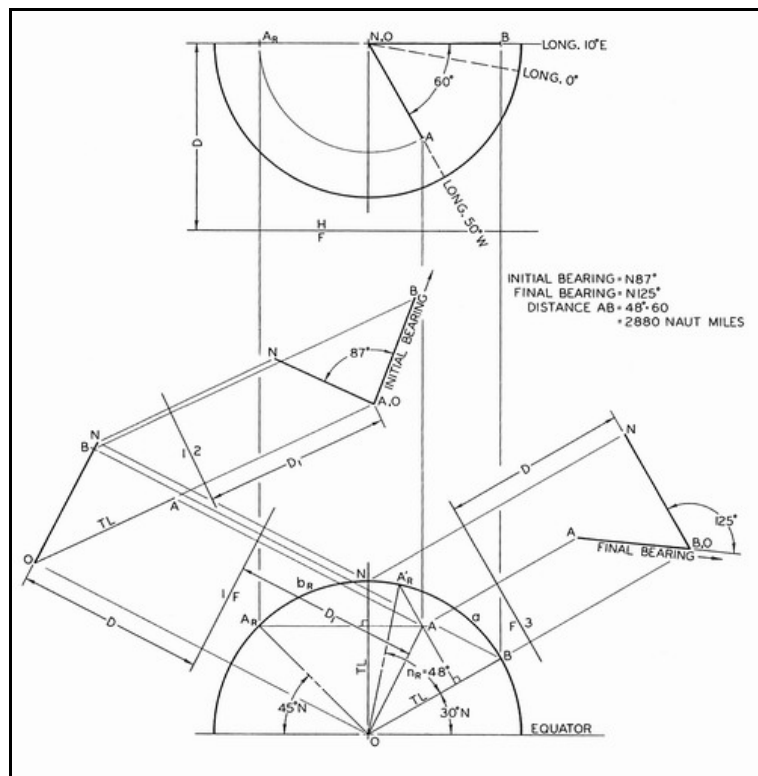


Fig. 30 Graphische Konstruktion eines sphärischen Dreiecks für die Navigation. Geg.: Punkt A ($45^\circ \text{ N } 50^\circ \text{ W}$), Punkt B ($30^\circ \text{ N } 10^\circ \text{ E}$). Ges.: 1. Distanz zwischen A und B, 2. Kurs zu Beginn der Reise, 3. Kurs zum Ende der Reise. (Giesecke et al., 1998)

In der Praxis transformiert der Computer ganze Netzwerktopologien dagegen binnen Sekundenbruchteilen. V. a. bei Verwendung unterschiedlicher Projektionsarten ergeben sich

schnell Koordinatendifferenzen von 200 m und mehr gegenüber einem ursprünglichen GIS-Datensatz, obwohl der oben berechnete Fehler zunächst vernachlässigbar klein aussieht. Soweit zu den historischen Grundlagen der Fragen, wie man sich im Raum Bezugssysteme schafft, diese normiert und darin Positionen bestimmt.

Es ist an dieser Stelle notwendig zu betonen, dass bis an den Rand des Satellitenzeitalters in den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts kaum Notwendigkeit bestand, lokale bis kontinentale Bezugs- und Vermessungssysteme miteinander zu verknüpfen. Historisch betrachtet hatten die meisten Burgen, Kirchen und Städte Planungskarten auf der Grundlage eigener, lokaler Koordinatensysteme. Zwei Hauptimpulse für eine systematisch auszubauende Landesaufnahme sind sicherlich maßgebend gewesen: Zum einen führte die seit dem 16. Jh. betriebene Säkularisation kirchlicher Ländereien sowie systematische Einhegungen zu einer Epoche dramatischer Besitzveränderungen (Adams, 1985); zum anderen revolutionierte der aufkeimende Absolutismus, und speziell damit verknüpft das organisierte Heerwesen, die gesellschaftliche Ordnung gegen Ende des 17. Jh. Das Jahr 1661 wird unter dem prägenden Einfluss von Ludwig XIV. (dem „Sonnenkönig“; schillernde Metapher und Ausdruck eines bis dahin unbekanntem Herrschaftsanspruchs: „Le roi c'est moi.“) als Beginn des Hochabsolutismus betrachtet.

„Mit Hilfe des Merkantilismus sollten der Reichtum des Staates gefördert, und damit die Staatskassen gefüllt werden. Eine zentralistisch aufgebaute Bürokratie, das stehende Heer und ein gut funktionierendes Steuersystem stellten die Stützen des absolutistischen Staates dar. [...] Bei allen Veränderungen im Bereich der Verfassung ließ der Absolutismus in der Regel die ständisch gegliederte Gesellschaft unangetastet. Die Leibeigenschaft wurde, bis auf wenige Ausnahmen, nicht aufgehoben. [...] Dem Adel kam in der Landwirtschaft nach wie vor eine bedeutende Rolle zu: in der ostelbischen Gutswirtschaft, im englischen Großgrundbesitz und auf den italienischen Latifundien. Nur teilweise war er hier bürgerlicher Konkurrenz ausgesetzt, wie etwa in Frankreich, wo in zunehmendem Maße das Bürgertum als Agrarunternehmer auftrat.

Das Bürgertum erlebte in Europa ganz unterschiedliche Entwicklungen. Während in England eine relativ offene Elite entstand, die in vielfältiger Weise als Kaufleute, Gewerbetreibende und Agrarunternehmer ökonomisch aufstieg, versuchte ein Teil der französischen Bourgeoisie die adlige Lebensweise anzunehmen und von einem Renteneinkommen aus Landbesitz und Ämtern zu leben. In Deutschland kam es, insbesondere in der Zeit des aufgeklärten Absolutismus [Höhepunkt mit Friedrich. II v. Preußen, um 1770, Anm. d. Verf.] zur Bildung eines bürokratischen Bildungsbürgertums. Gegen Ende der Epoche ist allgemein ein Anwachsen der Unterschichten in den Städten zu beobachten. London und Paris wuchsen zu riesigen Metropolen heran. Die Pauperisierung großer Massen des Stadtbürgertums bildete ein Problem, das erst durch die Auswanderung und die Industrialisierung eine Lösung fand.“ (Müller, 1996)

1719 wurde in La Fere die erste Artillerieakademie Europas durch Ludwig XIV. eingerichtet. 1722 gründete England die Royal Naval Academy in Portsmouth und 1741 die Royal Military Academy in Woolwich. Sie dienten dazu, „mathematischen Analphabeten“ praktische Fähigkeiten bei der Anwendung von messtechnischen und geometrischen Prinzipien im Felde lehrbuchmäßig zu vermitteln, wie sie für die zunehmende

Maschinisierung des Militärwesens erforderlich schienen. Das französische Artillerieregiment mitsamt seinen technischen Offizieren war erst 1671 formiert worden, und stellen somit eine Europäische Novität an der Schwelle zur Neuzeit dar.

“Voltaire hob es wie eine Sensation hervor, daß sich ‚das Artillerieregiment‘ durch diese Maßnahmen ‚schließlich im Besitz von Offizieren (sah), die beinahe alle befähigt waren, eine Belagerung richtig zu leiten.‘“ (Adams, 1985)

Belagerungen sind jedoch in Europa bis ins 14. Jh. nachzuweisen. Wer hatte also bis dahin über die dazu erforderlichen Kenntnisse verfügt?

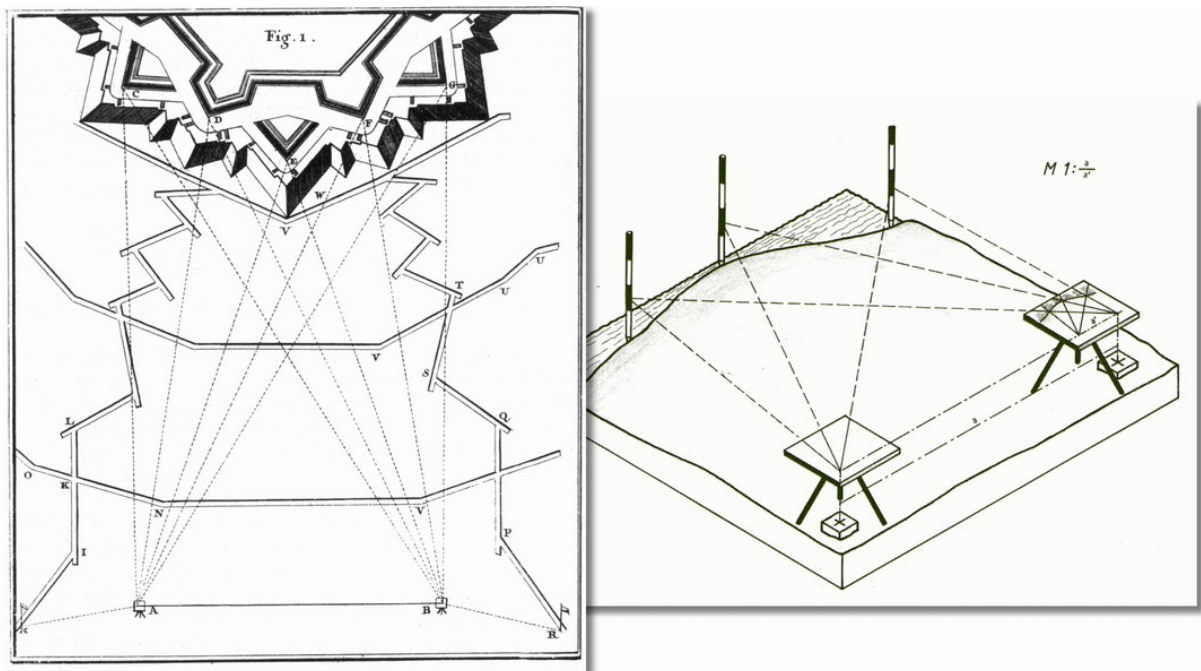


Fig. 31 Beispielanwendung des Messtisches für die Vermessung unzugänglicher Befestigungsanlagen (nach I. Landmann, Royal Military Academy Woolwich, Ende 18. Jh.; in: (Adams, 1985); aus der Darstellung rechts geht hervor, dass sich der Darstellungs-Maßstab aus dem Quotienten der Distanz der Messtisch-Aufstellungsorte und der Basislänge der Zeichenstrecke im Messtischblatt ergibt. in: (Fuhrer, 1998)

An dieser Stelle verläuft die Entwicklung ganz anders, als es der historisch Unbedarfte erwarten würde:

„Die Artillerie wurde bis dahin nicht von Soldaten zum Einsatz gebracht, sondern von denen, die die Geschütze herstellten, also von den „Stückegießern“, Handwerksmeistern der Büchsenmacherzunft. Die Arbeitsteilung innerhalb dieser Zunft schlug sich dabei soweit nieder, daß beispielsweise im Deutschland des 16. und 17. Jhdts. die einzelnen Geschützgattungen von den Meistern kommandiert wurden, in deren zünftige Zuständigkeit ihre Herstellung fiel: Es gab „Feuerwerker“ (zuständig für Wurfgeschütze wie Mörser), „Kartaunenschützen“ (zuständig für Geschütze schweren Kalibers) und „Schlangenschützen“ (zuständig für leichte Feldartillerie). [...] Mit dem Befestigungs- und Belagerungswesen stand es ähnlich. Auch dies lag in den Händen von Zivilisten, den Festungsbauingenieuren, die freilich keine Handwerksmeister waren. [...] An den Festungsbauingenieuren lässt sich gut das

Problem verdeutlichen, das diesen - aus unserer heutigen Sicht - befremdlichen Zuständen zugrunde lag. Der zur Zeit der Renaissance im Abendland aufkommende Beruf des Ingenieurs zeichnete sich zum einen dadurch aus, daß ihm die Planung und Leitung von Projekten oblag, die nur durch das Zusammenwirken unterschiedlicher handwerklicher Professionen zu realisieren waren. Diese Tätigkeit setzte voraus, die nicht durch die dem Handwerk eigentümliche Form der Tradierung von Wissen und Erfahrungen erworben werden konnten. Reiche praktische Erfahrungen in verschiedenartigen handwerklichen Metiers mußten mit theoretischen Kenntnissen kombiniert werden. ‚Ein jeder‘, beginnt Daniel Specklin (1536-1589) das erste Kapitel seines Werks über Festungsbau, ‚so ein Statt, Schloß, Marckt oder andere Vestungen zu erbawen vorhabens, muß volgender drey Puncten wol wissend und bericht sein, auch gute erkanntnuß haben, fürs erst der Matematica, demnach der Mechanischen kunst, als da seind die Handwercker, Steinmetzen, Maurer, Schreiner, Zimmerleut, Schmid, Schlosser, Wagner. ec. Was in ein Baw gehorig, So dann auch der Materialien [...] fürs drit der jetzigen Kriegsausrüstung, in Schantzen, Schiessen, Geschütze [...]. seitmal auß demselben, die grösse, hohe, dicke, breite und gantz stercke des Bawes genommen, geordnet und angelegt werden muß.‘ [...]

Durch die intellektuellen Voraussetzungen seiner Tätigkeit unterschied sich der Ingenieurberuf generell vom Handwerk, in dem nur ausnahmsweise – wie bei den für die Herstellung wissenschaftlicher Instrumente so entscheidenden Graveuren – theoretische Kenntnisse Berufsvoraussetzung waren; er unterschied sich dadurch aber ebenso vom Kriegshandwerk, für das die Tradierung bloßen Erfahrungswissens so charakteristisch war wie für das zivile. [...] Das Erfahrungswissen war ausreichend, solange die verwendeten Waffen im Wesentlichen wie das Handwerkszeug Ausrüstungen des einzelnen Mannes waren und nicht Maschinen.“ (Adams, 1985)

Diese in der Kriegskunst offenbar sehr tief verankerte Tradition findet man bis weit in die Moderne hinein, wie man anhand der Luftfahrtgeschichte mit einer kuriosen Überlieferung besonders eindrucksvoll belegen kann: Während des Ersten Weltkriegs wurde der bekannte Flugzeugbauer Anthony Fokker bei der Präsentation einer entscheidenden Innovation (des synchronisierten, durch den Propellerkreis eines Jagdflugzeugs schießenden Maschinengewehrs) von der deutschen Militärführung gebeten, höchstselbst über der Front aufzusteigen, um die Wirksamkeit seiner neuartigen Waffenanlage durch ein paar Feindabschüsse zu demonstrieren! Ebenso Erstaunliches fördert eingehendere Analyse des historischen, wissenschaftlichen Instrumentenbaus.

„Es ist eine in mehrfacher Hinsicht aufschlußreiche Tatsache, daß die Keimzelle der späteren professionellen Instrumentenmacher das Handwerk der Graveure war. Warum gerade dieses Handwerk? Wenn im Mittelalter ein Gelehrter sich eines der damaligen Instrumente bauen lassen wollte, ging er zum Tischler, Drechsler oder Schmied, entweder mit einem entsprechenden Gerät oder einer Zeichnung als Muster und Vorlage. Der oder die Handwerker bauten ihm das Instrument, allerdings ohne Auftragung der Skalen, Teilungsstriche usw., kurz: ohne die ‚Teilungen‘, wie wir diese Auftragungen im Folgenden nennen wollen. Diese Teilungen mußte damals der Gelehrte selbst auf das Instrument auftragen, natürlich nicht weil er etwa geschickter gewesen wäre als das gesamte Handwerk seiner Zeit, sondern weil damals allein die Leute wie er über die intellektuellen Voraussetzungen für die dafür erforderlichen geometrischen Konstruktionen verfügten. Änderungen brachte hier die Renaissance,

als sich die darstellende Kunst der geometrischen Konstruktion zu bedienen lernte – man denke an die Zentralperspektive [z. B. die grundlegenden Studien Albrecht Dürers, Anm. d. Verf.] – und dies seinen Niederschlag auch unter den handwerklichen Graveuren fand, bei denen nicht in erster Linie an Verzierer zu denken ist, sondern an Holzschnneider und Kupferstecher. [...] Im 16. Jahrhundert lieferte der Gelehrte, von dem damals allein Innovationen im Instrumentenbau ausgingen, nur noch den Entwurf eines Instruments, dessen vollständige Fertigung nun vom Handwerk durchgeführt wurde. Die einfache Mechanik der wissenschaftlichen Instrumente des 16. und 17. Jahrhunderts ermöglichte es, daß sich die Graveure über die Teilung der Instrumente hinaus mit ihrem Bau vertraut machen konnten und allmählich für alle Fragen der Instrumentenherstellung kompetent wurden. War der Graveur der wichtigste handwerkliche Partner des gelehrten Instrumentenerfinders, so brachte ihn sein eigentlicher Beruf, die Fertigung von Holzschnitten oder Kupferstichen, in Kontakt mit Landvermessern, Seefahrern, mathematischen Geographen und Astronomen, und zwar im Zusammenhang mit der Herstellung von Land-, See- und Sternenkarten. So sind zum Beispiel die ersten bekannten englischen Instrumentenmacher, der im letzten Viertel des 16. Jahrhunderts wirkende Augustine Ryther und der an der Wende zum 17. Jahrhundert arbeitende Charles Whitwell, fast berühmter wegen ihrer Karten als wegen ihrer Instrumente.

In ihrer Doppelrolle als Kartenstecher und Instrumentenmacher wurden die Graveure zu einem Zentrum und Vermittlungspunkt zwischen einerseits den mehr theoretisch orientierten Mathematikern, Geographen und Astronomen und andererseits den ‚practitioners‘, den sich im 17. Jahrhundert herausbildenden praktisch-mathematischen Berufen, Landvermessern, Navigatoren usw., deren Handwerkszeug die mathematischen Instrumente waren. So berichtet beispielsweise Robert Hooke (1635 - 1703) [derselbe, der für das erste Spiegelfernrohr nach dem Gregory-Prinzip – 1674 – und des Illustrationsbandes „Micrographia“ – 1665 – als Resultat systematischer Mikroskop-Beobachtungen verantwortlich zeichnet, und darüber einer der Mitbegründer der modernen Evolutionstheorie geworden ist; Anm. d. Verf.] hinsichtlich der Anläufe zur Standardisierung des Längenmaßes in England: ‚... der Standard-Fuß, den wir [...] benutzen, war seit damals [...] von einem Club unserer Hersteller mathematischer Instrumente verabredet worden, dessen Chef Mr. Elias Allen war.‘“(Adams, 1985)

Bis zu dieser Stelle liefert die geschichtliche Zusammenschau lediglich eine Ausgangsbasis, eine theoretische Grundlage für die massiven technischen Umwälzungen, die mit dem 20. Jh. einhergehen. Allein mit der Geschichte der Luftfahrt könnte man eine umfangreiche Bibliothek füllen. Deshalb wollen wir uns im Folgenden auf einige bemerkenswerte Abschnitte dieser Entwicklung konzentrieren, die üblicherweise nicht zu lexikalischem Wissen umgesetzt werden. Mit in diese Linie sollen die Geschichte der Fotografie und der Photogrammetrie hineingeflochten werden, ehe wir zu einer Schlüsselmethodik für den wissenschaftlichen Messflug vordringen: der Luftbildarchäologie. Darauf folgt für den ersten historischen Analyseteil der vorliegenden Arbeit der alles dominierende Kulminationspunkt an der Schwelle des 21. Jhdts.: die umfassende, da alle Lebensbereiche gleichermaßen tief greifend verändernde, digitale Revolution. Darin eingebettet werden einige moderne geographische Konzepte vorgestellt.

Die Fliegerei verzeiht, im Gegensatz zu den meisten übrigen Betätigungsfeldern kaum persönliche Fehlentscheidungen, organisatorische Mängel und Materialfehler. Entsprechend beschwerlich war der Weg der Menschheit bei der verkehrstechnischen Erschließung der dritten Dimension. Solange ein Fluggerät technisch einwandfrei fliegt, ist es schwer, ohne massive äußere Störungen in eine echte Notlage zu geraten. Geht jedoch etwas schief, so steigert sich eine ungewollte Entwicklung der Situation in wenigen Minuten oder gar Sekunden bis zur Katastrophe.

Wir kennen alle den Sturz des Ikarus in der griechischen Mythologie. Den wenigsten Menschen dürfte allerdings die Tatsache bekannt sein, dass im Jahr 843 v. Chr. der erste historisch verbrieft Menschen-Versuchsflug mit einer Flügelkonstruktion aus Federn stattfand, der tödlich für den Aspiranten ausging. Es handelte sich dabei um den „...im Athen der vorhomerischen Zeit in die Kunst der Totenbeschwörung eingeführten legendären englischen König Bladud^{*}, den seine Untertanen töteten, als er versuchte von einem hochgelegenen Punkt auf London niederzuschweben;...“ (Seelmann, 1973)

470 - 391 v. Chr. lebte der chinesische Philosoph Mo-Ti, der den Flugdrachen erfand. Selbst der Flugdrachen hatte seine militärische Verwendung, als er ab 169 v. Chr. zunächst für Distanzmessungen zur Bewegungslenkung von Truppen eingesetzt (General Han Sin), und ab etwa 600 n. Chr. für die signaltechnische Befehlsübermittlung verwendet wurde. Um 1020 n. Chr. wurde ein englischer Benediktiner-Mönch durch einen Flugversuch vom Kloster Malmesbury als Oliver von Malmesbury („The Flying Monk“) historisch aktenkundig. Der Sprung endete mit einem Beinbruch. 1042 n. Chr. berichtet Tseng Kung Liang, wie man chinesische Schießpulver-Raketen im Krieg verwendet.

Die ersten Flugmodelle finden sich bereits früh in der Historie: In einem flämischen Manuskript um etwa 1325 n. Chr. ist beispielsweise ein aus beweglichen Teilen zusammengesetzter Modellhubschrauber mit Aufziehschnur abgebildet, während eine andere Darstellung aus dem Jahr 1460 einen Spielzeughubschrauber zeigt. 1250 verfasst Roger Bacon, ein englischer Franziskaner-Mönch, ein Buch mit dem Titel „Secrets of Art and Nature“, das die erste bekannte Beschreibung einer Flügelschlagmaschine enthält („artificiall Wings made to beat the Aire“). Das Werk wurde erst 1542 veröffentlicht. Wir nennen heute Flügelschlagmaschinen „Ornithopter“ und wissen, dass sie ausnahmslos flugunfähig sind, da ausschließlich für den Flug mittels Menschenkraft konzipiert. Menschenkraftgetriebene Fluggeräte finden wir heute lediglich in der Form pedalgetriebener Luftschauben und mylarbespannter Minimaltragwerksskelette. Flugzeuge dieser Art verlangen jedoch von dem Piloten eher das körperliche Anforderungsprofil eines Radrennsportlers. Im 14. Jh. beobachteten Marco Polo, sein Vater und ein Onkel manntragende Drachen in Cathay (China), die von Matrosen eingesetzt werden. Aus dem Jahr 1326 datiert eine europäische Abbildung, die feuerbombentragende Drachen mit 3-Mann-Bodenbedienung bei der Belagerung einer befestigten Stadt zeigen (Walter de Milimete). Um 1420 entsteht der Entwurf des ersten raketentriebenen Flugzeugs (in Gestalt eines Vogelmodells) von dem Italiener Joanes Fontana. Zwischen 1483 und 1497 entwirft das bekannteste „Universalgenie“ der Renaissance, Leonardo da Vinci, Studienmodelle zu Fallschirm, Ornithopter, Helikopter und luftschraubengetriebenem Flugzeug.

* 9. Herrscher Britanniens; aus dem mächtigen Stamm der Trinovanten, die nördlich und nordöstlich vom heutigen London siedelten [korrigierte Fassung einer Falschdarstellung in (Taylor, 1999)]

1644 legt Torricelli mit der Erfindung des Quecksilber-Barometers den technischen Grundstein für die Erforschung der Druckverhältnisse in der Atmosphäre. 1766 isoliert Henry Cavendish Wasserstoffgas, das er zunächst gemäß einer damals gültigen alchemistischen Lehre Phlogiston benennt, und berichtet der Royal Society, dass dieses Gas viel leichter als Luft sei. Nach systematischen Vorstudien (unbemannte bzw. Versuchstier-Aufstiege) erhebt sich mit dem Heißluftballon „Montgolfière“ der gleichnamigen Brüder Francois Pilatre de Rozier, ein in Metz geborener junger Doktor der Naturwissenschaften (Seelmann, 1973), als erster anerkannter „Aeronaut“ der Geschichte am 15. Oktober 1783 in Paris etwa 26 m in die Luft. Der Flug ist durch Ballonfangleinen gesichert („tethered flight“, „Fesselflug“). Der erste Passagier der Luftfahrtgeschichte, Marquis d’Arland, steigt etwa einen Monat später zu de Rozier in den Korb und beginnt am Château la Muette zugleich die erste geschichtlich belegte „Luftreise“ von 25 min Dauer. In der großen Pionierzeit der „Aerostaten“, wie Leichter-als-Luft-Fahrzeuge auch genannt werden, kam es häufig zu schweren Unfällen, die größtenteils auf Ballastierungsfehler infolge mangelnder Kenntnis der Zusammensetzung und Eigenschaften der Atmosphäre oder auf technische Probleme im Umgang mit dem hochexplosiven Wasserstoff zurückgeführt werden können. Der wohlhabende Amerikaner John Jeffries war Förderer von Jean-Pierre Blanchard (dem routiniertesten Ballonfahrer seiner Zeit) und kann seit seiner gemeinsamen Ärmelkanalüberquerung von England nach Frankreich am 7. Januar 1785 als ein Pionier auf dem Gebiet der meteorologischen Atmosphärenforschung gelten. 1793 wird das französische „Aerostatic Corps“ der französischen Volksarmee in Meudon unter der Leitung von Captain Coutelle gegründet. Ausstattung: 50 Rekruten und ein 10-m-Trainingsballon für 2 Personen an einer 150-m-Fesselleine. Das Ballongas stammt aus eigener Herstellung nach Geräten, die von dem Chemiker Guyton de Morveau entwickelt wurden. Am 26. Juni 1794 wird der Ballon „Entreprenant“ von Captain Coutelle das erste Mal in der Geschichte für militärische Zwecke in der Schlacht bei Fleurus eingesetzt und erweist sich für den französischen General Jourdan als siegentscheidend gegen die Österreicher. Am 22. Oktober 1797 springt der Franzose André Jacques Garnerin aus 680 m Höhe als Erster mit dem Fallschirm aus einem Ballon ab (am 24. Juli 1808 wird R. Jordarki Kuparanto über Warschau so einen Sprung aus einem brennenden Heißluft-Ballon unfreiwillig wiederholen und damit zum ersten Aeronauten, der einen Rettungsabsprung aus einem in Luftnotlage geratenen Luftfahrzeug durchführt).

1799 zeichnet der spätere Sir George Cayley das richtungsweisende Modell für den aerodynamischen Flug: ein Fluggerät mit festen Tragflächen, einem Kreuzleitwerk und einem separaten Antriebssystem. Er erkennt, dass geeignete Flugmotoren (geringes Leistungsgewicht!) für manntragende Flugzeuge auf absehbare Zeit nicht zur Verfügung stehen werden. Also widmet er sich bald dem Gleitflugzeug. 1804 folgt ein aerodynamisch verbesserter Entwurf mit dem ersten freitragenden Eindecker-Tragflügel (Monoplane). 1809 baut er ein Großmodell eines Gleiters und startet es unbemannt. Spätestens 1849 geht er mit diesem Flugmodell als „Vater der Schwerer-als-Luft-Fluggeräte“ in die Geschichte ein nach einem erfolgreichen, bemannten Testgleitflug mit einem kleinen Jungen an Bord. 1853 wiederholt dieses Experiment sein Kutscher, der die berühmt gewordene Bemerkung macht, er werde eigentlich fürs Fahren, nicht fürs Fliegen bezahlt.

1804 findet aus naturwissenschaftlicher Sicht heraus ein sehr bedeutendes Ereignis statt: Die beiden Franzosen J.-B. Biot und J.-L. Gay-Lussac unternehmen mit dem Ballon die erste rein wissenschaftliche Messfahrt,

„... wobei sie unter Überwindung großer Schwierigkeiten eine Höhe von mehr als 2000 m erreicht haben [...] (Am Rande sei hier angemerkt, dass Gay-Lussac allein auch bis in eine Höhe von 7000 m aufgestiegen ist.) Bei ihren Messungen haben sie festgestellt, dass die Stärke des erdmagnetischen Feldes bis zu der beim Aufstieg erreichten Höhe im Wesentlichen unverändert bleibt.“ (Simonyi, 1986)

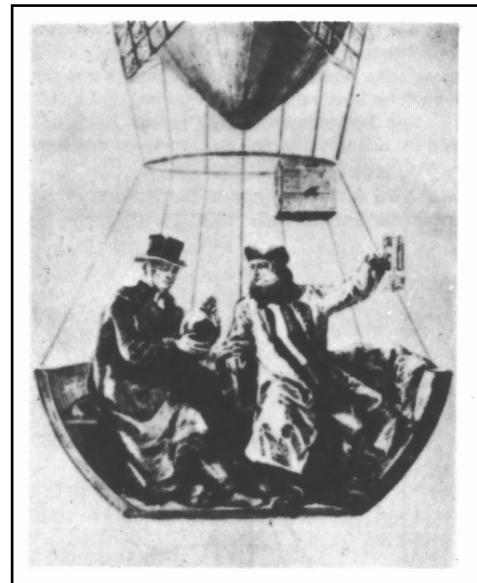


Fig. 32 Ballonaufstieg von Biot und Gay-Lussac zur Messung des magnetischen Erdfeldes (Simonyi, 1986)

Der Berliner Prof. Wilhelm Jungius setzte diesen Ansatz 1805 erfolgreich fort, aber es dauerte noch bis 1932, ehe der Schweizer Prof. Auguste Piccard den Begriff der „Höhenforschung“ prägte. (Seelmann, 1973)

1805 testet der britische Colonel William Congreve erste selbstentwickelte Artillerie-Raketen in Woolwich (vgl. oben). 1806 werden damit 24 Schiffe der Royal Navy ausgestattet und in einer Seeschlacht während der napoleonischen Kriege vor Boulogne eingesetzt. Die „Congreve-Raketen“ richten schwere Schäden an der französischen Stadt und den gegnerischen Booten an. 1807 erfolgt aus einer Entfernung von etwa 3 km der erste schwere Raketenangriff der Geschichte auf die Stadt Kopenhagen mit insgesamt 24 000 eingesetzten Flugkörpern.

Selbst für breitenwirksame Trendsportarten lassen sich oftmals sehr frühe Belege in der Technikgeschichte finden: 1827 spannte ein Lehrer aus Bristol namens George Pocock einen Wagen vor einen selbstentworfenen Drachen und ließ sich damit von Bristol nach Marlborough ziehen, um die Leistungsfähigkeit seines Entwurfs zu demonstrieren. 1858 nimmt der Zeichner, Schriftsteller und Ballonfahrer Félix Tournachon (gen. Nadar) über Paris von einem Fesselballon aus das erste geschichtlich verbriefte Luftbild auf. 1860 wird von dem Franzosen Etienne Lenoir der Gasmotor erfunden. 1861 setzt der Amerikaner Thaddeus S. C. Lowe aus dem dem Ballon „Enterprise“ die erste telegraphische Nachricht von Bord eines Luftfahrzeugs ab*.

„T.S.C. Lowe wird zum Chefaeronautiker der Potomac-Armee im Amerikanischen Bürgerkrieg berufen. Im Juni 1861 steigt er über Virginia auf und erstattet dem Nordstaaten-General McDonald einen völlig zutreffenden Bericht über die Stellungen der Rebellentruppen. [...] Er benutzte ein auf dem Potomac operierendes Schiff als Ballonträger ...“ (Schreyer, 1967).

Das amerikanische „Army Balloon Corps“ umfasst 5 Ballone und 50 Mann Bedienungspersonal. Während des amerikanischen Unabhängigkeitskrieges wird der Ballon

* Der Beginn des heutigen Flugfunks datiert dagegen auf das Jahr 1911 mit dem praktischen Nachweis durch den Amerikaner McCurdy. Diese Entwicklung wiederum war erst mit dem Wirken Marconis möglich, der 1901 erstmalig den Atlantik morsetechnisch überwand.

in den Schlachten von Fair Oaks (1862) und Chancellorsville (1863) für die Artilleriebeobachtung eingesetzt, bevor das Ballonregiment 1863 wieder aufgelöst wird.

1865 - 1872 arbeitet der Österreicher Paul Hämlein an einem Gasverbrennungsmotor mit 4 horizontal gegenüberliegenden Zylindern. Er zeigt damit das Prinzip des modernen Boxermotors auf. 1867 sichern sich J. W. Butler und E. Edwards das Patent auf ein motorisiertes Luftfahrzeug mit deltaförmigen Tragflächen. 1870 etabliert die Preußische Armee zwei Luftschifferabteilungen für den Kriegseinsatz gegen Frankreich. Die Einheiten werden interessanterweise von Henry Coxwell, einem Engländer, organisiert, verschwinden aber rasch wieder von der Bildfläche. (Erst 1885 sollte noch einmal eine Preußische Luftschifferabteilung in Berlin-Schöneburg für weitere vier Jahre folgen. Eine Bayerische Luftschiffer-Abteilung schließt im Jahre 1890 an und bleibt den gesamten Ersten Weltkrieg hindurch bis 1919 bestehen.)

Mit der erfolgreichen Flucht im Ballon von Jules Durog zum 23. September 1870 beginnt das von den Preußen belagerte Paris ein „Ballon-Notbauprogramm“. Bis zum 28. Januar 1871 werden nicht weniger als 66 Ballonflüge mit insgesamt 155 Passagieren und 3 Mill. beförderten Briefen verzeichnet. Es ist die erste „Luftbrücke“ der Geschichte. Nur 7 Ballone verdriften und 2 widerstehen feindlichem Gewehrfeuer. Im Oktober 1870 erfindet der Chemiker Barreswill den Mikrofilm, der es erlaubt, Nachrichten mittels Brieftauben ins belagerte Paris zu senden.

1871 wird in England von F.H. Wenham und John Browning der erste Windkanal gebaut.

1873 stürzt nach nur 41 NM der sehr groß dimensionierte Gasballon von John Wise bei einem von der New York Daily Graphic gesponsorten Versuch ab, den Atlantik erstmalig zu überqueren.

1876/77 patentiert Nikolaus Otto seinen revolutionären Viertaktbenzinmotor, den er bereits 1861 erfunden hat. 1885 konstruiert Gottlieb Daimler, vormals Angestellter im Otto-Motorenwerk, zusammen mit Wilhelm Maybach einen ersten eigenen, kleinen schnelldrehenden Viertaktmotor mit Benzinvergaser. Die Arbeit gipfelt, zusammen mit den Beiträgen von Karl-Friedrich Benz, in der Entwicklung des Automobils (1889). Letzterer verwendet außerdem den ersten Einzylindermotor als Antrieb für ein Motorrad. Das erste Motorrad war ein motorisiertes Fahrrad von Daimler und Maybach (1885). Maybach wird ab 1909 Luftfahrtmotoren für Zeppeline bauen. 1892 reicht Rudolf Diesel seine ersten Patentschriften für den Dieselmotor ein. Der Dieselantrieb wird zunächst für die Ausstattung der Marinekampfschiffe im großen Maßstab adaptiert, später bildet er die Grundlage für den Traktor als landwirtschaftliches Arbeitsgerät.

1889 schließlich erscheint von dem deutschen Otto Lilienthal eine bahnbrechende Abhandlung namens „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“. In dieser Schrift fasst er seine Beobachtungen zum Flug von Störchen zusammen und legt die phänomenologisch gewonnenen Erkenntnisse in Skizzenform dar. Beispielsweise beschreibt er die Flugbahnen und Flügelbewegungen von Storchflügeln während eines Fluges und unterteilt diese Flügel – in ingenieurtypischer Manier – in Zonen unterschiedlicher Wölbung. Seine Ideen führen ihn zur Frage nach den Eigenschaften von Tragflügelprofilen und zum Aufbau von Versuchsanordnungen zur Messung von deren Auftrieb und Widerstand. Lilienthal wird

damit zum Begründer der modernen Aerodynamik* Ab 1891 fliegt er zwei doppelflächige und fünf einflächige Gleitflugzeuge sehr erfolgreich. Es sind hölzerne Apparate mit Tuchbespannung nach Ideen von Cayley. Sie lassen sich zum Transport und zur Sicherung vor Unwettern in nur 2 min zusammenfallen. Am 9. August 1896 stürzt er nach über 2000 erfolgreichen Gleitflügen in den Rhinower Bergen bei Berlin ab und erliegt am nächsten Tag seinen Verletzungen. Zu jener Zeit war Lilienthal zwar einer der eifrigsten und am systematischsten arbeitende Forscher beim Lösen des Flugproblems, doch war er nicht der Einzige, der sich bei seinen Forschungen eng auf die Naturbeobachtung stützte.

Schon 1833 zeigte sich Charles Darwin bei Kap Horn beeindruckt von dem unwirklichen Geschick der Albatrosse in stärksten Sturmböen ruhig über die schwere See dahinzugleiten. Damals bedeutete es in den Augen der Seefahrer Unglück einen Albatross zu töten, da es immer wieder zu Beobachtungen verzweifelter Seeleuten kam, die mit zerfetzten Segeln zu kämpfen hatten, während diese Vögel mit unverständlicher Ruhe bei Windgeschwindigkeiten von 100 km/h und mehr um die hilflosen Schiffe kreisten. Kein Wunder, dass man dem Albatross im Laufe der Zeit magische Kräfte zuzusprechen begann.

„Als Kapitän Marie LeBris, fasziniert von den Vögeln, im 19. Jahrhundert einen Albatros erlegte und den Flügel in die Brise hielt, war er von dem Auftrieb so überrascht, dass er ‚plötzlich das ganze Geheimnis des Fliegens durchschaute‘. Später baute er in der Bretagne aus Holz und Stoff ein ‚geflügeltes Boot‘[†], das er – natürlich – auf den Namen Albatros taufte. An einem Sonntag des Jahres 1856 wurde das Gefährt auf einen Pferdewagen geladen und im Galopp bergab gezogen. Das Flugzeug – mit LeBris am Steuer – stieg hundert Meter in die Luft. Für die moderne Luftfahrt fehlte nur noch ein Motor, der ein solches Flugzeug antreiben könnte.“ (Safina, 2004)

Die folgende Textpassage zielt darauf ab, das entscheidende personelle Netzwerk auf dem Weg zum Motorflug abzubilden.

„In England und Amerika hatte man sich inzwischen eifrigst mit der Verfolgung der Lilienthalschen Gedanken beschäftigt. In England war es besonders der Marine-Ingenieur Percy Sinclair Pilcher, der bereits im Jahre 1894 sich von Lilienthal einen

* 1627 hatte der Tübinger Herrmann Flayder das erste Buch über Fragen der Luftfahrt veröffentlicht, das neben Wortbeschreibungen für damalige Verhältnisse auch auffallend genaue Berechnungen enthielt. Über 150 Jahre später (1781) lieferte Karl Friedrich Meerwein die erste brauchbare Berechnung eines Tragflügels. „Genau 370 Jahre vorher hatte es bei Leonardo da Vinci geheißen: »Beachte, wie der *Schlag* der Adlerflügel gegen die Luft ausreicht...« Im Buch Lilienthals hieß es: »Beobachte den *Gleitflug* der Störche...« Von dieser Voraussetzung ausgehend, führte der Berliner Ingenieur nach zehnjähriger Versuchsarbeit als Erster nach einem fast vierhundertjährigen Weg den Gedanken der starren Tragflächen wissenschaftlich zur Unwiderlegbarkeit.“ (Seilmann, 1973)

† 16m Spannweite, ca. 20m² Flächeninhalt, 41kg Masse, aufrecht stehender Pilot in kanuförmigem Rumpf. Angeblich soll das Flugzeug 100m hoch und die doppelte Strecke weit geglitten sein. Es existieren zwei historische Buchquellen dazu. Die Aussagen darin klingen etwas überhöht und werden zumindest bezüglich der genannten Flugleistung angezweifelt. An der Existenz eines zweiten Entwurfs von LeBris (1867) besteht dagegen keinerlei Zweifel, da dieser Apparat photographisch dokumentiert worden ist. Die unbemannte, ballastierte Maschine wurde jedoch durch eine Windbö am Boden völlig zerstört, worauf die Versuche mangels Finanzierung eingestellt wurden. Le Bris gilt als einer der Ersten einer längeren Reihe von Seefahrern, die über Vogelbeobachtungen zur Entwicklung von Gleitflugzeugen inspiriert wurden. (Wissmann, 1979) Die Zitate zum Albatross wurden in diese Betrachtung mit eingeführt, weil sich bei der bionischen Vergleichsbetrachtung erstaunliche Parallelen zu heute verfügbaren Hochleistungs-Motorseglern und der Anatomie dieser Vögel aufzeigen und quantifizieren lassen.

Flugapparat kaufte, mit dem er zahlreiche Versuche anstellte. Naturgemäß kam er hierbei auch zur Entwicklung selbständiger Ideen, und er konstruierte sich, nachdem er verschiedene Versuche mit dem amerikanischen Kastendrachen von Hargrave angestellt hatte, mehrere eigene Apparate, die sich namentlich durch größere Stabilität auszeichnen sollten als ihr deutsches Vorbild. Die Versuche mit Drachen führten Pilcher dazu, seine Apparate an einer Schnur auszuprobieren. Er ließ eine 300 Meter lange Leine an dem Drachenflieger befestigen und durch galoppierende Pferde unter Benutzung einer Flaschenzug-Übertragung gegen den Wind anziehen. Sobald nun der Flieger unter der Drachenwirkung hoch in der Luft schwebte, legte der Luftschiffer seinen Körper langsam vor, schnitt die Halteleine durch, um alsbald, in sanft absteigender Bahn gleitend, wieder zur Erde niederzukommen. Auch eine mit einem 4 PS Petroleummotor versehene Flugmaschine hatte er gebaut.

In Amerika haben die Lilienthalschen Versuche besonders bei [dem sehr angesehenen Eisenbahningenieur – Anm. d. Verf.] Octave Chanute Verständnis geweckt. [...] Sein Interesse für die Luftschiffahrt ist auf die Jahre 1876 und 1878 zurückzuführen. Zu jener Zeit sammelte er alle Projekte über Luftschiffahrt, deren er habhaft werden konnte. Da er aber durch seine Berufstätigkeit außerordentlich in Anspruch genommen war, steckte er das neue Studium eines Tages wieder auf, band alle Schriftstücke zu einem Bündel zusammen und legte sie beiseite. [...] Erst 11 Jahre später gewann er wieder Zeit, sich mit seiner alten Lieblingsidee zu beschäftigen. Er machte eine Studienreise nach Europa, deren Ergebnis er nach seiner Rückkehr in verschiedenen Vorträgen und Artikeln niederlegte. Damals schrieb Chanute das in Luftschifferkreisen weltberühmte Buch: ‚Progress in Flying Machines‘--Fortschritte auf dem Gebiete der Flugmaschinen--, in dem er eine kritische Übersicht aller bis dahin gemachten Experimente gab. Er war zu der Ansicht gekommen, dass namentlich der Gleichgewichtsmangel ein Haupthindernis aller Fortschritte sei. Sein Streben ging deshalb dahin, diesen Mangel zu beseitigen. Er machte unzählige Versuche mit den verschiedensten Formen von Flächen und kam zu dem Resultat, dass sein Leiter-Drachen, bei dem die Tragezellen durch ein Diagonal-Rahmenwerk in jeden beliebigen Winkel zur Luftströmung eingestellt werden konnten, die besten Resultate ergab. Der einer Trittleiter sehr ähnlich sehende, aus drei kastenförmigen Hargrave-Drachen zusammengesetzte Flieger erwies sich als außerordentlich stabil. Chanute erbaute alsdann einen Gleitflieger in einer solchen Größe, dass ein Mann durch die Fläche getragen werden konnte. [...]

In seinen Veröffentlichungen gab er damals der Ansicht Ausdruck, es sei nötig, bei den Versuchen sehr vorsichtig zu Werke zu gehen, was dazu führte, dass man mit leichtem Hohne ihm vorwarf, dieser Rat sei wohl leicht zu geben, aber schwer zu befolgen. Nunmehr wollte er seine Ratschläge in die Tat umsetzen und baute einen Vieldecker nach dem Prinzip seines Leiter-Drachens, der am Mittelgestell mehrere Paar sich um ihre Achse drehende Flügel besaß, die durch Federkraft in Spannung gehalten wurden. [...] Chanute brachte nacheinander bis zu fünf Paar Flächen am vorderen Teile an, und der Neigungswinkel wurde dadurch verringert, bis er etwa dieselbe Neigung erhielt, wie bei den Lilienthalschen Gleitfliegern. [...]

Im Dezember 1895 gewann sich Chanute die Hilfe des Ingenieurs Herring, der sich schon mehrere Jahre mit aviatischen Versuchen beschäftigte und einen seiner

Lilienthalschen Flieger, die er schon in New York erprobt hatte, für weitere Versuche umbaute. [...] An diesen Apparaten war ein sehr praktischer selbstregulierender Mechanismus angebracht, den Herrings erfunden hatte. Die praktischen Segelflugversuche wurden im Dune-Park im Jahre 1896 ausgeführt. Im Ganzen machten Chanute selbst sowie seine Assistenten, Herring, Avery und Butusoff, etwa 2000 Gleitflüge ohne den geringsten Unfall, wenn auch die Flugmaschine in einigen Fällen leicht beschädigt wurde.

Im Jahre 1902 baute Chanute einen dritten Typ, bei dem das Gleichgewicht durch Vor- und Zurückschwingen der Flügel um ihre Achse gehalten wurde. Dieser Dreidecker hatte ausgezeichnete Resultate und wurde den Brüdern Wright zu Versuchen übergeben. 1904 stellte Chanute zu St. Louis einen Apparat zum Vorwärtsziehen eines Gleitfliegers aus; er hatte dabei die Experimente Pilchers vor Augen, der, wie schon erwähnt, seine Flugmaschine durch Pferde in die Luft fierte. Chanute benutzte zum Hochfahren seiner Apparate einen auf einen Wagen gesetzten Dynamo.

In der Folge gab er aber, als die Brüder Wright immer mehr hervortraten, seine Experimente auf. Einerseits veranlasste ihn hierzu sein hohes Alter [zur Zeit des Entstehens dieses Quelltexts war er 77 Jahre alt! Anm. d. Verf.] und andererseits war er zu den Wrights in nähere Beziehungen getreten und hatte in ihnen Leute schätzen gelernt, die mit großer Energie und Sachkenntnis sich dem Flugproblem widmeten. Ihre mechanischen Vorkenntnisse, ihre große Praxis in der Kleinmechanik und ihre körperliche Behendigkeit befähigten die beiden seiner Ansicht nach, das Werk zu einem durchschlagenden Erfolge zu führen. Er hat ihnen deshalb nach Aufgabe seiner Versuche soviel wie möglich geholfen; er ist ihnen mit dem reichen Schatz seiner Erfahrungen beigesprungen und bei ihren Berechnungen behilflich geworden. Später, als man den Mitteilungen über die Erfolge Wrights nirgends Glauben schenken wollte, hat er sich durch Wort und Schrift bemüht, ihnen die verdiente Anerkennung zu verschaffen. Wenn in der Geschichte der Luftschiffahrt das Wirken der Wrights gewürdigt wird, so darf man keinesfalls den Namen Chanute dabei vergessen, der in selbstloser Weise im Interesse der Flugtechnik gewirkt hat.“ (Hildebrandt, 1909)*

Die Wrights mussten für die Entwicklung des Motorflugs den beschwerlichen Weg der Segelapparate gehen, um darauf aufbauen zu können. Ihre Erfahrungen als Fahrradfabrikanten sollten sich für diese fertigungstechnische Hürde bei der Entwicklung solcher Apparate als überaus wertvoll erweisen. So „wurden im Jahre 1902 etwa 1000 Flüge unternommen, deren längster bei einer Flugdauer von 26 Sekunden eine Strecke von 622,5 Metern betrug.“ (ebd.)

Am Ende des Jahres 1903 erfolgte schließlich der Durchbruch.

* Hauptmann a.D. A. Hildebrandt; vormals Lehrer im Königlich Preussischen Luftschiffer-Bataillon

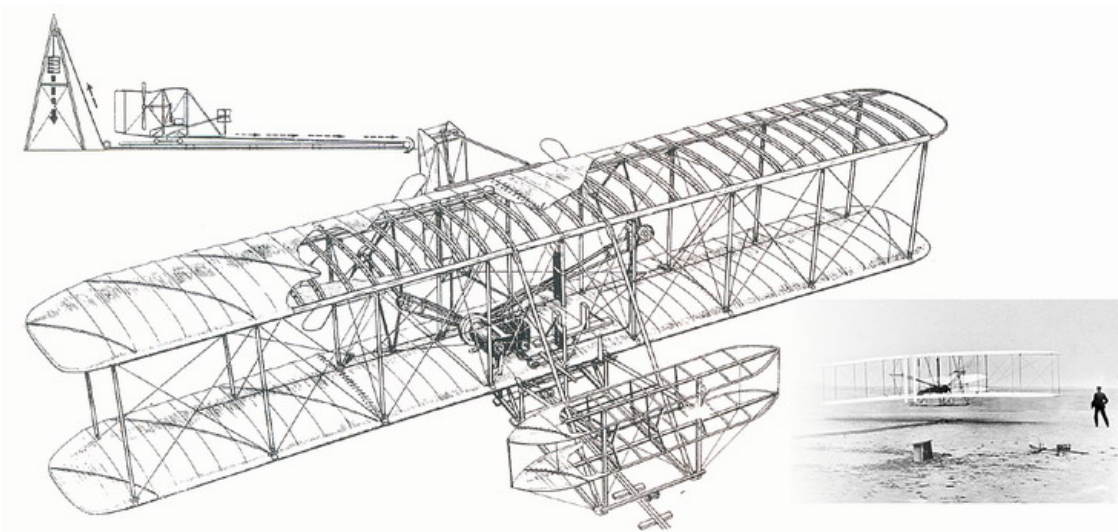


Fig. 33 Der Wright Flyer; Aufriss: (Brinkmann, v.Gersdorff, und Schwipps, 1995); Foto: der erste historisch dokumentierte und koordiniert gesteuerte Motorflug der Geschichte (Encyclopaedia Britannica., 2004)

Erwähnung finden sollte die Tatsache, dass der Wright Flyer aufgrund seiner schwachen Motorisierung anfänglich ein Flugzeug war, das mittels Katapult gestartet wurde – ebenfalls eine Erfindung, die später wieder aufgegriffen und weiterentwickelt wurde, und zwar an Bord von Schiffen (Seeaufklärungs- und Verbindungsflugzeuge) sowie an Bord strategisch operierender Flugzeugträger. Dabei ist anzumerken, dass sich in dem historischen Streit um die Anerkennung des ersten Motorfluges der Geschichte im Falle Gustav Weißkopfs folgende „Kompromisslösung“ herauskristallisiert: Infolge fehlender Wirtschaftskraft und seiner nicht amerikanischen Herkunft ist man im anglo-amerikanischen Sprachraum erst allmählich und widerstrebend geneigt, ihm den ersten „ungesteuerten Motorflug der Geschichte“ zuzubilligen. Die Literatur ist in dieser Hinsicht noch immer völlig uneins und so manches Lexikon verzichtet gänzlich auf einen entsprechenden Eintrag, wohingegen andere Quellen mit Selbstverständlichkeit jener Darstellung folgen, wonach bereits am 14. August 1901 der deutschstämmige Gustave Whitehead nahe bei Bridgeport/Conneticut einen motorgetriebenen Eindecker („No. 21“) in die Luft gebracht haben soll. (<http://www.weisskopf.de/history.htm>, Homepage der "Flughistorischen Forschungsgemeinschaft Gustav Weißkopf" (FFGW)). Ein Auszug aus dem Lebenslauf Weißkopfs berichtet auf derselben Homepage:

„1899 fand er Arbeit in einem Kohlebergwerk bei Pittsburgh. Hier lernte er Louis Darvarich kennen, mit dem er sich anfreundete. Dieser ging Weißkopf beim Flugzeugbau zur Hand. Eine eidesstattliche Erklärung vom 19. Juli 1934 bestätigt, daß Darvarich, als Beteiligter, Zeuge eines exzeptionellen Ereignisses von flughistorischer Relevanz geworden war: "Es war entweder im April oder im Mai 1899, als ich zugegen war und mit Mr. Whitehead (Weißkopf) flog, dem es gelang, seine von einem Dampfmotor angetriebene Maschine vom Boden abzuheben. Der Flug in etwa 8 m Höhe erstreckte sich etwa über eine Meile. Er fand in Pittsburgh statt und zwar mit Mr. Whiteheads Eindecker. Dabei gelang es uns nicht, ein dreistöckiges Gebäude zu umfliegen, und als die Maschine abstürzte, trug ich von dem Dampf schwere Verbrennungen davon, denn ich hatte den Kessel beheizt. Deswegen mußte ich einige Wochen im Krankenhaus verbringen. Ich erinnere mich genau an den Flug. Mr. Whitehead war unverletzt, denn er hatte im Vorderteil der Maschine gesessen und sie von dort gelenkt."

Nicht zuletzt das im historischen Wettstreit unterlegene Antriebskonzept der Dampfmaschine für Flugzeuge dürfte zur schwachen Ausprägung der heutigen Wahrnehmung dieser Pionierleistung geführt haben.

Über alle technischen und finanziellen Widrigkeiten hinaus ist diese frühe Anfangszeit der Fliegerei übersät mit allerlei kuriosen Begebenheiten. So erhielt beispielsweise der Franzose Hubert Latham auf seinem Antoinette-Eindecker nach dem ersten Überlandflug in Deutschland (10 km von Tempelhof nach Johannisthal in 14:31 min) von der preußischen Polizei tatsächlich ein Strafmandat wegen „groben Unfugs“. Die Medien dagegen waren begeistert, dass Latham nicht wie die Wrights ständig „knüppeln“ musste, um das Flugzeug zu pilotieren, sondern sich stattdessen während des Fluges Zigaretten anzündete.

Am 1. Februar 1910 wurde der erste Flugzeugführerschein mit der offiziellen Bezeichnung Nr. 1 für August Euler ausgestellt. „Noch 1912 fühlte sich eine Militärbehörde veranlaßt, Kurven mit mehr als 20° Schräglage als selbstmörderisch zu bezeichnen.“ (Wissmann, 1979)

Am 1. Sept. 1913 flog der als Kunstflieger berühmt gewordene Franzose A. Pegoud erstmals im Rückenflug. Dies geschah aufgrund seiner Erfahrungen, die er sich durch freiwilligen Absprung aus einem einsitzigen Bleriot-Eindecker am 19. August angeeignet hatte. Am 9. September 1913 flog dann der russische Pilot P. N. Nestjerow den ersten „Looping“ (Überschlag). Er erfand diese Figur keineswegs aus Langeweile, sondern versuchte, Steuerfehler während des Fluges systematisch zu erforschen, da bis zu jenem Zeitpunkt bereits einige Flugzeugabstürze auf menschliches Versagen zurückzuführen waren. Am 21. September wagte Pegoud die „Rolle“. Den „Turn“ erfand M. Immelmann als Angriffstaktik im Jahr 1915, während tatsächlich erst im August 1916 der Brite F. W. Gooden sein Flugzeug absichtlich in den Trudelzustand überführte, nachdem er erkannt hatte, dass die Trudelnegung durch ein Überziehen des Fluggeräts erzeugt wird. Sein Rezept für das Beenden ungewollter Trudelzustände wurde weltweit umgehend verbreitet.

Es ist in der 100-jährigen Rückschau erstaunlich, was die Unfallstatistik des deutschen Flugzentrums in der Anfangsphase zu Tage fördert:

Seite 555		„FLUGSPORT“			No. 13		
Vergleichende Darstellung der Flugleistungen auf dem Flugplatz Johannisthal in den Jahren 1911, 1912 und 1913. *)							
		1911	1912	1913			
1.	An wieviel Tagen wurde geflogen?	289	317	336			
2.	Wieviel verschiedene Flieger führten?	134	213	363			
3.	Gesamtzahl der Flüge?	7489	17 651	36 817			
4.	Gesamtdauer der Flüge?	821 Std. 41 Min.	1966 Std. 3 Min.	4096 Std. 48 Min.			
5.	Wieviel Flieger erfüllten die Bedingungen des Führerzeugnisses?	47	98	172			
6.	Wieviel Flieger führten Ueberlandflüge aus?	45	84	212			
7.	Zurückgelegte Kilometerzahl unter Zugrundelegung einer Stundengeschwindigkeit von 70 km für 1911, 80 km für 1912 und 1913?	57 522	157 284	327 760			
8.	Anzahl der Aufstiege pro Flugtag (vergl. Ziffer 1 und 3)?	26	56	110			
9.	Durchschnittliche Dauer eines Aufstieges?	6,5 Min.	6,7 Min.	6,7 Min.			
10.	Durchschnittliche Entfernung, die bei jedem Aufstieg zurückgelegt wurde?	7,6 km	8,9 km	8,9 km			
11.	Wieviel Apparate erlitten nennenswerte Beschädigungen?	63	107	115			
12.	Auf wieviel Flüge kommt 1 Flugzeugbeschädigung?	119	165	320			
13.	Prozentsatz der Flugzeugbeschädigungen (vergl. Ziffer 11 und 3)?	0,84%	0,61%	0,31%			
14.	Wieviel tödliche Unfälle ereigneten sich?	5	5	12			
15.	Prozentsatz der Unfälle mit tödl. Ausgang in bezug auf Ziffer 3?	0,066%	0,028%	0,032%			

*) Die Flüge während besonderer Veranstaltungen sind nicht mitgezählt.

Mehr als hundert Starts täglich weist die Statistik der Flugleistungen in Johannisthal für 1913 aus.

Fig. 34 Luftfahrtstatistik für Johannisthal 1911 - 1913 (Brinkmann, v. Gersdorff, und Schwipps, 1995)

Trotz der vielen technischen und finanziellen Hürden kann diese Übersicht uneingeschränkt als ausgezeichnetes Ergebnis gelten. Jeder 3000ste Flug endete 1913 statistisch betrachtet zwar noch tödlich, allerdings geschah dies zu einem Zeitpunkt, in der Erfahrungen nur spärlich vorhanden waren und weltweit weniger als 10 000 Flugapparate existierten. Dies provoziert einen direkten Vergleich mit den heutigen Verhältnissen. Eine derartige Gegenüberstellung muss allerdings verlustbehaftet bleiben: 10 Jahre nach Kitty Hawk existierte nur eine einzige Schwerer-als-Luft-Kategorie ziviler Luftfahrzeuge, nämlich „einmotoriges Flugzeug“. Heute werden viele unterschiedliche Klassen nach Antrieb, Gewicht und Verwendungszweck kategorisiert. Die folgende Abbildung fasst daher den Gesamttrend für die allgemeine Luftfahrt in Deutschland zur Jahrtausendwende differenziert zusammen.

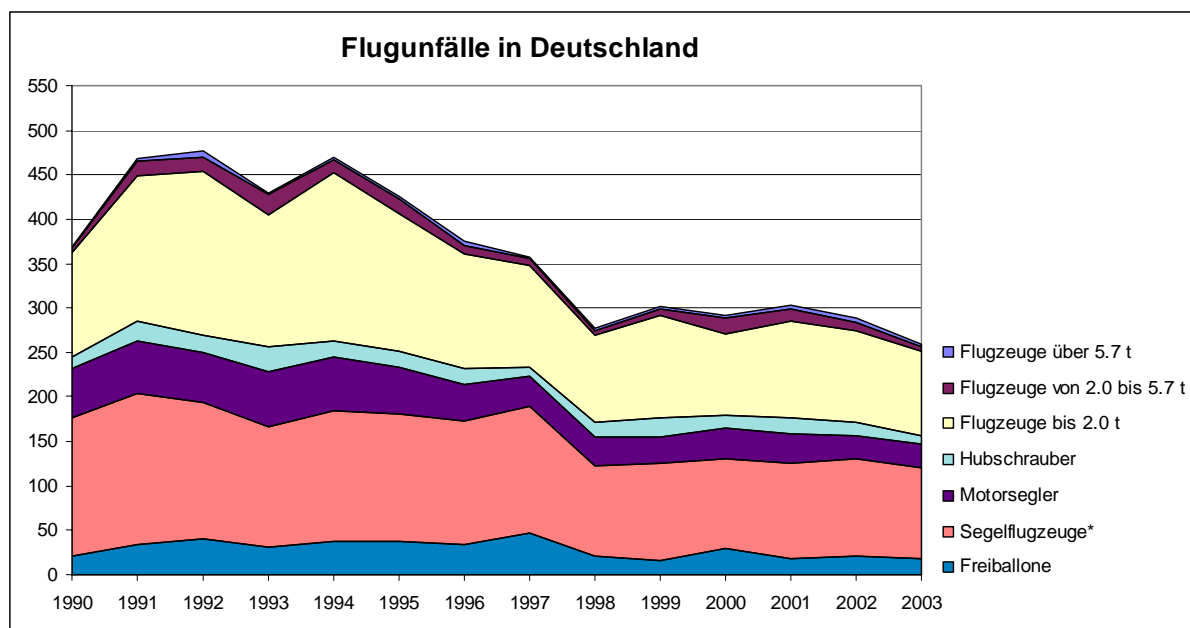


Fig. 35 Kumulierte Anzahl der Flugunfälle im Inland über 14-Jahresperiode; (Quelle: BFU; Material mit freundlicher Genehmigung von F. Göldner)

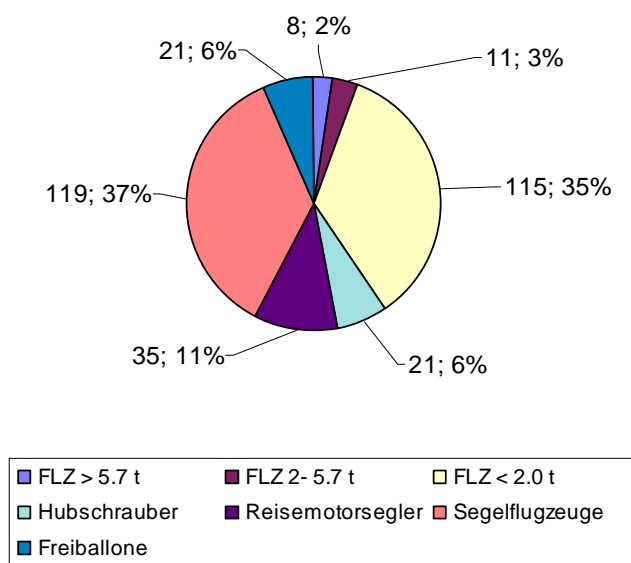


Fig. 36 Verteilung der Unfälle auf die LFZ-Arten; Stand: Oktober 2001; Diagrammlayout verändert (Quelle: BFU; F. Göldner)

Wir beschränken uns hier aus Argumentationsgründen innerhalb der Gesamtheit des heutigen Luftverkehrs auf folgende vier LFZ-Kategorien:

- Flugzeuge bis 2,0 t
- Reisemotorsegler
- Segelflugzeuge (inkl. Hilfsantrieb)
- Segelflugzeuge und Motorsegler

Diese Klassifizierung bedarf einer kurzen, vereinfachenden Erläuterung. Als Reisemotorsegler bezeichnet man alle eigenstart- und steigfähigen Motorflugzeuge größerer Flügelspannweite mit festeingebautem Triebwerk und nicht klappbarem Propeller.*

Flugzeuge bis 2,0 t heißen üblicherweise Motor-, Sport-, Geschäfts-, und/oder Reiseflugzeuge mit konventionellem Kolbentriebwerk. Die Gewichtsbeschränkung 2,0 t ergibt sich historisch einerseits aus dem Herstellerangebot und gleichzeitig als erstes Limit, bis zu dem eine Pilotenlizenz für Motorflugzeuge reicht.

Motorsegler sind dagegen Segelflugzeuge mit klappbarem Antrieb (Propeller oder Propeller/Motor). Segelflugzeuge und Motorsegler fasst man deshalb in einer Gruppe zusammen, weil die meisten Klapptriebwerke in Segelflugzeugen auch den unabhängigen Eigenstart vom Boden ermöglichen (vgl. Fig. 154). Die Hilfsantriebe von Segelflugzeugen dagegen werden auch als „Rotoren“ bezeichnet. Es handelt sich dabei um einziehbare, verkürzte Propeller, die so bemessen sind, dass ein Segelflugzeug im Fluge damit seine Höhe halten kann, um an den Startplatz zurückkehren zu können, falls ein Weiterfliegen mittels thermischen oder Hangwind-Segelflug nicht mehr möglich wäre. Diese Rotorantriebe sind so ausgelegt, dass damit nicht vom Boden aus gestartet werden kann. Derartige Flugzeuge werden üblicherweise mittels Winden- oder Flugzeugschlepp gestartet. Probleme ergeben sich bei dieser Einteilung deshalb, weil es Flugzeuge gibt, die aufgrund ihrer baulichen Merkmale in dieser Klassifikation nicht eindeutig zugeordnet werden können. Beispiele hierfür sind Flugzeugtypen wie etwa der einsitzige Motorsegler „Carat“ (Faltpropeller mit nach vorne(!) klappbaren Propellerblättern trotz fest eingebautem Triebwerk) oder die „S-10“ der Firma Stemme (Faltpropeller in einer Nasenverkleidung versenkbar, fest eingebautes Triebwerk im Mittelrumpf mit Kohlefaserwelle längs Kabine zur Kraftübertragung).

Flugzeuge bis 2.0 t	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Unfälle und schwere Störungen	118	159	178	147	180	158	132	116	111	120	106
Schwere Störungen	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Unfälle	118	159	178	147	180	158	132	116	110	119	104
Unfälle mit Schwerverletzten	4	8	9	9	12	12	6	5	9	8	12
Personen schwer verletzt	8	14	18	18	20	22	15	15	16	14	23
Unfälle mit tödl. Verletzten	11	16	19	9	18	18	25	20	15	21	16
Personen tödl. verletzt	22	33	32	20	45	34	52	35	34	43	41
Unfälle ohne gr. Personenschaden	103	135	150	129	150	128	101	91	86	90	76
zugelassene Stücke	6229	6590	6904	7115	7317	7304	7449	7285	7203	7267	7138
Starts (in Tausend)	1.720	1.793	1.989	1.916	1.877	1.873	1.806	1.800	1.742	1.655	2.378
Flugstunden (in Tausend)	716	736	797	845	788	787	770	760	746	711	736
Unfälle pro 100 Stück	1,9	2,4	2,6	2,1	2,5	2,2	1,8	1,6	1,5	1,6	1,5
Unfälle mit Toten pro 100 Stück	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
Unfälle pro 100.000 Flugbewegungen	6,9	8,9	8,9	7,7	9,6	8,4	7,3	6,4	6,3	7,2	4,4
Unfälle mit Toten pro 100.000 Flugbewegungen	0,6	0,9	1,0	0,5	1,0	1,0	1,4	1,1	0,9	1,3	0,7
Unfälle pro 100.000 Flugstunden	16,5	21,6	22,3	17,4	22,8	20,1	17,1	15,3	14,8	16,7	14,1
Unfälle mit Toten pro 100.000 Flugstunden	1,5	2,2	2,4	1,1	2,3	2,3	3,2	2,6	2,0	3,0	2,2
Reisemotorsegler	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997*	1998*	1999*	2000*
Unfälle	66	63	60	69	64	57	46	36	33	31	38
Unfälle mit Schwerverletzten	8	6	5	3	9	1	4	3	1	3	5
Personen schwer verletzt	10	6	7	5	10	3	7	3	1	4	6
Unfälle mit tödl. Verletzten	8	3	7	3	4	6	7	2	3	1	3
Personen tödl. verletzt	10	3	10	5	4	6	9	4	4	2	5
Unfälle ohne gr. Personenschaden	50	54	48	63	51	50	35	31	29	27	30
zugelassene Stücke	1473	1638	1828	1931	2016	2086	2163	2224	2323	2380	2413
Starts (in Tausend)	429	415	431	445	461	463	457	455	451	419	431
Flugstunden (in Tausend)	220	220	241	243	262	266	268	270	268	268	287
Unfälle pro 100 Stück	4,5	3,8	3,3	3,6	3,2	2,7	2,1	1,6	1,4	1,3	1,6
Unfälle mit Toten pro 100 Stück	0,5	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1

* Genaue Definition siehe Giemulla/von Elm „JAR-FCL – Recht des Luftfahrtpersonals, Textsammlung“ (2003, Luchterhand Verlag); (Quelle: www.luftrecht-online.de/regelwerke/pdf/JAR-FCL1.pdf, 2005)

Unfälle pro 100.000 Flugbewegungen	15,4	15,2	13,9	15,5	13,9	12,3	10,1	7,9	7,3	7,4	8,8
Unfälle mit Toten pro 100.000 Flugbewegungen	1,9	0,7	1,6	0,7	0,9	1,3	1,5	0,4	0,7	0,2	0,7
Unfälle pro 100.000 Flugstunden	30,0	28,6	24,9	28,4	24,4	21,4	17,2	13,3	12,3	11,6	13,2
Unfälle mit Toten pro 100.000 Flugstunden	3,6	1,4	2,9	1,2	1,5	2,3	2,6	0,7	1,1	0,4	1,0
*) Ab 1997 Reisemotorsegler											
Segelflugzeuge*	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997*	1998*	1999*	2000*
Unfälle	177	180	175	146	158	157	157	165	123	126	112
Unfälle mit Schwerverletzten	16	19	17	18	28	27	19	18	11	27	21
Personen schwer verletzt	17	23	19	18	32	28	20	19	15	28	23
Unfälle mit tödl. Verletzten	11	7	12	9	11	11	7	17	15	12	9
Personen tödl. verletzt	12	7	15	11	12	11	8	19	16	15	9
Unfälle ohne gr. Personenschaden	150	154	146	119	119	119	131	130	97	87	82
zugelassene Stücke	6.961	7.465	7.616	7.724	7.767	7.777	7.845	7.862	7.805	7.811	7.778
Starts (in Tausend)	894	981	1.033	966	1.002	942	938	940	911	827	1.261
Flugstunden (in Tausend)	589	621	617	578	580	549	567	570	571	515	554
Unfälle pro 100 Stück	2,5	2,4	2,3	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	1,6	1,6	1,4
Unfälle mit Toten pro 100 Stück	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
Unfälle pro 100.000 Flugbewegungen	19,8	18,3	16,9	15,1	15,8	16,7	16,7	17,6	13,5	15,2	8,9
Unfälle mit Toten pro 100.000 Flugbewegungen	1,2	0,7	1,2	0,9	1,1	1,2	0,7	1,8	1,6	1,5	0,7
Unfälle pro 100.000 Flugstunden	30,1	29,0	28,4	25,3	27,3	28,6	27,7	28,9	21,5	24,5	20,2
Unfälle mit Toten pro 100.000 Flugstunden	1,9	1,1	1,9	1,6	1,9	2,0	1,2	3,0	2,6	2,3	1,6
*) Ab 1997 auch mit Hilfsantrieb											
Segelflugzeuge und Motorsegler	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Ereignisse	243	243	235	215	222	214	203	201	156	157	150
Schwere Störungen									0	0	0
Unfälle	243	243	235	215	222	214	203	201	156	157	150
Unfälle mit Schwerverletzten	24	25	22	21	37	28	23	21	12	30	26
Personen schwer verletzt	27	29	26	23	42	31	27	22	16	32	29
Unfälle mit tödl. Verletzten	19	10	19	12	15	17	14	19	18	13	12
Personen tödl. verletzt	22	10	25	16	16	17	17	23	20	17	14
Unfälle ohne gr. Personenschaden	200	208	194	182	170	169	166	161	126	114	112
zugelassene Stücke	8434	9103	9444	9655	9783	9863	10008	10086	10128	10191	10191
Starts (in Tausend)	1323	1396	1464	1411	1463	1405	1395	1395	1362	1246	1692
Flugstunden (in Tausend)	809	841	858	821	842	815	835	840	839	783	841
Unfälle pro 100 Stück	2,88	2,67	2,49	2,23	2,27	2,17	2,03	1,99	1,54	1,54	1,47
Unfälle mit tödl. Verletzten pro 100 Stück	0,23	0,11	0,20	0,12	0,15	0,17	0,14	0,19	0,18	0,13	0,12
Unfälle pro 100.000 Starts	18,37	17,40	16,05	15,23	15,17	15,23	14,56	14,41	11,45	12,60	8,87
Unfälle mit tödl. Verletzten pro 100.000 Starts	1,44	0,72	1,30	0,85	1,03	1,21	1,00	1,36	1,32	1,04	0,71
Unfälle* pro 100.000 Starts	17,40	16,60	16,65	14,69	15,80	15,35	14,55	14,76	12,52	9,28	n. a.
Unfälle mit tödl. Verletzten* pro 100.000 Starts	1,36	0,68	1,35	0,82	1,07	1,22	1,00	1,40	1,44	0,77	n. a.

*) Bewegungszahlen zugeordnet

Fig. 37 Unfälle und schwere Störungen mit deutsch zugelassenen Luftfahrzeugen im In- und Ausland (Quelle: BFU; mit freundlicher Genehmigung von F. Göldner und J. Eisenreich, 2005)

Vorstehende Tabelle liefert präzise Informationen zur Schwere aller auftretenden Störungen. Der überwiegende Anteil von Störungen entfällt demnach auf Flugzeugbeschädigungen ohne ernsthafte Piloten-, oder Insassenverletzungen. Die Daten werden von der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchungen (BFU) laufend erhoben und u.a. im Internet in Form von Statistiken, Empfehlungen und Schadensberichten mit detaillierter Unfallanalyse veröffentlicht. Typische Störungsmeldungen lesen sich etwa so: „Beim Landen sackte die Maschine aus 1 m Höhe durch. Dabei wurde das Hauptfahrwerk beschädigt“ oder „Beim Startlauf brach die Maschine aus und rollte über unebenes Gelände. Dabei wurde das Fahrwerk/der Flügel beschädigt.“ Wertet man den willkürlich reduzierten Datensatz in obiger Tabelle aus, dann ergeben sich für die vier Gruppen im Zeitraum von 1990 - 2000 folgende summierten Mittelwerte:

Mit 26.507 LFZ wurden 2,422 Mill. Flugstunden in 4,696 Mill. Flugbewegungen erflogen. Dabei verunfallten durchschnittlich 19,6 Maschinen mit 1,7 Toten pro 100.000 Flugstunden. Definiert man Flugsicherheit als Menschenverluste pro Zeit- oder Verkehrsvolumen, dann lässt sich feststellen, dass innerhalb eines Jahrhunderts diese Sicherheit grob betrachtet um wenigstens zwei Größenordnungen gesteigert werden konnte, während das

Luftverkehrsaufkommen (in Flugstunden) auf ein Plus von fast 60.000 % gesteigert wurde. Bezogen auf das Jahr 1913 und die einzelne Flugstunde sank die Zahl der Flugunfälle mit Todesfolge demnach von $2,93 * 10^{-3}$ Tote* h^{-1} auf $1,7 * 10^{-5}$ Tote* h^{-1} . Das entspräche im vorliegenden Fall einem Sicherheitsverbesserungsfaktor von etwa 170. Diese Werte sind insofern direkt miteinander vergleichbar, da sie innerhalb beider Zeitintervalle repräsentativ für die Grundgesamtheit gelten können.

Verlassen wir diese strukturelle Abschätzung und kommen wir zurück auf die Darstellung weiterer chronologischer Ereignisse. Die Liste der Pionierleistungen lässt sich mühelos seitenweise weiterführen. Hier nur ein Auszug der bedeutenderen Ereignisse:

- 1911 – erster Flug eines Amphibiums (Projektant: Colieux/F): Issy/Seine
- 1911 – erster Tornisterfallschirm für Piloten (G. J. Kotjelnikow/UdSSR)
- 1911 – erster Segelflug über 11 min (O. Wright, Kitty Hawk/USA)
- 1913 – erste Überquerung des Mittelmeers (R. Garros/F)
- 1914 – erste Überquerung der Nordsee (Trygve Gran/NOR)
- 1920 – erster 10 000-m-Höhenflug (Schröder, Dayton/USA)
- 1919 – erste Nonstop-Atlantiküberquerung mit Landflugzeug (Alcock und Brown/GB)
- 1919 – erster Australienflug mit Vickers-Vimy-Bomber (Ross, Smith,+3/GB)
- 1922 – erste Südatlantiküberquerung im Wasserflugzeug (Cabral und Couthinho/PT)
- 1925 – erster motorloser Dauerflug über 12 h (Schulz/D)
- 1926 – erster Flug über den Nordpol (Byrd, Bennet/USA)
- 1926 - erster Gewittersegelflug (Kegel/D): 55,6 km von Wasserkuppe nach Gumbertshausen/Coburg
- 1929 – erster 100-km-Segelflug über gerade Distanz (Kronfeld/D)
- 1929 – erster reiner Instrumentenflug (Doolittle/USA)
- 1929 – erster Flug über den Südpol (Byrd, Balchen/USA)
- 1934 – erster 300-km-Segelflug (Hirth/D)
- 1935 – erster 500-km-Segelflug (Öltschner, Braeutigam, Heinemann und Steinhoff/D)
- 1937 – erster Segelflug über 5000 m (Steinig/D): Ausnutzung von Gebirgsleewellen
- 1937 – erster 10 000-km-Flug in gerader (Großkreis-)Linie (Gromow, Jmaschew, Danilin/UdSSR)

Daneben fanden kaum beachtete Entwicklungen statt, die jedoch als nicht weniger bedeutsam eingestuft werden müssen. Beispielsweise tauchten schon sehr früh auf- und abrüstbare Fluggeräte auf, die mittels angepasster Transportlösungen auf dem Boden flexibel standortverlegt werden konnten. Obwohl das Prinzip des Straßentransports von Flugzeugen noch heute gepflegt wird und beispielsweise bei Segelflugzeugen unverzichtbarer Bestandteil des Normalbetriebs darstellt, gingen hochaggregierte Lösungen, wie diejenige in Fig. 38 (Abb. rechts) gezeigt, wieder verloren. Für Umweltmessflugzeuge einer noch nicht existierenden Generation könnte sich jedoch gerade so eine Herangehensweise künftig als recht nützlich erweisen.

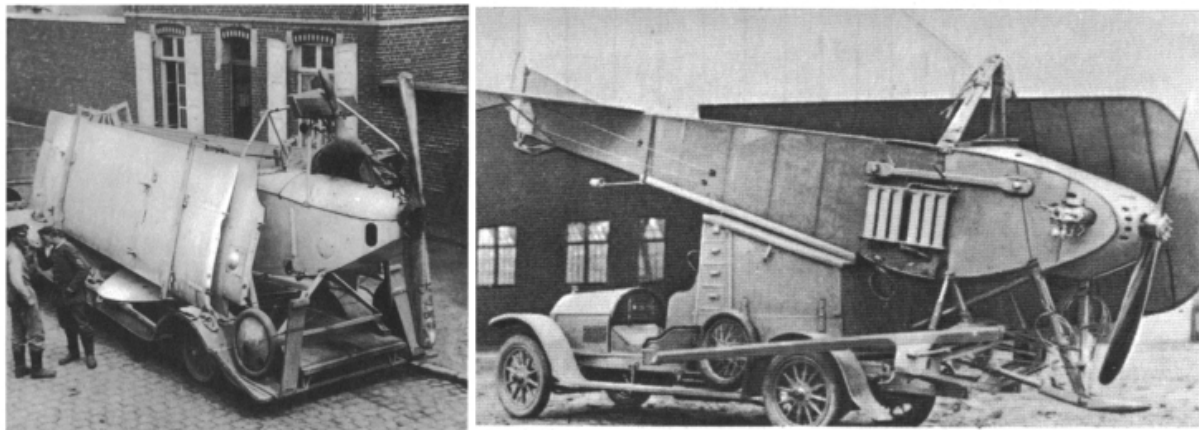


Fig. 38 Zwei Flugzeuge der LVG (Luft-Verkehrs-Gesellschaft) auf Transportfahrzeugen: links ein Doppeldecker auf Flugzeugtransportfahrzeug wie es im Prinzip heute noch verwendet wird (Aufnahmejahr nicht näher bezeichnet); rechts eine Abbildung aus dem Jahr 1913, die eine technische Lösung zeigt, bei der das Transportfahrzeug nach militärischen Erfordernissen gleichzeitig als Werkzeugwagen ausgeführt wurde. (Bergius, 1969)

Man kann bereits an der stark verkürzten Aufzählung erkennen, dass die Geschichte der Luftfahrt entwicklungstechnisch einzig und allein auf der ingenieurtechnischen Methode beruht: dem zielgerichteten Lernen aus empirischen Versuchen mit der unvermeidlichen Konsequenz menschlicher Irrtümer und technischer Fehlkonzeptionen, die es im Zuge mitunter großer Anstrengungen zu erkennen und zu überwinden gilt. Sie ruht historisch betrachtet auf den Schultern weniger Unbeirrbarer, die bereit waren, unter größten wirtschaftlichen Schwierigkeiten und bis zu existentiellen Opfern Ideen technisch zu verwirklichen. Bis in die Gegenwart hinein ist diese Erkenntnis in der Luft- und Raumfahrtindustrie stets präsent und immer wieder aufs Neue bestätigt worden. Aus Platzgründen ist es leider nicht möglich, in diesem Kontext auf die bleibenden Verdienste einer Vielzahl weiterer Pioniere und deren biographische Verflechtungen namentlich einzugehen. Deshalb bemühen wir uns im Folgenden, die Fortschritte in einem übergeordneten Rahmen einzuordnen, der einen Überblick zur Dimension der technologischen Entwicklungsprozesse vermittelt.

Ebenso bedeutsam wie die Taten Einzelner bei der Entwicklung von Luftfahrtgerät ist mit Sicherheit die rasant aufstrebende Werkstoffindustrie, wie sie etwa ab Beginn des Automobilzeitalters einsetzte. Ihre weltweite „diffuse Eintragsleistung“ für die Konstruktion allgemeiner, komplexer Maschinen ist mit einer bis zu jener Zeit nicht erreichbaren Geschwindigkeit vollzogen worden, die ihre Wurzeln in der Industrialisierung Englands begründet und durch die im beginnenden Zeitalter des Imperialismus nach territorialer Macht strebenden, führenden europäischen Nationalstaaten gespeist und beschleunigt wurde. Das für die Luftfahrt so bedeutende Leichtmetall (im Wesentlichen Aluminiumlegierungen) wandelte sich beispielsweise vom Laborversuchsmaßstab Friedrich Wöhlers (Chemiker, hauptsächlich bekannt durch die Synthese künstlichen Harnstoffs) um 1830 über die Darstellungsmethode von Sainte-Claire Deville auf der Pariser Weltausstellung 1855 (Präsentation von murmelgroßen Reinaluminiumklumpen) zur Industrieanwendung mit Erfindung des Gleichstromgenerators zur Elektrolyse, die nahezu gleichzeitig und völlig unabhängig von C. M. Hall und P. L. T. Héroult 1886 entdeckt wurde. Die erste europäische Aluminiumfabrik wurde in Neuhausen in der Schweiz errichtet, um die Wasserkraft des Rheins zu nutzen. Weltweit stieg der Bedarf an dem leicht zu bearbeitenden Metall rapide an, so dass in rascher

Folge die führenden Industrienationen eigene Produktionsstätten einrichteten. Erst zu Beginn des Ersten Weltkriegs wurde in Deutschland die Nachfrage so erdrückend, dass man sich dazu entschloss, zunächst auf Dampfkraft basierende Bauxitverhüttung zu betreiben.

Bei der Firma Junkers arbeitete man ab 1915 an der Konstruktion eines Ganzmetallflugzeugs, der Junkers J1, die aus dünnem Eisenblech bestand (spöttisch „Blechesel“ genannt). Der Übergang zum Duraluminium („Dural“: Al-Cu-Mg-Legierungen) fand erst bei der J3 bzw. der Weiterentwicklung J7 statt (1916/17), und zwar in der typischen Junkers-Wellblech-Bauweise. Daneben wurde in den Flugzeugbau auch „Elektron“ eingeführt (Mg-Al-Legierungen). Diese Leichtmetall-Revolution folgte auf die Stahlrevolution, die weltweit einen Höhepunkt mit der Etablierung des Krupp-Imperiums ab etwa Mitte des 19. Jh. zu markieren begann. Vergütungs-, Automaten-, Schweiß- und Werkzeugstähle ermöglichten überhaupt erst die Herausbildung von langlebigen Werkzeugmaschinen und industriellem Anlagenbau. So wurde beispielsweise in den Krupp-Werken ab 1914 rostfreier (stainless) Chrom-Nickel-Stahl hergestellt – ein Jahr, nachdem die Legierung in England erstmalig vorgestellt worden war. Elektrische Drehbänke und unterschiedlich harte Werkzeuglegierungen aus Stahl führten erst zur Etablierung von mechanischen Verbindungselementen wie z. B. Schrauben. Modernes (Azetylen-)Schweißen wurde ab 1916 eingesetzt.

Die beginnende länderweite Elektrifizierung setzte im Zuge des Geniestreits zwischen T. A. Edison und N. Tesla ein. Letzterer revolutionierte die Arbeitsweise der weltweit aufkeimenden industriellen Großproduktion mit der Entdeckung des mehrphasigen Wechselstromprinzips (Wechselstromgenerator 1884). Ab 1885 erfolgte die Verwertung der Patentrechte zum Wechselstromsystem durch die Westinghouse Electric Company, die zur Entwicklung von Generatoren, Transformatoren und Motoren führte. George Westinghouse trieb parallel dazu auch die Entwicklung von Pipelines für den Gasferntransport maßgeblich voran, die die Energieversorgung von industriellen Ballungsräumen grundlegend verändern sollte.

Ebenfalls in direkter Linie auf Tesla geht die Fernsteuerung von Fahrzeugen durch Funkübertragung zurück, die er 1898 mittels eines Schiffsmodells demonstrierte. Ferngelenkte Flugzeuge kamen erst 50 Jahre später, zu Beginn des Kalten Krieges, für Aufklärungs- und Spionagedrohnen in großem Maßstab zum Einsatz. Wenige wissen, dass beispielsweise gegen Ende des Vietnamkrieges die historisch erfolgreichste amerikanische Aufklärungsdrohne, das „Model 147-S“ von Ryan, über das als „Hanoi Hilton“ bekannt gewordene US-Kriegsgefangenenlager zwischen 1972 und 1973 zur moralischen Unterstützung der Häftlinge operationelle Tiefaufklärungsmissionen flog – um nur eine von vielen inzwischen weitläufig erprobten Einsatzkategorien für unbemannte Flugkörper zu benennen. Insgesamt wurden zwischen 1964 und 1977 insgesamt 28(!) Versionen der Ryan 147 produziert, mit einer Produktionsspitze bei 30 Flugkörpern pro Monat. Dabei wurden etwa 3400 Flüge mit einer Erfolgsquote von 95 % (unter Berücksichtigung der Kriegseinwirkung) geflogen. Wenn rückkehrende Drohnen nicht mehr am Boden geborgen

* Zum Vergleich: Um 1990 verfügten weltweit lediglich 41 Länder über eine eigene Aluminiumproduktion. 1997 wurden insgesamt 21 Mio. Tonnen Aluminium produziert. Im selben Jahr belief sich dagegen die weltweite Stahlproduktion auf 795 Mio. Tonnen.

werden konnten, dann fing man sie per CH-3C-Hubschrauber direkt aus der Luft ein* (Schwanhauser et al., 1997). Bedeutsam ist trotz dieser unleugbaren Erfolge, dass sich bis heute durch die Rüstungsgeschichte hindurch der Trend zu bemannten Systemen erhalten hat und dieser jeweils nur periodisch gebrochen wurde (z. B. Gary Powers U-2-Abschuss). Drohnen setzt man in modernen bewaffneten Auseinandersetzungen aus logistischen und politischen Gründen nur dort ein, wo hohes Verlustrisiko besteht oder verdeckt operiert wird – diese beiden Varianten betreffen nur phasenweise Abschnitte von Feldzügen.

Das weltweite Rennen um die fossilen Lagerstätten, das 1869 mit einer Erdöl-Bohrung durch 21-m-tiefen Fels von E. L. Drake in Pennsylvania eröffnet wurde, bildet zusammen mit der Elektrizität das Fundament für die petrochemische Industrie, die eine ganze Palette neuartiger Werkstoffe im Verlauf des 20. Jh. hervorgebracht hat, allen voran „Kunststoffe“ wie beispielsweise das seit 1909 bekannte Bakelit (Trivialname von Phenol-Formaldehyd-Harz) als prominenter Elektrotechnik-Isolatorwerkstoff, synthetischer Kautschuk (Reifenproduktion) und Nylonfasern (Ende 30er Jahre). Celluloid, erster Kunststoff überhaupt und vornehmlich als Folienträgermaterial für fotografischen Film verwendet, geht dagegen bereits auf das Jahr 1860 zurück (Erfinder: J. W. Hyatt). Wenigen dürfte im Alltag bewusst sein, dass das handelsübliche 24 x 36 mm-Kleinbild-Filmmaterial „baugleich“ mit dem 35 mm-Kinofilm ist und beide seit über 100 Jahren praktisch unverändert produziert werden – zumindest, was die Geometrie anbelangt und von den Ausnahmen abgesehen, die durch die Weiterentwicklung der farbsensitiven, fotochemischen Schichten herrühren. 1901 erschien ein Buch des Briten E. Davis, das als Grundlage der modernen chemischen Verfahrenstechnik gedeutet wird. Es zeigt im Wesentlichen auf, dass aus verschiedenen, relativ einfachen „Verfahrenseinheiten“ der chemischen Industrie (z. B. Polymerisation, Veresterung, Nitrifikation etc.) eine ungleich längere Prozesskette zusammengestellt werden kann, die eine nahezu beliebige Anzahl synthetisierbarer Stoffe erlaube. Die Auswirkungen dieser Entwicklung sind nicht abzusehen. Vor der Jahrtausendwende wurden weltweit etwa 60 000 chemische Stoffe produziert (Schwedt, 1996).

Die genannten Beispiele verdeutlichen nicht nur die technische „Interdependenz“ bei der Umsetzung für Ideen, die so häufig anzutreffen ist, sondern rufen zugleich den Begriff der technischen Zyklizität ins Bewusstsein.

* Ähnlich funktionierte auch die Bergung von Filmkapseln militärischer Aufklärungssatelliten. Es erforderte allerdings längere Testreihen mit zahlreichen Fehlschlägen und bedurfte daher der Etablierung sehr intensiver Formen der Kooperation, ehe diese Verfahren genügend zuverlässig arbeiteten. Am 19. August 1960 gelang mit einem CJ119-„Flying-Boxcar“-Transportflugzeug (zwei Propellertriebwerken und ein Gabelschwanz-Leitwerk) die Bergung einer Discoverer-XIV-Kapsel in 8000 ft Höhe 360 NM SW Honolulu/Hawaii. Die Maschine steht heute in einem Air-Force-Museum der Wright-Patterson AFB in Dayton/Ohio. Das zugrunde liegende Corona-Aufklärungsprogramm lieferte 800 000 Fotos aus dem Weltraum (Quellen: www.nro.gov, www.airliners.net)

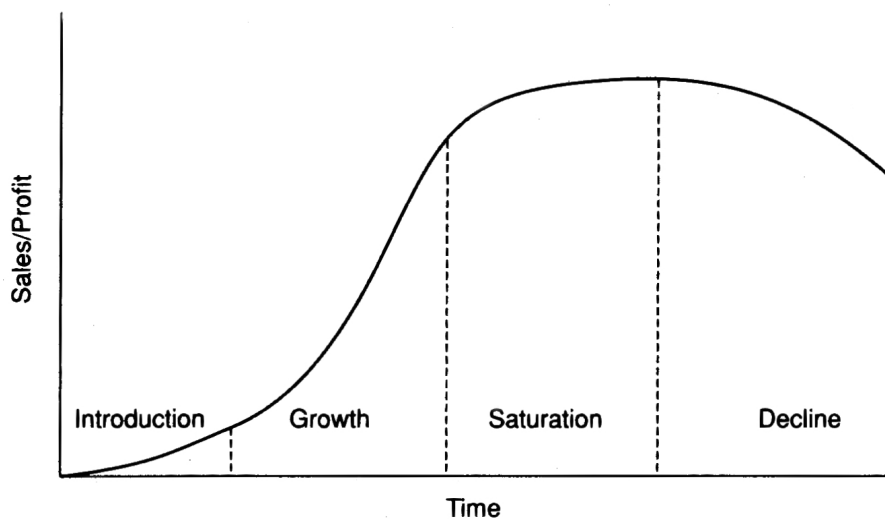


Fig. 39 Produktzyklus (Wisniewski, 1996)

Es ist aufschlussreich, technische Produktions-, Entwicklungs-, und Reifezyklen ganzer Industriezweige zu studieren, um die Systemübertragungsleistung und deren technische Lückenhaftigkeit (Innovationsraten, Innovationspotentiale) abschätzen zu lernen.

Nach der Schwerindustrie, der Etablierung der großen Energieversorgungsnetzkerne, der Elektro-, Grundstoff-, Chemie-Industrie und der flächendeckenden Verkehrserschließung durch die Eisenbahn folgten die großen gesellschaftlichen Zusammenbrüche des 20. Jh., innerhalb derer die vorhandenen, neuen Technologien nicht nur in sämtlichen denkbaren Ausprägungsgraden umgesetzt wurden, sondern auch weltweite Verbreitung fanden. Mit dem Ende des Zweiten Weltkriegs betrat der Mensch das Atomzeitalter und kurze Zeit darauf das Raumfahrtzeitalter, währenddessen ein verdeckt ausgetragener Kalter Krieg um die globale Rangordnung der neuen Machtblöcke ausgefochten wurde.

1948 erschien das Buch „Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine“ von Norbert Wiener, der damit eine Eröffnung für einen neuen Wissenschaftszweig lieferte, die Kybernetik. Noch im Zweiten Weltkrieg war einer der frühen Rechenautomaten Konrad Zuses (1943, „Z4“) in den Henschel-Flugzeugwerken dazu verwendet worden, fertigungsbedingte Abweichungen der Zelle und des Flügels ferngesteuerter Flugbomben durch Abtastung zu ermitteln und in Korrekturwerte für den Einstellwinkel von Flügel und Leitwerk umzurechnen (Braun und Kaiser, 1997). Mit etwa 2000 Relais ausgestattet arbeitete die Z4 mit einem Programmcode, der in gebrauchten (!) Kinofilm gestanzt war. Der zwischen 1939 und 1945 in den USA gebaute Rechner „Mark I“ (als Abkürzung für „Automatic Sequence Controlled Calculator – ASCC“) dagegen lieferte für die US Navy Ergebnisse ballistischer Berechnungen.

„Doch nicht nur der Rechner Mark I, sondern praktisch die gesamte frühe Rechnertechnik in den USA war auf die militärische Verwendung während des Zweiten Weltkrieges und auf die Hochrüstung während des ‚Kalten Krieges‘ ausgerichtet. Hierher gehören die geheimen kryptologischen Maschinen der Marine. Selbst mehr in der Öffentlichkeit stehende Projekte hatten ihre Wurzeln in militärischen Anwendungen. So war die Automatisierung der personalintensiven und zeitraubenden Berechnungen von Zieltabellen für Artillerie und Bombenkrieg der

Zweck einer Rechnerentwicklung, die von der Moore School of Electrical Engineering der Universität von Pennsylvania in Philadelphia ausging. John W. Mauchly [...] und J. Presper [...] entwickelten dort den ‚Electronic Numerical Integrator and Computer‘ (ENIAC). [...] Die große Leistung des im Herbst 1945 fertiggestellten ENIAC war, den Kritikern zu beweisen, daß ein fast 18.000 Röhren enthaltender Rechner mit einer Leistungsaufnahme von 170 kW (!) sicher zu betreiben ist, wobei die zeitliche Verfügbarkeit bei 50 Prozent lag. Vor allem ließen sich wegen der gegenüber Relaisrechnern deutlich gesenkten Schaltzeichen die Rechengeschwindigkeiten um den Faktor 1.000 bis 2.000 steigern und die Berechnungen von Zieltabellen von 30 Tagen auf weniger als 1 Tag reduzieren. Wie von Mauchly und Eckert geplant, konnte der Rechner ENIAC später auch als universeller, wissenschaftlicher Rechner eingesetzt werden. Die militärischen Zielsetzungen aber blieben dominierend; denn bei der Weiterentwicklung der Atomwaffen nach 1945 spielte der Rechner offenbar eine besonders bedeutende Rolle.

Die seit 1944 laufenden Arbeiten an der Verbesserung des Rechners ENIAC führten zu einer bitteren, aber produktiven Kontroverse unter den amerikanischen Computer-Pionieren und letztlich sogar zur Entwicklung eigener kommerzieller Rechner. Auslösender Faktor war der enge Kontakt, den der Mathematiker John von Neumann mit der ENIAC-Rechner-Gruppe aufgenommen hatte. [...] In Anteilen, die heute nur noch schwer rekonstruiert werden können, flossen dann Ideen von John von Neumann und aus der Gruppe J. Presper Eckerts und John W. Mauchlys in das Konzept eines neuen ‚Electronic Discrete Variable Automatic Computer‘ (EDVAC) ein. Die entscheidende Idee des EDVAC war, die Befehle des Programms wie die zu verarbeitenden Daten zu behandeln, sie binär zu kodieren und in den internen Speicher aufzunehmen. [...] Mit dem für den EDVAC geschaffenen Konzept hat sich – abgesehen von der Entwicklung der Parallelrechner seit etwa 1985 – die grundlegende Struktur eines Rechners herausgebildet ...“ (Braun und Kaiser, 1997).

Die Kybernetik, die zeitgleich hierzu theoretisch* ausgebaut wurde, hatte im Verbund mit nachfolgenden Computern enorme technische Auswirkungen auf die weltweite Produktionswirtschaft: Durch Anwendung des technischen Regelkreis[†]-Modells auf industrielle Fertigungsprozesse wurden die technisch erzielbaren Toleranzmaße dramatisch verbessert.

* In dem bahnbrechenden Werk „Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine“ (1. Aufl. 1948, 2. Aufl. 1961) untersucht Norbert Wiener mittels aufkommender Computer, programmierbarer Differentialgleichungen und für automatisch zielverfolgende Flugabwehrgeschütze technische Regelkreissysteme und findet darüber mathematische Analogien zu biologischen, selbstorganisierenden Systemen (Nervensystem, Gehirn).

† Definition Regelung laut DIN 19226: „Der Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe, fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen, und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich dabei ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis statt.“

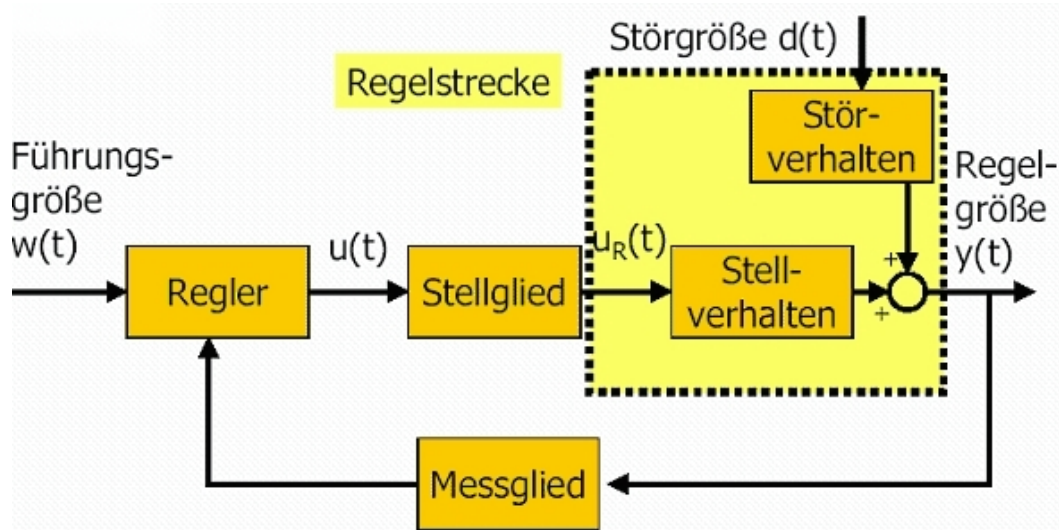


Fig. 40 Allgemeines Regelkreismodell (Hoffmann, 2005)

Und dies nahezu zeitgleich und auf vielen unterschiedlichen Anwendungsgebieten (Herstellung von Blechtafeln, Glasscheiben, Papier etc.). Der Begriff „Automatisierung“ wurde 1946 von D. S. Harder, einem Produktionsingenieur der Ford-Autowerke, geprägt. Die modernen Begriffspaare lauten dafür „Computer Aided Manufacturing“ (CAM) oder „Computer Aided Engineering“ (CAE). Obwohl die zunehmende Automatisierung durch Industrieroboter üblicherweise als arbeitsplatzgefährdende Erscheinung dargestellt wird, darf man über diesem Punkt nicht vergessen, zu welcher explosiven Qualitätssteigerungen diese graduelle Entwicklung geführt hat. Außerdem erklärt sich aus dieser Zusammenschau, warum die Mitte des 20. Jh. zu einer Blüteperiode einer opto-mechanischen Industrie werden konnte, die u. a. für die Weiterentwicklung der Photogrammetrie so bedeutsam war.

Wichtig ist darüber hinaus das Prinzip der Unabhängigkeit an solchen Überlegungen zu erkennen, das die gesamte Technik durchzieht: Es spielt keine Rolle, mit welchem Bauteil, Halbzeug oder an welcher Regelkreisschleife Sie während eines Produktzyklus ansetzen, um Kosten zu senken, Arbeitsprozessketten zu vereinfachen oder zu beschleunigen. Die Einzelkomponenten arbeiten mit eigenen (lokalen) Fertigungs-Toleranzen, bauteilspezifischen Koordinatensystemen und werkstoffspezifischen Berechnungsgrundlagen. Diese Tatsache spiegelt sich in einem bedeutsamen Kontrastverhältnis wider: Für die Konstrukteure existiert ein vielgestaltiges, soziales Netz mit darin eingebetteten personellen Abhängigkeiten – für die konstruktive Auslegung einer komplexen Maschine dagegen existiert weitgehende, modulare Unabhängigkeit! Das könnte man mit dem Begriff „Modulinvarianz“ ausdrücken.

Die Idee des „Total Controlling“ hat für die Gewichtsoptimierung im (Leicht-)Fahrzeugserienbau erst die „Honda Motor Company“ zu Beginn der 90er Jahre eingeführt. Direktes Resultat des damit verbundenen, unbestreitbar hohen Aufwandes: Sportmotorräder mit 600 ccm Hubraum (Honda CBR600) wogen innerhalb einer neuen Modellserie gleichsam über Nacht bis zu 20 % weniger als die Modelle gleicher Hubraumklasse der gesamten Konkurrenz und verfügten dabei gleichzeitig um über 10 % mehr Leistung. Eine derartige Leistungssteigerung war nur dadurch möglich, dass praktisch jedes einzelne verwendete Maschinenbauteil optimiert wurde. Dies wiederum ist möglich durch die Vernetzung von CAD-basierten Arbeitsmethoden. Die konstruktiven Grundlagen

zur Gewichtsreduktion liegen sämtlich in der Luft- und Raumfahrttechnik, bei der seit jeher das zentrale Problem der verfügbaren Antriebstechnik zu vermehrter Aufmerksamkeit bezüglich der Leistungs-/Gewichtsrelation ansprechen. Die Gesamt-Optimierung ist dabei abhängig von den gegebenen technologischen Rahmenbedingungen (Werkstoffe, Maschinen, Messinstrumente, theoretische Grundlagen, praktische Verfügbarkeit und Übertragbarkeit von Know-how etc.). Konkret erzielt man Gewichtseinsparungen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM), die zu einer Erhöhung der Bauteil-Steifigkeit und geringerer Bauteilmasse führt, da die Materialbemaßung iterativ in direkter Abhängigkeit von dynamischen Simulationen (Schwingungen, Vibration, Temperaturendehnungen etc.) erfolgt.

Eine wesentliche Grundlage für den Flugzeug-Leichtbau ruht historisch betrachtet auf dem Vermächtnis von Hans Klemm, dem Begründer der Idee des „Sportflugzeugs“ in unserem heutigen Sinne. Er spaltete die bis nach dem Ersten Weltkrieg bekannte Welt der Fliegerei in zwei Teile, indem er sich ausschließlich auf die Konstruktion von „freitragenden Leichtflugzeugen“ konzentrierte, die er den zur damaligen Zeit üblichen Mustern – hauptsächlich Doppeldeckern – gegenüberstellte (siehe Fig. 41).

Als „ordentlicher“ Konstrukteur begann seine Laufbahn als Regierungsbauführer der Königlich Württembergischen Staatsbahn. Später arbeitete er in der Flugzeugbauabteilung der Zeppelin-Werke (1917), als Statiker bei den Hansa- und Brandenburgischen Flugzeugwerken in Briest und ab 1918 als Chefkonstrukteur der Abteilung Flugzeugbau der Daimler-Motoren-Gesellschaft in Sindelfingen. Seine erste eigene Konstruktion war der Seeaufklärer „Hansa-Brandenburg W29“. Später folgten der Jagdeinsitzer L11 und das zweiseitige Beobachtungsflugzeug L14, beides abgestrebte Hochdecker. Nach dem Krieg blieb er bei der Firma Daimler und leitete dort bis 1926 das Karosseriewerk. Die Idee für einen freitragenden Tiefdecker mit niedriger Flächenbelastung und relativ schwacher Motorisierung entstand im Winter 1917/18.

Die erste Konstruktion einer bahnbrechenden „Leitlinie“ im Flugzeugbau war die „L15“, ein freitragender Schulterdecker mit einem Indian-Motorradmotor von 5,5 kW/7,5 PS und einer Flächenbelastung von nur 20 kg/m². Die Auflagen des Waffenstillstandsabkommens vom 11. November 1918 in Versailles sahen ein absolutes Bauverbot für Flugzeuge in Deutschland vor (§ 198, 1920 ratifiziert, 1921 weiter verschärft). Ein letzter Rest von 1700 Kriegsflugzeugen, 5000 Lokomotiven und anderem Kriegsgerät war nach der Kapitulation sofort zu übergeben.* Deshalb entstand die L15 in aller Heimlichkeit.

* Der Vollständigkeit halber muss hier erwähnt werden, dass es überraschenderweise ausgerechnet die Deutschen waren, die knapp drei Monate nach Unterzeichnung des Waffenstillstands mit der „Deutschen Luftreederei“ am 5. Februar 1919 die erste zivile Luftlinie Europas eröffneten: Linie Berlin-Leipzig-Weimar mit A.E.G.-Doppeldeckern. (Angelucci, 1972) Im Jahr 1922 wurden beispielsweise in Deutschland 7733 Personen und 617 553 kg Luftfracht befördert. (Westphal, 1996)

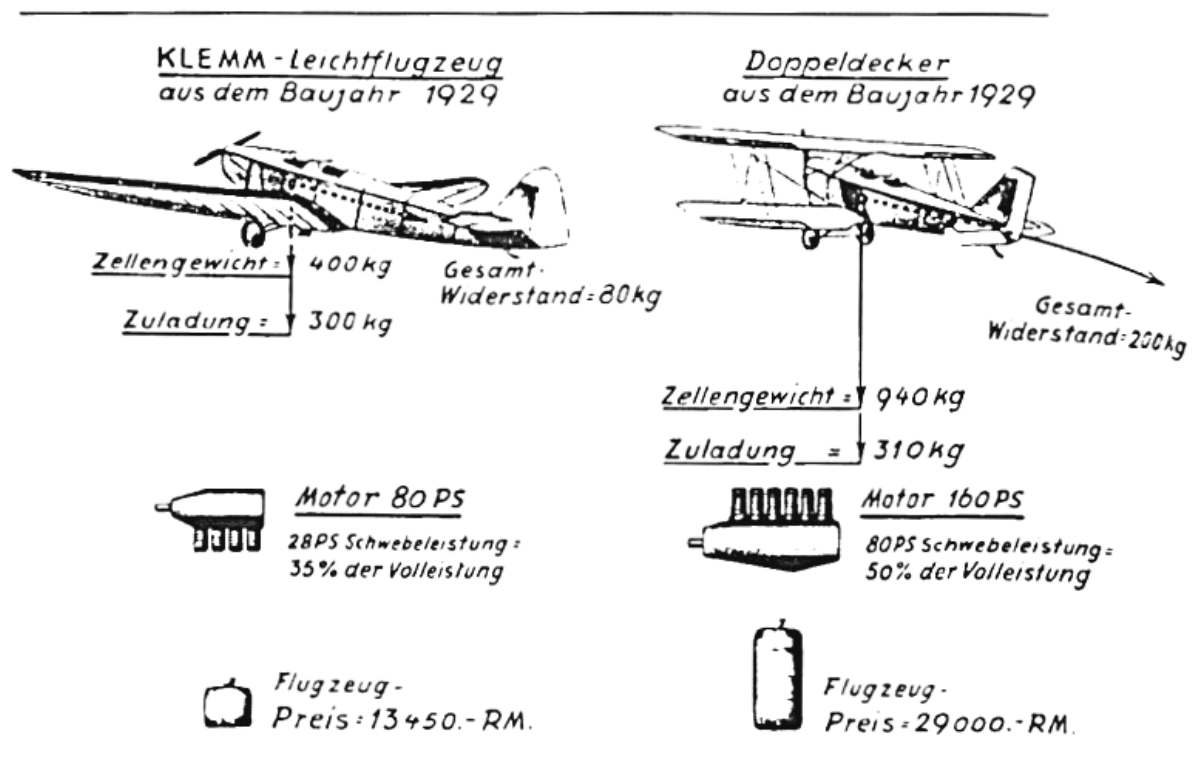


Fig. 41 Aus der Werbung für die Klemm-Leichtflugzeugbauweise: „Dieser interessante Vergleich läßt deutlich die entscheidenden Merkmale der Klemm-Leichtflugzeug-Bauweise erkennen: Während der Doppeldecker herkömmlicher Konstruktion 50 % seiner Motorleistung benötigt, um sich in der Luft zu halten, braucht das Klemm-Leichtflugzeug dazu nur 28 % [sic! Richtigerweise muss es 35% heißen, Anm. d. Verf.] seiner außerdem halb so starken Motorkraft. Sowohl für den Anschaffungspreis wie auch für die Betriebskosten und besonders hinsichtlich der fliegerischen Sicherheit ist dies von allergrößter Bedeutung.“; aus: (Brinkmann, v.Gersdorff, und Schwipps, 1995)

„Erst 1920 wurde es zum Start auf den Daimler-Flugplatz gebracht. Doch der Start mißglückte; der Pilot Eugen von Löbl machte schon beim Rollen Bruch, da das Gelände von Furchen und Löchern durchsetzt war. Das Flugzeug wurde dabei erheblich beschädigt und der Motor aus dem Rumpf herausgerissen.“ (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995).

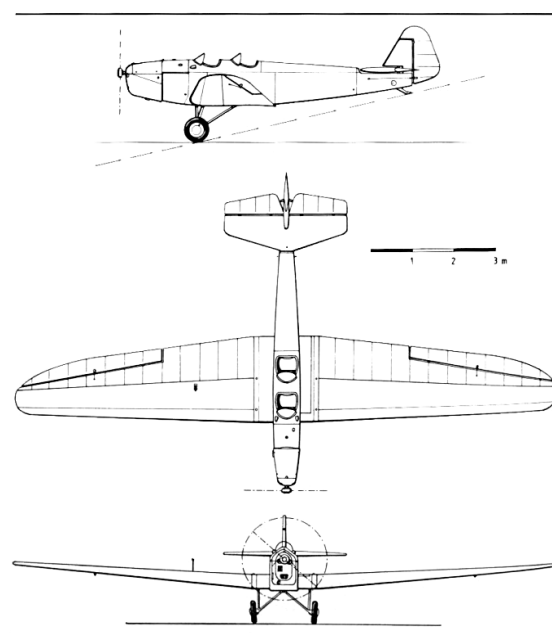
Hans Klemm brauchte 2 Jahre, ehe er seine Enttäuschung darüber verwand und mit einer visionären Denkschrift vom einfachen, leichten „Sportflugzeug“ bei der Direktion der Daimler-Werke in Sindelfingen aufwartete, um darum zu bitten, seine Bemühungen in offiziellem Rahmen fortführen zu dürfen. Ermutigt worden war er dazu durch die Erfolge der aufkeimenden Segelflugbewegung. Die L15 wurde nun repariert und ohne Motor an den Hängen der Schwäbischen Alb als Segelflugzeug eingeflogen, ehe es mit einem Harley-Davidson-Motorrad mit 9,2 kW/12,5 PS mit einem speziell von der Firma Daimler konstruierten Planetenrad-Untersetzungstriebwerk ausgerüstet wurde. Das kleine Flugzeug mit nur 276 kg, das auch zweiseitig geflogen werden konnte, erregte viel Aufsehen während seiner Flugerprobung am Böblinger Flugplatz. Auch Überlandflüge wurden durchgeführt. 1924 wurde die L15 sogar mit Schwimmern ausgerüstet und vom Bodensee aus geflogen. Hans Klemm entwarf in Folge mit gleicher Motorisierung die L16 (ein abgestreifter Tiefdecker), L17 (ein freitragender Hochdecker mit Motor im Flügel) und die L18 (als verkleinerte Version der L15). Der Durchbruch der Entwicklung erfolgte mit der L20, einem

Holzflugzeug mit 13 m Spannweite. Die Klemm L20 war das Vorbild für schwachmotorige, zweisitzige Leichtflugzeuge und der Grundtyp für alle späteren Klemm-Sportflugzeuge. Die Mehrzahl der in den Jahren von 1924 bis 1928 gebauten L20 verwendete den Porsche-Daimler-Motor F7502 mit 16 kW/20 PS, einen luftgekühlten Boxer-Motor mit vier Zylindern; nur die L20 B2 hatte den französischen Salmson-Sternmotor von 30 kW/40 PS. Der Anstoß zum Einbau dieses ausländischen Motors kam bei einem Flug mit einer L20 nach Nizza. Beim Rückflug in Richtung Zürich wehte im Rhônetal ein so starker Mistral, dass ein Radfahrer auf der Straße schneller war als die L20 mit dem Mercedes-Motor.

Die L20 wurde durch zahlreiche Langstreckenflüge weltweit bekannt. Besonders erwähnenswert ist der Flug von Werner von Langsdorff und Hans Guritzer von Stuttgart nach Budapest mit Überquerung der Zentralalpen im Gebiet des Großglocknermassivs im Jahre 1926. Einen Höhenweltrekord für Leichtflugzeuge mit 6500 m erreichte Werner von Langsdorff im Frühjahr 1927. Der Sportflieger Friedrich Freiherr von König-Warthausen unternahm 1926 einen Weltflug über 36 000 km. Die dazu benutzte L20 war eine Serienausführung mit vergrößerten Flächentanks und einer abgeänderten Schmierstoffanlage. Die zweisitzige Klemm-Daimler L20 mit einer Leermasse von 260 kg und einer Abflugmasse von 450 kg war nach heutigen Begriffen ein Ultra-Leichtflugzeug (UL). Sie hatte eine Höchstgeschwindigkeit von 105 km/h und eine Reisegeschwindigkeit von 95 km/h. Für das Steigen auf 1000 m brauchte sie rund 12 Minuten. Ihre Reichweite lag bei rund 480 km und der Kraftstoffverbrauch bei 6,3 Liter pro 100 km. Mehr als 200 dieser bemerkenswerten Leichtflugzeuge wurden gebaut. Die L20 kostete 8500 Reichsmark (1927). Das eigentliche „Geheimnis“ der L20 lag in dem genau abgestimmten Propeller eigener Entwicklung und Herstellung sowie in der aerodynamisch, sorgfältig gestalteten Rumpfspitze, die einen weitgehend ungestörten Abfluss des Propellerstrahls ergab. Die Drehzahl des großen Propellers betrug im Reiseflug nur rund 1000 min^{-1} . Ihre Nachfolgerin, die L25, war rumpfseitig komplett mit Sperrholz beplankt (statt mit Tuch bespannt).

Fig. 42 Die Klemm KL25 im Dreiseiten-Riss (Brinkmann, v.Gersdorff, und Schwipps, 1995)

Sie wurde in 30 verschiedenen Varianten (darunter auch Schwimmer, Ski, Ballonreifen, dreisitziger Rumpf, Stummelflügel) mit Motorleistungen von 30 kW/40 PS bis 70 kW/95 PS ausgestattet und fand sogar für den Segelflugschlepp Verwendung. Daher hatte sie – je nach eingebautem Motor – eine Abflugmasse von 620 bis 720 kg, erreichte eine Höchstgeschwindigkeit von 150 bis 160 km/h, eine Abreißgeschwindigkeit von nur 60 km/h und konnte mit 90 Litern Tankinhalt etwa 700 km weit fliegen. Mit 600 gebauten Flugzeugen war die L25 das bis dahin weltweit erfolgreichste und weitverbreitetste deutsche Sportflugzeug in der Ära der 20er/30er Jahre, ehe dieser



Erfolg mit der – vollkunstflugtauglichen – K135 ab 1935 mit insgesamt 2000 gebauten Nachfolgemustern eingestellt wurde.

Klemm revolutionierte den Flugzeugbau mit der Einführung der Halbschalenbauweise (auch Teilschalenbauweise genannt). Wie bei modernen Plastik-Modellbausätzen üblich wurden zwei Rumpfhälften jeweils in eigenen Montagevorrichtungen aufgebaut und mit allen Gestängen, Seilführungen etc. ausgestattet, ehe man sie zum vollständigen Rumpf längs der Mittelnaht zusammenleimte. Das brachte gegenüber der zuvor umständlichen Innenmontage von Gestängen in fertigen Rumpfröhren große Vorteile, da bequem im Stehen bestückt werden konnte. Heute wird im modernen Kunststoff-Flugzeugbau dieselbe Technik für Rümpfe und Flügel angewendet. Die K1 106 war als Musterflugzeug der K135 D sehr ähnlich (freitragender Knickflügel-Tiefdecker) und für einen amerikanischen Lizenznehmer bestimmt, der die Nachbaurechte, Patente (u. a. für spezielle Leimtechniken) und 10 Versuchsflugzeuge für 200 000 Reichsmark erwerben wollte. Als die Verschiffung des Materials gerade vorbereitet wurde, brach der Zweite Weltkrieg aus. Hans Klemm zog sich 1943 aus seinem Unternehmen zurück, das 1937 von „Klemm-Flugzeugwerk Halle/Saale GmbH“ in „Siebel-Flugzeugwerke Halle“ umbenannt worden war.

Heute sind weiten Teilen der Öffentlichkeit die großen Namen anderer bedeutender Konstrukteure noch in Erinnerung, die repräsentativ für Flugzeug-Großserienbau während der krisengeschüttelten Ersthälfte des 20. Jh. stehen: Junkers, Messerschmitt, Heinkel, Focke, Hirth, Dornier, Fieseler. Weitere international geläufige Namen wie DeHavilland, Antonov, Jakowlew, Karman, Sikorsky sind in der Fliegerei omnipräsent. Die steinigten Wege der Namensträger sind der Öffentlichkeit praktisch unbekannt, weisen jedoch gesellschafts-systemübergreifend erstaunliche Parallelen auf. Bisher ist mir diesbezüglich noch keine zusammenfassende biographische Darstellung internationaler Konstrukteure begegnet, die auch nur den Anschein von Vollständigkeit erwecken konnte; zu geringe wirtschaftliche Bedeutung teilen sich hunderte von Schöpfern mit ihren Werken, wie die folgende Übersicht der wesentlichen Leitlinien deutscher Luftfahrtgeschichte (nur Sport- und Reiseflugzeuge) veranschaulichen mag (Fig. 44 und Fig. 45). Weil wir die Betrachtung ausweiten müssen, um die einsetzende Dynamik im weltweiten Gesamtwirtschaftsgefüge seit der Erholung von der Weltwirtschaftskrise 1929/30 gegen Mitte der 30er Jahre zu verstehen, wird an diese beiden Übersichten eine kleine, zweifafelige Übersicht zur zunehmenden industriellen Konzernverflechtung ohne weitere Anmerkungen angefügt (Fig. 46 und Fig. 47). Die Gegenüberstellung dieser graphischen Übersichten erzeugt zwar einen gewissen Kontrastpunkt, die Vorgehensweise ist jedoch insofern gerechtfertigt, als man über die Beschaffenheit der Diagramme bereits auf signifikante Unterschiede zwischen nordamerikanischen und europäischen Verhältnissen schließen kann, was für unsere Zwecke eine detailliertere Ausführung zum Thema erübrigt.

Festzuhalten bleibt, dass spätestens gegen Mitte der 50er Jahre des 20. Jh. die Entwicklung allmählich umschlägt. Einzelne Namen und Persönlichkeiten treten gegenüber Großkonzernen und deren Weiterentwicklung zu Global-Playern zurück. Der Aufstieg der Elektronikindustrie setzt gegen Ende des Zweiten Weltkriegs synchron mit dem Wettrüsten der Siegermächte ein, was diesen Prozess beschleunigt:

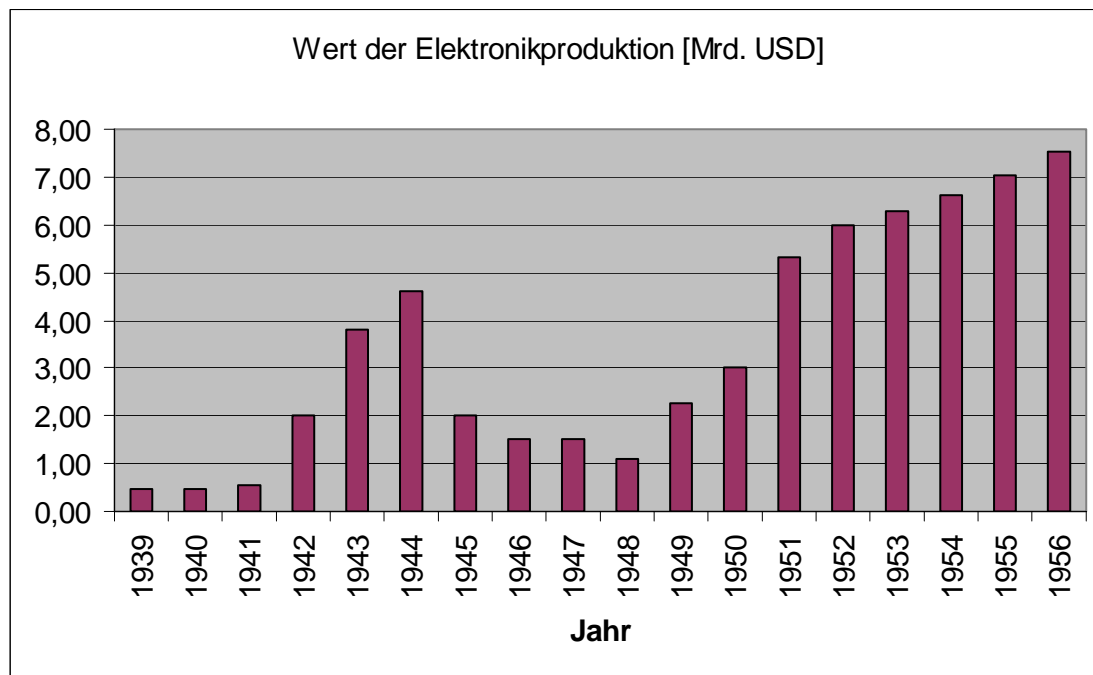


Fig. 43 Der Aufstieg der amerikanischen Elektronikindustrie; zitiert aus „Survey of Current Business“ Nr..3/1957, in (Eyermann, 1963)

Die Jahre 1955 und 1956 sind aufgrund der nachfolgenden Relationen als wirtschaftlich markant hervorzuheben. 1955 befanden sich auf den von 14 Fluglinien beflogenen Nordatlantik-Routen teilweise mehr als 2000 Personen gleichzeitig über dem Ozean, wobei die Zahl der Fluggäste bereits größer war als die der Schiffspassagiere. (Wissmann, 1979) Dazu muss man sich klarmachen, worin die Wirkleistung eines Transkontinentalflugzeuges besteht.

„Auf einem Flug von London nach New York konnte eine ‚Constellation‘ in zwölf Stunden 94 Passagiere über den Ozean befördern. [...] So können in einer Woche von einem Flugzeug durchschnittlich 1000 Passagiere über den Ozean befördert werden; die Personentransportleistung eines Riesendampfer vom Typ ‚Queen Mary‘ liegt dagegen für den gleichen Zeitraum bei nur 2000 Personen. Das bedeutet, daß zwei Flugzeuge in der Personenbeförderung genausoviel leisten wie ein Riesenschiff von 80000 BRT. Günstig für das Flugzeug ist außerdem das Zahlenverhältnis Besatzung zu Passagieren, das beim Schiff bei etwa 1:2 liegt, beim Flugzeug dagegen nur etwa 1:12 beträgt. Durch die [...] Düsenflugzeuge ist die Überlegenheit des Flugzeugs noch vergrößert worden. Ein moderner Ozeanriese vom Typ ‚Queen Elisabeth II.‘ kostete etwa 100 Mill. Dollar, hatte 1000 Mann Besatzung und beförderte 2000 Passagiere. Eine ‚Boing 707‘ dagegen kostet nur 8 Mill. Dollar, benötigte nur 8 Mann Besatzung, bot 185 Passagieren Platz und beförderte im gleichen Zeitraum genausoviel Menschen über den Ozean. [...] Im Linien- und Charterluftverkehr wurden bereits im Jahre 1967 etwa 5 Mill. Fluggäste über den Atlantik geflogen. Die Schifffahrt hatte dagegen nur 600 000 Passagiere in etwa 900 Überfahrten zu verzeichnen.“* (Wissmann, 1979)

* Zwischen 1960 und 1979 stieg die Zahl des weltweiten (!) Passagieraufkommens schließlich von 106.000.000 auf 639.000.000 (sogar 747.000.000, wenn man die damalige UdSSR mitberücksichtigt). (Angelucci, 1981)

Und auch die folgende Aussage spiegelt den Einfluss der Luftfahrt als dominierende Industrie zur Mitte der 50er Jahre wieder:

„Aus militärischen Gründen nahm die Luftfahrt im wirtschaftlichen Leben der Industriestaaten einen großen Raum ein. Die Stahlindustrie der USA hatte im Jahre 1956 ‚nur‘ 615000 Beschäftigte, die Luftfahrtindustrie 885000. Allerdings wurde dieses Verhältnis weitgehend durch die Rüstungsproduktion verursacht. Der zivile Bedarf wäre von einem Teil der Beschäftigten zu decken gewesen. Die Zahl der in der Flugzeugindustrie Beschäftigten nimmt jedoch von Jahr zu Jahr ab, da sich auf dem Rüstungssektor das Schwergewicht auf die Raketen verlagert.“ (Wissmann, 1979)

Der besagte Übergang zur Raketentechnik ist heute von entscheidender Wichtigkeit für die Herausprägung der modernen Geoinformatik. Außerdem bedingt die konsequente Weiterentwicklung von unbemannten Flugkörpern indirekt das Heranreifen einer Technologie die das Hinüberschielern von heute (noch) kleinen Märkten in die industrialisierte Luft- und Raumfahrttechnik an einer entscheidenden technologischen Nahtstelle attraktiv werden lässt: miniaturisierte Regelkreissysteme zur Fluglagebestimmung und -regelung (Trägheitsnavigation).

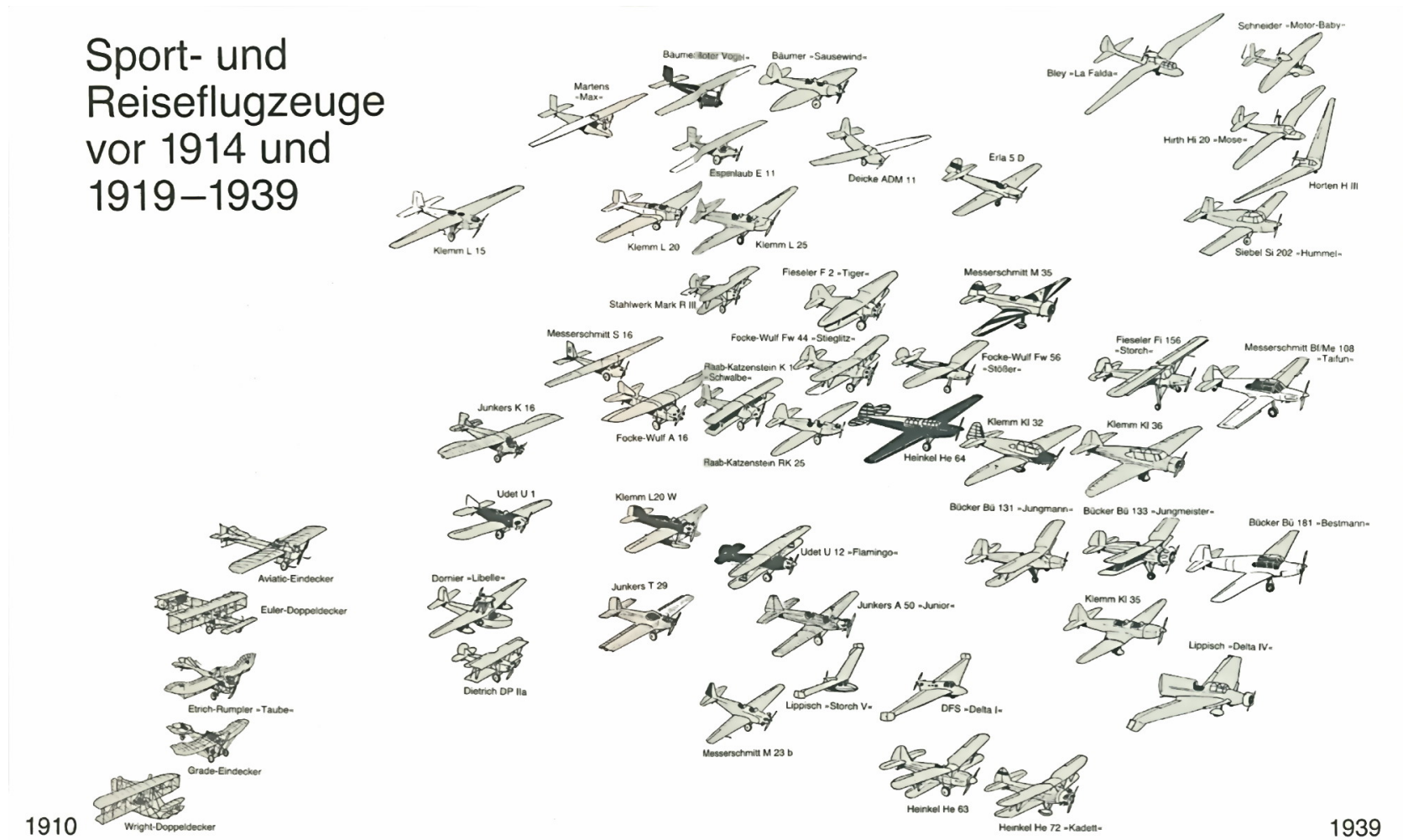
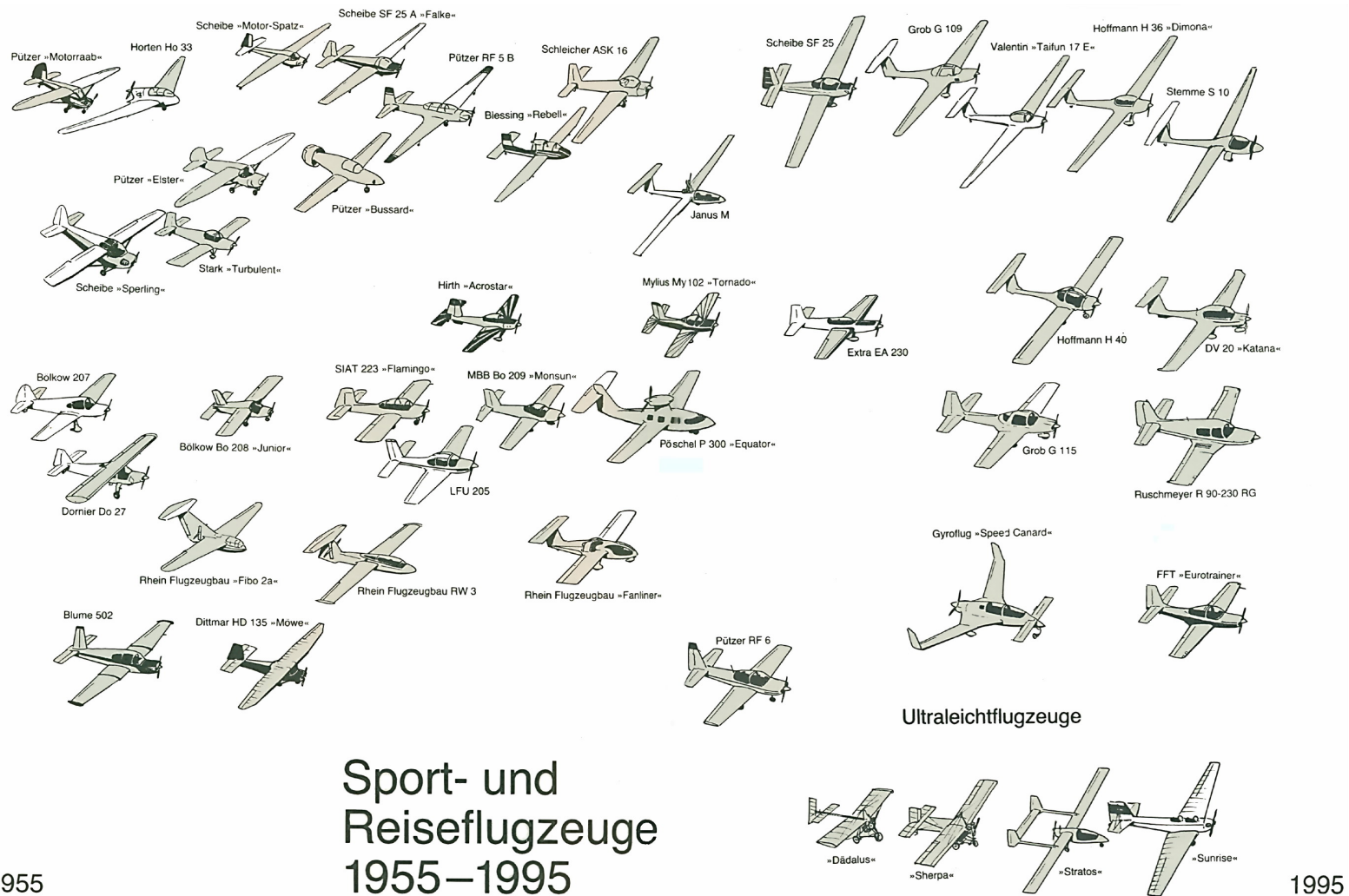
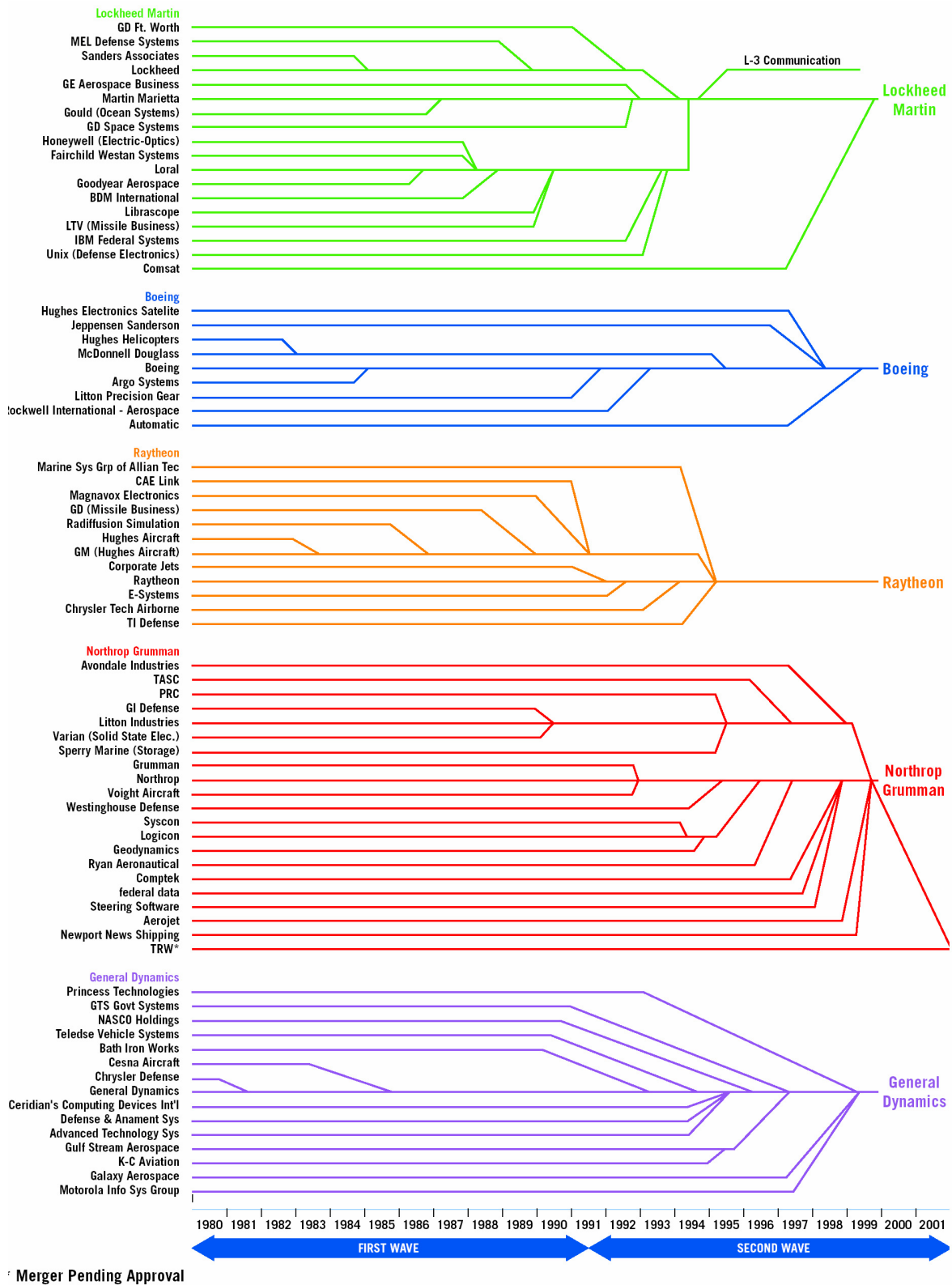


Fig. 44 Leitlinien des deutschen Flugzeugbaus – Teil I; vom Umschlagdeckel: (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995)



1955 **Sport- und Reiseflugzeuge 1955–1995** 1995
 Fig. 45 Leitlinien des deutschen Flugzeugbaus – Teil II; vom Umschlagdeckel: (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995)



7 - 4

FINAL REPORT OF THE COMMISSION ON THE FUTURE OF THE UNITED STATES AEROSPACE INDUSTRY

Fig. 46 US-amerikanischer Konsolidierungsprozess der Luft- und Raumfahrtindustrie (Walker et al., 2002)

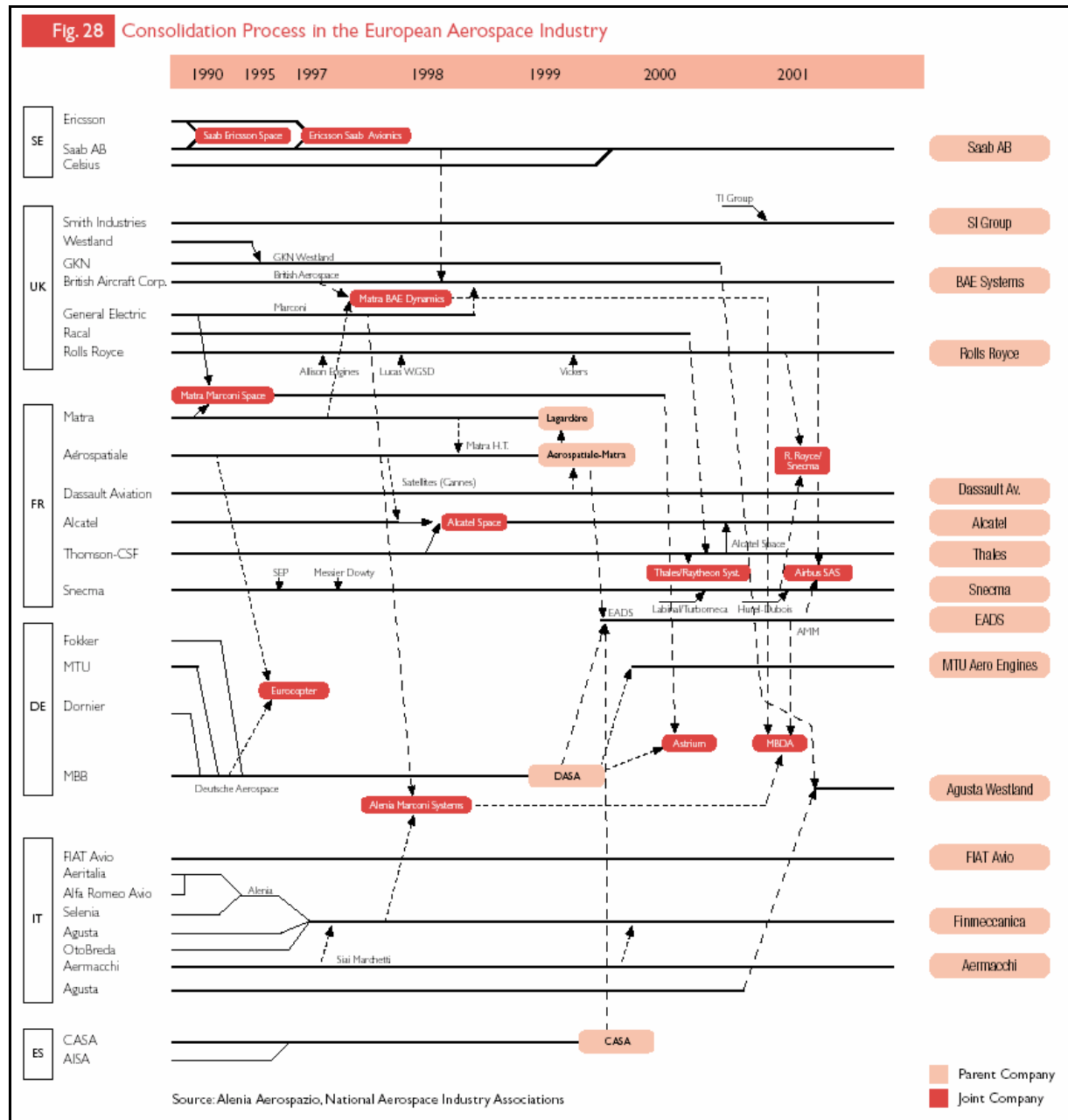


Fig. 47 Europäische Konzernverflechtung in der Luft- und Raumfahrtindustrie (Halse, 2003)

Es gäbe viele Möglichkeiten, graduelle Veränderungstendenzen auszuweisen, die von der Flugzeug- zur Raketentechnik überleiten. Eine besonders anschauliche Linie lässt sich anhand der Idee des (Erd-)Kampfflugzeuges aufzeigen, weil darüber der Bogen sogar zur Geoinformatik und ihrer derzeitigen Hauptentwicklungsrichtung aufgespannt werden kann. Zu Zeiten des Zweiten Weltkriegs wurden ebene Karten von Zielgebieten angefertigt, um präzise Übersichtspläne von Punktzielen zu gewinnen. Das Basisprozedere dabei war stets dasselbe: eine Region wurde befliegen und dabei flächig Vertikalnahmen erzeugt. Die Bilder wurden zu Analog-Luftbildmosaiken sortiert und dann in entsprechende Übersichtsplanen kleineren Maßstabs umgezeichnet. In einem weiteren Prozessschritt wurden anhand des Bildmaterials die wichtigsten strategischen Ziele ausgewählt. Von diesen wurden schließlich in einem dritten Schritt großmaßstäbige Detailübersichtspläne angefertigt und mit

allen greifbaren Informationen sonstiger Nachrichtenquellen in einer Zielkartei zusammengeführt.

Kurz vor oder nach Beginn einer Offensive werden die Detailkarten erneut einer Veränderungsbewertung mit Hilfe von Luftaufklärung unterzogen, teilweise um die letzten (baulichen, infrastrukturellen) Objektveränderungen zu erfassen, oder um Schadensberichtsmeldungen zu erstellen. Im Grunde genügte für jeden solchen Detailplan die Angabe einer einzigen Koordinate im Flächenschwerpunkt, um ihn koppelnavigatorisch in der Landschaft wieder zu finden. Um die Gesamtentwicklung bis zur Jahrtausendwende verstehen zu können, muss man jedoch die Betrachtung ausweiten und Entwicklungstendenzen völlig anderer Herkunft berücksichtigen:

vier Tage nach Beginn des Barbarossa-Feldzugs im Juni 1941 griffen 36 der berühmtesten STUKAs (STUKA: Sturzkampf-Flugzeug) eine Formation aus 60 russischen Panzern an und konnten dabei mit ihren Druck-/Splitterbomben im Sturzangriff nur einen einzigen davon ernsthaft beschädigen. Man lernte aus diesem Vorfall, dass man eine zielgenaue, panzerbrechende Waffe benötigen würde, um den Vormarsch aus der Luft wirksam sichern zu können. Deshalb wurde bis 1942 die Ju87G-1 Version des STUKAs in einer nichtsturzkampftauglichen Version mit zwei 37mm Kanonen entwickelt, die eine beträchtliche Wirkungssteigerung zur Folge hatte.

„Allein der Stuka-Pilot Oberst Hans Ulrich Rudel konnte neben der Zerstörung eines 26000 Tonnen-Schlachtschiffs der Sowjets rund 519 Panzerabschüsse auf seinem Konto verbuchen. Wenn es nur ein einziger Flieger schaffen kann, eine ganze sowjetische Panzerarmee (und ein Schlachtschiff!) auszuradieren, kann man wirklich von einem «Kraftmultiplikator» sprechen.* Gegen Ende des Kriegs war man bei der Luftwaffe in der Entwicklung soweit gediehen, dass man inzwischen sogar bei den einzig für die Luftnahsicherungsaufgabe gebauten Flugzeugen, etwa der zweimotorigen, schwer gepanzerten Hs 129B, Kanonen vom gewaltigen Kaliber 75mm einbaute. Die Hs 129 konnte zwar nur zwölf der mächtigen 11,8kg schweren 75-mm-Granaten mitführen, doch hatte man die Piloten darauf trainiert, lediglich kurze Feuerstöße von höchstens fünf Granaten abzugeben und diese nicht aus größeren Entfernungen als 500 Metern. Aus einer solchen Entfernung kann man kaum noch danebenschießen. Kein Panzer der damaligen Zeit hatte dem Einschlag solcher Geschosse noch etwas entgegenzusetzen... (...)“ (Clancy, 2000)

Die Russen antworteten auf diese bedrohliche Entwicklung mit der IL-2 „Sturmowik“, dem „fliegenden Panzer“: diese Maschine war mit einer 680kg schweren, 7mm starken Panzerplatte aus einem Guss, einer 52mm starken Frontscheibe aus Panzerglas und zwei 20mm-, 23mm- oder 37mm Kanonen, sowie (in der späteren Version IL-2M) einem Heckschützen ausgestattet. Insgesamt wurden von diesem Flugzeugtyp mehr als 40.000 gebaut. Die IL-2 gilt damit als eines der meistgebauten Flugzeuge des 2. Weltkriegs. Sie kann unter funktionalanalytischen Gesichtspunkten als direkter Vorläufer des erfolgreichen Kampfhubschraubers Mi24 „Hind“ betrachtet werden, der noch heute in Dienst steht.

„Die russischen Sturzbomber flogen ihre Angriffe bis auf Höhen von kaum zehn Metern, und so knapp über dem Boden waren sie für die deutsche Panzertruppe von

* Rudels Erfolge gelten international als beispiellose soldatische Einzelleistung des Zweiten Weltkriegs.

geradezu verheerender Tödlichkeit. In der Nähe der russischen Stadt Kursk schaffte es eine Abteilung von *Shturmoviks* am 7. Juli 1943, siebzig Panzer der 9. Panzerdivision der Deutschen in gerade einmal zwanzig Minuten zu zerstören. Das ist ein Äquivalent eines kompletten Panzerregiments!“ (Clancy, 2000)

Aus diesen beiden Begebenheiten lässt sich v.a. eine Erkenntnis ziehen: CAS-Flugzeuge* (CAS = Close Air Support; Luftnahsicherung, Kampf- bzw. Schlachtflugzeuge) waren preiswerte und hochwirksame Waffensysteme im Sinne einer ökonomischen Kosten-Nutzen-Relation. Ihr Anwendungspotential litt jedoch erheblich, sofern die absolute Luftherrschaft nicht gegeben war, denn im Vergleich zu Jagdflugzeugen waren sie aufgrund ihrer Panzerung vergleichsweise schwerfällig und daher trotz ihrer relativen Widerstandsfähigkeit, die aus konstruktiven Gründen stets nur partiell ausgelegt werden konnte, durchaus verwundbar. Sie fielen deshalb gegnerischen Jagdflugzeugen entsprechend leicht zum Opfer.

Das ist einer der maßgeblichen Einflussfaktoren dafür, warum durch die Kombination Radar-Flugabwehrkanone bzw. -rakete der allgemeine Trend zum langreichweitigen Raketenkampf (Standoff-Weapons: autonom operierende Lenkwaffen in Luft-Luft, Luft-Boden oder Boden-Boden-Varianten) und damit der Trend zum elektronischen Gefechtsfeld einsetzen musste, denn im Gegensatz zu CAS-Flugzeugen wurden die sie schützenden Jäger nun immer empfindlicher gegen Beschuss von Flugabwehrsystemen, so dass die Eindringtiefe in den gegnerischen Luftraum sowohl von Jägern als auch von CAS-Flugzeugen beständig kleiner zu werden drohte.

Und dieser Trend schließt den Kreis zur oben genannten Aufklärung bzw. militärischen Kartografie: moderne Lenkwaffensysteme sind trotz ihrer Präzision in einer Hinsicht

* Im Zweiten Weltkrieg brachten die Alliierten keine eigenen, speziell für die Luftnahunterstützung konstruierte Maschinen hervor. Die in einer vergleichbaren Rolle bewährte britische Hawker „Typhoon“ war eine Umwidmung, ebenso wie die amerikanische P-38 „Lightning“ oder P-47 „Thunderbolt“. In den USA wurde diese Lücke wirkungsvoll mit der Serieneinführung der A-10 „Thunderbolt-II“, auch bekannt unter den Namen „Warthog“ (Warzenschwein) bzw. „Hog“ (kastriertes Schwein – wahrscheinlich deshalb, weil dieses zweistrahlige Düsenflugzeug niedriger Wärmesignatur fast ausschließlich mit robuster, analoger Bordinstrumentierung und Papierkarten auf dem Kniebrett geflogen wird) im Jahr 1976 geschlossen. Es gilt als bestes CAS-Flugzeug der Geschichte. Bis 1980 waren 650 Flugzeuge gebaut worden. Im Verlauf der Desert Storm Aktivitäten wiedererstarke es 1991 in seiner Primärrolle. Weshalb hier die A-10 als Beispielträger gewählt wurde, liegt an einer einzigartigen Besonderheit dieses Flugzeugs, die aus Umweltschutzgründen strikt abgelehnt werden muß: das Flugzeug ist um seine siebenläufige „GAU-8“ 30mm-Gatling-Kanone (> 6m Länge, Gewicht: 1,8 t, 50-70 Schuß/min, 1350 Schuß gesamt) quasi herumgebaut und verschießt im Kriegsfall schwach-radioaktive Urankernmunition (abgereichertes U^{235} [Dichte $\rho_U = 18,7 \text{ g/cm}^3$, Siedepunkt $v_U = 3818^\circ\text{C}$] – im Frieden wird dagegen mit Wolfram-Geschossen gearbeitet [$\rho_W = 19,35 \text{ g/cm}^3$; $v_W = 5660^\circ\text{C}$]). Nur zum Vergleich: die Cockpit-Panzerung der A-10 besteht aus einer Wanne aus Titan, einem Element, das sich nur äußerst schwer schmieden und schweißen lässt, und deshalb die Flugzeugzelle teuer macht: $\rho_{Ti} = 4,54 \text{ g/cm}^3$; $v_{Ti} = 3287^\circ\text{C}$; Gegenüber Aluminium bedeutet dies einen gewaltigen Unterschied: $\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/cm}^3$; $v_{Al} = 2467^\circ\text{C}$). Anhand der A-10 Einsatz-Statistik während DesertStorm kann man sich auf indirekte Weise ein gutes Bild davon machen, wie schwer einerseits ein größerer Landschaftsausschnitt durch Verwendung solcher Munition geschädigt wird, und wie attraktiv andererseits ein solches Waffensystem im operationellen Einsatz erscheint: 144 A-10-Flugzeuge aktiv, dauernde Einsatzbereitschaft: 95%, Verluste insgesamt: 4 Maschinen, Einsatzaufkommen: 8755 Sorties (Einsatzflüge), bestätigte(!) Abschüsse: 1106 LKW, 987 Panzer, 926 Geschütze, 501 gepanzerte Mannschaftswagen, 249 bewegliche Befehlsstände, 51 SCUD-Startrampen, 96 irakische Radaranlagen und SAM-Stellungen, 10 Flugzeuge am Boden, 2 Hubschrauber im Luftkampf. Ein prozentual hoher Einsatz aller verwendeten Gefechtsmittel entfielen während des gesamten Krieges alleine auf die A-10, darunter 5013 AGM-65 „Maverik“-Fire-and-Forget-Lenkflugkörper, 14.184.227kg Bomben und 940.254 GAU-8-Granaten. (alle Angaben aus: (Clancy, 2000), ergänzt um die Werte zu Dichte- und Siedetemperaturen)

empfindlich – sie verfügen bislang praktisch über keine Selbstverteidigungskapazität während eines Angriffsfluges ins gegnerische Hinterland, und wären damit leichtes Ziel für gegnerische Jagdflugzeuge mit Luft-Luft-Raketen oder den bodengestützten Luftabwehrgürteln. Es gibt nur ein einziges wirkungsvolles „preiswertes“ Gegenmittel dafür: die Marschflugkörper – wie sie auch treffenderweise heißen – müssen solange wie möglich unentdeckt bleiben. Und das funktioniert am besten im Tiefflug auf einer Höhe von ca. 30m über Grund (Terrain Following bzw. Kontur-Tiefflug). Um die Flugkörperkosten (die im direkten Vergleich zu konventionellen Waffen horrend hohe Summen verursachen) zu minimieren konnten bislang keine intelligenten Terrain-Following-Systeme entwickelt werden, die es der Rakete erlauben würden, den Weg zum Ziel vollkommen selbständig auszuwählen und während des Fluges zu modifizieren. Der technische Ausweg aus dieser Situation besteht darin, den Flugkörper mit einem hochgenauen digitalen Geländemodell, einer präzisen Zielkoordinate für den Blindanflug zu füttern, und den Flugweg über diesem DGM festzulegen. Damit waren Marschflugkörper – zumindest bislang - Programmautomaten mit nur sehr eingeschränkten Freiheitsgraden während des Anflugs. Der Flugweg wird sinnvollerweise von der Position des Einschlagpunktes aus zurückgerechnet, um denjenigen Pfad zu finden, der möglichst lange im Radarschatten von Geländeerhebungen liegt.*

Und damit wird ein weiterer Transformationsprozess deutlich, der sich militärisch innerhalb der letzten Jahrzehnte herausgebildet hat, und in dem sich eine ganze nachgeordnete Informationsindustrie gerade befindet. War früher eine Koppelkoordinate über einem verebneten Erdgitternetz notwendig, so sind heute die Ansprüche dergestalt gestiegen, dass ein möglichst genaues flächendeckendes Geländeoberflächenmodell (inkl. aller darauf befindlicher Hindernisse) bekannt sein sollte, um die Waffenleistung in ökonomischer

* Das prominenteste Beispiel für einen Marschflugkörper ist die Raytheon BGM-109 „Tomahawk“ in der TLAM-Ausführung (TLAM: Tomahawk Land Attack Missile). „In den 70er-Jahren für ein nukleares Jüngstes-Gericht-Szenario entwickelt, erlebte die TLAM [tea-lamb ausgesprochen, Anm. d. Verf.] in den 90er-Jahren eine Wiedergeburt als der dicke Knüppel der amerikanischen Politik“ (Clancy, 2000)

Gegenüber der oben genannten, stark vereinfachten Version ist die Wirklichkeit sehr viel komplizierter. Hier ein kleiner Einblick:

Die Cruise-Missile wurde bislang in 3 Generationen („Blöcken“) produziert. Diese unterscheiden sich v.a. durch die Art ihrer Navigations- und Kommunikationsanlagen. 1991 musterte man die TLAM-N (Nuklearwaffe) aus. Der modernste Block III-Flugkörper BGM-109D, oder TLAM-D, weist folgende Merkmale auf: 6,25m Länge (inkl. Startbooster), 51,8cm Durchmesser (ausgelegt für Standard-Torpedorohr für U-Boot Start!), 1200kg, 450kg Sprengkopfmasse, 880km/h, 870NM Reichweite. Die Navigation basiert auf einer Kombination aus INS, TERCOM (Terrain Contour Matching), DSMAC (Digital Scene Matching Area Correlation: Passpunktkorrelation von auf dem Boden befindlichen markanten Geländeobjekten mittels Infrarotkamera und einem aktiven IR-Beleuchtungssystem zur Fix-Bestimmung) und GPS. Einschlagradius im Ziel: 3m.

Die Defense Mapping Agency (Bestandteil der NIMA: National Imagery and Mapping Agency) erarbeitet auf der Grundlage des TDI (Target Data Inventory, die amerikanische Bomber-Zielkartei, das Herzstück der strategischen Luftkriegführung und direktes Ergebnis sämtlicher Aufklärungstätigkeit bzw. permanenter Bedrohungsanalytik, in den 60er Jahren bereits zu einem zweibändigen Werk mit über 1000 Seiten und jährlich 3 Revisionszyklen herangereift, Bd.1: Alphabetische Zielaufstellung innerhalb des gesamten kommunistischen geopolitischen Lagers, Bd.2: Unterteilung nach Ziel-Kategorien) und der Bombing Encyclopaedia die TERCOM Karten in einem aufwendigen Fusionierungsprozess aller Daten aus dem gesamten Intelligence-Bereich (Pressemeldungen, geheimdienstliche Nachrichtenbeschaffung und Luft- und Weltraumaufklärung). Für drei alternative Flugrouten (eine vom Persischen Golf, eine vom Roten Meer und eine vom Mittelmeer aus) für einen Cruise-Missile-Flug nach Bagdad wurden 6 Monate benötigt, um den TLAM-Planungsstäben die TERCOM-Daten zur Verfügung zu stellen. In einer neueren Variante der „Tactical Tomahawk“ soll es möglich werden, einen Zielwechsel während des Fluges vorzunehmen, was eine Zweiwege-Satellitendatenverbindung erforderlich macht. Der Stückpreis einer Tactical Tomahawk wird bei etwa 575.000 USD liegen. (alle Angaben aus: (Burrows, 2001; Clancy, 2001))

Hinsicht zu optimieren (im militärischen Kontext spricht man von Saturierungsschwelle, die ein verteidigtes Ziel bietet, und die mit „n“ einzusetzenden Waffensystemen überwunden werden muss). Was hier für Drohnen ausgeführt wurde, gilt prinzipiell auch für tieffliegende bemannte Jagdbomber, deren wirksamster Schutz eine Kombination aus Relief, Geschwindigkeit, Passivsensorik, elektronische und physikalische Täuschungsfähigkeit (ECM, Chaffs, Flares etc.) und Echtzeit-Bedrohungsanalysefähigkeit darstellt.

Es liegt aufgrund der Fußnotentextaussagen die Vermutung nahe, dass derzeit über den meisten Krisenregionen der Welt DGMs mit unterschiedlichsten Genauigkeitsniveaus und Größen angefertigt werden. Wie man anhand der prinzipiellen Darstellung zur Verwendung von Marschflugkörpern sieht reicht im Grunde genommen die 3D-Kartierung eines Anflugsektors von wenigen hundert Metern Breite und mehreren hundert Kilometern Länge vollständig aus. Gegenüber einem halben Jahrhundert vorher bedeutet dies jedoch einen erheblichen Mehraufwand. Dieser wird jedoch durch Computerunterstützung teilweise kompensiert und die Produktivitätssteigerungen in den Softwarepaketen nehmen ihren Weg in die kommerziellen Märkte entsprechend rasch, wie man anhand einiger dafür notwendiger Schlüsselfunktionalitäten beobachten kann (z.B. Stichwort „ATM“ – Automatic Terrain Modelling innerhalb der digitalen Photogrammetrie). Dennoch ist dieser Trend von einfachen, punktuellen Aussagen zur aufwendigen, komplizierten Flächengeometrie unumkehrbar. Die Bedeutung von digitalen Oberflächenmodellen kann anhand der exemplarisch dargelegten Sichtweise abschließend gar nicht überbewertet werden.

Wie bereits erwähnt, würde eine noch weiterführende Vertiefung ins Detail den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb soll an dieser Stelle stattdessen eine weitere allgemeine Betrachtung zur Ausdimensionierung des Flugzeugbaus in den letzten 100 Jahren erschlossen werden. Es ist relativ schwer, eine so einfache Frage zu beantworten, wie viele Fluggeräte seit den Wrights geflogen sind, um das ganze Anwendungsgebiet der Fernerkundung und den heutigen Entwicklungszustand in ihrer Wirkdimension klar abzugrenzen. Noch schwerer ist es, das notwendige wirtschaftliche Umfeld in wenigen prägnanten, strukturellen Vergleichen dafür zu erfassen. Ebenso selten erhält man in der Literatur einen entsprechenden Einblick, auf welche Weise das Investitionskapital mit der erzielten technischen Leistung korreliert. Deshalb wenden wir hier einen kleinen Kunstgriff an: Wir entledigen uns der systembedingten Eigenwahrnehmung und verpflanzen den Betrachterstandpunkt an einigen Stellen in den ehemals sozialistischen Teil Deutschlands. Dort wurden, zumindest der oberflächlichen Wahrnehmung nach, aus politischen Gründen üblicherweise dichtere und zugänglichere Zahlenwerke zusammengetragen als dies in so konzentrierter Form im Westen opportun erschien. Darüber hinaus halten die hier gewählten Zahlen einer genaueren Prüfung durchaus stand, wenn man hiervon die systembedingte Terminologie und sozialistische Standardagitation abzieht. Zunächst liegt es unbestreitbar auf der Hand, dass die militärische Luftrüstung verantwortlich war für die Übertragung zahlloser technischer Einzelleistungen in die Masse. Deshalb ist es nützlich, ihr einen entsprechenden Anteil zu widmen. Die Stärke der weltweiten Luftflotten hielt sich im Jahre 1910 in engen Grenzen:

	Luftschiffe	Flugzeuge
Deutschland	9	5
England	2	4
Frankreich	3	36
Italien	3	2
Österreich	3	2
Japan	1	2
Russland	3	3
Belgien	2	2
USA	2	2

Fig. 48 Stärke der Luftflotten der Welt Ende 1910; (Groehler, 1981)

Nach einer Schätzung des renommierten Berichtsdienstes Jane betrug im Mai 1910 der weltweite Gesamtbestand etwa 2000 Flugzeuge (Groehler, 1981). An anderer Stelle wird allerdings von knapp 10 000 Flugzeugen zwischen 1903 und 1914 berichtet (Angelucci, 1972).

Die einsetzende Rüstung entwickelte sich auf dem Weg in den Ersten Weltkrieg etwa so:

	1911			1912		
	Armee	Flotte	privat	Armee	Flotte	privat
Großbritannien	57	31	167	23	6	130
China	1	–	1	1	–	2
Frankreich	161	10	400	259	1	422
Deutschland	50	2	101	46	2	100
Italien	31	4	36	22	4	50
Japan	4	4	3	10	4	2
Rußland	23	5	41	99	1	50
USA	11	3	301	3	2	750 (?)

Fig. 49 Flugzeugbestände der wichtigsten Länder im Jahre 1912 (Groehler, 1981)

Um sich ein Bild von der Größenordnung dieser Anstrengungen zu machen, bedarf es der Kenntnis, wie viel Kaufkraft hinter diesen Zahlen steckt. Da mir die dafür notwendigen volkswirtschaftlichen Kenntnisse und v. a. die entsprechenden Währungstabellen fehlen, führe ich hier im Folgenden stattdessen eher punktuelle Vergleiche an. Der erfolgreiche deutsche Flugzeugbauer Hans Grade hatte im Oktober 1909 den mit 40.000 Mark dotierten „Lanz-Preis der Lüfte“ für einen 8-förmigen Flug über 3 km Distanz gewonnen. Diese Summe entsprach damals etwa dem Jahreseinkommen von 40 Facharbeitern. (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995).

Die Entwicklung der Flugleistungen in der Ära von 1906 bis 1914 lässt sich – auszugsweise – wie folgt zusammenfassen:

Geschwindigkeitsrekorde					
Datum	Ort	Pilot	Flugzeugtyp	Triebwerk	Leistung
21.9.1908	Auvours (F)	Wilbur Wright	Wright Model A	30 HP Wright	44 km/h
29.9.1913	Reims (F)	Maurice-Prevost	Deperdussin	160 HP Le Rhône	204 km/h
Flugdauerrekorde					
12.11.1906	Bagatelle (F)	Santos-Dumont	Santos-Dumont 14-bis	50 PS (36,7kW) Antoinette	21 sec (!)
11.7.1914	Johannistal (D)	Böhm	Albatros	100 PS (73,5kW) Mercedes	24 h 12 min
Streckenrekorde					
13.9.1906	Bagatelle (F)	Santos-Dumont	Santos-Dumont 14-bis	24 PS (17,6kW) Antoinette	7,8 m (!)
28.6.1914	Johannistal (D)	Landmann	Albatros	(75/100PS) (55,1/73,5kW) Mercedes	1900,000 km
Höhenrekorde					
13.11.1908	Issy (F)	Henri Farman	Voisin	40 PS (29,4kW) Vivinus	25 m
14.7.1914	Leipzig (D)	Heinrich Oelerich	D. F. W.	100 PS (73,5kW) Mercedes	8150 m

Fig. 50 Flugrekorde* bis zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs; (Angelucci, 1981)

Da die Steigleistung von Flugzeugen v.a. für Aufklärungsflugzeuge eine entsprechend große Rolle besitzt sei mit der folgenden Abbildung ein Überblick zur Annäherung an die technischen Grenzen für Kolbenmotoren gegeben. Die daraus gewonnene Erkenntnis ist erstaunlich: im ersten Jahrhundert des bemannten Motorfluges wurde bereits nach 20% der zeitlichen Entwicklungsstrecke eine Leistung erreicht, die derjenigen des Passagierflugzeitalters mit Düsenflugzeugen entspricht. Das ist v.a. hinsichtlich der Entwicklung von Höhenaufklärungsflugzeugen bedeutsam, da diese erst 30 Jahre später ernsthaft ins Auge gefasst wurden, und bis heute kein Dutzend Flugzeugtypen existiert, die operationell für längere Zeiträume (Zeitskala Stunden) oberhalb von 17 km Flughöhe eingesetzt werden könn(t)en.

* Zum Vergleich: 1929 existierten 82 Weltrekorde. 80 davon verteilen sich auf folgende Industrienationen: England: 7, Frankreich: 13, USA: 17 und Deutschland: 33, mit der innerdeutschen Verteilung Junkers-Dessau (11), Dornier-Friedrichshafen (7), Heinkel-Rostock (4) und Bäumler-Hamburg (1). (Wissmann, 1979) Die Blüte der allgemeinen Rekordjagd wurde gegen Mitte der 30er Jahre erreicht. Mit anderen Worten: Alles, was man im 21. Jh. leistungstechnisch mit viel Aufwand optimieren können, blickt in der Masse auf ca. 70 Jahre Vergangenheit zurück. Die Ausnahmen bestätigen auch hier die Regel, wie später anhand der Segelflugstreckenrekorde noch gezeigt wird ...

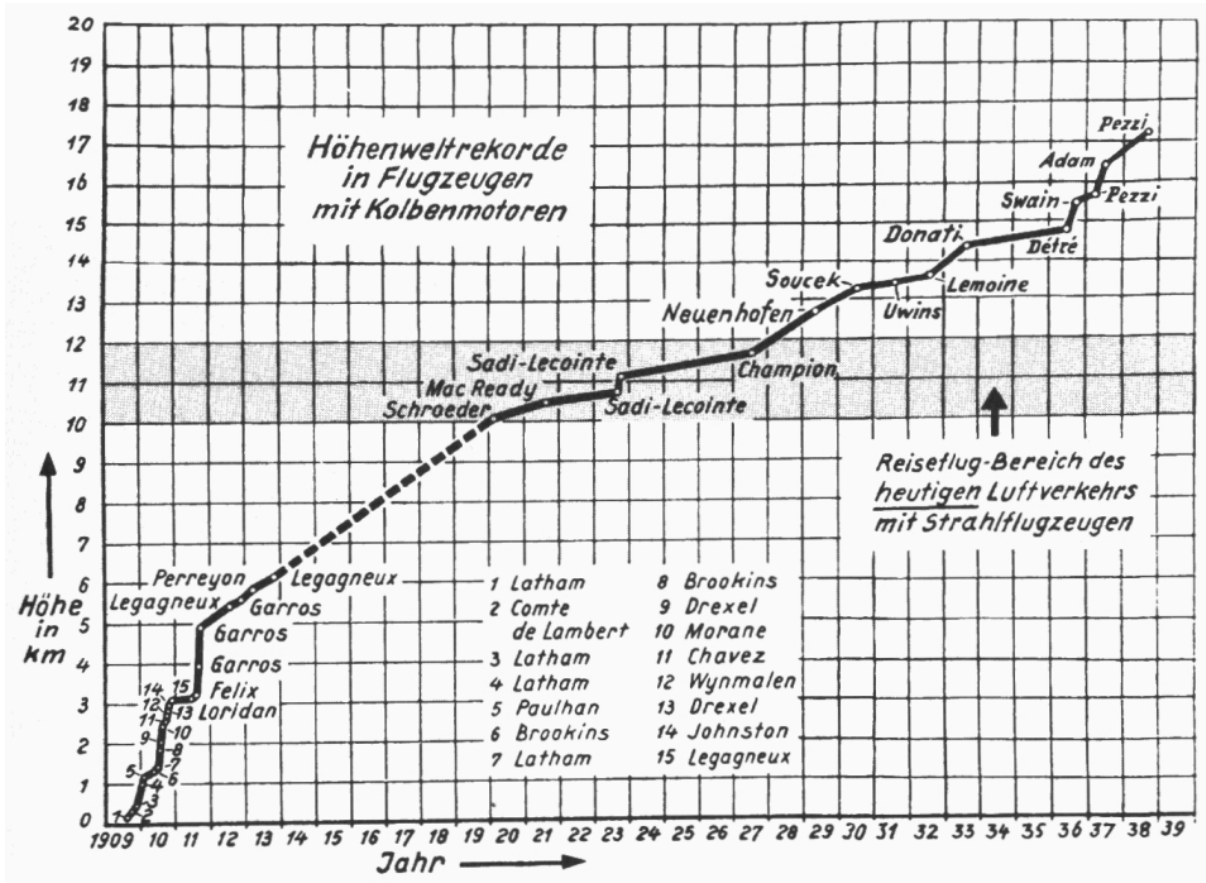


Fig. 51 Höhenflugweltrekorde (1909 – 1939); (Bergius, 1969)

Die Gesamtflugzeugproduktion belief sich im Ersten Weltkrieg auf 138 685 Flugzeuge, wie aus der folgenden Darstellung hervorgeht:

	1914	1915	1916	1917	1918	Gesamtproduktion
Deutschland	1 348	4 532	8 182	19 646	14 123	47 831
Österreich-Ungarn	70	238	931	1 714	2 438	5 391
Gesamt	1 418	4 770	9 113	21 360	16 561	53 222
Großbritannien	245	1 933	6 099	14 748	32 036	55 061
Frankreich	541	4 489	7 549	14 915	24 652	52 146
USA	–	–	83	1 807	11 950	13 840
Italien	–	382	1 255	3 871	6 523	12 031
Rußland	535	1 305	1 870	1 897	–	5 607
Gesamt	1 321	8 109	16 856	37 238	75 161	138 685

Fig. 52 Die Flugzeugproduktion der Großmächte während des Ersten Weltkriegs (in Stück) (Groehler, 1981)

Eine andere luftfahrthistorische Quelle (ebenfalls ostdeutscher Herkunft: Wissmann) benennt 44 000 Flugzeugzellen und 48 000 Flugmotoren aus deutscher Produktion für denselben Zeitraum. Interessant ist weiterhin die Entwicklung der Aufklärungsflugzeuge, die ebenso wie der Ballon zuvor zur Identifikation von Truppenkonzentrationen, deren Bewegungsverhalten

und zur Artilleriebeobachtung eingesetzt wurden. Die zahlenmäßige Entwicklung von französischen Aufklärungsmustern im Vergleich mit britischen („Scouts“) ist ebenso aussagekräftig:

Zeit	Zahl der Flugzeuge	Zahl der Staffeln	Bomberstaffeln	Jagdstaffeln	Aufklärungsstaffeln	gemischte Staffeln
11.11.1918	3437	260	32 (479)	83 (1392)	145 (1566)	-
Mitte 1925	1100	107	32 (320)	32 (320)	43 (470)	-
Mitte 1928	1540	138	30 (300)	30 (300)	44 (440)	32 (320)

Fig. 53 Entwicklung der französischen Luftstreitkräfte 1918 - 1928 (in Klammern: Flugzeuge); (Groehler, 1981)

Zeit	Zahl der Flugzeuge	Zahl der Staffeln	Bomberstaffeln	Jagdstaffeln	Aufklärungsstaffeln	Marinestaffeln	gemischte Staffeln
1918	3300	188	?	?	?	?	?
Mitte 1920	371	33	10	7	5	?	20
Mitte 1925	550	59	11	9	5	16	18
Mitte 1928	800	85	18	12	6	23	16
Anfang 1932	1000	90	35	17	10	12	26

Fig. 54 Die Entwicklung der britischen Luftstreitkräfte 1918 - 1932; (Groehler, 1981)

Eine weitere Quelle gibt folgende Übersicht:

Land	Absolute Zahl der Aufklärungsflugzeuge	Prozentualer Anteil der Aufklärungsflugzeuge in den Luftflotten
Deutschland	1442	52,8 %
Österreich	391	62,8 %
Großbritannien	503	28,6 %
Frankreich	1505	45,3 %
Belgien	100	65,4 %
USA	277	37,4 %

Fig. 55 Der Bestand an Aufklärungsflugzeugen in verschiedenen Luftflotten am 11. November 1918; (Eyermann, 1963)

„Zu Beginn des Jahrhunderts hatte man Geheimnachrichten noch ausschließlich über Agenten beschafft. [...] Im ersten Weltkrieg zeigte es sich zum ersten Mal, daß das Aufklärungsflugzeug oft mehr vermochte als der simple Agent. Bei günstigem Wetter konnte es schneller herausbekommen, was der Gegner tat. Die üblichen Anzeichen von Offensiven, wie Truppenverschiebungen und vermehrte Munitionstransporte, waren auf Luftbildern klar zu erkennen. Die Piloten meldeten sie meist eher als die

Spione, deren Schwierigkeit – trotz der neuauftkommenden Agentenfunkgeräte – die Nachrichtenübermittlung blieb.“ (Schreyer, 1967)

Für den gesamten Kriegsverlauf hatte die deutsche Aufklärungsflierei einen Flugzeuganteil von knapp 13 % aller verwendeten Muster (Typenbezeichnung „A“ und „B“ für Aufklärungs- bzw. Aufklärungs-/Schulflugzeug).

„Bezeichnend ist, daß in der Entwicklung mehrmotoriger Großflugzeuge die stärksten Flugzeugfirmen, die in der Regel die Macht eines gewaltigen Konzerns im Rücken hatten, tonangebend waren. Nur durch den Einsatz immer höherer Mittel und einer verbesserten Technologie war es auf diesem Gebiet des Flugzeugbaus möglich, Spitzenleistungen zu erzielen. Die Profite, die beim Bau von Großflugzeugen erzielt wurden, lagen ebenfalls beträchtlich höher als jene Gewinne, die die Flugzeugindustriellen aus der Produktion von Jagd- oder Aufklärungsflugzeugen zogen, obwohl die Preise für Flugzeuge seit 1914 insgesamt erheblich gestiegen waren. Bei Ausbruch des Krieges hatte eine Rumpler-Taube 25 000 Mark gekostet, die Preise der ersten C-Flugzeuge lagen bei 35 000 Mark [„C-Flugzeuge“ würden nach heutiger Terminologie „MRCA“ heißen: Multi-Role-Combat-Aircraft; Anm. d. Verf.]. 1917/18 kostete ein Flugzeug schon zwischen 40 000 und 60 000 Mark. Die Kosten der von der AEG, Gotha, Staaken und Linke-Hofmann gelieferten Großflugzeuge beliefen sich dagegen auf 500 000 Mark; Siemens-Schuckert forderte für seine sechsmotorigen Bombenflugzeuge vom Typ R VIII sogar 750 000 Mark. Kleinere Firmen waren nicht in der Lage, in diesem Konkurrenzkampf zu bestehen, obwohl, unter modernen Maßstäben betrachtet, die Entwicklungszeiten noch überaus gering waren. Für ein einmotoriges Flugzeug war – bei Bereitstellung eines entsprechenden Motors, dessen Entwicklung oftmals Jahre beanspruchte – eine einmonatige Entwicklungszeit im Werk notwendig. Vom Tag der Auftragserteilung bis zu den ersten Auslieferungen an die Front verstrichen im Durchschnitt nur sechs Wochen, bei zweimotorigen Flugzeugen acht Wochen.“ (Groehler, 1981)

Es erscheint interessant, sich bei einer genealogischen Langfristbetrachtung von Technologien auch einen Überblick über einen marktwirtschaftlich steuernden Haupteinflussparameter zu verschaffen: dem Preisgefüge. Wie teuer waren diese Flugzeuge also auf heutige Marktpreise umgerechnet? Erste erstaunliche Erkenntnis: Die heute üblicherweise verwendeten Formeln und Modelle der Finanzmathematik sind praktisch ausnahmslos auf die Zukunft ausgerichtet. Hören Sie sich einmal um und fragen Finanzexperten, wie man Preise von vor 50 oder 100 Jahren auf analytischem Wege ermitteln kann!

In Ermangelung besserer, d. h. umfangreicherer (Vergleichs-)Werte setzen wir deshalb 1.000 Mark als 1-Facharbeiter-Jahresgehalt (siehe oben: Beispiel aus dem Jahre 1909). Darf dieser Wert für einen direkten Vergleich verwendet werden? Dazu muss man abschätzen, wo die größeren wirtschaftlichen Brüche in der Weltkonjunktur zu Beginn des 20. Jh. liegen. Der russische Ökonom Nikolai D. Kondratjef^{*} hat in seinem Werk die langfristigen Wirtschaftsentwicklungen der Industriestaaten zwischen 1790 und 1940 untersucht und dabei zyklische Kontraktionsphasen statistisch nachgewiesen. In der ursprünglichen Arbeit wurden 3 signifikante Zyklen identifiziert („Kondratjef-Wellen“)[†]. Dieser Theorie zufolge existierte

^{*} Transliterationsschwierigkeiten russischer Eigennamen: Kondratev, Kondratjev, Kondratjew, Kondratjef

[†] Nachgewiesen wurden drei signifikante Wellen mit erstaunlichen Übereinstimmungen in den Periodenlängen

zwischen 1896 und 1920 eine wirtschaftliche Expansionsphase, die mit einer schweren wirtschaftlichen Depression 1890 eingeleitet wurde und in einer großen Inflation 1922/23 endete. (Encyclopaedia Britannica, 2004) Daher kann für eine erste Abschätzung der Wert aus dem Jahr 1909 für die gesamte Frühphase der Fliegerei ab dem Jahrhundertbeginn bis zum Ende des Ersten Weltkriegs herangezogen werden. Versuchen wir, das Jahresgehalt auf heutige Einkommensniveaus umzurechnen. Dazu bedienen wir uns mehrerer Angaben, um eine Plausibilitätsprüfung durchzuführen:

Quelle	Tabelle	Bezugs-jahr	Jahresgehalt [DM]	Jahresgehalt [EUR]	
Datenreport 2002 (Stat. Bundesamt)	S. 115 Tab. 2: Netto-Jahreseinkommen im Jahr 2000 (Ergebnisse der Volkswirtschaftl. Gesamtrechnung)	2000	-	10.600	Ø – Arbeitergehalt
Statistisches Taschenbuch 1999 (Stat. Bundesamt)	1.14 Nettolöhne und -gehälter	1999	32.850	Ca. 16.800	Ø – Arbeitergehalt
Key Data on Germany 1997 (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung)	S. 36: Wages And Salaries Former territory of the Federal Republic - Production industries - Gross monthly Earnings	1996	[Monats-lohn] $6357 * 12 = 76284$	Ca. 42.500	Ø – Industriearbeitergehalt
Key Data on Germany 1997 (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung)	S. 36: Wages And Salaries Former territory of the Federal Republic - Crafts - Gross monthly Earnings	1996	[Wochen-lohn] $898 * 52 = 46696$	Ca. 23.900	Ø – Handwerkergehalt

Fig. 56 Datengrundlage zur Grobabschätzung des anzusetzenden Durchschnittsgehalts eines Facharbeiters zur Jahrtausendwende

Die schwere Rezession (ab 2000) im Verbund mit der europäischen Währungsreform lässt erklären, warum es zwischen 1999 und dem Folgejahr zu einem drastischen Netto-Lohneinbruch von 6.200 EUR gekommen ist. Vier Jahre später wird in der Erholungsphase der wahre Wert für die Netto-Jahreslöhne etwas über der Marke von 2002 liegen, so dass wir an dieser Stelle von 12.000 EUR ausgehen wollen. Demnach hätte in der Ära des Ersten Weltkriegs eine Rumpler-Taube ca. 300.000 EUR, ein C-Flugzeug 720.000 EUR und ein schwerer Bomber RVIII etwa 9 Mill. EUR gekostet. Damit kann bereits folgende –

1. Welle (1792 - 1815): 23 Jahre Aufschwung (entspricht der Frühmechanisierung und dem Beginn der Industrialisierung in Deutschland; "Dampfmaschinen-Kondratieff").
2. Welle (1850 - 1873): 23 Jahre Aufschwung (Zweite industrielle Revolution "Eisenbahn-Kondratieff")
3. Welle (1896 - 1920): 24 Jahre Aufschwung ("Elektrotechnik- und Schwermaschinen-Kondratieff") ergänzt aus: (Encyclopaedia Britannica, 2004)

hypothetische – Aussage gemacht werden: Damals hätte ein Facharbeiter, der sein Netto-Einkommen zu 100 % für den Kauf eines Flugzeugs hätte ansparen wollen, 25 Jahre für eine Rumpler-Taube, 60 Jahre für ein C-Flugzeug und gar 750 Jahre für einen schweren Bomber benötigt.

„Im Kriege zählte nur das, was in kurzer Zeit einsatzbereit war, und der wichtigste Faktor in der Flugtechnik, die Anwendung der Erkenntnisse der Aerodynamik, blieb so gut wie unberücksichtigt. Die wenigen Schritte in Richtung auf ein aerodynamisch hochwertiges Flugzeug ändern nichts an dieser Tatsache, die bereits während und nach dem Kriege ausgesprochen wurde. Der Herausgeber der bekannten englischen Luftfahrtzeitschrift «The Aeroplane», C. G. GREY, schrieb z. B. im Jahre 1924 zu diesem Problem: «Als eine Tatsache hat der Krieg den flugtechnischen Fortschritt behindert, und es gibt viele, die im Gleitflug die beste Methode sehen, den Fortschritt zu verwirklichen, der während des Krieges verlorengegangen ist.» Zu ähnlichen Feststellungen war auch der Leiter des ersten deutschen Reichsluftamtes August Euler im Jahre 1919 gekommen: «Die Flugzeugindustrie und das Flugwesen ist von einzelnen Privatleuten auf ihre Kosten in nur fünf Friedensjahren entwickelt worden. Der Krieg hat, rein flugtechnisch gesehen, wenig aufgebaut. Er hat das vor dem Kriege Vorhandene ins Vielfältige übertragen. [...]»“(Wissmann, 1979)

In den Jahren 1930 bis 1939 stieg die Zahl der Flugzeuge infolge eines Wettrüstens unter den europäischen Großmächten dramatisch an, wie folgende Tabelle belegt:

Jahr	Sowjetunion	USA	Großbritannien	Deutschland	Japan
1930	899	3 437	1 434	—	445
1931	860	2 800	n. b.	13	368
1932	1 734	1 396	n. b.	36	691
1933	2 952	1 324	1 102	368	766
1934	3 109	1 615	1 108	1 968	688
1935	2 529	1 807	1 710	3 183	952
1936	3 578	3 010	1 830	5 112	1 181
1937	4 769	3 578	2 218	5 606	1 511
1938	5 469	3 623	2 828	5 235	3 201
1939	10 382	2 141	7 940	8 295	4 467
	36 281	24 731	(20 170)	29 816	14 210

Fig. 57 Die Flugzeugproduktion der großen Luftfahrerstaaten (1930 - 1939) (Groehler, 1981)

In Deutschland besaß die Luftfahrtindustrie im Jahre 1933 einen Gesamtanteil von 0,2 % an der Gesamtindustrieproduktion (97. Stelle von 279 Industriezweigen). Bis 1935 war dieser Anteil um das 15-fache gesteigert worden, so dass die Luftfahrt auf den 14. Rang innerhalb der Gesamtindustrie vordrang. Die Zahl der Beschäftigten stieg von 3988 am 31. Januar 1933 auf 11 635 am 1. Oktober 1933 und erreichte bis zum 31. Januar 1935 eine Zahl von 53 865. Bis 1938 verfünffachte sich diese Zahl der Beschäftigten nochmals auf 293 000; (alle Angaben aus: (Groehler, 1981)). Zum Vergleich: Im Jahre 2002 betrug die Gesamtzahl der Beschäftigten innerhalb der europäischen Luft- und Raumfahrtindustrie 407 800 (Halse, 2003).

„Der Bau von Flugzeugen wurde nicht nur immer teurer, sondern auch immer komplizierter. Nach polnischen Angaben verhielt sich der Wert je Kilogramm eines Flugmotors (= 100 gesetzt) zu anderen Metallwaren wie folgt: bei Geschützen – 60, bei Handfeuerwaffen – 40, bei Granaten – 7, bei Dampfturbinen – 3, bei Verbrennungsmotoren – 4. Die Herstellung eines Flugmotors erforderte 1935 einen fünfmal höheren Arbeitsaufwand als 1918. Im Unterhaus legte der britische Luftfahrtminister Lord Swinton (Bonar Law) im Mai 1938 dar, daß die künftigen Hochleistungsmotoren der RAF statt aus 1 700 Teilen aus nicht weniger als 11 000 Teilen bestehen und daß die modernen Bombenflugzeuge sich aus 70 000 Einzelteilen zusammensetzen, für die 6 000 bis 8 000 Zeichnungen erforderlich sind. Für ein Ganzmetallflugzeug waren 14 000 bis 18 000 Arbeitsstunden notwendig*, für einen 800- bis 1 000-PS-Motor nochmals 8 000 bis 9 000 Arbeitsstunden. [...] Hinzu kam, daß die Flugzeuge auch einen weitaus höheren Aufwand an Wartung erforderten als 1918. Der französische Luftkriegstheoretiker Rougeron schätzte 1937, daß auf ein Mann fliegendes Personal vier Mann Bodenpersonal und 13,5 Rüstungsarbeiter kämen. Italienische Schätzungen sprachen davon, daß ein Mann fliegendes Personal 5 Bedienungskräfte und 33 Arbeiter erforderlich mache. Im Durchschnitt nahm man an, daß für ein zweisitziges Kampfflugzeug 60 Mann hinter der Front tätig sein mußten. Auch die Anforderungen an den Nachschub waren enorm gestiegen. Sowjetische Militärs gingen davon aus, daß ein Flugzeug täglich eine Tonne Nachschub benötigt, ein schweres Bombenflugzeug sogar 6 bis 8 Tonnen. Im ersten Weltkrieg reichten dagegen 4 Tonnen Betriebsstoff aus, um die Gefechtstätigkeit einer Flugzeugstaffel für zwei Wochen sicherzustellen.“ (Groehler, 1981)

Ein deutsches Beispiel: Eine Heinkel 112 bestand 1935 in der Prototypenversion aus 2885 Einzelteilen und 26 864 Nieten (Mason, 1973).

Die industrielle Flugzeugproduktion, die im Laufe der 30er Jahre die Periode der Manufaktur-Tätigkeit endgültig abgelegt hatte, erlangte im Lauf der Kriegsjahre eine von den Auftraggebern ungewollte und kaum mehr zu kontrollierende Diversifikation. Gab es in der Serienproduktion 1939 nur 17 Flugzeugmuster mit 3 Varianten, so waren es 1944 ganze 27 Muster mit 11 Varianten. Heute würde ein solcher Effekt in der mit Positivismen durchwirkten Wirtschaftsterminologie als „organisches Wachstum“ bezeichnet werden. Bis 1939 waren weltweit ca. 1,5 Mill. Flugzeuge gebaut worden. (Wissmann, 1979)

Die Gesamtzahl der im Zweiten Weltkrieg produzierten Flugzeuge beläuft sich gemäß folgender Tabelle auf etwa 800 000. Eine hervorragende französischsprachige Darstellung zur Luftfahrtgeschichte dagegen geht von 675 000 Einheiten aus. (Petit, 1993) Da es uns im vorliegenden Fall darauf ankommt, eine obere Schranke in erster Näherung zu bestimmen, werden wir im Zweifelsfalle stets höhere Zahlenwerte einsetzen, sofern diese akzeptierbar erscheinen. Außerdem wird versucht, aus Gründen der Vereinfachung eine gewisse Homogenität des angebotenen Quellenmaterials in Form von Übersichtstabellen zu bewahren.

* Zum Vergleich: bei Airbus suchte man zur Jahrtausendwende Lösungen dafür, wie man ein ungleich komplexeres Großraumpassagierflugzeug der A3xx-Klasse von 12.000 auf 8.000 Stunden Bauzeit im Sinne des Montageaufwandes reduzieren kann. (1a = 8760 h)

Jahr	Sowjet- union	USA	Groß- britannien	Deutsch- land	Japan	Italien
1939	10 382	2 141	7 940	8 295	4 467	1 692
1940	10 565	6 086	15 049	10 247	4 768	2 142
1941	15 735	19 433	20 094	12 414	5 088	3 503
1942	25 436	47 836	23 672	15 401	8 861	2 818
1943	34 900	85 898	26 263	24 807	16 693	967*
1944	40 300	96 318	26 461	40 593	28 180	—
1945	20 900**	46 001***	12 070****	7 539*****	8 263*****	—
	158 218	303 713	131 549	119 296	76 320	11 122

* bis April 1943

** bis Mai 1945

*** bis August 1945

**** bis September 1945

***** bis April 1945

***** bis 15. August 1945

Fig. 58 Die Flugzeugproduktion in den am Zweiten Weltkrieg beteiligten Hauptmächten (Groehler, 1981)

Während in obiger Tabelle aus der ostdeutschen Quelle die Zahl für die deutsche Produktion an Flugzeugen mit 119 296 angegeben wird, kommt ein englischer Autor auf 113 515 Flugzeuge (Mason, 1973) und eine andere ostdeutsche Quelle auf 113 315 Maschinen (Wissmann, 1979). Es entstehen damit Abweichungen um -5 % (4,9 % bzw. 5,01 %). Auch werden offensichtlich gerundete Werte angeboten: Ein italienischer Autor mit umfassender Typenkenntnis spricht von 120 000 deutschen Flugzeugen (Angelucci, 1972). Es drängt sich die Frage nach der Glaubwürdigkeit der verwendeten Quellen auf. Das Gesamtmaterial an Zahlen lässt sich nicht sehr einfach miteinander vergleichen, weil sich nicht jede Quelle so homogen und umfassend präsentiert wie das hier hauptsächlich zugrunde gelegte Werk von O. Groehler. Für die oben aufgeführte US-Flugzeugproduktion von 303 713 Flugzeugen ergibt sich im Vergleich mit Lexikon-Angaben, z. B. Encyclopaedia Britannica: 300 718 produzierte Flugzeuge, eine Differenz von 0,99 %. Man stellt fest, dass die Hunderter und Zehner oftmals übereinstimmen, sich jedoch typischerweise bei den Tausendern einige Abweichungen ergeben. Das lässt einerseits die Hoffnung zu, dass die Zahlen einer gemeinsamen Primärquelle oder Statistik entstammen und andererseits, dass es sich wegen der häufig auftretenden glatten Tausenderbeträge im unteren einstelligen Bereich um nicht berücksichtigte Industrie-Losnummern handeln wird. So ist es beispielsweise denkbar, dass eine Statistik die Anzahl der tatsächlich physisch gebauten Flugzeuge zählt und die andere die Anzahl aller produzierten Flugzeuge, die jedoch nur vom eigenen Land eingesetzt wurden (Man denke hier nur an Lieferungen amerikanischer Flugzeuge an die Sowjetunion im Rahmen des Pacht- und Leihvertrages). Vielleicht wurden auch Lastensegler, Raketen- bzw. Düsenflugzeuge ausgeklammert oder die Grenzen von Versuchs- und Serienflugzeugen anders gezogen. Die im Rahmen dieser Arbeit auftauchenden Unterschiede betragen für die Militärfliegerei zu Kriegszeiten in ihrer Summe rund 5 %. Höhere Abweichungen ergeben sich für zivile Motorflugzeuge in der Periode vor und bis 1914 (20%). Zusammen mit beiden Weltkriegen ergibt sich daher in etwa folgende Erstabschätzung einer weltweiten Flugzeuggesamtproduktion:

Ära	Anzahl	Bemerkung(en)
Pionierphase bis 1914	10.000	Höhere Zahl von E. Angelucci eingesetzt
1914 - 18	138.685	1. Weltkrieg - Gesamtkriegsproduktion
1918 - 30	1.234.000	
1930 - 39	125.208	
1939	2.000	Aktive (Linien-)Verkehrsflugzeuge, 300 Mio. Strecken-km und 4,5 Mill. Passagiere
1939 - 45	800.218	2. Weltkrieg - Gesamtkriegsproduktion
1965 - 2003	11.755	(Boing, 2004): globale Airlineflotten-Unfallstatistik
2002	10.789	(Airbus, 2003) EADS-Marktanalyse (Fokus: A/C mit > 100 Sitze, akt. Flottenbestand 2002)
1946 - 2003	407.981	(GAMA, 2003) Gesamtstatistik GA (US-Produktion) siehe Erläuterungen und Tabelle unten!
Zwischensumme:	<u>2.740.636</u>	

Fig. 59 Abschätzung einer weltweiten, umfassenden Produktionsbilanz für Motorflugzeuge (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Doch ein paar Unbekannte bleiben in dieser Rechnung. Es lassen sich kaum weltweite Übersichten zur Sportflugzeug-Produktion in den Zwischenkriegsjahren finden. Die Fragestellung ist in dieser Form offenbar bisher nicht aufgegriffen worden. Noch schwieriger wird die Abschätzung der Produktionszahlen von Militärluftfahrzeugen seit 1945. Es gibt zwar Produktions-Zahlen zu einzelnen LFZ-Mustern, jedoch erscheint es fast aussichtslos, sich durch eine unübersehbare Anzahl von Baureihen aus Klein- und Kleinstserien über viele unstandardisierte Quellen hinweg zu mühen. Die Quellenangaben von strategischen Aufklärungsflugzeugen widersprechen sich zum Teil erheblich. Man müsste also, um genau quantifizieren zu können, bis zum Flugzeug-Kennzeichen genau prüfen – ein Aufwand, der kaum über alle Produktionslinien von Starrflüglern mit befriedigender Genauigkeit durchgehalten werden kann. Wir wissen andererseits, dass heute die weltweiten Flotten der Allgemeinen Luftfahrt auf nur wenigen Großserien-Baureihen beruhen und diese allmählich überaltern. Von der berühmten Cessna wurden zwischen 1955 und 1986 während der Serienfertigung 33 629 Stück produziert (zusätzlich 4957 Stück in französischer Lizenzproduktion „F-172“). Die Serienfertigung wurde 1996 wiederaufgenommen („C-172 R“) und erreicht mittlerweile eine historische Gesamtmarke von über 42 5000 (Quellen: <http://www.aerofiles.com/cessna.html>; <http://www.airliners.net>). Das entspricht mit Abstand dem erfolgreichsten zivilen Serienflugzeug der Welt und lässt sich direkt mit der Kriegsproduktion des historisch bislang meistgebauten Jagdflugzeugs vergleichen, der Me109 mit etwa 35 000 ausgelieferten Einheiten). Wie groß sind also diese beiden Unbekannten?

Widmen wir uns zunächst der Zivilluftfahrt. Wie man aus der umfangreichen Geschichtsschreibung entnehmen kann, darf Deutschland neben Frankreich als „Flugzeugland“ gelten. Dennoch wir dieser Eindruck angesichts ernüchternder Statistiken erheblich getrübt:

„Laut ICAO gehören 90 % aller weltweit registrierten zivilen Luftfahrzeuge zur Allgemeinen Luftfahrt, davon sind ca. 80 % einmotorige Flugzeuge. Von den in

Deutschland zugelassenen Flugzeugen der E-Klasse (Ende 1994 waren es 7317 [...]) sind 67 % US-Fabrikation, 26 % französische Fabrikation und nur etwa 7 % aus deutscher Herstellung.“ (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995)

Jahr ¹	Ins-gesamt ²	Flugzeuge mit einem Startgewicht				Hub-schrau-ber
		bis 2 t	über 2 t bis 20 t	über 20 t		
				zusam- men	darunter mit Strahl- turbinen	
1960	1 111	975	83	38	4	14
1970	3 792	3 263	288	115	100	126
1980	7 769	6 565	685	153	146	366
1990	9 158	7 702	682	306	284	468
1995	12 208	9 856	1 111	444	401	797
1996	12 244	9 874	1 127	445	402	798
1997	12 263	10 102	908	476	441	777
1998	12 245	10 059	891	511	475	784
1999	12 290	10 026	924	541	502	799
2000	12 272	9 950	907	595	556	820

1 Bis einschl. 1990 früheres Bundesgebiet, 1950 ohne Saarland und Berlin-West; ab 1995 Deutschland.

2 Nur motorisierte Luftfahrzeuge (ohne Luftschiffe).

Quelle: Luftfahrt-Bundesamt.

Fig. 60 Flugzeugbestandsentwicklung in Deutschland (Dallinger, 2002)

Gegenüber den konventionellen Motorflugzeugen hat sich der Motorsegler aufgrund seiner Wirtschaftlichkeits-Vorteile deutlich fester etabliert, wie aus der folgenden Übersicht hervorgeht:

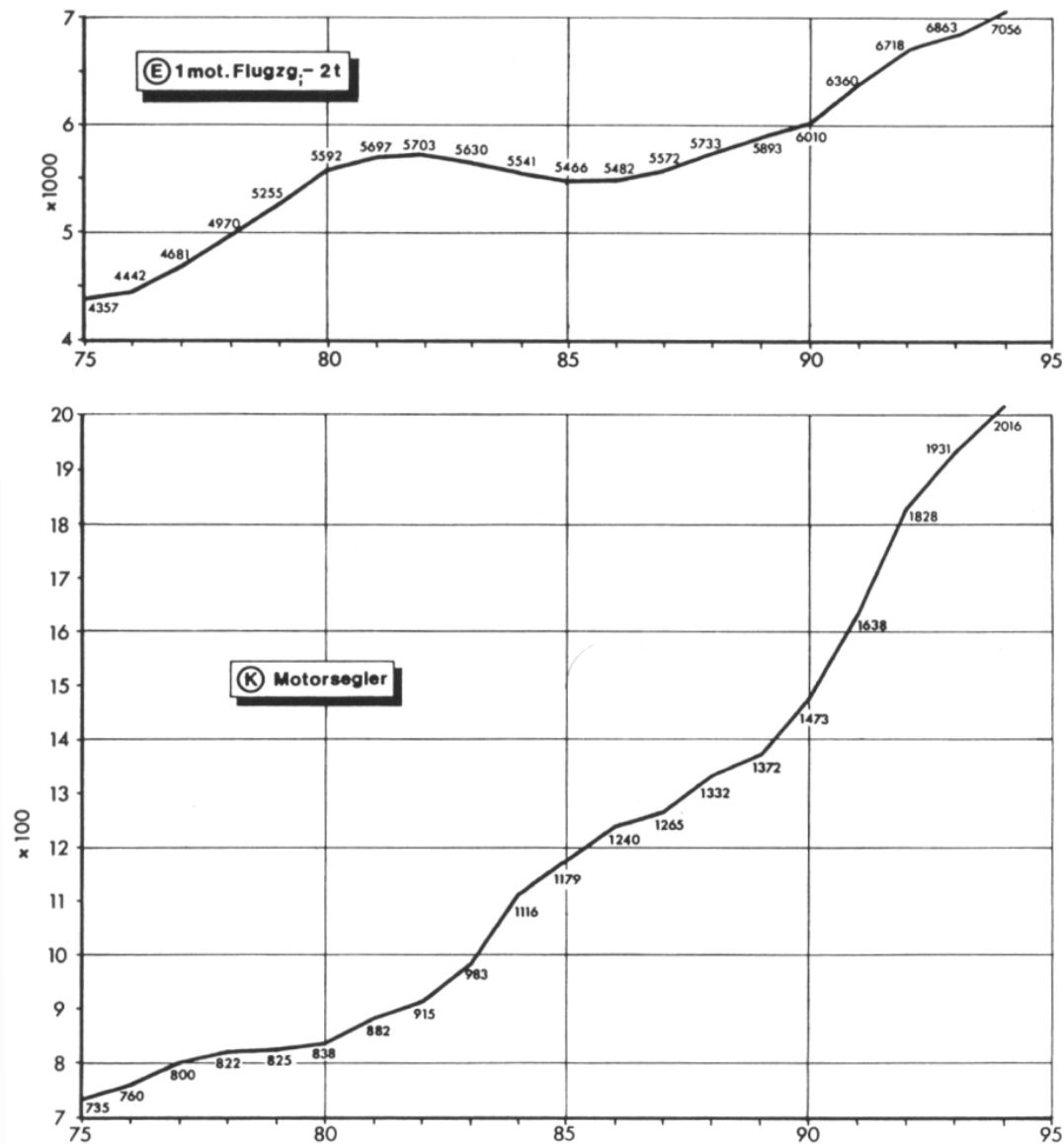


Fig. 61 Bestandsentwicklung Motorflugzeuge und Motorsegler in den Jahren 1975 – 1995; (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995)

In der LBA-Info Nr. 20 (Februar 1992) berichtet Klaus Neufeldt, damaliger Leiter des Referates Flugsicherheits- und Öffentlichkeitsarbeit im Luftfahrt-Bundesamt (LBA) von dem Forschungsauftrag „Situation und Perspektiven der Luftfahrtindustrie und ihre Bedeutung für die deutsche Wirtschaft (Schwerpunkt Allgemeine Luftfahrt) des Bundesministers für Wirtschaft und Verkehr (1991):

„... Der Markt für Motorflugzeuge ist ein Weltmarkt. Diesen teilen sich zur Zeit zwei kleinere amerikanische (noch) und zwei französische Hersteller. Deutsche Hersteller spielen praktisch keine Rolle weltweit. Bei der derzeitigen Jahresproduktion von ca. 1000 Motorflugzeugen sind deutsche Hersteller nicht nennenswert beteiligt; die Stückzahl liegt bei etwa 10 Luftfahrzeugen – und das noch mit höchst

unterschiedlichen Mustern. Bedingt durch die zunehmende Überalterung der Flotte und Schwierigkeiten bei der Ersatzteilbeschaffung wird weltweit die zukünftige Jahresproduktion auf bis zu 10 000 Neuflugzeuge geschätzt.“

Die LBA-Info Nr. 29 vom Mai 1995 weist die Altersstruktur der deutschen GA-Flotte aus (berücksichtigt wurden alle Flugzeuge der „E“-Klasse, d. h. unter 2 t Abfluggewicht):

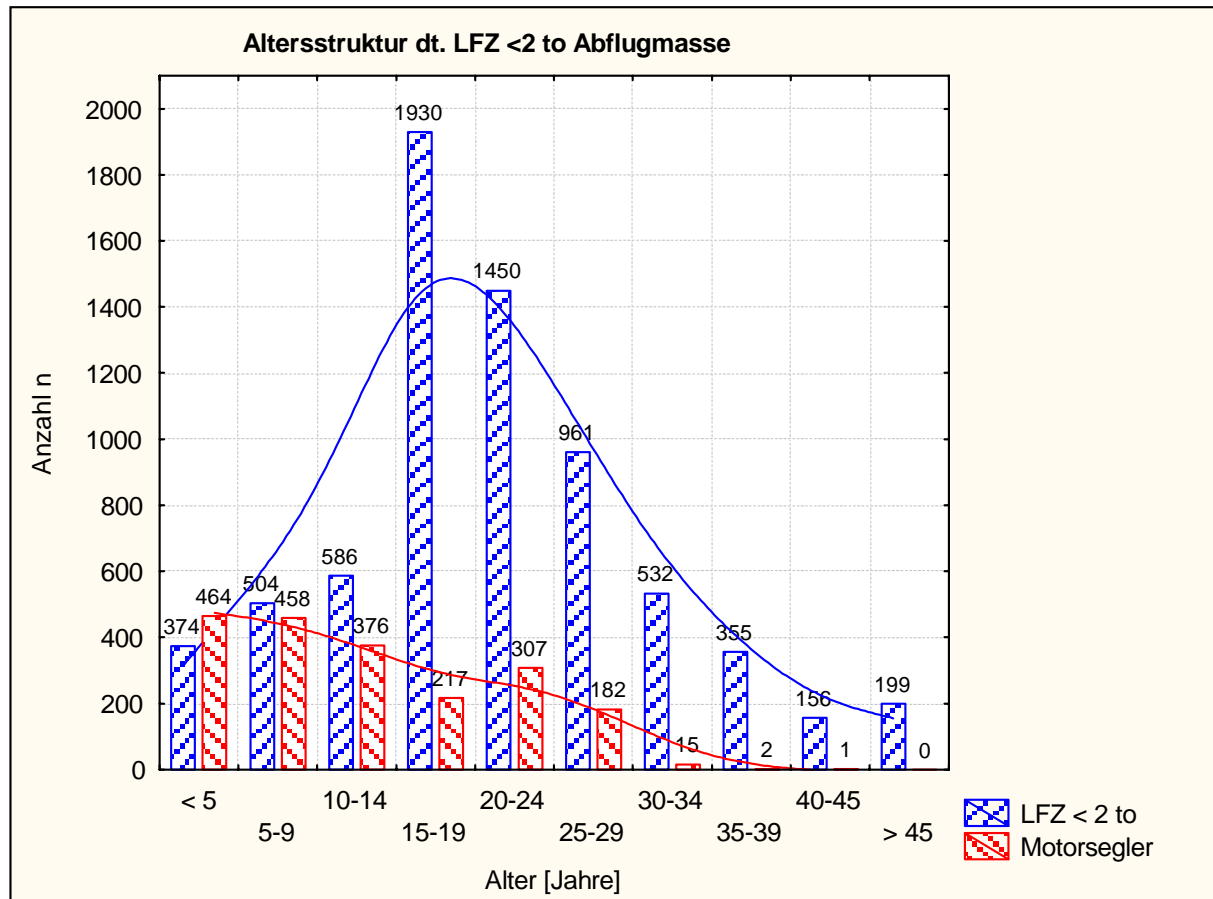


Fig. 62 Altersstruktur von deutschen Motorflugzeugen und Motorseglern (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995)

Im Jahr 2004 ist demzufolge von einem typischen Alter von 25 - 40 Jahren für Motorflugzeuge auszugehen. Das Konstruktionsalter ist noch einmal um 10 - 20 Jahre zu erhöhen. Die obige Grafik weist ebenfalls den spürbaren Trend zum wirtschaftlicheren Motorsegler aus. Eine allmähliche Linderung der Gesamt-Situation ist über den Ultraleicht-Flugzeugboom zu erwarten, der seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts in Deutschland eingesetzt hat.

Hier ist eine wichtige Begriffsdefinition vonnöten: unter „Allgemeiner Luftfahrt“ (oft „General Aviation“, kurz GA) versteht man alle Luftfahrzeuge und deren Verkehrsaufkommen mit Ausnahme flugplanbasierter, kommerzieller Luftfahrt (Airline-Betrieb) und der militärischen Luftfahrt. Ein Krankentransport-Flugzeug des ADACs, Polizei-Hubschrauber zur Verkehrsüberwachung, Feuerlöschflugzeuge, private Geschäftsreiseflugzeuge von Firmen oder Einzelpersonen, Kunstflugzeuge (mit Ausnahme militärischer Nationalflugstaffeln, die lediglich Einsatzmuster in besonderen Farben und

Konfigurationen verwenden), sämtliche Vereinsflugzeuge (Segel-, Motorflugzeuge), Fallschirmabsetzerflugzeuge, Ballone, Luftschiffe, zivile Rekordflugzeuge und Erprobungsmuster, Expeditionsflugzeuge etc. wären demzufolge alles Beispiele für Allgemeine Luftfahrt.

Aus den jüngst veröffentlichten Zahlen der nordamerikanischen „General Aviation Manufacturers Association“ (GAMA) geht hervor, dass die Prognose von etwa 10 000 benötigten Neuflygezeugen in der oben zitierten LBA-Info Nr. 20/1992 etwas zu optimistisch war, sofern sich das beschriebene Angebotsgefüge nicht wesentlich verschoben hat. Derzeit erreichen die USA jährlich etwa folgende Produktionszahlen:

Kategorie	2000	2001	2002	2003
Single-Engine Piston (SEP)	1810	1581	1366	1519
Multi-Engine Piston (MEP)	103	147	130	71
Turbo-Propeller (TP)	315	306	187	163
Business-Jet (BJ)	588	600	538	384
Summe:	2816	2634	2214	2137
Gesamt-Umsatz [Mrd. USD]:	8558	14034	11868	9995

Fig. 63 GAMA Jahresstatistiken 2000 - 2003 der US-Produktion für Flugzeuge (A/C) der Allgemeinen Luftfahrt

Demgegenüber lauten die Zahlen für die weltweite Produktion (Allgemeine Luftfahrt):

Kategorie	2000	2001	2002	2003
Single-Engine Piston (SEP)	n. a.	1644	1446	1825
Multi-Engine Piston (MEP)	n. a.	147	130	71
Turbo-Propeller (TP)	n. a.	421	280	272
Business-Jet (BJ)	n. a.	787	683	518
Summe:	n. a.	2999	2539	2686

Fig. 64 GAMA Statistik zur weltweiten A/C-Produktion für die Allgemeine Luftfahrt

Die militärische Luftfahrzeug-Produktion fällt in diesem Zeitraum volumenmäßig kaum ins Gewicht:

Kategorie	2000	2001	2002	2003
Military-Aircraft	51	54	71	75

Fig. 65 GAMA Statistik zur weltweiten A/C-Produktion für die Allgemeine Luftfahrt

Bezüglich einmotoriger, kolbengetriebener Sport- und Reiseflugzeuge (SEP) macht also die US-Produktion innerhalb der Jahre 2000 bis 2003 im Vergleich zur weltweiten Neuproduktion jeweils zwischen 83,2 % (2003) und 96,2 % (2001) aus. Nun muss man sich jedoch vergegenwärtigen, dass die US-Hersteller in dieser dominierenden Rolle am Ende der 70er Jahre durch einen US-internen Gesetzesentwurf entscheidend geschwächt wurden:

„... Insgesamt sank die Zahl der in den USA gebauten General-Aviation-Flugzeuge von 1978 bis 1992 um 95 Prozent. Die Gesetzgebung zur Produkthaftung hatte

einen ganzen Industriezweig vernichtet. Nun, viel zu spät, sind einige Senatoren und Kongreßabgeordnete in Washington, D.c., aufgewacht und haben den General Aviation Revitalization Act of 1993 (Gesetzesvorlage zur Wiederbelebung der Allgemeinen Luftfahrt) auf den Weg gebracht. [...] Mit dem Revitalization Act soll, wenn er die Hürden des Gesetzgebungsprozesses nimmt, die Produkthaftpflicht für Flugzeughersteller auf 15 Jahre beschränkt werden. Das würde bedeuten, daß ein Flugzeug- oder Ausrüstungshersteller nicht mehr von der Produkthaftpflicht belangt werden darf, wenn das Flugzeug oder das Gerät länger als 15 Jahre sicher betrieben wurde. Bisläng galt die Produkthaftpflicht unbegrenzt, was zur Folge hatte, daß Hersteller wegen Unfällen mit 40 Jahre alten Flugzeugen angeklagt wurden ...

Bei den US-Flugzeugherstellern findet die Gesetzesinitiative ungeteilte Unterstützung. Cessna-Chef Russel W. Meyer sagte, sein Unternehmen werde an dem Tag, an dem der US-Präsident durch seine Unterschrift dem Revitalization Act Gesetzesbedeutung verleihe, mit den Produktionsvorbereitungen für die Cessna 172, 182 und 206 beginnen. Er rechne mit einer anfänglichen Produktionsrate von 1500 bis 2000 Maschinen pro Jahr ...« [vgl. mit obigen Tabellen! Anm. d. Verf.]

Von einer Neukonstruktion ist nicht die Rede; offenbar setzt man auch nach Jahren noch auf den guten Ruf und die Bekanntheit der Flugzeuge aus den sechziger und siebziger Jahren. Volker K. Thomalla prognostiziert einen harten Wettbewerb mit den europäischen Herstellern, denn gerade in Zeiten der Rezession dürfte der zu erwartende Preisvorteil der US-Muster gegenüber den europäischen Konstruktionen Gewicht gewinnen. Man darf gespannt sein, ob die besseren Leistungen, die geringeren Betriebskosten und die Umweltfreundlichkeit etwa der neuen Kunststoff-Motorflugzeuge potentielle Käufer nicht doch stärker beeindruckt. Das Beispiel der »Katana«, die wegen ihrer in diesem Sinne herausragenden Eigenschaften auf dem US-Markt vorpreschen konnte (siehe »Das Einfachflugzeug: DV 20, >Katana<«), gibt zu Hoffnungen Anlaß. Andererseits scheint sich das Problem der Produkthaftung in den USA in absehbarer Zeit abzuschwächen.“ (aus Aerokurier-Editorial12/93 schreibt Volker K. Thomalla, in Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995)

Daher werden die globalen Produktionsziffern seit 1945 nur um eine geringe Prozent-Spanne von der US-amerikanischen Industriestatistik abweichen, deren Entwicklung genau nachverfolgt werden kann:

**Annual Shipments of New U.S. Manufactured General Aviation Airplanes by Units Shipped,
Number of Companies Reporting and Factory Net Billings**

Year	Units Shipped	Companies Reporting	Factory Net Billings (\$Millions)
1946	35,000	-	111.0
1947	15,594	15	57.9
1948	7,037	12	32.4
1949	3,405	11	17.7
1950	3,386	13	19.1
1951	2,302	12	16.8
1952	3,058	8	26.8
1953	3,788	7	34.4
1954	3,071	7	43.4
1955	4,434	7	68.2
1956	6,738	8	103.7
1957	6,118	9	99.6
1958	6,414	10	101.9
1959	7,689	9	129.8
1960	7,588	8	151.2
1961	6,778	8	124.3
1962	6,697	7	136.8
1963	7,569	7	153.4
1964	9,336	8	198.8
1965	11,852	8	318.2
1966	15,768	10	444.9
1967	13,577	14	359.6
1968	13,698	14	425.7
1969	12,457	14	584.5
1970	7,292	13	337.0
1971	7,466	11	321.5
1972	9,774	12	557.6
1973	13,646	12	828.1
1974	14,166	12	909.4
1975	14,056	12	1,032.9
1976	15,451	12	1,225.5
1977	16,904	12	1,488.1
1978	17,811	12	1,781.2
1979	17,048	12	2,165.0
1980	11,877	12	2,486.2
1981	9,457	12	2,919.9
1982	4,266	11	1,999.5
1983	2,691	10	1,469.5
1984	2,431	9	1,680.7
1985	2,029	9	1,430.6
1986	1,495	9	1,261.9
1987	1,085	9	1,363.5
1988R	1,212	11	1,922.9
1989	1,535	11	1,803.9
1990	1,144	14	2,007.5
1991	1,021	14	1,968.3
1992	941	16	1,839.6
1993	964	16	2,143.8
1994	928	13	2,357.1
1995	1,077	13	2,841.9
1996R	1,115	13	3,047.5
1997R	1,549	12	4,592.9
1998	2,200	12	5,761.2
1999	2,504	13	7,843.0
2000	2,816	15	8,558.4
2001	2,632	14	8,641.1
2002R	2,207	12	7,719.2
2003	2,137	13	6,433.9

Source: GAMA

Fig. 66 Produktion der amerikanischen General-Aviation-Industrie seit 1946. Die Aufstellung umfasst 407 981 Flugzeuge. (GAMA, 2003)

Die Anschaffungskosten für Fluggeräte sind demgegenüber seit Einführung des Produkthaftungsgesetzes unverhältnismäßig hoch angestiegen, wie folgende Gegenüberstellung beweist:

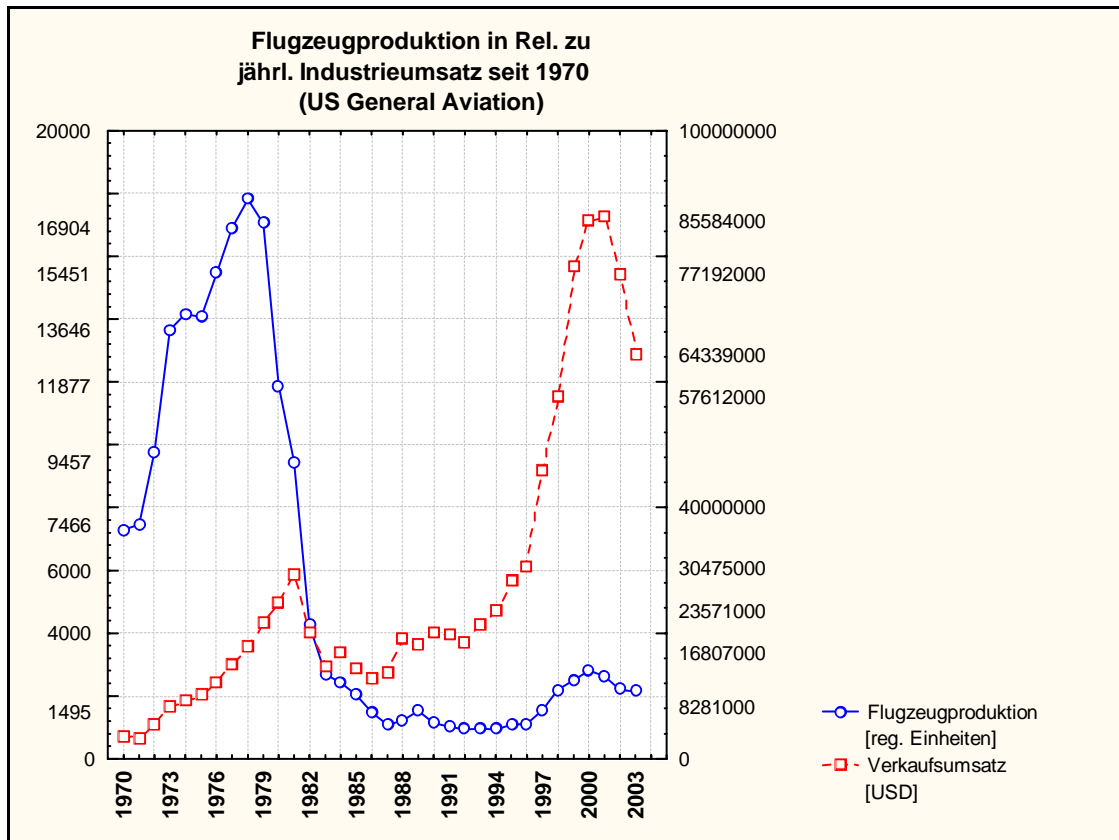


Fig. 67 Folgen der Produkthaftung in den USA auf die Allgemeine Luftfahrt; (Brinkmann, v.Gersdorff und Schwipps, 1995)

Diese wirtschaftliche Entwicklung ist mit dafür verantwortlich, warum die sog. Ultraleichtflugzeuge in den letzten 30 Jahren so populär wurden. Wieder standen hier 3 Faktoren ausschlaggebend zur Verfügung: übertragbares Wissen, Wirtschaftlichkeit und Fortschritte in der Werkstoff-Technologie (wir werden weiter unten konkrete Beispiele dafür erhalten).

	1997		1998		1999		2000		2001		2002	
	Number Active	Est. Hours Flown (000)	Number Active	Est. Hours Flown (000)	Number Active	Est. Hours Flown (000)	Number Active	Est. Hours Flown (000)	Number Active	Est. Hours Flown (000)	Number Active	Est. Hours Flown (000)
Amateur Built	10,261	698	13,189	729	16,858	879	16,739	906	16,736	799	18,168	976
Exhibition	1,798	246	1,630	73	1,999	121	1,973	114	2,052	102	2,190	127
Other	442	2,620	382	1,684	1,671	246	1,694	287	1,633	313	1,578	242
Total Experimental	14,679	1,326	16,502	1,071	20,528	1,247	20,407	1,307	20,421	1,214	21,936	1,345
% of G.A. Fleet	7.6%	4.8%	8.1 %	3.8%	9.4%	3.9%	9.4%	4.2%	9.7%	4.2%	10.4%	5.0%

Fig. 68 US Experimental Aircraft Fleet: Estimated Active Aircraft and Hours Flown (1997 - 2002); (Quelle: GAMA General Aviation Fact Book 2003)

Note: Prior to 1994, Experimental aircraft included those built without a production certificate. Beginning in 1994, Experimental includes aircraft with an experimental airworthiness certificate. These include research and development, amateur built, exhibition, racing, crew training and market survey aircraft and aircraft used to show compliance with Federal Aviation Regulations.

Ich gehe aufgrund der Gesamtheit des mir zur Verfügung stehenden Quellenmaterials davon aus, dass die übrige Weltproduktion an Flugzeugen der Allgemeinen Luftfahrt seit der Jahrhundertmitte nie mehr als 20 % der US-Produktion ausmachte. Weiterhin nehme ich an, dass die Militärflugzeugproduktion vor, während und nach dem Kalten Krieg angesichts der stark angestiegenen Stückkosten die Kriegsproduktionsleistung noch nicht einmal annähernd erreichte. Als Hauptgrund für obige Annahme der stark begrenzten Stückzahlen innerhalb der militärischen Luftfahrt in der Ära globaler Blockpolitik sind die ernsthaften aerodynamischen Grenzen der Flugzeuge zu nennen, die vor etwa 30 Jahren erreicht wurden. Seitdem schält sich der Haupttrend des sog. „elektronischen Gefechtsfeldes“ heraus. Folge: die Flugzeuge werden nur noch durch entsprechende Elektronik-Integration „kampfwertgesteigert“. Aerodynamisch gesehen bringen dagegen neue Automatisierungsgrundlagen für die Fluglageregelung innovative Systemkomponenten wie etwa schwenkbare Schubdüsen zur Erzielung von Flugmanövern hervor, wie sie ausschließlich über die am Flugzeug angreifenden Luftkräfte manuell nicht mehr vollständig steuerbar wären. Beispielsweise zählt das mit der russischen Su-27 eingeführte defensive „Cobra“-Manöver bei Flugzeugen konventioneller Auslegung zu einer der herausforderndsten Flugfiguren, die noch geflogen werden können: ein jähes Aufrichten der Flugzeuglängsachse um bis zu 120° mit entsprechend starker Verzögerung durch den auftretenden Widerstand.

Seit Jahrzehnten versucht man angesichts dieser sich klar abzeichnenden Grenzen, neue Wege zu beschreiten, die zu Flugzeugen mit schwenkbaren Antriebsdüsen und instabiler aerodynamischer Auslegung führen werden. Ursächlich für eine derartige konstruktive Neulandgewinnung sind verantwortlich die Computertechnik als solche sowie neuere Verbundwerkstoffe für Kontroll- und Regelmechanismen (z. B. faseroptische, gewichtsneutral redundant auslegbare Flugregelsysteme „Fly-by-Wire“). Dieser Trend wird sich weiterhin fortsetzen – läuft jedoch mit langsamerer Geschwindigkeit ab, als im historischen Rahmen betrachtet die Herausbildung der technischen Aerodynamik.

Selbst in Krisen und Kriegszeiten besitzen die Flugzeuge der militärischen Luftflotten westlicher Industriestaaten aufgrund der Art der bewaffneten Konflikte, wie sie seit 1945 stattgefunden haben, eine relativ hohe Überlebensrate, so dass dort ebenfalls eine gewisse Überalterung der Flotten einsetzt, wie bereits anhand eines Flugzeugs aufgezeigt wurde, das aufgrund seiner harten Einsatzanforderungen prädestiniert für einen solchen Vergleich gelten kann, nämlich die weiter vorne erwähnte A-10 „Thunderbolt-II“*.

Als weiterer Grund spricht schließlich die Preisentwicklung pro Flugzeug gegen einen massiven Flottenausbau:

* Die A-10 widersetzte sich souverän der drohenden Verdrängung durch die elektronisch weit modernere CAS-Variante der F16 „Fighting Falcon“ im Golfkrieg 1991. Die F-16, der sog. „Electric Jet“, ist mit weltweit 2986 im Einsatz befindlichen und über 1000 offenen Aufträgen eines der erfolgreichsten Strahlflugzeuge seit dem Zweiten Weltkrieg (zum Vergleich: verbreitete MiG-21: 2313 Stück). Angaben aus: (Clancy, 2000) und (Lang, 2000)

1956 - 66	F-4 Phantom II	1,6 Mill. USD
1956 - 67	F-105 Thunderchief	2,2 Mill. USD
1956 - 68	Aufklärungsbomber RB-66A	62 Mill. USD
1956 - 69	B-52 A	117 Mill. USD
1956 - 70	Aufklärer YRB-58 A	150 Mill. USD

Fig. 69 Preisentwicklung militärischer Flugzeuge – man beachte den vergleichsweise hohen ökonomischen Wert, der einem Aufklärungsflugzeug beigemessen wurde (dahinter stehende Logik: ohne Aufklärungsergebnisse keine Zielkataloge für die strategische Bomberflotte!). (Groehler, 1981)

Es ist unwahrscheinlich, dass angesichts solcher Kosten die Serienfertigung stark ausgeweitet werden konnte. Eine andere Übersicht unterstützt diese Argumentation ebenfalls:

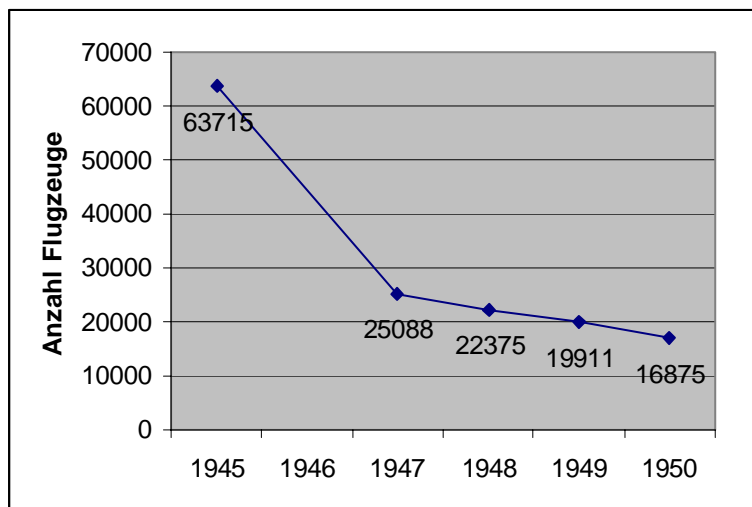


Fig. 70 Bestand einsatzbereiter Militärflugzeuge in den USA (ohne 1946) laut Angaben amerikanischer Luftfahrthistoriker. „Die Stärke der USA-Luftstreitkräfte pendelte sich für die nächsten 10 Jahre auf etwas über 20 000 Flugzeuge ein ...“ (Groehler, 1981)

Der Lockheed Starfighter F-104* bildete zusammen mit der McDonnell Douglas Phantom F-4 über Jahrzehnte das Rückgrat der Nato-Luftstreitkräfte. Von beiden Maschinen wurden nur etwa 2000 bzw. 4000 Stück gebaut. Vom Panavia Tornado sind bis zu seinem 30. Jubiläum der Indienstellung in 3 Versionen (IDS, ECR und RECCE†) 929 Stück gebaut worden (Quelle: n24-Reportage vom 15. Januar 2005, 2 x im Internet gegengeprüft; der Hersteller EADS sagt auf Homepage: „Mit rund 1000 gebauten Flugzeugen stellt der Tornado das bislang größte multinationale Rüstungsprogramm in Europa dar.“) Deshalb schätze ich für die weltweite Nachkriegsfertigung von militärischen Flugzeugen verhalten vorsichtig, um eine obere Schranke zu treffen, 30 % der Kriegsproduktion. Wenn wir dann noch die marktbeherrschende UL-Flugzeugszene in den USA mitberücksichtigen (mit ebenfalls 20 % Aufschlag, um darüber den weltweiten Bestand abzuschätzen), dann ergibt sich aus all diesen Zahlen ein überraschendes Gesamtergebnis:

* Operationelle Betriebskosten: 2.400 DM Sprit/h, 45 Wartungsstunden pro Flugstunde (Eyermann, 1963)

† Diese 3-fache „Rollenverteilung“ folgt durchaus dem historischen Bedarf (vgl. Fig. 54 Die Entwicklung der britischen Luftstreitkräfte 1918 - 1932; (Groehler, 1981)

Seit Beginn der bemannten Schwerer-als-Luft-Luftfahrt hat die Welt wahrscheinlich nicht mehr als 3,3 Mill. bemannte Flächen-Flugzeuge gesehen!

Darin enthalten sind alle Fluggeräte: von der Eigenentwicklung 14-jähriger Segelfluggpioniere bis hin zu milliardenschweren Rüstungsentwicklungen. Ich vermute, dass darin auch die Satellitensysteme und die gesamte Raumfahrtflugkörper-Parade in dieser Abschätzung noch reichlich Platz haben. Überaus bedeutsam erscheint mir, in diesem Kontext darauf hinzuweisen, dass etwa ein Drittel dieser Flugzeuge nur wenige Monate in Dienst standen, bevor sie verloren gingen* oder aus wirtschaftlichen oder praxisrelevanten Gründen ausgemustert wurden, beispielsweise wenn ein Entwicklungsziel in ausreichendem Maße erreicht wurde (Stichwort: aerodynamische Versuchsflugzeuge, z. B. „X“-Flugzeuge der NASA).

Umso erstaunlicher mutet diese vorläufige Gesamtübersicht an, wenn wir sie den weltweiten Produktionsleistungen der Automobilindustrie gegenüberstellen.

„Der Weltbestand an Kraftfahrzeugen beträgt derzeit rd. 700 Mio. Die letzten genauen Zahlen ermittelten die UN für 1998: 477,096 Mio. PKW und 158,943 Mio. Nutzfahrzeuge (LKW, Busse u. a.; jeweils ohne motorisierte Zweiräder, landwirtschaftliche Zugmaschinen, Anhänger, Polizei- und Militärfahrzeuge).“ (Fischer Weltalmanach, 2004)

Dabei traten auf dem Weltmarkt für Kraftfahrzeuge in den letzten Jahren die ersten Sättigungserscheinungen auf. Im Jahr 2000 betrug die globale Neuproduktionsleistung 40,382 Mill. PKWs und 14,850 Mill. LKWs, Busse u. a. Nutzfahrzeuge (ohne Traktoren). Wenn wir vereinfachend annehmen, dass das Marktwachstum der globalen Automobilindustrie vorläufig ein dynamisches Fließgleichgewicht erreicht hat, dann entspräche die PKW-Neubildungsrate ca. 10 % und bei LKWs und Nutzfahrzeugen etwa 1 %.

Da wir bei der obigen Ermittlung der weltweiten Gesamtproduktion alle Kategorien von Luftfahrzeugen mit in die Betrachtung aufgenommen haben, erscheint es angebracht, einige Zahlen zu liefern, um eine ungefähre Vorstellung zur Größenordnung desjenigen Fahrzeugbestandes zu vermitteln, der oben ausgeschlossen wurde, nämlich landwirtschaftliche Zugmaschinen.

„Die USA und Kanada sind mit großem Abstand netto der weltweit größte Agrarüberschuss- und Exportraum.“ (Fischer Weltalmanach, 2004).

Vor diesem Hintergrund können einige bedeutendere Länder herausgegriffen werden, um deren Besitz mit Traktoren bis Anfang der 60er Jahre zurückzuverfolgen.

* kurze Dimensionsanalyse zu dieser Aussage: Deutsche Jagdflugzeuge aller Einsatzklassen schossen im Zweiten Weltkrieg 70 000 gegnerische Flugzeuge ab. Dabei gingen 27 300 Flugzeuge innerhalb und 27 700 außerhalb direkter Kampfhandlungen verloren, insgesamt also 55 000 Jagdflugzeuge. Die Gesamtstatistik weist einen Verlust von 94 435 Flugzeugen aller Art aus. Darunter befanden sich 3301 Nah- und 3059 Fernaufklärer. (Kurowski, 1984) Legt man die oben eingesetzte Gesamtproduktionszahl von 119 296 Flugzeugen zugrunde, dann ergibt sich daraus ein Kriegsverlust von fast 80 % (genau: 79,16 %).

Jahr	1961	1970	1980	1990	1992	1999
USA	4.690.000	5.270.000	4.726.000	4.800.000	4.800.000	4.800.000
Deutschland	1.027.884	1.504.965	1.613.502	1.567.500	1.321.900	1.030.775
Frankreich	743.400	1.230.200	1.473.600	1.440.000	1.390.000	1.270.000
Kanada	549.789	596.426	657.400	750.000	730.000	711.335
Großbritannien	459.010	446.813	512.494	505.000	500.000	500.000
Australien	264.069	326.725	327.000	317.000	315.000	315.000
Spanien	71.077	259.819	523.907	740.830	766.267	882.000
China	52.661	126.440	747.900	824.113	770.629	798.286
Indien	31.016	100.000	382.869	988.070	1.136.160	1.520.000
Ägypten	12.837	17.300	36.000	57.000	61.000	86.000
Ukraine					511.500	347.247
Weißrussland					125.900	78.200
Summe:	7.901.743	9.878.688	11.000.672	11.989.513	12.428.356	12.338.843

Fig. 71 Bestandsveränderungen von Traktoren einiger willkürlich herausgegriffener Länder; (Quelle: Fischer Weltalmanach, 2004)

Die obige Tabelle vermittelt ein recht indifferentes Bild: Während in den Industriestaaten der Traktorbestand nach Erreichen von Spitzenverbreitungsgraden in den 80er Jahren weitgehend konstant bleibt oder sinkt, bieten Länder wie Indien, China oder Ägypten - eine Kornkammer des Antiken Roms - offenbar noch genügend Expansionsraum. Wir sehen, dass die Traktoren von 12 Ländern etwa in der Größenordnung der jährlichen, weltweiten Produktionsstatistik von Nutzfahrzeugen liegen. Wie sich das Bild ändern würde, wenn alle Länder mit in die Betrachtung einbezogen werden würden, lässt sich hier nicht genau genug abschätzen. Ebenso lässt sich der Fahrzeugbestand von Polizei- und Militär(panzer)fahrzeugen nicht mit wirtschaftlich und zeitlich vertretbarem Aufwand ermitteln. Legen wir die oben im Zitat erwähnten 700 Mill. Fahrzeuge Gesamtbestand zugrunde, erhalten wir einen Rest von ca. 52 Mill. Spezialfahrzeugen (Polizei, Militär etc.). Dieser stellt knapp 7,5 % der vermuteten Grundmenge dar und es ergäbe sich darüber ein durchaus stimmiges Bild.

Im Jahr 1998 wurden dagegen alleine in Deutschland 3,736 Mill. KFZ-Neuzulassungen registriert (Statistisches Taschenbuch 1999^{*}). Der nationale KFZ-Bestand wuchs von 4,4 Mill. im Jahre 1960 stetig auf 41,67 Mill. im Jahre 1998 an. Der „Datenreport 2002“ (Dallinger, 2002) sagt wörtlich:

„Der PKW ist das beherrschende Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland. Im früheren Bundesgebiet wurden bereits ab Mitte der 50er-Jahre mehr Fahrten mit dem eigenen PKW als mit öffentlichen Verkehrsmitteln unternommen, im Jahr 1990 waren es 84 % aller Fahrten. [...] Im Jahr 2000 wurden im motorisierten Individualverkehr mit PKW und Motorrädern 51 Mrd. Fahrten unternommen. Die Zunahme von 9 % gegenüber 1991 ist nicht zuletzt auf die noch immer steigende Motorisierung der privaten Haushalte [...] zurückzuführen.“

Trotz der Existenz von knapp 600 deutschen Großraumflugzeugen mit über 20 t Startgewicht und weltweit 10 789 im Betrieb befindlichen Linien- und Frachtflugzeugen, von denen die meisten 3450 Stunden pro Jahr (1 a = 8760 h) in der Luft sind (Airbus Global Market Forecast 2003 - 2022; Vorhersagefokus: weltweite Analyse von 407 Luftfahrtgesellschaften),

^{*} Arbeits- und Sozialstatistik (Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung)

beträgt der Anteil des Luftverkehrs am Gesamtverkehrsaufkommen im Jahre 2000 für Deutschland nur 0,2 %. Die angegebene durchschnittliche Einsatzbereitschaft dieser Großraumflugzeuge von ca. 40 % über das ganze Jahr hindurch ist vom logistischen Standpunkt aus betrachtet sehr beeindruckend. Flugzeuge von Luftsportvereinen oder privater Eigner werden mitunter nur $50 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ bewegt, was einem zeitlichen Jahresanteil von 0,0057 % entspricht. Und dennoch: Weltweit steht dem Airline-Gesamtflugaufkommen von ca. 37,2 Mill. Flugstunden (2003) die ebenso überraschende Zahl von 41,99 Mill. Flugstunden (1997) aus der Allgemeinen Luftfahrt gegenüber, die aus einem weltweiten Bestand von 273 500 Flugzeugen herrührt (GAMA, General Aviation Statistical Databook, 2003).

Die Bemühungen, den Weltluftverkehr in den Überschallbereich hinein auszudehnen, sind mit dem Absturz einer Concorde am 25. Juli 2000 unmittelbar nach dem Start vom Flughafen Charles-de-Gaulle in Paris bis auf weiteres eingestellt worden. Die Concorde war bislang das einzige operationell betriebene Überschallverkehrsflugzeug der Welt. Von 1969 an wurden insgesamt nur 20 Maschinen gebaut und 31 Jahre lang unfallfrei betrieben. Es lässt sich eine direkte historische Parallele zwischen dem Überschallflugverkehr und der Luftschiffahrt herstellen: Die Leichter-als-Luft-Ära des Personenluftverkehrs endete 37 Jahre nach dem Erstflug eines Starrluftschiffs nach Zeppelinbauart abrupt mit dem Absturz der LZ129 „Hindenburg“ am 6. Mai 1937 in Lakehurst. Diese Gegenüberstellung belegt einmal mehr, dass Einzelereignisse in der Geschichte einen weit höheren Stellenwert besitzen als man ihnen aufgrund einer statistischen Gesamtentwicklung zuschreiben möchte. Dieser Effekt hat Vor- aber auch Nachteile. So lassen sich aufgrund der übergeordneten Bedeutung solcher natürlichen Wendepunkte historische Entwicklungen relativ trennscharf ausweisen. Andererseits blockieren solche singulären Begebenheiten den stetigen kulturellen Fortschritt*, indem hierdurch kontinuierliche Langfristbemühungen aus dem kollektiven Bewusstsein geradezu ausgetilgt werden. Das deutsche „Sänger-Projekt“† der Nachkriegsära stellt z.B. meiner Ansicht nach einen ebenso tiefgreifenden Wendepunkt in der Luft- und Raumfahrtindustrie dar, der allerdings der Öffentlichkeit verborgen blieb. Hier wurde einer ganzen Generation von fähigen Ingenieuren historisch erstmalig mit einem Schlag klar, dass sie evtl. die Früchte ihrer Arbeit gar nicht mehr erleben werden. Wir brauchen die Wirkung auf das daraus resultierende Arbeitsklima einer ganzen Branche nicht näher zu vertiefen. Der 11. September 2001 markiert schließlich eine weitere historische Singularität, die sich nicht nur auf den Linienflugdienst, sondern auf alle Arten von Luftfahrt nachhaltig auswirkte. Neben der physikalisch-technischen Wirkosphäre existiert auch eine wirtschaftlich-politische, die in dieser Arbeit gegenüber den meisten anderen naturwissenschaftlichen Publikationen zur Methodik der Fernerkundung bewusst mitbetrachtet wird, weil beide Sphären nicht verlustfrei voneinander isoliert werden können.

2001 betrug die Zahl der zugelassenen LFZ in Deutschland 20 854. Davon waren 8530 Flugzeuge (darunter 811 Maschinen über 5,7 t), 7768 Segelflugzeuge, 2412 Motorsegler, 1447 Ballone, 694 Hubschrauber und 3 Luftschiffe. Das Statistische Bundesamt ermittelte für 2003 folgendes Luftverkehrsaufkommen. Die Statistiker sind jedoch

* Kleine Zeppelin-Statistik: von 1900 bis 1914 wurden 25 Luftschiffe gebaut, davon gingen bis zum August 1914 15 Stück verloren (8 durch Unwetter, 3 durch Explosionen, 4 technisch stillgelegt). Demgegenüber stehen die Erfolge: zwischen 1910 und 1914 wurden auf innerdeutschen Strecken bei 16 000 Fahrten 37 000 Fahrgäste in 3200 h 150 000 km weit befördert. (Wissmann, 1979)

† Mehrfach-Überschallverkehrsflugzeug in der Form eines keilförmigen „Wiedereintrittskörpers“, das außerhalb der Atmosphäre den Globus im transkontinentalen Linienflugverkehr umrunden sollte, benannt nach dem österreichischen Luft- und Raumfahrt-Pionier Eugen Sänger (1905 - 1965).

– ebenso wie das LBA – nicht (mehr) ohne weiteres in der Lage, unter diesen Verkehrsentwicklungen bis zur Ebene „gewerblicher Bildflug“ oder „Agrarflug“ zu filtern.

Verkehrsart	Flüge ¹⁾
Gewerblicher Verkehr	2 094 149
auf ausgewählten Flugplätzen	1 530 755
auf sonstigen Flugplätzen	563 394
Nichtgewerbliche Motorflüge	1 400 993
auf Flugplätzen	1 219 892
auf Hubschrauberlandeplätzen	67 148
auf Segelfluggelände	112 671
auf Ultraleichtfluggelände	1 282
Segelflüge	790 515
Motorsegelflüge	385 289
Flüge mit Ultraleichtflugzeugen	475 977
Bemannte Ballone	3 729
SUMME:	8 645 794

1) Passagier- und Nichtpassagierflüge (z. B. Arbeitsflüge, gewerbliche Schulflüge).

Fig. 72 Luftverkehrsstatistik für 2003; (Quelle: <http://www.destatis.de>, Recherche telefonisch unterstützt)

Dieses gesamte Zahlenwerk ist dazu bestimmt, eine grobe Vorstellung für die Größenordnungen zu vermitteln, mit denen wir es im historischen Rahmen zu tun haben.

5 Kurze Genealogie der Luftbildfotografie und Luftbildphotogrammetrie

Gehen wir noch einmal zurück an den Anfang und betrachten die Entstehung der Luftbildfotografie – und speziell der Photogrammetrie – etwas näher. Diese technischen Entwicklungslinien ruhen hierbei auf drei Säulen: der Flug- und der Fototechnik sowie den mathematisch formulierbaren Prinzipien der Perspektive, die über das künstliche stereoskopische Sehen bis hin zur analytischen Raumgeometrie mit Koordinatenrechnung reichen.

5.1 Geometrische Perspektive in Kunst und Wissenschaft

„Die Zentralperspektive gibt ein Bild eines Körpers, wie der Betrachter es wirklich sieht. Bei dem Verfahren der schrägen Parallelprojektion vereinfacht man das Problem, indem man den Beobachter in unendliche Ferne rückt, also auf einen Standpunkt, der in Wirklichkeit nicht eingenommen werden kann. Die so entstandenen Schrägbilder sind daher für unser Auge nicht immer befriedigend. Jetzt liegt der Beobachtungspunkt (Projektionszentrum) P in einer endlichen Entfernung von der Tafel Ebene. [...] Das Erkennen der Gesetze, nach denen Gegenstände so zu zeichnen sind, wie sie der Mensch ständig vor Augen hat, war keine leichte Aufgabe. Im Altertum wußte man zwar, daß entferntere Dinge uns kleiner erscheinen als unmittelbar vor uns stehende; auch die Verkürzung der Tiefenstrecken wurde allmählich erkannt, aber man stellte keine genauen Regeln auf. Dennoch besaßen hellenistische Maler großes Geschick, die Tiefendimension vorzutäuschen. Aber auch ihnen war das wichtigste Gesetz der Zentralprojektion, der Satz vom Fluchtpunkt, unbekannt. Kein Künstler der Antike wäre in der Lage gewesen, etwa eine Pappelallee zu zeichnen, die ins Bild hineinführt und am Horizont verschwindet. Die Kunst, in einem ebenen Bilde die Illusion räumlicher Tiefe zu erwecken, wurde im Mittelalter durch Giotto di Bondone (1266 - 1337) neu entdeckt und weiterentwickelt. Die Entdeckung des Fluchtpunktsatzes* wird Filippo Brunelleschi (1377 - 1446) zugeschrieben. Sie bedeutet einen Wendepunkt in der Malerei. Die bisherige, zum Teil sehr weitgehende Gleichgültigkeit gegenüber den wirklichen Raumverhältnissen weicht von dieser Zeit an dem Bemühen, den Betrachter zum Zeugen des dargestellten Ereignisses zu machen, das sich vor ihm wie auf einer Bühne abspielt. Seither sind die Gesetze der Zentralperspektive bis ins einzelne genau erforscht worden und finden in der bildenden Kunst wie in der Technik immer neue Anwendungen. Die Art und Weise, wie die Parallelen behandelt worden sind, kann zuweilen als wichtiges Kriterium bei der Bestimmung des Alters von Gemälden dienen.“ (Gellert et al., 1950).

* „Die Bilder paralleler Geraden verlaufen durch einen gemeinsamen Fluchtpunkt, der für ihre Richtung charakteristisch ist. Insbesondere ist der Hauptpunkt der Fluchtpunkt aller Tiefengeraden.“ und „Ist die Lage des Zentrums P bezüglich der Tafel Ebene T festgelegt, so bestimmt das perspektive Bild einer Geraden zusammen mit ihrem Spur- und ihrem Fluchtpunkt die Lage der Geraden im Raum eindeutig.“

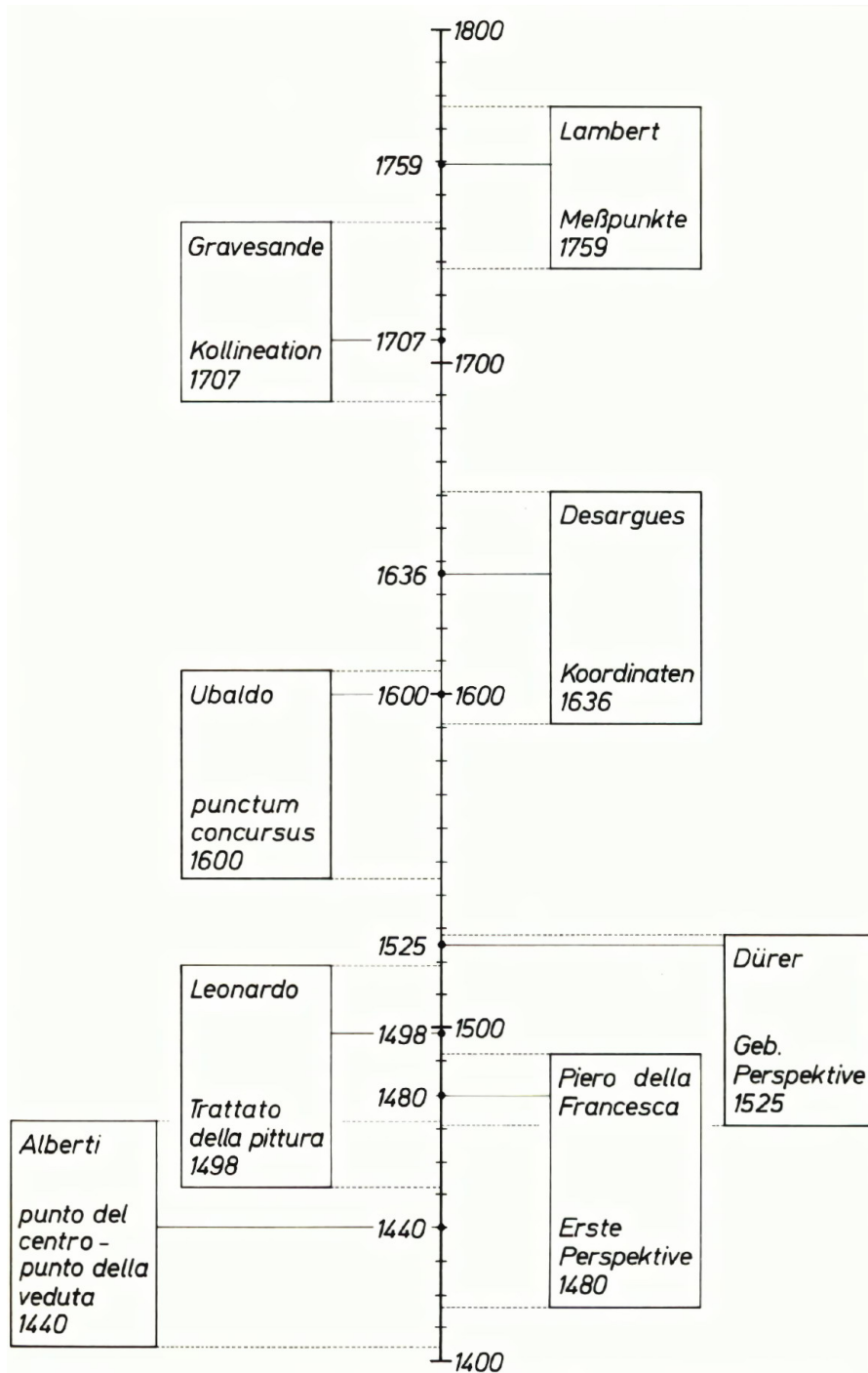


Fig. 73 Entwicklung der perspektivischen Geometrie durch die Jahrhunderte (Rehbock, 1979)

“Die Künstler der Renaissance suchten und fanden allgemeine, oft später als falsch erkannte Konstruktionen. Der Baumeister Giorgio Vasari (1511 - 1574) schildert [...] ausführlich und liebevoll diese Prospettivi. Besonders erfolgreich war Leon Battista Alberti, Architekt, Jurist, guter Mathematiker, vielseitiger Schriftsteller [...]. Sein Buch über die Malerei, verfaßt um 1440, erschien 1511 nach seinem Tode in lateinischer Sprache [...]. Darin zeigte er, daß in einem Bilde horizontaler Quadrate die zur Tafel senkrechten Seiten durch einen Hauptpunkt (*punto del centro*), die Diagonalen durch einen Distanzpunkt (*punto della veduta*) gehen. Ein Lehr- und Aufgabenbuch diktierte der erblindete Maler Piero della Francesca (*Petrus pictor*

Burgensis) seinen Schülern um 1480. [...] Der unvollständig überlieferte Traktat über die Malerei von Leonardo da Vinci (1498) enthielt wahrscheinlich auch geometrische Gesetze. Deutlich erkennbar sind solche in den Holzschnitten von Albrecht Dürer. In einem kurzen Kapitel seines schönen Buches (1525) gewinnt er das Zentralbild aus Rissen, d. h. in gebundener Perspektive. Erst das mehrbändige Werk von Guido Ubaldo del Monte (1600), Künstler und Mathematiker, bringt allgemeine Sätze und Begriffe, so den des Fluchtpunktes, durch den die Bilder paralleler Geraden gehen, als *punctum concursus*. Johann Heinrich Lambert, Mathematiker und Physiker in Berlin, zeigt in seiner ‚Freyen Perspektive‘ (1759) die Herstellung von Bildern ohne Benutzung von Rissen mit Hilfe von Teilpunkten, unseren Meßpunkten. Wertvolle Hilfsmittel für moderne Entwicklungen schufen der Franzose Desargues mit dem Begriff der Koordinaten (1636) und der Holländer s’Gravesande mit dem der linearen Verwandtschaft oder Kollineation (1707: Ihr Spezialfall hat als Perspektivität große Bedeutung auch für das praktische Zeichnen.“ (Rehbock, 1979)

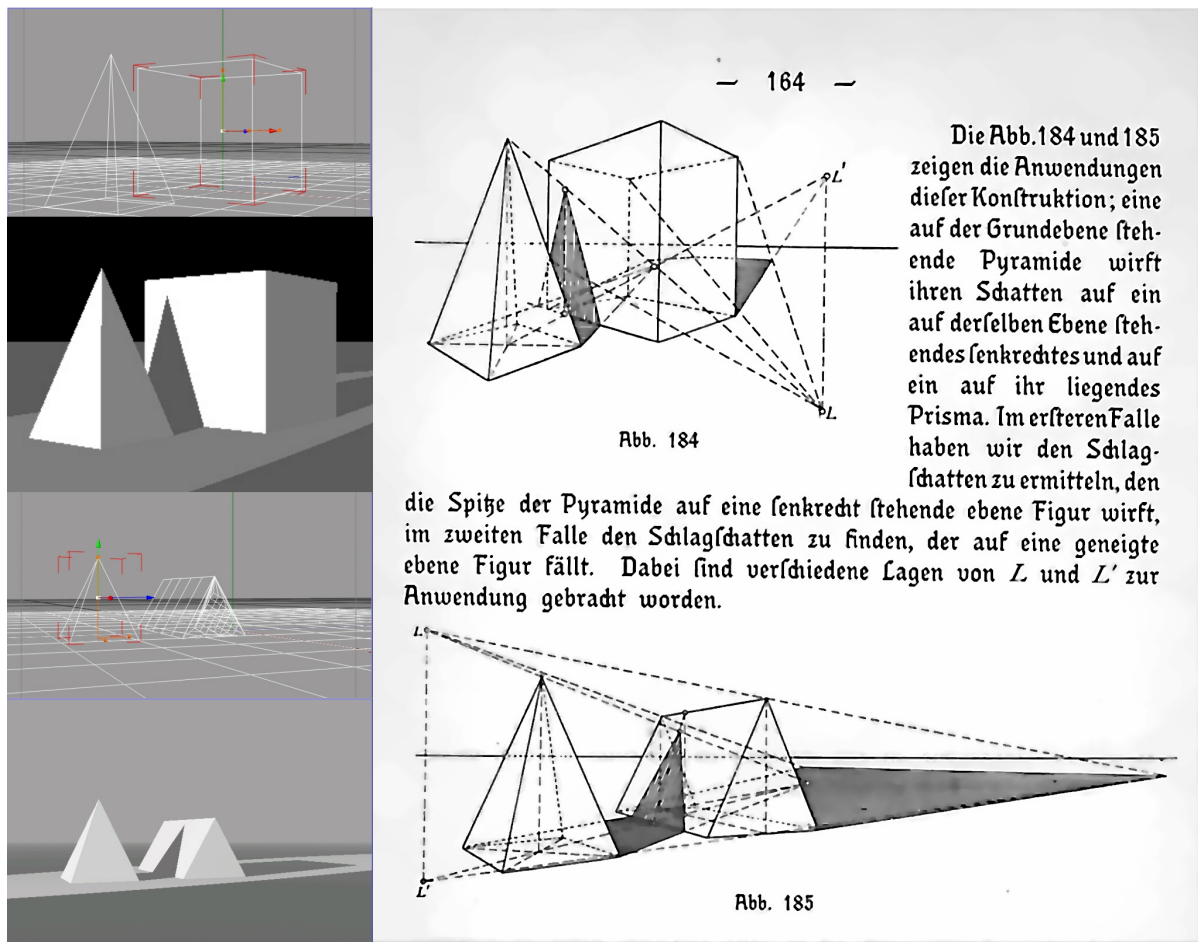


Fig. 74 Geometrische Perspektive in einem Lehrbuch des frühen 20. Jh. (Meisel, 1908) und Computermodellierung. Beobachtetes Phänomen: Die aus der analytischen Geometrie stammenden Risslinien sind im Software-Implementierungsprozess aus Gründen der Übersichtlichkeit und zur Schonung der Computerressourcen verschwunden, obwohl man auch in der 3-D-Animationssoftware mit Weltkoordinaten konstruieren kann. (2005, Cinema4D)

Die Beobachtung, die mit der obigen Abbildung verbunden ist, erscheint zunächst völlig harmlos. Sie wird jedoch mittel- und langfristig weit reichende Konsequenzen nach sich

ziehen, die aus unserem täglichen Umgang mit dem Computer erwächst: Über kurz oder lang werden wir zwangsläufig „vergessen“, wie hochentwickelte 3-D-Computergraphik sich aus mathematischen Prinzipien herleitet. Eine Methode, um dieses Wissen um die mathematischen Prinzipien, die sich hinter den geometrischen Konstruktionen verbergen, auf eine elegante Weise „zu retten“, könnte beispielsweise darin bestehen, den im Computerzeitalter längst untergegangenen*, mathematischen Zweig der „Nomographie“ in der Ausbildung erneut etwas stärker aufleben zu lassen. Dies würde gut mit den Ausführungen zu den Stückgießern und den Graveuren aus Kapitel 4 (Historische Synopse: von den Anfängen der Navigation bis zum modernen Messflugzeug) harmonieren. Als praktisches Beispiel sei hier eine graphische Multiplikationstafel für die Bestimmung von Kinofilmlängen und -zeiten angeführt:

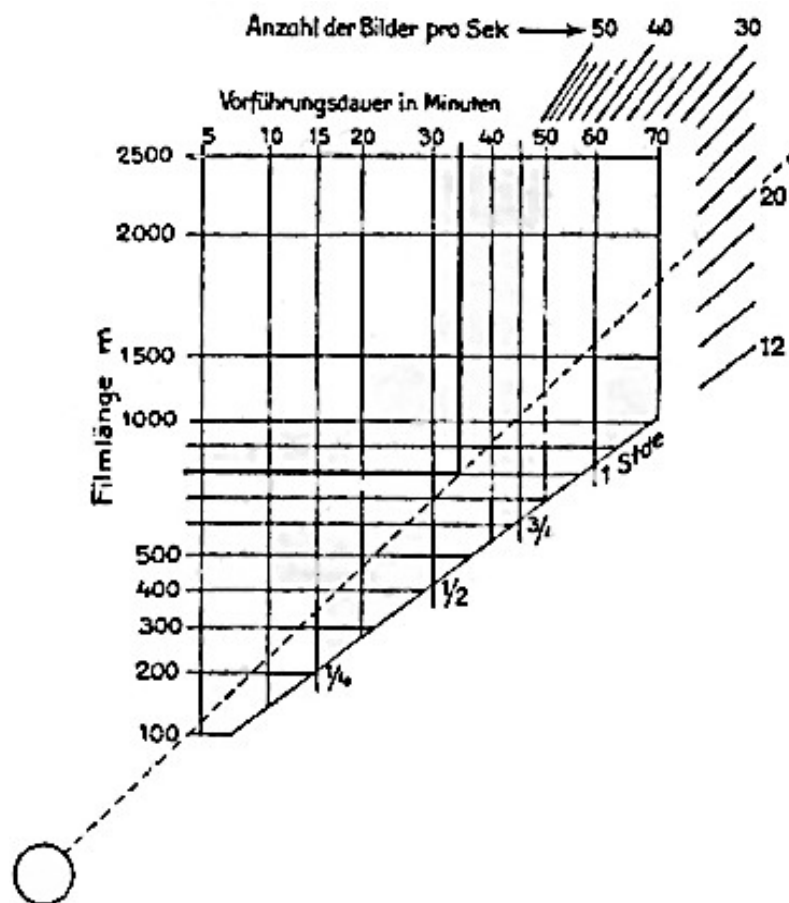


Fig. 75 Multiplikationstafel nach Schwerdt (*Lehrbuch der Nomographie*, 1924); in: (Pirani und Fischer, 1957)

In der nachfolgenden Darstellung sehen wir ein komplexes Beispiel aus der Astronomie.

* Nomogramme boten vor Einführung des Computers hervorragende Möglichkeiten, komplexe Sachverhalte in sehr übersichtlicher und komprimierter Form darzustellen, ganz abgesehen von ihrer Eigenschaft, messtechnische Skalen auf analytisch-konstruktivem Wege zu erstellen (Eichkunst). Graphisch konstruierte Nomogramme gehören heute zunehmend der Vergangenheit an, da man bequemerweise dazu übergegangen ist, die Speicherkapazitäten von Computern zu verwenden, um abgelegtes Tabellenmaterial in Datenbanken beliebigen Umfangs abzurufen.

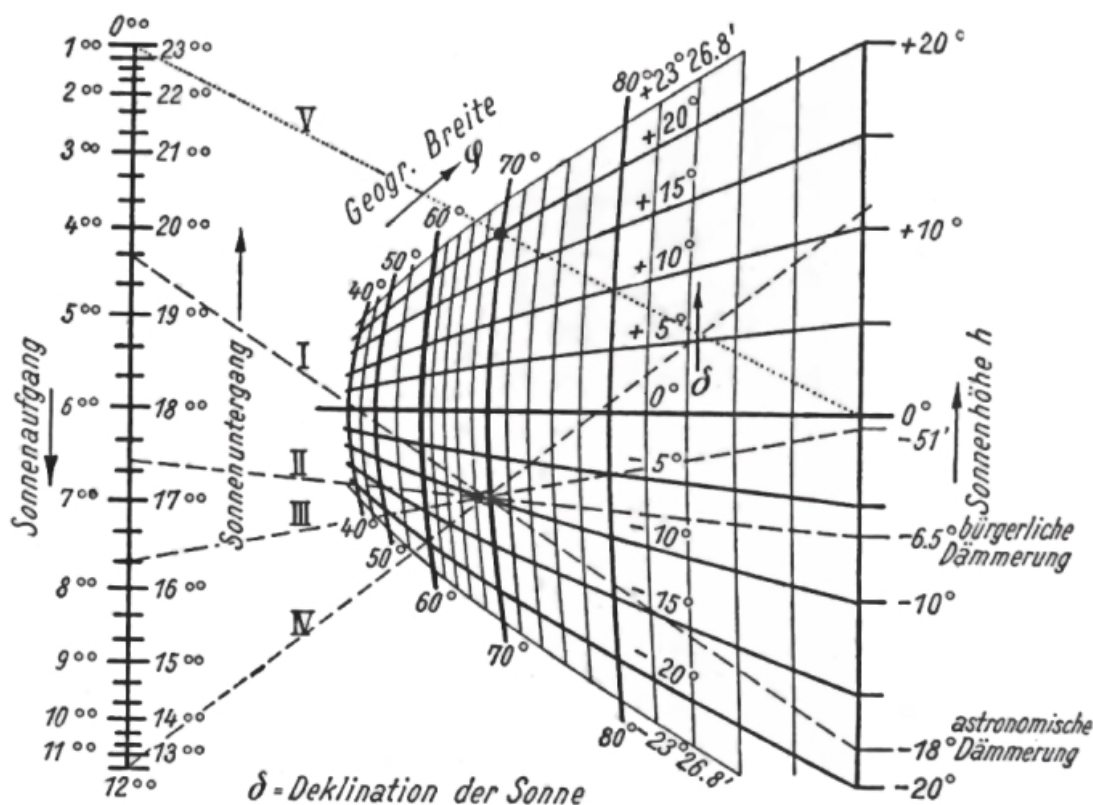


Fig. 76 Projektiv verzerrte Netztafel, aus der der Zusammenhang zwischen geographischer Breite φ , Deklination der Sonne δ , Sonnenhöhe h und Sonnenauf- und -untergangszeit t hervorgeht. Eingezeichnet ist als Beispiel der Ort Tromsø auf $69,9^\circ$ geogr. Breite am 23. Februar (für diesen Tag gilt $\delta = -10^\circ$) (Pirani und Fischer, 1957)

Man liest in der Abbildung von rechts nach links und umgekehrt, indem man vom Zustandsort (Schnittpunkt der geogr. Breite und der Sonnendeklination) Geraden dreht, die bis zur rechten und linken Skala reichen. Es ergeben sich folgende Zusammenhänge:

Linke Skala	von unten nach oben	Rechte Skala	Anm. d. Verf.
(I)	Beginn der astronom. Dämmerung	4:20	Eingesetzte Definition
(II)	Beginn der bürgerl. Dämmerung	6:35	Eingesetzte Definition
(III)	Rand der Sonnenscheibe berührt Horizontlinie	7:40	Größe der Sonnenscheibe (Beobachtungswinkel)?
(IV)	Höchster Sonnenstand an diesem Tage	+ 11°	Kulminationspunkt der Sonne (12 Mittags)

Das Nomogramm erlaubt auch eine umgekehrte Rechen- und damit Fragerichtung, z. B. in welcher Zeit des Jahres die Mitternachtssonne am Himmel steht. Die Antwort ergibt sich aus (V), indem der Sonnenhöhen-Nullpunkt mit dem Zeitnullpunkt verbunden wird: an allen Tagen, an denen die Sonnendeklination $> +20^\circ$ ist. Aus astronomischen Tabellen kann man dann den 21. Mai bis zum 24. Juli für dieses Deklinationsmaß herauslesen. Die Netztafel ist dabei eine graphische Repräsentation des Zusammenhangs

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

der jedoch für eine graphische Konstruktion entsprechend umgeformt und aufbereitet werden muss. Die methodischen Grundlagen dafür stellt die Nomographie zur Verfügung. Wir wollen

aus Platzgründen nicht weiter darauf eingehen. Zusammenfassend kann man jedoch die Nomographie als eine hohe Form des Ingenieurwesens und der Wissenschaft betrachten, anhand derer man einige theoretische und praktische Verflechtungen elegant und komprimiert zugleich erläutern kann.

5.2 Wichtige Meilensteine in der Geschichte der Fotografie

Die Geschichte der Fotografie ist in ihren Anfängen eine Summe von Zufallsentdeckungen, die bis ins erste nachchristliche Jahrtausend zurückreichen.

- 1038 Al Hazen aus Basra beschreibt das Prinzip der Lochkamera (lat. *camera* - Kammer; *obscura* - dunkel).
- 1267 Roger Bacon verwendet die Camera obscura für Versuche zur Sonnenbeobachtung.
- 1490 Leonardo da Vinci untersucht den Strahlengang der Camera obscura und bringt den darin stattfindenden, bildgebenden Prozess mit dem menschlichen Auge in Verbindung.
- 1572 Friedrich Risnor erzeugt Landschaftsaufnahmen mit einer miniaturisierten und tragbaren Camera obscura. Eine größere Verbreitung jedoch erfolgt erst mit der Konstruktion von Johannes Zahn im Jahre 1686: Ein Spiegel, der im Winkel von 45° zur Linse im Inneren der Kamera angebracht war, projizierte das Bild nach oben auf eine Mattscheibe und konnte so bequem abgezeichnet werden. Deshalb wurde die Camera obscura von Malern vor der Fotografie gern als Zeichenhilfe genutzt, um Landschaftsmerkmale proportional richtig wiederzugeben. (Bekanntestes Beispiel ist der Maler Canaletto mit seinen berühmten Gemälden von Dresden und Warschau.)
- 1614 Angelo Sala entdeckt, dass Silbersalze unter Sonneneinstrahlung schwärzen.
- 1666 Sir Isaac Newton entdeckt die Spektralzerlegung von weißem Licht, während er mit einem Prisma experimentiert. Mittels eines weiteren Prismas konnte er die Einzelfarben wieder zu weißem Licht zusammenführen.
- 1676 Johann Christopher Sturm, ein Mathematikprofessor, stellt ein Linsensystem vor, das mittels eines 45° im Strahlengang angebrachten Spiegels ein Bild projiziert. Diese Anordnung („relax lens principle“) ist die Grundlage für die Entwicklung der modernen Spiegelreflexkamera.
- 1770 Carl Wilhelm Scheele, ein schwedischer Chemiker (Entdecker zahlreicher Elemente, darunter Sauerstoff und Stickstoff, Erfinder eines dem Pasteurisieren ähnlichen Konservierungsprozesses), experimentiert mit Silberchlorid und entdeckt dessen Lichtempfindlichkeit. Er findet auch heraus, dass belichtetes, geschwärztes Silberchlorid mit Ammoniak gespült unlöslich wird und auf diese Weise ein fixiertes Bild übrig bleibt. Er erkennt jedoch die Bedeutung dieses Fixiermittels für die chemische Fotografie nicht.
- 1800 Der für seine astronomischen Arbeiten bekannt gewordene Wilhelm Herschel (1738 - 1822) entdeckt den infraroten Anteil des elektromagnetischen Spektrums.
- 1802 Thomas Young bringt grundlegende Konzepte zum Farbsehen hervor (Young-Von-Helmholtz-Theory of color vision): In der Netzhaut sind drei separate und für verschiedene Wellenlängen sensible Zäpfchen für das Farbsehen verantwortlich: rot, blau und grün.

Erst gegen Mitte des 19. Jh. keimten genügend systematische Versuche auf, um die chemischen Grundlagen des Fotografierens dazu auszubauen, dauerhafte Bilder zu erzeugen. Es dauerte vier Jahrzehnte, ehe die Filmchemie von Labormaßstab und Glasplatten als

Belichtungsträger zur handhabbaren Aufnahme mittels Kolloid-Trockenverfahren führte und weitere zwei Jahrzehnte, ehe die Fotochemische Belichtungs-/Entwicklungskette in einen industriellen Prozess transformiert wurde.

- 1822 Nicéphore Niépce kombiniert das Prinzip der Camera obscura mit der Bleichwirkung von Licht und erzeugt in 2 - 8 Stunden (!) dauernden Belichtungssitzungen die ersten auf dem Kopf stehenden Fotografien. Die erste historisch verbrieft und erhalten gebliebene, lichtbeständige Fotografie der Welt ist ein 8 Stunden lang belichteter Blick aus dem Fenster seines Arbeitszimmers eines französischen Landhauses. Das entstandene Bild ist ein Direktpositiv auf einer mit Asphalt lichtempfindlich gemachten Zinnplatte.
- 1839 Es entstehen die ersten historischen Fotografien von Daguerre in Kooperation mit Niépce in Frankreich („Daguerrotypie“).
- 1840 Man benutzt in Frankreich Fotos zur Herstellung topographischer Karten.
- 1849 Brewster erfindet das Linsenstereoskop für die (ca. 70 Jahre später breitenwirksam einsetzende) 3-D-Betrachtung von Stereobildern.
- 1851 Archer revolutioniert die frühe Fotografie durch die Verwendung feuchter Kolloid-Beschichtungen auf Glasplatten (Kolloid-Foto-Chemie), die den Belichtungszeitraum auf 2 s reduzierte.
- 1850er Fotografien sind bedeutsam für die Eroberung des amerikanischen Westens (bis in die 1870er).
- 1855 Maxwell erbringt den Beweis für trichromatisches Farbsehen durch fotografische Experimente. [Sutton, 1861]
- 1857 Helmholtz realisiert das Spiegelstereoskop, das auf den Ideen von Wheatstone aus dem Jahre 1838 beruht.
- 1858 Über Paris werden Luftbilder mit Automatikkameras aus freien und gefesselten Ballons heraus gemacht.
- 1858 Der französische Armeeingenieur Laussedat schießt vom Drachen und später Fesselballon aus mittels einer aufgehängten Glasplatten-Kamera erste Luftaufnahmen. Allerdings gibt er die Versuche wegen auftretender Lagestabilisierungs- und Lenkprobleme wieder auf und widmet sich dem Fototheodolit.

Aufgrund der militärischen Bedeutung der Arbeiten Laussedats werden diese nicht im Ausland veröffentlicht. In Deutschland arbeitet jedoch zeitgleich und unabhängig davon der Architekt Meydenbauer an ähnlichen Studien. Er entwickelt orthographische Zeichnungen aus (naturegeben perspektivischen) Fotografien von Monumenten. Ob Meydenbauers Arbeit mit militärischen Hintergründen behaftet ist, ist unklar. Im Deutsch-Französischen Krieg von 1870/71 benutzen jedoch die Preußen bereits die terrestrische Photogrammetrie bei der Belagerung von Paris. Meydenbauer war der Erste, der das Wort „Photogrammetrie“ in einem veröffentlichten Artikel benutzte. [Whitmore, 1952]

„Die große Anschaulichkeit der Zentralprojektion geht [...] mit einem gewissen Nachteil einher. Liegt von einem Gegenstand, etwa eine Photographie, vor, so kann man aus ihr die *wirklichen Maßverhältnisse* nicht unmittelbar entnehmen. Das Verfahren, aus einer Abbildung die Größenverhältnisse des Gegenstandes zu bestimmen, ihn z. B. in Grund- und Aufriß zu konstruieren, nennt man Photogrammetrie. Es hat große Bedeutung erlangt, weil es die Möglichkeit gibt, aus photographischen Luftaufnahmen *Landkarten* herzustellen. [...] Dabei finden

Spezialkameras Verwendung, durch die bei der Aufnahme Marken mitphotographiert werden, die den Hauptpunkt des Bildes angeben. Ist das Objektiv auf unendlich eingestellt, so gibt seine Brennweite die Distanz an. Durch diese zwei Elemente ist die innere Orientierung, mit anderen Worten, die Lage des Projektionszentrums, bekannt. Seine Bedeutung ergibt sich aus den Betrachtungen des perspektivischen Bildes der Geraden. In der Praxis dienen Spezialgeräte (Photogrammeter oder Phototheodolite) zum Ausmessen der photographischen Aufnahmen.“ (Gellert et al., 1972)

- 1859 Erste Luftbildaufnahme von Paris durch F. Tournachon (gen. Nadar).
- 1861 Laussedat wendet die Prinzipien der Perspektive auf Fotografien an und erstellt das erste Orthofoto eines Dorfes in der Nähe von Versailles (Anfänge der terrestrischen Photogrammetrie).
- 1862 Du Hauron analysiert Multispektralaufnahmen mit einlinsiger, prismatischer Lichtstrahlerlegung (Single-lens Beam Splitter Technique)
- 1860er Angaben zu Fotos für militärische Beobachtungen aus Ballons während des amerikanischen Bürgerkriegs; kein Foto überdauert.
- 1870er Entwicklung einfacher, additiver Farbmischung und Farbdarstellung.
- 1880 Kolloid-Trockenverfahren von R. L. Maddox, der dadurch den instrumentellen Aufwand für eine Aufnahme erheblich senkte (vorher Labormaßstab notwendig!).
- 1881 H. Goodwin stellt den ersten transparenten, flexiblen, fotografischen Film vor.
- 1881 Stolze führt das Passpunktverfahren („Ground Control“) im heutigen Sinne ein.
- 1888 A. Batut befestigt eine Kamera an einem Papierdrachen und erstellt Luftaufnahmen. Bereits 1890 hatte er ein Buch zum Thema veröffentlicht. „Dieser Versuch leitete den letzten Schritt zum universellen, modernen Kartographieverfahren ein, die seit den Dreißigerjahren eingeführte Luftphotogrammetrie.“ (Fuhrer, 1998)
- 1889 Der 35 mm breite, für den Filmtransport mit einer doppelseitigen Perforation versehene Filmstreifen wurde 1889 von Thomas Alva Edison eingeführt, der seitdem das meistbenutzte Aufnahme- und Projektionsformat für Kinofilme ist.
- 1899 Eastman erfindet den Celluloid-Film. (Howard, 1970) Eine andere Quelle spricht von der Kinofilmproduktion seit 1896 und der Massenfertigung in einem kontinuierlichen Verfahren seit 1900 (Braun, Kaiser und König, 1997).
- 1880er Fotoapparate an Drachen in England, Frankreich und Russland. Der erste Drachenfernerkundler soll der englische Meteorologe E. D. Archibald gewesen sein, der den Drachen für routinemäßige, meteorologische Beobachtungen nutzte, ehe er auf Tandemdrachen umstieg und eine Kamera-Plattform anhängte. Der berühmteste dieser Zunft wird der Amerikaner G. R. Lawrence, der Drachenkameras mit 400 kg Gewicht und 1350 x 2400 mm Negativgrößen bis 1000 m Schlepphöhe verwendet haben soll und sogar den großen Stadtbrand von San Francisco im Jahre 1906 damit fotografierte. (R. Read und R. Graham, 2002)*
- 1891 Die Fotografie von Raketen aus wird patentiert (Vorschlag von Rahrmann). Allerdings dauert es bis 1912, ehe A. Maul ein erstes erfolgreiches System testet (40 kg kreiselstabilisierte Kameraplattform in 6 m hoher Rakete, erreichte Flughöhe: 800 m).
- 1895 Erste Farbtrennversuche durchgeführt (First color separations produced).
- 1895 Fotos werden von Seville in topographischen Vermessungen in Kanada eingesetzt.

* Weitere prominente Vertreter der KAP-Szene (Kite-Aerial-Photography): Geoffrey de Beaufort (*1929, Brüssel), Michel Dusiariez (*1938, Brüssel), David Town, Raoul Fossett (Belgien), Serge Negre (Frankreich).

- 1898 Erstes praktisches Mehrkamasystem („Panoramograph“) für topographische Anwendungen durch den Russen R. Yu. Tile (6 Kameras mit je 95 mm Brennweite und 140 x 140 mm Negativfläche); nach: (Shershen, 1961) in: (R. Read und R. Graham, 2002)
- 1900 Ives erfindet die dreilinsige Multispektralkamera (Rot-, Grün-, Blau-Kanäle, RGB).
- 1900 Pulfrich erfindet das stereoskopische Fotografieren, das sich als weltweiter, gesellschaftlicher Modesport etablieren wird.
- 1901 Pulfrich erfindet den Stereokomparator, mit dem die Luftbildphotogrammetrie mittels Luftbildpaaren („Stereo paar“) bedeutend vereinfacht wird. (Fuhrer, 1998)
- 1902 Fourcade schlägt in Südafrika ein Instrument zum Messen von Unterschieden in Parallaxen vor. Unabhängig davon arbeiten Hubl und Orel (AUS) und Pulfrich an einfachen photogrammetrischen Instrumenten.
- 1903 Der Deutsche J. Neubronner entwickelt eine Minikamera mit 70 g Gewicht und 38 mm (quadratischem) Negativformat für Fotoflüge mittels Brieftauben. (R. Read und R. Graham, 2002)
- 1906 Der englische Leutnant P. H. Sharpe begründet mit Vertikal- und Schrägaufnahmen während militärischer Übungsaufstiege im Ballon die moderne Luftbildarchäologie – und zwar zufällig über Stonehenge (des größten megalithischen Monuments in Europa). Die Bilder erregen in einer Ausstellung große öffentliche Aufmerksamkeit.
- 1907 Auguste und Louis Lumiere, zwei französische Brüder, entwickeln ein einfaches System zur Farbfotografie und etablieren den 35-mm-Standard.
- 1909 Wilbur Wright nimmt die ersten Luftaufnahmen (von Passagier gedrehter Film über Centocelli, nahe Rom) aus einem Schwerer-als-Luft-Fahrzeug auf. Zeitgleich dazu unternimmt der Franzose Meurisse entsprechende Versuche.
- 1909 Berthon erfindet den linsenförmigen Farbfilmprozess für additive Systeme.
- 1910 “9 June: The first aircraft reconnaissance is made by Captain Marconnet and Lieutenant Fequant of the French Army. They used a single seat Henri Farman biplane on a 2½ hour, 145 kilometre flight from Camp de Châlons at Mourmelon to Vincennes. Fequart piloted the aircraft while Marconnet, armed with a hand held camera, squeezed into a narrow space between the seat and the engine. During the flight, photographs were taken of roads, railways, towns and the countryside.” (Quelle: <http://www.rafmuseum.org.uk/milestones-of-flight/world/1910.html>)*
- 1911 Der Orel-Zeiss Stereoautograph wird zum wichtigsten Gerät zur Auswertung von Reihen-Stereoaufnahmen: Höhenlinien lassen sich damit automatisch zeichnen.
- 1911 Die erste Verwendung des Flugzeugs als Kriegsgerät fand am 23. Oktober im Italienisch-Türkischen Krieg statt. Ein italienischer Pilot führte an Bord eines Blériot XI-Eindeckers einen einstündigen Aufklärungsflug über feindlichen Positionen in der Nähe von Tripolis in Lybien aus. Der erste dokumentierte Bombenangriff mittels Flugzeug fand 9 Tage später statt.
- 1912 die ersten militärischen Aufklärungseinsätze im Kriegseinsatz werden am 24. und 25. Februar im selben Konflikt geflogen.
- 1913 Beginn der modernen (zivilen) Luftbild-Fotografie durch Tardivo: Ein italienisches Flugzeug überfliegt die lybische Stadt Benghazi und deren nähere Umgebung und macht Aufnahmen. Sie dienen als Luftbildmosaik zusammengesetzt als Grundlage für eine geologische Kartierung.

* Der DDR-Luftfahrtautor K.-H. Eyer mann liegt mit seiner Angabe zu diesem Ereignis (1912, unter Angabe richtiger Namen/Orte) ganze zwei Jahre daneben. („Luftspionage“, Dt. Militärverlag Berlin, 1963)

- 1914 In der Schlacht von Tannenberg wird die russische Narew-Armee durch konsequenten Einsatz der 14. Fliegerabteilung auf deutscher Seite aufgeklärt und geschlagen. (Schreyer, 1967)
- 1915 Erste operationelle Luftbildaufklärung durch britische Luftstreitkräfte (Royal Flying Corps RFC – später Royal Air Force RAF) zur Aufklärung (gemäß Vorschlägen von F. V. C. Laws, C. D. M. Campbel und J. T. C. Moore-Brabazon). Die gesamte Kriegstaktik wird damit aus historischer Perspektive heraus entscheidend verändert. Der britische Angriff auf Neuve Chapelle im März 1915 erfolgt auf der Basis von Kartenmaterial, das ausschließlich mittels Luftbildern über das gesamte deutsche Grabensystem erstellt worden war; Einführung von „Aerial Reconnaissance“; (Donaldson, 1962)
- 1917 Das “Unites States Signal Corps” verwendet Luftbildaufnahmen im Mexikanischen Grenzkrieg.
- 1918 Französische Foto-Aufklärungseinheiten, die den Landstreitkräften zugeordnet sind, werten pro Woche (!) bis zu 50 000 Bilder aus. Die Briten verfügen zu Kriegsende über 400 verschiedene (!) Kameratypen mit 4000 Kameras im Feldeinsatz und 5000 in England für die Ausbildung; nach: (Parry, 1982); in: (R. Read und R. Graham, 2002) „Piloten des Amerikanischen Expeditionskorps lieferten während der Argonnenoffensive [26. September – 11. November 1918, Anm. d. Verf.] binnen vier Tagen sechshunderttausend Luftaufnahmen ab! Gegen Kriegsende hatten die Deutschen zweitausend Kameras für Luftbildaufnahmen und hundert automatische Luftbildkameras für Reihenaufnahmen in Gebrauch. An normalen Tagen schossen sie viertausend Fotos. Wir [britische Aufklärungseinheiten, Anm. d. Verf.] brachten es etwa auf tausend.“ (Schreyer, 1967)

An dieser Stelle ist ein struktureller Vergleich angebracht. Der Archivbestand des österreichischen Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen umfasst seit Sammlungsbeginn in den 40er Jahren „nur“ 380 000 Bilder (Bastian und Schreiber, 1999). Das archäologische Luftbildarchiv des bayerischen Landesamt für Denkmalpflege umfasst dagegen über 1 Mio. Klein- und Mittelformatbilder (Stand 2004, eigene Erkundigung), die jedoch erst seit 1976 gesammelt werden (vgl. Entwicklung der Luftbildarchäologie weiter unten). Dieser Datenbestand ist neben dem luftbildarchäologischen Archiv Oxfords der zweitgrößte luftbildarchäologische Fundus der Welt. In Bayern wurden mit dieser Million Bilder über 30 000 archäologische Bodendenkmäler identifiziert.

- 1920 Luftbilder werden von Explorationsgeologen für die Erdölsuche eingesetzt.
- 1923 Zeiss Stereoplanigraph.
- 1924 Der mehrschichtige Farbfilm wird entwickelt: “Mannes and Godousky patent the first of their work of multi-layer film which led to the marketing of Kodachrome in 1935.” (Hemphill und Estes, 2003)
- 1925 Die Firma Leica führt die Kleinbildkamera ein. Oskar Barnack verwendete bei der Entwicklung der Ur-Leica (bereits 1913) dazu den herkömmlichen 35-mm-Kinofilm und konstruierte eine Kamera um den Film herum. Anfangs belächelt, ermöglichte erst die 35-mm-Kamera eine mobile, schnelle Fotografie. Dies begründete die moderne Reportagefotografie.
- 1930 Erste Luftbild-Spektralaufnahme der Erde durch Krinov et al. (RUS).
- 1930er Umfangreiche Verwendung des Luftbilds in Erdwissenschaften und Landwirtschaft.
- 1931 Erprobung von Luftbild-Infrarot-Film aus Stratosphären-Ballon.

Das Stichwort Infrarot bedarf einer eingehenderen Erläuterung: A. Nürnberg berichtet 1957 in einem Buch mit dem Titel „Infrarot-Photographie“:

„Kapt.* A. W. Stevens ist in Argentinien in der Nähe von Villa Mercedes in einem Flugzeug 6,5 km hoch aufgestiegen. Im Flugzeug hatte er eine Kamera mit Infrarot-Filter und Kryptocyaninplatten (= Sensibilisator für Infrarot-Platten). [...] In 6500 m Höhe hat er die Kamera dahin gerichtet, wo er sich vorstellte, daß das Andengebirge sei. Von diesem Gebirge konnte er gar nichts sehen. Nach Entwicklung und Kopieren bekam er eine merkwürdige Photographie. Darauf sieht man die Gipfel des Andengebirges am Horizont. [...] Der größte Teil des Gebirges ist hinter der Krümmung der Erde verborgen. Rechts sieht man. [...] den 7000 m hohen Aconcagua. Der Abstand dieses Berges von Villa Mercedes war geographisch bekannt, und so konnte festgestellt werden, daß der Abstand zwischen Kamera und Aconcagua 470 km[†] ist. Die ganze Strecke, welche photographiert wurde, war 112 km (breit), also 1/360 des Erdumfanges. Der Horizont zeigte eine schwache Krümmung, welche auf der Originalphotographie einen Radius von 25 m hat, was übereinstimmt mit der Krümmung der Erde, so daß hier zum erstenmal die Erdkrümmung photographiert ist.“ (Schreyer, 1961)

An anderer Stelle heißt es unter Verweis auf das Jahr 1936: “Captain Albert W. Stevens takes the first photograph of the actual curvature of the earth - taken from a free balloon at an altitude of 72,000 feet.” (Hemphill und Estes, 2003). Diese Angabe bezieht sich offensichtlich auf die panchromatische Fotografie und einen Weltrekordflug, der am 11. November 1935 stattfand: „With assistance from the National Geographic Society, Capts. A. W. Stevens and O. A. Anderson establish a new balloon world altitude record of 72,395 ft (22,066 m) following launch from Rapid City, South Dakota.” (Taylor, 1999)

- 1934 Gründung der American Society for Photogrammetry (ASP).
- 1935 Kodachrome – ein Farbfilm auf subtraktiver Farbdarstellung beruhend – erscheint auf dem Markt.
- 1937 Der Farbfilm wird im Luftbildwesen eingeführt.
- 1938 Bausch und Lomb stellen den Photogrammetrischen Plotter Multiplex vor.
- 1940 Kelsh Plotter finden weite Verbreitung.
- 1940-43 Rasche Fortschritte in der Entwicklung von Schwarz-Weiß-Film und Farb-Infrarot-Film (CIR, „Falschfarbenfilm“) zur Lokalisierung von Tarnung und verbesserten Durchdringung von Dunst.
- 1941 Publikation von Eardleys “*Aerial Photos: Their Use and Interpretation*”
- 1940-45 Dramatische Fortschritte in der Luftbildfotografie und Photogrammetrie durch militärische Anforderungen. Die Deutschen verwenden mehr als 200 von Oscar Messters „Reihenmesskammern“, um über 7 Mill. km² Streifenmosaike zu

* Mit Kapitän ist hier nicht ein Seefahrer gemeint, sondern der irreführend übersetzte Offiziersrang eines „Captains“, vergleichbar einem Hauptmann, wie das nächste Zitat vermuten lässt.

† Die tatsächliche Entfernung von Villa Mercedes/San Juan und dem Berg Aconcagua beträgt laut National Geographic 3-D-Weltatlas (Software) ziemlich genau 300 km. Ein zweites Villa Mercedes (Santiago del Estero) wird nicht gemeint sein, da zu jenem die Entfernung deutlich über 600 km beträgt. Entweder befand sich das Flugzeug zum Zeitpunkt der Aufnahme 170 km nördlich der erstgenannten Stadt oder das Zahlenmaterial konnte von beiden Autoren mit damaligen Mitteln nicht genau genug recherchiert und überprüft werden.

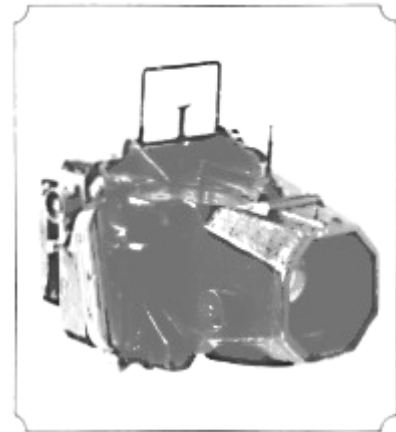
- erfliegen. Im letzten Kriegsjahr wird die gesamte Westfront alle 2 Wochen komplett neu erfasst. (R. Read und R. Graham, 2002)
- 1943 „Die Zentrale Auswertungseinheit („Allied Central Interpretation Unit“, ACIU) befindet sich auf einem Landsitz in Medmenham, etwa 50 Kilometer von London. Rund 4 Millionen Luftaufnahmen treffen hier jeden Monat ein, 250 detaillierte Berichte gehen täglich an die alliierten Stäbe sowie an den Premierminister. Die Bildauswerter sitzen in allen Luftstützpunkten. Sofort nach der Landung der Aufklärer werden die Luftbilder entwickelt, geprüft und ausgewertet. Ungefähr 3000 Männer und Frauen arbeiten im Dienste der ACIU.“ (Piekalkiewicz, 1978) Für die Planung der letzten anglo-amerikanischen Offensive im Zweiten Weltkrieg in Italien wurden rund 120 000 detaillierte Luftaufnahmen angefertigt. (Eyer mann, 1963)
- 1944 Erstausgabe von AS's *“Manual of Photogrammetry”*.
- 1944 Militärische Studien zur Wasser-Durchdringungsleistung von zweibandigem Luftbildfilm (U-Boot-Aufklärung?).
- 1947 Veröffentlichung von Krinovs *“Spectral Reflectance Properties of Natural Materials”*.
- 1950er Die Orthofoto-Kartierung wird populär.
- 1952 Farbluftbilder werden zur geologischen Kartierung eingesetzt.
- 1953 Colwell (US) demonstriert methodischen Nachweis und Stress in Vegetationsdecken mittels Fernerkundung (1956 veröffentlicht).
- 1954 Die Wetterflugzeuge der US-Luftwaffe (USAF) „sind zwischen den Bermuda-Inseln und Alaska, zwischen Europa und Asien insgesamt 57 573 Stunden in der Luft – das entspricht einer Gesamtflugzeit von sechseinhalb Jahren!“ (Eyer mann, 1963) Dieses Zitat verweist auf den Zusammenhang zwischen militärischer Aufklärung im Kalten Krieg und verschiedenen Arten der Aufklärung, hier der sog. meteorologischen Luftspionage.
- 1950er Der Begriff "Remote Sensing" wird geprägt (erstmaliger Gebrauch wird Evelyn Pruitt von der University of Michigan in den Willow Run Laboratories anlässlich eines Infrarot-Scanner-Projekts zugesprochen). (Konecny, 1998)
- 1956 In Russland publiziert man die Spektrozonal fotografie zur Bodenkartierung.
- 1960er Der Farbfilm tritt innerhalb der Luftbildfotografie in den allgemeinen Gebrauch.
- 1960 Colwells *“Manual of Photointerpretation”* und Rays *“Aerial Photographs in Geologic Interpretation and Mapping”* erscheinen.
- 1960er Beachtliche Ausweitung von Multispektralphotographie-Anwendungen.
- 1960 Wheelers additives Multispektral-System Colorvision erscheint.
- 1962 Neunlinsige Multispektral-Kameras durch USA und UDSSR (Itek-Kamera mit 10 Linsen, 1963).
- 1963 Die USAF baut Farbdrucker nach dem Prinzip der additiven Farbmischung.
- 1964 Die NASA führt Programme zur Verwendungsfähigkeit von multibandiger Fotografie zur Erderkundung ein.
- 1965 Pro Monat erfliegen 200 taktische Aufklärungs-Flugzeuge der USAF über Vietnam auszuwertendes Filmmaterial von 80 km Länge (Schreyer, 1967). Legt man vereinfachend ein 23 x 23 cm Luftbild-Standardformat zugrunde, so hätten sich daraus 347 826 Aufnahmen ergeben.
- 1965 Multispektrales, additives Farbsystem von Yost und Wenderoth.
- 1967 Erste praktische Anwendungen von UV-Fotografie.
- 1967 Zwei-bändiges Werk *“Earth Resources Surveys from Space”* des US Army Corps of Engineers.

- 1968 *“Manual of Color Aerial Photography”* der ASP (American Society for Photogrammetry).
- 1972 Die Firma Linhof stellt die „Aero-Technika“-4-x-5-Mittelformatkamera mit pneumatischer Filmansaugung vor. Dieses Prinzip kommt sonst nur bei großformatigen Luftbildkammern zum Einsatz und dient der Filmebnung zum Zeitpunkt der Belichtung, um Bildverzerrungen zu minimieren, die durch Filmwelligkeit entstehen. (Die einzige Serien-KB-Kamera, die ebenfalls mit pneumatischer Filmansaugung arbeitet, ist die 1990 erschienene Contax RTS-III).
- 1975 Veröffentlichung des *“Manual of Remote Sensing”* durch die ASP.

5.3 Der Verbund von Flugzeug und Kamera

Fassen wir die knapp 100-jährige Geschichte der luftgestützten, fotografischen Fernerkundung nochmals für lenkbare (Starrflügel- oder Flächen-)Flugzeuge auf der technischen Ebene zusammen: Am Anfang standen zweisitzige Beobachtungsflugzeuge mit einem Piloten und einem Fotografen, der die Kamera zunächst freihändig über der Bordwand zum Einsatz brachte.

Fig. 77 Beispiel für eine Flieger-Hand-Kamera: Carl-Zeiss, Jena, 13 x 18 cm auf Platten. (Spezial Wechsellkassetten mit 6 Platten). Objektiv Tessar 1 : 4.5 / 250 mm Brennweite, Schlitzverschluss (1/90 bis 1/750), ca. 1920 (Cornwall, 1979)



Es wurden von Beginn an sowohl Schräg- als auch Senkrechtaufnahmen gemacht. Bis zum britischen Palästina-Feldzug im Herbst 1917 dominierte die Punktbefliegung („pin-pointing“), danach gewann zunehmend die Streifenbefliegung an Bedeutung („strip-photography“). Bei der Streifenbefliegung steuerte der Pilot lediglich einen vorgegebenen Kurs, wendete nach Erreichen festgelegter Routenabschnitte, die der Luftbildfotograf („Operator“) mittels unbewehrtem Auge oder einfachen Visiervorrichtungen (häufig: umgerüstete „Bomb-Sights“) kontrollierte. Auf den Flugstreifen wurde die Kamera mittels vorgegebenem Zählschema zunächst per Hand, später mittels Zeitautomaten („Intervalometer“) ausgelöst. Die Aufklärungs-Kameras wurden freihändig geführt, solange sie kleine Negativformate und kurze Brennweiten besaßen. Diese beiden Kriterien waren bald nach Beginn des ersten Weltkriegs nicht mehr erfüllt, weil man sich aufgrund von Fliegerabwehrmaßnahmen schnell gezwungen sah, die (sehr schwach bzw. völlig ungepanzerten) Aufklärer in größeren Flughöhen mit längeren Brennweiten zu betreiben. Später kam die Notwendigkeit hinzu, möglichst große Flächen zu erfassen, was zu schweren, großformatigen Reihenmess-Kameras führte, die im Laufe ihrer technischen Evolution bei einem (im Nachkriegs-Europa) als optimal empfundenen Bildmaßstab von 1 : 50 000 ausreiften. Derartige Kameras waren fest mit der Flugzeugzelle verbunden. Aufgrund ihrer Massen setzte man sie häufig an Bord mehrmotoriger Maschinen mit mehr als 3 Mann Besatzung ein. Typische deutsche Fotoflugzeuge der Ära bis 1945 waren z. B. die Junkers W34 (265 km/h; 840 km), Ju52, Do215, Ju86* (13 000 m, 1300 km) oder Ju88 (D1

* Die relative Unverwundbarkeit derartiger Höhenaufklärungsflugzeuge wurde am 24. August 1942 eingestellt, als eine von Alexandria aus operierende Spitfire VC (ohne Druckkabine) eine Ju-86P-2 (mit Druckkabine) in 12.800m Höhe abfang und abschoss. (Taylor, 1999)

bis D3 mit 3100 km Reichweite, oder H1 mit 5150 km). Flugzeuge wie die Ju52 traten vor Kriegsausbruch nicht selten in der Gestalt von Verkehrsflugzeugen auf.

Die Übergänge von Bildaufträgen zur wirtschaftlichen Raumerschließung durch effiziente Luftbildkartierungen, einer neuen Form von Industriespionage mittels Luftbildinterpretation und dem Auskundschaften der bedeutsamsten Wirtschaftsstandorte für eine Bomberflotten-Zielkartei*, gingen zeitlich und intentional nahtlos ineinander über. Jede europäische Nation folgte diesem Muster.

„Überall, wo man großräumige Wirtschaftsprojekte entwarf, fehlte es an Karten. Stand und Qualität der Kartierungsarbeiten nahmen in allen fünf Kontinenten proportionell zur Besiedlungsdichte ab. Auf herkömmliche Weise – mit Theodolit und Meßtisch – war eine solche Riesenaufgabe nicht zu lösen. Auch erbrachte das Luftbild mehr Informationen als die Arbeit des Landvermessers, die sich auf wenige Geländepunkte beschränkte. Und bald diente es auch dem Forstwirtschaftler, dem Verkehrs- und Städteplaner, dem Agronomen, dem Archäologen und dem Geologen. Farbige Fotokarten ließen den Baumwuchs erkennen, die Bodenfeuchtigkeit, Grundrisse früherer Siedlungen und geologische Formationen. 2000 Jahre – von den Forschungszügen des Altertums bis zu Stanleys Expeditionen 1876 – hatte es gedauert, bis man die Nilquellen fand; die Luftbildkartierung der Quellflüsse des Hoang-ho war eine Sache von Tagen.“ (Schreyer, 1967)

Damit man eine Vorstellung von der Flächenleistung der verwendeten Luftbildmaschinen gewinnt, sei ein Beispiel zur Luftbildaufklärung der Insel Korsika aus dem Jahre 1941 wiedergegeben: Mit drei parallel fliegenden Ju86, von denen jede eine Senkrechtkamera mit 40 x 60 cm Negativformat und 75 cm Brennweite sowie zwei 30° oder 60° seitwärts geneigten Schrägkameras† mit 50 cm Brennweite verfügte, ließen sich aus 8000 m Flughöhe in 1,5 h etwa 4000 km² erfassen. Dies entspricht annähernd der Hälfte der 8681 km² großen Insel. Jede Kamera besaß Filmmaterial mit 60 m Länge und 100 Aufnahmen. Der erfasste Bildbereich betrug in dieser Höhe 27 km Breite. In 10 000 m wäre er 33 km breit und in 13 000 m 44 km breit gewesen. aus: (Schreyer, 1967)

Ein Nachkriegsbeispiel aus der Ära des Kalten Krieges:

„Das Auge [als meistgebrauchtes Spähinstrument zwischen den Weltkriegen, Anm. d. Verf.] konnte jedoch nicht mit der Entwicklung der Flugtechnik und der Luftverteidigung konkurrieren; Aufnahmepräzision und Aufnahmeentfernung waren zu gering im Vergleich zu den neugeschaffenen Geräten. Die Luftbildkameras, die in den letzten Jahrzehnten bedeutend verbessert wurden, erlauben dagegen Aufnahmen aus beträchtlich größeren Höhen. Die Brennweiten ihrer Objektive erreichten bereits im zweiten Weltkrieg über 4 Meter. Gleichzeitig verbesserte man das Filmmaterial. Mit Hilfe moderner Kameras sind zum Beispiel vier strahlgetriebene Aufklärungsjagdflugzeuge vom Typ RF-84F ‚Thunderflash‘ in der Lage, in knapp

* Stichwort „Douhetismus“: benannt nach dem italienischen General und Militärtheoretiker Giulio Douhet (1869 - 1930) "Il dominio dell' aria", in Deutschland als "Luftherrschaft" (Drei Masken Verlag, Berlin 1935) erschienen. Diese Ideen bahnten maßgeblich den Weg zum Bomberkrieg und gelten heute als überholt.

† Diese Kameraanordnung innerhalb eines Apparats wird „Trimetrogon“ genannt. Wesentliche Eigenschaft von Trimetrogon-Kameras ist ihre Fähigkeit, Horizont-zu-Horizont-Bilddaten zu liefern. (Burrows, 2001)

100 Minuten aus 10 000 Meter Flughöhe ganz Italien aufzunehmen*. Diese Tatsache wirkt im ersten Moment verblüffend. Doch bei näherer Betrachtung muß man feststellen, daß so zwar ein solches Gebiet in einer groben Übersicht erfasst werden könnte, aber zwischen Bergen, in Tälern verborgene Einzelheiten nicht erkennbar wären. Außerdem müssten ganze Gruppen erfahrener Bildauswerter in einem zeitraubenden Arbeitsprozeß aus dem umfangreichen Filmmaterial die unwichtigen Aufnahmen von den wichtigen trennen.“ (Eyermann, 1963)

Dieses Zitat enthält den Begriff des „Aufklärungsjagdflugzeugs“. Es lohnt sich, dessen Entwicklung näher zu beleuchten, da über den kleinen Erklärungsexkurs zahlreiche wissenswerte Verflechtungen aufgezeigt werden können.

Am 10. September 1938 erklärt man von deutscher Seite aus das Grenzgebiet zwischen Luxemburg und der Schweiz überraschend zur Flugsperrezone für den Zivilluftverkehr. Noch im selben Monat rekrutiert der Britische Geheimdienst MI 6 einen Geschäftsmann und Piloten, der eine als Zivilflugzeug getarnte Aufklärungsmaschine über die deutsche „Siegfriedlinie“ (den unter der eingerichteten Sperrzone liegenden Westwall) bringen soll. Der Pilot ist

„Sidney Cotton [1894 - 1969, Anm. d. Verf.], ein australischer Spezialist für Luftaufnahmen und passionierter Flieger, hauptberuflich Direktor einer Weltfirma, die sich mit der kommerziellen Auswertung des Farbfilm-Dufaycolor-Verfahrens befaßt, und im europäischen Flugsport eine recht populäre Erscheinung ist. Eine leistungsstarke fabrikneue Maschine, das zweimotorige Passagierflugzeug Lockheed 12 A [„Electra Junior“, Anm. d. Verf.] wird Cotton bereits im Jahr 1939 zur Verfügung gestellt. Er soll das Flugzeug so oft wie möglich benutzen, um die Story einer britischen Geschäftsmaschine in Privatbesitz glaubhaft zu machen.“[†] (Piekalkiewicz, 1978)

Das Flugzeug war mit drei Kameras ausgerüstet, deren Objektive 5" Brennweite hatten. Eine Kamera zeigte senkrecht nach unten, die zwei übrigen nach schräg außen[‡], so dass aus 20 000 ft 11,5 Meilen breite Flugstreifen aufgenommen werden konnten. Nun kamen drei Besonderheiten zusammen: Das Flugzeug war in unauffälligen Farbe gestrichen („pale duck egg green“), das es gegen den Himmel betrachtet verschwinden ließ. Die Kameras waren versteckt eingebaut, so dass sie an der am Boden befindlichen Maschine kaum entdeckt werden konnten („cameras behind tight fitting metal ports“) und waren durch Heizbelüftung und elektrische Fernsteuerung „höhentauglich“ gemacht. Außerdem stellte Cotton sich als kontaktfreudiger und geschäftstüchtiger Unternehmer vor. Diejenige Episode, die ihn zu einer Legende werden ließ, bezieht sich auf ein internationales Sportfliegertreffen in Frankfurt, das

* Fläche Italiens: 301 336 km² (Fischer Weltalmanach, 2004); im vorliegenden Beispiel entfiel also auf ein Flugzeug eine Erfassungsleistung von 45 000 km²·h⁻¹.

† Diese Darstellung widerspricht der Auslegung der nachfolgend zitierten amerikanischen Quelle (Burrows, 2001) und einigen anderen Darstellungen im Internet, die naturgemäß den Aspekt des abenteuerlich veranlagten Individuums betonen und dabei offenbar alle der Verschleierungsmaßnahme (Geschäftsflugzeug in Privatbesitz) unterlegen sind. An diesem Umstand lässt sich sehr schön demonstrieren, dass man ca. ein halbes Dutzend Quellen miteinander abgleichen muss, ehe man zu einer Vorstellung darüber gelangt, was wirklich passiert sein könnte ...

‡ Die Anordnung der Kameras entsprach somit einer technischen Vorläuferstufe auf dem Weg zum „Trimetrogon“.

nach dem 27. Juli 1939 stattgefunden haben muss, und an dem er auf Einladung des Flughafendirektors von Tempelhof teilnimmt:

„Cotton lässt nun zwei Leica-Motorfotoapparate in den Tragflächen montieren, die er durch einen Knopf unter dem Pilotensitz betätigen kann. Dieser Knopf, mit dem Motor eines Autoscheibenwischers verbunden, der die versteckten Schutzbleche unter den Leicas automatisch öffnet und schließt, setzt auch die Kameras mit Negativrollen für je 250 Aufnahmen in Betrieb. In Frankfurt ist die ‚riesige Lockheed‘ [im Internet betonter Ausdruck: „Kolossal Lockheed“, Anm. d. Verf.] Gesprächsstoff Nummer eins, und als der anwesende Tempelhofer Flughafendirektor Cotton bittet, ihn auf einem der Flüge mitzunehmen, schlägt der Engländer einen Trip den ‚wunderschönen Rhein entlang bis Mannheim vor, von dem seine Tante so schwärmt‘. Und während der arglose Flughafendirektor das Rheinpanorama bewundert, drückt Cotton fleißig den Knopf unter seinem Sitz.“ (Piekalkiewicz, 1978)

Angeblich sollen sich bei diesem Flug sogar Mitglieder des deutschen Generalstabs an Bord befunden haben. Für Lockheed sind derartige Begebenheiten später Anlass genug, die „12 A“ scherzhaft als erstes vollwertiges Spionageflugzeug aus eigener Produktion zu deklarieren. Im Laufe der Zeit entwickelte sich die RAF als Hauptabnehmer der Bilder. Cottons Einsätze, die an verschiedenen Brennpunkten quer über den Mittelmeerraum bis zu den als strategisch bedeutsam eingestuften Ölfeldern von Baku am Kaspischen Meer und den Raffinerien von Batumi (georgische Schwarzmeerküste) und vornehmlich über Deutschland stattfanden, trugen bis 1940 den Namen Photographic Development Unit (PDU). Aus der PDU entstand die Luftbildaufklärungseinheit der RAF, die Flugzeuge durch den „Cottonizing-Prozess“ in Aufklärungsflugzeuge umrüstete (Gewichtsreduktion, höhentaugliche Kameras, Zusatztanks zur Reichweitenerhöhung etc.). Tatsache ist, dass Cottons Lockheed mit dem Kennzeichen G-AFTL am 24. August 1939 Deutschland als letzte Zivilmaschine vor Ausbruch des Zweiten Weltkriegs verlässt. Er hatte buchstäblich bis zur letzten Stunde mit dem Reichsluftfahrtministerium (RLM) darüber verhandelt, einige Angehörige des RLM nach England zu friedenserhaltenden Gesprächen zu fliegen. Zusammengefasst schuf Cottons ungewöhnlicher Einfallsreichtum mehrere für die Luftfahrt bedeutende Techniken, so beispielsweise Fluganzüge (Sidcot Suit), Tarnmuster bzw. -farbe (Camotint), Luftbildfilm (Dufaycolor) und die tropfenförmig ausgebeulten Beobachtungsfenster, die heute an Bord zahlreicher Hubschrauber und Überwachungsflugzeuge zu finden sind. Sein Vorschlag, anstelle üblicher Aufklärungsmuster ein Jagdflugzeug mit Kameras auszurüsten (und Treibstoff anstelle von schwerer Bewaffnung und Funkausrüstung mitzunehmen), erwies sich als unwälzendste Neuerung.

„Das zeigt ein Vergleich der Verluste von Aufklärungsflugzeugen der verschiedenen Typen und der von diesen bei Luftbildaufklärungsflügen aufgenommenen Gebiete zwischen dem 1. September 1939 und dem 15. Januar 1940: Die Royal Air Force fotografierte mit Hilfe der bisherigen Aufklärungstypen 2500 Quadratmeilen [...], wobei 40 Flugzeuge abgeschossen wurden; die französische Armée de l’Air machte von 6000 Quadratmeilen Luftbilder und verlor dabei 60 Flugzeuge; eine einzige „Spitfire“ fotografierte dagegen unbehelligt 5000 Quadratmeilen in einem bedeutend kürzeren Zeitraum.“;

Quellen: (Eyer mann, 1963), (Burrows, 2001),

<http://www.adastron.com/lockheed/electra/sidcotton.htm>

<http://www.aceflyer.com/cotton/> u.v.a.

Um sich die Dimensionen der Operationalisierung bei der Luftbildgewinnung noch etwas besser verdeutlichen zu können, sei hier noch eine eindrucksvolle Zahlenreihung gegeben:

„Die Aktivität der britischen Luftaufklärung war in den ersten Kriegsjahren sehr gering; so führte zum Beispiel der 1. Fotoaufklärungsverband [einer von 4 Strategischen Aufklärungsverbänden – dieser hier mit Schwerpunkt West- und Mitteleuropa, Anm. d. Verf.] im Mai 1941 täglich nur vier Erkundungsflüge durch – ein Jahr später lag der Tagesdurchschnitt bei neun Flügen. Ab 1942 änderte sich diese Situation. Die Royal Air Force begann die Luftbildaufklärung zu verstärken. Verbesserte Fernaufklärungsflugzeuge und neue Kameras, so das Luftbildgerät F.53 mit einer Filmkapazität von 500 Aufnahmen, gelangten in die vergrößerten Aufklärungsverbände der Royal Air Force. Gleichzeitig wurde eine Zentralabteilung für Luftbildauswertung gegründet, die Anfang 1943 über eintausend Mitarbeiter zählte. [...]

Im Jahr 1942 fertigten die Bildauswerter der Royal Air Force 204 neue Zielkarteien an und analysierten 1,5 Mill. Luftbilder. In den folgenden Jahren wuchsen diese Zahlen sprunghaft an, denn die Aufklärungsfliegereinheiten konnten ungestört über West-, Süd-, Mittel- und Nordeuropa operieren [...]. Allein das 106. Aufklärungsgeschwader führte im Jahr 1943 rund dreitausend Einsätze durch, wobei 2252 militärisch wichtige Objekte auf 467 042 Negativen [das sind 207 Bilder pro Objekt, Anm. d. Verf.] festgehalten wurden; von den ausgewerteten Filmmaterial fertigte die Zentralabteilung 1 329 756 Abzüge an! [Bewertet man das anhand heutiger EDV-technischer Maßstäbe, so entspricht dies knapp einer Verdreifachung des Primärmaterials zu Zwecken der Metadokumentation – genauer 1 : 2,87 – wobei zu prüfen wäre, mit welchen Vorgaben diese Daten vervielfältigt und verteilt wurden, Anm. d. Verf.]

Die Royal Air Force erhielt zwischen 1939 und 1945 ein umfangreiches Potential und ein vieltausendköpfiges spezialisiertes Personal für die Luftaufklärung [...] Es ist unbestreitbar, daß von den am Zweiten Weltkrieg beteiligten [...] Mächten Großbritannien die meisten Erfahrungen auf dem Gebiet der Luftaufklärung gewann. Interessant ist es in diesem Zusammenhang zu wissen, daß selbst die Militärs der anderen NATO-Länder offen eingestehen, daß die Royal Air Force das größte Luftbildunternehmen der westlichen Hemisphäre ist.“ (Eyermann, 1963)

Sowohl nach dem Ersten als auch nach dem Zweiten Weltkrieg wurden in den jeweiligen Nachkriegsjahren bewährte, gebrauchte Militärmuster für die Fernerkundung verwendet. Bis in die 30er Jahre hinein war Flugbenzin so billig, dass keine Notwendigkeit bestand, es mit in die ökonomische Bilanzierung eines FE-Unternehmens einzubeziehen. Die Zellen der Flugzeuge wurden immer stabiler und langlebiger. Die Motorleistungen stiegen weiterhin kontinuierlich an und erreichten nicht zuletzt durch die prestigeträchtigen internationalen Wettbewerbe, wie z. B. dem Schneider-Pokal – einem Hochgeschwindigkeitswettbewerb für Wasserflugzeuge – enorme Ausmaße. Im angloamerikanischen Wirtschaftsraum verwendete man mit Vorliebe die aus dem Zweiten Weltkrieg berühmte DC-3 Dakota, die von den 40ern bis in die 60er Jahre hinein die Szene dominierte (Read und Graham, 1984). Das lag v. a. an ihrer richtungsweisenden Konstruktion, ihrer Wirtschaftlichkeit, der Reichweite und nicht zuletzt ihrer sprichwörtlichen Zuverlässigkeit. Weitere Militärmaschinen im FE-Einsatz

waren beispielsweise der Bomber B-26, die Anson* und sogar die Rapide aus den Vorkriegsjahren. (Read, 1982)

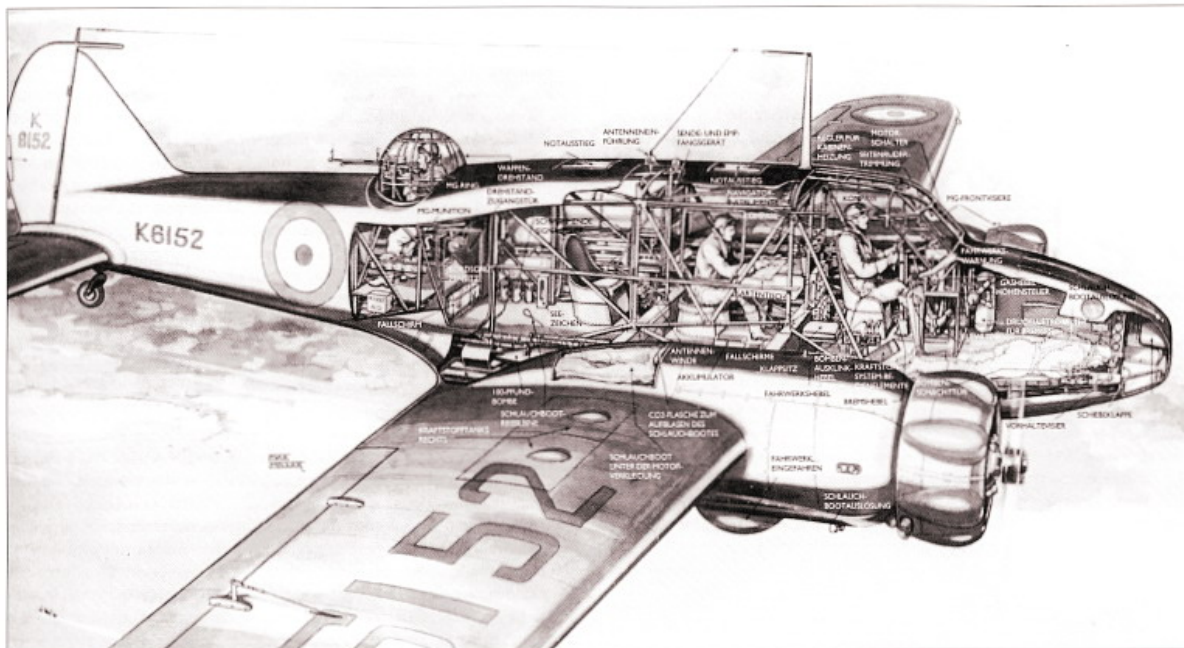


Fig. 78 Die erfolgreiche Avro Anson mit 4 Mann Besatzung in ihrer Primärrolle in seltener Aufrissdarstellung (Zeichner: Max Millar, erstmals veröffentlicht im Flight-Magazine, 30. Januar 1936; aus: (Gunston, 1999)). Anhand solcher lehrreichen Zeichnungen lassen sich auf sehr unterhaltsame Weise konstruktive Grundlagen des Flugzeugbaus studieren.

Danach fanden Flugzeuge aus der Allgemeinen Luftfahrt der USA breite Verwendung für diese Aufgaben. Dieser Trend ist bis heute ungebrochen. Es sind dies u. a. Flugzeuge wie die Piper PA-23 Aztec, PA-31 Navajo, Cessna 310, 320, 336 und die 400er-Serien, Beech Queenair- und King-Air-Serien, sowie die Aero Commander 500er bis 800er Baureihen. In Ostdeutschland verwendete man für den Bildflug in den 80er und 90er Jahren die LET-410, ein in über 1000 Einheiten produziertes Mittelstreckentransport- und Frachtflugzeug, das nach 1989 eine Renaissance im Westen und einigen Schwellen- und Dritte-Weltländern erfuhr.

* Von der Avro Anson wurden insgesamt 11 020 Stück gebaut, 2882 davon in Kanada. Es war der erste Eindecker und das erste Flugzeug mit Einziehfahrwerk, das bei der RAF ab 1936 in Dienst gestellt wurde. (Angelucci, 1972)



Fig. 79 Diese Let-410UVP mit dem Kennzeichen „DDR-SXE“ kam im Sept. 1983 zur Interflug und wurde zu einem der sechs „Universalforschungsflugzeuge“ des FIF (Forschungs-, Industrie- und Fotoflug, ein Ableger aus der ehemaligen Betriebsteile Bild- und Spezialflug der Interflug) umgerüstet. Über AEROTEC nach Guatemala verkauft, heute als „HIC-690T“ in der Dominikanischen Republik stationiert. (Billig und Meyer, 2003; mit freundlicher Genehmigung durch M. Meyer, 2005)

Die Art und Güte der verwendeten Filme sowie ihre Entwicklungstechnik wurden ebenfalls beständig weiterentwickelt. Vom pragmatischen Standpunkt aus betrachtet lohnt es sich jedoch nicht, in diesem Rahmen näher darauf einzugehen. Wie groß der über sieben Jahrzehnte entstandene Markt ist, vermitteln in etwa folgende Zahlen zu Art und Anzahl der in Umlauf befindlichen Reihen-Messkammern:



Fig. 80 Derselbe Flugzeugtyp in einer Funktionalgliederung dargestellt (Zeichnung: O. Reich für *FliegerRevue* Ausgabe Nr. 8/1986, mit freundlicher Genehmigung *FliegerRevue*, 2005)

Hersteller	CARL ZEISS	CARL ZEISS	WILD	JENOPTIK
Kammer-Typ	RMK A 15/23	RMK A 30/23	RC 10A	LMK
Bildformat	23 x 23 cm	23 x 23 cm	23 x 23 cm	23 x 23 cm
Brennweite	150 mm	300 mm	150 mm	150 mm*
Bildfeld	83 gon	47 gon	83 gon	83 gon
Objektiv	Pleogon A	Topar A	Univ.-Aviogon	Lamegon PI
Blenden	1 : 4 bis 1 : 11	1 : 5,6 bis 1 : 11	1 : 4 bis 1 : 22	1 : 4,5 bis 1 : 11
Belichtungszeit	1/100 - 1/1000 s	1/100 - 1/1000 s	1/100 - 1/1000 s	1/50 - 1/1000 s
Kassettenvolumen	120 m	120 m	120 m	120 m
Kürzeste Bildfolge	2 s	2 s	2 s	2 s
Gewicht**	etwa 110 kg	etwa 110 kg	etwa 130 kg	etwa 120 kg
* austauschbar 90,150,300mm				
** mit Aufhängung, Kassette und Steuergerät				

Fig. 81 Technische Daten einiger Reihemesskamern; minimal verändert; aus: (Albertz, 1991)

Kameramodell	Zeitraum	Produzierte Stückzahlen
Carl Zeiss RMK A	1955 – 1989	> 800
Wild RC10A	1968 – 1980	Mehrere Hundert
RC20	1987 – 1992	Ca. 200

Fig. 82 Anzahl verkaufter, metrischer Kamerasysteme; Angaben aus: (Kramer, 1994)

Diese Angaben werden unterstützt durch eine Abschätzung aus anderer Quelle, die darüber hinaus eine prognostische Lagebeurteilung liefert und weiterhin einen Bezug auf die Geofernerkundung mittels Satelliten herstellt:

Sensor	Bis 2002	Bis 2007	Nach 2007
Luftbild-Reihenkamera, Analogfilm	> 1000	> 1000	> 1000
Photogrammetrischer Scanner	> 500	... 1000	?
großformatige Luftbildkamera, digital	< 10	... 200	?
Kleinformat, digital	< 300	< 1000	?
Satelliten	< 20	< 50	?

Fig. 83 Abschätzung der weltweiten Primärdatenerfassungssysteme; Werte nach: (Mayr, 2002) in: (Linder, 2003)

Hohe Systemkosten für ein Sensor-Trägerflugzeug und ausgereifte, großformatige Kamerasysteme bedingen typischerweise sehr lange Standzeiten. Der Werterhalt kann als Indikator für eine gewisse Standfestigkeit der verwendeten Sensorik-Komponenten herangezogen werden: Aus US-Internet-Newsgroups war im Jahr 1997 in Erfahrung zu bringen, dass selbst langjährig gebrauchte Reihemesskamern der RMK-Serie in gutem Zustand noch mit 450.000 USD gehandelt werden (zum Vergleich: erste „große“ Luftbilddigitalkameras, wie etwa die „DMC-2001“ der Firma Z/I-Imaging, wurden zu ihrem geplanten Erscheinungsdatum etwa ab Juni 2002 mit Einführungspreisen um 920.000 USD erwartet (Graham und Koh, 2000)). Wie wir bereits gesehen haben, sind Fluggeräte im Allgemeinen ebenfalls langlebige Investitionsgüter. V. a. die Preisentwicklung bei zweimotorigen Geschäftsreiseflugzeugen und Business-Jets legt die Vermutung nahe, dass sich die typischen Beschaffungskosten für Gesamtsysteme um etwa 2 - 8 Mio. EUR bewegen.

Dies kann man nun in Relation zum historischen Flottenverlauf der Luftbildfirmen setzen, über die äußerst spärliche Informationen existieren. Wie bereits ausgeführt reagiert der Gesamtmarkt relativ langsam auf sich ändernde technologische Rahmenbedingungen, da – anders als bei Industrieprojekten mit nationalen Finanzierungsbeteiligungen – Investitionen in Technologie-Hardware langfristig binden und sich Fehlprognosen entsprechend empfindlich für klein- und mittelständische Betriebe auswirken. (Winkler, 2000, unveröff.)

Noch zu Beginn der 60er Jahre wurden in Westdeutschland und Westberlin 17 größere Luftbildunternehmen gezählt, alleine in Bayern 13 weitere kleine Firmen mit der Erlaubnis für die kommerzielle Luftbildgewinnung (Eyer mann, 1963). Spätestens seit Mitte der 70er Jahre setzte weltweit ein massives Flottensterben ein, das durch ein Phänomen hervorgerufen wurde, das ich als „Satelliteneuphorie“ bezeichnen möchte, wie unten noch weiter präzisiert wird. Dies geht u. a. aus amerikanischen und kanadischen Übersichten hervor, die sich mit Versuchen zur Entwicklung alternativer, kostengünstigerer Fernerkundungsmethoden beschäftigen (siehe v. a. Meyer, 1997 und Zsilinsky, 1997).

Als vorläufiges Endresultat dieser Entwicklungen stehen heute im zeitlichen Mittel nur etwa 20 deutsche Fernerkundungsträgerflugzeuge zur Verfügung, die nahezu ausnahmslos zur Flächenkartierung (mehrere Tausend Hektar, vorzugsweise über 100 km² und mehr) eingesetzt werden, wie man in Expertenkreisen erfragen kann. Die gewonnenen Bilddaten werden als Grundlage für topographische Kartengewinnung und -nachführung oder landesweite Archiv-Bestandspflege (CIR-Befliegungen) verwendet. Die Flugzeuge werden – teils in saisonaler Abhängigkeit – über ganz Europa und darüber hinaus kommerziell eingesetzt. Bei den verwendeten Mustern handelt es sich um Flugzeuge ab einmotorigen Business- oder Utility-Klassen aufwärts, wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht:

Firma	Anzahl	Flugzeugtyp	Bemerkungen
Hansa Luftbild –			
German Air Surveys	3 x	C 404 Cessna „Titan“	2-mot. Kolbentriebwerk, 8-sitziges Geschäftsreiseflugzeug
	1 x	C 172 RG (?)	
Eurosense	3 x	C 404	
	1 x	Piper PA31 „Chieftain“	2-mot. Kolbentriebwerk, 10-sitziges Regionalverkehrsflugzeug
Aerowest GmbH	1 x	C 404	
Becker & Keller	1 x	C 206	Cessna Utility Flugzeug (C-172 ähnlich; Hauptunterschied: verlängerter Rumpf)
Geocart	1 x	C 402 Cessna „Business Liner“	
Geoplana	1 x	C 340	
	1 x	C 180	
ILV	1 x	C 206	
	1 x	C 421	2-mot. Kolbentriebwerk

MAPS geosystems	2 x	PA-31p Piper „Comancho“	2-mot. Propellerturbinen- Flugzeug (kurz: „Turbo- Prop“)
	1 x	C 206 Stationair	
RWE Power AG – Abt. Geobasisdaten/Photogrammetrie	1 x	Cessna 208 „Caravan“	1-mot. Turboprop
Terraplan-3D	1 x	Do 27	Ehemal. Verbindungs- flugzeug der Luftwaffe
Enviscope GmbH	1 x	Learjet 35A	
	1 x	Partenavia P68B	
BSF Luftbild GmbH	1 x	C 404	Ein Unternehmen der Swissphoto-Gruppe
	1 x	C 207	
SUMME:	24		

Fig. 84 Kommerzielle Fernerkundungs-Flugzeuge in Deutschland (Quelle: eigene Erhebung per Internet/Telefon) basierend auf 2003-Liste korporativer Mitglieder DGPF; ergänzt, Stand: Oktober 2004, ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Auffällig ist die Tendenz der bedeutenderen Firmen, in größere Regionen zu expandieren, dabei vornehmlich in den mittleren Osten. Vermutete Ursachen für diesen Trend:

- Notwendigkeit qualitativ hochwertiger Kartensätze für infrastrukturelle Erschließung in wirtschaftlich bedeutenden Trockenregionen.
- Notwendigkeit hoher Aktualisierungsraten durch verstärkte wirtschaftliche Aktivitäten und direkte und indirekte Auswirkungen bewaffneter Konflikte.
- Klimatische Trockenräume versprechen aufgrund der Witterungsverhältnisse sowie spärlicher Vegetation höchste Kosten-Nutzen-Effizienz für Luftbildinterpretation und -messung.
- Zunehmender wirtschaftlicher Druck (mit zwei Haupteinflussfaktoren, nämlich der Globalisierung einerseits und der „Digitalisierung des Luftbildwesens“ andererseits, die mit massiven Preisrutschen einherging und von erheblichen Steigerungen im Entwicklungsaufwand von Kameras neuerer Bauart begleitet wurde).

Experten sprechen auf Fachmessen und -tagungen im Kontext vermehrt einsetzender „Preisschlachten“ sogar von einer regelrechten Zerstörung des Binnenmarkts.



Fig. 85 C172: typische Merkmale: abgestrebter Hochdecker, große Leitwerksflosse bis fast zum Heckfenster reichend, starres Bugfahrwerk, an der Zahl der seitlichen Fenster ist grob der Typ ablesbar. Vorliegende Abb. zeigt eine C172 im Verbandsflug mit einer zweiten C172 (beides Maschinen von R. Krüger ARDEX GmbH/Flugplatz Kyritz). Das Bild entstand wenige Minuten vor der totalen Sonnenfinsternis 1999, ungefähr auf der geographischen Breite von Berlin in etwa 2500 m Höhe (Piloten: R. Beator, G. Winkler).



Fig. 87 PA31, hier als geophysikalisches Messflugzeug der Firma Fugro am 7. August 2001 über der brasilianischen Küste bei Rio de Janeiro; Foto: D. R. Carneiro; (Quelle: www.airliners.net, 2005)



Fig. 89 Cessna C208 „Caravan“ (Homepage: TerraVista – gezeigt ist die Maschine der RWE Power AG, 2005)



Fig. 86 Cessna C206, die auch als „TU206“ – „Transport Utility“ bekannt ist; hier: Bj. 1981; (Quelle: www.mistralair.com, 2005)



Fig. 88 C404 Titan ; (Quelle: Homepage Aerowest GmbH, 2005)



Fig. 90 Do27 des Luftsportvereins Kiel (ehemaliges Verbindungs- und Beobachtungsflugzeug, Bj. 1958, Reichweite: 800 km; (Quelle: www.lsv-kiel.de, 2005)

Wer sich darüber hinaus einen Blick auf europäische, luftgestützte Fernerkundungsaktivitäten verschaffen will, der sei auf zwei wesentliche Übersichtsdarstellungen verwiesen. Zum einen auf die Veröffentlichung von H. Kramer „Observation of the Earth and its Environment - Survey of Missions and Sensors“, und zum anderen auf die webbasierte Übersicht von EUFAR (European Fleet for Airborne Research) unter www.eufar.net. EUFAR fasst mit nur wenigen Ausnahmen all jene luftgestützten Aktivitäten zusammen, die auf und oberhalb der Ebene von einmotorigen Motorflugzeugen liegen (im deutschen Kontext also „D-E ...“-Kennzeichen, MTOW < 2 t). Besagte Ausnahmen sind:

- ein ASK-16 Motorsegler der DLR/Oberpfaffenhofen,
- ein Eco-Dimona-Motorsegler der etablierten schweizer Firma MetAir/Flugplatz Hausen am Albis (südlich von Zürich)
- ein ENDURO Ultraleicht-Trike (das von Dr. Wolfgang Junkermann/Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)) betrieben wird, sowie
- ein als „ERA“ bezeichnetes Sky-Arrow-Leichtflugzeug mit amerikanischer Zulassung (Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestale del Mediterraneo/Napoli)

Derzeit umfasst die Flugzeug-Liste 30 Eintragungen, die vom aufgeführten Trike bis zum zweistrahligen, russischen Höhenforschungsjet M55-„Geophysika“ reichen.

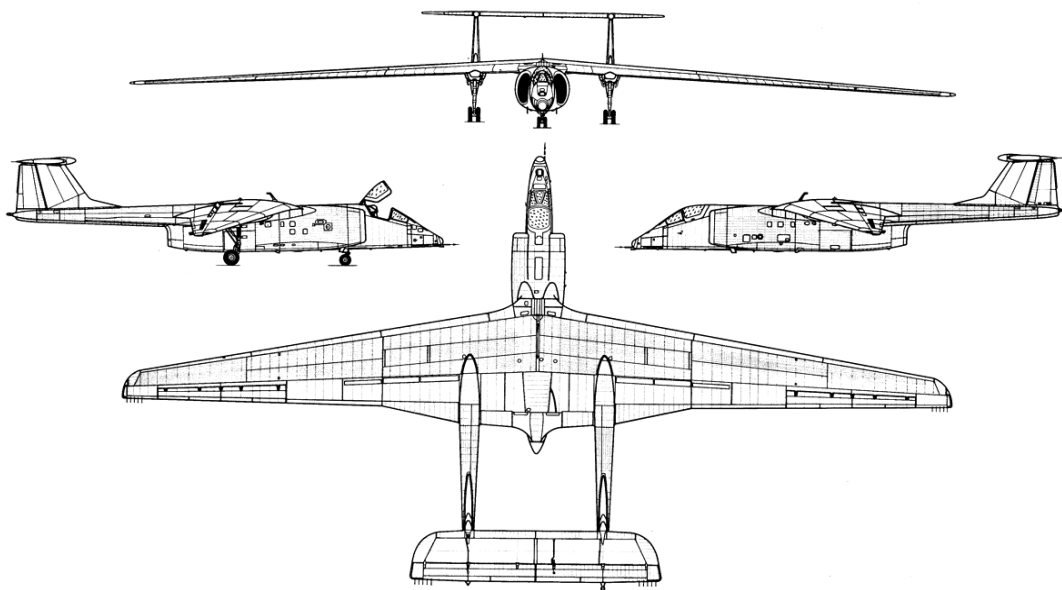


Fig. 91 Seitenansichten der Myasishchev M-17 „Stratosfera“ (NATO-Codename „RAM-M“, später „Mystic-A“; 1982 erstmals mittels Aufklärungssatellitenbildern identifiziert; es existierten zusammen mit der sehr ähnlich aussehenden „Mystic-B“ oder M 55 „Geofizika“ bis 1992 nur 6 Flugzeuge; Technische Daten: einsitziges, zweistrahliges Höhengaufklärungs- und Forschungsflugzeug, max. Geschwindigkeit: 750 km/h, 4 Stunden Flugdauer bei „Loitering-Speed“ in Einsatzhöhen um 20 000 m (65 600 ft), 7 h in 17 000 m, Nutzlast: bis 2 t, MTOW: 19,95 t, Spannweite: 37,4 m, Länge: 22,8 m, Höhe: 4,7 m). Die Stratosfera- und Geophysika-Flugzeuge finden ihre westlichen Äquivalente in der U-2 und deren zivilem NASA-Pendant „ER-2“ (Quellen: www.aeronautics.ru, www.airwar.ru mit Bezugsangaben auf „The Complete Encyclopedia of World Aircraft, 1997, Aerospace Publishing“ und „North American Special Operations Group“ (NASOG, 2001).

Darunter befindet sich auch eines der am zweifellos exotischsten Einzelstücke, die die deutsche Luftfahrtindustrie in den letzten 50 Jahren hervorgebracht hat: die Grob Egrett

T520G (Kennzeichen „VH-ARA“) der Einrichtung „Airborne Research Australia“ (ARA/University Flinders) mit SE-Turboprop, 4,7 t MTOW, 3000 km Einsatzreichweite und 50 000 ft (15 250 m) Dienstgipfelhöhe.

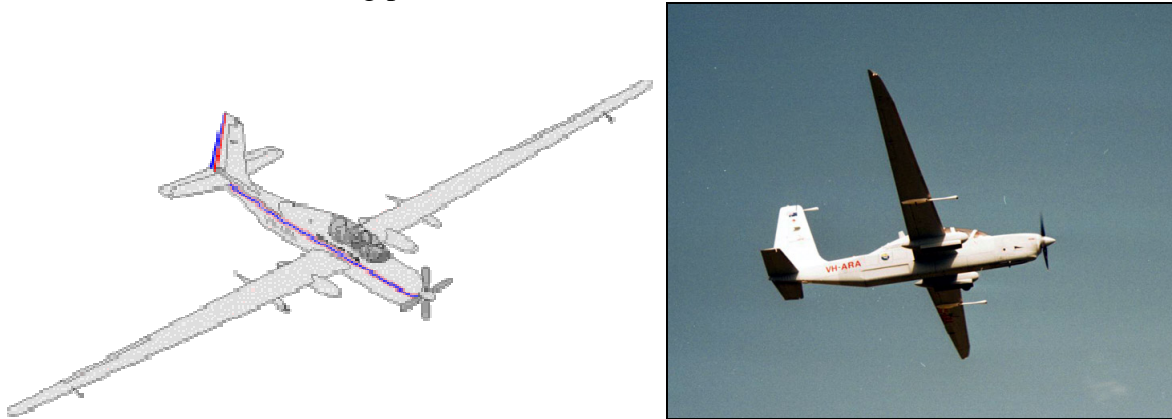


Fig. 92 Grob Egrett (Quellen: links: www.fas.org, rechts: www.dlr.de Abb. zeigt „VH-ARA“ der „Airborne Research Australia“ von der Universität Flinders)

Ursprünglich war dieses Flugzeug als hochfliegender Fernaufklärer mit niedrigem Radarquerschnitt (GFK-Bauweise) für militärische Zwecke entwickelt worden.* Die Flugzeuge wurden auch unter der Bezeichnung Grob „Strato1“ bekannt.

Uns soll in diesem Kontext nur folgende Payload-Übersicht interessieren, da sie einem verallgemeinerbaren Schema folgt: es lassen sich praktisch in jedem Flugzeug entsprechende Stauräume, Hardpoints und Zugangsmöglichkeiten für einen Ausbau mit Instrumenten finden.

* “The Egrett series of aircraft was originally developed by Grob Flugzeugbau GmbH & Co KG (Germany) and E-Systems Inc. (USA) as a low-cost (in military terms) high altitude reconnaissance platform for the German and US Air Forces. Egrett, a high-altitude long endurance manned aircraft made out of composites, is powered by a single turboprop engine, it has a wingspan similar to that of a commercial Boeing 737. The program was known as Senior Guardian in the United States, and as LAPAS (Airborne Stand-off Primary Reconnaissance System) in Germany. Although the mission of the Senior Guardian project is publicly portrayed as focused environmental monitoring and treaty verification, a similar cover story was used during the early years of the U-2 program. A total of five airplanes were built, the single-seater Proof-of-Concept aircraft, three production single seaters and one two-seater trainer. After an evaluation period, the two Air Forces decided that the aircraft did not fit their requirements. Since then, some of the single seaters have been successfully used as ad-hoc high-altitude research platforms (for example by Aurora Corporation in the USA and by the Weltrauminstitut in Berlin).” (Quelle: Military Network Analysis – www.fas.org) Dazu sollte man wissen, dass das Weltrauminstitut Berlin – WIB, von dem Physiker und Wissenschaftsastronauten Reinhard Furrer bis zu seinem Absturz auf dem Flugplatz Johannisthal mit einer Me108 „Taifun“ im September 1995 aufgebaut wurde.

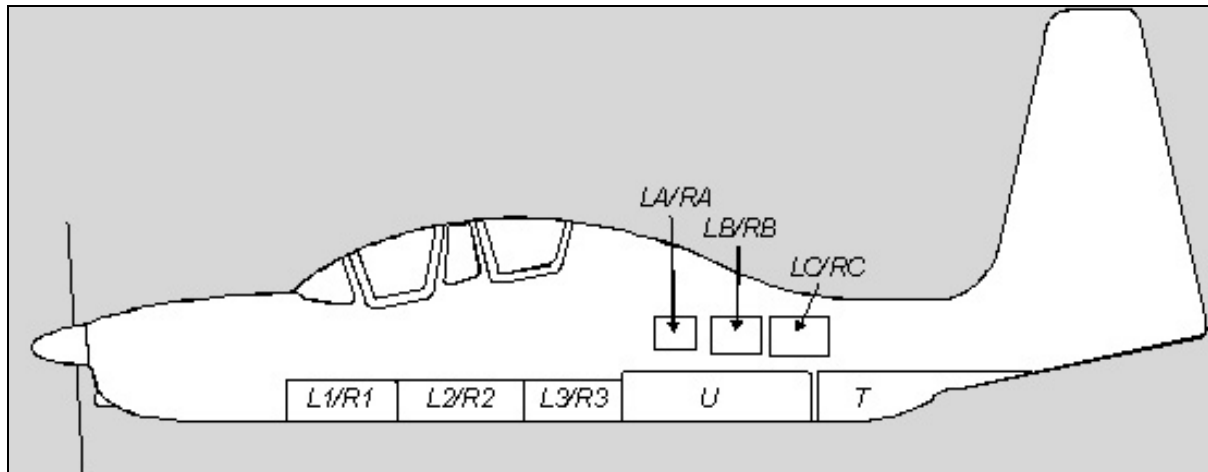


Fig. 93 Beispiel für eine schematische Payload-Übersicht "VH-ARA is capable of carrying a total of 750 kg of instrumentation payload in 13 different payload bays and 3 external locations (2 hardpoints on the wings and one probe mount on the tail fin)." (Quelle: www.dlr.de, 2005)

Location	Maximum Payload Dimensions (mm)	Maximum Payload Mass (kg)
R1	Not available for payload	-
L1	1275 x 250 x 500	68
R2	1450 x 250 x 500	68
L2	1450 x 250 x 500	68
R3	1100 x 250 x 500	68
L3	1100 x 250 x 500	68
RA	615 x 940 x 450	68
LA	615 x 940 x 450	68
RB	625 x 940 x 415	102
LB	625 x 940 x 540	102
RC	645 x 940 x 545	102
LC	645 x 940 x 545	102
U	1950 x 800 x 530	238
T	100 x 750 x 530	22

Fig. 94 Spezifikationen zu den internen Ladebuchten an Bord der „VH-ARA“; (Quelle: www.dlr.de, 2005)

Zwei Drittel der Liste von EUFAR-Flugzeugen fallen in die übliche Business-Class-Kategorie: zweimotorige Flugzeuge mit maximalen Abflugmassen deutlich jenseits der 2 t und typischerweise >> 1000 EUR/h. Des Weiteren ist anzumerken, dass der Großteil dieser Flugzeuge im Auftrag von meteorologischen Forschungseinrichtungen für in-situ-Messungen in der unteren Atmosphäre mit Flugprofilen bis etwa 10 km Höhe betrieben wird.

6 Der globale Rahmen – Beginn der satellitengestützten Erdbeobachtung, geopolitische Aspekte und wachsendes globales Umweltbewusstsein

In der Literatur wird häufig angeführt, dass mit dem Einsetzen der bemannten Raumfahrt, den ersten von Hand erzeugten Weltraumbildern der Erde als Ganzes, dem Brundlandt-Report sowie einem grundlegenden Pionierwerk der biologisch-ökologischen Forschung („Der stumme Frühling“ von Rachel Carson – ein Bericht zum Massensterben von Singvögeln durch Übereinsatz von DDT) hauptverantwortlich mit dazu beigetragen haben, die Gefährdung unserer Umwelt zu erkennen. (Fritzler, 1997) Der Club-of-Rome-Bericht („Grenzen des Wachstums“), die Energiekrise, das Erkennen der Bevölkerungsexplosion, das Nord-Süd-Gefälle in der Wohlstandsverteilung sowie die schweren, teils offen zutage tretenden Umweltbeeinträchtigungen (z. B. lokale Waldschäden durch sauren Regen, epidemische Verseuchung), teils schleichenden Umwelteffekte (z. B. Ozonloch, Luftverschmutzung, Grundwasserbelastung) haben in der beginnenden Ära der Informationsgesellschaft zu einem veränderten Natur- und Umwelt-Bewusstsein geführt. Die latente globale Bedrohung durch unbegrenzt, unreguliertes, wirtschaftliches Wachstum und uneingeschränktem Ressourcenverbrauch auf allen Ebenen unserer ökonomischen Existenz führten zu einem signifikanten Trendimpuls in der Umweltgesetzgebung, der mit dem Beginn der Erderkundung aus dem All im Zuge der Weltraumeroberung ab Ende der 60er Jahre einsetzte. Die Umweltgesetzgebung vollzog sich in Deutschland nach 1945 hauptsächlich in zwei großen Hauptperioden: in einer ersten legislativen Phase von 1970 - 1980 und in einer weiteren von 1980 bis zur Jahrtausendschwelle. Das gesamte System fußt auf dem nach modernen Gesichtspunkten fortschrittlichen Reichsnaturschutzgesetz vom 26. Juni 1935 (RGBl I S. 821), welches bereits Gebietsschutz, Artenschutz und Ausgleichsregelungen bei Eingriffen in den Naturhaushalt kannte.

„Wie das Bundesverfassungsgericht mit Beschluß vom 14.10.1958 (BGBl 1959 I S. 23) feststellte, ging das Reichsnaturschutzgesetz inhaltlich jedoch über eine Rahmenregelung hinaus, so daß es gemäß Art. 125 GG nach Inkrafttreten des Grundgesetzes nur als Landesrecht fortgelten konnte. Aus diesem Grund, als Folge des wachsenden Umweltbewußtseins und um eine Zersplitterung des Naturschutzes zu vermeiden, setzte sich 1970 die damalige Bundesregierung zum Ziel, im Wege der Verfassungsänderung dem Bund die konkurrierende Gesetzgebungsbefugnis auf dem Gebiet des Naturschutzes und der Landschaftspflege einzuräumen. Ihr 1972 eingebrachter Entwurf eines Bundesnaturschutzgesetzes stellte inhaltlich eine Vollregelung dar und setzte somit eine Verfassungsänderung voraus, für die sich aber das Fehlen der erforderlichen qualifizierten Mehrheit, insbesondere im Bundesrat, abzeichnete. Die CDU/CSU-Bundestagsfraktion stellte dem Regierungsentwurf einen eigenen Gesetzesentwurf auf der geltenden Verfassungsbasis (Rahmengesetz) gegenüber. Beide Entwürfe konnten in der 6. Legislaturperiode nicht mehr zu Ende behandelt werden und wurden gleichlautend in der 7. Legislaturperiode wieder eingebracht.

Drei Bundesländer – Bayern, Schleswig-Holstein und Rheinland-Pfalz – erließen 1973 jedoch neue Landesnaturschutzgesetze anstelle des Reichsnaturschutzgesetzes (1975 folgten Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg), so daß die Bestrebungen der Bundesregierung, eine Verfassungsänderung und damit eine Vollregelung des Bundes zu erreichen, naturgemäß noch aussichtsloser wurden. Damit verlagerte sich die Initiative auf den Bundesrat: auf Antrag von Schleswig-Holstein und Rheinland-Pfalz brachte der Bundesrat im Frühjahr 1975 einen eigenen Gesetzesentwurf auf der Grundlage der Rahmenkompetenz des Bundes ein. Dieser Entwurf wurde nach etlichen Änderungen vom Bundestag verabschiedet und dem Bundesrat zugeleitet, der den Vermittlungsausschuß anrief. Am 10.6.1976 verabschiedete der Bundestag und am 12.6.1976 der Bundesrat schließlich das Gesetz in seiner endgültigen Fassung. Es trat am 24.12.1976 in Kraft.“ (Seewald, 1999)

Im Umweltrecht finden zwei Arten von Rechtsnormen Anwendung:

1. schutzgutbezogene Normen (medialer Umweltschutz), z. B. BWaldG, PflSchG, BNatSchG
2. gefährdungsbezogene Normen (kausaler Umweltschutz), z. B. FluglärmG, BImSchG, AtG

Von 1970 - 1995 sind nicht weniger als 28 Einzelgesetze im Rahmen der Umweltlegislative erlassen worden.

„Im Gegensatz zu der vornehmlich auf einzelne Umweltmedien und Teilbereichen bezogenen Ersten legislativen Phase rücken seit den 80er Jahren der umweltmedienübergreifende, die jeweiligen Wechselwirkungen beachtende ökologische Gesamtzusammenhang der gesamten Rechtsordnung als externe Integration der Umweltbelange im Sinne einer ‚ökologischen Tönung des Umweltrechts‘ stärker in den Vordergrund. [...] Die Tendenz einer ökologischen Fortentwicklung des Umweltrechts findet sich [...] auch in der Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung von 1985, die dem Boden neben Wasser und Luft einen gleichwertigen Rechtsgüterschutz angedeihen lassen und die Altlastenproblematik lösen will. [...] Die Tendenz der ökologischen Fortentwicklung setzt insgesamt einen erhöhten Bedarf an Umweltinformationen, an ‚Daten zur Umwelt‘ voraus, was wiederum die Entwicklung von Umweltindikatoren erfordert. Dieser ‚Datenhunger‘ intensiviert Informationsbeschaffung wie Informationsbearbeitung und verstärkt vor allem die Dokumentation von umweltbedeutsamen technischen Verfahrensabläufen sowie kontinuierliche und automatische Messungen von Immissionen. Umweltrecht war und ist dynamisches Recht. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse, Erfahrungen aus dem Vollzug des geltenden Umweltrechts sowie europa- und völkerrechtliche Vorgaben führen ständig zu legislativen Nachbesserungen. Dabei lassen sich über die Tendenz der Verdichtung und Verfeinerung hinaus vier weitere Entwicklungslinien [...] erkennen: ökologische Fortentwicklung, Vereinheitlichung des Umweltrechts, Aktivierung ‚Indirekter Strategien‘ zur mittelbaren Lenkung und Übernahme supra- und internationaler Entwicklungen.“ (UmweltRecht, 10. Aufl. 1997, Beck-Texte)

EU-weit existiert seit 1972 eine gemeinsame, umweltgesetzgebende Grundlage. Dies unterstreicht einmal mehr die Bedeutung der Fernerkundung für die Forschung. Sie ist so gut wie kein anderes methodisches Instrument in der Lage, für lagegenaue Rauminformationen

den notwendigen Integrationsrahmen jenseits der fachlichen Belange aller möglichen denkbaren, beteiligten Fachdisziplinen in einem Verbundvorhaben aufzuspannen. Für GIS-basierte Umweltbeobachtung ist dies der entscheidende Aspekt.

Jedoch auch ohne Berücksichtigung der gesetzlichen Komponente ist die Sonderstellung von Fernerkundungsdaten historisch eng in den Kontext luftgestützter Verfahren eingebunden. Der berühmt gewordene Artikel des bekannten Geographen C. Troll „Luftbildplan und ökologische Bodenforschung“ ist nicht nur die Geburtsstunde der geographischen Landschaftsökologie, sondern zugleich auch offizieller Ausgangspunkt für die luftgestützte Fernerkundung als geographisch-wissenschaftliche Methode im deutschsprachigen Raum. Fernerkundung und Landschaftsökologie liegen somit in derselben Wiege und sind nicht nur analytisch, sondern auch historisch untrennbar miteinander verflochten. H. Leser schreibt hierüber in seiner „Landschaftsökologie“ (1997) unter anderem:

„Die geowissenschaftliche Raumerkundung hat mit den Fernerkundungsmethoden ein methodisch wichtiges Instrument erlangt. Es ermöglicht die Flächenaussage, die zunächst nur – man denke an die Luftbilder – im topographisch-kartographischen Sinne angestrebt wurde. Bereits 1939 wies C. Troll – im Zusammenhang mit der Begründung der Landschaftsökologie – auf die thematische Auswertung von Luftbildern hin. Nicht von ungefähr wollte er das Luftbild bei der landschaftsökologischen Arbeit eingesetzt wissen: Es bildet den Gesamtzusammenhang der Landschaft ab.“

An anderer Stelle heißt es:

„Da die Fernerkundung von einem raumwissenschaftlichen und letztlich landschaftsökologischen Ansatz ausgeht (Haefener 1987), ist sie als Methodik besonders geeignet, Umweltprobleme aufzuarbeiten. Wenn es aber nicht nur um allgemeine Feststellungen des visuell wahrnehmbaren Umweltzustandes geht, sondern auch prozessuale, ökofunktionale Phänomene der Umweltsysteme erfasst werden sollen, zeigen sich methodische Grenzen. Es wird nämlich zwischen Aussagen und Methodik der Fernerkundung für Umweltprobleme und der landschaftsökologischen Grundlagenforschung eine Übereinstimmung sichtbar. Die Fernerkundung bewegt sich, will sie „dynamische“ Aussagen machen, in Richtung der methodischen Möglichkeiten und Grenzen des [...] naturwissenschaftlichen Ansatzes des ‚landschaftsökologischen Umweltschutzes‘. Am Einzelbeispiel ‚Waldbelastungen und Waldschäden‘ zeigte H. Kenneweg (1980) Möglichkeiten und Grenzen von Fernerkundungsverfahren, wobei er auch die Vorteile gegenüber terrestrischen Verfahren hervorhob.“ (Leser, 1997)

Die Sensibilisierung auf globale und v. a. ökofunktionale Zusammenhänge, die mittels Modellierung erkenntlich gemacht werden sollten, wurde zu Zeiten der ersten Landsat-Satelliten weltweit gefeiert. Die „Münchener Schule“ um Bodechtel pries die Vorzüge der globalen Erdbeobachtung, als die ersten Sensorsysteme in Verbindung mit ersten leistungsfähigen EDV-Systemen historisch die Bildfläche betraten. Das Motto der „dritten Entdeckung der Erde“ kursierte landesweit und lockte viele Wissenschaftler an die aufkommenden Modellierungswerkzeuge in Gestalt von Hard- und Software. Vier untereinander unabhängige Indizien lassen heute – über 30 Jahre später – erahnen, dass einer

gewissen, überschwänglichen Übertreibungsphase eine entsprechende Ernüchterungswelle folgte:

- Die von der lokalen bis zur globalen geographischen Dimensionsebene reichenden Modellsimulationen erwiesen sich größtenteils als falsch (v. a. Abschätzungen zur absoluten logistischen Grenzwertigkeit globaler Rohstoffvorkommen sowie sämtliche Arten von Pufferkapazitäten in ökologischen Systemen) und gelten bis heute allgemein als nicht vollständig validierbar.
- Es reifte nur allmählich die Einsicht, dass eine Fernerkundung ohne Kenntnis der lokalen Zusammenhänge vor Ort von nur sehr beschränktem Anwendungswert ist (unverzichtbare Notwendigkeit des sog. „Ground-Truthing“) – dieser schmerzlichen Einsicht verdankt wahrscheinlich das „GTCO“ (Ground-Truth Center Oberbayern) seine Existenz.
- Die gesetzlichen Regelungen zum „Luftbildwesen“ (amtlich erforderliche Luftbildfreigabenummern) in den §§ 83 - 89 LuftVZO wurden angesichts der erwarteten Leistung von abbildenden Satellitensystemen aufgehoben (nicht davon betroffen ist der besondere Teil des StGB, fünfter Abschnitt. Straftaten gegen die Landesverteidigung § 109 g „... Gefährdung der Sicherheit oder der Schlagkraft der Truppe“) (Giemulla und Schmid, 1996). Das Luftfahrt-Bundesamt drückt diese Tatsache auf dem eigenen Server unter FAQs so aus: „Nach Artikel 37 des 3. Rechtsbereinigungsgesetzes ist bereits 1990 die Genehmigungspflicht für Luftbildaufnahmen entfallen. Allerdings dürfen nach § 109 g Abs. 2 des Strafgesetzbuches auch aus Luftfahrzeugen sicherheitsgefährdete Anlagen nicht fotografiert werden.“ Lediglich spezielle Lufträume (namentlich „kontrollierte“ Lufträume sowie Luftsperr- oder Beschränkungsgebiete bedürfen also Sonderregelungen, die man in den „Richtlinien für Fotoflüge“ bei der Deutschen Flugsicherung (DFS) erfragen kann.*
- Der prognostizierte kommerzielle Erfolg stellte sich allen Erwartungen zum Trotz seitens amerikanischer Satellitenbetreiber offenbar nicht im gewünschten Maß ein. „The impact of the end of the cold war in these developments cannot be overstated, particularly as the technologies that were the prime tools for military surveillance in that era are now being declassified including the high-resolution sensor systems which are becoming available for civilian application [...] The radar satellites of Europe (*ERS-1 & -2*), Japan (*JERS*) and Canada (*RADARSAT*), with their night and day monitoring and all weather capabilities, including the ability to penetrate rain and clouds, have contributed much knowledge to human understanding of our planet, and have highly complemented and enriched the information that is being acquired particularly in the visible and the infrared bands of the electromagnetic spectrum. However, the first decade and a half of civil remote sensing did not win many converts from the commercial sector. Many perceived the application opportunities as being very limiting particularly because of low spatial resolution of 80 m of early *Landsat* imagery and the long time needed for a site revisit by the satellite. In the public sector, particularly in the industrialised countries, the surveying and mapping agencies also did not see much opportunity for ground braking applications; [...] Many of the

* Des Weiteren soll noch ein BGH-Urteil zum Persönlichkeitsrecht im Konflikt mit hoch auflösenden Luftbildern existieren, das mir bislang jedoch aus dem Kontext einer Umwelteinrichtung heraus als zu unbedeutend für eine Recherche erschien.

anticipated opportunities were not fulfilled, and those who expected satellite data to show them *that gold deposit* were, indeed, very disappointed. These early data were also expected to be very helpful, particularly for the under-mapped developing countries. But limited access to data, unaffordable cost of data and of data-analysis equipment, and inadequate human and institutional capacity did not create a very user friendly environment in the developing countries for the first generation of remote sensing data. Use of satellite data in these countries were factored into mostly donor supported projects. Today, however, the story is very different. [...] Indeed, the belief now is that there is a large information market in the world for high resolution images from which information of all kinds can be extracted using the ever expanding information processing capabilities of the ubiquitous desktop computer. Accordingly, within the next decade, over 100 Earth observation satellites may be launched by both private and government entities. [...] The commercial sector has targeted the medium and high spatial resolution imaging systems as the ones to invest in.“ (Abiodun, 1998)

Wie sich im Verlauf der schweren Rezession seit der Jahrtausendwende zeigte, war auch diese eingeschränkte Prognose von Abiodun nicht in vollem Umfang zu verwirklichen. Um zu verstehen, wie die Gesamtentwicklung verläuft, muss man einen Blick in die gesamte Raumfahrt-Industrie und in all ihre Teilsegmente hineinwerfen. Gegenüber der vergleichsweise riesigen Auswahl verfügbaren Materials zu diesem Thema muss hier aus Platzgründen auf eine ausführliche Darlegung verzichtet werden. Stattdessen sollen hier nur einige Hinweise gegeben werden. Zunächst wird ein Zitat aus einem Konferenzartikel und eine dazugehörige Tabelle angeführt, und diese später nach ein paar thematischen Einschüben schrittweise ergänzt.

“Highresolution satellite images (HRSI) at 5 m and better geometrical resolution, their use and limitations have become a source of ongoing discussions since a number of years. Especially the commercial 1 - 4 m sensors have attracted much attention since 1995, in particular within the photogrammetric, mapping and GIS communities. Highflying expectations concerning the opening of new and hitherto untouched business markets were raised. As always in such situations of emergence of new technologies the problem of exaggeration, the danger of false predictions and unrealistic expectations are imminent. The first blow to these rosy dreams came with the failure of some of the launches. After the successful deployment of the first system (IKONOS-2) customers are still waiting for the promise of instant delivery of value-added products to be fulfilled.

There are serious and unsolved issues related to the business model of the HRSI providers, legal aspects concerning licenses and royalties, government restrictions (including shutter control), maintenance of standards and specifications from government to the geoinformation industry, unlawful use of images and derived products. On the technological side there are problems with undisclosed camera models, the accommodation of the vast amount and diversity of satellite images and products, and education and training of this business sector. Fraser, 1999 and Fritz, 1999 have addressed some of these issues in detail. [...]

At the time of the writing of this paper (November 2000) we receive the report that another commercial HR mission (launch of Quicbird-1 of EarthWatch Inc. on

21 November 2000) has failed. This puts the successrate of HR commercial launch missions to 1 out of 4, or in other words, considering [...] [Proposed Commercial Launches in Fritz, 1999; Anm. d. Verf.], out of 11 planned missions up to and including the year 2000 only a single one made it – a fairly depressing story. On the other hand, out of the 16 HR missions planned within the next 4 years we hopefully can expect many to succeed. Then the skies will be loaded with systems and sensors providing a stream of high quality data never experienced before in history. Are we ready to cope with this flood of information? Is the methodology and software for information extraction ready for use and efficient in order to be able to make good use of these treasures? What kind of information can we extract from these images and at what accuracy level? What is the role left for aerial photogrammetry to be played, especially considering the new highresolution digital cameras? What will the business models of the providers be and how will the prices develop, given the tough competitive situation.” (Grün, 2000)

Date	Spacecraft / Launcher	Country/Remarks	Best resolution	Validation Remarks 2004 (G.Winkler)	Mission-status
12 Mar 2000	MTI Taurus (T5)	USA, Multi-spectral Thermal Imager (MTI)	5 m VNIR, 20 m TIR	http://www.space.com	Success
28 June 2000	Tsinghua-1 Cosmos-3M	Tsinghua Univ., Beijing, microsat, Highres imaging,	?	Demonstrator: Tandem-Mission with SNAP-1, 6.5kg Nanosatellite (http://spaceflightnow.com)	Success
1 Sep 2000	Ziyuan-2 CZ-4B	China/Brasil	5 m	Ziyuan-2 was actually Chinas first military high-res Satellite (Codename „Jianbing-3“) (http://www.astronautix.com)	Success
29 Sep 2000	Kometa-20	Russia, KVR-1000 camera	2 m	(http://www.sovinformsputnik.com)	Success
21 Nov 2000	NMP / EO-1 Delta-7320	USA, NASA New Millenium Mapping Programme	10 m PAN, 30m MS, HS 220 bands (30m)	Designlife: 2yrs! (http://science.hq.nasa.gov)	Success
21 Nov 2000	QuickBird-1 Cosmos-3M	USA, EarthWatch Inc.	0.8 m	http://www.space.com	Failure
end Nov 2000	EROS-A1 Start1	Russia USA/Israel, based on Ofeq-3	1.5 m	Lift-off: 5.Dez.2000 http://www.astronautix.com	Success
early 2001	IRS-P5 PLSV	India India/defense	1 m	PLSV (Polar Space Launch Vehicle) is a Launch-Vehicle, not an EO-Programme. Maiden-Flight with IRS-I E Earth observation spacecraft: 20 Sept. 1993 (http://www.defenceindia.com)	n.a.
14 April 2001	Orbview-4 Taurus (T6)	USA, Orbital Sciences, HS 280 bands	1 m	Lift-off: 21.Sept. 2001 (http://www.spaceflightnow.com)	Failure
Q3	Orbview-3	USA commercial	1 m	Airborne Rocket Launch!	Success

2001	Pegasus-XL			(June 26, 2003)	
Q3 2001	EROS-A2	USA/Israel	1 m	Changed plans to directly proceed with EROS-B (http://www.gisdevelopment.net)	Cancelled (Feb. 2001)
Q3 2002	IRS-P5	India, Cartosat-1	2.5 m stereo	Scheduled 2005 (www.euromap.de)	Delayed
2001	IRS-P6	India, Resourcesat-1	5.8 m PAN, 23 m	Lift-off: 17.Oct. 2003 (www.euromap.de)	Success
Q1 2002	EagleEye	Germany, based on UoSat-12	5-7 m	Scheduled 2005 (http://www.itc.nl/~bakker/launuch-table.html)	Delayed
2002	Radarsat 2	Canada	3 m Radar	Scheduled late 2005 (www.radarsat2.info)	Delayed
2002	CBERS-3	China/Brasil	3 m	Scheduled 2008 (http://www.cbers.inpe.br)	Delayed
2002	CBERS-4	China/Brasil	3 m	Scheduled 2010 (http://www.cbers.inpe.br)	Delayed
2002	ALOS	Japan (Advanced Land Observation Satellite)	2.5 m	Designlife: 3-5 yrs; Delayed for several times (2003, 2004) New schedule: 2005 (http://www.jaxa.jp)	Delayed
2002	SPOT-5	France	5 m	Lift-off: 3. May 2002 (http://spot5.cnes.fr/gb/index3.htm)	Success
2002	ROCSAT-2	Taiwan, land & ocean	2 m B&W, 8m COL	With lightning detector. Lift-off: 20.May 2004 (http://www.skyrocket.de)	Success
2003	IRS-2A	India, Cartosat -2	1 m	Scheduled: June 2005 (http://www.isro.org)	Delayed
2004	Resource21	USA, commercial	10 m	Targeted at "Landsat Data Continuity Mission". Originally scheduled for 1999; NASA-Bid withdrawn in 2004 (http://www.eonline.com)	Cancelled
2004	TerraSAR	DLR, Radar	1 m	Scheduled Apr. 2006 (http://www.terrasar.de)	Delayed

Fig. 95 Highres earth observation satellite launches 2000 - 2004; Table from (Grün, 2000), adopted, checked and updated by G. Winkler, Verification Status: Feb. 2005)

Wir können an dieser Stelle abschließend zum Thema Satellitenfernerkundung noch eine zwar verbrieft, doch auf den ersten Blick etwas befremdlich wirkende Verbindung in das frühe 20. Jh. herstellen, die eine für uns heute hochaktuelle (weltwirtschaftliche und gleichermaßen weltpolitische) Bedeutung ausstrahlt.

Die britische geographische Schule wurde ab 1887 mit der Berufung von Halford J. Mackinder (1861 - 1947) zum ordentlichen Geographie-Professor in Oxford wissenschaftlich begründet und ausgebaut. 1904 entstand im Zuge der Entwicklung des Konzepts zur „Geopolitik“ eine weltweit vielbeachtete Kernland-Theorie („Heartland Theory of Mackinder“) als Resultat einiger Überlegungen zu einem geographischen Dreh- und Angelpunkt der Weltgeschichte („geographical pivot in history“). In seinem zweiten

Hauptwerk („Democratic Ideals and Reality“, erschienen 1919) diskutierte Mackinder eine globale Mächtepolitik. (Husain, 2001) Weil diese Ideen den Verlauf der Geschichte maßgeblich beeinflusst haben, ist es wert sie zu erwähnen:

„In this theory, Mackinder identified a ‚World Island‘ [...] consisting of the continents of Eurasia and Africa. The most inaccessible part of the world, he called heartland. This is the area of low population and difficult accessibility. He summarized his view of global strategy in the famous lines:

Who rules East Europe commands the Heartland;
Who rules Heartland commands the World Island;
Who rules the World Island commands the World.

Mackinder declared that throughout the history of mankind, the coastal lands had always proved vulnerable to attack from the heartland, and the heartland remained invulnerable because sea power could be denied access to it. Thus, Mackinder was mainly concerned with a global view. He repeated the same view in 1943 ... [...]. He warned of the danger of the heartland falling in its entirety under the control of the Soviet Union and of Russia’s ability then to strike out to peripheral lands to the east, south and west of the ‘World Island‘. His regional concept also pervaded his interpretation in countries. According to some scholars, Mackinder’s thinking was a generation ahead of his time.” (Husain, 2001)

Gepaart mit den Ängsten gegenüber einem weltweit um sich greifenden Kommunismus fanden Mackinders Ausführungen v. a. in Nordamerika regen Zuspruch, so dass Mackinder konsequenterweise heute in einer historischen Darlegung des US-amerikanischen Weges in den Weltraum und die militärische Satellitenaufklärung eine entsprechende Würdigung erfährt. (Taubman, 2003)

Dem Leser dürfte nun klar geworden sein, warum ein Gary Powers in seiner U2 bei Swerdlowsk und eine Menge anderer Aufklärungsflugzeuge um die Sowjetunion, China, Vietnam, Korea und den nahen und mittleren Osten herum abgeschossen wurden, nie aber ein russischer MiG-25-, „Foxbat“-Pilot, eine Tu-20-, „Bear“- oder Tu-22-, „Blinder“-Besatzung über Seattle, San Diego, Houston oder Boston. Über diese Ursprünge versteht man dann auch erst, wie sich ein Wettlauf ins All zwischen den Supermächten herauskristallisieren konnte: Die Amerikaner verspürten nach Kriegsende sehr großen Aufklärungsbedarf und schickten 2 - 3 Jahrzehnte lang Besatzungen in typischerweise 5 km Flughöhe mit teilweise dafür nicht geeigneten Flugzeugtypen zu strategischen Einsätzen über Tausende von Kilometern Reichweite und 10 Stunden und länger dauernden Aufklärungsflügen los, ehe die U2 und dann die SR71 zur Verfügung standen, die zu einer erheblichen (operationellen, nicht jedoch technischen^{*}) Aufwands- und Risikominimierung beitrugen, indem sie mit viel weniger riskierten Leben aus unerreichbar großer Höhe oder Geschwindigkeit operierten. Die Keyhole-Satellitenserie schließlich brachte den noch sichereren Schritt ins All, bei dem pro

^{*} Eine SR71 war am Boden ein völlig „undichtes“ Fluggerät: Es wurde daher mit wenig Treibstoff an Bord in die Luft gebracht, dort „warmgeflogen“ und erst anschließend in der Luft vollgetankt, damit die konstruktiv berücksichtigte Ausdehnung von Zelle und Tragwerk zur normalen Dichtigkeit führt – bei Endgeschwindigkeit von Ma 3,2 erhitzte sich die Außenhülle auf weit über 500 °C. Alleine für das Anziehen sowie das Ein- und Aussteigen des Piloten vergingen inkl. Briefing mehrere Stunden.

Mission Bilddaten über größeren Flächen anfielen, als in allen vorherigen U2-Missionen zusammengenommen.

Ganz ähnlich wie die schwierige Lage, in die die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie durch das Sänger-Nachkriegsprojekt hineingeraten war, erging es auch der britischen Luft- und Raumfahrtindustrie mit einem militärischen Projekt, das Anschluss an die strategischen Aufklärungsmöglichkeiten der USA durch die Entwicklung eines Überschall-Aufklärungsflugzeuges suchte: der TSR-2* von BAC (British Aircraft Corporation). Dieses zweisitzige Flugzeug war für Geschwindigkeiten bis Mach 2 ausgelegt und sollte entweder im Tiefflug oder als hochfliegender Aufklärer (Dienstgipfelhöhe 16 460 m; Reichweite 6857 km) mit Seitensicht radar (SLAR) und tag- und nachtauglichen optischen Sensoren eingesetzt werden. Darüber hinaus sollte das Flugzeug auch Nuklearwaffen tragen können. Eine interessante Interpretation zum Verlauf dieser Flugzeugentwicklung lautet:

„Die 40 Tonnen schwere TSR-2, von der die Royal Air Force 100 Stück bestellte, kostete mehr als ihr Gewicht in reinem Gold. Ihre Entwicklung wurde im April 1965 eingestellt, nachdem sie 200 Millionen Pfund (2,3 Milliarden Mark) verschlungen hatte; die englische Industrie entließ daraufhin mehrere tausend Arbeiter. [...] Der Zeitpunkt, an dem selbst Großmächte die Last einer hochmodernen Luftrüstung nicht mehr allein tragen konnten war da. Statt einen eigenen Überschallspäher zu bauen bestellte London [...] den F-111-A-Allzweckjagdbomber des USA-Konzerns General Dynamics.“ (Schreyer, 1967)

Bei einer Überprüfung dieser Angaben stellt sich heraus, dass die Gewichtsangaben zum Flugzeug zwischen 34,5 t und 43 545 kg (MTOW) differieren (bei mehr als 25 000 Litern Tankvolumen in einem extrem langen Rumpf von über 27 m!), und die Maschine darüber hinaus noch etwas mehr gekostet hat, nämlich 205 Mill. Pfund Gesamt-Entwicklungsaufwand.

(Quellen: <http://www.suchoj.com>,

http://www.csd.uwo.ca/~pettypi/elevon/baugher_other/tsr2.html u.a., mehrfach gegengeprüft, April 2005).

Das Wesentliche daran dürfte jedoch sein, dass die TSR-2 als ein markanter Wendepunkt der europäischen Wirtschaftsgeschichte betrachtet werden darf, der zu einer massiven Industriekonsolidierung – und damit untrennbar verbunden – zu einem grundlegenden Richtungswechsel in der staatlichen Verteidigungspolitik zwang.

“On 6 April 1965, the Prime Minister, Harold Wilson, announced the cancellation of the TSR.2 in the House of Commons. The Secretary of State for Defense, Denis Healey, explained that the government had been very reluctant to do so, but that the cost of the TSR.2 program was becoming an ‘intolerable burden’, because the total cost of 750 millions pounds amounted to 5 million per aircraft, assuming a production of 150 aircraft. Such an expenditure, he declared, could not be cost-effective. He

* TSR für Tactical Strike and Reconnaissance; „It is also possible that someone had remembered the *original* TSR.II --- the prototype of the Fairey Swordfish!“

(http://www.csd.uwo.ca/~pettypi/elevon/baugher_other/tsr2.html). Anm.: Die Fairey Swordfish war ein Torpedoflugzeug der Britischen Marine aus dem Jahr 1937, von dem insgesamt 2391 Stück gebaut wurden. (Angelucci, 1972) Man sieht also auch hier, wie weit die Bezüge oft zurückreichen können.

added that even the best efforts of BAC and the government could not provide any ‘assurance that the Government’s ultimate financial responsibility would be limited’. Healey continued to say that Britain could no longer afford to produce combat aircraft for its own armed forces only. [...] He mentioned that the government did indeed intend to buy a new strike aircraft, the General Dynamics F-111A*, and that this could be done for less than half the price of the TSR.2 program.“ (Quelle: http://www.csd.uwo.ca/~pettypi/elevon/baugher_other/tsr2.html, April 2005)

Der Weg ins All wurde infolgedessen weiter beschleunigt und die technische Überlegenheit der beiden Supermächte weiter vergrößert.† Dies hätte alles primär nichts mit dem Fokus einer naturwissenschaftlichen Arbeit zu tun, wenn nicht marktbestimmende Konsequenzen daraus erwachsen würden, mit denen wir noch jahrzehntelang zu tun haben werden: dem Preisgefüge für Satellitendaten und der allgemeinen Mechanik des globalen Markts.

„The powerful satellites [KH-11, Anm. d. Verf.] were so large and expensive – more than \$1 billion apiece – that the government never operated more than two or three at a time, limiting coverage of the globe. And if the replacement for a retiring KH-11 was lost on launch because of a rocket failure, months might pass before another satellite was built and ready to be placed in orbit, hindering Washington Intelligence gathering. [...] The Future Imagery Architecture program [FIA, Anm. d. Verf.], which at an estimated cost of more than \$4 billion is the most expensive spy project in the nation’s history, will give Washington a much larger fleet of reconnaissance satellites. Instead of four or five large imagery satellites in orbit at any time, there will be nearly a dozen smaller photo and radar-imaging satellites. [...] For now, the government’s answer to the shortage of panoramic images is to buy pictures taken by privately operated systems like Ikonos satellite put in orbit in 1999 by Space Imaging, Incorporated, a Colorado company. The company sells much of its imagery to the government, which

* Im Januar 1968 wurde der britische Auftrag über die F111-A zurückgezogen. Das Flugzeug war mittlerweile noch teurer als die TSR-2, fiel unter die Spezifikationen und litt unter Termenschwierigkeiten. (ebd.) Es erlebte als erstes US-Flugzeug mit variabler Flügelgeometrie während der Truppeneinführung im März 1968 im Vietnamkrieg einen desaströsen Auftakt mit 2 verlorenen Maschinen in nur 5 Tagen. (Angelucci, 1972) Später bewährte sich die F111 besonders in einer Electronic-Warfare-Variante (EF-111 „Raven“). In der Sowjetunion erreichte man mit den Flugzeugen Tu-128 (Serienproduktion ab 1962) und Su-24 (1974, erstaunliche Ähnlichkeit mit der F111; 1200 Stück gebaut, erstes sowjetisches, vollintegriertes Avionik-Flugzeug, das um die Waffenrechner-Anlage herum konzipiert wurde) vergleichbare Entwicklungsziele von hoch- und schnellfliegenden Maschinen.

† Dazu eine geopolitisch und fernerkundungstechnisch gleichermaßen relevante Anmerkung: am 24. März 1992 wurde während der 4. KSZE-Folgeverhandlung ein Programm namens „Open Skies“ beschlossen, um im Rahmen der Abrüstungskontrolle gegenseitige Inspektions- und Überwachungsflüge zwischen dem Osten und dem Westen zu legalisieren. Auf deutscher Seite entschied man sich dafür, ein VIP-Flugzeug der ehemaligen Honecker-Regierung, eine Tu-154M, für diese Aufgabe umzurüsten. Eingebaut wurden 1 x Zenit A-84 Panoramakamera, 3 x Carl Zeiss Jena LMK-2015, 3 x Zeiss Oberkochen VOS-60, 2 x IRLS (Infrared-Line-Scanner), 1 x ROSSAR (Russian Open Skies Synthetic Aperture Radar), 1 x MOLEM (Zeiss Laser Altimeter). Das einzige verfügbare Open-Skies-Flugzeug Deutschlands stieß am 13. September 1997 vor der Küste Namibias auf einem reinen Transportflug in einer Weltluftverkehrszone ohne nennenswerte Flugdichte mit einer amerikanischen Frachtmaschine zusammen. Niemand überlebte die beiden Abstürze. Die Flugzeuge hatten dieselben GPS-Waypoints benutzt und waren in derselben Höhe geflogen. Am 1. Januar 2002 ist der Vertrag in Kraft getreten und es haben inzwischen die ersten „scharfen“ Flüge stattgefunden. Derzeit laufen noch immer Verhandlungen zu einer gemeinsam genutzten Nachfolger-Plattform mit deutscher Beteiligung, die kurz vor Abschluss stehen soll. (Quellen: <http://www.auswaertiges-amt.de>, 2005 - Suchstichwort „Open Skies“; (Grimm, 2003))

retains the right to exercise ‘shutter control‘ over private American satellite operators during wartime by ordering them to give Washington sole access to pictures of potentially sensitive locations ...” (Taubman, 2003)

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass auch in den meisten übrigen Staaten der Erde eine zunehmende Verflechtung militärischer Programme mit zivil deklarierten Erdbeobachtungssatelliten zu beobachten sein wird. Dabei können Bilddatensätze ganzer Monate oder Jahre mühelos „verloren gehen“. Das Preisgefüge der Satellitendatenbetreiber wird vor diesem Hintergrund für wenigstens das nächste Vierteljahrhundert relativ stabil hochpreisig bleiben, nämlich so lange, bis die staatlichen, militärischen Fernerkundungsprogramme sicher auf eigenen Beinen und ohne temporäre Ausfälle stehen werden. Rechnen wir grob den Gegenwert eines Kleinwagens für eine oder ein paar wenige Szenen. Genauso, wie es sich also auf dem Weg in zwei Weltkriege im Luftbildfall abzeichnete, fahren daher die meisten Programme finanziell mit einer gewissen Lücke in ihrer Wirtschaftlichkeit, die nur über mehr oder minder verdeckte staatliche geopolitische Intervention erklärt werden kann.

Stellen wir hierzu eine kurze Überschlagsrechnung an. Der nachfolgenden Tabelle sind einige aktuelle Nutzlast-Preise für einen Start in einen Erdorbit tiefer Umlaufbahn (LEO: Low Earth Orbit) und geostationärer Bahn (GSO: Geostationary Earth Orbit) nach Marktzugehörigkeit zu entnehmen. Die Nutzlastpreise gestalten sich im Wesentlichen über das zu befördernde Gewicht und die Steighöhe des Trägersystems (Energieeinsatz). Für kommerzielle Erdbeobachtungssatelliten gelten widersinnig hohe Preise, obwohl die Nutzlastkapazität der Trägersysteme sowie deren Anzahl offenbar keinen Engpass darstellen – es ist wahrscheinlich, dass hier hohe prestigegebundene Zukunftserwartungen im Verbund mit einem erhöhten Risiko für die aufwendigen und teureren optronischen Systeme während der Startphase mitberücksichtigt sind.

Market	\$-Per-Pound to LEO	\$-Per-Pound to GSO	Notes
Telephony	\$8,816	\$13,830	Average effective price per pound (launch price divided by payload masses) from telecom launches 1996-2001. LEO based on Iridium and Globalstar.
Data	\$8,816	\$13,830	
TV/Radio	N/A	\$13,830	
Commercial Satellite Remote Sensing	\$17,198	\$28,758	Wide variety of payload sizes and vehicles - vehicle capacity often in excess of payload mass.
Public Space Travel	\$2,993	N/A	Based on Soyuz capsule.
Commercial ISS Module	\$10,000	N/A	Pressurized cargo.
Space Product Promotion	(\$29)	N/A	Revenue represents an offset of \$29/lb.
Space Hardware R&D	\$10,000	N/A	Based on Shuttle.
Space Burial	\$13,832	N/A	Based on Pegasus vehicle.
On-orbit Sparing	\$4,200	\$11,500	Based on commercial telecom markets: vehicle price divided by capacity.
Orbital Asset Servicing and Salvage	\$4,200	\$11,500	
Space Solar Power - On orbit Uses	\$4,000	N/A	Assumes heavy lift launch vehicle to LEO.
Propellant Depot	\$4,000	N/A	Assumes heavy lift launch vehicle to LEO.
Government	\$22,577	\$30,088	For U.S. and European government payloads on ELV's 1996-2001. Titan IV, with the largest effective \$/lb, is responsible for the high average.

Fig. 96 Current Launch Price per Pound* by Market Sector (in 2001 dollars); (Quelle: Philip McAlister (Director, Futron Corp.), Artikel: "The "Top Ten" Things We Learned During the ASCENT Study†", April 10, 2003; <http://www.futron.com/spaceandtelecom/src/srclist.htm>, 2005)

Konkretes Beispiel: Am 18. Oktober 2001 wurde ein weiterer Quickbird-Satellit von DigitalGlobe™ gestartet, diesmal erfolgreich. Seine 950 kg und die 450 km hohe Bahn mit einem 98°-sonnensynchronen Orbit (entspricht LEO) erlaubt eine Berechnung für die Startkosten. Sie betragen 2094 lb * 17.198 USD = 36.012.612 USD oder 36 Mill. USD – nur für den Start, wohlgermerkt.

Nehmen wir an, ein (fiktiver) kommerzieller Hi-Resolution-Satellit kostet insgesamt 500 Mio. USD (also die Hälfte eines militärischen Aufklärungssatelliten), wobei darin die Entwicklung, die Bodeninfrastruktur sowie die Kosten für den Flug in den Orbit berücksichtigt sind. Dann benötigte man – bei einem angenommenen Preis pro Szene von 5.000 USD nicht weniger als 100 000 verkaufte Bilder, um den Selbstkostenpreis als Satellitenbetreiber zu erreichen. Das entspräche bei 5 Jahren veranschlagter Lebensdauer (= 1825 Tage) etwa 54 Bilder pro Tag, die durchschnittlich veräußert werden müssten. Das mag zunächst überschaubar klingen, doch muss man sich vor Augen führen, dass nicht jeder Endnutzer dieselben qualitativen Ansprüche hat und daher seine Daten durch Auswahl hochspezifisch an seine Aufgaben anzupassen hat. Außerdem ist der Endnutzerkreis weltweit verteilt und jeder bräuchte Bilddaten geographisch unterschiedlicher Regionen. Mir ist aus der Erfahrung bekannt, dass es mitunter nur sehr wenige Tage im Jahr gibt, auf die über einem größeren zusammenhängenden Untersuchungsgebiet Wolkenfreiheit herrscht und ein Satellit auch zur Stelle ist – manchmal fallen nur 2 oder 3 solcher gewünschter Aufnahmen über ein ganzes

* 1 Pound = 1 lb = 453,5924 g

† Die ASCENT-Studie der NASA bezog sich auf die Langfristerwartungen und daraus zu prognostizierende Entwicklungen der kommerziellen Satellitenindustrie.

Jahr an. Das beschränkt die Möglichkeiten erheblich. Und nicht zuletzt ist es auch eine Frage, wie viele Endnutzer existieren, für die es Sinn macht, in solche Daten direkt zu investieren. Gehen wir einmal von 20 HR-Systemen aus, die über die nächsten 10 Jahre operationell verfügbar werden. Dann müssten – eine identische Kostenstruktur und Preispolitik vorausgesetzt – 2,0 Mill. Bilder für einen Marktwert von 10 Mrd. USD binnen 5 Jahren Design-Life umgesetzt werden. Und dies nur, um die Aufwendungen zu neutralisieren.

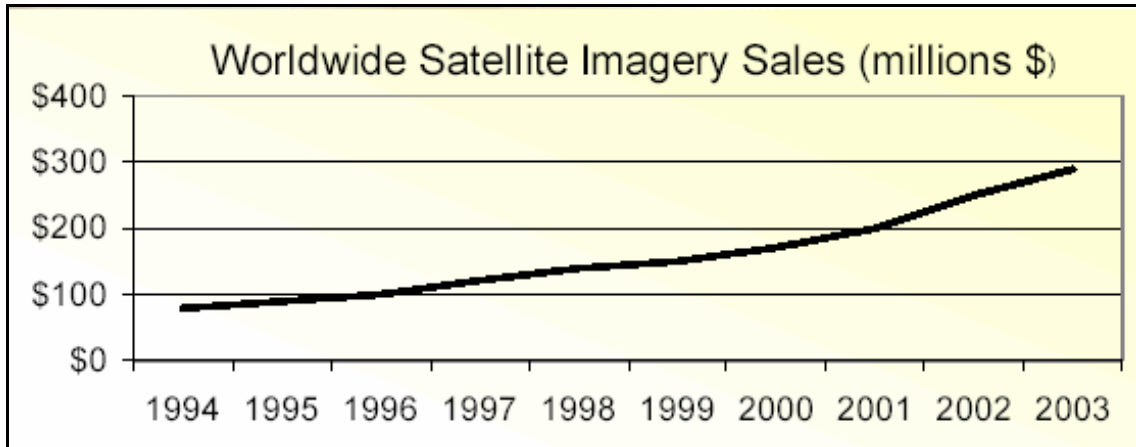


Fig. 97 Historische Marktentwicklung für Satellitenbilddaten (Quelle: „Understanding Remote Sensing Markets and Pathways for GrowthMarkets and Pathways for Growth“, Strategic Research Institute, US Commercial Remote Sensing Industry Conference, Dec. 1, 2003, Charles Murphy, Senior Analyst, Futron Corporation, www.futron.com, 2005)

Diese Überlegungen führen zur oben im Zitat bereits angerissenen Frage, ob diese Daten- und Kostenflut tatsächlich bewältigt werden kann, wobei sich der Weltmarkt ganz offensichtlich noch immer in einer Initialphase bzw. einem intermediären Stadium zu befinden scheint.

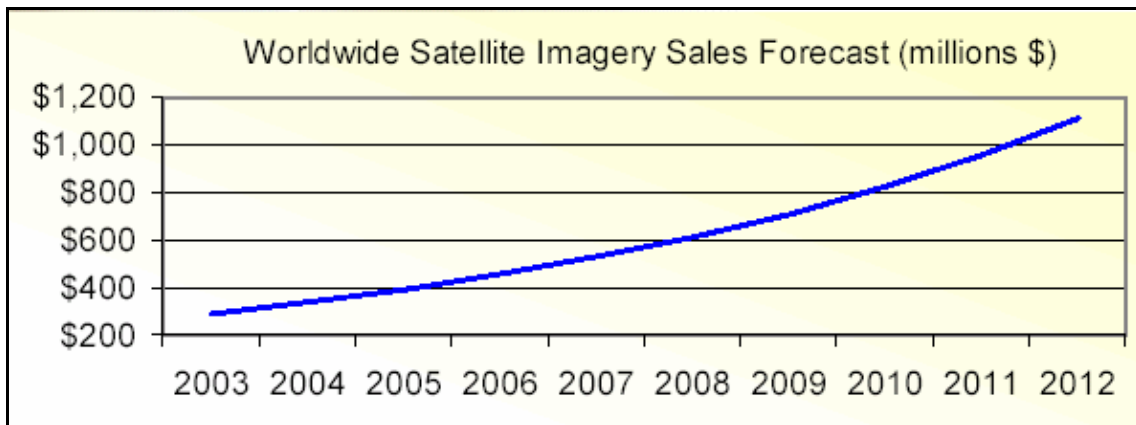


Fig. 98 Angestrebte Ausweitung der Märkte für die Weltraumindustrie (ebd.)

Dieses Thema verdiente eigene Publikationen, um darin die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Geschäftsmodelle unterschiedlicher Satellitenbetreiber näher zu bestimmen. Es wird hier vorerst mit einiger Sicherheit angenommen, dass einigen Geschäftsmodellen von Satellitensystemen des Gesamtmarkts zwangsläufig Finanzierungslücken immanent anhaften und diese sich aus dem oben umrissenen geopolitischen Kontext heraus erklären lassen. Die interessanteste Frage, die es in diesem Zusammenhang zu beantworten gäbe, wäre eine Abschätzung darüber, ob bzw. ab wann der Satellitenmarkt weltweit kommerziell

kostendeckend betrieben werden kann und sich aus eigener wirtschaftlicher Kraft fortzuentwickeln beginnt.

Die folgenden Abschnitte mit ihren Faktenreihungen mögen darüber eigene Anregungen liefern.

7 Anmerkungen zum Entwicklungsstand der Geoinformatikindustrie

In den nächsten Abschnitten werden einige Primärquellen zum Zustand der Weltraumindustrie ausgewertet, da diese die Herausbildung der Geoinformatik maßgeblich mitbeeinflusst. Des Weiteren werden Überblicke zur amerikanischen und europäischen Fernerkundungs- bzw. Geoinformatikindustrie gegeben. Für eine authentische Präsentation des Materials erschien es opportun, größere Exzerpte in ihrer Originalsprache zu belassen und nur partiell zu übersetzen oder überzuleiten.

7.1 Primär auslösender Faktor: die Erschließung kommerzieller Satellitenmärkte

Der Markt für Erdbeobachtungssatelliten ist eng gekoppelt an die Gesamtmarktentwicklung der Weltraumindustrie, die sich wie folgt gliedern lässt:

Satellite Manufacturing	Launch Industry
<ul style="list-style-type: none"> • Satellite Manufacturing • Component and Subsystem Manufacturing 	<ul style="list-style-type: none"> • Launch Services • Vehicle Manufacturing • Component and Subsystem Manufacturing
Ground Equipment	Satellite Services
<ul style="list-style-type: none"> • Mobile Terminals • Gateways • Control stations • VSATs & USATs* • DBS[†] dishes • Handheld phones 	<ul style="list-style-type: none"> • Transponder Leasing • Retail/Subscription Services • Direct-to-home • Wireless telephone • Data services • Direct radio • Remote sensing

Fig. 99 Marktsegmente der Weltraumindustrie; (Quelle: <http://www.futron.com>, 2005)

Daher muss man sich ein Bild darüber machen, wie dieser Markt beschaffen ist und welche Dynamik ihm innewohnt, um unterschiedliche Aussagen zu Trends sinnvoll zuordnen zu können.

Das Jahr 2003 markierte für viele Wirtschaftszweige einen relativen Tiefpunkt im Bereich mittelfristiger Entwicklungszeiträume (10 - 20 Jahre). Sehen wir uns einmal an, was innerhalb eines wirklich schlechten Jahres auf so einem Markt passieren kann.

Die nachfolgenden Aussagen entstammen einem Bericht mit dem Titel „*The State of the Space Industry*“, der vor der U. S. Chamber of Commerce und ihrem

* VSAT: Very Small Aperture Terminals, USAT: Ultra Small Aperture Terminals, TSAT: T1 Small Aperture Terminals: all dies sind Geräte für Datenempfang- und/oder übertragung via Satellit. Aufgabenbereiche: Sprach-, Daten- und FAX-Übertragung, Videokonferenzen, Verbindung zwischen mehreren LANs. Verwendeter Telekommunikationsstandard ist dabei DVB (Digital Video-Broadcast).

† DBS: Data Broadcast Services – Datenübertragung per Richtfunk

Space Enterprise Council während eines Policy Committee Meetings am 8. Januar 2004 von Philip McAlister, dem Direktor der Futron Corporation*, vorgetragen wurde:

“Commercial Space Industry Commercial Space Industry - 2003

- Boeing took a \$1.1 billion[†] pretax charge against earnings and is no longer marketing the Delta IV commercially.
- "The commercial space market has eroded to a point where it is no longer a driving factor in either our satellite or launch services business," – Jim Albaugh, president and CEO, Boeing Integrated Defense Systems.
- Loral filed for bankruptcy and sold six of its eleven satellites to Intelsat.
- EMS Technologies announced plans to sell its commercial space division – “Like all competitors in the space industry, the financial performance of our Montreal division has been volatile, and has been significantly affected by the current period of slow orders activity” –Alfred Hansen, president and CEO.
- Intelsat’s 1Q2003 revenue decreased 8% from last year, net income fell by 24%.
- DirecTV Latin America filed for bankruptcy, as did Kistler Aerospace.
- BAE Systems transferred its 25% stake in Astrium to EADS for free.
- Teledesic discontinued operations and relinquished all of its spectrum.
- Arianespace required a \$1 billion bailout from ESA.
- EADS took restructuring charges of \$315 million; sales declined by 19%; 3,000+ layoffs.
- Raytheon and Lockheed Martin wrote off their investments in Space Imaging. Raytheon took a \$175 million pretax charge, while Lockheed Martin took a \$106 million charge.
- NASA scrubbed the Landsat Data Continuity Mission.
- Lockheed Martin took a \$173M charge because of lower than expected Proton orders.

THE Commercial Space Industry Issue

The overarching, primary, preeminent, paramount commercial space industry issue is ... **OVERCAPACITY!**

Military Space Military Space

- The DOD[‡] is spending nearly \$18 billion annually to develop, acquire, and operate satellites and other space-related systems. This [sum, Anm.d.Verf.] includes research, development, and testing; and operations and maintenance accounts (GAO-04-253T).
- Space assets are ubiquitous and diversified in military operations.

* Futron Corporation Bethesda, Maryland; <http://www.futron.com>, gegr. 1986, 90 Mitarbeiter (2005), Schwerpunkt: Aerospace Technology Consulting

[†] Vorsicht: „false Friend“ 1 Billion (englisch) = 1 Milliarde (deutsch)!

[‡] DOD: Department of Defence – US Verteidigungsministerium

- With each major conflict over the last two decades, the visibility, criticality, and importance of the space sector has increased.
- DOD is looking to space to play an even more pivotal role in future military operations by developing new, expensive, and technically challenging satellites.
- However, almost every recent major DOD space system acquisition has experienced significant problems that increased costs, delayed schedules, and degraded performance.

Outlook for 2004

- Commercial space industry will continue to be weak, with continued financial pressure on most sectors. However, we have probably seen the worst. Direct-to-home and video distribution services will remain strong.
- Military space sector will be very active in 2004. Budgets for new satellite programs and launch services will grow by 115% over the next four years. Hard choices are ahead though.
- NASA will continue to be beleaguered by the lack of a White House policy and lack of consensus on OSP for most of the year. Also, the Shuttle's return to flight and ISS maintenance will be very real challenges. New initiatives show promise."

In einer weiteren Präsentation zwei Jahre später mit dem Titel "Space Business Overview for 2004 and Outlook for 2005" für ein AIA* Space Council Meeting präsentiert Phil McAlister (Director, Space and Telecommunications Division) am 2. Februar 2005 einige aufschlussreiche Zahlen zur Entwicklung der kommerziellen Satellitenmärkte. Es seien hier zum besseren Überblick nur zwei Betrachtungen herausgegriffen:

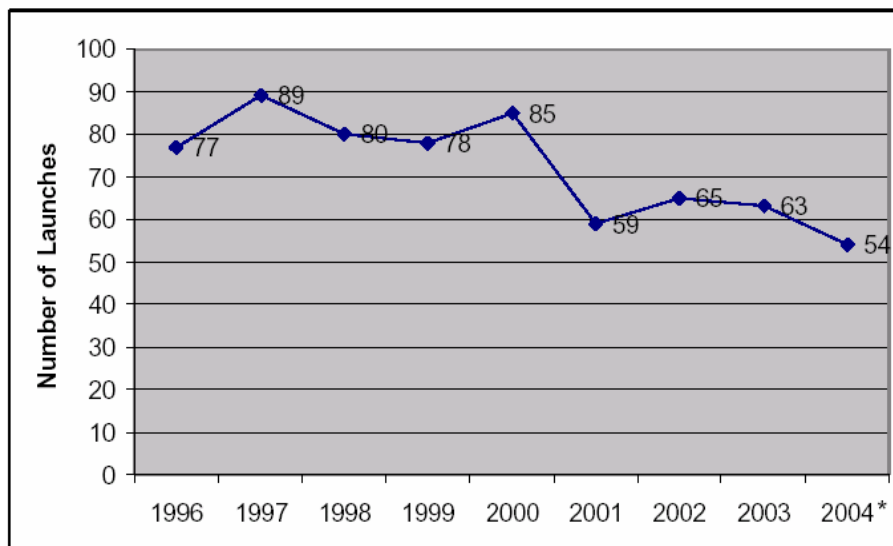


Fig. 100 Langjähriges Startaufkommen [Anzahl Starts pro Jahr] – Die Anmerkung für diese Graphik ist interessant: „* The 54 orbital launches recorded in 2004 was the lowest total since 1961 (47).“

* AIA: Aerospace Industries Association.

Leider fehlen der obigen Abbildung 25 Jahre bis zum Beginn des Raumfahrtzeitalters. Da jedoch die technische Revolution innerhalb der Telekommunikationsindustrie (Mobilfunk), Satellitenkommunikation (Breitband-Internet via Satellit, Satelliten-TV, Digitales Satellitenradio), die PC-Revolution (Verfügbarkeit von GIS- und leistungsfähiger FE-Auswerte-Software) und die ersten kommerziellen Geo-Satelliten gleichzeitig alle erst in der letzten Dekade des 20. Jh. verfügbar waren, darf man aus dieser abgebildeten Kurve die schon angesprochene „Satelliteneuphorie“ herausinterpretieren. Weiterhin erkennt man die simultan seit der Jahrtausendwende einsetzende Bremswirkung, die deshalb einsetzen muss, weil die Verwertbarkeit von Daten noch nicht in dem Maße möglich ist, wie dies wünschenswert wäre. Diese zunächst freizügig erscheinende Interpretation wird gestützt durch die Aussagen der nächsten Tabelle.

The Pros	The Cons
<ul style="list-style-type: none"> • It was a great year for NASA <ul style="list-style-type: none"> » Vision for Space Exploration » Budget was fully funded along with budget flexibility » Increased credibility on the Hill » The Rovers • Satellites became “entrenched” within the U.S. DoD. • NGA* stepped up to support the remote sensing industry. • The commercial space industry stabilized. <ul style="list-style-type: none"> » Strong Direct-To-Home sector » The X Prize† was captured 	<ul style="list-style-type: none"> • It was not all good news at NASA <ul style="list-style-type: none"> » Sean O’Keefe resigned » Cultural transformation has been slow » Shuttle RTF delayed • SBR and TSAT got cut badly. • <u>Remote sensing industry hampered by lower than anticipated demand and competition by aerial imaging.</u> • Private equity ownership of the global satellite operators is bad, bad, bad.

Fig. 101 Strategischer Jahresrückblick zur Lage der kommerziellen Weltraumindustrie 2004 aus der marktanalytischen Sicht von Futron Corp. („2004 Pros and Cons“)

V. a. die angesprochene Konkurrenz des Bildflugzeugs wird den Satellitenbetreibern noch einige Zeit Kopfzerbrechen bereiten. Einem Insider brauchen Sie nicht zu erklären, warum dem einfachen Bildflugzeug aufgrund seiner Flexibilität eine unanfechtbare Aufgabenstellung innerhalb der Geoinformatik-Industrie zukommt, aber für den zurückhaltenden potentiellen Nutzer ohne eigene Erfahrung im Umgang mit hochaggregierten digitalen Syntheseprodukten benötigt man einen nicht zu unterschätzenden Aufwand, um die Leistungs- und Anwendungsvorteile der Flugzeuge in dem insgesamt widrigen Marktumfeld über die letzten 3 Jahrzehnte darzulegen.

Alleine der Investitionsvorteil ist mit den bisher genannten Zahlen beeindruckend: Für den Gegenwert eines einzigen 32 Mill. USD teuren Satellitenstarts erhalten Sie ohne große Mühe 8 moderne Bildflugzeuge konventioneller Ausführung, wenn man 2 Mill. für das Flugzeug, 1 Mill. für die Kamera und 1 Mill. für Personal, Zusatzausrüstung und Bodeninfrastruktur rechnet. Flugzeuge halten 40 Jahre, Satelliten sind für 3 - 5 Jahre ausgelegt. Am Boden erhalten die Flugzeuge einen laufenden technischen Update, während ein gestarteter Satellit

* NGA: National Geospatial-Intelligence Agency (NGA, www.nga.mil).

† Burt Rutans Entwicklungstriumph mit seinem Spaceship One auf dem an anderer Stelle erwähnten Trägerflugzeug White Knight um das erste privat finanzierte Weltraumunternehmen der Geschichte.

auf Gedeih und Verderb seiner Teilsystem-Zuverlässigkeit ausgeliefert ist (eine Shuttle-Repair-Mission wird man für einen zivilen Erdbeobachtungssatelliten angesichts des allgemeinen Trends hoher Innovationsraten nicht finanzieren können oder wollen).

Eine grundlegende Philosophie bei dieser Argumentation besteht also darin, die oben zitierte allgemeine Überkapazität eines global verfügbaren Leistungspotentials gegen zielführende und vor Ort kontrollierbare Anwenderkapazität einzutauschen – zumindest bis zu einem gewissen Grad.

Man kann es auch so betrachten: Die Transformation von einem rein staatlichen Unternehmen hin zur Kommerzialisierung verläuft nicht ohne Reibungsverluste und Widerstände, und zwar sowohl von außerhalb als auch innerhalb. Dies gilt für beide Marktsphären (Satelliten- und flugzeuggestützter Markt). Eine immer stärker werdende Fraktion vorausschauender Planer hat inzwischen erkannt, dass eine optimale Leistungsfähigkeit von Geodatenprodukten nicht ausschließlich über Satellit oder Flugzeug erreichbar sein wird. Sie sprechen daher lieber von einer Earth-Observation-Industrie (EO-Industrie), als die spezifischen Vor- oder Nachteile zu (über)betonen.

7.2 Vorbild US-Markt

Im August 1999 begannen ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) und NASAs ESAD (Earth Science Application Division) damit im Rahmen eines Commercial Remote Sensing Programm (CRSP) eine 5-Jahreskooperation namens Space Act Agreement (SAA). Das angestrebte Hauptziel dieser vereinten Bemühungen bestand darin, eine 10-Jahresprognose über die Entwicklung der kommerziellen Geofernerkundung abzuleiten. Des Weiteren sollten detaillierte Entscheidungsgrundlagen für das Management von Fernerkundungsfirmen und deren Geschäftsfeldentwicklungsstrategien entstehen. Damit verknüpft war das Ziel die Markteinfluss-Sphären zwischen Kapitalgebern und politischen Entscheidungsträgern zu durchleuchten.

Im Folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse dieser US-weiten Studie dargelegt (Quellen: ASPRS-Webseite, mehrere EDV-Präsentationen: R. Rabin (Firma Lockheed Martin) Okt., 2001 und J. Plasker (ASPRS-Direktor) Nov., 2002)

Der Zeitplan sah vor, die Situation über Firmen- und Marktteilnehmerbefragungen in vier Schritten zu ermitteln.

Phase I	Characterization and Baseline Forecast of the Industry (Dec 2000)
Phase II	Characterization of Customers/Users and Determination of Their Needs/Requirements (Jan 2002)
Phase III	Validate I and II (Dec 2003) Technology Assessment
Phase IV	Market Forecast (Dec 2004)

Bis zum April 2002 war die Meinung von insgesamt etwa 1450 Industrie-Spezialisten mittels Interviews, offener und anonymer Fragebögen erhoben worden. Die Projektverantwortlichen gingen zu diesem Zeitpunkt davon aus, einen repräsentativen Querschnitt bezüglich der herrschenden Meinung in der Gesamtindustrie erreicht zu haben. Die vorläufigen Gesamtergebnisse (vorgestellt als „Highlights“ der Studie im November 2002) lauteten:

Used Types of Imagery and Formats:

- Imagery collected from Aerial Platforms is used 65% of the time.
- Multispectral imagery collected from space is the most used type of imagery collected by space platforms and second only to panchromatic imagery collected by aerial platforms.
- Digital Format is used 70% of the time; film is used 30%. (Preference? Trend? Cost? Ease of Use?)

Spatial Resolution Use

Spatial Resolution	Responses
6 inches or less	29
1 - 3 feet	24
1 - 2 meters	25
3 - 5 meters	17
6 - 10 meters	10
11 - 15 meters	8
16 - 30 meters	18
More than 30 meters	4

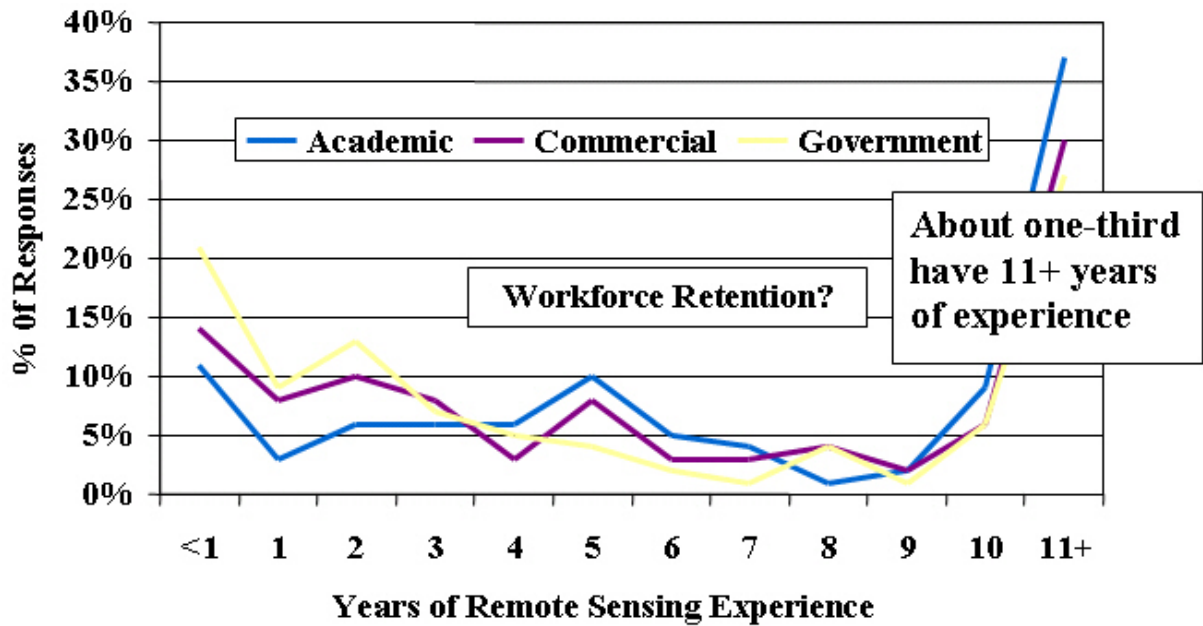
- About 40% use > 1 meter resolution
- Nearly 60% use 2 meters or less

Importance of RS Data/Information Characteristics

- Users of data/information collected from both Aerial and Space Platforms agree that Spatial Resolution and Geolocation Accuracy are the most important characteristics.
- Cost is an important characteristic but not most important to this *interview sample*. ... **HOWEVER, survey sample** indicates that cost is a major driver for Manager-Users who purchase the data / information.

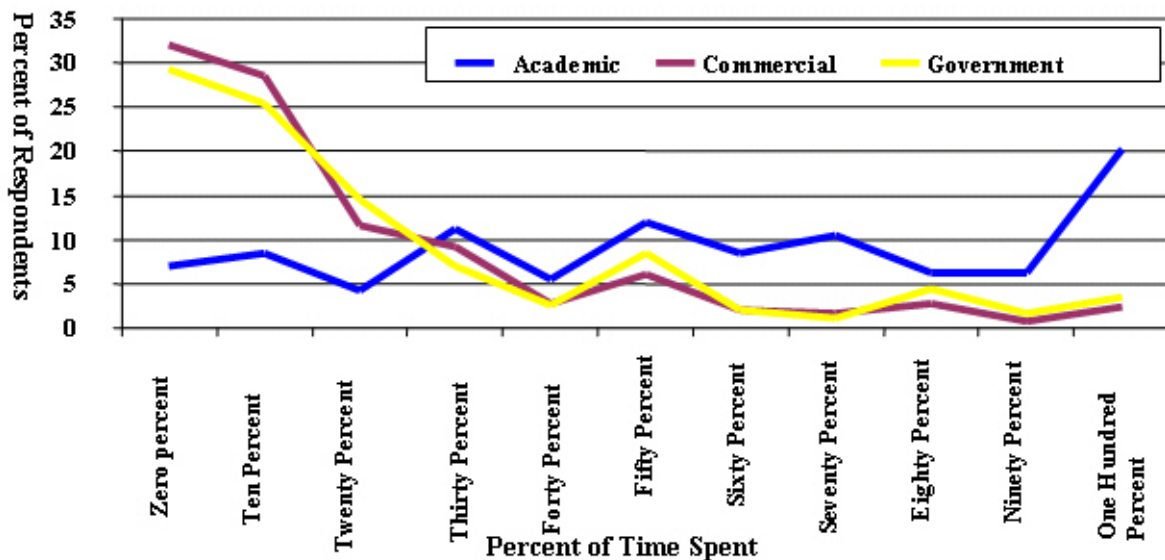
Characteristics	Important	Most Important
Geo-Location Accuracy	76	41
Spatial Resolution	76	40
Cost	34	4
Currentness/Timeliness of Data Delivery	27	7
Color/Spectral/Radiometric Quality	23	9
Ease of Use	23	
Software Utility Compatibility	18	1
Data Format	16	
Area Coverage/Theme Size	15	1

Imagery Types	Responses
<u>Airborne:</u>	
Aerial photography:	
• Color Infrared	40
• Pan	40
• Truecolor	45
• Unspecified	10
• DOQQ	6
• Hyperspectral	13
• Lidar	21
• Multispectral	33
• Multispectral - CASI	1
• SAR	7
• IFSAR	7
• Thermal	11
<u>Spaceborne:</u>	
• Color Infrared	4
• Pan	3
• Truecolor	8
• Hyperspectral	4
• Multispectral	
• GOES	2
• IKONOS	16
• Indian	1
• Landsat	19
• Landsat Pan	1
• SPOT	12
• Russian	1
• Unspecified	11
• SAR	1
• IFSAR	1
• Thermal	3
DEMs	7

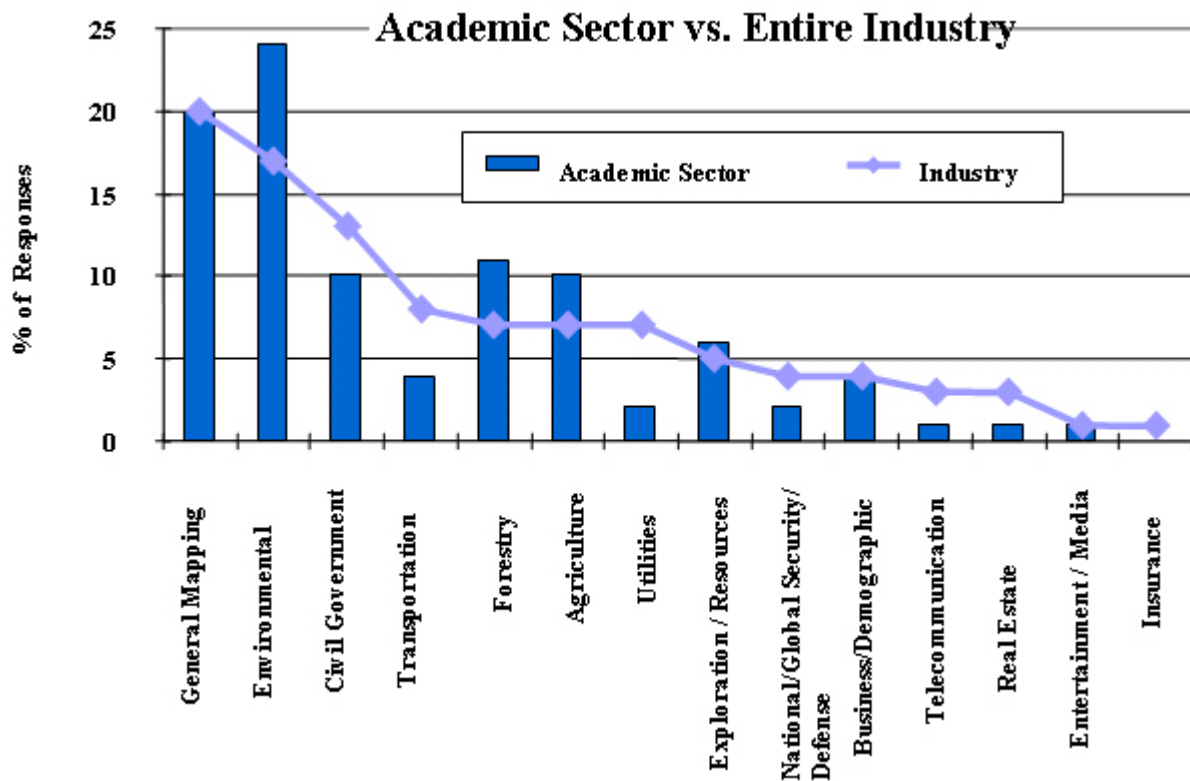


- A bi-modally distributed workforce
- Government has most “entry levels”(>20%) , but least with 10/11+ years of experience (<30%)
- Academia has nearly 40% with 11+ years experience
- Apparently, workforce retention is a key issue

Percent of Time Spent Performing Research and/or Research and Development by Sector



Application Areas in which Respondents Work



Students in RS/GIS Related Programs

- Based on survey results, the average number of students involved in RS/GIS related programs at Respondents' universities/colleges is about 140
- Therefore, students involved in RS/GIS related programs at these universities are slightly less than 1% of the student body population (Avg. 17,000)
- This small % of Student Population probably has a negative effect on funding/resource availability
 - A role for local industry? government?

7.3 Europäischer Status quo

Im Gegensatz zum luftgestützten Fall ist es im Bereich Satellitenfernerkundung relativ einfach, marktumfassende Zustandserhebungen zu finden und miteinander zu vergleichen. In diesem Kapitel sollen einige wesentliche Anmerkungen zum Stand der europäischen Fernerkundungsindustrie gegeben werden. Dabei ist es zweckdienlich, hier etwas detaillierter zu Werke zu gehen als im vorhergehenden Teilkapitel. Beginnen wir.

Analyse der Europäischen Fernerkundungs-Industrie vor der Jahrtausendwende (Die JRC/ESYS-Studie)

Nachfolgend wird ein Exzerpt zu einer bedeutsamen Studie vorgestellt, welche das Centre for Earth Observation (CEO) – oder genauer, das Space Applications Institute (SAI) am Joint Research Centre (JRC), welche beide in das Europäische Erdbeobachtungs-Programm involviert sind – 1998 in Auftrag gegeben hat. Die Studie gibt detaillierte Auskunft über die Beschaffenheit der Europäischen FE-Industrie, sowie ihres Marktes und der prognostizierten zukünftigen Entwicklung von beidem. Außerdem liefert sie einen Rückblick nach 1995. Alle folgenden, sowohl in der Originalsprache belassenen Textpassagen als auch Übersetzungen beziehen sich also auf diese JRC- bzw. ESYS-Studie; (Jenkins und Shaw, 1998)), sofern nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet.

1995 führten die Unternehmen ESYS Limited, Spot Image und Scot Conseil eine Analyse über die im FE-Markt involvierten Firmen und Institutionen durch und ermittelten die Marktgröße für deren Produkte und Dienstleistungen. Einhergehend mit dieser Marktstudie von 1995, untersuchte CEO [EU-finanziertes, europäisches Erdbeobachtungs-Programm, Anm. d. Verf.] die Struktur der europäischen FE-Industrie und bezog die erhaltenen Untersuchungsergebnisse auf Theorien über industrielles Wachstum. Man wollte wissen, wie sich die FE-Industrie bis zum Jahr 2000 entwickeln würde. Das Gesamtergebnis wurde als Szenario dargestellt: man leitete aus einem Gesamtumsatzvolumen der Industrie im Jahre 1995 von ca. 170 Millionen ECU* (MECU) eine optimistische Marktentwicklungsvariante von bis etwa 270 MECU, und eine pessimistische Variante von nur wenig über 180 MECU ab.

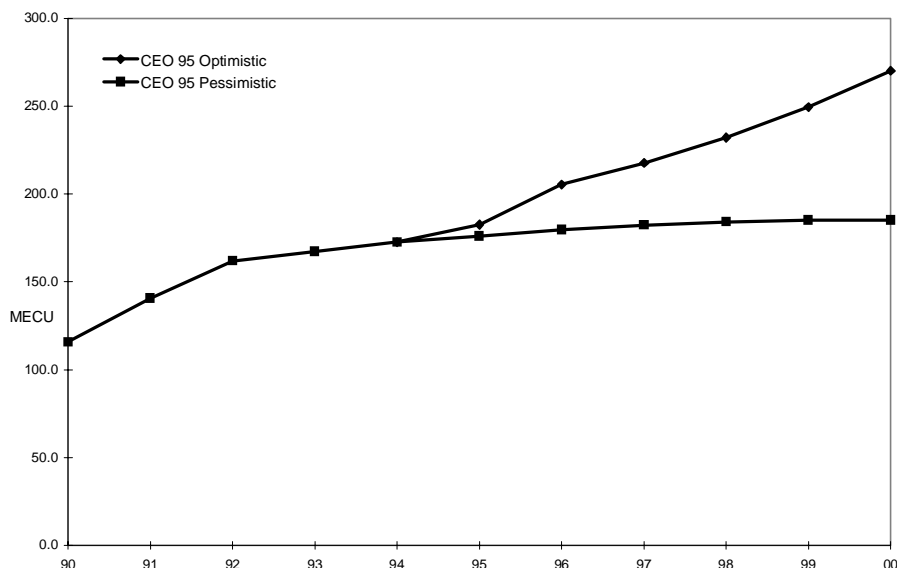


Fig. 102 Szenariobetrachtung zur Entwicklung der FE-Industrie (1995)

* Es gilt: 1 ECU = 1 Euro = 1,95583 DM (ECU: European Currency Unit, 1975 bis 1998 Währungseinheit der Europäischen Union).

Die Studie erbrachte die Erkenntnis, dass die Hauptumsätze in der Gesamtindustrie durch staatliche Einrichtung erzeugt, und sich die mehrwertschöpfenden Stufen bei der Datenprozessierung (value adding chain, oft kurz: „VA“) näher in Richtung Markt hin entwickeln würden. Darüber hinaus entdeckte man Neuzugänge aus anderen Märkten und Industrien. Die bedeutendste Entdeckung der gesamten Unternehmung beruhte auf folgender abgeleiteter Prognose: die Mehrwertschöpfungskette würde noch enger zum Markt hinrücken müssen und Spezialisierung dürfte wahrscheinlich als Überlebensmechanismus angesichts des zunehmenden Wettbewerbs einsetzen.

Die JRC/ESYS - Untersuchungen waren und sind immer noch einzigartige Erhebungen über Größe und Struktur des Europäischen FE-Markts in der Periode zwischen 1990 und 1994. Die Stärke der Arbeiten beruhte jeweils auf der Art des Vorgehens bei der Sammlung der zugrundeliegenden Daten; sie wurden in umfangreichen Befragungen in einem „Bottom-up“-Prozeß, gleichsam von der breiten Basis von unten nach oben gefiltert und verdichtet. Im Vergleich zu manch anderem makro-ökonomischen Ansatz erbrachte dies genauere Zahlen.

1998 beauftragte CEO die Unternehmen ESYS mit Partnern, Spot Image und Dornier Satellitensysteme DSS damit eine derartige Studie erneut durchzuführen und dies mit einer zweiten Befragung zur Struktur des Europäischen FE-Marktes zu unterlegen. Die Ziele dieser Studie galten vornehmlich vier Bereichen:

- Industrie- und Marktanalyse für die Jahre 1990 bis 1997;
- Bestätigung des Informationsgehalts aus den vorangegangenen Studien;
- Angabe einer Marktprognose für die kommenden 5 Jahre (1998-2002);
- Anwendung aller gewonnenen Daten und deren umfassende Diskussion.

Obwohl es innerhalb der Untersuchung erwünscht war die zu verwendende Methodik weitestgehend an derjenigen der vorangegangenen Studie auszurichten zwang eine gewisse Umstrukturierung des Marktes zu bestimmten Änderungen im methodischen Ansatz. Zum Beispiel erschien die simple Kategorisierung von FE-Unternehmen in „Datenlieferanten“ und „Mehrwert-Schöpfern“ nicht mehr angebracht. Mehrwert-Erzeuger boten damals bereits auch komplementäre Dienste an und einige darunter waren auch (Roh-)Datenlieferanten. Für die beauftragten Unternehmen wurden unterschiedliche Arbeitsbereiche festgelegt.

<p>ESYS Limited</p> <p>ESYS are a leading technical consultancy that have built a strong reputation for detailed and accurate market assessments across the range of space technologies. ESYS was the prime contractor for the 1995 market survey.</p>	<p>Prime contractor Definitions and methodology Data collection from companies in Denmark, Greece, The Netherlands, Norway, Sweden, UK and Ireland Database design, administration and application Analysis of data Compilation of current market, validation of previous studies, market projections and CEO impacts analysis Production of reports</p>
<p>Spot Image</p> <p>Spot Image are the world's leading supplier of EO imagery,</p>	<p>Data collection from companies in France, Belgium, Italy and Luxembourg Verification of data from other regions Internal review of study findings</p>

products and commercial services.	
DSS DSS have been leading developments in EO technology, satellite construction and applications in Europe since 1995.	Data collection from companies in Germany, Austria, Switzerland and Spain Verification of data from other regions Internal review of study findings

Fig. 103 Schwerpunktuntersuchungsbereiche der beauftragten Unternehmen

Untersuchungsrahmen und -perspektive

Es ist für das Verständnis wichtig darauf hinzuweisen, dass der Betrachtungsschwerpunkt der ESYS-Studie von 1998 nicht explizit auf flugzeuggestützter FE und deren Entwicklung lag, sondern vielmehr auf einer Gesamtbetrachtung innerhalb der satellitengestützten FE. Jedoch ist aus der folgenden Abbildung zu entnehmen, wie aus CEO-Sicht im weiteren Sinne des Begriffs „Informationen mit Raumbezug“ die Luftbildindustrie, Digitale Informationsdienste, Organisationen aus dem öffentlichen Sektor und Forschungseinrichtungen in dem Gesamtverbund FE-Industrie erscheinen.

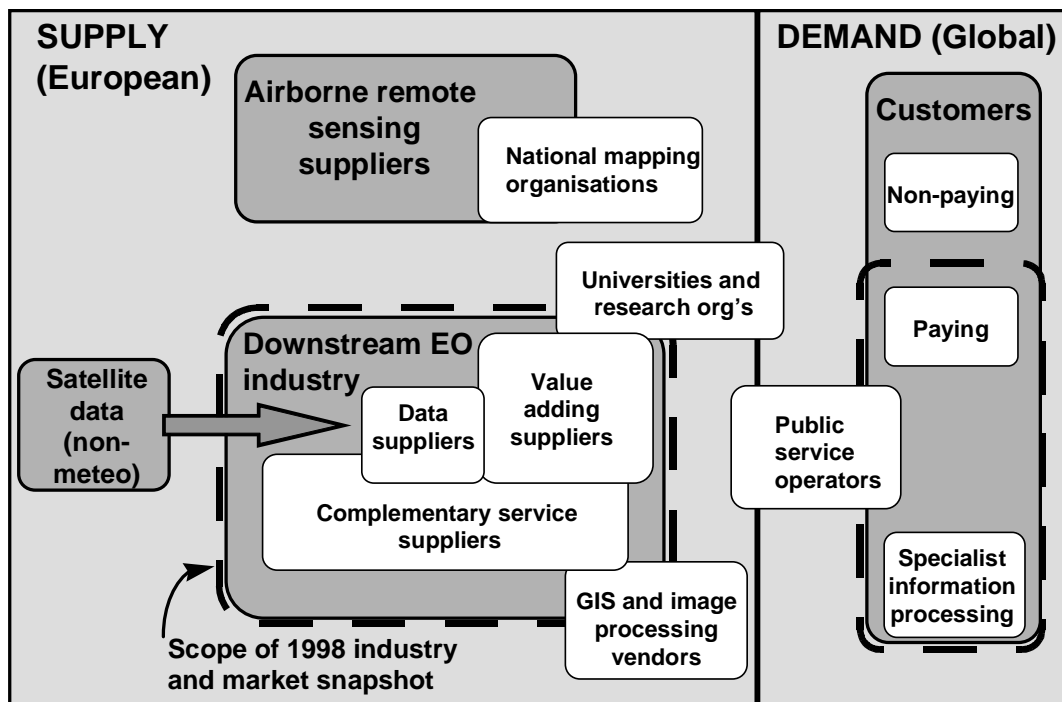


Fig. 104 Gesamtrahmen FE-Industrie in Europa unter dem Blickwinkel der ESYS-Studie von 1998

Nach vier Hauptgesichtspunkten wurde definiert, wonach genau die Studie geforscht hat, d. h. in welchem Kontext man die erhaltenen quantitativen Ergebnisse sehen muss. Diese lauteten:

- **Geographical location.** The study is measuring the size and structure of **European** companies which are selling satellite EO data and services to customers located anywhere in the world;

- **Type of business activity.** The study only addresses the ‘downstream commercial EO business’, distinguishing three main categories of EO supplier: data, value adding or complementary service suppliers (defined below). It does not include business activities associated with satellite manufacturing, launch, insurance, ground segment development or operations, which in Europe are largely funded by Government research and development budgets. It also does not include Government funded science and research that is underpinning algorithm development unless this is contracted out commercially. The main categories of business activity are:
 - ⇒ *Data suppliers* – selling satellite EO data and increasingly, a series of standard products (this is a slightly broader definition than that used in the 1995 study reflecting additional higher level products now being offered from a standard catalogue by major data suppliers);
 - ⇒ *Value adding suppliers* – offer higher value, customised products and services to the market, based often on a range of satellite data and other sources. A distinction between ‘major’ and ‘minor’ value adding organisations is made, based on whether their value adding turnover is greater than or less than 1 MECU;
 - ⇒ *Complementary service suppliers* – receive revenue from selling software, hardware, consultancy, training, ancillary products and through advertising to customers *buying* EO data, products and services. The study does not include revenues from selling any of these services to European EO suppliers. The following types of organisations have been included:
 - **Software suppliers** – selling off-the-shelf software packages or custom designed software for image processing, data handling and Geographic Information Systems;
 - **Hardware suppliers** – selling computers, printers and other related hardware;
 - **Consultancy organisations** – providing technical, commercial and strategic support to decision making in the customer domain;
 - **Training and education organisations** – providing customers with the technical and management capability to apply satellite EO;
 - **Complementary data suppliers** – providing ancillary products and services in support of satellite EO applications, for example calibration and validation, airborne data, GPS systems and data.
- **Source of EO data.** In line with the previous study, supply of airborne data and related services as well as meteorological data have both been excluded and the focus is on satellite EO data. However, no limits have been applied in terms of source of satellite data where these are sold through European organisations;
- **Role in the value adding chain.** As the market for satellite EO data has developed during the 1990’s, the role of the various research organisations, private companies, national mapping agencies and end customers is changing. Roles vary significantly between countries and also between market segments. For example, the UK situation, where an emphasis on private investment and progressive commercialisation of key Government agencies like the Ordnance Survey and DERA contrasts sharply with many continental

countries. It has therefore been important to find a common 'cut-off' point along this value adding chain to ensure consistency with the previous study. Fig. 104 summarises the scope of the market analysis and as has been stressed, the focus is on industry and commercial business. The study therefore does not address the revenues associated with the following players in the market:

- ⇒ **national mapping agencies;**
- ⇒ **public sector organisations offering public services;**
- ⇒ **Geographic Information Systems or image processing vendors** – except where they can identify sales directly related to satellite EO data. Certain resellers of GIS software packages also generate revenue from EO related consultancy work;
- ⇒ **any specialist information processing centres** associated with customer organisations that may be incorporating some satellite data with other information products and selling these on, within or beyond their own organisation. For example some civil engineering consultancies;
- ⇒ **research organisations** - unless they are acting as a commercial organisation in the market.

[...]

Das Gesamtergebnis der Studie präsentiert sich wie folgt (alle Angaben beziehen sich auf den Zeitraum von 1990 bis 1997 und den gesamten oben definierten Markt):

	Organisations surveyed	Under-sampling factors applied	Total annual revenue in 1997 (MECU)	Error estimate
Data supply	8	0.95	30	5%
Major VA	22	0.8	81	5%
Minor VA	48	0.55	41	10%
Complementary services	37	0.6	55	10%
Totals:			207	7.5%

Fig. 105 Summary Statistics

Umsätze

„The total annual revenue for EO suppliers in 1997 was 207 MECU compared with 173 MECU in 1994. This is an average annual growth of 6% in this 3 year period.“

Die nachfolgende Darstellung zeigt das stetige Wachstum von 1990 bis 1997.

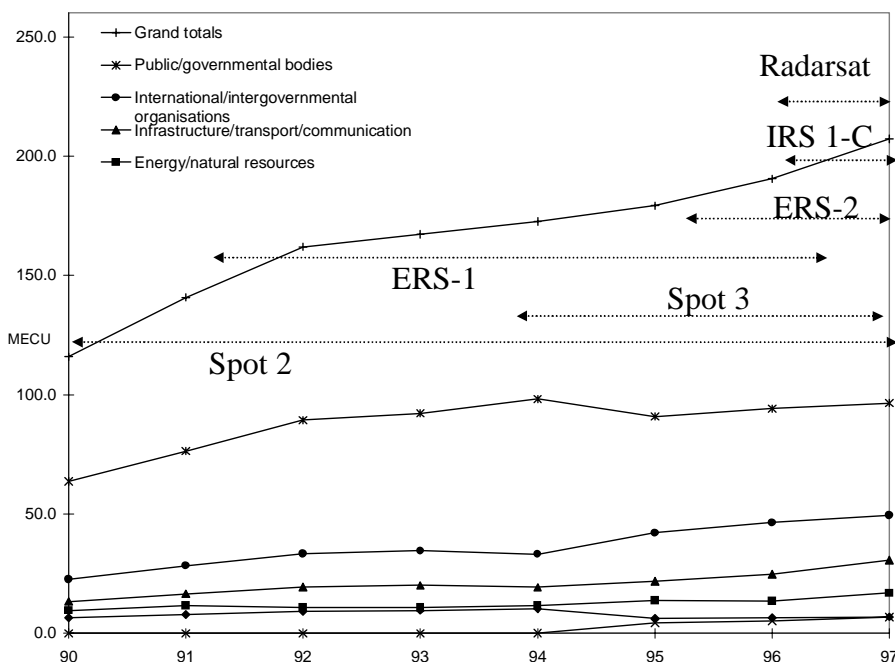


Fig. 106 Jährlicher Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie bezogen auf das jeweilige Marktsegment

Marktsegmentierung

The main trend throughout the period has been a gradual strengthening of the private sector markets while the public sector markets, mainly the national and regional governments (public/governmental bodies market), fell to 146 MECU (68%) in 1997 from 131 MECU (76% of the total) in 1994.

In 1997 the private sector share had grown to 61.4 MECU (32%) from its level of 41.3 MECU (24%) in 1994. This is an average annual growth rate of 23%. The main private sector market, 30.7 MECU, with a share of 17% in 1997 is the infrastructure/transport/communication market in which the telecommunications industry is the main contributor. It has grown at an average annual rate of 18% from 1994. The energy/natural resources and agro/fish/forest markets share 4th and 5th place with 16.9 MECU (8%) and 6.9 MECU (3%) of the market revenues respectively. Revenues from the research community are insignificant throughout the period having only a 1% share in 1997.

Die umsatzmäßige Marktverteilung der Jahre 1997, 1994 und 1990 wird in den nachfolgenden Abbildungen Fig. 107, Fig. 108 und Fig. 109 dargestellt.

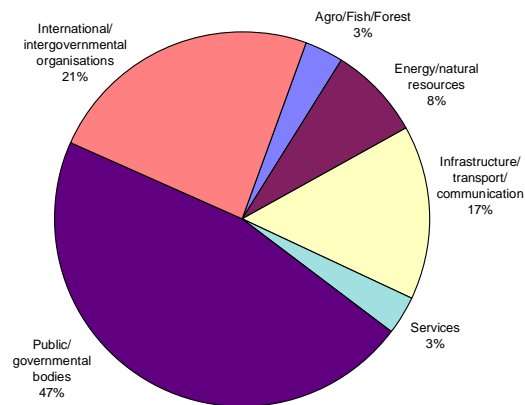


Fig. 107 Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie bezogen auf das jeweilige Marktsegment 1997

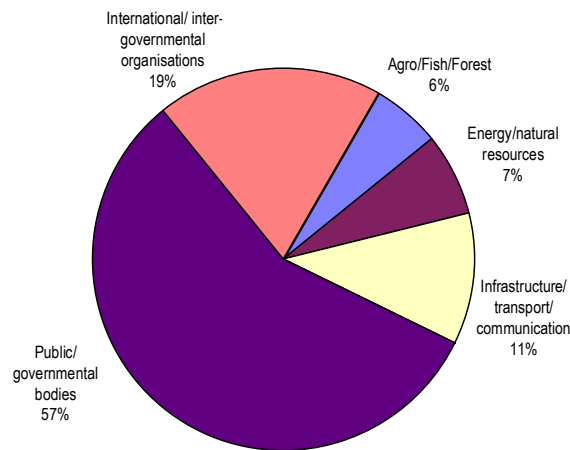


Fig. 108 Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie bezogen auf das jeweilige Marktsegment 1994

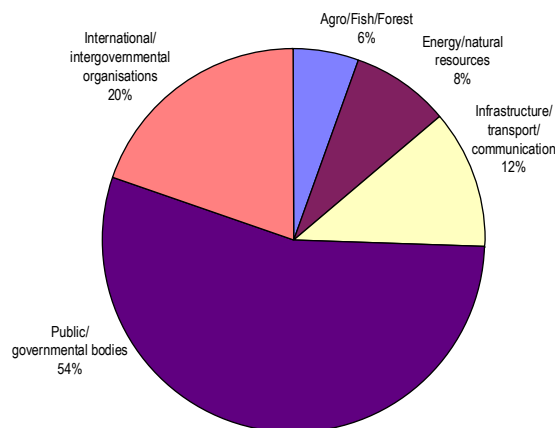


Fig. 109 Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie bezogen auf das jeweilige Marktsegment 1990

Fig. 110 shows the distribution of overall revenues by business activity, i. e. revenue from data supply activities, value added activities etc. This shows that, overall, all 3 business activities have increased gradually throughout the period 1990 to 1997 with the exception of a small fall in major value adding revenues from 1992 to 1995 (about 0.5 MECU). Average annual growth rates between 1995 and 1997 are as follows:

- data suppliers and complementary service suppliers at an average of 11% per year;
- value adding suppliers at an average of 5.5% per year.

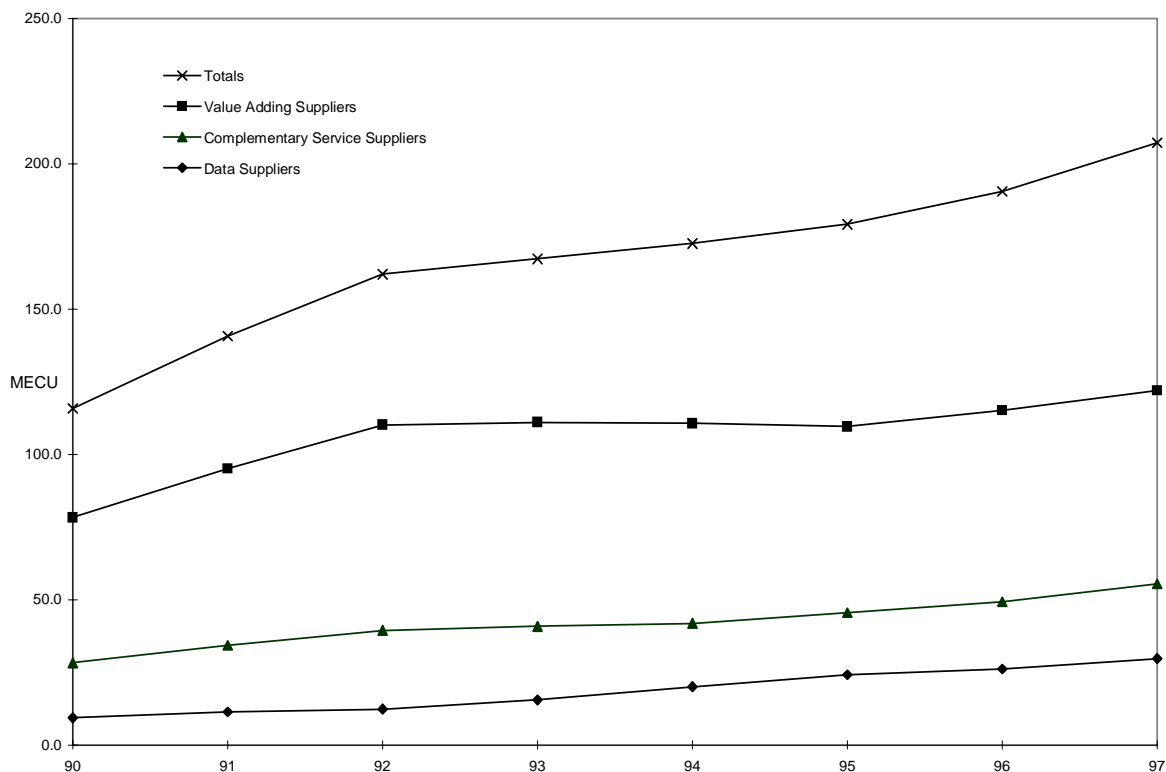


Fig. 110 Jährliche Gesamtumsätze der Europäischen FE-Industrie nach Geschäftsaktivität

Verhältnis der Geschäftsfeldaktivitäten

Fig. 111 shows the ratio relative to data revenues of value added and complementary service revenues for each year of the entire period.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Value adding revenues	8.5	8.7	9.0	7.2	5.1	4.5	4.4	4.1
Complementary service revenues	3.0	3.1	3.2	2.6	2.0	1.9	1.9	1.9

Fig. 111 Jährliches Umsatzverhältnis von mehrwertschöpfenden und zusätzlichen Diensten im Vergleich zum Umsatzerlös von Daten der Einheit 1

This shows how the ratio of value added revenues relative to one unit of data revenue has fallen steadily from 8.5 in 1994 to 4.1 and 1.9 in 1997. In the same period the ratio of complementary service revenues for one unit of data revenue has also fallen from 3.0 to 1.9. This reinforces the point already made that value added revenues have fallen relative to data revenues through the increase in availability of higher level, added value products, through greater market penetration by the data suppliers, and through improvements in conversion efficiency in the value adding process itself.

Fig. 112 shows how the percentage of data revenues has changed between 1990 and 1997. The percentage of data in 1997 is more than double the 1990 value while the minor value adding revenues revenue has fallen from 27% to 20% of the market. The gain in data revenues

is due to the increasing market share of the main data suppliers and the increase in the proportion of sales of higher level products now in their catalogues.

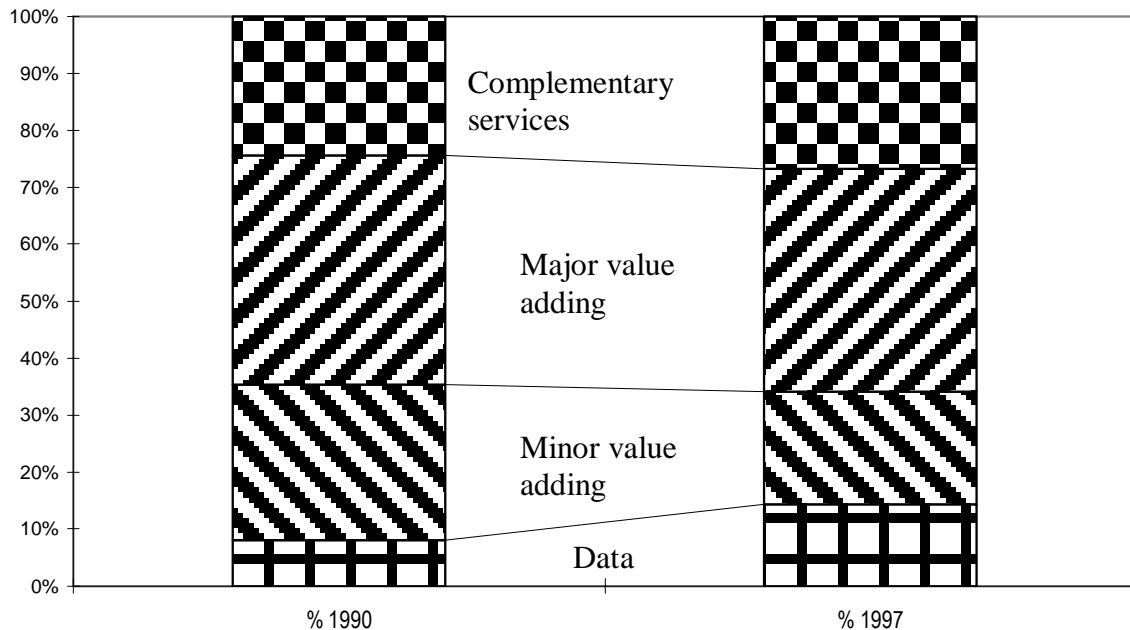


Fig. 112 Geschäftsfeldverhältnis – Vergleich zwischen 1990 und 1997

Beschäftigtenanzahl

It is estimated from the 77 companies which provided employee information that the number of EO employees in the European EO industry is 2,278. This does not account for those engaged in research by Universities or employed in public sector organisations supplying EO services that fall outside the scope of this study.

Durchschnittliche Umsätze

An analysis of changes in the revenues per EO employee has been possible by linking with the 1995 CEO study. Proof that value adding companies are experiencing a difficult period can be found in an analysis of changes in average EO revenues and the numbers of employees generating them. Fig. 113 illustrates the falling revenues per employee across all value adding companies with the worst effects being experienced by smaller companies.

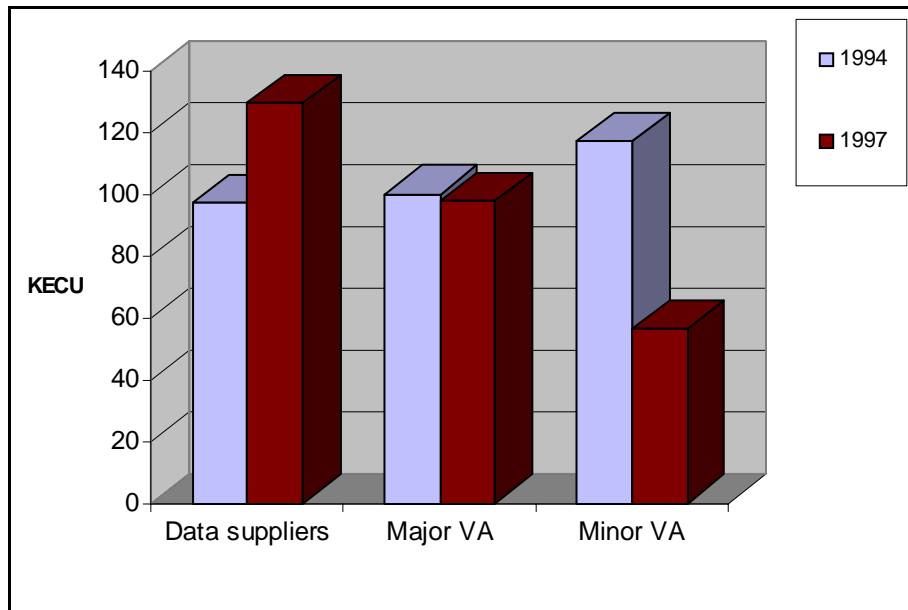


Fig. 113 Veränderung des durchschnittlichen FE-Umsatzes zwischen 1994 und 1997 pro Angestellter und Geschäftsfeld

Major value adding companies have managed to remain relatively stable in this respect, possibly due to the ability to secure larger and more profitable contracts. Minor value adding companies, which traditionally rely on government spending, have had less success in generating revenue per employee. This may be due to the more intensive competition for contracts among these smaller companies, their lower capability to diversify and the widespread practice of partly funding contracts which puts smaller companies at a disadvantage because of their limited investment capacity.

Marktkonzentration

One of the major internal changes noted since 1994 is the apparent tendency towards industry concentration. That is to say, the number of companies responsible for the majority of EO revenues is decreasing driven by the strong growth of a few companies with predominantly data supply and larger scale value adding activities. In 1994, 16 companies provided 50% of the total data and value adding revenue. By 1997, 50% of the market share was delivered by 13 companies.

At the same time some other major value adding companies have experienced no growth or even a decline between 1994 and 1997 which has exacerbated the consolidation trends. The largest loser is the minor value adding sector which has lost an increasing proportion of total turnover to the data supply sector (see also Fig. 112). Larger companies also have a better capability and capacity to augment their turnover by diversification and the evidence for increased diversification is discussed in the next paragraph.

Spezialisierung und Diversifikation

Another major internal shift within the EO industry that has occurred since 1994 is the diversification of business activities. Fig. 114 compares the range of business activities from which EO companies derived revenue in both 1994 and 1997, illustrating how consultancy and R&D work have become more prominent in the activities of EO companies. For instance,

in 1994 just over 12% of companies indicated any kind of R&D revenue. This figure had increased to just over 50% by 1997.

Furthermore, over 50% of the companies reported revenues in more than one business activity, e.g. value adding revenues with one or more of the complementary service activities such as software or training.

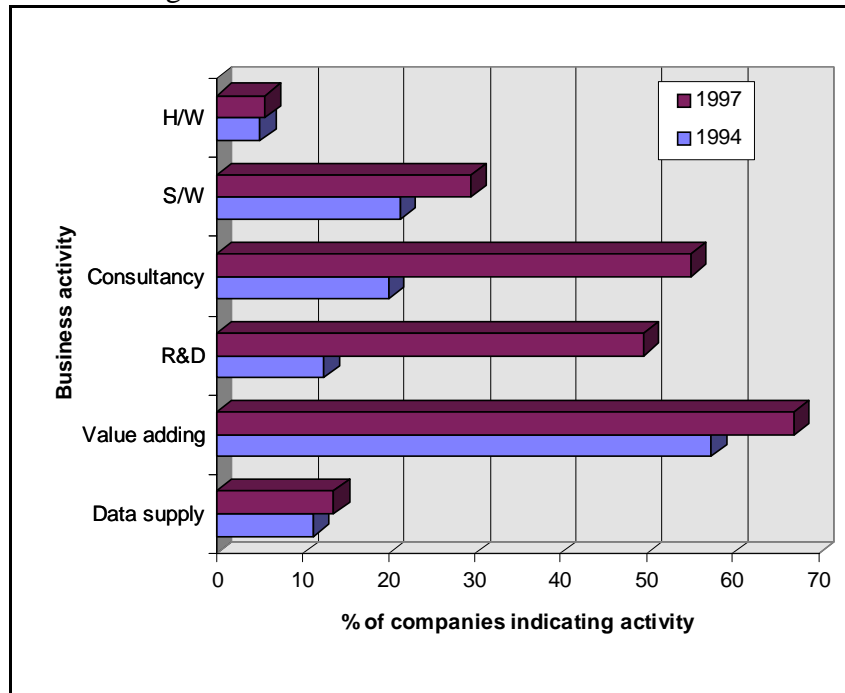


Fig. 114 Diversifikation der Geschäftsfelder im Vergleich 1994 und 1997

One explanation for these trends is that value adding companies are supplementing their original core business with more diverse revenue streams such as those provided by the CEO programme and the DG XII shared cost actions. This may also have been stimulated by the delay of new EO missions which were expected to have formed the basis for further growth and one company has mentioned a fall in revenues resulting from the failure of Spot 3.

Geschäftsbasis und Kundenstandorte

A further transformation within the European EO industry has been the decrease in the dominance of the home market. In 1994, more than 75% of survey respondents derived more than 50% of their annual turnover from their home market. Today, the more dominant markets are those overseas and outside of the EU as shown in Fig. 115.

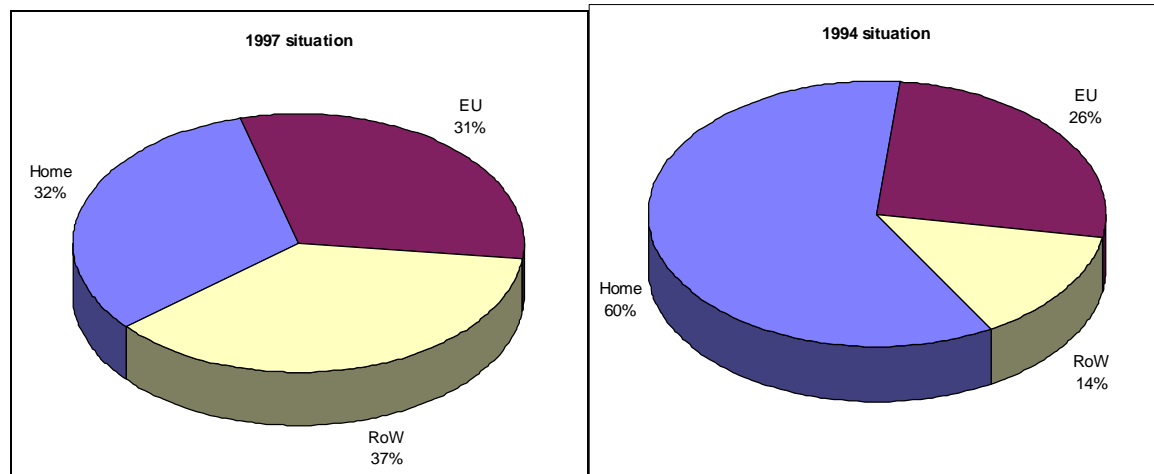


Fig. 115 Geographische Verteilung der Umsätze 1994 und 1997

The reasons for this change are unclear. One positive conclusion is that EU companies are becoming more successful in securing overseas business, albeit forced upon them by slower home markets. It is interesting to note that the companies mainly responsible for this growth in exports are the same companies driving the concentration of EO business discussed earlier.

Taxonomie der Anwendungen – Marktsegmentierung

An dieser Stelle soll zunächst ein Blick darauf eröffnet werden, nach welchem Klassifikationsschema man sich in der europäischen „Downstream-EO-Industry“ die Erdbeobachtung nach kommerziellen Aspekten einteilt. Daran anschließen wird eine kurze Diskussion einzelner Bereiche aus den 26 Kategorien der Übersicht, um die Teilpotenziale der diversen Märkte quantitativ aufzuzeigen.

Anwendungsbereiche aus kommerzieller Perspektive

Customer segments	
AGRO/FISH/FOREST	
1	Agro Industry Including: Farming and farming business, Agro products manufactures, Farming advisors, Agricultural commodities/Trading Industry, Agriculture machinery, Agro chemicals suppliers, Agricultural service suppliers, Agricultural Trade organisations
2	Fishing Industry Including: Boat owners and fishing business, Fish farming, Fish product manufactures, Fishery trading industry, Fishery service suppliers, Fishing trade organisations
3	Forest Industry Including: Forestry owners, Forestry management agencies, Logging industry, Wood products/paper industry, Forestry service suppliers, Forestry trading industry
ENERGY/NATURAL RESOURCES	
4	Oil and gas Industry Including: Oil and gas Production Companies, Off shore operators, Exploration service companies (geophysics, seismic, etc), Drilling and support services, Oil and gas drilling, exploration and extraction equipment, Oil & gas trading organisations

5	Alternative energy Industry	Including: Solar energy industry, Wind energy industry, Wave energy industry
6	Coal and mining Industry	Including: Coal and mining industry, Geological Survey Organisations, Exploration service companies
7	Water Industry	Including: Water plants, Hydroelectric power producers, Regulatory bodies
INFRASTRUCTURE/TRANSPORT/COMMUNICATION		
8	Construction Industry	Including: Construction companies, Civil engineering consultancy companies, Architect companies
9	Transportation industry	Including: Airports administration, Harbour administration, Airlines, Railways, Trucking
10	Shipping Industry	Including: Bulk cargo and oil carriers, Container carriers, Cruise liners, Ferries, Fishery vessels/fleets owners, Naval operations, Offshore industry, Shipping industry service suppliers
11	Navigation Industry	Including: Digital map data providers, Cartography/map producers, GPS providers, Ocean racing/leisure industry
12	Telecommunication industry	Including: Tele companies, Mobile tele providers
SERVICES		
13	Insurance Industry	Including: Primary insurers, Reinsurance companies, Reinsurance brokers, Insurance service suppliers
14	Real Estate Industry	Including; Real estate brokers
15	News/media Industry	Including: TV broadcasting stations, WWW broadcasting providers, Other news/information providers
16	Software Industry	Including: GIS providers, Decision support system providers, Edutainment providers
17	Travel/tourism/leisure industry	Including: Tour operators, Travel agencies, National & Regional Tourist Offices, Travel Agent associations
PUBLIC/GOVERNMENTAL BODIES		
18	Local and regional governments	Including; Town/city local governments, Regional governments
19	Public National Administration	Including: Statistical Institutions, Agricultural department, Forestry department, Fishery department, Health department, Environmental department, Infrastructure department, Tourism department, Taxation department, Planning department
20	Public operational services	Including: Civil Protection organisations, Fire brigades, Coastal guards, Police force, National, Ice services
21	Education, training and research communities	Including: Primary+secondary schools, High schools, Universities, Professional training organisations,
INTERNATIONAL/INTERGOVERNMENTAL ORGANISATIONS		

22	European Commission	Including: DGI, DGIII, DGIV, DGV, DGVI, DGVII, DGXI, DGXVI, EEA-European Environmental Agency
23	Intergovernmental bodies	Including: Eumetsat, EUROCONTROL, World Bank, Other development Banks, United Nations, FAO, Other international programmes
24	Non-governmental organisations	Including: Environmental protection organisations, Human aid organisations
25	Meteorological sector	Meteorological Institutes, weather service companies
26	Other	

Fig. 116 Marktsegmentierung

Die nachfolgenden Trenderwartungen stammen ebenfalls aus der ESYS-Studie. Die Hauptaussage kann vor dem oben skizzierten allgemeinen Entwicklungstrend zur Digitalisierung vorweggenommen werden: die geometrische Auflösung von Bilddaten, die zunehmende Rechnerausstattung sowie die voranschreitende PC-Vernetzung dominier(t)en die (Markt-)Entwicklung.

Derzeitige und künftige Erwartungen der Industrie (ESYS-Studie)

Interviewees were asked for their views on developments they expected to see in the EO market over the next 5 years, the opportunities offered by these developments and the constraints to growth being experienced. The responses have been combined into sets of statements and the number of companies that accord with such statements. The results are presented in Fig. 117, Fig. 118 and Fig. 119 as shown below.

In general, the expectations for EO industrial development have not changed dramatically from those views expressed in 1995. Most respondents agree, as they did in 1995, that advanced sensors (such as forthcoming very high resolution missions), integration of EO and GIS and application-oriented product developments would all be important developmental trends in the future.

Perhaps the most interesting addition to the list is the assertion that the end-to-end value adding chain would shorten. This has serious repercussions for both the value adding industry as well as complementary service suppliers. With data suppliers providing more 'off the shelf' data products directly to the market, the requirement for specific value adding nodes and the associated software tools is diminished. Several respondents active in both these sectors clearly identified this trend and indicated that appropriate action would need to be taken by the relevant companies to remain in business.

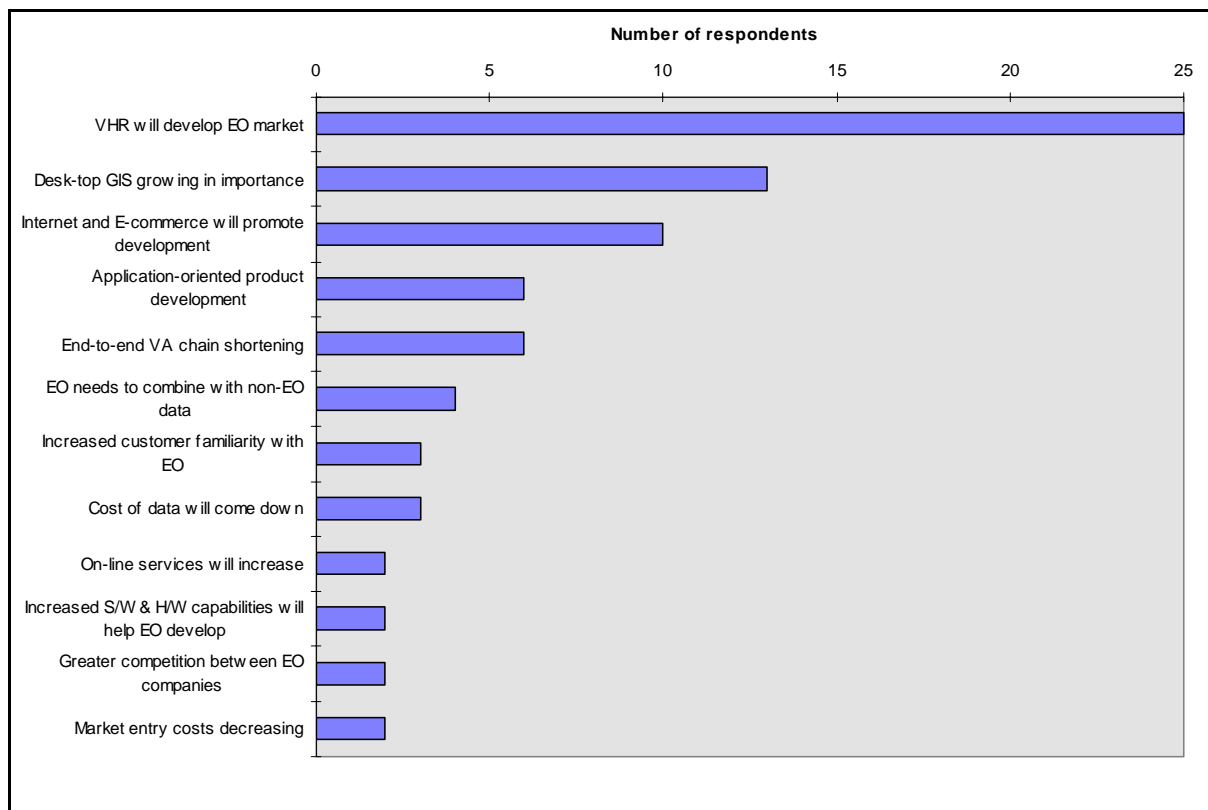


Fig. 117 Allgemeine Trends und erwartete Entwicklungen*

In addition to the general trends expected in the industry, respondents indicated constraints to business growth and these are summarised in Fig. 118. The most marked difference with responses to such questions in 1995 is that constraints related to the supply, pricing and licensing of data have become the foremost complaint. Lack of government expenditure on EO remains a key constraint while the delay in satellite launches appears to have had adverse effect upon EO company growth.

* Erläuterung/Erinnerung zu: VHR → Very High Resolution; höchstaflösende Bilddaten, üblicherweise < 1 m; VA Chain → Value Adding Chain: Kette der Mehrwerterzeugung; S/W & H/W → Software & Hardware

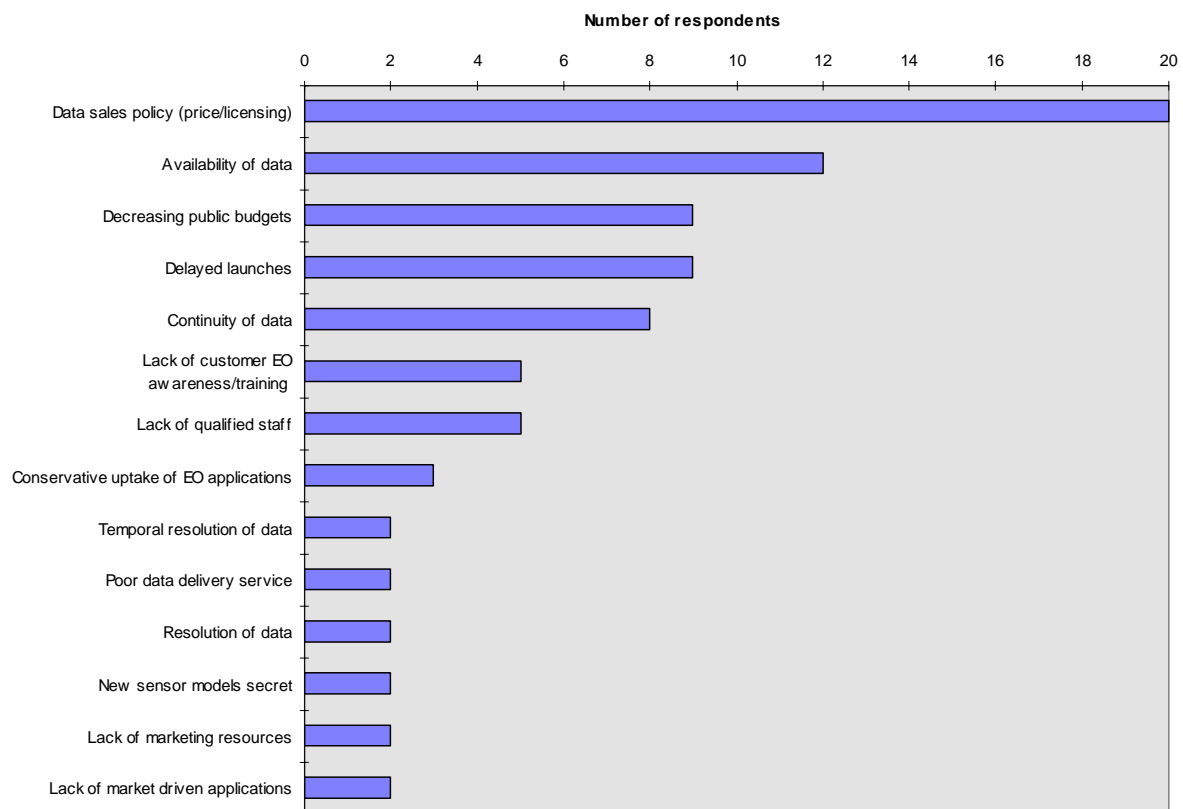


Fig. 118 Beschränkungen für die FE-Marktentwicklung

The lack of customer awareness has been identified as less of a constraint than in 1994 which may, in part, be an indication of the success of initiatives such as the CEO programme.

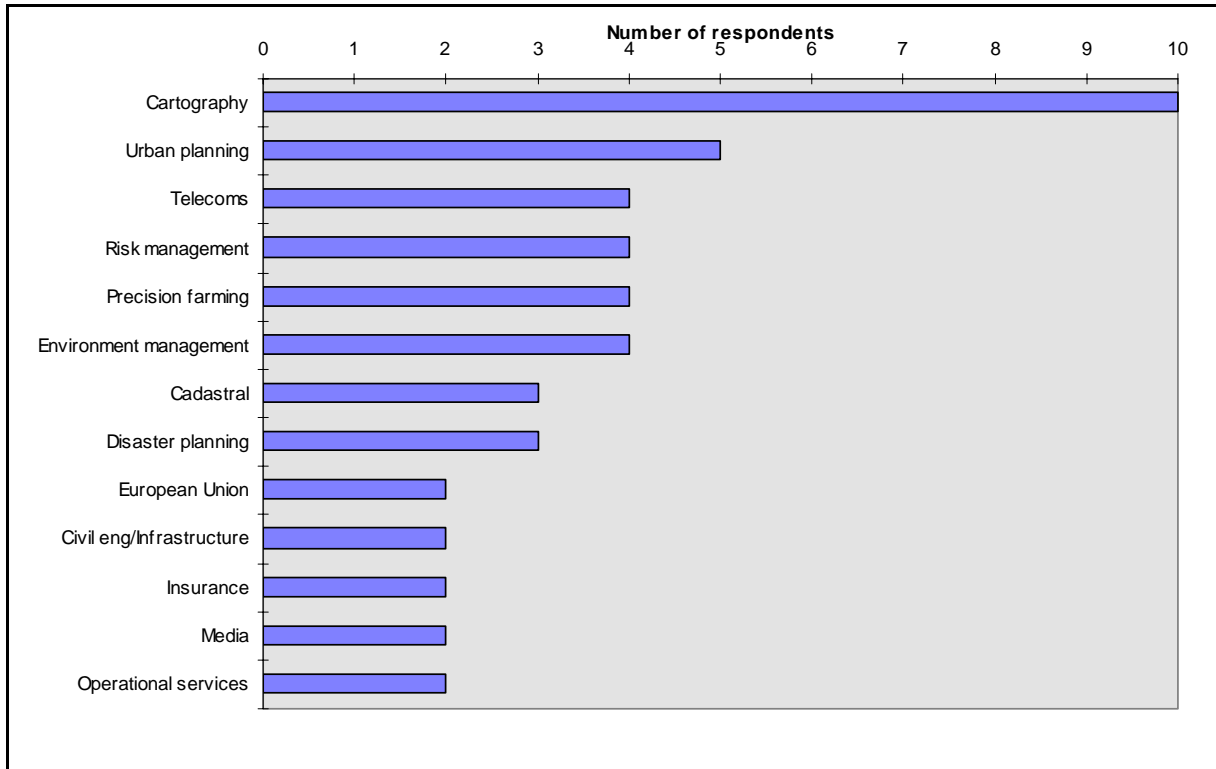


Fig. 119 Antizipierte zukünftige Marktchancen

New sources of data remain a key focus for future growth expectation, as indicated in Fig. 117. Fig. 119 confirms this fact with an assessment of the promising future markets for EO. Cartographic applications were by the far the most quoted due almost completely to the expectation of very high resolution data. Urban planning, especially in developing countries has been rated as a highly promising area as were telecommunications, risk management, precision farming and environmental monitoring applications.

Zusammenfassung der Firmenbefragung (innerhalb der ESYS-Studie)

In general, the expectations for EO industrial development expressed by those surveyed have not changed dramatically from views expressed in 1995. New sources of data, especially VHR, the further integration of EO and GIS and application-oriented product developments are all still considered to be important drivers for market expansion.

A new theme has emerged however, an assertion that the end-to-end value adding chain is (and will continue to) shorten. This has serious repercussions for the value adding industry. Data suppliers are providing a greater range of off-the-shelf products directly to the market and are moving further down the value adding chain, directly to access the market. Consequently, the requirement for value adding service and associated software tools is diminishing and the start of this trend is clearly visible now in the market figures. Certainly this is continuing in 1998 and whilst individual value adding companies may be facing serious decisions on whether they can sustain their position in the EO market, this trend has the potential to underpin more effective growth rates in the future. Certainly, the successful growth companies are adopting new business models that are reinforcing their growing domination.

Importantly, lack of knowledge about new markets and customer awareness has been identified as less of a constraint in 1998 than in 1995. This must be a good indication of the impact of CEO initiatives.

Mit dieser Aussage wird die Exploitation der ESYS-Studie (Jenkins und Shaw, 1998) im Wesentlichen abgeschlossen und verlassen.

Eine komprimierte und übersichtliche Marktcharakterisierung etwas jüngeren Datums findet sich unter http://www.eomd.esa.int/talks/ESA_Pre-study_app.pdf (Stand: April 2005). Die Aussagen dieses Downloads stammen von EOMD (Earth Observation Market Development), und sind in der nachfolgenden Tabelle aufbereitet:

Directorate of Earth Observation Programs
ESA – Industry Workshop : 05+06-Nov-03
Pre-Study Public Knowledge of the EO Services Industry
Prior Knowledge - Markets, Services, EO Data, Industry

Main Sources

- CEO ‘Snapshot’ – 1998 + 2000 update
- Frost & Sullivan 2001, Bain & Cunneo 2000, Ardak 1999
- ESA ‘ERSIS’ study 1999 (large Aerospace view)
- ESA EOMD Industry Workshop 1999 (small VA view)
- ESA commercial DE’s (EMMA, SARCOM)
- ESA commercial SAR SW Market study 2001
- D/EOP ‘Oxygen’ paper 2003
- DG ‘Agenda 2007’ paper 2003
- US DoC conference on commercial remote sensing 2003
- P. DeSelding on yahoo.com 2003 [Peter deSelding ist Kolumnist (Space News Staff Writer) und befasst sich hauptberuflich mit den Möglichkeiten und Grenzen der Kommerzialisierung des Weltraums; Anm. d. Verf.]

Markets

- Y2000 Global addressable market for Remote Sensing is ~ 2000 MEu,
- Y2000 Global accessible market for EO services is 300 MEu,
- Military is the real market for EO (ClearView : 2x\$500M, NextView : \$500M)
- The total Y2000 revenues for European EO services industry is about 220 MEu, (40 M Data, 120 M Services, 60 M Complementary).
- This has grown at ~ 1.4% since 97, (ie shrunk with inflation) and 20% below the ‘pessimistic’ growth projections of 98.
- Y2003 projections are 265 MEu (optimistic), 225 MEu (pessimistic)
- The 2003 European market for EO services is about 480 MEu (?)
- The Global market for commercial SAR SW packages is about 12 MEu.

Services

- Y2000 Services revenues are 65% Govt., 12% Telecoms, 5% Oil&Gas, 5% Agro/Fish, 15% unspecified, and... –1.3% on 97.
- Y2000 Services revenues are 70% European buyers, 30% RoW*
- There are about 20 marketable SAR-based services which are mature & earning revenue today, both land & ocean domains
- Y2000 revenues for SAR-based EO services in EU + CA is about 12 – 15 MEu (so, 10% radar, 90% optical ?)
- The cost of EO Services varies greatly, eg:
- Radar DEM's : ~ 2-5 Eu/km²
- Optical DEM's : ~ 5-25 Eu/km²
- Agricultural Maps : ~ 250 Eu/km²
- The ratio of Value-Adding / Data Costs is ~ 4-10 /1 (?)

EO Data

- Customers want information solutions, not EO image products,
- The cost of EO data is prohibiting the commercial provision of EO services (?)
- The cost of EO data varies greatly, but continuing trend to fall in price ...(ie. 1km : Free, SAR 20 m : 1-3 KEu, Optical 20 m : 1-2 KEu, Optical 1m : 4-10 KEu)
- The Y2000 EO data market for European suppliers is 40 MEu, and has grown +12% since 97,
- The Y2002 revenues from SPOT-5 are 55 MEU (Data, Partner agreements?)
- European EO data suppliers are losing market share to US suppliers (ecommerce, low prices)
- Annual revenues from global data sales of ERS are at about 2.5 MEu and stable (ie SAR represents 5% of data market?),
- Annual volume of ERS data sold is growing (ie 4000 in Y2000, 6000 in Y2001, 12000 in Y2003) and now exceeds volume for scientific use (provided free)
- When data cost is low (< 50 Eu/scene), large volumes of ERS SAR (i.e. several thousands) are bought for 'data hungry' services (i.e. Oil-seep, Land-Motion)

EO Industry

- The EO service industry is fragmented & fragile (?)
- Public financing to the European VA sector has been on the order of 25 MEu/yr (?)
- Space Agencies have not significantly invested in the EO Downstream sector,
- There is strong movement towards vertical integration of small VA companies with satellite producers & some re-alignments of EO in large companies.
- EO services industry is fed-up with surveys(!)

Fig. 120 Zwischenstand der europäischen Fernerkundungs-Industrie, 2003 (ebd.)

Im September 2004 erschien schließlich erneut eine 354 Seiten umfassende Studie mit dem Titel „The State and Health of the European and Canadian EO Service Industry – Technical Report“ (Curtis und Knops, 2004), die von der ESA in Auftrag gegeben worden war. Der Fokus dieser Studie lag auf den mehrwerterzeugenden Unternehmen der Fernerkundungsbranche, deren Entwicklung in den ESYS-Studien Anlass zur Besorgnis gegeben hatte. Inzwischen hatten diese Firmen eine Industrie-Bezeichnung: **Value-Adding Companies (VACs oder EO VACs)**. Die Fortschreibung der Zustandserhebungen ist sehr

* RoW: Rest of World

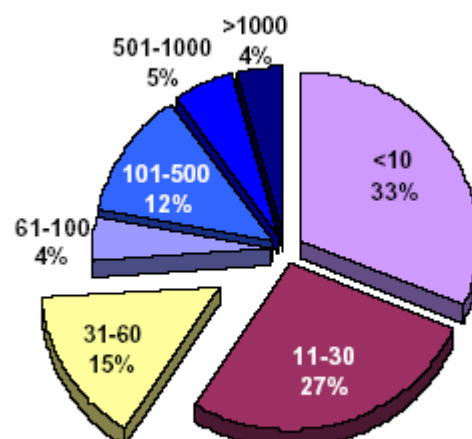
aufschlussreich. Die allerwichtigsten Ergebnisse werden in der nachfolgenden Übersicht stichpunktartig zusammengefasst:

- Zeitlicher Erhebungsaufwand: 18 Monate.
- 162 Firmen(51 davon mit Finanzleistung, 73 mit Firmencharakterisierung)
- Die Fernerkundungs-Dienstleistungsindustrie ist ein extrem facettenreicher Sektor. Sie weist die Charakteristik hauptsächlich kleiner, verteilter und fachspezifischer Beratungsunternehmungen auf, die Nischenmärkte besetzen.
- Größe der EO VAC-Industrie: ca. 2900 Beschäftigte.
- Die größte Firma beschäftigt weniger als 250 Mitarbeiter
- Durchschnittlicher Pro-Kopf-Umsatz: 107 kEUR; zum Vergleich: Maschinenbau und IT durchschnittlich 100 - 150 k.
- Die Industrie scheint dynamisch und beschleunigend zu wachsen: in 2004 19,4 % (größter Wert seit 1990, dem Beginn der Marktentwicklung, allerdings von nur 10 Firmen maßgeblich über letzte 3-Jahresperiode getragen).
- 77 % des Gesamtwachstums der Branche werden von nur 6 Firmen bestritten, fast die Hälfte dieses Anteils von nur einem einzigen Unternehmen.
- 78 % des Geschäfts entfällt nach wie vor auf Regierungsgeschäfte oder Aufträge der öffentlichen Hand.
- Geschätzter Jahresgesamtumsatz über alle EO VACs (für 2002): 285 Mill. EUR (Schätzdaten basieren auf Umsatzdaten von 42 Unternehmen, die ca. 48 % des EO-Industriepersonals beschäftigen).
- In Europa herrscht der härteste Wettbewerb (gegenüber Amerika und der übrigen Welt).
- Die Fernerkundungs-Industrie ist arbeitsintensiv (vergleichbar mit derjenigen von Management Consulting). VACs sind hochspezialisiert in Bezug auf die gestellten akademischen Anforderungen. 60 % der Firmen beschäftigen mehr als die Hälfte ihrer Mitarbeiter auf dem akademischen Gradniveau von Masters und darüber. Das bedeutet eine dramatische Abweichung gegenüber der normalen Arbeitskraft in der Industrie und wird daher als potenzielle Wachstumsbeschränkung gesehen, da der Zugang auf diese Qualifikation begrenzt ist.
- Die derzeitige Arbeitspraxis und das äußere Unternehmensumfeld werden sich evtl. wachstumshemmend auf die Leistungsfähigkeit und die Marktentwicklung auswirken: nur 27 % der VACs halten ihre Liefervereinbarungen ohne Probleme ein.

Am interessantesten ist die Statistik zur Unternehmensgröße: 60 % aller Firmen beschäftigen weniger als 30 Personen. Wobei tendenziell festgestellt wurde, dass der EO-Anteil umso bedeutender für die Geschäftsbasis eines Unternehmens zu sein scheint, je kleiner dieses ist.

Fig. 121 Größe EO VACs

50% of all products exploit optical data and 30% exploit SAR data, in some form. 30% of



products combine both SAR and optical data. Only 17% of products rely on a single source.

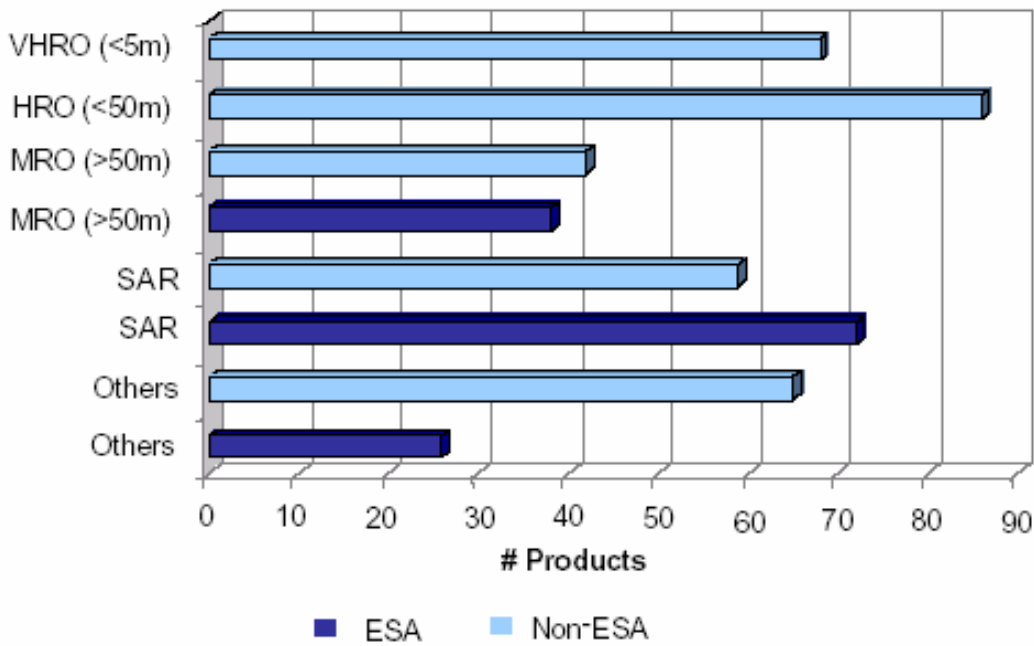


Fig. 122 EO-Produkt-Datenquellen (VHRO: Very High Resolution Optical, analog M... Medium...)

The widespread utilisation of different EO data sources may point to potential points of failure associated with availability. However, 72% of products have alternative sources of data. Therefore, the industry is taking steps to reduce this risk and build resilience in EO production chains. There is a small trend towards higher resolution optical data for new products under development. This appears to be at the expense of medium resolution Optical (> 50m resolution). The proportion of SAR as source appears to be stable. Most (80%) products include data from either ground or aircraft-based sensors in addition to EO data. 40% of products combine data from all 3 of these sources.

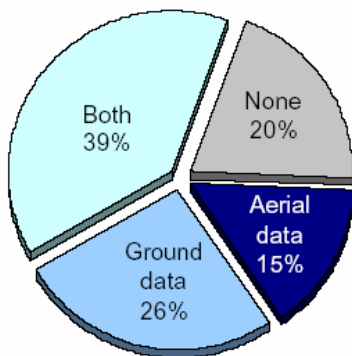


Fig. 123 Herkunft von Datensätzen (non-EO Data)

Most (70%) products always or often assimilate data sources via some level of modelling to arrive at geophysical values.

Only 7% of products never involve this type of activity.

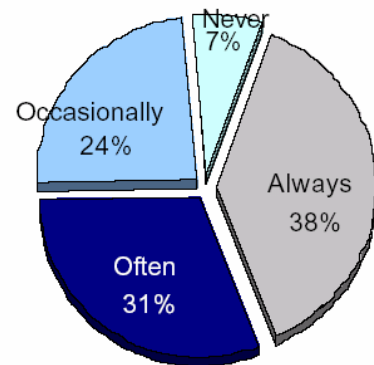


Fig. 124 Verwendung von zusammengesetzten Produkten und Modellierung

The widespread use of both non-EO data together with this higher-level modelling and interpretation points to a more complex production and delivery process that is

reliant on the expertise of the supplier. A significant issue for the industry is to insulate end-users from this complexity by providing services that not only meet the user needs but are easy to use and understand. Generally the EO products can be characterised either as a one-off project delivery or as a core product, with customisation or configuration to meet the evolving needs of customers. Only 8% of identified products are 'off the shelf' and have no customisation in their delivery. Almost 40% of services are customised for every delivery. Ende des Exzerpts aus:(Curtis und Knops, 2004)

Man könnte für die Zustandsbeschreibung der Gesamtmärkte noch detaillierter aufbereitete Analysedaten heranziehen, um noch mehr Sicherheit für die Erarbeitung einer tragfähigen (Ausbildungs-)Strategie an Universitäten und Forschungseinrichtungen zu erhalten. Diese Informationen müssten jedoch sehr teuer auf dem Consulting-Markt beschafft werden. Die nächste Tabelle zeigt, wie leicht zugänglich hochverdichtetes Material an sich wäre:

Datum	Thema der Marktanalyse	Preis [USD]	Umfang [Seiten]	Bemerkung(en)
1. Feb. 1998	World Commercial Remote Sensing Markets	2950	n. a.	The remote sensing market is in transition from the domain of governmental funding to the realm of commercial enterprise ...
1. Feb. 1999	European Environmental Remote Sensing Markets	4350	205	15 EU-Countries, incl. Norway and Switzerland
1. Aug. 2004	Image Sensors	3950	577	82 Companies, 196 Exhibits (Market Data, Tables, Shares, Analyses, Trends, etc.) 2,600+ employee hours of research and analyses
1. Nov. 2004	System on a Chip* : Technology, Markets	4658	558	Coverage of SOC segments in terms of market size and revenue trends; Revenue forecasts through 2009; A current industry directory, a survey of US SOC-related patents from 2000 to 2004 (partial), and profiles of leading SOC vendors.
1. Mrz. 2005	WISM: World MEMS† Inertial Sensor Markets	3500	100	Micromachined Acceleration Sensors and Gyroscopes

Fig. 125 Einige für Fernerkundungs-Applikationen relevant erscheinende Marktanalysen (Quelle: www.marketresearch.com, April 2005); die hier vorgestellten Studien sind mit Ausnahme der vorletzten Studie (November 2004: Business Communication Inc.) von Frost & Sullivan.

Eine solche Vorgehensweise verbietet sich für den universitären Forschungs- und Ausbildungsbetrieb. Dennoch kann man alleine über die bloße Existenz solcher Untersuchungen und deren zeitliche Abfolge mehr oder minder klar sich abzeichnende

* System-on-a-Chip: ultraminiaturisierte Computer; man bringt heute beispielsweise ohne Mühe einen PC mit sämtlichen Schnittstellen und der Funktionalität eines Webservers in einer zigaretenschachtelgroßen Anwendung unter (ohne Peripherie wie Maus, Tastatur etc. versteht sich!). Verwandte Stichworte: Embedded PC, PC104.

† MEMS: Micro Electro Mechanical Systems.

Entwicklungslinien erkennen; die in der obigen Tabelle genannten Beispiele lassen sich alle nahtlos in das hier behandelte Thema Flugzeugfernerkundung überführen. Deshalb ist so eine Reihe für sich alleine betrachtet bereits ein guter Indikator für eine technische Gesamtevaluierung der Situation. Man muss dies nicht zwingend quantifizieren können, sondern lediglich die darin unverkennbar enthaltenen Trends signale erfassen. V. a. die jüngste genannte Studie in der letzten Tabelle ist im Hinblick auf die Ausführungen im Kapitel zur Direkten Autogeoreferenzierung bedeutsam.

7.4 Einflussfaktor Geoinformatik-Software: GIS und digitale Photogrammetrie

Laut achtem, in jährlicher Folge erscheinendem GIS-Report stieg im Jahre 2003 die Verbreitung von Desktop-GIS im Vergleich zum Vorjahr um weitere 42 % auf 181 618 eingerichteter GIS-Arbeitsplätze („Seats“). (Buhmann und Wiesel, 2003)

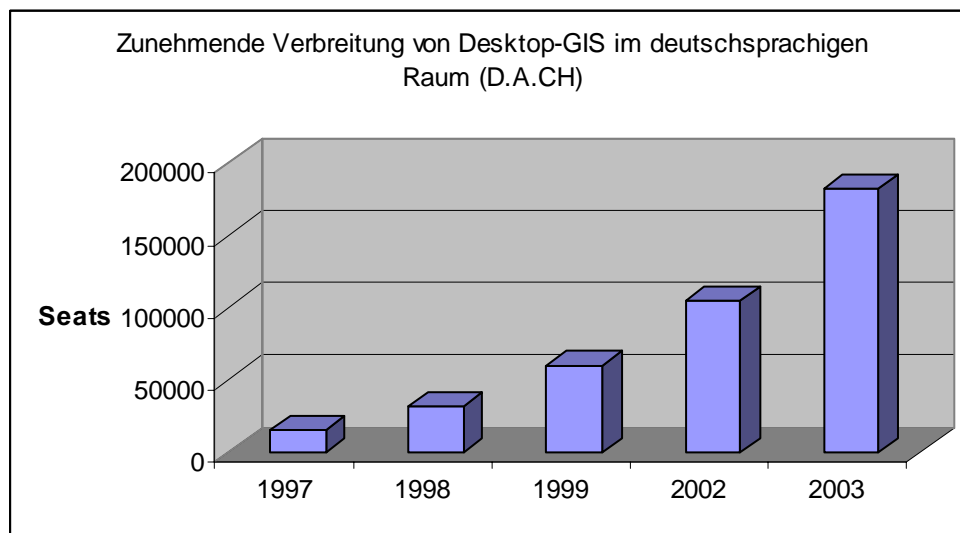


Fig. 126 Entwicklung von Desktop-GIS seit 1997 in den D.A.CH-Ländern (Quelle: GIS-Reporte 1999, 2000 und 2003)

2003 waren alleine von einem der bekanntesten Vertreter der Desktop-GIS-Produktlinie – ARCVIEW GIS (Firma ESRI) – 1,1 Mill. Seats weltweit, 35 000 davon im deutschsprachigen Raum installiert. Im Jahre 2000 noch war das Produkt weltweit 500 000, in Deutschland 15 500-mal lizenziert worden. Dabei ist erwähnenswert, dass die Erstinstallation von ARCVIEW auf das Jahr 1992 zurückgeht.

Auf der nächsten Abbildung erkennt man die Bedeutung von Desktop-GIS gegenüber den professionellen GIS-Produkten, wie etwa ArcGIS (vormals Arc/INFO), Smallworld, GeoMedia Professional, IDRISI etc.

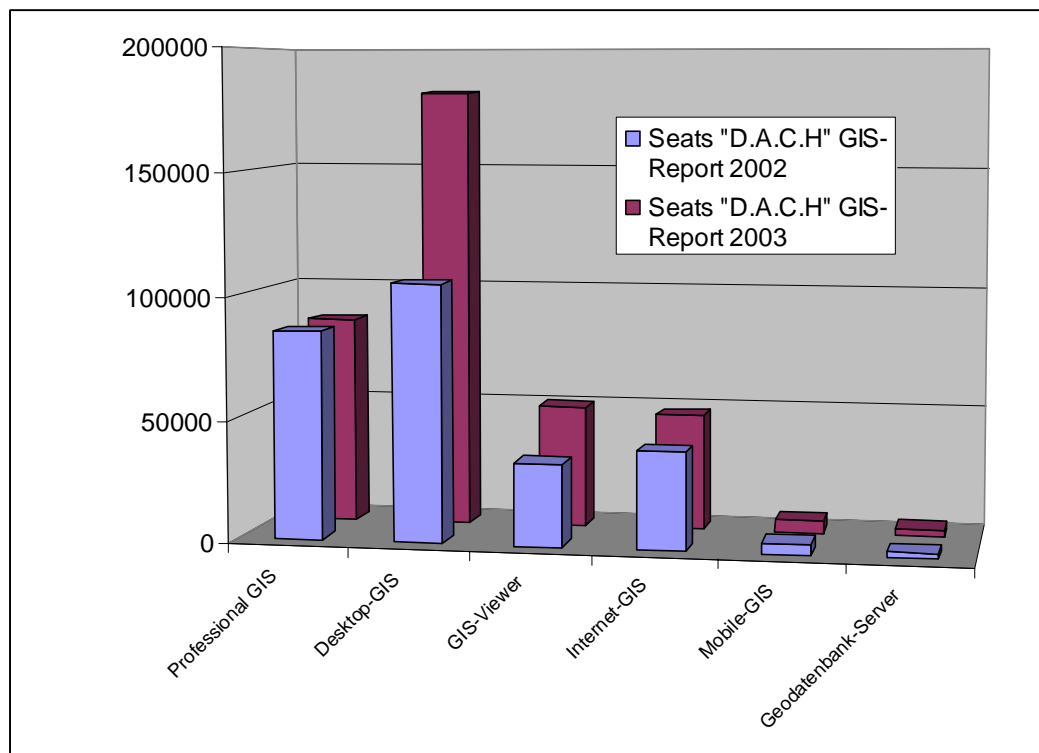


Fig. 127 Aufgliederung von GIS nach Produktparten (GIS-Report 2003)

Diese Bedeutung erklärt sich u. a. aus der Betriebsgröße der Landschaftsarchitekturbüros, von denen aus einer 423 Firmen umfassenden Stichprobe 147 Unternehmen aus 9 Bundesländern antworteten:

Büro nach Mitarbeiter	Anteile der Büros
1 – 3	42 %
3 – 9	48 %
10 – 19	8 %
> 19	2 %

Fig. 128 Mitarbeiteranzahl von Büros einer repräsentativen GIS-Beispiel-Anwendergruppe freier Landschaftsarchitekten (GIS-Report 2003)

Gemessen an den Schwierigkeiten, die sich alleine durch die Aufgabenstellung von Landschaftsarchitekten ergeben, zeigen diese Ergebnisse eine Zersplitterung von manueller Arbeitskraft auf, die mit den umfangreichen Datenbankfunktionen und Manipulationsmöglichkeiten der hochwertigen GIS-Produkte nicht mehr leistbar erscheint. Dies wiederum mag den im Vergleich zu anderen Softwarekategorien noch relativ geringen Einführungsgrad erklären:

Software-Anwendungsbereich	Einführungsgrad 2003
Büroorganisation	99,23 %
HOAI-Fachprogramme	93,20 %
Projektmanagement	32,65 %
CAD	97,96 %
GIS	35,37 %

Internet	95,21 %
Bildbearbeitung	85,71 %

Fig. 129 Einführungsgrade verschiedener Softwareapplikationen (GIS-Report 2003)

Kommentierend zu diesen Zahlen wird ausgeführt:

„Obwohl CAD- und GIS-Technologien seit 1985 zunächst als Workstation-Lösungen auf den Markt kamen, erfolgte die breite Einführung erst mit leistungsstarken PC-Lösungen mit guter Benutzerführung. Den Siegeszug haben CAD-Systeme dabei schon 1990 begonnen und erreichten bereits 1998 eine Einführungsrate von 80%. Die GIS-Industrie hat wesentlich später die Konzentration auf die Workstation überwunden, so dass der Siegeszug der Desktop-GIS-Produkte erst 1997 begann und wir in 2003 erst bei 38% Einführungsrate von GIS angekommen sind. Während Ingenieurbüros über einen Zeitraum von 8 Jahren (1990-1998) über 80% CAD eingeführt und nun zu über 98% im Einsatz haben, hat die Einführung von Internet bis zur 80%-Einführung nur 5 Jahre in den Jahren 1995-2000 benötigt, und kann heute ebenfalls als abgeschlossen gelten.“ (GIS-Report 2003).

Die Bedeutung von Orthofotos über mittleren und kleineren Gebietsgrößen nimmt zu. Diese Büros verfügen heute über die notwendigen Grundvoraussetzungen von (Breitband-)Internet, digitale Bildverarbeitungsfunktionalität und GIS. Die Landesvermessungsämter werden durch die Umstellung auf digitale Produkte die Nachfrage auf Standarddatenprodukte erhöhen. Für Umweltforschungseinrichtungen jedoch wird dieser Standardisierungsprozess nicht ausreichen. Dort herrscht eine Nachfragesituation, die weit über den Straßendurchschnitt hinausgeht. Dies ist mit dem selbstgewählten Auftrag dieser Einrichtungen begründbar. Die Aufgabenstellung erfordert einen Fokus auf frei zu wählende landschaftliche Inventarisierungsobjekte, die eine Quantifizierung der anzutreffenden Veränderungsdynamik oder die Bedeutung technisch identifizierbarer Prozesse überhaupt erst erlauben. Deshalb erscheinen hier bei mittel- und langfristiger Betrachtungsweise operationell verfügbare Eigenkapazitäten unumgänglich. Dabei besitzt der direkte Zugriff auf beliebig konfigurierbare Rohdatenströme und deren Überschau- und Handhabbarkeit zentrale Bedeutung. Software mit ihrer immanenten Kraft zur Standardisierung ist dabei der entscheidende Hebel. Die gesamte Geoinformatikindustrie und ihre Produktabsatzleistung treiben diesen nicht umkehrbaren Entwicklungstrend voran. Die Verbreitung von Satellitendaten- und Luftbild-Auswertesoftware mit Photogrammetriefunktionalitäten folgt einer ähnlich Entwicklung wie die der oben genannten Produktkategorien, ist jedoch nicht so transparent dokumentiert.

Einen weiteren Ausgangspunkt meiner Überlegungen bildet ein umfassender Review-Artikel zur digitalen Photogrammetrie (Petrie und Walker, 2000). Darin wird der Hard- und Softwaremarkt zur Jahrtausendwende erschöpfend beleuchtet. Das Marktakronym für digitale Photogrammetrie-Arbeitsplatzrechner lautete damals DPW (Digital Photogrammetric Workstation). Den einführenden Kapiteln zu Photogrammetrie-Scannern und Photogrammetrie-Hardware widmete ich weniger Aufmerksamkeit, da sich diese Hürde durch Verwendung von Digitalkameras und das Hardware-Finanzierungsproblem professioneller Ausstattung durch das einsetzende Gigahertzrennen der CPU-Hersteller allmählich etwas entzerren würde. Schließlich war in dem Artikel auch der Verweis enthalten:

„At the Kyoto ISPRS Congress in 1988, the main photogrammetric system suppliers from Western Europe – Wild, Kern, Zeiss, Matra, Galileo-Siscam, OMI etc. – with

their analytical plotters completely dominated the market. No one then could have predicted or envisaged the dramatic changes that have taken place since, which have resulted in the system supply side largely moving elsewhere, especially to North America.” (ebd.)

Es ist davon auszugehen, dass die genannten Experten für Photogrammetrie und Fernerkundung kompetente Software-Lösungen anbieten, da sich aufgrund derer eine vernünftige Ausgangsposition erarbeiten ließ. Das daraus abgeleitete Konzept bewährte sich praktisch so gut, dass die aufgeführte Liste nicht weiter aktualisiert wurde.

Anbieter	Land	Software	Bemerkungen
Wichtigste Anbieter:			
Z/I-Imaging (Zeiss/Intergraph)		“Image Station Z” DPW (Windows NT) bzw. PHODIS (SGI)	Modulkombinationen Match-AT, -T, SCOP (Fa. Inpho) und SPOT (Fa. Trifid/Orbimage) speziell auf Hardware angepasst
LH-Systems		Socet-Set	
		Pro600	
		DP Digital Plotter	Einsteiger-Version Socet Set und Pro600 Funktionalitäten
BAE Systems		Socet-Set	Vormals GDE Systems und Marconi Integrated Systems – spezialisiert auf milit. Fernerkundung
PCI Geomatics		Ortho Engine AE und SE	Basiert auf Socet-Set
Autometric		SoftPlotter	UNIX basierend auf Sun und SGI
		OrthoKork	Nur als PC-Version
ERDAS	US	OrthoMax	ERDAS IMAGINE Modul unter UNIX, basierend auf Autometric-Produkt
		OrthoBase	Photogrammetrie-Modul für IMAGINE, für Windows 95, 98 und NT mit Aerotriangulation, Feature-Extraktion (Stereoanalyst), automatische DEM- Extraktion
DPWs kleinerer nordamerikanischer Anbieter:			
ISM	CAN	DiAP-NT	Hauptprodukt
		DiAP Viewer	Einfacheres, preiswerteres Produkt mit Feature Extraktion, Stereobetrachtung, - messung, und -überlagerung
DVP Geomatic Systems	CAN	DV400P	Sehr leistungsfähige DPW mit innovativen Funktionalitäten: Virtual Stereo Index, DVP Spot-Modul etc.
R-Wel	US	DMS	Anwendungsschwerpunkt: Feature Extraktion und Map Revision
KLT Associates		Atlas/DSP	Sehr bekannt wegen Atlas Digital Data Collection für analoge Stereo-Plotter
		Atlas/Ortho	
		Atlas/TIN	
DAT/EM	US	SummitPC	Gute AutoCad- und MicroStation- Anbindung, sowie Verwendung von Inpho- Modulen
AMSATEK	US	AMSA-RIS (Relational Information System)	AMSA98/NT
		AMSA-DC (Digital)	Feature Extraktion

		Compiler)	
		AMSA-Digital Orthophoto	Modul zur Generierung von Orthofotos
Europäische Anbieter:			
INPHO	GER	Match(-AT,-T und -I), PAT(-B und -M), SCOP, SKIP	Hersteller mit Potential zum Weltmarktführer bezüglich der Produktleistung, noch keine Ambitionen für Feature Extraktion und Orthofototerzeugung
		OrthoVista	Nur Vertrieb, vormals von ZEISS
Siscam		Orthomap	Orthophoto-Erzeugung
		A. D. A.	Automatische DEM-Erzeugung
		B. A. T.	Blockausgleichung (alle Module auf DPW „Stereometric“)
ESPA Systems Ltd.	FIN	Espa Kernel	Hochmodulares System
		Espa Block	
		Espa Ortho	
		Espa City	
DPWs aus der ehemaligen Sowjetunion:			
GeoSystems	GUS	Delta-Station	Beeindruckende Produktvielfalt inkl. Photogrammetrie-Scanner, alle Produkte windowsbasiert, Absatzmärkte bis Westeuropa, Afrika und Asien
Siberian State Academy of Geodesy	GUS	Siberian Digital Stereoplotter (SDS)	International vorgestellt, aber ohne weitere ersichtliche Marketingbemühungen
Racurs	GUS	PHOTOMOD	Potenter Moskauer Ausstatter von Kartografie-Instituten im gesamten ehem. Ostblock inkl. Westeuropa, Mittlerer Osten (Syrien, Saudi Arabien).
DPW-Anbieter mit chinesischen Wurzeln:			
Supresoft	AUS	VirtuoZo	Firmensitz Brisbane, Ursprünge an der TU Wuhan „Surveying & Mapping“, Hauptentwicklungsziel: Orthobild- und DEM-Erzeugung, PAT-B-Interface
3-D-mapper	AUS	Desktop Digital Photogrammetric System (DDPS) mit den Modulen StereoMaker, StereoMapper und OrthoMaker	Firmensitz Perth, Software ausschließlich für Windows 95, 98 und NT.

Fig. 130 Spezifische DPW-Produkte (Stand: 2000)

Daneben wurden in dem Artikel die Mainstream-Hersteller von „Remote Sensing Processing Packages“ genannt, nämlich Earth Resource Mapping (Produkt „ERMMapper“), MicroImages (TNTMips), ResearchSystems (ENVI/IDL), die ihre Produktlinien um entsprechende Orthofoto-Funktionalitäten erweiterten. Darunter wurde auch ERDAS (IMAGINE) und PCI (OrthoEngine) ein weiteres mal genannt. Der Weltmarkt von Photogrammetrie-Produkten umfasste zur Jahrtausendwende etwa zwei Dutzend Softwarepakete. Die Tabelle belegt mit den aufgezeigten Verflechtungen, wie dynamisch der Markt am Übergang von der analytischen Analogplotter-Photogrammetrie zur Softcopy-Photogrammetrie war. Eine ähnliche Dynamik wie in der GIS-Branche vorausgesetzt, würde dies eine enorme Ausweitung dieses Marktes bedeuten. Es war abzusehen, dass das Windows-Betriebssystem als dominierende Plattform vorherrschen würde.

Aber welches Produkt hätte die meisten Chancen auf eine Marktführerschaft? Einen guten Eindruck vermittelte ENVI, mit dem zu jener Zeit bereits praktische Erfahrungen vorlagen. Die Recherchen zu INPHO ergaben, dass man ausgebildeter Photogrammeter sein sollte, um sich in einer derartigen Modulvielfalt zurechtzufinden und darüber hinaus die Leistungsfähigkeit voll ausschöpfen zu können. Dieser Einstieg in eine digitale Photogrammetrie würde High-End-Leistung beschern, wäre jedoch auch mit entsprechenden Kosten verbunden, die man gerade beim Einstieg scheut. Zweifelsohne besitzt die Firma INPHO das Potenzial zum Weltmarktführer. Pragmatisch und am sinnvollsten erschien es, auf das bereits damals mit 1.500 Seats in Deutschland v. a. an den Hochschulen fest etablierte ERDAS IMAGINE mit der modularen Erweiterung OrthoBase zu setzen. Wie es sich inzwischen gezeigt hat, war diese Entscheidung grundsätzlich richtig. Der Nutzerkreis von Fernerkundungspaketen wächst langsamer als der übrige Softwaremarkt, wie folgende Tabelle für ERDAS IMAGINE belegt.

Name	Erst- installation	2000		2003	
		Weltweit	D.A.CH	Weltweit	D.A.CH
ENVI/IDL	1993	40.000	6.000	k. A.	k. A.
ERMMapper	1990	20.000	500	k. A.	k. A.
ERDAS IMAGINE	1979	30.000	1.500	57.000	3.750
MicroImages TNTmips	1988	5.000	90	6.500	120
MicroImages TNTlite	1997	30.000	1.000	35.000	2.000

Fig. 131 Verbreitung einiger Mainstream-Fernerkundungspakete mit GIS-, und Photogrammetriefunktionalität (GIS-Report 2003)

Das Fehlen der Daten von ENVI und ERMMapper für 2003 kann als Zeichen für eine bislang noch nicht gefestigte bzw. unterbrochene Vertriebsstruktur gesehen werden; die Produktqualitäten erscheinen in beiden Fällen zu hoch, als dass sie sich im deutschsprachigen Raum nicht behaupten könnten. Der langsame Anstieg der TNT-Produktverbreitung dürfte dagegen auf den hohen Entwickler-Anspruch der Software zurückzuführen sein: TNTmips ist als vollwertiges GIS-Fernerkundungs-und-Photogrammetrie-Komplettpaket ausgelegt. Darüber hinaus wäre TNT durchaus interessant, weil sein herausragendes Merkmal darin besteht, von Anfang an als 100 % plattformübergreifendes, kombiniertes GIS-/Fernerkundungssystem entwickelt worden zu sein. Es sieht auf jedem Betriebssystem gleich aus. Während der Umsetzung dieses hohen Anspruchs hat jedoch die Konzeption der Benutzerschnittstelle (GUI) etwas gelitten: es sind zwar alle zu erwartenden Funktionalitäten vorhanden, ein flüssiger Arbeitsablauf gestaltet sich während der Einarbeitungsphase jedoch als schwierig. Für visuell orientierte, pragmatische Anwender ist das übersichtliche Workflow-Konzept von ERDAS-Orthobase dagegen binnen Minuten zu verstehen.

Zusammenfassend ist nach den obigen Ausführungen daher abzuschätzen, dass wir uns heute im Bereich der digitalen Photogrammetrie in etwa auf einem Marktentwicklungsstand befinden dürften, wie er im Bereich von CAD und GIS gegen Mitte der 90er Jahre angetroffen werden konnte: Das Initialstadium liegt hinter uns, aber der Masseneffekt hat noch nicht eingesetzt. Wir befinden uns derzeit inmitten einer Phase, in der professionelle Ingenieurdienstleister die Umstellung auf digitale Photogrammetrie-Methoden zunehmend vorbereiten oder abschließen. Es ist zu erwarten, dass sich der Markt nur langsam ausdehnt. Die Materie erfordert eine recht umfassende Einarbeitung. Eine Primärerfassungstrecke zu etablieren ist bislang mit sehr hohen Investitionskosten verbunden. Es ist durchaus schwierig,

verlässliche Zahlen diesbezüglich zu recherchieren, da dieser Trend bei der Mehrheit noch kein klar erkennbares Ziel zulässt. Es ist i. Allg. noch nicht erkennbar, wohin diese vielen unabhängigen, branchenübergreifenden Konvergenzlinien führen werden. Man muss sich vor Augen halten, dass heute – Intel hat vor einigen Monaten das Gigahertzrennen für Prozessoren vorerst offiziell für beendet erklärt – alle Produktlinien von der Gigahertzbezeichnung auf willkürliche gewählte Ziffernfolgen als Handelsname umgestellt werden. Ein PC aus dem Lebensmitteldiscountmarkt bei Installation eines Photogrammetriepakets leistet so viel, wie vor 20 Jahren noch ein mehrere 100 kg schweres feinmechanisches opto-elektronisches Präzisions-Instrument mit globalen Verbreitungsgraden von nur wenigen Hundert Stück. Damit verglichen liegt die softwarebasierte Umsetzung eines Photogrammetrie-Arbeitsplatzes investitionstechnisch mindestens ein bis zwei Größenordnungen unterhalb derjenigen von opto-mechanischen Vorgängergenerationen.

Das sind keine kleinen Strukturbrüche mehr. Diese Entwicklung erzeugt einen völlig neuen Nutzeranspruch. Die in früheren Kapiteln angesprochenen Nichtlinearitätseffekte und Übertragungsmechanismen beginnen einzusetzen. Solche Prozesse sind nur schwer plan- und steuerbar. Sie wirken permanent und sind nicht leicht detektier- oder quantifizierbar. Allerdings ist es keineswegs unmöglich, sich derartigen Entwicklungen erfolgreich zu stellen.

Fest steht soweit nur, dass Software Informationsverarbeitungskapazitäten ausbaut und den Austausch von Daten beschleunigt! Dies fördert unser intuitives Verständnis von Zusammenhängen, auch wenn Skeptiker behaupten, dass kommerzielle Software den User entmündigt, da er wie ein Laborversuchstier durch die Labyrinth der vordefinierten Arbeitsabläufe gejagt wird. Das mag für jene stimmen, die selbst ihre Zeit ausschließlich der Programmierung widmen. Allerdings argumentiere ich aus einer neutralen Sichtweise heraus, die zwischen dem Programmierer und dem Endnutzer angesiedelt ist: Ich sehe die Wirkung des Aufeinanderprallens ganzer Entwicklungsphilosophien von Softwareherstellern verschiedener Bereiche, die nicht selten neue Denkschulen über ihre Designschwerpunkte in den Produkten etablieren.

Letztlich entscheidet die individuelle philosophische Grundhaltung darüber, ob wir uns diesem Prozess gegenüber völlig wehrlos ausgeliefert fühlen oder ob wir in dem scheinbaren Chaos eine sinnvolle Zukunft erblicken.

8 Überblick zur Historie der Luftbildarchäologie

Der harte Übergang vom weltweiten Geomatics-Business zur Luftbildarchäologie ist bewusst gewählt und findet in folgender synthesehafter Überlegung seinen Ausdruck: Wir haben in den vorhergehenden Kapiteln bereits gesehen, wie viele Fluggeräte bislang produziert wurden, wie technische Konvergenzen und Abhängigkeiten im historischen Rahmen prinzipiell verlaufen und wir haben einen sehr groben Überblick über aktuellere Entwicklungen der kommerziellen Märkte erhalten. Nun ist es an der Zeit, auf ein paar wichtige Unterschiede zwischen der ingenieurtechnisch geprägten Zunft der Photogrammeter im Vergleich zu fliegenden Geisteswissenschaftlern einzugehen. Dieser Versuch wird unternommen, um den Blick auf spezifische Arbeitsmethoden zu lenken, die heute – zu Beginn der softwaregestützten Bilddatengewinnung und -prozessierung – eine neue Gewichtung verlangen.

Aus Platzgründen kann hier zunächst nur ein stichwortartiger Überblick gegeben werden, der im Wesentlichen auf den Ausführungen von „Flug ins Gestern – Das Abenteuer der Luftarchäologie“ (Deuel, 1977) einerseits, und ergänzenden Angaben in dem Arbeitsheft „Archäologische Prospektion – Luftbildarchäologie und Geophysik“ des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege (Becker, 1996) beruht.

Zeit(raum)	Name	Leistung / Tätigkeitsgebiet
Um 1890	Maj. Elsdale	British Royal Engineers Balloon Establishment: Einführung unbemannter Freiballone mit automatisch arbeitenden Kameras
1891	Lt. C.F. Close (später Sir Charles)	Indiendienst: Idee zur Ballonaufnahme ausgedehnter Ruinenfelder bei Agra. Realisierung einiger unbedeutender Luftbilder bei Kalkutta. Agra wurde erst 50 Jahre später (WK2) erkundet.
1906	Oberleutnant P.H. Sharpe / Colonel J.E. Capper	Einsatz des Luftbildes als archäologisches Hilfsmittel (Ballonübungsfotografien von Stonehenge)/ öffentl. Ausstellung der Bilder und ein Jahr später Veröffentlichung in „Archäologia“: Wert : Zustandsdokumentation und Überblick über Steinsäulen, Erdwälle, Zugänge und Grabhügel.
	Ital. Armeeingenieure	Luftbilder des Forums in Rom und der antiken Hafenstadt Ostia
1910	Sir Henry Wellcome	Luftbilder von Privatgrabungen im Sudan mittels Kastendrachen und fernbedienbarer Kamera
WK I	G.A. Beazeley	Nutzte als Erster das Flugzeug für eine ganze Reihe von Neuentdeckungen im Zweistromland (Euphrat/Tigris: Mesopotamien) – allerdings noch keine systematische Suche möglich wegen der Flüge über Feindgebiet. ZB. Alt-Samarra (erb. Durch Kalif al-Mustasim, 9.Jh., nur 50Jahre bewohnt) mit 30x4km Fläche 100km NW von Bagdad mit deutlicher Abgrenzung sozialer

		Wohnviertel am Tigris. Weitere Fundstellen: Paläste, Prozessionsstrassen, Festungen und Bewässerungssysteme; Veröffentlichung in zwei Aufsätzen im Geographical Journal 1919 und 1920
1916	Leon Rey	Luftaufnahmen zur Analyse antiker Siedlungsplätze über Makedonien
1915/ Sommer 1918	Oberleutnant Dittmann / Major Eicke	Erste Luftaufnahmen des antiken Troja
1916 - 1920	Theodor Wiegand (1864- 1936) - Gründer der Pergamonmuseum/Berlin	Nach Gründung einer Luftbildstaffel für die Aufklärung historischer Denkmäler im Nahen Osten: Flüge über die Wüste Negev, Sinai Halbinsel und den Golf von Akaba zur Erfassung spätrömischer und byzantinischer Ruinenstätten (ca. 300 Aufnahmen)
1914 – 1918	Carl Schuchardt (1859- 1943) Direktor Vorgeschichtliche Abteilung des Berliner Völkerkundemuseums	Archäologische Luftaufklärung über Rumänien durch dt. Militärpiloten: zahlreiche Fotos von den Trajanswällen westlich Constanza in der Dobrudscha
1922 „Geburtsjahr der Luftbild- archäologie“	Osbert Guy Stanhope Crawford (1886 – 1957) Gründer der Zeitschrift Antiquity, deren Herausgeber er von 1924 bis zu seinem Tode war; Archäologische Prospektion als Methode erstmalig 1928 zusammen mit Alexander Keiller in „Wessex from the Air“ veröffentlicht	Engl. Archäologe und Fliegerbeobachter; erste Erfahrungen im WKI über Frankreich und Belgien zunächst ohne deutliche Befunde; nach dem Krieg Aufbau der systematischen Luftbildarchäologie in England – 1922 von ihm selbst als „Geburtsjahr der Luftbildarchäologie“ genannt; widmete sich intensiv den Verfahren der fliegerischen Fernerkundung, die er in Südengland praktisch selbst umsetzte
Mitte 20er	Père Antoine Poidebard (franz. Jesuitenpater als Fliegerbeobachter)	Luftbildarchäologie über Syrien – Veröffentlichung der Ergebnisse in Büchern (1934: La Trace de Rome dans le Désert de Syrie) und mehreren Aufsätzen (Antiquity). „Export“ der Methode von Nahost und Nordafrika nach Frankreich
	Maj. George W.G. Allen	Wohlhabender Ingenieur, der sich mit der Luftbildarchäologie 1930 durch eine Veröffentlichung Crawfords „infizierte“: er vervollkommnete daraufhin die Methode technisch und schuf damit das erste, unabhängige Einmann-Unternehmen. Baute Kameras selbst und spielte systematisch mit Wetter, Licht- und Pflanzenwuchs-Faktoren. Ergebnis: 2000

		unübertroffene Aufnahmen (Ashmolean Museum b. Oxford)
WK II	J. Baradez, A. Caillemer, R. Chevallier	Franz. Luftbildarchäologie über Algerien und Tunesien
1945	J.K. St. Joseph	Erste Professur für Luftbildarchäologie (Cambridge University Committee for Aerial Photography). Tausende von Erkundungsflügen über den brit. Inseln und Nordeuropa. Ergebnisse heute unter dem Akronym CUCAP bekannt (Cambridge University Collection of Air Photos).
	John Hampton (Royal Commission on Ancient Monuments, London)	Zweites bedeutendes, britisches, archäologisches Luftbildzentrum
1975	James Pickering, Arnold Baker, Derek Riley	Englische Ex-Militärpiloten und Amateur-Archäologen (enge Kooperation mit St. Joseph): alleine 1975 über 50.000 Aufnahmen. 1976 noch trockener [bis zum Erscheinen des Buchs 1977 der trockenste Sommer seit Beginn der Wetteraufzeichnungen, Anm. d. Verf.] und noch mehr Luftbilder.
50er Jahre	Dinu Adamesteanu	Umfangreiches Luftbildarchiv mit archäologisch bedeutenden Inhalten
Mitte 50er Jahre	Vitale Valvassori (ital. Ingenieur)	Entdeckt die lang gesuchte etruskische Stadtanlage Spina im Mündungsgebiet des Po (0,5 Mill. E ca. 6.-4. Jht. v.Chr.)
Ab 1959	Dinu Adamesteanu	Leitung des Inst. „Aerofoteca Archeologia“ in der Nähe von Rom; Besonderheit: neben Aufbau des Archivs mit Forschungsflügen auch luftbildarchäologische Fortbildungskurse für Archäologen. (Inzwischen weltweite Tätigkeiten dieser Schule, z.B. Iran, Afghanistan und Südamerika)
	Roger Agache	Luftbildarchäologie im Somme-Tal und über der Picardy
	Daniel Jalmain	Pariser Becken
	René Goguey	Burgund
	Jacques Dassié	Charente
	Michel Bouroux	Aisne und Monguilan in Südfrankreich
	Peter Williams-Hunt	Einige Tausend Schrägaufnahmen in der Ebene um Foggia (der Tavoliere) in nur 4 Wochen; später mit Senkrecht-Luftbildern im Maßstab 1:6000 für Auswertung ergänzt. 3 Jahre Auswerteaufwand; Ergebnis: 200 Siedlungsplätze aus dem Chalkolithikum (3. Jht. v.Chr.). Überraschende Resultate auch für römische Epoche und Mittelalter.

	Charles Leva (belg. Unternehmer)	Umfangreiches in Eigeninitiative erstelltes Luftbildarchiv zu archäologischen Fundstätten. Vergleichsweise schwierige Bodenverhältnisse in Belgien!
	W. de Vries-Metz (niederländische Archäologin)	Erzielte erstaunliche Erfolge, obwohl in den Niederlanden noch schlechtere Bodenverhältnisse als in Belgien anzutreffen sind. Nach eigenen Aussagen luftbildfotografisch nicht mehr aktiv.
	J. A. Brongers (Niederlande)	Studie zu antiken Feldsystemen
Seit 1983	J.-S. Kühlborn	Systematische Erkundung Westfalens, deren Ergebnisse am Bodendenkmalamt in Münster archiviert werden.
1912		Zufällige Entdeckung eines Bodendenkmals in Hessen während einer Ballonfahrt: eine Villa rustica bei Vilbel.
1928		Erste Systematische Befliegung in Hessen: römisches Kastell Kapersburg im Taunus
1937		Weitere einzelne Luftbilder durch die Fliegerübungsstelle Mannheim
1955		Erste Aufnahmen nach Aufhebung des Alliierten Flugverbots über Deutschland (1945-55 Verbot für Privatflugzeugflüge über Gesamtdeutschland) im Fritzlarer Becken (Hessen).
1955		Erste systematische archäologische Flüge über Bayern (Ausgrabung des keltischen Oppidum bei Manching)
Seit 1959	Günther Krahe	Archäologische Prospektion aus der Luft (1963 und 1966 mittels Bundeswehr-Hubschrauber), seit 1973 zusammen mit H. Thieme, H. Sterz Erkundung des Nördlinger Ries von Bord eines Motorseglers
1961	G. Spitzer (Österreichische prähistorische Gesellschaft)	Beginn der Luftbildarchäologie in Österreich – Luftbildgewinnung als archäologische Prospektionsmethode in Kooperation mit den österreichischen Luftstreitkräften programmatisch ausgeweitet durch H. Friesinger
1973 – 1979	Otto Braasch	Ehem. Luftwaffen-Pilot und Oberstleutnant O. Braasch entdeckt die Möglichkeiten der Luftbildarchäologie und sammelt über 4500 Aufnahmen über Schwaben, die in der Augsburger Außenstelle des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege inventarisiert werden.
70er Jahre	Archäologen und Heeresflieger bzw.	Vereinzelte Flüge

	Bereitschaftspolizei	
Beginn 80er Jahre	Uni Marburg	Lehrveranstaltung „Luftbildarchäologie“ an der Universität Marburg am Seminar für Vor- und Frühgeschichte; einige wenige Flüge in das Amöneburger Becken werden durchgeführt.
1980-82	Dietwulf Baatz (Saalburg Museum)	Organisation von Befliegungen zur Vorbereitung des Buches „Die Römer in Hessen“. Ergebnis: zahlreiche neue Entdeckungen – nicht nur zur römischen Geschichtsepoche.
Ab 1982	Otto Braasch	Sporadische Flüge über Hessen.
	Margarete Dohrn	Stadtgebiet und Umland von Frankfurt
	Heide Birley	Nördliche Wetterau
	Werner Erk	Östliche Wetterau
	Peter Groß	Umgebung von Dieburg und im Kreis Bergstrasse
	Miriam Schmidt	Vortaunus
	Peter Schöttler	Wetterau
Seit 1988	Otto Braasch und Klaus Leidorf	Systematische Befliegung Hessens mit Landtagsmitteln für intensive Befliegung
1958 – 1962	Philipp Filzinger	Stabsbildabteilung der Bundeswehr in Köln-Wahn sucht im Rahmen von Übungsflügen auch nach vorgeschichtlichen Denkmälern an der oberen Donau, auf der Schwäbischen Alb und am Neckar.
Anfang 80er	Otto Braasch	Erkundung Baden-Württembergs mit vielen Neufunden. Aufgrund der Erfolge erkundet zwischen 82-89 Rolf Gensheimer systematisch, ehe dieser von Otto Braasch erneut abgelöst wird.
Ab 1990	Otto Braasch	Leistet Pionierarbeit über den neuen Bundesländern (v.a. Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt)
Seit 1976	Rainer Christlein (Leiter der Außenstelle Landshut des Bayer. Landesamts f. Denkmalpflege)	Eigene Erkundungsflüge, bis im Jahr 1980 Otto Braasch für die systematische Befliegung in ganz Bayern beauftragt werden konnte. Resultat aus den 9 Jahren Tätigkeit von O. Braasch: 20.000 neue Fundstellen und mehrere Hunderttausend Bilder.
Seit 1989	Klaus Leidorf	Nachfolger von O. Braasch. Freiberuflich tätig für das BLfD/München. Erweitert das Luftbildarchiv auf mehr als 1.000.000 Bilder.
Weitere Namen (ohne Zeitbezug)		
	Lothar Beckel (Österreich)	Römisches Carnuntum und dessen Umgebung
	Esse Ericsson (schwedischer)	Schiffswracks aus Cockpit eines schwedischen Düsenjägers im Rückenflug erkundet und „über

	Militärpilot)	Kopf“ fotografiert!
	Hans Stiesdal (Dänisches Nationalmuseum Kopenhagen)	Zusammenstellung eines Luftbildarchivs von Bodendenkmälern quer durch Dänemark

Fig. 132 Kurzabriss der Entwicklung der Luftbildarchäologie

Wer sich in die (vergleichsweise noch) übersichtliche Luftbildarchäologie intensiver einarbeiten möchte, dem gibt Irvin Scollar im Nachwort der Luftbildarchäologiegeschichte folgende Anregungen:

Verfasser	Untersuchungsgegenstand
Benson & Mile	Archäologische Übersicht über das obere Themsetal
Agache	Als „monumental“ bezeichneter Luftbildatlas der Picardy
Elmer Harp	Probleme des Maßstabs und verwendeter Filmtypen
Bruce Bevan	Luftbild-Archäologie-Handbuch
Derek Wilson	Beste Zusammenfassung der bis 1974 verfügbaren Techniken (anlässlich eines Symposiums im April 1974 in London)
Jones & Evans	Erste, wirklich wissenschaftliche Abhandlung zu Bewuchsmerkmalen
Rinker	Filmmaterialien und ihre Relation zu verschiedenen Problemen
W. Baker	Tiefinfrarot-Abtastmethoden*
A. Tabbagh	Mathematische Darstellung von Infrarotfotografie

Fig. 133 Bedeutende Publikationen zur Herausbildung der luftbildarchäologischen Methode

Ein Zitat von besonders hohem Aussagewert belegt, dass die Zukunft der luftbildarchäologischen Forschung technisch betrachtet auf dem Propellerflugzeug verharren wird:

„Anders als Allen verließ sich St. Joseph von Anfang an auf die Hilfe der R.A.F., die ihm „im Rahmen von Ausbildungsflügen“ Maschinen und Piloten zur Verfügung stellte. Als die R.A.F. jedoch schnellere, für die archäologische Luftaufklärung ungeeignete Maschinen anschaffte, nahm diese nützliche Hilfe ein Ende. Glücklicherweise erhielt St. Josephs Arbeit keine Unterbrechung. Mit Unterstützung der Nuffield-Stiftung kaufte die Universität 1960 ein eigenes Flugzeug, eine Auster, die 1965 durch eine zweimotorige Cessna Skymaster ersetzt wurde, und stellte einen Piloten an.“ (Deuel, 1977)

Vom 5. - 8. September 2004 fand in München das Internationale Symposium „Aerial Archeology – European Advances; 10 years from Kleinmachnow“ statt. Die Veranstaltung wurde von der international orientierten Vereinigung „Aerial Archeology Research Group“

* Gemeint ist wohl das „nahe IR“ zw. 800 und 1200nm

(AARG) am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege ausgerichtet. Sie knüpfte an eine historische Zusammenkunft mit dem Arbeitstitel „Aerial Archeology in Middle and Eastern Europe“ an, die nach dem Fall des Ostblocks 1994 in Kleinmachnow* veranstaltet worden war. Von den etwa 180 aktuellen Mitgliedern der AARG waren um die 90 angemeldet, darunter v. a. für die deutsche Luftbildarchäologie bedeutende Persönlichkeiten wie Irvin Scollar und Otto Braasch. Erwartungsgemäß überwog unter den Teilnehmern die traditionsreiche englische Archäologie personell deutlich. Auch aus einigen osteuropäischen Ländern fanden sich Experten ein, wie etwa Martin Gojda (Prag/Tschechien), Lech Czerniak & Włodzimierz (Posnan/Polen), Ivan Kuzma & Branko Kerman (Slowenien). Die gesamte Veranstaltung glich einem Seminar für Luftbildinterpretation mit Hunderten von Beispielen für archäologische Befunde und Neuentdeckungen auf Schrägluftbildern über der Fläche Mittel- und Osteuropas verteilt. Auch anwesend waren die beiden routiniertesten deutschen und derzeit am engsten mit staatlichen Stellen zusammenarbeitenden Luftbildarchäologen Klaus Leidorf (München) und Ralf Schwarz (Halle).

Dazu muss angefügt werden, dass das überaus erfolgreiche archäologische Prospektionsprogramm Bayerns mit mehr als 30 000 archivierten Fundstellen in jüngster Vergangenheit drastische Kürzungen erfuhr. Der Generalkonservator des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, Herr J. Greipl, gab dazu in seiner Eröffnungsrede für diesen Reduktionsprozess absolute Zahlen an: der seit 1992 routinemäßig durchgeführte archäologische Prospektionsflugbetrieb wurde jüngst in nur zwei Jahren von etwa 450 Flugstunden auf 170 Flugstunden pro Jahr zurückgefahren. Demgegenüber stehen insgesamt etwa $500 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ für die großen, traditionsreichen englischen Luftbildarchäologie-Einrichtungen: The Royal Commission on the Ancient and Historical Monuments of Wales (RCAHMW), The Royal Commission on the Ancient and Historical Monuments of Scotland (RCAHMS) und English Heritage („The Historic Building and Monuments Commission for England“). Allerdings mit dem entscheidenden Unterschied, dass diese Bemühungen über Jahrzehnte hinweg anhaltend kultiviert wurden.

Besondere Bedeutung besitzt in diesem Kontext das National Mapping Programme (NMP), das seit über 20 Jahren etwa ein Drittel der Landesfläche im kartographischen Maßstab von 1 : 10 000 erfasst hat:

„Projects undertaken by the Royal Commission on the Historical Monuments of England in the 1980's in the Yorkshire Wolds (cropmarks) and on Dartmoor (earthworks) showed the great potential of archaeological survey from aerial photography. NMP Pilot projects in Kent, Hertfordshire, Thames Valley and Yorkshire Dales followed, and by December 2001 some 28 % of the country had been covered.“ (Quelle: <http://www.english-heritage.org.uk>, 2004)

* Zwischen Potsdam und ehem. West-Berlin, wahrscheinlich nicht ganz zufällig gewählter Tagungsort in der Nähe des Checkpoints Charlie an der Glienicker Brücke – einem der berühmtesten Brennpunkte des Ost-West-Spannungsverhältnisses während des Kalten Krieges.

Denkmalschutz in England

“What is the schedule? ‘Scheduling’ is shorthand for the process through which nationally important sites and monuments are given legal protection by being placed on a list, or ‘schedule’. English Heritage takes the lead in identifying sites in England which should be placed on the schedule by the Secretary of State for Culture, Media and Sport. A schedule has been kept since 1882 of monuments whose preservation is given priority over other land uses. The current legislation, the Ancient Monuments and Archaeological Areas Act 1979, supports a formal system of *Scheduled Monument Consent* for any work to a designated monument. Scheduling is the only legal protection specifically for archaeological sites. Which sites are monuments? The word ‘monument’ covers the whole range of archaeological sites. Scheduled monuments are not always ancient, or visible above ground. There are over 200 ‘classes’ of monuments on the schedule, and they range from prehistoric standing stones and burial mounds, through the many types of medieval site – castles, monasteries, abandoned farmsteads and villages – to the more recent results of human activity, such as collieries and wartime pillboxes.



Many prehistoric Stone Circles, such as this one in Derbyshire are already protected by scheduling. Scheduling is applied only to sites of national importance, and even then only if it is the best means of protection (see Alternatives to scheduling below). Only deliberately created structures, features and remains can be scheduled. The schedule now has about 18,300 entries (about 31,400 sites). There are 1 million or so archaeological sites or find spots of all types currently recorded in England, of which perhaps less than half might qualify for consideration for scheduling as ‘monuments’.”
(Quelle: <http://www.english-heritage.org.uk>, 2004)

Soweit sich hierzu ein kleiner methodischer Überblick geben lässt, führt der Flugbetrieb von nur wenigen Flugplätzen aus über zwei typische Grundkategorien von Denkmälern. Einerseits handelt es sich dabei um geschützte Baudenkmäler und Objekte, deren Zustand dokumentiert und fortgeschrieben werden soll (SAMs – Scheduled Ancient Monuments), und zweitens fliegt man bekannte Bodendenkmäler an, um sich einen Überblick über das herrschende Umweltregime für die Luftbildprospektion zu verschaffen („touch-stone“-Konzept; diskutiert z. B. in Cowley, 2002). Je nach Sichtbarkeit der Bewuchsmerkmale über einem solchen Trittstein wird entschieden, ob der Flug sich in der weiteren Umgebung für Neuerkundung

oder lediglich zur Fortschreibung bekannter Bodendenkmäler eignen könnte. Werden Tal-, Hang- oder Hochlagen am ergiebigsten sein?

Die beiden wichtigsten Einfluss-Summenparameter für die Entscheidungen zum Start bzw. die Erfolgsaussichten eines Fluges sind die Bodenfeuchte und der Lichteinfall. Nach O. Braasch hat sich für Mitteleuropa das typische „Rückseitenwetter“, etwa zwei Tage nach dem zyklonalen Durchzug einer Kaltfront, als besonders ergiebig erwiesen. Früh morgens und abends werden in der Literatur als optimale Befliegungszeitpunkte oft genannt, um größte visuelle Detektionsleistung zu erzielen. Doch wie man von einigen Aktiven erfahren kann, treten derartige Überlegungen operationell eher in den Hintergrund. R. Schwarz führt seine Prospektionsflüge beispielsweise unabhängig von solchen Empfehlungen und nicht nur wegen der Bildhelligkeit gerne zur Tagesmitte durch.

Meistens wird mit einem Fotografen vorne rechts neben dem Piloten sowie einem Missionsplaner auf dem hinteren Sitz geflogen, der nicht nur den Flugablauf koordiniert, sondern zugleich für die Grobnavigation anhand von Karten und Fundplatzübersichten verantwortlich ist. In einer weniger verbreiteten Variante fliegt der Luftbildarchäologe alleine los und wertet den Fotoflug anhand von Kartenmitschriften, Tonbandaufzeichnungen und – zunehmend – GPS-Tracks am Boden in vollkommener Eigenregie aus.

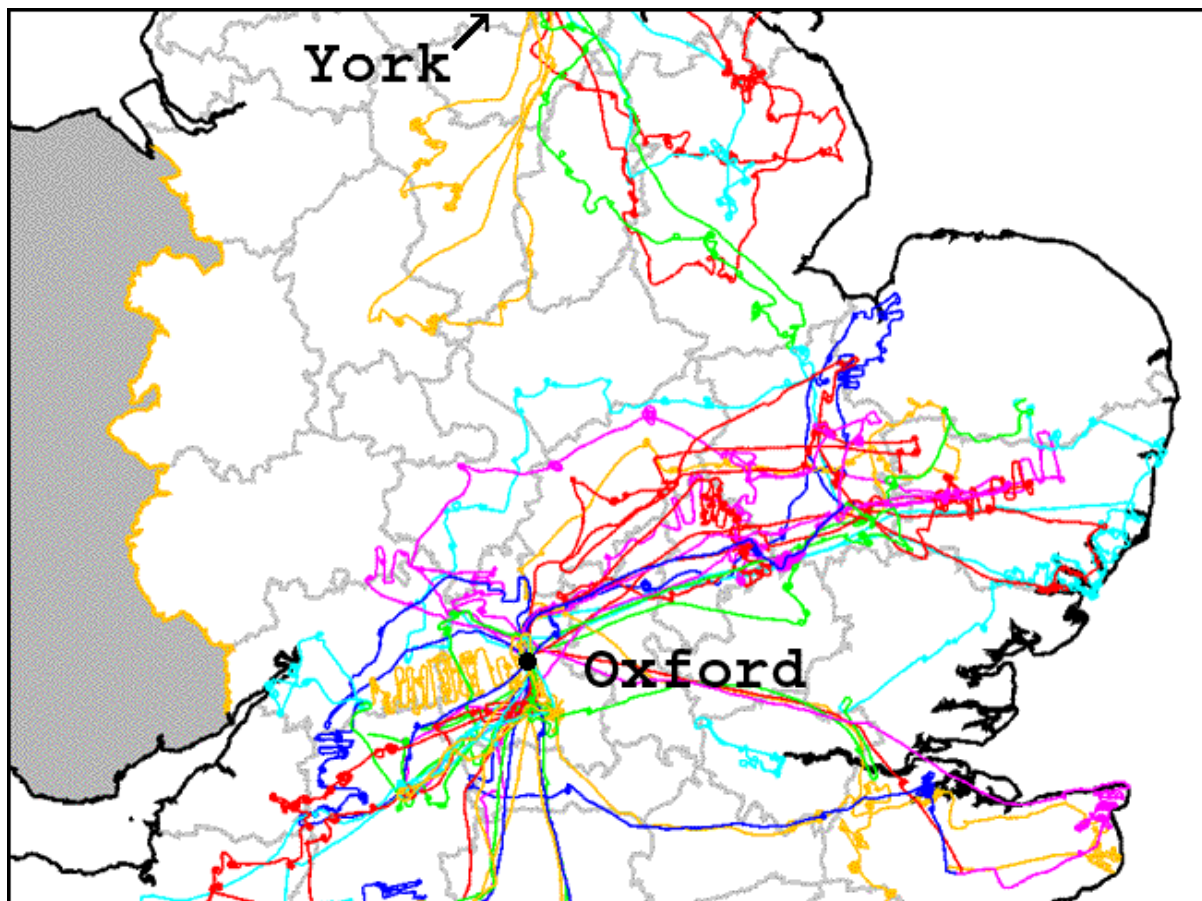


Fig. 134 Typische GPS-Tracks, ausgehend von den beiden Aerial-Reconnaissance-Aktivitätszentren von English-Heritage: York und Oxford

Bezüglich des Bestandes an aktiven Luftbildarchäologen, die selbst fliegerische Tätigkeiten wahrnehmen, ergibt sich innerhalb der Community insgesamt ein eher nüchternes Bild. Im Corporate-Plan von RCAHMW für 2005 - 2008 wird dazu ausgeführt:

„By developing a grant-aid programme for archaeological survey we have maintained a high level of output with relatively few staff, and new posts have been assigned to reader services, education and computer mapping. These adjustments have been made possible because staff members have shown great willingness to adapt to new methods and to work flexibly in order to meet changing user needs. One consequence has been that we now support a broader range of activities than ever before, all expert and some of them highly specialised. On the other hand, flexible working can only achieve so much, and in some areas there is too few staff. This poses an unacceptable level of risk. The most vulnerable activity is aerial photography, where we have only one staff member and no available back-up.“ (Griffiths, 2004)

Diesem Zustand wird augenscheinlich nicht vehementer begegnet, obwohl sich die Experten darin vollkommen einig sind, dass Witterungseinfluss, Tageszeit und Vegetationszustand in nur geringer Variabilität für vollkommen unterschiedliche Ergebnisse (Ausprägung von Bewuchsmerkmalen) verantwortlich sind. So erlangt Luftbildarchäologie nur dann methodisch volle Wirksamkeit, wenn das zu erforschende Gebiet einer gewissen Dauerbeobachtung aus der Luft mit entsprechend flexibel gestaltbaren Repetitionszyklen unterzogen werden kann.

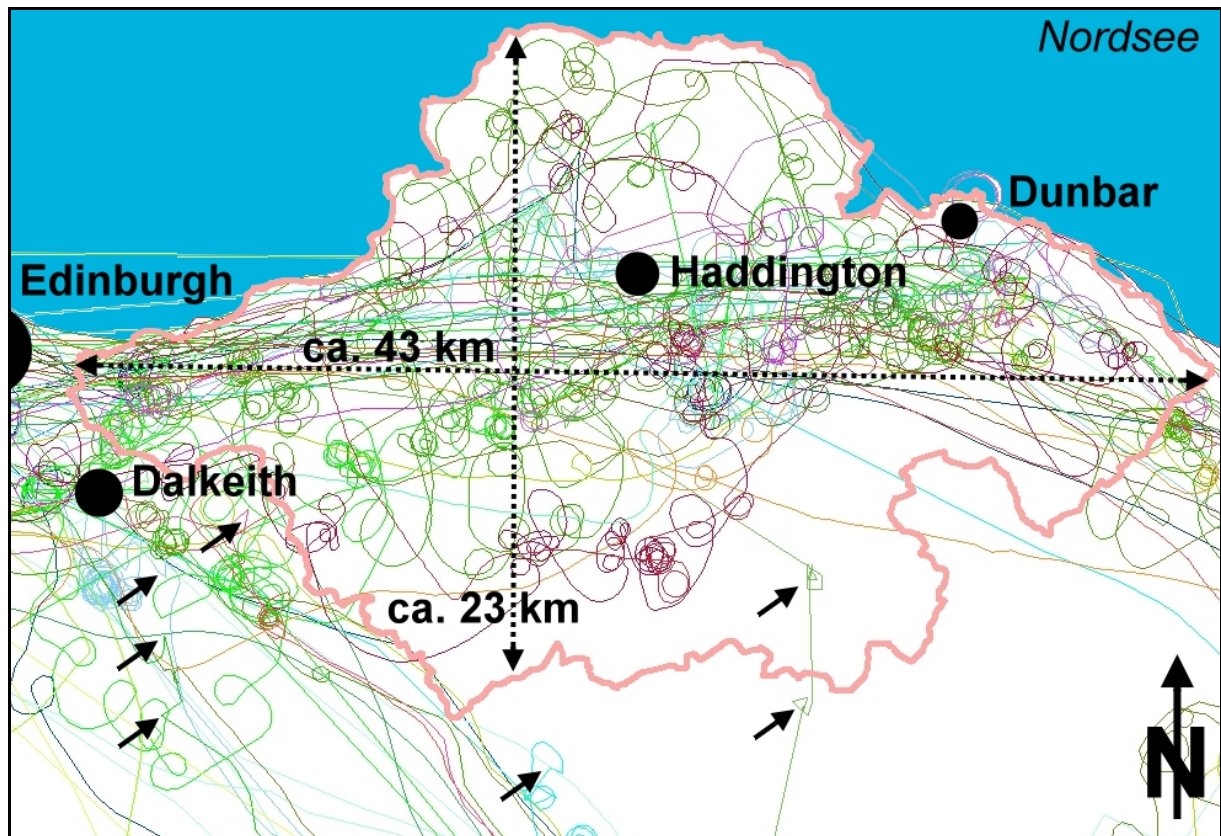


Fig. 135 Aerial Reconnaissance Aktivitäten von RCAHMS in der östlich von Edinburgh gelegenen Region „East Lothian“ seit 1993. Die Einzelflüge sind hier über farbkodierte GPS-Tracks dokumentiert (Crown Copyright: RCAHMS). Man beachte die kurzen schwarzen Pfeile: sie zeigen einige GPS-Signalstörungen an, die zu Kurs-Artefakten führen; GIS-Screendump um eigene Beschriftung ergänzt. (2005)

Während in Westeuropa routinemäßige Flüge im oberen zweistelligen Bereich durchgeführt werden, sind Kollegen aus den osteuropäischen Ländern üblicherweise gezwungen, mit nur 10 - 15 h*a⁻¹ auszukommen.

Eine weitere interessante Erkenntnis des Symposiums betrifft die Anzahl der verwendeten Luftfahrzeugmuster. In Analogie zur inländischen Flotte an Messflugzeugen werden nur wenige Flugzeugtypen eingesetzt. Im Wesentlichen arbeitet man bei der systematischen Luftbild-Erkundung in den westlichen Staaten Europas mit dem Cessna-Typ (üblicherweise C172) und in Osteuropa mit der PZL „Wilga“, ebenfalls ein einmotoriger Hochdecker, allerdings mit robustem Spornfahrwerk, Sternmotor und freitragendem Flügel. Die Wilga genießt dort sehr weite Verbreitung als Schleppflugzeug für den Segelflug und Vereinsmaschine zur Motorflugausbildung. In Frankreich kommen die weit verbreiteten Robin DR-400 „Regent“, Jodel „Remorquer“, oder betagte Morane MS 892 „Rally Commander“ zum Einsatz. Die beiden ersteren sind als entwurfsähnliche Typen mit Bugfahrwerk ausgestattet und bieten als freitragende Tiefdecker mit stoffbespannten Knickflügeln, starker Motorisierung und großer, nach vorne schiebbarer Rundumsicht-Haube günstige Voraussetzungen für wirtschaftlichen Schleppflugbetrieb. Die Morane dagegen ist ebenfalls ein freitragender Tiefdecker mit starker V-Stellung der Metallflügel sowie automatisch ausfahrbaren Vorflügeln zur Auftriebserhöhung für sicheren Langsamflugbetrieb. Das Alleinstellungsmerkmal der französischen Luftbildarchäologie besteht neben der Verwendung von Flugzeugen aus landeseigener Produktion in der Abwesenheit bekannterer

staatlicher Förderprogramme. Soweit dem Verfasser bekannt beruhen die bislang erfolgten archäologischen Luftbildarchive ausnahmslos auf privater Initiative.



Fig. 136 Eine von privat gecharterte Cessna 185RG (RG: Retractable Gear), die für die schottische RCAHMS fliegt. Die Maschine ist voll instrumentenflugtauglich – man erkennt das an der Windschutzscheibenteisungsvorrichtung vor dem Piloten. (Crown Copyright: RCAHMS)

Bei der stetig dichter werdenden internationalen Kooperation innerhalb und um die AARG ist man innerhalb der letzten Jahrzehnte einhellig zu der Erkenntnis gelangt, dass die Luftbildarchäologie eine der kosteneffizientesten Prospektionsmethoden darstellt, die überhaupt existieren. Diese Meinung über den methodischen Nutzwert wird ohne jegliche Einschränkungen vertreten und verbreitet sich daher auch außerhalb der Reihen anwendender Luftbildarchäologen zunehmend. Wie schnell und nachhaltig dieser Prozess greift, blieb durch die Hauptzielrichtung der bisherigen Studienarbeit verborgen.

Weiterhin bestätigte das AARG-Symposium 2004 die übliche, in der Literatur vertretene Auffassung, wonach die englischsprachige Fernerkundungswelt seit jeher größeren Wert auf die Luftbildinterpretation durch Spezialisten mit entsprechend eigenem, tradiertem Berufsverständnis legt.

Es wird gerne der „Bias“ in der Interpretation diskutiert, d. h. die Abweichungen von Auswertergebnissen über lange Zeiträume durch die unvermeidbaren personellen Neigungen, Befähigungen, Vorlieben und Befangenheiten unterschiedlicher menschlicher Bearbeiter. Fast liebevoll wird von handschriftlichen Notizen auf Archivadokumenten berichtet, die vom wegbereitenden Pionier stammen und Vermutungen dokumentieren, die sich erst ein halbes Jahrhundert später durch wiederholte Prospektionsflüge bewahrheiten oder erst jetzt Fragen zur Besiedlungshistorie in gänzlich neuem Licht erscheinen lassen. Dieser methodische Bias wird heute in Deutschland in der mir bisher bekannten

Fernerkundungsszene praktisch nicht thematisiert, weil der historische Bezug zur Luftbildinterpretation für das kleinräumige Erfassen von Landschaftsmerkmalen in einem grösseren Kreis so ausgeprägt nie in Erscheinung getreten ist. Wahrscheinlich stellen hierzulande die Bemühungen eines Abgleichs der kartierenden Bodenkundler während der langwierigen und umfangreichen Feldarbeiten zur Reichsbodenschätzung (30er - 50er Jahre des 20. Jh.) oder bei der Entwicklung der Mittelmaßstäbigen Bodenkarte der DDR (MMK) für die Gesamtfläche des Staates die letzten guten Beispiele für Bias-Diskussionen dar. Eine mit dem englischen Vorbild vergleichbare Kontinuität und Aufwandshöhe in Bezug auf Luftbildarchive ist mir für das europäische Festland nicht bekannt.

Zum Ende dieses Abschnitts möchte ich noch eine wichtige Vergleichsbetrachtung zur branchentypischen Herangehensweise innerhalb der luftgestützten Fernerkundung anbringen. Wie aus der historischen Analyse hervorgeht, ist der Anteil an Primärdatenerzeugern selbst unter einschlägigen Fachleuten sehr gering. Dies gilt für die kommerzialisierte Welt der photogrammetrisch orientierten Luftbildfirmen ebenso wie für luftbildarchäologische Anwenderkreise. Worin sich jedoch beide Communities massiv unterscheiden, ist die disziplinbehaftete Sichtweise auf den Forschungsgegenstand, nämlich der abzubildenden Landschaft: Während bei den Photogrammetern das Hauptaugenmerk auf der topographischen Modellbildung (Geocodierung, Mosaikerstellung, Kartenumzeichnung) bzw. der thematischen Kartographie (Merkmalsextraktion zu beliebigen – späteren – Zeitpunkten) liegt, konzentrieren sich die Luftbildarchäologen seit jeher auf die Extraktion auffälliger Landschaftsmerkmale (z. B. Cropmarks, Encirclements, Trenches, Lines, Ditches usw.) schon während des Fluges. D. h. letztere stehen zum Zeitpunkt der Aufnahmen bereits mit ihrem eigentlichen Forschungs- und Wissensgebiet in relativ engem Kontakt, während erstere nicht wesentlich Notiz zu nehmen brauchen von dem, was sie da eigentlich aufnehmen.

Bei Photogrammetern zählt die Erfassungsleistung, also die Fläche pro Zeiteinheit. Wann ausgewertet wird, spielt primär keine Rolle. Das Datenmaterial muss in einem Großteil der Anwendungsfälle lediglich unter möglichst günstigen Bedingungen (Strahlungswetter oder hohe, dünne 8/8-Bedeckung für optimale Ausleuchtung, richtige Jahreszeit, Windstille oder laminare, d. h. thermikfreie Schwachwindfelder zu optimalen Tageszeiten) erflogen werden. Demgegenüber spielt es für die Luftbildarchäologie eine zentrale Rolle, was tatsächlich vor Ort erkannt wird und fotografisch festgehalten werden kann. Mit anderen Worten: Luftbildarchäologen haben einen völlig anderen Zugang zu ihrer „Datenstrecke“! Mit dem Begriff Datenstrecke umschreiben wir die gesamte Prozesskette von der Entscheidung Loszufliegen, über die visuelle Erfassung und Vorab-Identifikation, die Aufnahmeentscheidung, die Flugnachbereitung mit Filmentwicklung (oder Digitalbildübertrag auf einen Bürorechner), bis hin zur daran anschließenden Auswertung und Archivierung.

Das ist ein bedeutsamer Unterschied, den es zu diskutieren gilt, wenn es darum geht sich ernsthaft über die Gestaltung von Umweltmonitoringprojekten zu unterhalten. Denn dieser Unterschied wirft die Frage auf, was aus einem Luftbild-Archiv tatsächlich herausgelesen werden kann, wenn zeitkritische Belange eine Rolle spielen (z. B. Überschwemmungen, Erosionserscheinungen sowie Bewuchsmerkmale für archäologische Untersuchungen). Dies gilt umso mehr bei einem flächendeckenden Archiv, das primär für eine die topographisch-kartographische Aufnahme eines gesamten Staatsgebiets ausgelegt wurde.

Im Falle der Flächenkartierung mittels Photogrammetrie gleicht der Bildflugbetrieb daher eher einer industrialisierten Massenproduktion. Der Unterschied zwischen dieser industriell geprägten Fernerkundung, wie sie sich spätestens seit dem Beginn des Satellitenzeitalters mit

den üblichen industriebegleitenden Spezialisationsprozessen herauszuschälen begann, ist im Vergleich zur luftbildarchäologischen Methode so gewaltig, dass es durchaus überraschen mag, wenn hier folgende grundlegende Behauptung aufgestellt wird: künftige Messflugzeuge werden über dieselben technischen Grundvoraussetzungen verfügen, diese beiden Methoden nahtlos miteinander zu kombinieren und situationsabhängig vor Ort augenblicklich ineinander überzuführen.

Wichtig ist dabei, das grundsätzliche Vorgehen von Luftbildarchäologen als erfolgversprechenden Modellansatz für ein Umweltmonitoring aufzufassen, das bislang im historischen Rahmen noch in keiner Weise operationell realisiert werden konnte, weil bis vor etwa 10 Jahren die technischen Voraussetzungen dafür nicht gegeben waren. Dieser Ansatz könnte als Vorbild für eine flexible, multisensorielle und multitemporale Umweltbeobachtung dienen, um die Dechiffrierung der Kulturlandschaft in einer Weise zu perfektionieren, die bislang weder methodisch noch technisch möglich war.

Im Kern geht es dabei die Standzeiten in der Luft um ein Vielfaches auszudehnen, das Fluggerät im operationellen Flugbetrieb dabei wirtschaftlicher und emissionsärmer zu gestalten, moderne Verfahren der Autogeocodierung zu verwenden und die Art der Flugdurchführung von sowohl Photogrammetrie- als auch Archäologie- bzw. Monitoringflügen anzugleichen.

Die Ausführungen in den restlichen Kapiteln werden diese Aussagen unter Angabe detaillierter Vergleiche und Beispiele näher erläutern.

Eine dritte Gruppe von Flugzeug-Anwendern im Forschungseinsatz gesellt sich nahtlos in diese Betrachtung ein und stellt sich gleichsam zwischen die beiden vorgenannten Gruppierungen. Es handelt sich dabei um die Pionierleistung erbringenden Individuen oder Firmen, die mittels Sensorik außerhalb des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums ihre Aufmerksamkeit in einem noch spezialisierteren Nischensegment ebenfalls der systematischen „Anomalie-Detektion“ widmen, um die Umwelt auf messtechnische Weise abzubilden. Die Rede ist hier von Verfahren der geophysikalischen Prospektion bzw. der Multispektralfernerkundung (Thermographie, Magnetometrie, Gravimetrie etc.). Aus Platzgründen wird hier nicht näher auf diese Communities eingegangen.

In dem Folgekapitel finden sich zunächst einige wesentliche Aussagen zum allgemeinen Leistungsanstieg der digitalen Rechentechnik, bevor obige Synthese weiter ausgebaut wird.

9 Dreh- und Angelpunkt Computer – grundlegende Betrachtungen zur Entwicklung von Hard- und Software

9.1 Allgemeine Leistungszunahme

Vielzitiert ist die Analogiebetrachtung der Wachstumsgeschwindigkeit von Computer(hardware)- und Automobilindustrie: Zugrunde gelegt seien die (amerikanisierten) Leistungsparameter Höchstgeschwindigkeit und Verbrauch eines durchschnittlichen Automobils im Jahr 1977, die jeweils mit den real angetroffenen Wachstumsfaktoren der Computerindustrie extrapoliert werden.

Zeitpunkt	Höchstgeschwindigkeit [mph]	Verbrauch [SM/Gall.]	Verbesserungsfaktor Zeitraum I	Verbesserungsfaktor Zeitraum II
1977	100	15	$(1,35)^{10} = 20,1$	
1987	2010	301,5		$(1,5)^{13} = 194,6$
2000	391146	58672		

Fig. 137 Allg. Technologieentwicklung der Computerindustrie: Wäre das Automobil seit 1977 mit derselben Innovationsrate weiterentwickelt worden wie der PC, dann hätte man damit zur Jahrtausendwende eine Distanz bis zum Mond in unter 40 min bei einem Spritverbrauch von weniger als 8 Gallonen zurücklegen können; aus einem Repetitorium zur Computer Architektur: (Carter, 2002)

Die bei obiger Betrachtung eingesetzten Technologie-Beschleunigungsparameter leiten sich aus langfristigen Durchschnittswerten ab. Hierzu existieren zwei wesentliche, allgemein formulierte Gesetze, und zwar die bekannten Gesetze von Amdahl und Moore: Das Gesetz Amdahls bezieht sich auf die Steigerung der Rechenleistung (Geschwindigkeit) von Computern. Die wesentliche Forderung bezüglich der Geschwindigkeitsoptimierung lautet, „den allgemeinen Fall“ zu beschleunigen, also die für bestimmte Aufgaben üblicherweise in Prozessoren anfallenden Schaltzustände zu beschleunigen.*

Das Gesetz lautet in der einfachsten Form:

$$\text{Geschwindigkeitszuwachs} = \frac{\text{Ausführungszeit (alt)}}{\text{Ausführungszeit (neu)}}$$

oder:

$$\text{Geschwindigkeitszuwachs} = \frac{1}{s + \frac{p}{N}}$$

mit s : Zeitbedarf eines seriellen Prozessors für die seriellen Bestandteile eines Programms,

* Diese Optimierung ist stark aufgabenabhängig und erfordert Fallbetrachtungen. Das ist der Hauptgrund dafür, warum eine Vielzahl unterschiedlichster Programme zur Ermittlung von Rechnerleistungen vorhanden sind (Benchmark-Programme). Dieser Umstand macht die Bewertung wie „langsam“ oder „schnell“ bei PCs zu einem Problem, das sich nicht mehr in einem einzigen Lösungssatz hinreichend genau beantworten lässt. Die bekanntesten Benchmarks für Prozessorleistung beziehen sich auf MIPS (Millionen Instruktionen pro Sekunde) und MFLOPS (Millionen Gleitkommaberechnungen pro Sekunde).

p: Zeitbedarf eines seriellen Prozessors für parallel abzuarbeitende Programmteile,
N: Anzahl der verwendeten Prozessoren und
 $s + p = 1$

Das Mooresche Gesetz dagegen erlaubt Vorhersagen zur Integrations- und damit Informationsdichte von Halbleitern. Speicherdichte wird hierbei als Maß für die logische Informationsdichte angegeben und hängt technologisch primär davon ab, mit welcher geometrischen Auflösung Halbleiterbahnen aus monokristallinen Siliziumscheiben (Wafers) mittels Laserlithographie herausgearbeitet werden können. Es lautet:

$$\text{Bits per square Inch} = 2^{(T-1962)}$$

wobei T ein beliebiges Jahr nach dem in der Formel auftauchenden „Startjahr“ 1962 markiert.

Obwohl Gordon Moore dieses Gesetz selbst nie anders formuliert hat, existiert auch eine weitverbreitete „Geschwindigkeitsvariante“ davon:

$$\text{Speed} = P \cdot 1,53^{(T-1973)}$$

wobei Speed: Verarbeitungsgeschwindigkeit in FLOPS

P: Preis in Dollars

T: beliebiges Jahr nach 1973

Bei dieser monetären Betrachtungsweise ist der Einfluss der Inflation noch nicht mitberücksichtigt. Tut man dies und rechnet alle Preisdurchschnitte auf das Niveau von 1973 um, so verändert sich die Basis 1,53 zu annähernd 1,58*, was einer 3-prozentigen Durchschnitts-Inflationsrate entspricht. Diese modifizierte Formel drückt dann den tatsächlichen Technologiefortschritt der Computerindustrie aus.†

9.2 PC-Basisarchitektur

Es lohnt sich noch wenigstens einen weiteren Schritt an den Computer als Arbeitshilfsmittel heranzutreten, um den Leistungsbegriff etwas deutlicher herauszuarbeiten:

Es existieren sechs leistungsbestimmende Faktoren in der PC-Grundarchitektur. Es sind dies das Mainboard, die Grafikkarte (VGA), der Prozessor (CPU), der Speicher (RAM), die Festplatte (HDD) sowie weitere (optische) Laufwerke (z. B. CD/DVD). Betrachten wir deren Einzelentwicklung bzw. ihre entscheidenden Einflussgrößen auf der Ebene des jeweiligen Subsystems:

* Vgl. obige Tabelle!

† Quelle beider Formeln: <http://home.earthlink.net/~mrob/pub/computer-history.html> (R. Munafo, 2004)

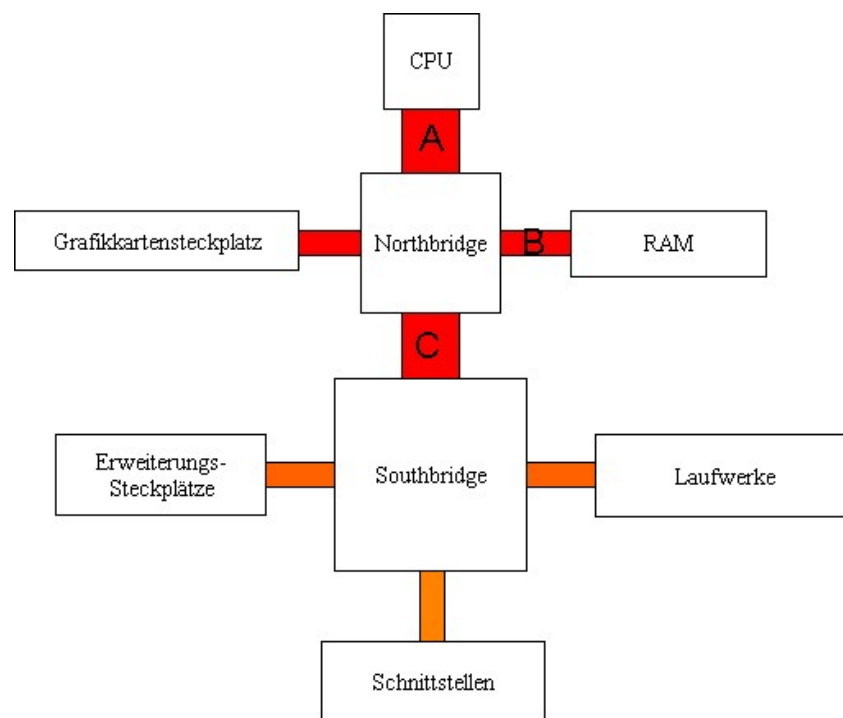


Fig. 138 Schematische Grundarchitektur des modernen „WINTEL“-PCs; die entscheidende Geschwindigkeit erwächst aus den internen Datenübertragungsgeschwindigkeiten zwischen Chipsatz und dem erweiterten Speichers von und zur CPU (A: Prozessorbandbreite; B: Speicherbandbreite; C: chipsatzinterne Bandbreite); nach: (Nickles, 2004)[†]

1. Mainboard: das Rückgrat des PCs, denn es liefert den Datenbus für die interne Komponentenkommunikation sowie die Steckplätze für System(erweiterungs)karten (z. B. Grafik-, Sound-, Video-, TV-Karte etc.), die Schnittstellen für die wesentliche Rechnerperipherie (Ein-/Ausgabegeräte wie Tastatur, Monitor und Maus) und deren Energieversorgung über einen Spannungsanschluss vom PC-Netzteil. Mittlerweile existiert ein starker Trend, alle Funktionen, die bisher auf extra Steckkarten saßen, direkt mit auf dem Mainboard zu integrieren. Typisch sind zusätzliche Controller, Sound, Grafik, Netzwerk oder mehr Schnittstellen. Dieser Trend resultiert offenbar aus zweierlei Gründen: Erstens ist so ein Gesamtpaket bei gleicher Leistung preiswerter, zweitens verschafft sich ein Mainboard-Hersteller mit integrierten Zusatzfunktionen die Möglichkeit, die Programmierung von Systemtreibern vollständig an sein Produkt anzupassen, was strategisch zu besserer Systemstabilität, besserer Qualität und damit letztlich einem zufriedeneren Endkunden führt. Des Weiteren ist dieser Trend dazu geeignet, mit Hochminiaturisierung völlig neue Anwendungsbereiche für Consumer-Elektronik zu erschließen. Wichtig zu wissen ist weiterhin, dass die Gesamtsystemleistung von der Ausgewogenheit des verbauten Chipsatzes abhängt, der im Wesentlichen durch die Leistung der sog. Northbridge und der Southbridge abhängt. Dabei verbindet die Northbridge stets den Prozessor mit dem Auslagerungsspeicher (RAM) und der Grafik; die Southbridge dagegen synchronisiert den Datenfluss zu den Mainboardsteckplätzen, den Laufwerken sowie weiteren Schnittstellen.

* Kunstwort, das aus dem Microsoft-Betriebssystem „Windows“ und „Intel“ gebildet wird. Das Wort umreißt im Wesentlichen die strategische Allianz der beiden Firmen Microsoft und Intel, von der seit Mitte der 80er Jahre die PC-Revolution massgeblich ausging.

[†] In Ergänzung zu einer didaktisch wertvollen (reichhaltig illustrierten) Informatik-Grundlageneinführung. (White, 2004)

Da es sich bei North- und Southbridge um unterschiedliche Integrierte Schaltbausteine handelt können diese unterschiedliche Qualitätsmerkmale aufweisen. Als Grundregel kann gelten: ein Mainboard verfügt im Allgemeinen immer dann über eine akzeptable Leistung, wenn beide Bausteine vom selben Hersteller *und* aus einer bewährten Baureihe stammen, worüber in der Praxis die mitunter erheblichen Preisunterschiede zustande kommen.

2. Prozessor (CPU): das meistumworbene Bauelement in einem PC. Die wesentlichen Leistungsparameter eines Prozessors sind Taktfrequenz, Anzahl der Transistoren, verfügbarer Cache-Speicher „on-Die“ (d. h. direkt auf der Prozessorplatine integriert) und Verlustleistung. Derzeit zeichnen sich zwei bedeutende Trends ab: zum einen der Übergang von der 32-Bit-Architektur hin zu 64-Bit (erster Vertreter für den Desktop-PC vorgestellt von der Firma AMD mit dem Athlon FX64, Codename „Hammer“) und durch die sich physikalisch abzeichnenden Grenzen der derzeitigen Halbleiterfertigung (Laserlithographie) der Übergang zu Mehrprozessorsystemen auf einem einzigen Chip (Dual-Core). (Beim ersten Vertreter dieser Linie bei Intel heißt diese Technologie „Hyperthreading“, kurz „HT“). Wichtig ist, zu wissen, dass oftmals ein und dieselben Prozessorkerne in einer jeweiligen CPU-Baureihe stecken und nur die Ausstattung mit mehr oder weniger Cache-Speicher spürbare Leistungsunterschiede erzwingt. Eine dramatische Neuerung stellte Intel mit dem mobilen Pentium IV Prozessor („Centrino“) vor: Der üblicherweise auf 256 bzw. 512 kB begrenzte L2-Cache (der bedeutendste von insgesamt 3 Zwischenspeichern im Prozessorkern) wurde mit einem Schlag auf 1024 kB erweitert. Der Centrino 2 wird sogar 2 MB L2-Cache umfassen. Das ist so viel schneller Speicher „on-Die“, wie er bisher nur High-End-Serversystemen vorbehalten war. Das bedeutet, dass bei geringerer Taktfrequenz genauso hohe Arbeitsgeschwindigkeiten möglich sind, da der Speicherzugriff auf den L2-Cache um wenigstens eine Größenordnung schneller erfolgt als der Zugriff auf den RAM-Speicher. Da dieser Zugriff auch energetisch günstiger ist, liefert ein Centrino-Prozessor deutlich weniger Verlustwärme als die Intel-Vorgängermodelle mit vergleichbarer Taktung. Das wiederum bedeutet höhere Laufleistung, weniger Stromverbrauch, längere Akkuzeit und flachere Gehäuse. Für die mobile Anwendung beträgt der Leistungssprung rund 100 %: Notebooks mit Centrino laufen, anstatt, wie bisher üblich 1,5 - 2,5 h, von nun an zwischen 3,0 h und 6,0 h (je nach Konfiguration). Außerdem wird durch die geringere Abwärme das Kühlproblem sehr vereinfacht. Dies begünstigt die Entwicklung von so genannten Embedded-PC-Lösungen, bei denen häufig nur noch Tastatur, Festplatte und optische Laufwerke „extern“ vorhanden sind. Alles Übrige ist komplett integriert und sitzt auf dem Mainboard, das teilweise mit passiver Kühlung auskommt. Es existieren sogar Embedded-Lösungen ohne beweglichen mechanischen Teile für die Speicherung des Betriebssystems („Disk-on-Chip“). Technisch nahe Verwandte dieser Spielart sind beispielsweise die zahllosen Modellvarianten von PDA-Geräten (Personal Digital Assistant) sowie Handheld-Personalcomputern (mehr dazu weiter unten).

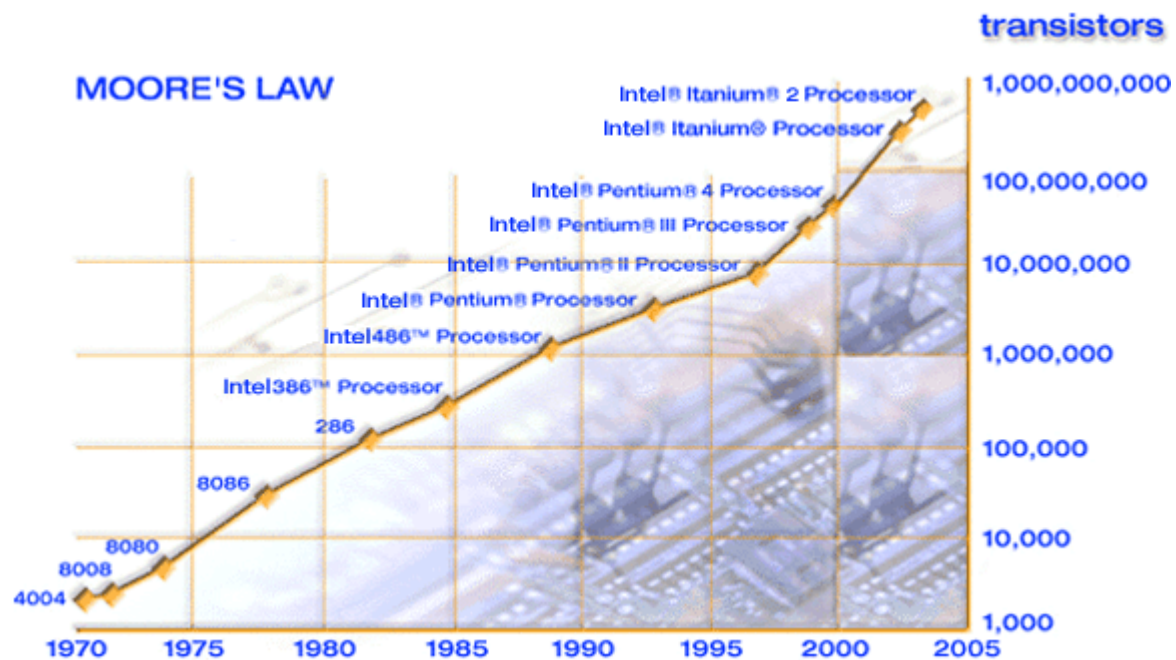


Fig. 139 CPU-Entwicklung seit den Anfängen vor 35 Jahren
(Quelle: www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm, 2005)

3. Grafikkarte (Video Graphics Array*, VGA): sie liefert die Bildschirmausgabe. Für moderne „Leistungsapplikationen“ (CAD, 3D, Animation, Videoschnitt) ist die Grafikkarte dasjenige Leistungselement im PC, bei dem neben der Grundschnelligkeit eines Systems, die hauptsächlich über die Mainboard-Prozessor-Kombination geprägt wird, am ehesten ein Leistungs-„Flaschenhals“ auftritt. V. a. die 3D-Unterstützung (hier v.a. OpenGL) ist ein nicht vernachlässigbares Kriterium. GPUs („Graphical Processing Units“; in Analogie zur CPU) erfuhren seit Mitte der 90er Jahre eine Entwicklung, die dem Markt mehr Bewegung und Herausforderungen beschert hat, als ihm lieb sein konnte: Der Konkurrenzdruck führte dazu, dass High-End-Grafikkarten oft erst monatelang nach Auslieferung mit entsprechenden Hardware-Treibern in hohen Revisionsnummern beim Endkunden zu vernünftigen, stabilen Systemen heranreifen[†]. Seit Mitte 2004 existieren Grafikchips (ATI X800XT [R423-GPU] und Nvidia GeForce 6800 [NV45-GPU]), die deutlich mehr Transistoren beherbergen als dies bei CPUs der Fall ist (160 Mill. Transistoren [R423] bzw. 222 Mill. Transistoren [NV43] gegenüber 125 Mill. bei Intel Pentium4E („Prescott“) bzw. 144 Mill. bei AMD Athlon64 („Newcastle“)). Diese Entwicklung führt allmählich zu ernsthaften Kühlproblemen für die Grafik (50-80°C sind keine Seltenheit), weshalb die weitere Anhebung von GPU- und Speichertakt (2004 ca. 500/400 MHz) in eine Stagnationsphase hineinzugeraten droht.

* Ursprünglich ein Computergrafik-Standard aus dem Jahr 1987, der bestimmte Kombinationen von Bildauflösung und Farbanzahl (Bittiefe) sowie Wiederholfrequenz definiert; das Akronym wird seither jedoch auch als Handelsrivalname verwendet.

† Grafikkartentreiber nehmen in gewisser Weise eine Sonderstellung im Hardwarebereich ein. Während alle übrigen PC-Komponenten meist mit Treiberversionen deutlich unter 10 zu ihre „Endreife“ erlangen, erzwingt die Schnelligkeit des Grafikkartenmarkts Revisionen um 40 und höher, wobei man als Enduser gefordert ist, sich die passende Treiberversion für spezifische Aufgaben selbst auszuwählen. Diese Entwicklungen laufen so rasch ab und zeitigen so viele technische Interdependenzen, dass es sich zu diesem Thema kaum lohnt systematische Einführungen in Buchform aufzubereiten.

Derzeit ist der Trend erkennbar, dass Grafikkartenhersteller für Mehrleistung höhere Grafikkartenspeicher kontingentieren, um die steigenden Anforderungen an Texturenkapazitäten in virtuellen 3D-Umgebungen zu befriedigen. 256 MB Grafikkarten-DDR-RAM entwickeln sich momentan in einer 2-3 jährigen Übergangsphase zum Marktstandard, ehe sich die Transformation zu 512MB abzeichnen wird, die bereits vereinzelt realisiert sind. (Interessant wird es, diesen Trend mit der RAM-Entwicklung zu korrelieren – siehe nachfolgenden Punkt 4). Außerdem vervielfacht man die sog. Pixel-Pipelines zur Grafikberechnung. „Pipelining“ als Konzept für die Parallelverarbeitung von Prozessoren gewinnt für die Geschwindigkeitssteigerung von Grafikkarten zunehmende Bedeutung. Technisch werden Pipelines in Form von Auffangregistern realisiert, die Instruktionen zeitlich überlappend weitergeben. Die wesentlichen damit assoziierten Begriffe sind Latency (Zeitbedarf für die Ausführung einer einzigen Instruktion [ns]) und Throughput (Rate für das Ausführen von Operationen [operations*s⁻¹]). Die resultierende Busbreite zwischen GPU und verbautem VGA-RAM spielt ebenfalls eine wichtige Rolle (derzeit max. 256bit-Anbindung serienmäßig verfügbar).

Baujahr	Merkmale
1988	Erste VGA-Karten mit 256 KByte RAM, 600 EUR
1991	HiColor-Karten mit 512 KByte RAM sind Standard, 150 EUR
1993	TrueColor-Karten mit 1 MByte RAM sind Standard, 150 EUR
1994	TrueColor, 1 MByte, AVI-Beschleunigung, 150 EUR
1995	TrueColor, 1 MByte, AVI/MPEG-Beschleunigung, 150 EUR
1996	TrueColor, 2 MByte, AVI/MPEG-Beschleunigung, 3-D-Chips, 300 EUR
1997	TrueColor, 2 MByte, AVI/MPEG-Beschleunigung, 3-D-Chips, 50 EUR
1998	TrueColor, 4 - 8 MByte, AVI/MPEG-Beschleunigung, 3-D-Chips, 50 - 100 EUR
1999	TrueColor, 16 - 32 MByte, AVI/MPEG-Beschleunigung, 2-D/3-D-Kombichip, Multimonitorbetrieb, LCD/TV-Ausgang, 130 EUR
2000	TrueColor, 32 - 64 MByte, AVI/MPEG-Beschleunigung, 2-D/3-D-Kombichip, Multimonitorbetrieb, LCD/TV-Ausgang, 100 - 500 EUR
2001	3-D-Karten mit Geometriebeschleunigung, besserer Kantenglättung und enorm schnellem Speicher, 250 - 500 EUR
2002	TV-Ausgang bereits bei Billigkarten um 70 EUR. In der 3D-Luxusklasse: Preise > 500 EUR
2003	Digitalausgang und Mehrfachbildschirm-Unterstützung auch bei Billigkarten. Hardwareunterstützte Verbesserung von MPEG4/DivX-Videoqualität.
2004	Zunehmend sehr preiswerte Graphikkarten mit VIVO (Video In/Video Out) um die 100 EUR erhältlich.

Fig. 140 Grafikkarten-Entwicklung: (Nickles, 2004)

Komponente	Takt (MHz)	Datenwortbreite	Pakete pro Takt	Datentransportleistung/ Bandbreite (MByte/s)
ISA	8,33 MHz	16 Bit	1	16
PCI	33 MHz	32 Bit	1	132
AGP 1 x	66 MHz	32 Bit	1	264
AGP 2 x	66 MHz	32 Bit	2	528

AGP 4 x	66 MHz	32 Bit	4	1056
AGP 8 x	66 MHz	32 Bit	8	2112

Fig. 141 Grafikkbussysteme (Nickles, 2004)

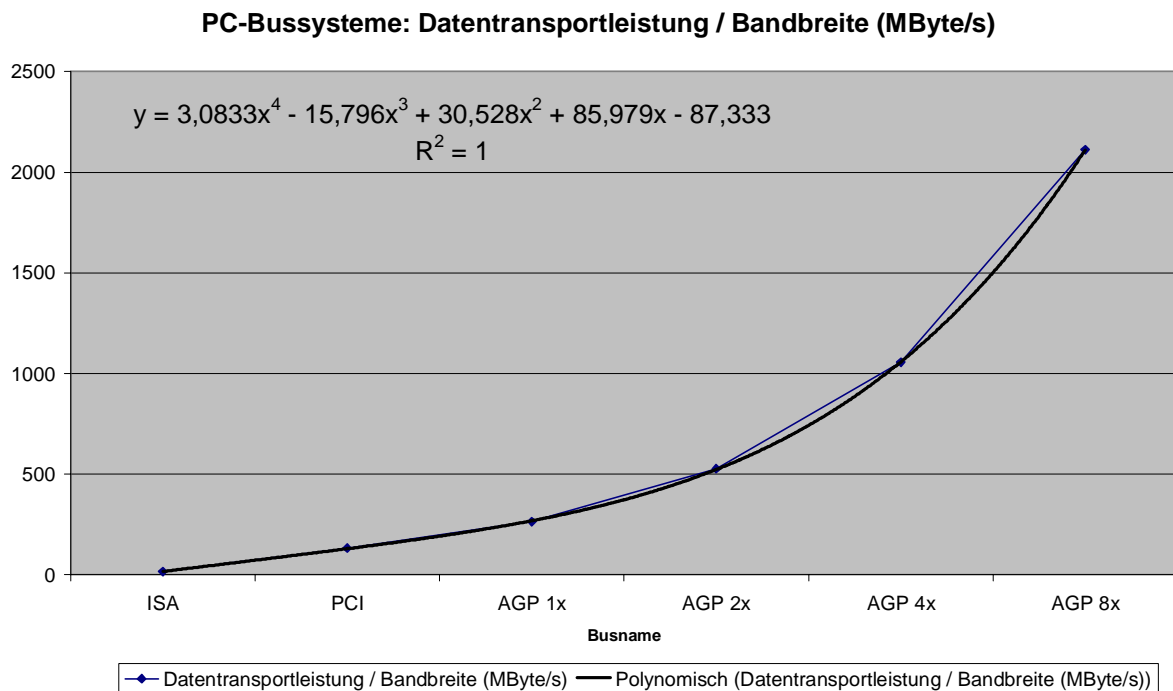


Fig. 142 Grafische Veranschaulichung Datentransportleistung / Bandbreite

Den Beschränkungen der VGA-Bandbreite versucht man durch den Wechsel vom AGP-Standard hin zum PCI-Express-Standard (kurz: PCI-E, PCIe, PCX) beizukommen, der etwa 8 GB/s Bandbreite erzielen wird.

Außerdem wurde im Jahre 2004 eine aus den frühen 90er Jahren stammende Idee der Fa. 3dfx durch Nvidia erneut aufgegriffen, bei der versucht wird durch Parallelschalten zweier Grafikkarten die Grafikleistung (theoretisch) zu verdoppeln. Das Konzept wird SLI (Scalable-Link-Interface) genannt, funktioniert nur mit speziellen Mainboards, zwei identischen PCIe-16x-Grafikkarten gleicher VGA-Bios-Revision und hat sich im Masseneinsatz noch nicht hinlänglich bewährt (Problembereiche: Energiebedarf, Wärmehaushalt, Betriebsgeräusch, Einbauvolumina). Dennoch werden etwa 60-70% Mehrleistung damit erzielt. Die Fa. ATI hat entsprechend darauf reagiert und platziert ein Konkurrenz-Konzept namens „Crossfire“ auf dem Markt. Verallgemeinert betrachtet verläuft also auch hier die Marktentwicklung analog zu derjenigen bei den CPUs: Mehrleistung wird aufgrund der zwangsläufig einsetzenden Verflachung in der Leistungskurve (physikalische Grenzen) durch Parallelisierung von ICs erzeugt. Wie man anhand von Serverarchitekturen und der Filmbranche (Hunderte von PCs im Verbund – „Clustering“ in sog. „Renderfarmen“ für Special-Effects-Bearbeitung) sehen kann, wird sich eine solche Herangehensweise künftig über sehr weite Strecken hindurch relativ problemlos aufrechterhalten lassen.

Grafikkarten sind aus der Sicht des Endanwenders die kompliziertesten PC-Komponenten, denn im Gegensatz zu den meisten übrigen Bauteilen mit relativ geringem Manipulationspielraum eröffnen VGA-Karten mit 3D-Unterstützung eine für den praktischen

Gebrauch fast unüberschaubare Vielzahl an Einstellmöglichkeiten. Wie hierbei theoretische Konzepte mit Soft- und Hardware zusammenwirken lässt sich daher nur mit erheblichem Zeitaufwand erarbeiten. (vgl. hierzu beispielsweise Watt, 2002)

4. Speicher (Random Access Memory, RAM): gegenüber Massenspeichern oder anderen non-volatilen digitalen Speichermedien der flüchtige, versorgungsspannungsabhängige Teil eines PC-Systems). RAM-Speicher besteht technisch betrachtet aus Kondensatoren, die mittels Datenleitungen und Transistoren vom Prozessor über den Systembus adressiert und in zeitlichen Dimensionen von wenigen Nanosekunden aktualisiert werden. Bis Ende der 90er Jahre war dieser Bereich aus der Sicht des Endverbrauchers relativ übersichtlich. Es existierten verschiedene, zueinander inkompatible* Speicherbaureihen (EDO, PS2, SDRAM), die jeweils in unterschiedlichen Kapazitäten angeboten wurden (nämlich in 2^x MB, mit $x < 9$). Als es maximal 64-MB-Speicherriegel gab, wurden serienmäßig oft nur 8 oder 16 ausgeliefert. Später, als es 512 MB gab, kamen Neu-PCs typischerweise mit 128 MB an den Endkunden. Allerdings wird es seit Einführung von Double-Data-Rate-SDRAM-Elementen (DDR) als durchsetzungsfähige Konkurrenz zum längere Zeit propagierten Rambus-System durch unterschiedliche Frontside-Bus[†]-Taktfrequenzen (FSB) allmählich unübersichtlich bezüglich der Speicherleistung. Das liegt daran, dass Speicherriegel identischer, äußerer, geometrischer Abmessungen intern mit unterschiedlichen Frequenzen angesteuert werden. DDR-RAM verfügt einen physischen Steckanschluss von 184-pin Modulbreite und taktet gegenüber dem veralteten SDRAM (PC100 bzw. PC133) mit effektiven 266 MHz bzw. 333 MHz oder gar 400 MHz. „Effektiv“ spielt auf die Double-Data-Rate-Bezeichnung des Speichers an und meint dabei hier können während der aufsteigenden und gleichzeitig während der abfallenden Signalflanke eines Speichertakts Bits übertragen werden. Für ein mit einem FSB von 166 MHz arbeitendes System ergeben sich demzufolge effektive 333 MHz Datentransportkapazität. Neben der kontinuierlichen Reduktion von 10 ns auf mittlerweile 5 ns (und 2 ns im besten Falle, sog. DDR3-RAM) zur Bandbreitenerhöhung existiert prinzipiell der Vorteil der Speicher-Abwärtskompatibilität für verschiedene Hauptplatinen. Im sog. Dual-Channel-Betrieb von DDR-RAM, bei dem zwei baugleiche RAM-Module verwendet werden, können durch eine technische Finesse statt der bislang üblichen 3,2 GB/s theoretisch 6,4 GB/s Datendurchsatz erzielt werden, sofern das Mainboard Dual-Channel-Unterstützung bietet.

Speichertechnologie	Leistung (Bandbreite) [GByte/s]
SDRAM PC100	0,8
SDRAM PC133	1,1
RAMBUS-RAM PC600 Single	1,2
DDR-RAM PC1600	1,6
RAMBUS-RAM PC800 Single	1,6
DDR-RAM PC2100 (DDR 266)	2,1
RAMBUS-RAM PC600 Dual	2,4
DDR 333 PC2700	2,7

* Jeder RAM-Typ benötigte Mainboardsteckplätze (sog. „Slots“) mit spezifischem elektrischen Anschluß

† Der FSB ist direkt verantwortlich für die Kommunikation zwischen Prozessor und RAM-Speicher und daher primäres Geschwindigkeitsmaß für die jeweilige Prozessor-Chipsatz-Kombination

DDR 400 PC3200 Single	3,2
RAMBUS-RAM PC800 Dual	3,2
RAMBUS-RAM PC4200 bei 533 MHz	4,2
DDR 400 PC3200 Dual	6,4

Fig. 143 Entwicklung der Speicherbandbreite (Schmid und Töpelt, 2004)

Aufgrund der relativ geringen Leistungsabweichungen unterschiedlicher RAM-Baureihen derselben Speicherchip-Generation (nur etwa 5-10%) lässt sich zusammenfassend festhalten: hinsichtlich der Speicherleistung genießt das statische Element der Speichergröße gegenüber dem Speichertakt ein gewisses Mehrgewicht. Demzufolge besteht – v. a. für grafikintensive Anwendungen – das wirksamste Leistungsrezept darin, ein Mainboard mit möglichst viel RAM-Speicher auszustatten.

5. Festplatte (Hard Disk Drive, HDD): Ursprünglich als knappe PC-Ressource geboren haben sich die Festplattenkapazitäten im globalen Nachfragestrudel rasant entwickelt. Derzeit rücken Multimedia-Arbeitsplätze für Geoinformatikprojekte allmählich in den Kapazitätsbereich von Terabyte vor. Die leistungsbestimmenden Faktoren von Festplatten sind v. a. die Zugriffszeit des Schreib-/Lesekopfes (welche i. a. 12 - 8 ms beträgt) sowie die Größe des verwendeten HDD-Zwischenspeichers (zunächst 256 kB, später 512 kB, derzeit typ. zwischen 2 und 8 MB) sowie deren Umdrehungsgeschwindigkeit, die vor insbesondere zwei nicht ganz unwesentliche Parameter direkt steuert: die Lärm- und die Wärmeentwicklung der Platte. Aus langjährigen Literaturrecherchen ist bekannt, dass mittels ölgedämpfter Lagerung der Festplatten neben der Geräuschemission auch die Anfälligkeit gegenüber mechanischen Störeinflüssen in den letzten Jahren selbst bei HDDs für den Massenmarkt dramatisch gesenkt werden konnten. Schockfestigkeiten von 80 g im ausgeschalteten Zustand, 30 g während des Betriebs und Vibrationsfestigkeiten von 9 g Dauerbelastung sind für Notebook-Platten heute Durchschnitt.*

Wenn man bedenkt, dass Apollo-Astronauten beim Start max. 12 g über wenige Minuten ausgesetzt waren und ein Pilot ohne spezielle Ausrüstung, aber mit besonderer Atemtechnik, nur etwa 4 g Dauerbelastung im Sitzen erträgt, dann bedeutet das, dass preiswerte, handelsübliche Massenmarkt-Festplatten in luftgestützten Applikationen durchaus ihre Existenzberechtigung haben werden. Ingenieure gehen davon aus, dass Straßenfahrzeuge hinsichtlich ihrer fahrphysikalischen Parameter rauerer Umgebungsbedingungen unterworfen sind als Luftfahrzeuge. Die durchschnittlich zu erwartende Komponentenausfallzeit (MTBF[†]) beträgt für PC-Laufwerke derzeit i.d.R. 50 000 h. Als Endnutzer bzw. Entwickler hat man kaum eine andere Möglichkeit als die empirische Ermittlung der tatsächlichen Ausfallrate.

Wenn diese Ausfallrate jedoch von diesem Wert auf 20 000 h mit 15 000 h Streubreite gesenkt würde, dann wäre dies angesichts der tatsächlichen jährlichen Einsatzdauer eines Fotoflugzeuges von nur Dutzenden bis Hunderten von Flugstunden tolerierbar (v. a. bei Verfügbarkeit eines entsprechenden Festplatten-Images auf einer bereitstehenden oder sogar mitgeführten Reserveplatte). Es gibt nur eine ernstzunehmende Grenze: moderne Festplatten werden i.a. für einen Einsatzbereich 4000m N.N. ausgelegt, da die Hersteller davon ausgehen,

* Meine jüngste private Festplatte (200GB, Hersteller: Seagate, beschafft: Dezember 2004) verliert laut Typenschild ihre Garantie erst bei Überschreiten von 350 g(!) – allerdings in ausgeschaltetem Zustand.

† Meantime-between-Failure: statistische Ausfallwahrscheinlichkeit von Großserienprodukten in [h].

bis zu dieser Höhe auf dem Erdboden noch menschliche Siedlungen vorzufinden. Übersteigt man diese Höhe, so nimmt die Gefahr überproportional zu, dass der auf einem Luftpolster dicht über der Datenträgeroberfläche dahingleitende Schreib-/Lesekopf durch die verringerte Luftdichte unter geringeren mechanischen Störeinflüssen gegenüber der Spezifikation aufsetzen, und damit schwere Plattenschäden hervorrufen kann.

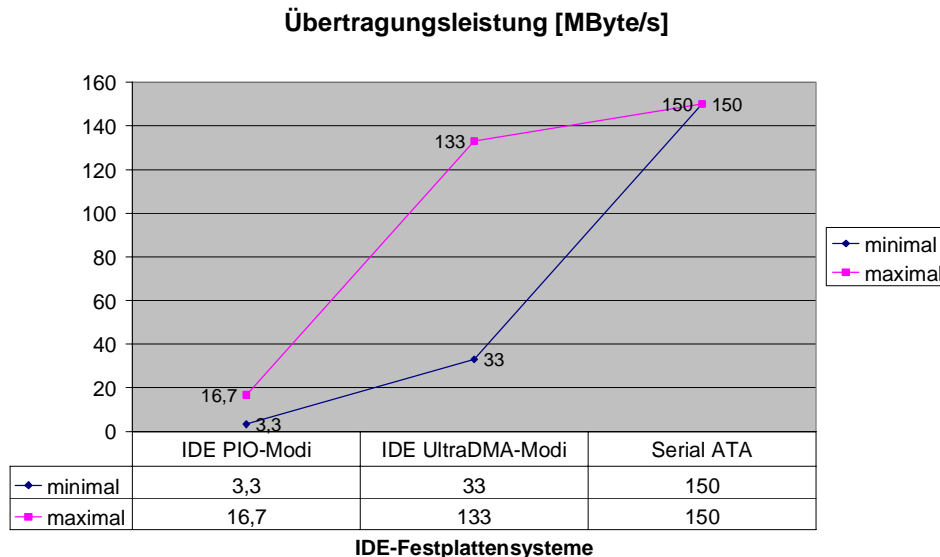


Fig. 144 Die Entwicklung von IDE-Festplatten in einem Zeitraum von 30 Jahren (Nickles, 2004)

6. Optische Laufwerke (CD/DVD): als Ersatz für das Floppy-Laufwerk, das mit 1,44 MB Kapazität heutzutage dem Datenaustausch zwischen verschiedenen Rechnersystemen in keinsten Weise mehr gewachsen ist. Die Fähigkeiten von CD und DVD in der Brennervariante zur Ergebnispräsentation bzw. Daten-Zusammenstellung als „Auskoppelung des Datenbestandes“ gewinnen innerhalb von Geoinformatik-Projekten eine entscheidende Bedeutung. Die optischen Laufwerke bestimmen weiterhin maßgeblich die Backup-Strategie, die ein integraler Bestandteil der Systemwartung und -pflege (v. a. von mobilen oder mit speziellen Aufgaben betrauten, unabhängigen Arbeitsplätzen) sein sollte. Sowohl CD (typ. 700 MB, max. 800 MB) als auch DVD (4,7 GB, mit Doubleside-Technik 8 GB und seit 2004 mit „Blu-ray“-Technologie, bei der ein kurzwelliger, erstmals blauer Laser eingesetzt wird, bis zu 16 GB), erwiesen sich gegenüber dem Bandlaufwerk (z. B. „DDS-4“ mit 4 mm Bandbreite und bis zu 70 GB Kapazität; derzeit typ. 20 GB) historisch als Speichermedium für den Massenmarkt preis-/leistungs-technisch überlegen. Deshalb wird auch zukünftig das starke Missverhältnis zwischen Datenträgergrößen und Datenkapazität derartiger Sicherungsmedien erhalten bleiben. Das wiederum drängt zur Vermutung, ob es mittel- und langfristig nicht sinnvoll wäre, serverähnliche Festplatten-Verbundsysteme (sog. Hardware-RAIDs) für eigene, IDE-basierte Low-Cost-Datenhaltungs- und Backupsysteme anzulegen. Wie aus dieser kurzen Darstellung bereits hervorgehen dürfte, sind Datenhaltungs- und Sicherungslösungen insgesamt nichttrivial, planungsintensiv und damit relativ aufwändig.

Dieser stürmische Aufschwung der Hardware entwickelte sich in wechselseitiger Abhängigkeit zur Softwareindustrie, die in den letzten 20 Jahren des 20. Jh. zu einer

dominierenden Schlüsselindustrie und zu einem Fundament des Informationszeitalters herangereift ist. Der ursprüngliche Impuls dürfte aus der Bedeutung programmgesteuerter Automaten für die Industrieproduktion erwachsen sein.

Der Haupteinfluss des Computers als Planungs- und Durchführungswerkzeug für industrielle Produktionsprozesse und Vertriebswege lässt sich anhand des Qualitäts-Begriffs gut veranschaulichen. „Qualität“ soll hier synonym für Reibungslosigkeit in den Prozessketten, Fertigungs- und Lagerstufen sowie der Güte und Passhaltigkeit des Endprodukts verwendet werden. Qualität erstreckt sich seit der Automatisierung in der Produktionswirtschaft auf ganze Ketten von Arbeitsschritten und deren jeweilige Be- und Verarbeitungsgüte, die sich sowohl geometrisch, werkstofftechnisch einerseits als auch zeit- und (ziel-)mengenorientiert andererseits darstellen. Aus der Publikation eines Laien zum Thema Luftelektrizitäts-Forschung (Geburtsjahrgang 1927) entnimmt man folgende Tatsache:

„In den Fünfziger Jahren galt eine Ausschußquote von zwanzig bis dreißig Prozent in allen Industriestaaten der Welt als normal. Unsere Forschung [gemeint ist im Darstellungskontext die allgemeine Industrieforschung, Anm. d. Verf.] führte schließlich dazu, daß die Ausschußquoten auf unter drei Prozent verringert werden konnten.“ (Baumer, 1987)

Tatsächlich führten „Six-Sigma“-Programme in industriellen Produktionsbetrieben dazu, dass die oben erwähnten 50-prozentigen und 3-prozentigen Fertigungs-Ausschüsse bzw. Leistungsausfallquoten in einem kontinuierlichen Prozess der Automatisierung und Standardisierung auf 3,4 ppm* abgesenkt werden konnten.

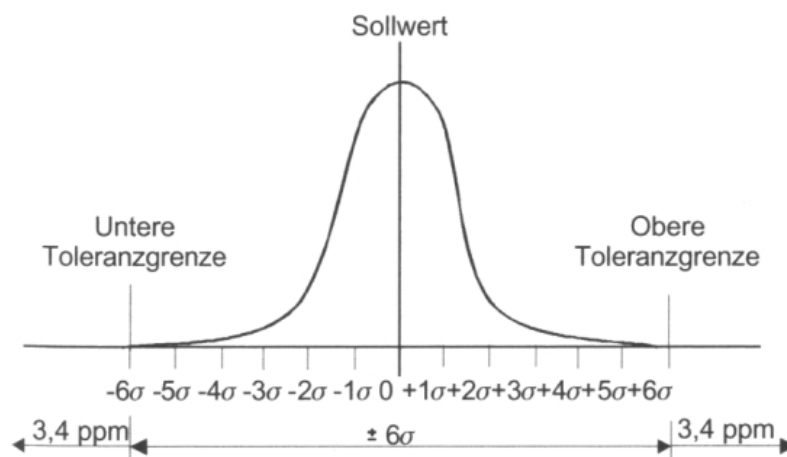


Fig. 145 Normalverteilung mit Standardabweichungen σ vom Mittelwert (Conrad, 2004)

Das entspricht einem statistischen Defektanteil von 0,0034 ‰! Man spricht in diesem Kontext auch von 3,4 DPMO („Defects Per Million Opportunities“).

* „Parts per million“.

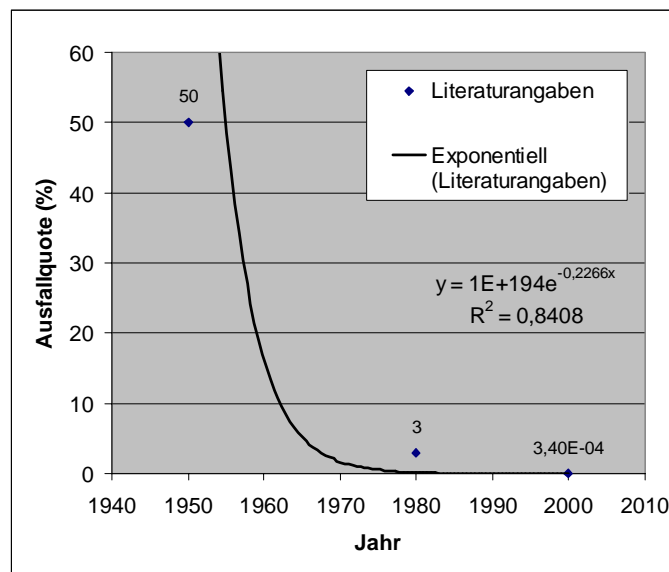


Fig. 146 Graphische Veranschaulichung des Six-Sigma-Effekts seit Beginn der digitalen Revolution

Diese Tatsachen sind deshalb so bedeutsam, da sie sehr anschaulich vermitteln, was im Hinblick auf die Zuverlässigkeit selbst komplexer Maschinen in den letzten Jahrzehnten passiert ist. Der Qualitätsgedanke blieb dabei keineswegs auf einzelne Branchen beschränkt. Er durchzieht die gesamte Wirtschaft, von der Verhüttungstechnik im Primärsektor über die Jogurtabfüllanlage in der Nahrungsmittelproduktion bis hin zum multinationalen Mischkonzern mit dem Geschäftsfeldschwerpunkt Weltraumtechnikentwicklung. Das Einkreuzen der Computer in die Produktionstechnik und die von ihnen gesteuerte Regelkreistechnik haben zu einer Leistungsexplosion geführt, die selbst unser Denken in allen Lebensbereichen grundlegend verändert hat.

Inmitten des Transformationsprozesses zur Informationsgesellschaft wird derzeit Wissen weltweit und bezüglich jeder denkbaren menschlichen Daseinsebene „in Silizium gegossen“. Der globale Softwaremarkt befindet sich hierbei auf dem irreversiblen Entwicklungspfad von einer Investitionsgüterindustrie zur Konsumgüterindustrie. Software ist per se ein Massengut. Das Ziel von Software ist stets die Massenwirksamkeit. Das Bewusstsein der breiten Masse der Endanwender wächst auf diese Art und Weise mit der Gesamtwirkung aller Marktzyklen aller Branchen – die letztlich Baukastensysteme von Algorithmen auf einer oberhalb der individuellen Einfluss- und Kontrollsphäre liegenden Ebene systematisch rekombiniert und beständig funktional erweitert.

Bezüglich der Anwendung sind die erzielbare Interoperabilität und Kompatibilität zwischen verschiedenen Softwareprodukten entscheidende Größen. Aber auch der allgemeine Trend zur Miniaturisierung ist ein bedeutender Faktor für die Computerbranche.

In wieweit diese Einflüsse bereits heute in der Allgemeinen Luftfahrt wirken, soll in den folgenden beiden Abschnitten etwas näher beleuchtet werden.

9.3 Der Einfluss von Software auf Flugplanung und –führung: GPS und Moving Map

Bis vor 20 Jahren bedurften Bildflugzeuge bei ihrer Ansteuerung der Auslösezentren im Raum einer wesentlich umfangreicheren Ausrüstung als heute für dieselbe Aufgabe noch notwendig ist. Mit dem Omega-Gerät wurden für kleinmaßstäbige Befliegungen die Wellen von weltweit acht verteilten Langwellensenderstationen mit 5000 km Reichweite ausgewertet. (LORAN-Navigation).

Das bordseitige Dopplerradar ermittelte über Phasendifferenzmessungen von bodenreflektierten Mikrowellen eine Geschwindigkeit des Flugzeugs, die mit einem Kompass-System zu einer analytischen Koppelkoordinate umgesetzt wurden (DOPPLER-Navigation). Es existierten regional unterschiedliche Systeme: In Frankreich benutzte man das TRIDENT III-System, in der Sowjetunion existierte ein RDS-2. Diese Systeme arbeiteten mit 1 - 3 m Positionsgenauigkeit, basierten auf boden- und bordseitigen Sende-/Empfangseinrichtungen für die Positionsbestimmung mittels Standlinienauswertung und unterlagen Beschränkungen bezüglich Reichweite und Fluggeschwindigkeit. Oft hatten die Bildflugzeuge mehrere unterschiedliche Höhenfeinmessenrichtungen an Bord: Statoskop, Barometer, Radiohöhenmesser, Laserhöhenmesser, Radarhöhenmesser.

Es wird alleine durch diese Aufzählung deutlich, welche Investitions-/Betriebskosten verursacht wurden und welcher manuelle Aufwand für einen störungsfreien Betrieb dieser Geräte notwendig war. Heute findet man im nächsten Trekkingladen um die Ecke ein Fußgänger-Handheld-GPS-Gerät und verfügt damit über die prinzipiell identische Grundfunktionalität, die ein solcher Gerätepark zusammengenommen ergeben hat. Und dies ohne jede regionale Beschränkung! Da GPS ursprünglich ein rein militärisches System darstellt, liegen auch die meisten denkbaren Verwendungsmöglichkeiten weit unterhalb der zugrunde liegenden Systemspezifikationen.

Neben der Eigenschaft von GPS, den Windeinfluss zu eliminieren, besitzt es auch die Fähigkeit der Verfahrensvereinfachung. GPS reduziert das navigatorische Instrumentarium erheblich. Die Bordausrüstung schrumpft dadurch massiv – im Endeffekt auf ein einziges integriertes Gerät. Wenn man beim Handheld-Gerät bleibt, kann man diese Betrachtung weiterführen und gelangt zu der Erkenntnis, dass GPS auch die Anforderungen an das Fluggerät drastisch senkt. Logische Folge: Die Flugzeuge können kleiner, leichter und mit wesentlich weniger Aufwand betrieben werden.

Was passiert, wenn ein Flugzeug ohne Funknavigationsausrüstung ein entsprechend ausgelegtes GPS-Navigationsgerät installiert bekommt? Es ist heute ohne weiteres möglich, weltweite Datenbanken von Flugplätzen, Pflichtmeldepunkten für deren An- und Abflug sowie Bodenstationen zu erwerben und diese in Flug-Handheld-GPS einzupflegen. Die Konsequenz daraus ist, dass Sie mit solch einem Flugzeug prinzipiell dieselben Navigationsverfahren ausführen können wie mit Flugzeugen auf technisch wesentlich höheren Maßstabsebenen. Ein Towerlotse, der mit Ihnen in Funkkontakt steht, während Sie seinen Flugplatz anfliegen, wird nicht erkennen, ob Sie sein Funkfeuer mittels GPS oder mittels Radiopeilung anfliegen. Höchstens ein Radarlotse könnte dies bei genauerer Beobachtung des

„Groundtracks“ bei entsprechend starkem Wind beobachten, da sich beim Radiopeilen („Homing“) zwangsläufig eine Anflugkurve zur Station ergibt, die bei einem GPS-Direktanflug nicht vorhanden ist, weil GPS stets den wahren Kurs über Grund ausgibt.

Eine derartige Vorgehensweise setzt natürlich eine entsprechende Auslegung des Mensch-Maschine-Interfaces solcher GPS-Geräte voraus. Das Handling eines GPS-Geräts muss überschaubar, flexibel und unmissverständlich sein. Welche Betriebsarten wird es dabei geben? Wo liegen die Hauptgefahren? Ein wesentliches Problemfeld erwuchs bei Einführung von GPS-Geräten in die Allgemeine Luftfahrt daraus, dass es für Piloten nicht sehr ergonomisch ist, auf alphanumerischen Displays mit nur wenigen Zeilen Anzeigekapazität Ströme von Ziffernfolgen und schwer verständlichen Kürzeln von Flugplätzen, Frequenzen und Anflugmarken zu dechiffrieren.

Das Thema „Moving Map“ ist deshalb die entwicklungsstrategische Konsequenz aus diesen Überlegungen. Moving Map entzerrt das Interfaceproblem enorm, indem man versucht, analoge Kartenverfahren unter geringen methodischen Brüchen in die digitale Welt zu übersetzen. Die dazu notwendigen Schlüsselfaktoren sind Display-Technologie (TFT), Prozessorgeschwindigkeiten, Speichermedienkapazität und Softwareumgebung (Betriebssysteme von Miniaturrechnern). Diese sind nach ökonomischer Auffassung alle unmittelbar an die Massenmärkte von Konsumelektronik gekoppelt. Abgesehen davon macht es die Visualisierungsleistung einer Moving Map künftig immer schwerer, sich zu „verfranken“*, also einen temporären oder vollständigen navigatorischen Orientierungsverlust zu erleiden. Um die dramatischen Veränderungen, die mit der GPS-Technologie gerätetechnisch einhergehen etwas näher zu erläutern, werden in den folgenden zwei Unterkapiteln praktische Beispiele dargelegt:

9.3.1 Ein Moving-Map-System auf PC-Basis: Beispiel „Flight Planner“

Noch vor der Jahrtausendwende kostete ein Flugführungs-Computer auf Moving-Map-Basis ungefähr 2/3 eines Ultraleichtflugzeuges („Digitales Kartengerät - DGK3“, Fa. Dornier, bestehend aus sog. Embedded-PC in einer TFT-Monitorbox verpackt als digitaler Kniebrettersatz für die Hubschrauberpiloten bei Heer, Marine, Polizei und Bundesgrenzschutz; Systempreis: ca. 80.000 DM).

1999 erschien der kleinste, serienmäßig erhältliche Laptop der Welt von der Firma Toshiba. Es handelte sich dabei um den „Libretto“ 110CT (höchste Ausstattungsvariante mit 233 MHz, 64 MB RAM, 4 GB HDD, Windows NT 4.0 sowie einem TFT-Touchscreen). Die Abmessungen waren damals im Vergleich zu allen übrigen mobilen PC-Varianten winzig: 210 x 132 x 34 mm. Das Gesamtgewicht betrug ohne Portreplikator nur ca. 0,9 kg. Der Preis für den Rechner belief sich auf etwa 6.500 DM.

Auf diesem Rechner ließ sich eine Software installieren, die explizit für die Flugplanung, nicht jedoch für die Flugführung ausgelegt war, obwohl sie eine entsprechende GPS-NMEA[†]-Schnittstelle zur Echtzeit-Koordinatenübertragung mitbrachte (Flight Planner,

* „Verfranken“ tut man sich seit dem Ersten Weltkrieg, in dem bei den Deutschen der Pilot „Emil“ und sein Beobachter an Bord „Franz“ hieß. (Wissmann, 1979)

† NMEA stammt von der US-„National Marine Electronics Association“ und ist das wichtigste standardisierte GPS-Datenübertragungsprotokoll.

Firma ifos GmbH)*. Die Software kostete 1999 mit der damals aktuellen deutschen ICAO-Fliegerkarte (M 1 : 500 000) 498 DM.

Der Hauptzweck von FlightPlanner besteht darin, über eine grafische Flugplanung Flugdurchführungsunterlagen nach amtlichen Vorgaben zu erstellen, wobei eine Vielzahl von typisch auftretenden Berechnungsschritten automatisch ausgeführt werden, so z.B. die Berechnung der einzelnen Winddreiecke, die resultierenden Flug- und Ankunftszeiten etc.

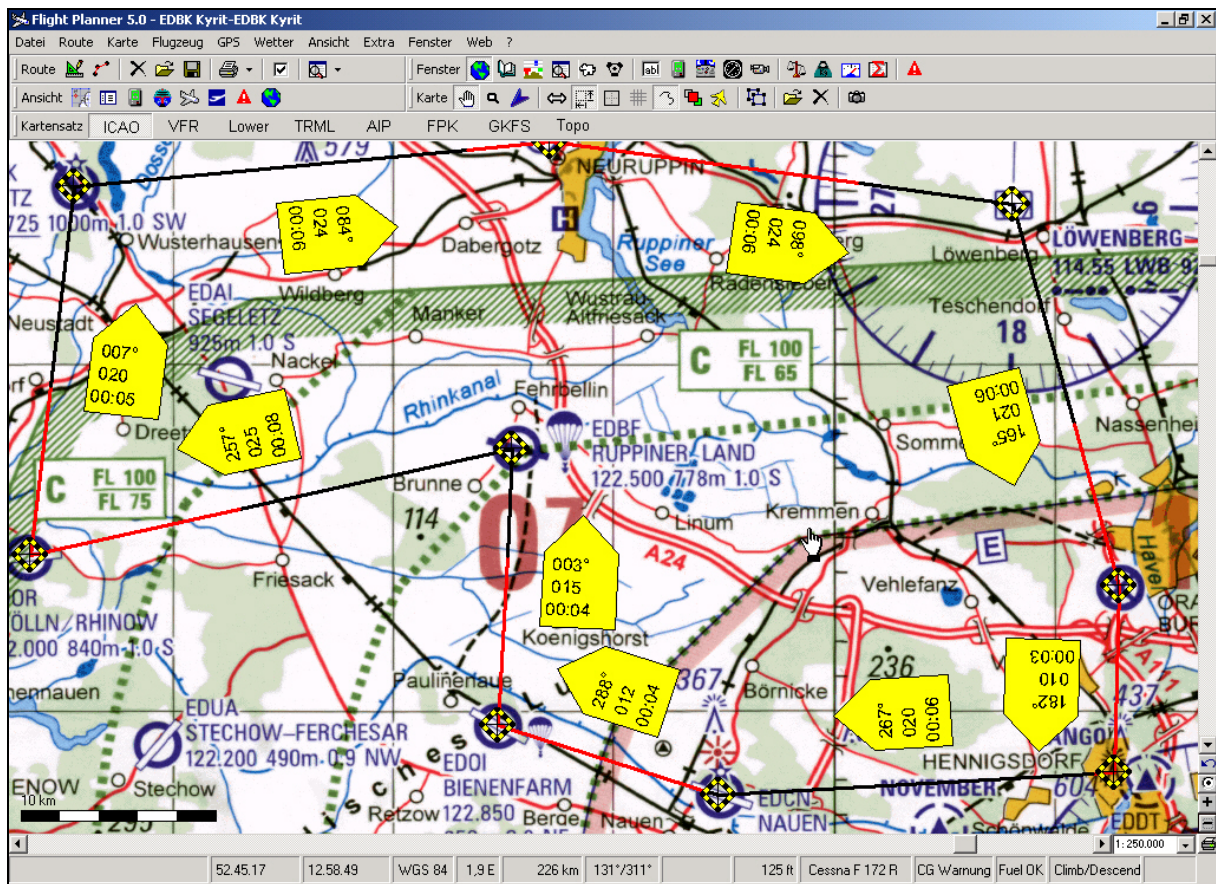


Fig. 147 Screenshot Flightplanner / ICAO mit Route/Flugplanung NW Berlins (2004)

Belatediagramme, Spritbedarfsrechner und viele weitere nützliche Funktionalitäten gehören ebenfalls zum Programmumfang. Ein wesentlicher Flugplanungsvorteil ergibt sich v.a. daraus, dass mehrere Flugkarten in verschiedenen Maßstabsebenen eingeblendet werden können, darunter sogar die topografische Karte TK50 (vgl. Fig. 149 mit dargestellter Platzrunde in Kiel-Holtenau).

* Der „Flight Planner“ ist das deutsche Pendant zum Flugplanungs-Produkt „FlightStar“ der US-Firma Jeppesen. Die beiden Programme stellen die Marktführer in diesem Softwaresegment. Jeppesen ist eine für die Allgemeine Luftfahrt bedeutende Firma, die sich seit Jahrzehnten als weltweit operierender, strategischer Informationsbroker für Luftfahrt-Veröffentlichungen mit rechtsverbindlichen Inhalten spezialisiert hat. Deshalb existieren neben dem FlightStar-Programm auch Versionen für die Instrumentenflugplanung („FlightStar IFR“ bzw. „FlightStar Corporate“). Die Firma veröffentlicht weiterhin eine spezielle Sichtflugkarte, die sich international bei den Piloten großer Beliebtheit erfreut: die Jeppesen VFR+GPS, sowohl analog als auch digital erhältlich. Besonderheit: Das Format der Jeppesen VFR+GPS ist kompatibel zu FlightPlanner, wodurch beide Programme als Universal-Frontend für prinzipiell weltweite Sichtflugplanung und -navigation angesehen werden können.

Verwendet man das Programm im Flugführungsmodus (mit angeschlossenem GPS-Empfänger, so lässt sich die Maßstabsproblematik unterschiedlicher Kartenwerke und Anflugblätter drastisch abschwächen, indem FlightPlanner automatisch während eines Anflugs auf eine Piste immer mehr Details einblendet (gestuft von M 1:500.000 bis M 1: 20.000). Die nächste Abbildung zeigt beispielsweise die Anflugkarte für den Flugplatz Neumünster. Hierbei wurde jedoch nicht mit der MovingMap geflogen, sondern lediglich ein GPS-Gerät zur Trackaufzeichnung (Logging) mitgeführt und der Flugweg später in die Karte eingespielt. Insgesamt erwachsen aus den Programmfunktionalitäten vielerlei Verwendungsmöglichkeiten.

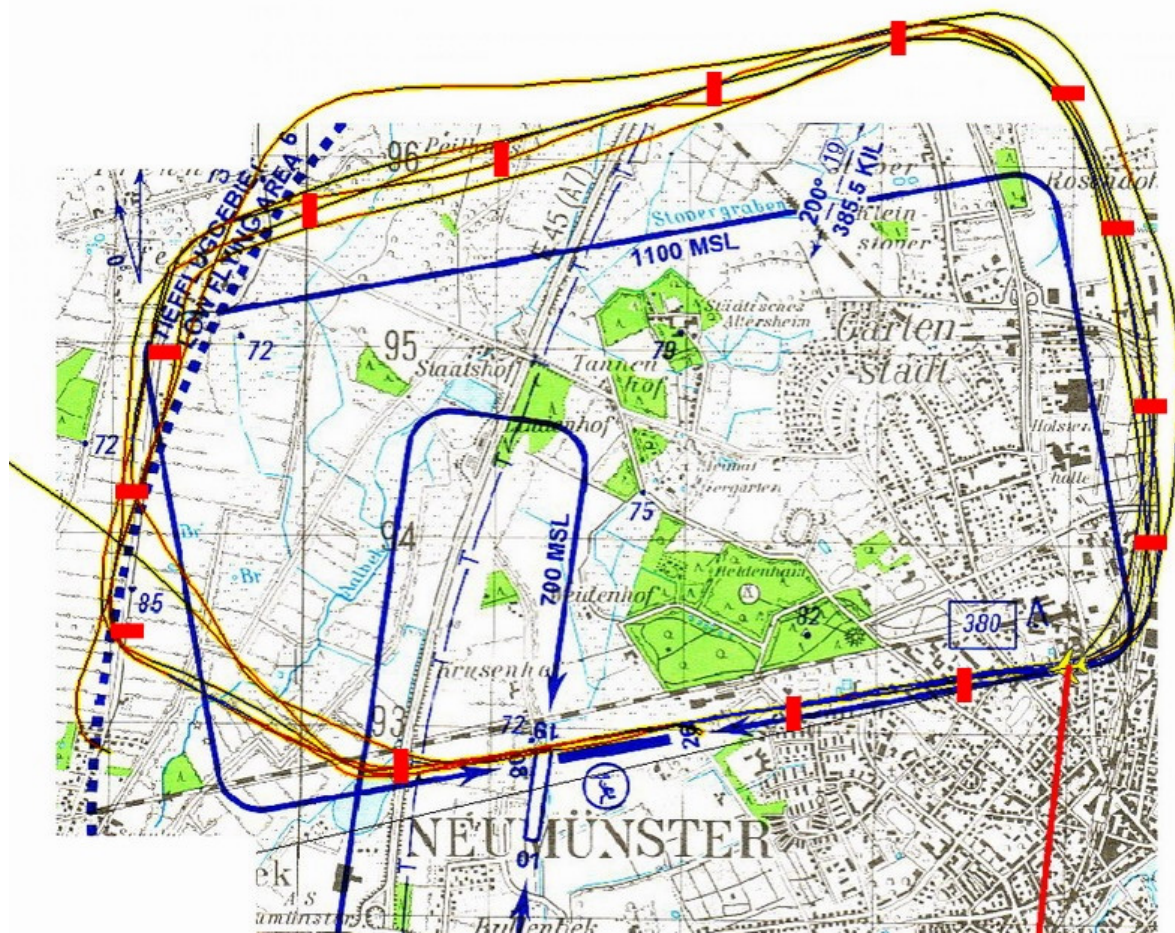


Fig. 148 „Spurtreue“ in rein visuell geflogenen Platzrunden (ohne GPS-Referenz) – amtliche Anflugkarte laut (AIP), FlightPlanner-Darstellung, (M 1:23.000); rote Balken über GPS-Track: 100m Breite; Flugplatzeinweisung auf G109B (Pilot: G. Winkler, Begleiter: P. Machalinski, 5.7.2004)

Über ein serielles Verbindungskabel ließ sich über den Portreplikator des Libretto-Notebooks ein Handheld-GPS anschließen. Zugunsten eines geringen Anschaffungspreises war gegenüber einer ganzen Palette verfügbarer Flug-GPS-Empfänger die Einsteigerklasse Fußgängerhandheld-Geräten der Fa. Garmin gewählt worden: das „eTrex Summit“ mit integriertem barometrischen Drucksensor und einem elektronischen Kompass (500 DM).

Die Entscheidung dafür war nur sinnvoll begründbar geworden, nachdem sich durch umfangreiche Literaturrecherche in jeweils aktuellen Fachzeitschriften allmählich abgezeichnet hatte, dass die Elektronik-Hardware-Entwicklung für – im weitesten Sinne –

messtechnische Anwendungen in etwa demselben Grundschemata folgt, wie dem der PC-Industrie als Sonderfall: Es existieren zwei oder drei Dutzend Hersteller für Grafikkarten und Mainboards, jedoch ist die Zahl der verfügbaren und tatsächlich verbauten Chipsätze weitaus geringer, da sich nur wenige Technologieführer im Bereich Chipsatz-Herstellung auf dem Markt als solchem (über bestehende Vertriebskanäle, Patente und dergleichen) behaupten können. Ein berühmtes programmierbares Grundmodell stammt z. B. von Rockwell und ist einsetzbar für Geschwindigkeiten bis 1024 km/h. Die gewünschte Software-Umgebung und weitere Funktionalität bestimmt dann der weiterverarbeitende Geräte-Hersteller. Blickte man um die Jahrtausendwende in diese GPS-Welt mit einer gewissen inneren Distanz, so kam man immer zu demselben Ergebnis: ein DGPS-fähiger, 12-kanaliger Parallel-Empfänger würde als GPS-Grundausstattung das technologische Maß der Dinge darstellen. (Ein Parallel-Empfänger verfügt für jede zu errechnende Positionslösung eigene Hardware „onboard“. Multiplexer- und sequentielle Empfänger sind weniger leistungsfähig, dafür aber preisgünstiger. 12-kanalig bedeutet das simultane Empfangen von GPS-Signalen von 12 verschiedenen Satelliten, wobei der Empfang von 4 Satelliten Mindestvoraussetzung ist, um physikalisch eine dreidimensionale Koordinate ohne Mehrdeutigkeiten zu errechnen. Es hatte sich auf dem Markt eine Angebotspalette von 5- bis 12-kanaligen GPS-Geräten etabliert, um zeitlich beständige Navigationslösungen zu errechnen. (vgl. (DePriest, 2003))

Dies alles hat mit dem möglichen Signalverlust zu tun, der auftreten kann, wenn die GPS-Empfangsantenne in Kurvenbewegungen wegkippt (siehe Fig. 149) oder zeitweilig durch Objekte in der quasi-optischen Satellitenstandlinie verdeckt wird (z. B. Bewegen im innerstädtischen Bereich).

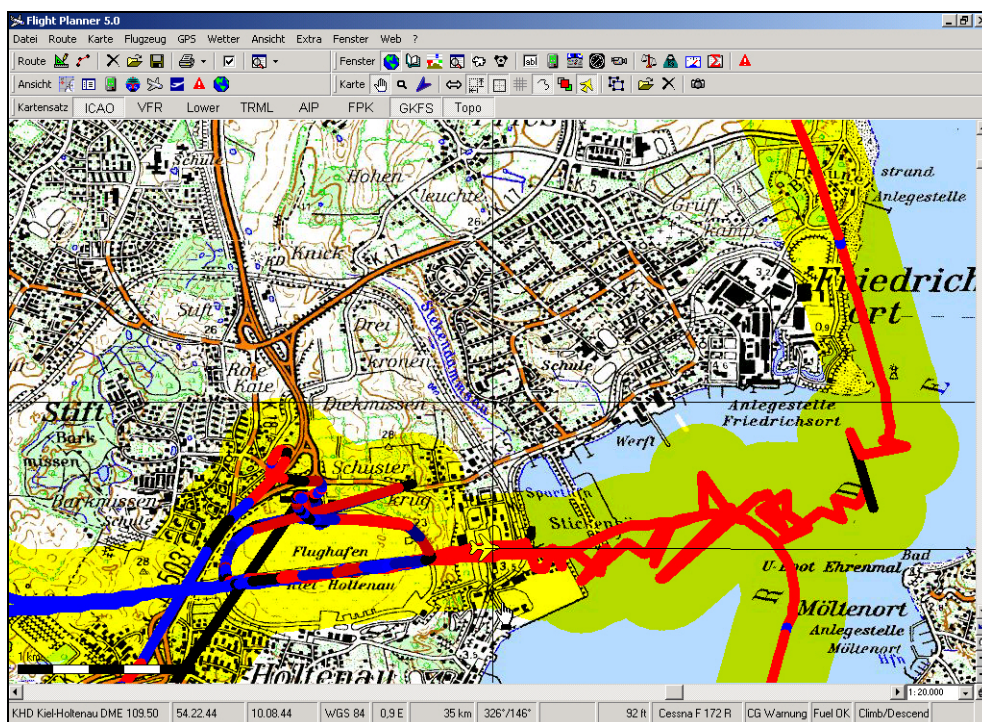


Fig. 149 Der Ausnahmefall: „Wegkippen“ des GPS-Signals durch einen frei über dem Instrumentenbrett einer Cessna liegenden GPS-Empfänger (Platzrunde und Abflug Kiel-Holtenau). Durch Starreinbauten von Empfängern ließen sich solche Track-Verzerrungen deutlich reduzieren. (2004)

Der Rest an GPS-Themen betrifft unterschiedlichste Modellgruppen (Datenbanken, Displays, Zubehör etc.), ist im Endeffekt Produktpflege- und Zielgruppenpolitik und fällt damit in den Bereich des Marketings.

Zwei fertig konfektionierte GARMIN-Kabel kosteten für die PC-Anbindung bzw. das Andocken an eine KFZ-Zigarettenbuchse weitere 200 DM. Das Thema Kabel und Konverter ist ein besonderes. Auf den kleinsten Nenner gebracht bedeutet es: Interkonnektivität kostet!

Resultat: für 7.700 DM war es in 2004 möglich nach einigem Recherchieren und Experimentieren auf einem „Nebenbeschäftigungsfeld“ ein voll funktionsfähiges Moving-Map-System in der gewohnten Windows-Betriebsumgebung zu schaffen; ein Projekt, das zum Zeitpunkt des Rechnererwerbs von nicht wenigen Personen als nicht sehr aussichtsreich eingestuft worden war.

Auf Tausenden Kilometern Testfahrten quer durch Deutschland (wann immer sich die Gelegenheit dazu ergab: auf langen Autobahnstrecken während der Freizeit oder auf Dienstfahrten mit anderen Aufgabenstellungen zu begleiten) hat sich das System im Testbetrieb als sehr zuverlässig herausgestellt.



Fig. 150 VW-Bus mit Toshiba-Laptop anlässlich einer Tagungsexkursion (AKBoGeo-Tagung am ÖZK, 2004)

Das empirische Ergebnis ist höchst zufriedenstellend. Die Applikation ist insgesamt nur einmal im laufenden Betrieb „abgestürzt“, was auf einen Bedienungsfehler während der Software-Einarbeitung zurückzuführen war. Ansonsten ließ sich das Programm reproduzierbar nur dann nicht initialisieren, wenn das NMEA-Signal an der RS232-Schnittstelle anlag, bevor das Betriebssystem des Laptops gebootet wurde. In so einem Fall wurde die Software-Schnittstelle blockiert und konnte erst durch einen Neustart wieder aktiviert werden. Dieses Problem-Verhalten kann jedoch mühelos durch die richtige Einschaltreihenfolge ausgeschlossen werden. Entsprechende Telefonate mit dem Softwarehersteller bestätigten die Richtigkeit des gewählten Vorgehens. Dies ist im Detail aufgezeigt auch der Grund dafür, warum in Flugzeugen „Checklisten“ für einen sicheren Betrieb unabdingbar sind. Man ist seit 100 Jahren aus systemintegratorischer Sicht heraus gezwungen, mit diesem „Kunstgriff“ eine ausreichend stabile Verhaltenskompatibilität komplexer Systeme zu erzeugen. Diese allgemeine technische Operabilitätshürde wird sich auch künftig nicht anders überwinden lassen.

Erstaunlich mutet auf den ersten Blick evtl. an, dass eine Software mit aktueller Datenbasis und allen installierten Produktaktualisierungen (Software-„Patches“) auf einer Hardware reibungslos funktioniert, die bereits 5 Jahre alt ist, was gemessen an üblichen Zyklusdauern der Hardwarebranche eine überaus lange Zeitspanne darstellt.

9.3.2 Ein hochminiaturisiertes Moving-Map-System auf PDA-Basis: Beispiel „PocketStrepla“

Man kann heute Navigationssysteme serienmäßig sogar noch kleiner bauen, als oben beschrieben. Dies ermöglicht das Konzept des „Personal Digital Assistant“ (PDA). Der erste PDA mit weiter Verbreitung war der „Newton“ (Firma Apple) und erschien zu Beginn der 90er Jahre. Er war der erste leistungsfähige Handheld-Computer, der mit eigenem Betriebssystem („Newton Message Pad 100“* ff.). Charakteristische Kennzeichen für PDAs waren der Verzicht auf einen CRT-Monitor und eine Tastatur. Stattdessen wurde mit einem Stift auf einem Display getippt oder Notizen per Handschrifterkennung eingegeben. 1990 war diese Handschrifterkennung noch nicht sehr fortschrittlich und zuverlässig. Deshalb erfolgte der Durchbruch von PDAs erst im Jahre 1997 mit dem Modell „Pilot“ (Firma Palm Inc.), ebenfalls mit eigenem Betriebssystem („Palm-OS“).

Die Firma Microsoft erschloss mit dem Betriebssystem „Windows CE“ (später darauf aufbauend „PocketPC200x“, mit „x“ für das Erscheinungsjahr) eine größere Nutzeranzahl von PDAs, da es die Aussicht eröffnete, Computer im Brieftaschenformat in der gewohnten Office-Arbeitsumgebung (Word, Excel, Outlook, InternetExplorer etc.) mobil zur Verfügung zu stellen. PDAs zählt man zu einer Klasse von Computern, die auch „Embedded Systems“ genannt wird, weil unabhängig von Hardware-Hersteller und Betriebssystem diese Miniaturcomputer keine Massenspeicher mit rotierenden Platten und keine aktive Prozessorkühlung benötigen. Das Betriebssystem sitzt vielmehr auf einem ROM-Speicherbaustein und zeichnet sich dadurch aus, dass es ohne spürbaren Zeitbedarf für eine Bootsequenz instantan mit dem Einschalten des Geräts arbeitsfähig ist. Diese Eigenschaften erschließen Embedded-Systemen völlig neuartige Einsatzgebiete, die heute noch nicht annähernd entwickelt sind (z. B. Textilintegrierte Computer).

Eine sehr leistungsfähige Produktlinie wurde von der Firma Compaq[†] mit der „iPaq“-Serie geschaffen. Diese PDAs erschienen in mehreren Baureihen sowohl mit RISC[‡]-Prozessoren der Firma ARM („StrongARM“/206 MHz) als auch mit „Xscale“-Prozessoren der Firma Intel (400 MHz bzw. 624 MHz). Das Modell iPaq „H3850“ bildete für die deutsche Firma „8F Computer“ technische Grundlage eines sehr kleinen Navigationssystems, das speziell für Segelflieger entwickelt wurde. Das Programm Pocket-StrePla wurde auf der AERO-Luftfahrtmesse in Friedrichshafen im April 2003 auf den Markt gebracht. Gegen Mitte 2004 erfolgte der Durchbruch von PDAs für GPS-gestützte Navigationsaufgaben als Massenmarktanwendung.

* Das Newton OS war das erste vollständig in C++ geschriebene Betriebssystem (Geschwindigkeit, Kompaktheit)

† Compaq wurde zwischenzeitlich von Hewlett-Packard übernommen.

‡ RISC: Reduced Instruction Set Computer



Fig. 151 Der Compaq iPaq als Grundlage für ein Moving-Map-System. Links abgebildet ist ein Foto vom Firmenserver (8F Computer), rechts ein Bildschirmfoto vom Rechner des Autors: Gezeigt wird ein iPaq-Simulatorprogramm, das sich über das Hauptprogramm „Strepla“ starten lässt.(2005)

Im Bild oben rechts ist eine willkürlich herausgegriffene Track-Datei mit einem Flug über Flensburg vom 18. Januar 2004 von A. Kroh geladen (Daten-Quelle: siehe Erläuterungen auf den nachfolgenden Seiten). Neben der Deutschen Generalkarte im Maßstab 1 : 200 000 im Hintergrund erkennt man in grün den Groundtrack, in gelb eine Standlinie zu einem Flugziel sowie zahlreiche kleine Informationsfenster, die mittels Finger auf dem Touchscreen ein- oder ausgeblendet werden können. Die Karte ist in verschiedenen Stufen zoombar. Das wichtigste Infowindow (links oben) listet Peilung und Entfernung zum nächsten Waypoint auf (hier: Startflugplatz Flensburg-Schäferhaus, 17° links voraus in 5,66 km) sowie die voraussichtliche Anlandungshöhe über Grund (112 m). Die momentane Flughöhe beträgt im Beispiel 316 m. Aufgrund der GPS-Kreisflug-Daten hat der Rechner ermittelt, dass Wind mit 16 km/h aus SSW herrscht.

Ich möchte einen kleinen Überblick vermitteln, welchen Organisationsgrad man heute im Segelflugsport mithilfe von GPS-Technologie erreicht hat. Die Software „StrePla“ (Abkürzung für „Strecken(flug)planung“) soll dem Segelflieger ermöglichen, am Leistungsflugsport teilzunehmen, indem sie es gestattet, Dreiecksflüge zu planen und durchzuführen, die nach nationalen und internationalen Regeln computergestützt ausgewertet werden. Die Ermittlung der Streckenflugeistung ist in der Segelfliegerei eine keineswegs triviale Aufgabe. Ein motorloses Flugzeug ist während des sog. Überlandfluges an die thermische Konvektion gebunden, die durch Sonnenerwärmung oberflächennaher

Luftschichten hervorgerufen wird. Deshalb können Segelflugzeuge nur in Ausnahmefällen drei Wendepunkte in der Landschaft über größere Distanzen hinweg auf jeweils gerader Linie anfliegen und umrunden. Aus diesem Grunde wurden Regelkataloge erschaffen, die innerhalb verschiedener Wertungsdisziplinen eine objektive Vergleichsbasis für solche Flüge und ihre zugehörigen Streckenlängen erzeugen (FAI-Dreiecke).

In zwei großen, über Deutschland ausgetragenen Wettbewerben geht es darum, innerhalb einer Saison die meisten Streckenflugkilometer zu sammeln. Es handelt sich dabei um die „Deutsche Streckenflugmeisterschaft“ (DMSt) und den internationalen „Online Contest“ (OLC), der hierzulande vom Luftfahrtmagazin Aerokurier ausgeschrieben und gesponsert wird. Eine zentrale Anlaufstelle im Internet bildet der Server <http://www2.onlinecontest.org/>, auf den jeder teilnehmende Pilot am Ende eines Flugtages eine verschlüsselte GPS-Flugdatenrekorderdatei automatisiert und kostenlos hochladen kann. GPS-Navigation wird somit zu einem Flugbeurkundungssystem. Nur spezielle GPS-Hardware* ist für den Wettbewerbseinsatz erlaubt bzw. fähig, solche von der International Gliding Commission zertifizierte „igc“-Dateiprotokolle zu schreiben. In Deutschland existiert z. B. ein besonders robuster und einfacher GPS-Empfänger namens „Volkslogger“ (Firma Garrecht), der während des Fluges Navigationsdaten speichert bzw. auf einem zweizeiligen, grünen LED-Display in einem einfachen Menü ausgibt. Nach einem Flug wird die igc-Datei vom GPS-Empfänger ausgelesen und in die Flugplanungssoftware zur Analyse importiert. Die Wertungsmeldung erfolgt anschließend über StrePla in dem oben bereits genannten automatisierten Verfahren.

In Deutschland wurde mit Hilfe der GPS-Flugbeurkundung in den letzten beiden Jahren folgende Statistik erfolgen:

Jahr	Anzahl Teilnehmer	Flüge	Gesamt-km	Best-platzierter	Flüge	Strecken-kilometer	Ø-km
2003	6701	41108	11.519.024,1	N. Kries	62	29.314,03	472,8
2004	7155	41021	10.955.191,5	M. Pfennig	73	22.817,92	312,6

Fig. 152 OLC-Statistiken Deutschland (Quelle: <http://www2.onlinecontest.org/>, 2005)

Nur zum Vergleich: Die Nord-Südausdehnung von Deutschland beträgt etwa 800 km. Auf diese Distanz umgerechnet haben allein die Wettbewerbs-Segelflieger 2003 statistisch das Land 14 400-mal überflogen. Darin ist der Vereinsschul- und Ausbildungsbetrieb noch nicht enthalten. Willkürlich aus dem Teilnehmerfeld herausgegriffen konnte R. Walter (FSV Grabfeld auf ASW 20, 18-m-Klasse, Heimatflugplatz Saal, Bad Neustadt-Saale, Hassberge) während des „Jahrhundertsommers“ 2003 in 52 Flügen für sich alleine bereits 20 703,91 km verbuchen. Das bedeutet durchschnittlich eine Streckenleistung von knapp 400 km pro Flug. Jeder Kalenderwoche des Jahres stand also statistisch ein Flug gegenüber; wobei R. Walter in Wirklichkeit aber nur vom 23. Februar 2003 bis zum 12. Oktober 2003 flog. Die persönliche Saisondauer betrug also nur etwa 7 Monate. Ein noch beeindruckenderes Bild ergibt sich, wenn man die Leistungen im Streckensegelflug über einen längeren Zeitraum zurückverfolgt. Wir sehen anhand der folgenden Darstellung, dass etwa die Hälfte aller deutschen Segelflugzeuge für den sportlichen Wettbewerb eingesetzt wird.

* Anbieterfirmen sind beispielsweise Peschges, Filser, Zander, Cambridge, Garrecht etc.

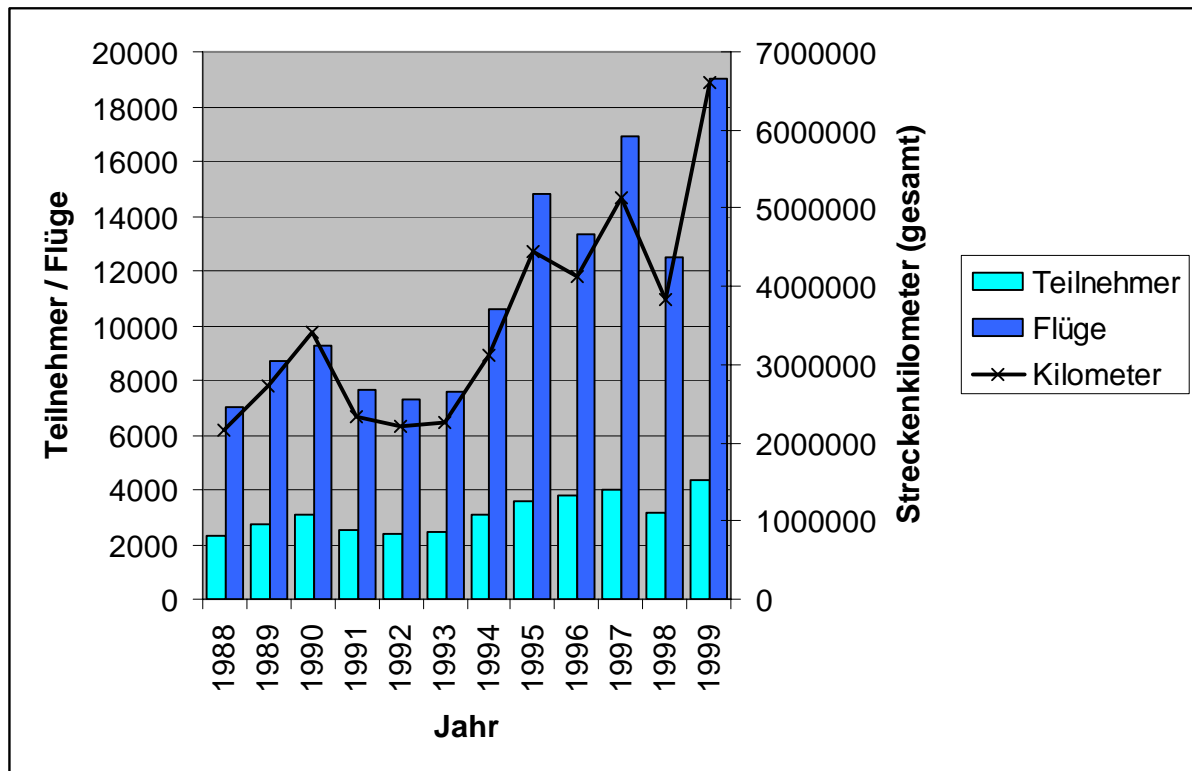


Fig. 153 Historie der Deutschen Meisterschaft im Streckensegelflug (DMSt) über 12 Jahre in der Übergangsphase zur Digitalen Flugbeurkundung mittels GPS; (Quelle: Flieger-Taschenkalender, 2000)

Der besondere Reiz moderner Wettbewerbe liegt darin, dass diese zentral auf einem Server abgelegt werden und ein Pilot jederzeit die Möglichkeit hat, die Wertungsdatei jedes anderen Mitbewerbers zu downloaden und in seiner Software einer eigenen flugtaktischen Bewertung zu unterziehen. Der Server erstellt Wertungsstatistiken nach Teilnehmer, Verein, Bundesland etc. oder zeigt besonders erfolgreiche Flüge an.

Anhand des folgenden – ebenfalls willkürlich herausgegriffenen Beispiels – sollen die technischen Querverbindungen und ihre Vorteile weiter verdeutlicht werden. Wir betrachten einen Flug, den U. Henke (LSV Kiel, DG800B, 18-m-Klasse) auf einem Leistungs-Motorsegler mit Klapptriebwerk (siehe Abb.) am 25. August 2003 quer durch Schleswig-Holstein durchgeführt hatte.

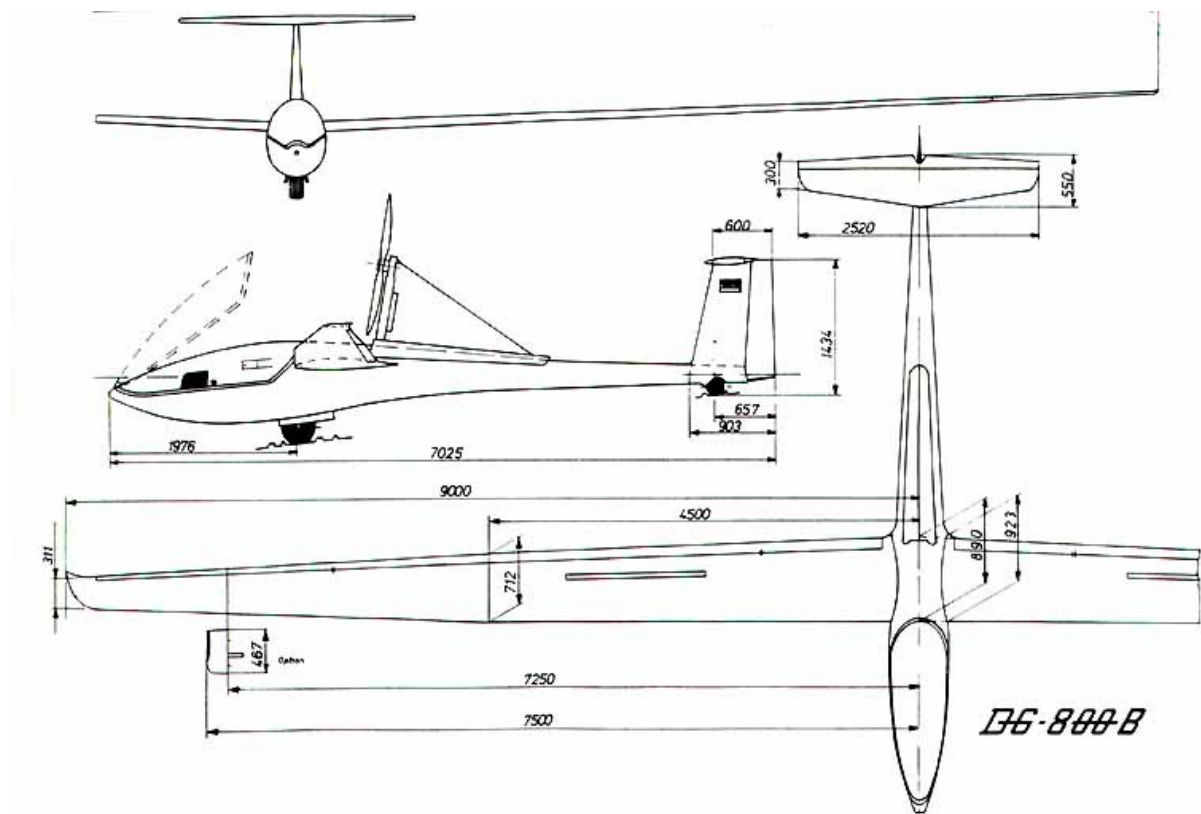


Fig. 154 Dreiseitenriss eines typischen Hochleistungssegelflugzeugs mit Klapptriebwerk: DG-800B (Quelle: Hersteller-Homepage der Firma Glaser-Dirks, <http://www.dg-flugzeugbau.de>)

Auf dem besagten OLC-Wertungsserver findet man eine herunterladbare igc-Datei, deren Metadaten automatisiert auf einer gesonderten Webseite dargestellt sind. Dazu gehört eine Tabelle mit den Kenndaten wie Datum, Name, Klasse, Zeiten, Start- und Zielort usw., ein Vertikalprofil (siehe unten) sowie eine Höhengichtenkarte mit geocodiertem Track aus dem GPS-Logger.

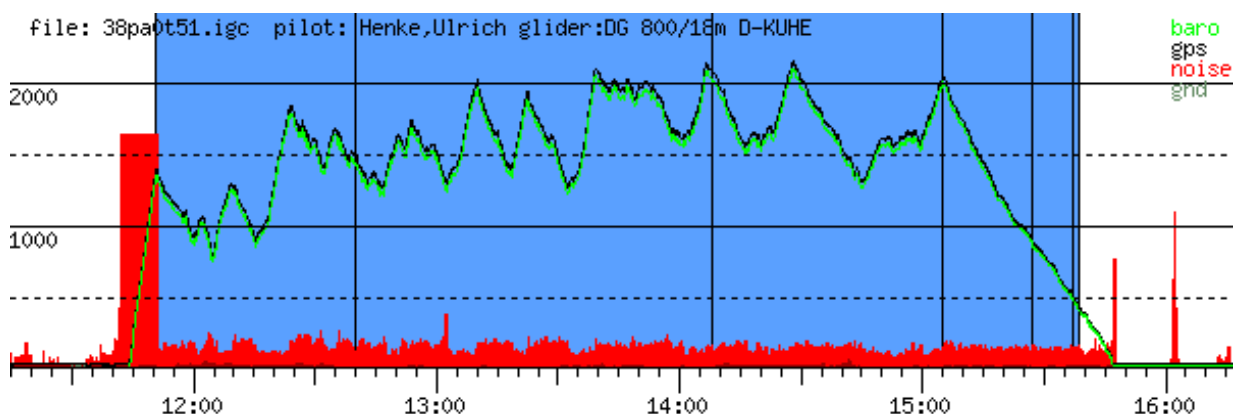


Fig. 155 Vertikalprofil eines Wertungsfluges mit Zeitleiste. Der GPS-Logger zeichnet auch Geräuschdaten im Cockpit auf, anhand derer sich bestimmen lässt, ob und wann ein Motor benutzt wurde (rote Histogrammwerte). Ferner lässt sich mittels dieser Graphik sehr schön belegen, dass die GPS-Höhendaten (schwarz) mit den barometrisch ermittelten (grün) recht gut übereinstimmen. (<http://www2.onlinecontest.org>)

Auf die Motorlaufzeit muss besonders eingegangen werden: Die Motor-/Propeller-Wartungsintervalle (TBOs*) von modernen Hochleistungs-Kunststoff-Motorseglern mit Klapptriebwerk liegen bei 50 oder 100 Flugstunden. Diejenigen von Motorflugzeugen oder Reiseflugzeugen mit starr eingebautem Triebwerk dagegen um den Faktor 10+ darüber (also bei 1000 h oder mehr). Das erklärt sich daraus, dass Klapptriebwerke im Durchschnitt lediglich 3 - 5 % der gesamten Flugbetriebsdauer von solchen Sportgeräten tatsächlich im Einsatz sind. Im obigen Diagramm, das durchaus als repräsentativ bezeichnet werden kann, sieht man das anhand der roten Säulen. Die Lärm-Spitze kurz nach 13:00 UTC(!) sagt aufgrund ihres Abstandes gegenüber den Spitzenwerten bei Start und dem Zurückrollen nach der Landung lediglich aus, dass zu diesem Zeitpunkt das Flugzeug seine höchste Gleitflugeschwindigkeit auf diesem Flug erzielt hat.

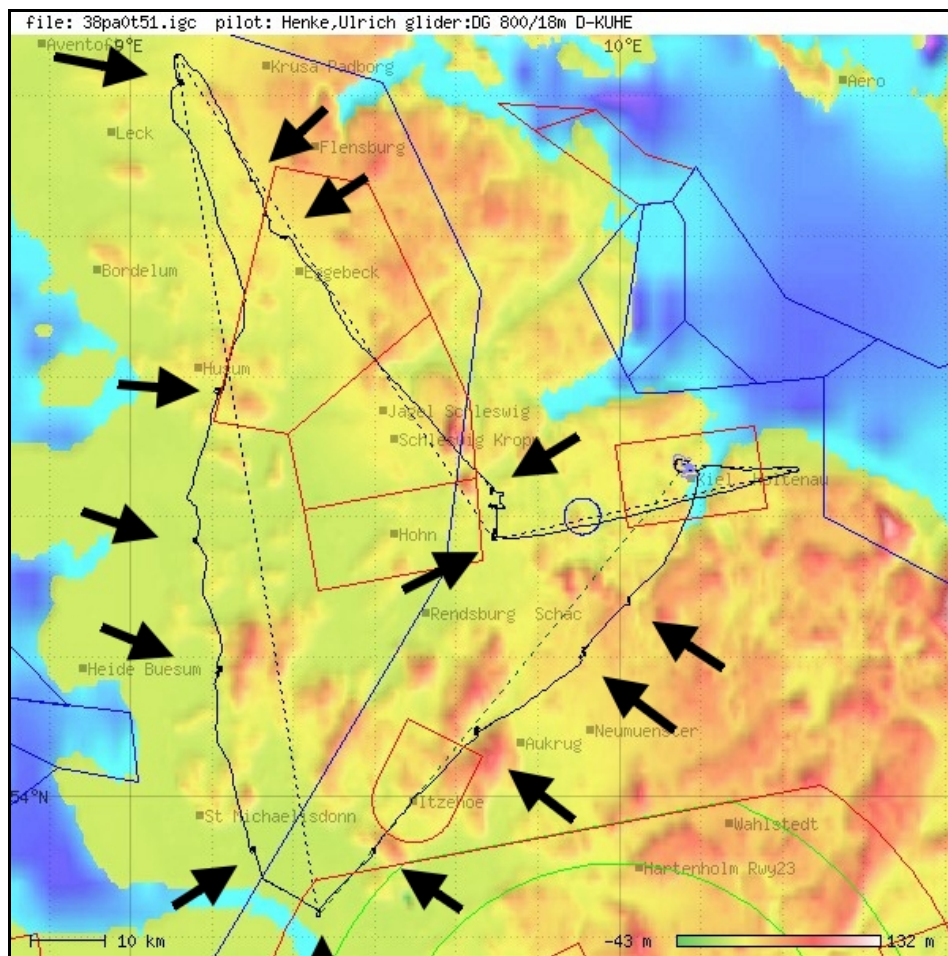


Fig. 156 Automatisch generierte Ansicht einer igc-Logdatei (hier: Dreiecksflug über weite Teile Schleswig-Holsteins) in einer Höhengichtenkarte zur visuellen Schnellerfassung. Zur Orientierung bieten diese Karten ausgewählte Land-Wasser-Grenzen, Orte, Lufträume und den Groundtrack. Nicht enthalten sind die hier dargestellten schwarzen Pfeile. (<http://www2.onlinecontest.org>)

Vor dem Herunterladen einer Wertungsdatei kann man sich anhand eines standardisierten Wertungsblattes orientieren, welche Leistung (Distanz, Dauer, Schwierigkeitsgrad des Geländes etc.) ein Pilot erbracht hat. Wichtig ist die Transparenz, die mit einem derartigen

* TBO: Time Between Overhaul; oftmals sind damit Inspektionen gemeint, die durch qualifiziertes Fachpersonal mit besonderen Prüfmethode durchgeführt werden – im „schlechtesten Falle“ durch vollständiges Zerlegen und Wiederzusammensetzen. Kurz: TBOs sind die Intervallzyklen, in denen eine Maschine einen Werftbesuch benötigt.

Vorgehen erreicht wird. Die Fliegerei hat sehr lange darunter gelitten, ihre Ergebnisse und Fortschritte einem größeren Publikum nicht im gewünschten Maß vermitteln zu können. Diese kommunikative Hürde ist mit der GPS-Beurkundung nun nach den ersten 100 Jahren Menschenflug weggefallen. In der obigen Darstellung lässt sich z. B. sehr gut belegen, was die Flugleistung einer Maschine, die hauptsächlich im Gleitverhältnis bzw. der Gleitzahl „E“ ausgedrückt wird, in einer realen Umweltsituation bedeuten. Die Angabe „Die DG-800B besitzt ein Gleitverhältnis von 1 : 50“ sagt für Nichtflieger relativ wenig aus. Es bedeutet, dass mit jedem Meter Höhe, den ein solches Flugzeug besitzt, 50 Meter Strecke im Gleitflug zurückgelegt werden können. Das reicht im Allgemeinen jedoch nicht aus, sich darunter in einer dynamischen Welt mit Wolken, Sonnenstand, Wind, Regen etc. etwas vorzustellen. Durch GPS jedoch wird selbst in einer Übersichtskarte mit kleinem Maßstab jedes einzelne Eindrehen in die Thermik sichtbar, die sich anhand kleiner spiralförmiger Tracks bzw. einer knotenförmigen Verdickung einer Grundkurslinie äußert. Diese Stellen sind in der vorliegenden Übersicht mit durch Pfeile markiert. So kann man beispielsweise auf der groben Übersichtskarte erkennen, dass die Distanz zwischen Husum und Leck im stationären Geradeausgleitflug zurückgelegt werden konnte. Solch eine Angabe dürfte für Nichtflieger einen bedeutend höheren Aussagewert besitzen. Zudem ist das Ganze noch messtechnisch belegt.

Importiert man die igc-Datei schließlich in StrePla, ergeben sich erheblich umfassendere Analysemöglichkeiten. Die folgenden Abbildungen sollen einen kleinen Eindruck davon vermitteln, wie flexibel man mit den GPS-Daten umgehen kann. Grundlage sind jeweils Screendumps des StrePla-Hauptfensters. Dieses Hauptfenster besteht neben den windowsüblichen Symbolleisten im Wesentlichen aus einem großen Kartenfenster links, einer dreigliedrigen Datenfeinanalyse am rechten Fensterrand und wichtigen fliegerischen Kennzahlen zum momentanen Flugzustand unten. Es lassen sich auch Tracks eines ganzen Pulks eines Flugwettbewerbs simultan darstellen und in Quasi-Echtzeit vergleichen.

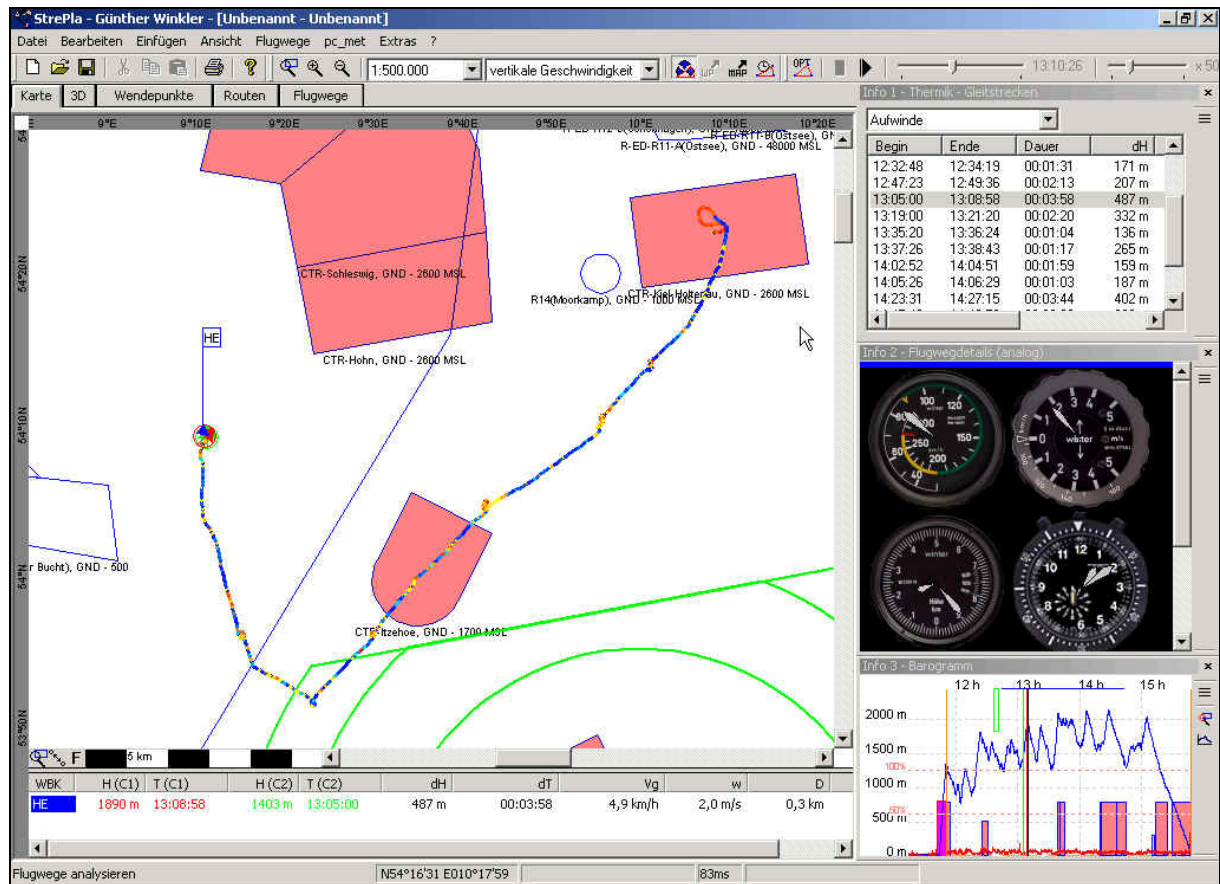


Fig. 157 D-KUHE, 25. August 2003, 13:08 UTC, Luftraumdarstellung (DCW), M 1 : 500 000

In obiger Abbildung erkennt man den Groundtrack des Motorseglers, der in Kiel-Holtenau gestartet ist (Kartenfenster rechts oben), einen ersten Kursschenkel nach SW abflog und sich nach Passieren des Wendepunkts kurz nach 13:00 UTC auf dem zweiten Schenkel auf Nordkurs befindet. Der Groundtrack ist farbcodiert (blau/gelb/rot), wobei die warmen Farben mit positiven, warmen Aufwindzonen assoziiert sind. Die momentane Flugzeugposition wird durch eine Flagge markiert, die mit dem sog. „Wettbewerbskennzeichen“ versehen ist (hier: „HE“). In der Mitte der rechten Bildhälfte erkennt man in Schwarz vier simulierte Analoggeräte, so wie sie der Pilot zu jenem Zeitpunkt vor sich gesehen haben mag (Fahrtmesser, Variometer, Höhenmesser und Borduhr). Rechts unten befindet sich das Vertikalprofil des gesamten Fluges und ganz rechts oben ist die Aufwindstatistik eingeblendet. Sie zeigt an, wann ein Pilot in welche Aufwindzonen eingedreht hat, wie lange er sich in der Thermik befand und wie viel Höhenmeter er dabei gewann. Uns soll an dieser Stelle die Art der Karte interessieren. Es handelt sich um Vektordatenebenen mit Darstellung der Luftraumstruktur (vgl. Kapitel 10.4), die zum großen Teil vom Hersteller kostenlos für weltweit erschlossene Segelfluggebiete heruntergeladen werden können. Dabei ist der Download umso wahrscheinlicher kostenpflichtig, je flugsicherheitskritischer die attraktivsten der Segelfluggebiete sind und je höher der damit verbundene Aufwand für die Nachführung der Datenbasis liegt (z. B. Alpenregion).

Mit dem schwarzen Dreieck in der Symbolleiste des Programmfensters ist übrigens die „Play-Funktion“ für das Abspielen der igr-Datei als Animation bezeichnet. Die Schieberegler rechts

daneben verweisen auf die Abspieldauer/-länge bzw. die eingestellte Simulationsgeschwindigkeit.

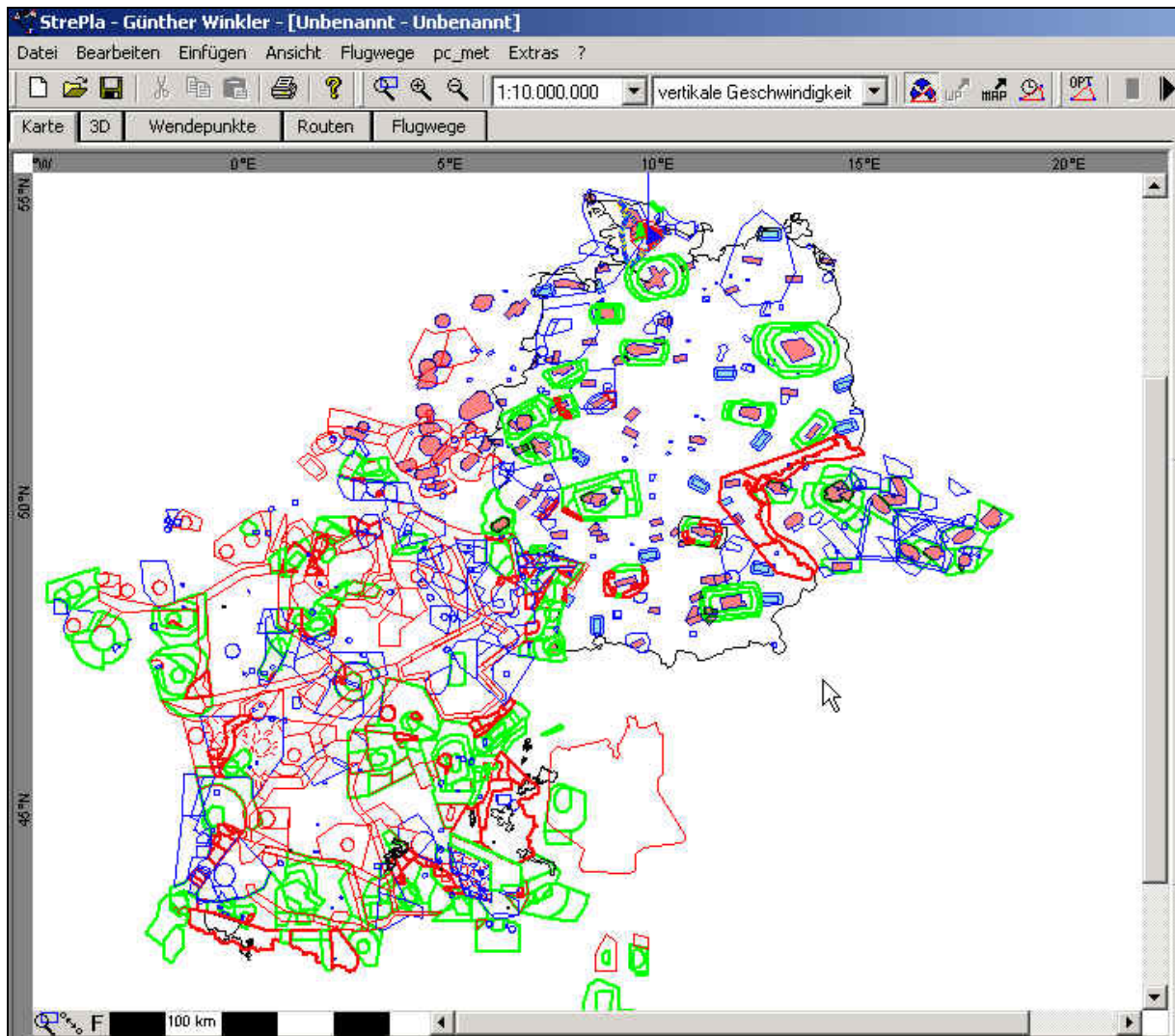


Fig. 158 Luftraumstruktur (frei erhältliche Vektordaten) beispielhaft in die Software geladen für Deutschland, Frankreich, Benelux, Tschechien. (Abbildungsmaßstab 1 : 10 Mill.); rot: Flugplatz-Kontrollzonen (in Frankreich zusätzlich Tiefflugkorridore), grün: IFR-Anflugzonen, blau: zeitweilig aktivierte Kontrollzonen.

Die GIS-angelehnte Layertechnik ist eine sehr bedeutsame Programmfunktionalität, da sie es ermöglicht, auch igc-Dateien aus einem Land zu laden, deren Flugkarten man nicht in digitaler Form besitzt. Beispielsweise hat während der Jahrtausendwende der Deutsche K. Ohlmann in Argentinien einige bedeutende Streckenflugweltrekorde aufgestellt. Diese Rekordflüge wurden selbstverständlich von Argentinien aus auf dem OLC-Server abgelegt, um Eingang in die internationale Wertung zu finden. Über die Wertungsdatei lässt sich ein solcher Weltrekordflug im Detail nachvollziehen. Deshalb besitzt man mit einem Programm wie StrePla die Möglichkeit, vom Können und der Philosophie (Flugtaktik) jedes anderen Piloten direkt zu lernen und zu profitieren.

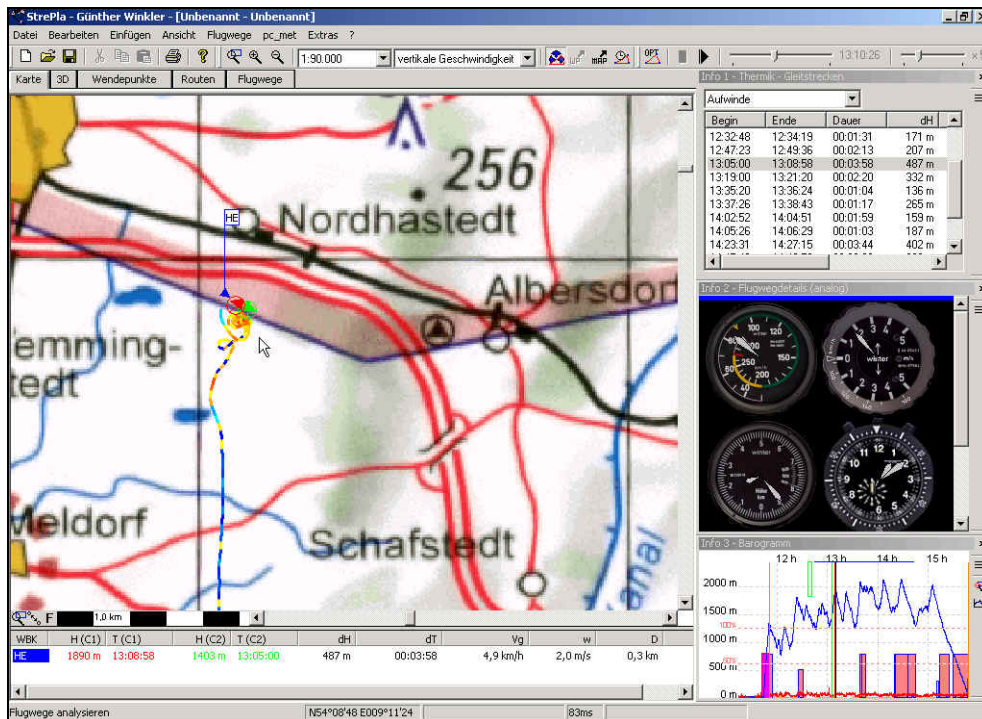


Fig. 159 D-KUHE, 25. August 2003, 13:08 UTC, ICAO (M 1 : 500 000), Zoom: M 1 : 90 000

In obiger Abbildung wurde die Kartengrundlage geändert. Man erkennt (durch Mauszeiger markiert) in etwa dieselbe Position wie in der Luftraumdarstellung zuvor, nun allerdings in der deutschen Luftfahrerkarte 1 : 500 000 (ICAO 2004).

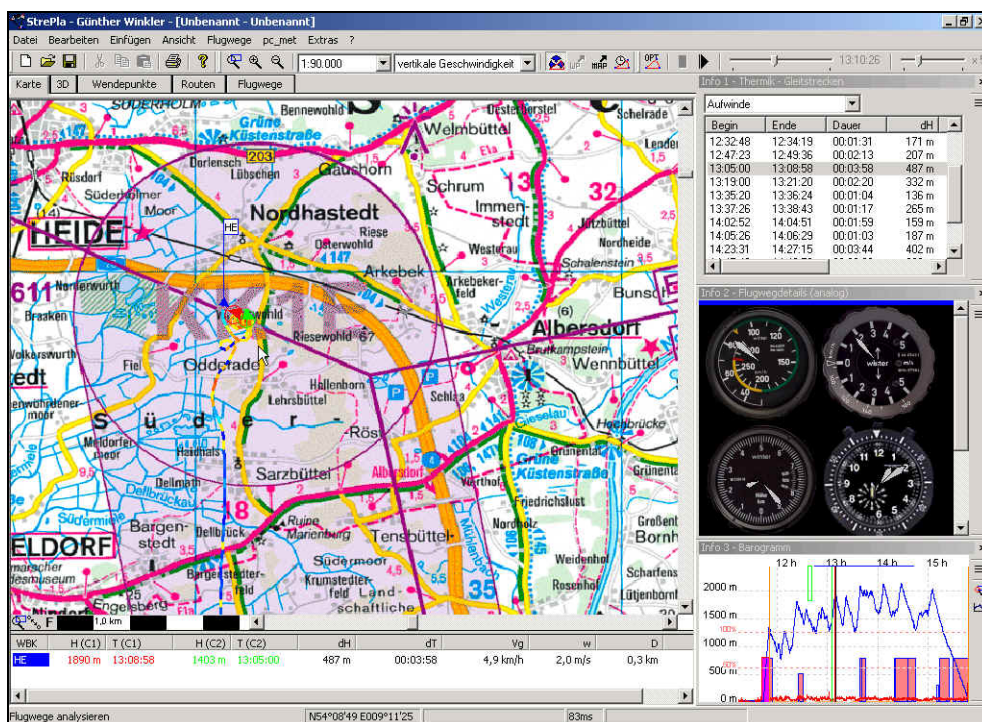


Fig. 160 D-KUHE, 25. August 2003, 13:09 UTC, Deutsche Generalkarte (M 1 : 200 000), Zoom: M 1 : 90 000

Der Detailgrad innerhalb der Kartensignatur steigt erheblich an, wenn man dieselbe Position anstatt in der Fliegerkarte in der Deutschen Generalkarte M 1 : 200 000 darstellt, die ursprünglich für die Autoreiseplanung konzipiert wurde. Man misst direkt im Kartenfenster, dass sich das Flugzeug zu diesem Zeitpunkt etwa 7,5 km westlich des Archäologischen Zentrums Albersdorf (AÖZA) befunden hat und in einem lautlosen, spiralförmigen, stationären Thermikkreisflug bei 85 km/h Momentangeschwindigkeit, 1890 m Höhe und 2 m/s Steiggeschwindigkeit. Der Höhengewinn seit Einstieg in die Thermik um 13:05 UTC (vor exakt 3:58 min) betrug 487 m^{*}. Die interpolierte Grundgeschwindigkeit betrug 4,9 km/h, das heißt, mit dieser Geschwindigkeit bewegte sich das Flugzeug in seiner Aufwärtsspirale gegenüber Grund längs der bisherigen Kurslinie vorwärts. All diese Daten werden ausschließlich aus einem GPS-Mitschrieb in der Form (X, Y, Z, t) errechnet. Besitzt ein Pilot einen PDA mit GPS-Kopplung und die Software „PocketStrePla“, dann stehen ihm diese Informationen während des Fluges in Quasi-Echtzeit zur Verfügung. Die gesamte Hardware wiegt dabei deutlich weniger als 1 kg. Das Verfahren eröffnet viele Anwendungen, da sich Flugdaten und beliebige Flugkartenausschnitte über die jeweils vom Hersteller des PDAs mitgelieferte DockingStation und standardisierter Kommunikationssoftware vom PC zum PDA transportieren lassen – im Falle von Windows CE beispielsweise die Freeware „ActiveSync“ der Firma Microsoft. Die Darstellungskapazität des mobilen PDAs ist letztlich nur durch dessen Speichermedium begrenzt. Die Leistung von Firmen wie „8F Computer“ besteht neben der eigentlichen Programmierung der Anwendersoftware darin, erfolgreich Wege gefunden zu haben, alle auftretenden Datenvolumina durch Auswahl und Einstellung von Kompressionsalgorithmen geschickt zu reduzieren. Gegenüber dem standardisierten digitalen ICAO-Luftfahrer-Kartenblatt von ca. 180 MB sprechen wir im Falle des PDAs von weniger als 50 MB für ganz Deutschland. Mit einer SD-Karte von nur 64 MB lässt sich also der gesamte deutsche Luftraum lückenlos im Rasterformat auf dem PDA speichern. Den höchsten Grad an Anschaulichkeit erhält man schließlich, wenn man die geflogenen oder von anderen Piloten erzeugten Trackdaten in 3D-Ansicht dynamisch visualisiert.

* Für Segelflieger besitzen solche Angaben einen hohen Stellenwert, weil mit Ihnen die Fähigkeiten eines Piloten zum Ausdruck gebracht werden, wie gut er Aufwinde im Vergleich zu anderen „zentrieren“ kann. Auf messtechnischer Grundlage wissen wir noch immer nicht sehr viel über die wahre Gestalt der Thermik. Wir wissen nicht, ob sie schlauch-, tropfen- oder quallenförmig aufsteigt. Wir wissen auch nicht, ob sie so aussieht, wie man Konvektion in einem Topf kochenden Wassers beobachten kann. Das werden wir evtl. erst über Millionen solcher Datensätze ermitteln können. Wir wissen bislang nur, dass Thermik Gleitflugzeuge „trägt“.

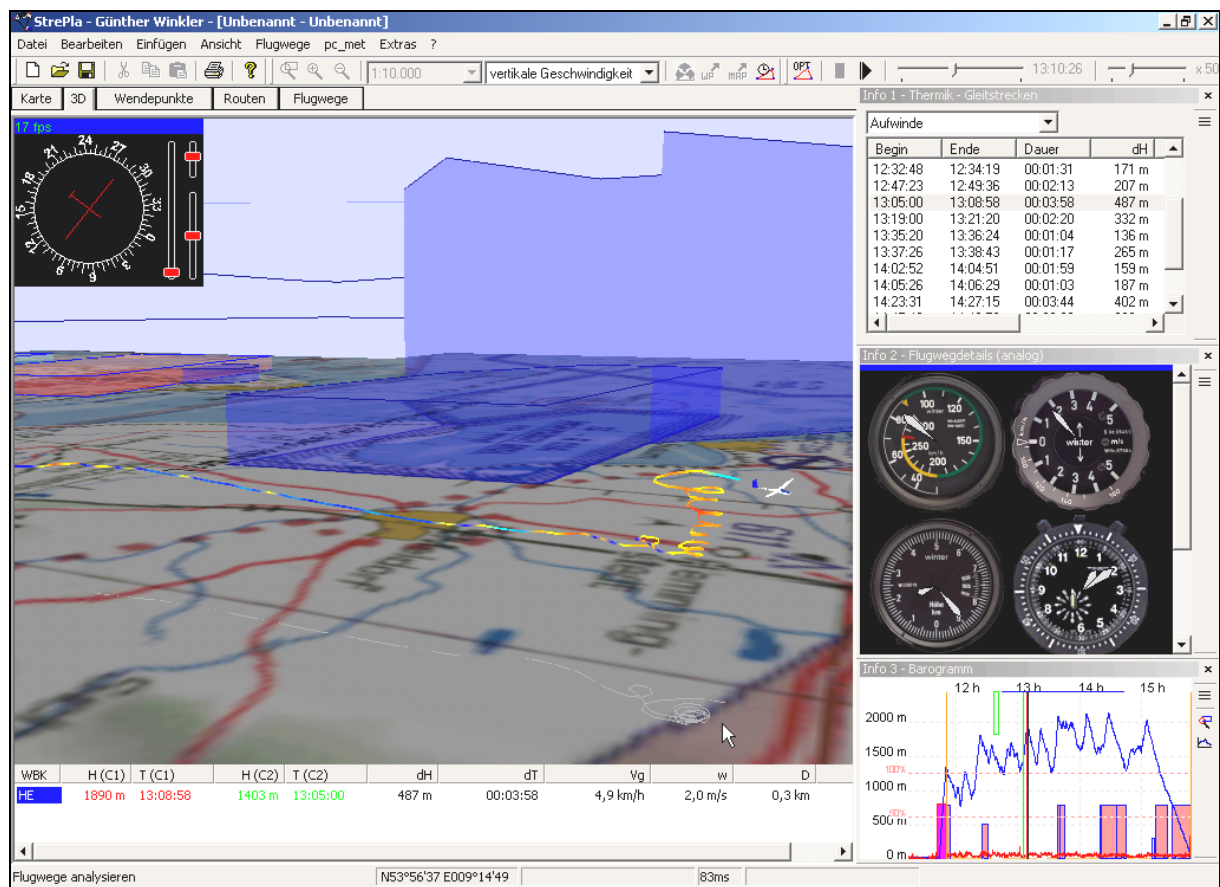


Fig. 161 D-KUHE, 25. August 2003, 13:09 UTC, 3-D-Animationssequenz, Blickrichtung SW, Kartenbild: ICAO M 1 : 500 000 auf Höhenmodell

Man erkennt in obiger Abbildung das Strepla-Fenster und einen Track, der in 3D in die Fliegerkarte eingeblendet ist. Das Besondere daran ist die 3D-Darstellung der Luftraumstruktur neben der Fähigkeit, jeden einzelnen Kreis des Flugzeugs abzählen zu können (bei höherer Zoomstufe lassen sich im vorliegenden Beispiel 8 Vollkreise ermitteln, was einer Steigrade von $60 \text{ m}/360^\circ$ entspricht). Hier erkennt man z. B. im Hintergrund (in dunkelblau) das Flugbeschränkungsgebiet* (ED-R13A und B) sowie ganz hinten links (in rot) die Kontrollzone des Militärflugplatzes Nordholz. Weiterhin ist beachtenswert, dass die Fußspur des Tracks in hellgrau auf der DGM-Oberfläche mitgezeichnet wird (siehe Mauszeiger).

Wir sprechen also bei einer derartigen Anwendung von vielerlei Technologien, die hier konvergent auf mehreren – teilweise völlig unabhängig voneinander – verfolgten Entwicklungsteillinien beruht: Die GPS-Hersteller schreiben die Industrieprotokolle in spezielle Logprotokolle um, die in Absprache mit einem Konglomerat aus Segelflugsportverbänden und einflussreichen Individuen und deren Interessen erzeugt werden. Die Flugzeughersteller greifen die wichtigeren der sich abzeichnenden Trends auf und versuchen mit ihrer Produktpolitik (Ausrüstungspolitik) darauf zu reagieren. Die Softwarefirmen versuchen, aus der Kartographie-Szene Standardprodukte abzuleiten. Hier ist es besonders wichtig anzumerken, dass die Lizenzgebühren für Luftfahrerkarten, Topographische Karten und Auto-Atlantenmaterial jeweils nur einmal pro Revisionszyklus

* Vgl. Erläuterungen zur Luftraumstruktur siehe Kapitel 10.4.

bezahlt werden müssen und die Karten dann sowohl in FlightPlanner, StrePla, PocketStrePla als auch FlightStar verwendet werden können. Das ist ein wesentlicher Beschleunigungsimpuls für die Verbreitung solcher Software und indirekt die Beförderung des Segelflugsports.

Es ist für das Verständnis solcher Entwicklungen und Umschwünge wesentlich, dass diese Prozesse alle simultan ablaufen und sich vielfältig überlagern. Trotz zahlreicher Zersplitterungseffekte sind die theoretischen Grundlagen letztlich identisch. Dennoch besteht eine nicht unerhebliche Herausforderung dabei in der nach wie vor notwendigen Detailabstimmung. Hierzu ein Hersteller-

„HINWEIS: Die höhere Taktfrequenz der neueren iPAQ-Modelle weckt die Erwartung, dass pocket*StrePla auf diesen Modellen deutlich schneller läuft. Das stimmt jedoch leider nicht! Pocket*StrePla läuft auf dem aktuellen iPAQs 5450 mit XScale-Prozessor etwa genau so schnell wie auf einem iPAQ 3660. Die XScale-Modelle verfügen über ein Display, das in geschlossenen Räumen einen brillanten Eindruck macht. Im Cockpit bei starkem Sonnenlicht eignen sich jedoch die alten StrongArm-Modelle besser, da das Display kontrastreicher ist. Die beste Wahl ist zur Zeit der iPAQ 3850: Sehr gute Ablesbarkeit bei starkem Sonnenlicht, mehr Farben als die Modelle iPAQ 3660 und iPAQ 3760, einfache Speichererweiterung über SD-Karten ohne ein 'Jacket' installieren zu müssen, das den iPAQ recht unhandlich werden lässt.“ (Quelle: Homepage Firma „8F Computer“

http://www.strepla.de/StrePla3/deutsch/Tour_Vorbereitung/index.htm)

Die Vorteile der Moving-Map-Systeme wurden hier nicht in aller Tiefe erläutert. Es ist leicht einzusehen, dass die schwersten Handhabungsfehler bei der GPS-Programmierung durch das Eintippen umfangreicher Zahlenkolonnen allmählich der Vergangenheit angehören. Die Piloten planen zunehmend vollgrafisch, d. h., sie erzeugen die Flugplanungsdaten auf einem Laptop oder Desktopcomputer nach dem WYSIWYG*-Konzept (in StrePla) und übertragen die Flugplanung anschließend auf den PDA (PocketStrePla).

Interessante Analogie: Dieser Trend zum „Füttern“ und Auslesen eines Bordcomputers mit Planungskordinaten ist in der Militärfliegerei ca. 30 Jahre alt. Er wurde für europäische Militärpiloten mit der Einführung des Jagdbombers Panavia „Tornado“ Routine. PDA-Navigationssysteme ergeben mit den aufgezeigten Grundfunktionalitäten für leichtere Messflugaufgaben hervorragende Backup-Navigationslösungen. Außerdem eignen sie sich für die Flugweganalyse bzw. -dokumentation gleichermaßen. Dies nicht zuletzt aufgrund der 3D-Implementierung. Es existiert auch eine StrePla-Version für Motorflieger. Abschließend sei noch erwähnt, dass sowohl FlightPlanner als auch StrePla vorbildliche Kooperationen mit Behörden (DFS, DWD, LBA etc.) besitzen, was diesen Programmen potentielle Langfrist-Marktüberlebensfähigkeiten beschert.

* WYSIWYG: What-You-See-Is-What-You-Get; Motto aus der PC-Historie für die Entwicklung graphischer Oberflächen von Betriebssystemen und Anwendersoftware.

10 Small Format Aerial Photography (SFAP) und dessen technische Grundlagen

Ein kanadisches Wissenschaftler-Team veröffentlichte vor einigen Jahren eine detaillierte Vision, die heute zum Greifen nahe liegt (Tarrusov, Dubois und Wenzl, 1996):

„Projekte, die eine räumliche Datenbeschaffung im Gelände benötigen, können in großem Maße von der Integration moderner, tragbarer Fernerkundungssensoren und luftgestützter leichter Plattformen profitieren. Diese Möglichkeit besteht erst seit einigen Jahren. Die Hauptfaktoren sind miniaturisierte Fernerkundungssensoren und Computer, die Entwicklung von zuverlässigen ökonomischen Flugzeugen sowie von GPS. Die Integration dieser drei Komponenten befindet sich am Anfang des Konzepts der leichten Fernerkundungssysteme für den großen Maßstab. [...] Eine Bodenmannschaft kann ein solches System in der Nähe des Untersuchungsgebiets halten und es in der täglichen Arbeit verwenden, entweder als Fahrzeug oder als Computer, aber mit der Möglichkeit der wiederholenden Sammlung räumlicher Daten, je nach Bedürfnis.“*

In den USA und in England bildete sich im Zuge der Verwendung von 35mm-Kleinbild-Kameras bzw. 70mm-Rollfilmkameras gegenüber den großformatigen, metrischen Reihenmesskammern dafür der Begriff „Small Format Aerial Photography“ (SFAP) heraus; vgl. (Graham, 1988; Graham und Koh, 2002; Meyer, 1997; Zsilinsky, 1997).

Den Faden für die sinnvolle Fortführung der SFAP-Idee kann man mit der Betrachtung der Digitalfotografie und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung für ein luftgestütztes Monitoring aufgreifen.

Bis zur Jahrtausendwende hinein dominierten Analogfilm-basierte Fotoapparate den Markt. Texas Instruments hatte 1972 bereits eine erste digitale Kamera patentiert. Während der 60er Jahre hatte die NASA erste Digitalfotografien bei der Eroberung des Mondes per Funk auf die Erde zurück übertragen. Auch liegen die ersten mit digitaler Sensorik ausgestatteten militärischen Aufklärungssatelliten der Keyhole-Serien (ab KH-7) am 9. August 1966 (Start von KH-7 in Vandenberg/Kalifornien auf Thor-Rakete) schon einige Zeit zurück. (Thaller, 1999) Es dauerte aber noch über 30 Jahre, ehe die CCD-Kamera den Eingang in die Massenmärkte fand. Allerdings benötigte man ab Mitte der 90er Jahre keine ausgeprägten analytischen Fähigkeiten, um den Aufstieg der Digitaltechnik treffsicher vorherzusagen, da die Vorteile einer Digitalkamera auf der Hand liegen: gelingt es die Digitalbilder störungsfrei auf die bestehende Infrastruktur des Home-PCs zu übertragen, so verfügt man damit auf Seiten der Endverbraucher der Konsumelektronik-Märkte über eine preiswerte und attraktive Technik. Nach der Anschaffung von Kamera und Zusatzausrüstung für die Bilddatenübertragung entstehen keine weiteren Kosten mehr und man erzielt mit dem Kaufpreis eine nur von der Komponentenlebensdauer abhängige Fototechnik ohne störende Zwischenglieder und Materialflüsse.

* Der in französischer Sprache vorliegende Originaltext erschien mir so bedeutend, dass ich ihn in Zusammenarbeit mit A. Mayer vollständig übersetzte.

Die Fa. Kodak schuf 1986 den ersten „Megapixel-Sensor“ für Digitalkameras und offerierte ab 1991 die DCS-Serie (Digital Camera System) auf der Basis einer Nikon F-3 mit einem 1,3 MPx-Sensor für einen professionellen Zielmarkt (Fotojournalismus). (Bellis, 2005)

Vor ein paar Jahren hat Kodak eine Produktionsvariante des DCS-420-Modells* mit einem IR-sensitiven Chip mangels Nachfrage wieder vom Markt genommen.

„The Kodak DCS-420CIR camera (9mm x 14mm format) and its replacement DCS-460 CIR (18mm x 28mm format) have been used with a wide range of lenses from 15mm to the standard of 28mm to provide excellent false colour infrared (CIR) imagery. There is the added advantage that the field worker has complete freedom to analyse, modify and enhance imagery on the computer (Graham und Mills, 1997) Unfortunately both of these cameras are now discontinued and have been replaced with the DCS-660 (6 MPx chip) conventional colour only. [...] Although expensive (the DCS-460 CIR was c. £15,000), the CIR cameras were rapidly taking over from 2443 film for a number of small area applications where a smaller platform, rapid (computer) analysis and, most important, full user control. [sic!] provided considerable advantages.” (Read und Graham, 2000)

Entsprechende Gebrauchtmodelle sind schwierig zu finden und ihrem inneren Wert nach nur schwer zu beziffern. Es ist jedoch offensichtlich, dass die Verwendung von IR-sensitiven Sensoren für Biomasse-Schätzungen im Bereich Forstökologie, teilflächenspezifischer Landbewirtschaftung, Naturschutz (Renaturierung bzw. Schutzflächenmanagement) vorteilhaft wäre. Reflexionen von IR-Licht in der Vegetationsdecke sind vom physikalischen Standpunkt her betrachtet proportional an die Existenz von Zellsaftvakuolen mit hinreichendem Wassergehalt gebunden. Es gilt vereinfacht ausgedrückt der Zusammenhang: je höher die IR-Reflexion, umso besser die Wasserversorgung des Bestandes. Solange jedoch eine ausreichende Wasserversorgung sichergestellt ist befindet sich auch der Assimilattransport und darüber die Photosyntheseleistung in einem bevorzugten Arbeitsbereich der Pflanzen: der Bestand ist gesund.

Entsprechend zeitlich aufgelöste Profilaufnahmen würden regionale Unterschiede erkennbar machen, die nach den Flügen unmittelbar für eine Analyse bereitstünden.

Was bringt die Digitalkameratechnik, ob IR-sensitiv oder nicht, insgesamt für die Fernerkundung? Einfache Antwort: sie eliminiert den zeit- und damit kostenintensiven Zwischenschritt des Scannens, der zudem mit unvermeidbarem Informationsverlust einhergeht. Ein Luftbildaufnahmesystem sollte deshalb von vornherein digital ausgelegt sein – sofern eine sinnvolle Kosten-Nutzen-Relation bezüglich der verfügbaren Komponenten eingehalten werden kann. Dies ist seit den späten 90er Jahren in meinen Augen der Fall.

Nun verhält es sich jedoch für die CCD-Chips wie für die meisten übrigen Elektronikkomponenten mit speziellem Einsatzgebiet: Es existieren nur wenige Anbieter und demzufolge nur wenige verfügbare Grunddefinitionen. Aus umfangreicher Literaturrecherche in Publikationen der International Society for Optical Engineering (SPIE) war mir 1998

* Die DCS-420 darf als ein gut untersuchtes Kameramodell betrachtet werden; (Warner, Graham, Read, 1996).

bekannt, dass die amerikanischen Normgrößen für CCD-Chips 1" und entsprechende Fragmente davon betragen, also $\frac{1}{2}$ ", $\frac{1}{4}$ ", $\frac{3}{4}$ " – und zwar Diagonallänge.*

Es verhält sich also bei der CCD-Produktion genauso wie bei der Herstellung von Siliziumwafern für die CPU-Herstellung: Der Fertigungsprozess ist entscheidend. Bis 2000 gab es keine größeren CCDs. Damit ist die verfügbare Aufnahme­fläche von Kameras mit CCDs in Focal-Plane-Array-Anordnung auf jene Fläche begrenzt, die als technisches Vergleichsmaß durch die Diagonale des Chips angegeben wird. Lediglich Form und geometrische Abmessungen des einzelnen CCD-Elements ließen sich bei dieser ersten Generation von optischen Halbleitersensoren für den Massenmarkt modifizieren.† Damit sind jedoch ganze handelsübliche Digitalkamerareihen der ersten Generationen bezüglich ihrer Belichtungsfläche erheblich kleiner als Luftbildaufnahmekameras mit 23 x 23 cm Standardformat.

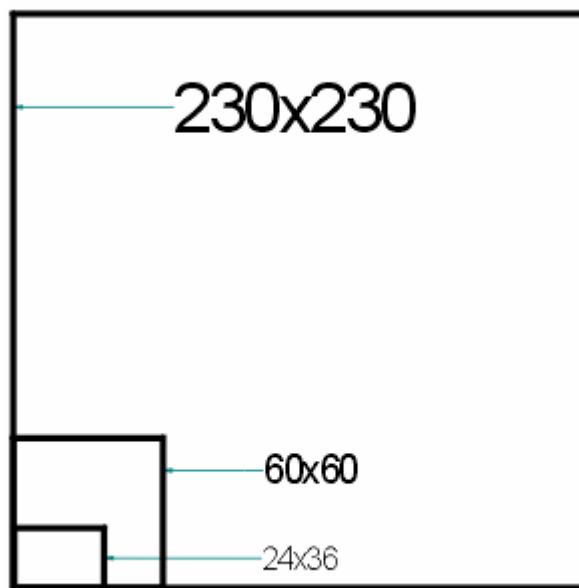


Fig. 162 Maßstäblicher Größenvergleich des Standardluftbildformats (23 x 23 cm) mit handelsüblichem Mittel- und Kleinbildformat (24 x 36 mm). Von den Formatflächen her betrachtet benötigt man fast 15 MF-Bilder und 61 KB-Bilder, um ein einziges herkömmliches Luftbild nahtlos auszufüllen. Vorsicht: Dieser Formatvergleich sagt nur bedingt etwas über die Bodenfläche aus, die in der Landschaft abgebildet werden kann!

Diese Beobachtung ist wichtig, um verstehen zu können, welcher Weg heute bei der Entwicklung metrischer, digitaler Luftbildkamern eingeschlagen wird. Mehrere CCD-Chips werden parallel angeordnet und die einzelnen Bildkomposite mit aufwändigen Algorithmen wieder zusammengefügt, um die geometrischen Beschränkungen zu überwinden und so digitale Ersatzformate in akzeptablen Formatgrößen zu erhalten. Diese Vorgehensweise

* Die Ausnahmen bestätigen die Regel: „Bereits die FourThirds CCD Größe des Olympus E-Systems (13,5 x 18 mm Sensorfläche, Diagonal 33,9 mm Nominalgröße = $\frac{4}{3}$ Zoll, daher der Name ‚Four Thirds‘) und der Chip der Canon EOS 300 D oder EOS 10 D (beide mit einer CCD-Größe von 15,1 x 22,7 mm) haben bereits ein deutlich größeres Format. Übrigens: Leider werden die CCD Formate immer noch nach einem völlig veralteten ‚brutto‘ Aussen-Produktionsformat (ähnlich der Fernseh-Bildröhren) nach Bruchteilen von Zoll benannt. Wer nachrechnet stellt fest, daß die effektiven Bilddiagonalen dieser CCDs keinesfalls $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ oder $\frac{2}{3}$ Zoll lang sind. Und daß das Kleinbildformat - zumindest im Vergleich zu den meisten bisherigen CCDs riesengroß ist.“ (Walz, 2004)

† FUJIFILM hat als erster Hersteller CCD-Chips mit wabenförmigen CCD-Elementen zur Serienreife entwickelt (Handelsname für die Technologie: „SuperCCD“) und 2000 auf den Markt gebracht.

verursacht einen enormen Entwicklungsaufwand. Es ist klar, dass diese Variante für ein Low-Cost- Luftbildaufnahmesystem (kleinere Projektgruppen in Umweltforschungseinrichtungen oder Ingenieurbüros) zu einer kaum überwindbaren Finanzierungshürde führt. Das ist die erste Technologieschwelle: Ein digitales Luftbildaufnahmesystem unterliegt hauptsächlich der verfügbaren Chiptechnologie im Zusammenwirken mit der optischen Güte verwendbarer Objektive. Damit ist eine erste Grundsatzentscheidung unumgänglich: Es erscheint aus ökonomischer Sicht klug, die Aufnahmesensorik bezüglich ihrer limitierenden Faktoren an die allgemeine Entwicklung der Massenmärkte anzukoppeln, denn die Absatzzahlen in den Massenmärkten treiben letztlich Qualität, Applikationssicherheit und breite Verfügbarkeit digitaler Elemente voran. Die Leistungskurve der Halbleiterindustrie hat unausweichlich eine entsprechende Preisverfallskurve zur Folge, die man mittel- und langfristig geschickt ausnützen kann. Anders ausgedrückt: Es ist besser, alle 2-3 Jahre eine gebrauchsfertige, neue Digitalkamera für 3.000 EUR und mit 200 % oder 500 % Mehrleistung (z. B. bezüglich Auflösung, Geschwindigkeit, Speicher) aus einem Massenmarkt zu beschaffen, als einmal ein Modell für 500.000 EUR, mit dem man 20 Jahre zu fliegen hat, ehe sich die Investition amortisiert. Dies ist zumindest für all jene Fälle angebracht, bei denen bekannte Funktionalitäten direkt verwendungsfähig übertragen werden können. Auf diese Weise lassen sich Innovationen relativ elegant und mit überschaubarem Aufwand in bestehende Applikationen hineinkreuzen. Wegen mangelnder Erfahrung oder aufgrund von Informationsdefiziten getroffene ökonomische Fehlentscheidungen wiegen so weitaus weniger schwer.* Darüber hinaus ist das Kriterium Servicenetz und Bekanntheitsgrad ein weiterer ausschlaggebender Faktor, der für kleine „Off-the-shelf“-Komponenten spricht. Im Sinne einer ausgewogenen Kosten-Nutzen-Abschätzung ist bei der Beschaffung einer Digitalkamera deshalb der gehobene Amateurmarkt ein guter Rechercheausgangspunkt. Die limitierenden Eigenschaften einer Digitalkamera als Luftbildsensor sind (in dieser Reihenfolge):

- CCD-Auflösung
- Art und Größe des Bildspeichers (CompactFlash, PCMCIA, Microdrive, SecureDigital, MemoryStick, MiniCD-R)
- Verfügbare Schnittstellen (USB, Firewire)
- Zubehörangebot und Erweiterungsmöglichkeiten
- Form, Größe und Gewicht des Korpus
- Spannungsversorgung

Jedoch stehen den kleineren Bildformaten für die Erfassung derselben Bodenfläche im Vergleich zu konventionellen Luftbildkameras erheblich mehr notwendige Aufnahmen gegenüber. Die Hauptidee besteht nun darin geeignete technische Wege zu finden, um diese höhere Bildanzahl durch automatisierte Verfahren handhabbar zu gestalten. Dazu ist es erforderlich, sich einen Überblick zu verschaffen, um wie viele Aufnahmen es sich jeweils für verschiedene Anspruchsniveaus bezüglich der Flächenerfassungsleistung handelt.

* Es ist hier ausdrücklich nicht gewollt, den Anwendungswert von High-End-Systemen in Frage zu stellen. Das ist bezüglich deren konstruktiven Systemzwecks gar nicht sinnvoll. Es geht in diesem Kontext lediglich darum, aufzuzeigen, dass wir uns technologisch derzeit unausweichlich auf dem Weg in eine qualitativ neue Anwendungssphäre weit unterhalb der konventionell betriebenen, flugzeuggestützten Fernerkundung befinden.

Sehen wir uns hier die im Jahre 2004 technisch bereits längst veraltete DCS-460-Digitalkamera genauer an; (folgende Tabelle und Diskussion ergänzt aus: (Winkler, 2000, unveröff.)).

„Technische Daten: Sensorgröße 27,6 x 18,4 mm, 3060 x 2036 Pixel, nominale Pixelgröße 9 x 9 μm , $c = 35$ mm (aufgrund der Geometrie von Objektiv und Chip keine Brennweitenverlängerung), 6,5 MB/Bild bei 36 bit Farbtiefe, Speichermedium PCMCIA [z. B. 80 Bilder auf 520 MB-Medium (Jahr 2000), über 500 Bilder auf 4 GB-Medium (Jahr 2004)].

Flughöhe über Grund H [m AGL]	Bildmaßstabszahl m	Bodenfläche pro Einzelbild [m x m]	Größe Bodenpixel [m x m]	Bildanzahl pro km ² *	Bildbasis* [m]	Erforderliche Fluggeschwindigkeit [m/s]
50	1400	38,6 x 28,8	0,013 x 0,014	2184	38,6	4,8
100	2800	77,3 x 51,5	0,025 x 0,025	598	77,3	9,7
200	5700	157,3 x 104,9	0,051 x 0,052	143	157,3	19,7
500	14200	391,9 x 261,3	0,128 x 0,128	25	391,9	33,3
1000	28500	786,6 x 524,4	0,257 x 0,258	8	786,6	33,3
2000	57100	1576,0 x 1050,6	0,515 x 0,516	143**	1576,0	33,3
3000	85700	2365,3 x 1576,9	0,773 x 0,775	64**	2365,3	33,3

* Berechnet für 50 % Längs- und 20 % Querüberlappung sowie Formatlängsseite in Flugrichtung zeigend!

** Pro 10 km²!

Fig. 163 Theoretischer Mission-Envelope (berechnet nach technischen Daten der Kodak DCS-460)

Die hellgrau unterlegten Felder geben physikalisch von Starrflüglern nicht zu realisierende Fluggeschwindigkeiten an. Man sieht deutlich, dass die erforderliche Bildanzahl exzessiv ansteigt. Daher wird man im größten Maßstabsbereich üblicherweise im Burst-Modus der Kamera operieren müssen. Im vorliegenden Falle ergibt sich daraus folgende Abschätzung: Der Image-Burst erfolgt mit 2 Bildern/2 s, das heißt, ein mit 70 km/h (ca. 19,4 m/s) überfliegendes Fotoflugzeug könnte aus 100 m Höhe über Grund beispielsweise eine archäologische Grabungsstätte mit zwei Einzelbildern aufnehmen. Die beiden Bildhauptpunkte liegen dabei etwa 38,8 m auseinander. Der Bildhauptpunkt des zweiten Bildes liegt dabei bereits innerhalb des ersten Bildes, da dessen Bildrand 38,65 m vom Mittelpunkt entfernt ist. Es handelt sich hierbei also um eine fast exakte 50-prozentige Bildüberlappung. Die Größe des Überlappungsbereichs beträgt in diesem Fall 38,65 m * 51,5 m = 1990 m². Das Bodenpixel hat dabei eine Größe von nur 2,5 x 2,5 cm.“

Hierbei gewinnt die Frage, wie man ein Einzelbild so zielgenau in der Landschaft platzieren kann, eine erhebliche Bedeutung. Sie wird bei der Ausführung zu GPS und anderen Navigationsarten weiter unten beantwortet.

Die Erfahrung lehrt, dass Digitalbilder um 500 % vergrößert werden können, ehe die „Pixeligkeit“ des Bildes die Betrachtung nicht parallel zum Bildrand verlaufender Linien über „Treppenkanten“ zu stören beginnt. Das heißt, dass der effektive Bildbetrachtungsmaßstab im Flughöhenbereich zwischen 50 und 3000 m bei rund 1 : 17 000 bis 1 : 280 liegt. Oder auf luftrechtliche Aspekte bezogen: Gegenüber einer 150 kts schnellen, zweimotorigen Geschäftsreisemaschine, die aus Lärmschutzgründen kaum unterhalb von 10 000 ft operieren kann, erschließt sich bei Verwendung von leisen, kleineren und langsameren Flugzeugen ein Abbildungsmaßstab im Bereich von etwa 1 : 100 bis etwa 1 : 100 000. Das würde an der

erstgenannten Schranke ausreichen, um bei genügend hohem Kontrast beispielsweise Pferdehufspuren erkennen zu können. Das wiederum ist Leistung und Flexibilität zugleich.

Andererseits zeitigen viele kleine Einzelbilder bei einer anschließenden Photogrammetrie-Auswertung entsprechende Datenhaltungsprobleme. Viele Aufnahmen bedeuten im Vergleich zu einigen wenigen einen überproportionalen Anstieg an manueller Bearbeitungszeit. Überlegen wir folgendes: Jedes Bild liegt typischerweise im Rechteckformat vor und besitzt damit vier Ecken (es existiert keine einzige runde Sensorfläche, obwohl die Halbleiterkristalle allesamt rund gezogen werden, obwohl auch wabenförmige CCD-Elemente existieren und obwohl praktisch ausnahmslos runde Linsensysteme verwendet werden, wenn man einmal von Fresnelschen Beugungsgittern beliebiger Geometrie absieht). Mathematisch ist mit drei Punkten im Raum eine Ebene eindeutig bestimmt. Die präziseste Lagebestimmung eines (ebenen) Einzelbildes im Raum erfolgt deshalb geschickterweise über Punkte, die möglichst nahe an den jeweiligen Bildecken bzw. -rändern liegen.

Das Verknüpfen von Bildpunkten mit Geländepunkten bekannter Koordinaten, die auch als Passpunkte oder Ground Control Points (GCPs) bezeichnet werden, nennt man Geocodierung. Diese heißt softwareseitig auch Bildregistrierung (Image Registration). Geocodierung ist mit einem Abstand die arbeitsintensivste Projektphase während der Datenprozessierung.

Nun existiert jedoch physikalisch kein optisch perfektes Linsensystem: Die bekannten Linsenfehler und Abbildungseigenschaften verschiedener Linsenordnungen bedingen Verzerrungen im Strahlengang des Lichts: Öffnungsfehler (sphärische Aberration), Zweischalenfehler (Astigmatismus), Bildfeldwölbung, Verzeichnung, Farblängsfehler (chromatische Aberration). Des Weiteren tragen geometrische Versatzbewegungen von Objektiv, respektive dessen optischer Hauptebene, und der Film- bzw. Sensoroberfläche durch mechanische Störungen und thermische Spannungen dazu bei, dass sich sowohl der sog. Bildhaupt- oder Bildmittelpunkt als auch alle seine benachbarten und damit alle Pixel im Bild um einige μm verschieben können. Die resultierenden Abbildungsfehler machen eine mathematische Korrektur notwendig, die als Herstellung bzw. Wiederherstellung der „inneren Orientierung“ bezeichnet wird. Die innere Orientierung wird während des photogrammetrischen Arbeitsgangs für jedes einzelne Bild mittels Ausgleichsrechnung wiederhergestellt. Sie wird zeitlich vor die Rekonstruktion der sog. äußeren Orientierung gestellt und bedeutet die (heute noch überwiegend)* manuelle Zuordnung von weiteren Bildpunkten auf einem kameraeigenen Koordinatensystem mit dessen kalibrierten Markierungen und bekannten Koordinaten (üblicherweise 4, 8, 9 oder mehr weitere Rahmenmarken, Rahmen-Messmarken oder „Fiducial Marks“ genannt).

* Derzeit beginnen die Softwarehersteller damit Mustererkennung zu verwenden, um die Rahmenmessmarken eines Messbildes automatisch zu erfassen, und damit den Prozess der Herstellung der inneren Orientierung drastisch zu verkürzen.

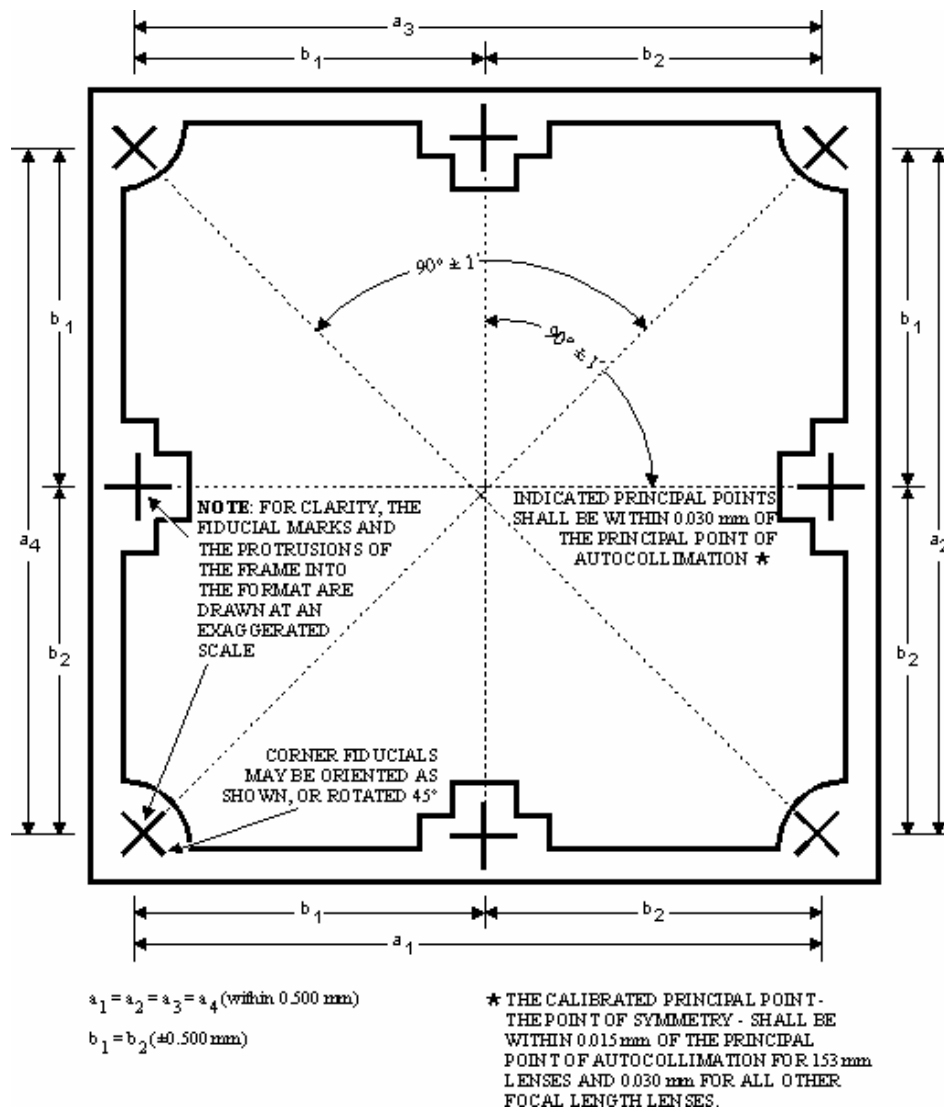


Fig. 164 Prinzipskizze eines Messbildrahmens mit 8 „x“ bzw. kreuzförmigen „Rahmenmarken“ (Fiducial Marks) (Quelle: <http://erg.usgs.gov/tsb/osl/figure2.gif>) Anmerkung: Mit ausreichender Erfahrung lässt sich allein aufgrund unterschiedlicher Layouts von Rahmenmarken das Kamerafabrikat erkennen!

Nehmen wir der Einfachheit halber einmal vier weitere Punkte pro Bild an, die wir zur Herstellung der inneren Orientierung benötigen. Das bedeutet, dass jedes Bild in eine beliebige Photogrammetrie-Softwareumgebung importiert und geladen werden muss, um dann in einem manuellen oder semi-automatischen Verfahren die acht Rahmenmarken ihren jeweiligen Koordinaten aus einem Kalibrierprotokoll zuzuordnen.

Nun ist bekannt, dass einschlägige Photogrammetrie-Software seit Beginn ihrer Entwicklung für Massendatenprozessierung ausgelegt wurde. D. h., es spielt keine Rolle, ob man Orthofotos zu Dutzenden, zu Hunderten oder gar Tausenden erstellt. Letztlich sind den Anwendungen lediglich durch die verfügbaren Datenspeicherkapazitäten Grenzen gesetzt. Die Praktikabilitätsgrenze für manuell auf dem Computer bearbeitbare Projekte liegt zumeist weit darunter.

„Mittelgroße“ Photogrammetrie-Projekte umfassen beispielsweise 300 - 500 Bilder. Mehr als 1000 Bilder sind kein substantielles Problem, wie man in einschlägigen Expertenrunden leicht

erfragen kann.* Das gilt jedoch mit einer massiven Einschränkung: Man benötigt bislang eine genügend hohe Anzahl von Passpunkten im Gelände, die auf den Bildern mit abgeleitet sind und zweifelsfrei identifiziert werden können, um die Geocodierung mittels Aerotriangulation durchführen zu können. Das bedeutendste Verfahren hierfür ist die Bündelblockausgleichung, bei der ebenfalls über Ausgleichsrechnung die sog. „Äußere Orientierung“ des Sensors zum Zeitpunkt der Aufnahme wiederhergestellt wird. Ergebnis der Bündelblockausgleichung ist hauptsächlich die Angabe der Sensorblickrichtung um alle 3 räumlichen Achsen und eine Bild-Koordinatentransformation, die jedem Bildpunkt eine entsprechende Geländekoordinate zuordnet. Das statische, digitale Endprodukt dieser Berechnung wird als Orthofoto bezeichnet.

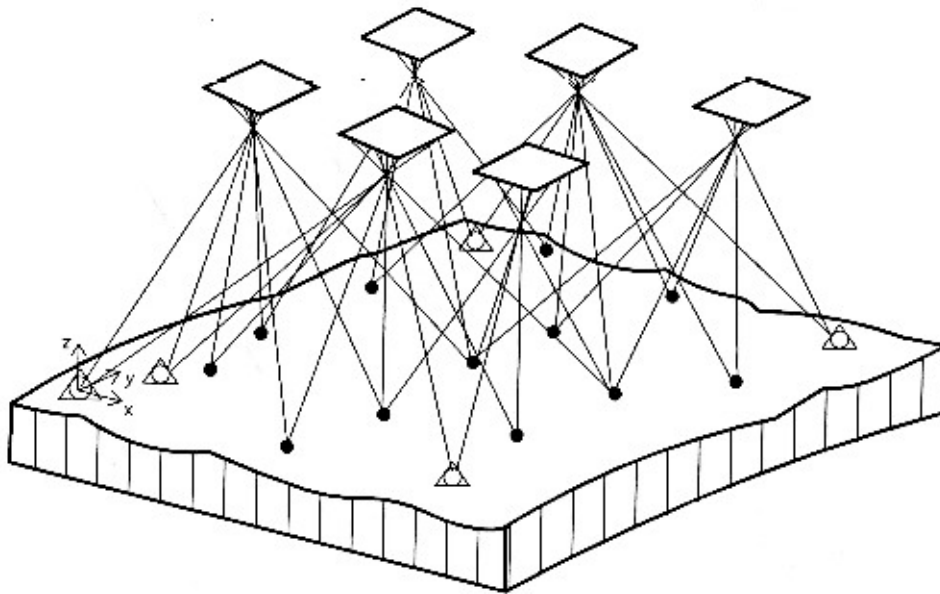


Fig. 165 Grundprinzip der Bündelblockausgleichung. Gefüllte Punkte: Verknüpfungspunkte; Dreiecke: allg. Signatur in der Photogrammetrie für einen Passpunkt, der sich durch bekannte Koordinaten innerhalb eines beliebig gearteten Koordinatensystems auszeichnet; (Kraus, 1997)

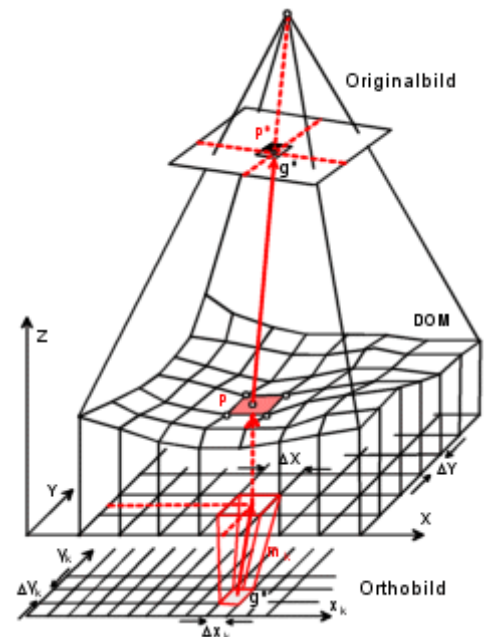
Dieser Begriff ist für die Photogrammetrie von zentraler Bedeutung. Er verdient deshalb eine nähere Definition:

Ein „Orthofoto ist ein durch Differenzialentzerrung verändertes, photographisches Bild, das geometrisch weitgehend einer orthogonalen Projektion des Objekts auf eine abwickelbare Bezugsfläche entspricht. Dieses Bild ist bereits entzerrt und auf ein orthogonales Koordinatensystem transformiert. Während dieser Arbeitsschritt früher durch einen speziellen Orthophotoplotter durchgeführt wurde und zum analogen

* Von Kritikern, deren Interessenschwerpunkt nicht auf der Geoinformtik ruht, wird häufig befürchtet, dass ein PC nicht mehr Bilder prozessieren könne, als in den physikalisch vorhandenen RAM-Speicher passen. Dies gilt meiner nach Erfahrung tatsächlich für eine Vielzahl von Low-/Midrange-Grafiksoftwarepaketen. Man darf jedoch hierbei nicht vergessen, dass Photogrammetrie-Software im Zuge ihrer Entstehung um den Faktor 10 000 aufwändiger programmiert und in einer ebensolchen Relation teurer war bzw. noch immer ist. Selbst mit 486ern und Pentium-I-PCs mit nur 64 MB RAM war gegen Mitte der 90er Jahre photogrammetrische Bildverarbeitung möglich. Allerdings war bis zur Jahrtausendwende dieses Thema noch nicht allgemein diskussionsfähig. Die tatsächlichen „Flaschenhälse“ liegen heute (2005) wie bei jedem anderen Multimediasystem im Bereich CPU-Takt, Speicher-Takt und Festplattendurchsatzgeschwindigkeit.

Orthophoto führte, geschieht dies in der digitalen Photogrammetrie rein rechnerisch und resultiert im digitalen Orthophoto. Ist speziell in digitaler und aktueller Form sehr gut als Hintergrund in einem hybriden GIS einsetzbar und ersetzt hier oftmals fehlende digitale Kartengrundlagen.“ (Quelle: Online-Lexikon zur Geoinformatik der Universität Rostock, <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/lexikon.asp>, April 2005)

Fig. 166 Prinzipdarstellung der Orthobilderzeugung (ebd.) – Wichtige Anmerkung: Im abgebildeten Fall wird ein Luftbild über einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM) differentiell entzerrt, und damit zu einem Orthofoto umgewandelt. Streng genommen erhält man jedoch auch Orthofotos ohne vorhandenes Oberflächenmodell. In so einem Falle wird das resultierende Endprodukt auf eine idealisierte Bezugsfläche entzerrt (Ebene oder Kugel). In der Praxis herrscht hierüber einige Verwirrung: GIS-Anwender tendieren dazu, erst dann von Orthofoto zu sprechen, wenn das Bild auch tatsächlich auf eine modellhafte Repräsentation des Geländes projiziert wurde.



Weil es aus der obigen Definition nicht klar genug hervorgeht, sei hier noch einmal darauf verwiesen, dass das Orthofoto auch als direkte Folge aller Arbeitsschritte im Zuge der Geocodierung betrachtet werden kann und ein unverzichtbares Bindeglied auf dem Weg zum sog. Luftbildplan darstellt, d. h. eines geocodierten Mosaiks von Einzelbildern mit Eigenschaften, wie sie sonst nur kartographischen Produkten zu eigen sind (Messbarkeit von Maßstab, Winkel, Länge, Fläche).

Zurück zum Problem des Aufwandes bei der Geocodierung: Für unser oben genanntes schematisches Beispielprojekt würde dies alles bedeuten, dass für die 1000 Bilder ein Arbeitsaufwand von 8000 manuell zuzuordnenden Punkten und mindestens(!) 4000 Geländepunkte mit bekannten Koordinaten notwendig wären. Diese Zahl schreckt wahrscheinlich selbst diejenigen Geographen auf, die bereits eine gewisse Vorstellung über die Funktionsweise von Photogrammetrie mitbringen. Man stelle sich einmal vor, 4000 Bildpunkte auszusuchen, in einer Karte zu identifizieren und dann 6- bis 8-stellige Koordinaten in eine Zuordnungstabelle einzutippen! Das macht man nicht „einfach so nebenbei“. Nehmen wir einmal an, wir bräuchten bei optimaler Lage natürlicher Passpunkte und sämtlicher vorhandener Koordinaten für ein Bild durchschnittlich nur 3 min. Dann würde diese überaus eintönige Arbeit bereits 200 wertvolle Zeitstunden oder volle 25 Arbeitstage in Anspruch nehmen plus einen gewissen Zeitbetrag „x“ für die eigentliche Triangulationsrechnung, die dann völlig automatisch ablaufen kann – allerdings nur, sofern sich keine Fehler eingeschlichen haben. Danach stünde ein etwas übersichtlicheres Bündel Orthofotos zur Verfügung, von denen wir jedes einzelne direkt in ein GIS als zeitlich und räumlich hochpräzise Rasterebene importieren oder die wir für eine weitere 3D-Auswertung (Höhenbestimmung) heranziehen könnten. Alles in allem würde dieser Gesamtprozess wenigstens zwei bis drei Monate in Anspruch nehmen.

Wie viel Geländefläche hätte man mit diesem Aufwand schlussendlich in eine computerverständliche, universell transformierbare Modellumgebung überführt? Im Falle der

oben angesprochenen Kodak DCS-460 ergäbe sich folgende idealisierte und flughöhen-, d. h. bildmaßstabsabhängige Szenariobetrachtung:

Flughöhe über Grund H [m AGL]	Bildmaßstabszahl m	Bodenfläche pro Einzelbild [m x m]	Größe Bodenpixel [m x m]	Erzielte Fläche bei 1000 Aufnahmen [km ²]
50	1400	38,6 x 28,8	0,013 x 0,014	1,112
100	2800	77,3 x 51,5	0,025 x 0,025	3,981
200	5700	157,3 x 104,9	0,051 x 0,052	16,501
500	14200	391,9 x 261,3	0,128 x 0,128	102,404
1000	28500	786,6 x 524,4	0,257 x 0,258	412,493
2000	57100	1576,0 x 1050,6	0,515 x 0,516	1655,746
3000	85700	2365,3 x 1576,9	0,773 x 0,775	3729,842

Fig. 167 Theoretische Flächenleistung bei 1000 nahtlos aneinander liegender Aufnahmen mit Kodak DCS-460. Die tatsächlich erzielbare Flächenleistung liegt weit darunter, da durch unvermeidbare Flugzeugstörbewegungen mit entsprechenden Bildüberlappungen geflogen werden muss, um den Bildverband nicht zu „zerreißen“. Wenn jedoch nur 50 % oder weniger davon übrig blieben, dann ergäben sich noch immer genügend sinnvolle Anwendungen. Die hellgrau unterlegte Fläche ist wieder jene mit nicht-fliegbare Geschwindigkeit. Was passierte allerdings in jenen Flughöhen und Maßstabsbereichen, wenn man anstelle einer Digitalkamera eine digitale Videokamera benützte? DV-Kameras mit Megapixel-CCD-Sensor gibt es bereits. Mit Frame-Grabbern ließen sich ohne Schwierigkeiten nach beliebigen Zeitintervallen Einzelbilder auskoppeln und dem üblichen Auswerte-Prozess zuführen.

Gleichen wir diese Zwischenergebnisse mit anderen Einflussgrößen ab: Aus Veröffentlichungen von P. Bachmann und der Erfahrung können wir schließen, dass Flugzeuge unabhängig von Typ und Nutzungsart (gewerblich/privat) etwa $250 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ in der Luft sein sollten, um in ökonomisch sinnvolle Kosten-Nutzen-Relationen zu gelangen.* Dieser Autor stellte Wirtschaftlichkeitsberechnungen für mehrere Dutzend Flugzeugtypen an; bei den einmotorigen LFZ vom Motorsegler angefangen (z. B. Super Dimona) bis hin zum mittelschweren Utility-Flugzeug (z. B. Pilatus Turbo Porter).

* Eine umfassende Arbeit zur Beleuchtung wirtschaftlicher Aspekte liefert „Die Entwicklung und Bedeutung des Kleinflugzeugmarktes in Westdeutschland nach 1955“ (Scholz, 1995). Hierin schreibt er, dass Bachmann auf statistischem Wege $400 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ für die kommerzielle Fliegerei als anzustrebendes Minimum ermittelte. Dieser Wert erscheint mir jedoch derzeit für eine wissenschaftlich orientierte Fliegerei noch als deutlich zu hoch.

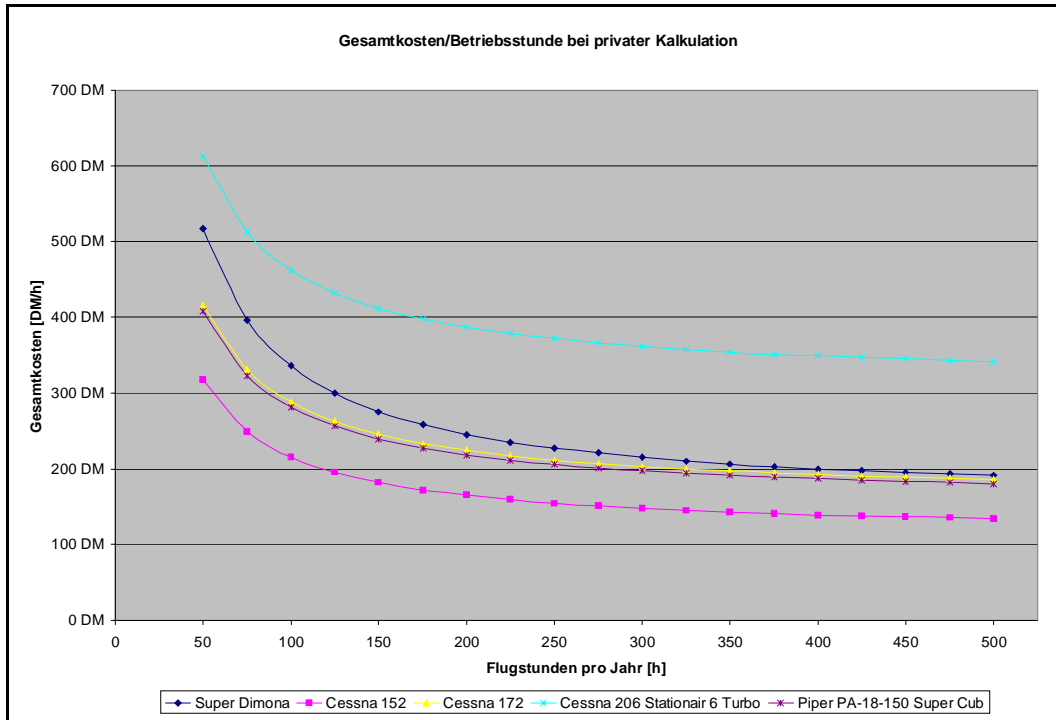


Fig. 168 Zusammenhang zwischen jährlichem Flugstundenaufkommen und resultierenden Gesamtkosten pro Flugstunde einiger ausgewählter konventioneller Sportflugzeuge und Motorsegler – private Kalkulation; alle Angaben aus (Bachmann, 1996)

Bei einer Berücksichtigung der steuerlichen Abschreibung ergeben sich ähnliche Kurvenscharen mit veränderter Krümmung und Verschiebung auf der y-Achse.

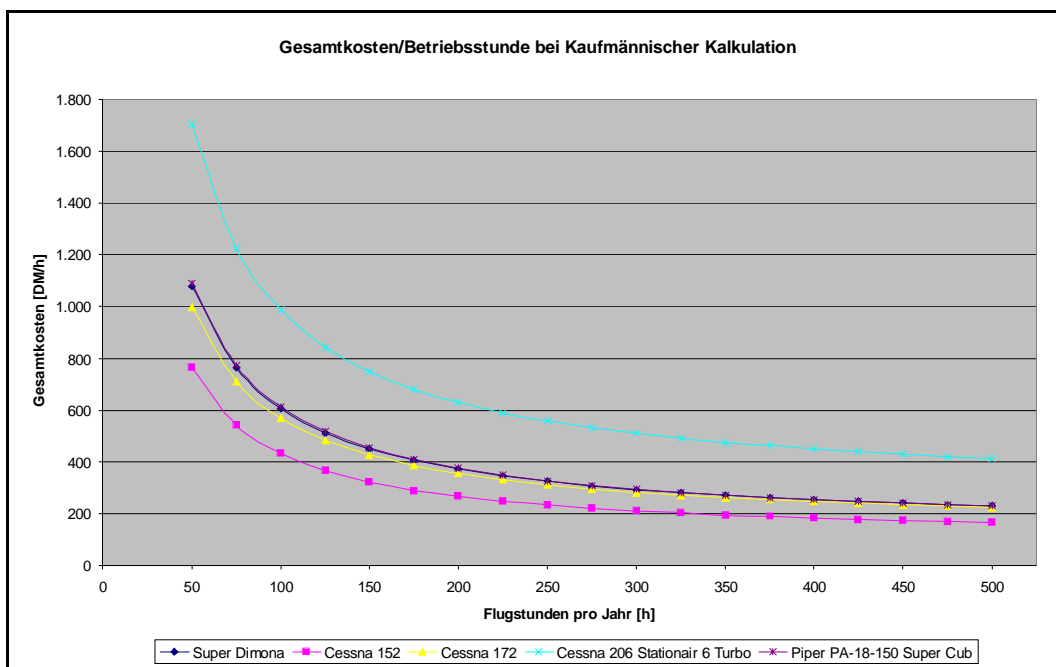


Fig. 169 Erhöhung der Flankensteilheit um etwa den Faktor 2 bei kaufmännischer Kalkulation (Bachmann, 1996)

Es existieren allerdings einige vereinsbetriebene und private Flugzeuge, die aus unterschiedlichsten Gründen heraus sogar weniger als $50 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ bewegt werden. Manchmal

stehen Flugzeuge über Jahre hinweg praktisch ungenutzt in den Hangars. Eine verlässliche Statistik hierüber existiert nicht und es erscheint im Rahmen dieser Arbeit zu aufwändig, entsprechende Schätzzahlen dafür zu liefern. Wenn man diese beschriebenen Verhältnisse mitberücksichtigt, dann kann man daraus die rein willkürliche Festlegung aufstellen für einen bemannten 3-achsgesteuerten Starrflügler mindestens 100 operationelle Flugstunden pro Jahr zu fordern, um eine Beschaffung überhaupt erst rechtfertigen.* Diese Grenze sollte als absolutes operationelles Minimum betrachtet werden, von dem man für die Untersuchung verschiedener Szenarios ausgehen sollte.

Berechnen wir also vor diesem Hintergrund den „Leistungsüberhang“, der sich alleine durch die Verwendung von Digitalkameras gegenüber herkömmlichen Filmkameras in diesem Kontext ergibt: Ein kritisches Maß von Digitalkameras stellt heute noch immer deren „Dwell Time“ dar, das ist die Mindestzeit, die benötigt wird, um die CCD-Elemente auszulesen und deren Werte zu einem Bild zusammenzusetzen und auf das verwendete Speichermedium zu schreiben. Die Dwell Time ist damit ein kritischer Faktor für die Flugplanung, da sie damit gleichzeitig die Mindestbildfolgezeit für die unterbrechungsfreie Aufnahme von Bildserien beliebiger Dauer angibt. Sie steuert damit auch den größtmöglichen Bildmaßstab, der maximal erfolgen werden kann. Für viele Kameras ist diese Dwell Time nicht genau genug in Erfahrung zu bringen, da zeitkritische Anwendungsfälle eher selten untersucht werden, und demzufolge die Angaben in Testberichten stärkeren Schwankungen unterliegen, sofern sie überhaupt vorhanden sind.

Gehen wir also für eine Beispielbetrachtung vorsichtigerweise von 10 s aus. Dann bräuchten wir für jene 1000 Bilder 167 min, also etwa 2:47 h. Berücksichtigen wir eine An- und Abflugdauer von und zum Einsatzgebiet von je einer Stunde (was für kleinere Projekte durchaus realistisch erscheint), dann ergäben sich ca. 1000 Bilder pro 5 Flugstunden. Das wiederum würde bei der von mir als realistisch empfundenen Nutzungsdauer von 250 Flugstunden pro Jahr 50 000 Aufnahmen im selben Zeitraum bedeuten.

Daraus lässt sich die Problemlage deutlich erkennen: Ein Bündel aus 1000 Bildern verursacht bereits einen Aufwand, der selbst mit computergestützter, semiautomatischer Auswertung bei 50 x 2 Monaten, also 100 vollen Monaten liegen würde! Das Flugzeug liefert jedoch die 50-fache Datenmenge. Wohlgermerkt – die 100 Monate wären bei dieser Betrachtung nur damit ausgefüllt, die Geodaten in sinnvoll computer-archivierbarer Form aufzubereiten. Dabei ist noch keineswegs das zentrale Problem der Koordinatengewinnung für die Passpunkte berücksichtigt. Stellen Sie sich einmal vor, dass diese Passpunkte im Gelände pro Bild mit ein oder mehreren Signalmarken noch ausgelegt werden müssten, wenn man der Triangulations-Methode korrekt folgt, weil man über vollständig unbebautem Gelände arbeitet (z.B. Monitoringprojekte über Nationalparks). Ein derartiger Aufwand wäre wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen!

* Unterhält man sich mit Sportpiloten, dann wird eine Übungsmindestgrenze von $100 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ angegeben, die benötigt wird, um an heute üblichen Erfahrungs- und Lernkurven im Wettbewerbsrahmen anknüpfen zu können. Verglichen damit ist das gesetzlich geforderte Minimum zur „In-Übungs-Haltung“ zwar ausreichend, aber vergleichsweise gering: 24 h pro 24 Monate.

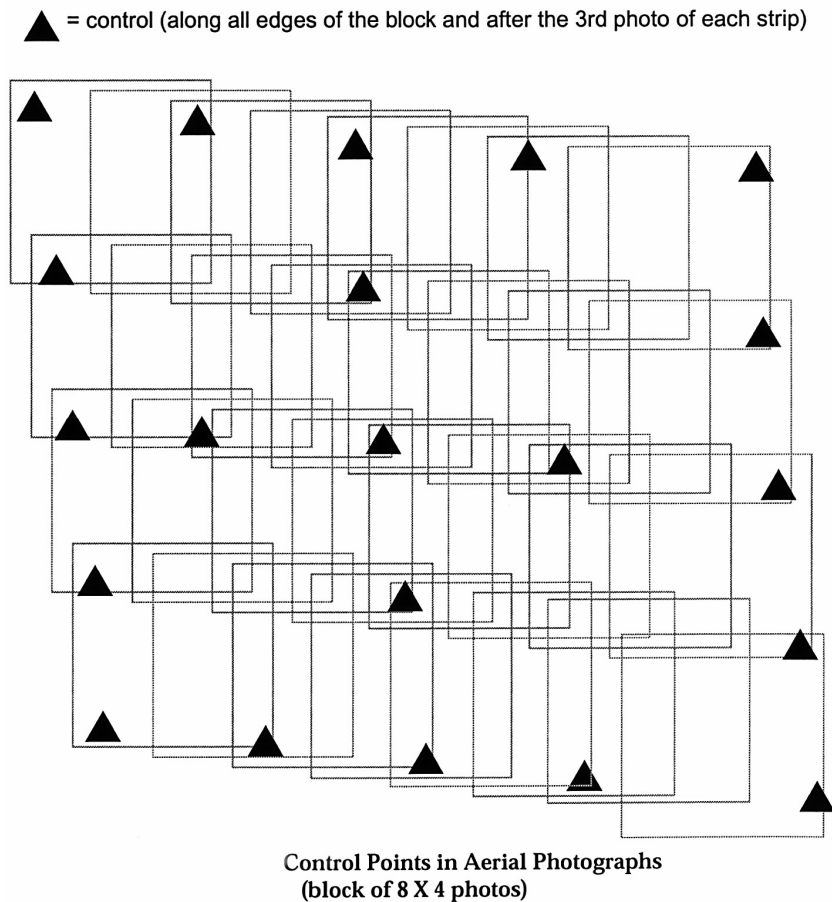


Fig. 170 Optimale Passpunktverteilung im Bildblock (Schrader und Pouncey, 1997)

Denn: Wo steckt bei all diesen Betrachtungen der eigentliche Lernanteil am beobachteten Forschungsgegenstand, nämlich der Landschaft selbst mit ihrem Prozessgefüge? Wenn wir 100 Monate lang einen oder mehrere entsprechend geschulte Mitarbeiter einer Umweltforschungseinrichtung mit dieser Datenaufbereitung betrauen, dann wird zwar das Ziel der GIS-Integration zeitlich und räumlich hoch aufgelöster Datensätze erreicht. Nicht jedoch der Lerneffekt, der sich durch das „Beobachten“ als Tätigkeit an sich ergibt, wie es für Feldbiologen seit jeher zum elementaren, methodischen Handwerkszeug gehört. Was nützen uns Fernerkundungsdaten, auf denen man evtl. ausgezeichnete Forschungen zum Bewegungsverhalten von Wildtieren erfassen und rekonstruieren könnte, wenn wir es angesichts der anzustrebenden GIS-tauglichen Auswertung mit einem zeitlichen Versatz und einem Aufwandsüberhang zu tun haben, der nur bedingt zur intensiveren Nutzung von zeitlich und geometrisch hochauflösender Fernerkundung einlädt?

Diese – zugegebenermaßen sehr grobe – Wirkanalyse von Fernerkundung veranschaulicht die bestehenden Vor- und Nachteile kleinformatiger Luftbildforschung bereits sehr deutlich. Der größte Teil des aufgewendeten Arbeitseinsatzes verpufft regelrecht in den für die Allgemeinheit nicht mehr nachvollziehbaren Tiefen unserer digitalen Transkriptionsmethoden. Es ist keineswegs überraschend, dass die Fernerkundung aufgrund des Geocodierungsproblems heute noch nicht den Stellenwert in größeren potentiellen Anwenderkreisen erlangt hat, der ihr im Zeitalter des Computers eigentlich zustünde. Die daraus resultierende Zweiseitigkeit dieses Instruments führt dazu, dass die Bearbeiter von Fernerkundungsdaten nur bedingt oder gar nicht mehr in direkte Kommunikation zu den

eigentlichen Adressaten für diese Daten treten können. Bis zum Abschluss der Projektarbeiten sind die wesentlichen Erkenntnisse über das räumliche Gefüge anderweitig bekannt geworden oder erhoben. Aufgrund dieser methodischen Beschränkung haftet der Fernerkundung der Ruf an, lediglich Bestätigungen für ohnehin Bekanntes liefern zu können; und dies obwohl der langfristige historische Entwicklungsverlauf etwas völlig anderes beweist.

Ein photogrammetrischer Bildflug ist von einem „Bildflugneuling“ über unbekanntem Gebiet in einem halben Tag sorgfältig geplant und in einem ebensolchen Zeitraum durchgeführt.* Unter der Voraussetzung, dass die Vorteile der Photogrammetrie vollständig ausgeschöpft werden sollen, stehen also einem einzigen Tag der Datenerhebung 4 Jahre Datengrobauswertung gegenüber. Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis beträgt also ca. 1520/1. Der Wirkungsgrad $\eta = \text{Erfassungsleistung}/\text{Auswerteleistung} = 1/1520 = 0,00066$. Das ist ein so katastrophaler Wert, dass selbst bei einer Fehlkalkulation der Aufwandsermittlung um mehrere 100 % das tatsächliche Endergebnis außerhalb jeglicher Wunschgrenzen liegt. Hierzu ein direkter Vergleich aus den Zeiten der Analogbildaufbereitung und im militärischen Kontext der taktischen Luftbildaufklärung:

„In der Praxis hat sich bewährt, den Entwicklungsprozeß auf 1min zu beschränken, nach einer Zwischenwässerung von 10s, anschließendem Stopp- bzw. Unterbrecherbad und einer Fixage von 20 bis 30s bereits am nassen Luftbildnegativ die Luftbildinterpretation zu beginnen. Das Luftbildnegativ ist nach 1 bis 2 Stunden zur Interpretation nicht mehr zu gebrauchen, hat aber seinen Zweck voll inhaltlich erfüllt. In der taktischen Tiefe kann sich die Lage so schnell ändern, daß eine Lagerung solcher Luftbildfilme unzweckmäßig erscheint. Moderne Entwicklungsautomaten werden dieser Technologie gerecht. Sie arbeiten mit Verfahren, die eine längere Lagerung möglich machen, aber bereits nach 2 bis 5 Minuten brauchbare Ergebnisse vorweisen, die [...] dringend notwendig sind.“ (Welzer, 1985)

Wenn die Lage derartig drastische Methoden erfordert, kann man getrost davon ausgehen, dass die gesamte Prozesskette selbst unter Anfertigung mehrerer Tausend Aufklärungsfotos an einem einzigen oder an nur wenigen Tagen deutlich näher an einem Wirkungsgrad von 1 liegen wird als in dem oben skizzierten Fall, in dem es auf Präzision, Auswerteflexibilisierung und Archivierbarkeit ankommt. Zugegeben – dieses Beispiel hinkt aufgrund völlig unterschiedlicher personeller Möglichkeiten und zugrunde liegender Sacherfordernisse. Was mit derartigen Gegenüberstellungen zum Ausdruck gebracht werden soll, ist darauf eindringlich hinzuweisen, sowohl die Technologie als auch die verwendete Methodik den Erfordernissen anzupassen. Beispielsweise ist es denkbar, für die Erarbeitung linearer Geländemerkmale (Fließgewässerzustandsüberwachung[†], Trassenplanung etc.) anstelle von hoch auflösenden Einzelbildsensoren (derzeit 16 Mio. Pixel) digitales Video[‡] (derzeit max. 1 Mio. Pixel) zu verwenden. Das würde das aufgezeigte Problem etwas lindern – hier nicht so

* Wenn wir hier annehmen, dass er über ein Fluggerät verfügt, das für einen Einhand-Flugbetrieb entsprechend ausgerüstet ist (Digitalkamera automatisch mittels Computer an vorgesehenen GPS-Koordinaten ausgelöst; keine weitere Hilfe benötigt).

† Vgl. hierzu (Gießübel, 1991; Gießübel, 1993)

‡ Digitales Video besitzt – trotz seiner vergleichsweise geringen Bildqualität – einen entscheidenden Vorteil: Die sog. Bildbasis, der Abstand zweier Bilder, die zusammen ein Stereobildpaar für eine photogrammetrische Auswertung ergeben, ist sehr stabil (24 Bilder/s!). Damit ist es möglich, einzelne Bilder („Frames“) aus dem Videodatenstrom mittels Frame-Grabber zu extrahieren und weiterzuverarbeiten.

sehr im Sinne der Geocodierung als vielmehr für eine gewisse Steigerung der Bearbeitungsflexibilität (drastische Vereinfachung der Datenerhebung, einfachere Handhabung des Datensatzes über Einzelbildextraktion etc.).

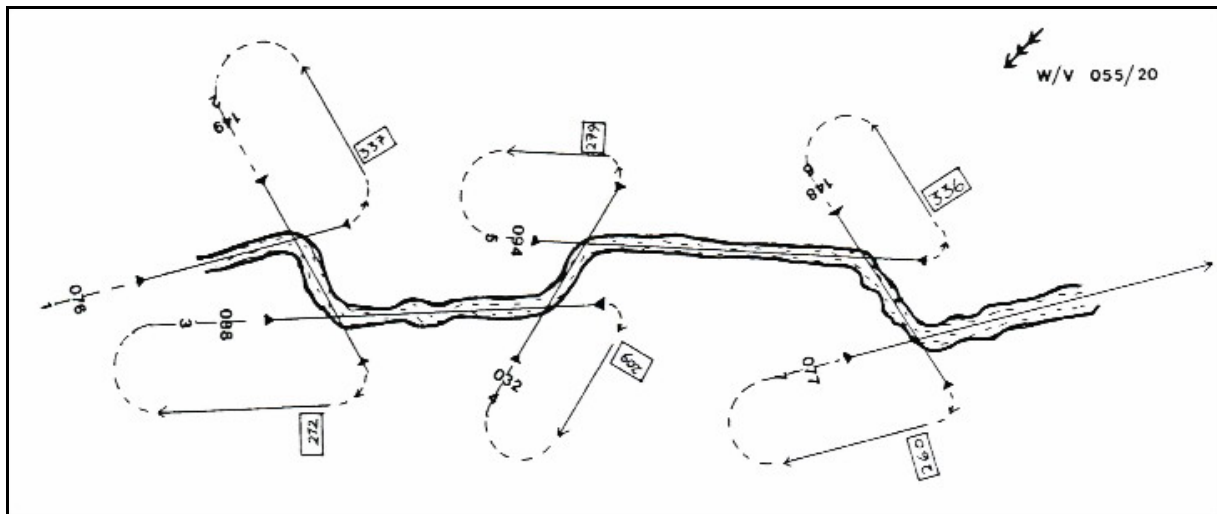


Fig. 171 Fachgerechte Flugstreifenplanung zur Erfassung linienhafter Geländeelemente (Read und Graham, 2002)

Fahren wir in dem Beispiel fort und konzentrieren uns auf die wirksamsten Lösungsstrategien, die aus diesem Problemfeld der GIS-Integrierbarkeit erwachsen. Wie wir oben in dem einfachen Beispiel gesehen haben, ist die Geocodierung ein entscheidender Engpass. Dies gilt prinzipiell für alle Sensoren auf sämtlichen Plattformen. Das strategische Entwicklungsziel lautet daher, die Technologie so auszubauen, dass beobachtbare exogen wirkende Kräfte in der Umwelt in etwa mit der Geschwindigkeit erfasst werden können, in der sie auftreten, und weiterhin der grundlegende analytische Schritt für die computerbasierte Rekonstruktion oder Modellierung dieser Sachverhalte, nämlich jener der Geocodierung, in dasselbe Zeitintervall fällt, höchstens jedoch um den Faktor 2 bis 5 hinterherhinkt und nicht um zwei Größenordnungen und mehr darüber liegt, wie dies heute üblicherweise der Fall ist.

Die Lösung für dieses Problem ist nicht nur prinzipiell bekannt, sondern seit etwa Mitte der 90er Jahre technisch vollständig gelöst und direkt verwendbar. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, bei dem die Passpunkte, und damit das manuelle Zuordnen von Bildpunkten zu Geokoordinaten, im Zuge der digitalen Datenaufbereitung weitestgehend eliminiert werden.

10.1 Direkte Autogeoreferenzierung – eine technologische Meilensteinentwicklung in der Rahmenbetrachtung

Ein Luftbild ist zunächst einmal lediglich eine Abbildung der Erdoberfläche. Es besitzt per se einen gewissen dokumentarischen Wert – in direkter Abhängigkeit von einer mehr oder minder einzigartigen Standortwahl des Betrachters und seiner Perspektive. So wird das weite Anwendungsfeld der Schrägaufnahmen heute - im wahrsten Sinne des Wortes - gesehen. Für Umweltwissenschaftler ohne entsprechende Ausbildung ersetzt das Luftbild lediglich eine aufwändig anzufertigende eigene Geländeskizze. Ohne Geocodierung ist jedoch solch ein Bild für eine elegante, computergestützte Verknüpfung mit den Arbeitsergebnissen eines

Feldwissenschaftlers nur von eingeschränktem Nutzwert. Dieses Problem zeigt sich besonders gut in der Luftbildarchäologie. Dort werden seit Jahrzehnten Luftbildarchive aufgebaut, die vornehmlich auf Einzelbildern über punktuellen Aufnahmeorten beruhen. Bei diesen Schräg- oder Steilaufnahmen geht es überwiegend darum, unbekannte archäologische Bodendenkmäler zu lokalisieren und deren Zustand zu dokumentieren. Diesem Zweck werden die Bilddaten in umfangreichen Archiven voll und ganz gerecht. Nun zeichnet sich jedoch allmählich auch ab, dass eine schlaggenaue Kenntnis der Position einer solchen Entdeckung nicht ohne weiteres in ein GIS-verträgliches Format unter Rechtfertigung eines wirtschaftlich vertretbaren Geocodierungsaufwandes umgesetzt und weiterverarbeitet werden kann. In den Datenbeständen befinden sich mitunter sehr widerspenstige Bilddokumentationen.

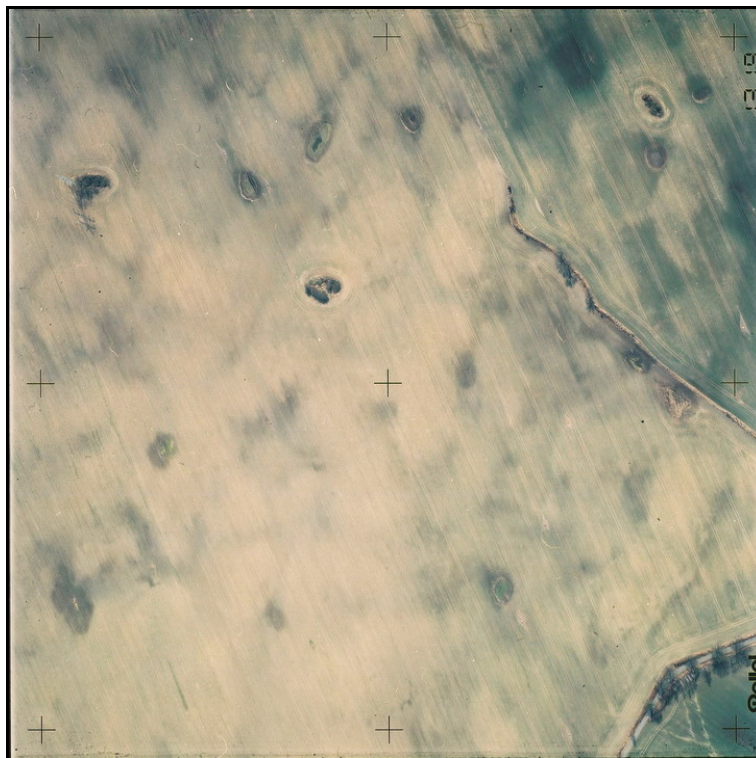


Fig. 172 Ein typisches Senkrechtbild, das zwar hochdetaillierte Geländemerkmale wiedergibt, bei dem jedoch kaum Aussicht darauf besteht, es mit sinnvollen Lagegenauigkeiten geocodieren zu können (Quelle: eigene Befliegung, Foto: I. Feeser, 2003)

Seit dem 2004-AARG-Symposium in München gibt es dafür eine – wenngleich eher scherzhaft geäußerte – Bezeichnung: der Altmeister der deutschen Luftbildarchäologie, I. Scollar, bezeichnet Bilder in der Art wie das oben gezeigte als „Otto-Pix“^{*}: Aus jeweils singulären, schräg oder steil gewonnenen Aufnahmen größter Bodenauflösung lassen sich aufgrund fehlender Schlaggrenzen nur selten geocodierte Digitalprodukte gewinnen. Weltweit arbeiten derzeit Experten aus der „Computer-Vision“-Szene an entsprechenden Algorithmen, mit denen es gelingen soll, von *beliebigen* Beobachterstandpunkten aus gewonnene Bildgegenstände zu dreidimensionalen Objekten umzurechnen, doch das Problem der maßstabsgerechten Visualisierung bleibt erhalten, wenn Objekte ohne bekannte Dimensionen in der Bildszene auftauchen und aufgrund fehlender Infrastruktur (z.B. Straßenbreiten etc.) keine Vergleichsmaßstäbe vorhanden sind. Darüber hinaus ist es fraglich, ob eine allgemeine

^{*} In Anspielung auf Otto Braasch, den bislang produktivsten aller Luftbildarchäologen, und seine bleibenden Verdienste, die er sich um die Verbreitung und Weiterentwicklung der Methode erworben hat.

3-D-Visualisierungssoftware die geringen Geländehöhenunterschiede, wie sie im archäologischen Luftbild typischerweise von Interesse sind, für eine quantitative, relative Geländehöhenmodellierung ausnützen könnte.

Daher gilt:

Aus Otto-Pix entstehen keine Ortho-Pix!

Damit haben prinzipiell alle bisher gewonnenen Archivdatenbestände zu kämpfen. Diejenigen, die noch angelegt werden, unterliegen demselben Phänomen: Die geometrischen Auflösungen, die mittels Flugzeugsensorik ohne weiteres in den geometrischen Auflösungsbereich von Subdezimetern getrieben werden können, gestalten sich ab jenem Zeitpunkt kritisch für eine weitere Auswertung, ab dem die Schlaggrenzen über die Bildränder hinaus wandern. Die hohe geometrische Lagegenauigkeit, die im Landeskoordinatensystem aufgrund der guten Bodenpixelauflösung von nur wenigen Zentimetern potentiell erreicht werden könnte, wird somit wieder zunichte gemacht. Dieser Umstand greift bereits bei einem einzelnen Otto-Pix. Eine bequeme Berechnung eines ganzen Bildverbandes dagegen ist praktisch kaum mehr durchführbar.

Infolge dieser Beschränkungen haben wir es heute nicht nur in der Archäologie, sondern in fast allen lokalen feld-wissenschaftlichen Untersuchungen, bei denen die Geoinformatik eine Rolle spielt, mit Anwendungen zu tun, bei denen der Geschwindigkeitsvorteil einer luftgestützten Erfassung im Zuge der (irgendwann) anstehenden Datenweiterverarbeitung wieder aufgehoben wird. Ein weiterer – in meinen Augen noch wesentlicherer Aspekt – betrifft die Güte der digitalen Endprodukte: Obwohl die mathematischen Definitionen von Erdfigur und darauf befindlicher Koordinatensysteme eindeutig und auch auf jedem Computer mit entsprechend installierter GIS-Lizenz vorhanden sind, wird bei den meisten der mir bislang bekannten Untersuchungen mit manuellen „Offset“-Vektoren gearbeitet, die die auftretenden Modelldeformationen bearbeiterabhängig nach rein visuell-subjektiven Kriterien ausgleichen. Das wiederum führt dazu, dass die meisten mit einem um ein Vielfaches darüber liegenden Aufwand im Gelände präzise erhobener lokaler Koordinatensysteme nicht eindeutig abgeglichen werden könnten, sofern eines Tages der Wunsch im Raume stünde, mehrere Geodatenbasen von Feldkampagnen zusammenzuführen.

Anders ausgedrückt: An verschiedenen Stufen der Erhebung unterschiedlicher Geodaten wird mit einer fast übertriebenen Sorgfalt gearbeitet, während sich diese Einzelgenauigkeiten von einzelnen Bearbeiterstufen nicht bis zu einem vollständigen Endprodukt (Hybrid-GIS mit beliebig vielen thematischen Layern) erhalten lassen. Negativ dargestellt zielt im Grunde genommen dieser Zeitversatz darauf ab, die Verantwortung für die Konsistenz von Datensätzen zugunsten der Geschwindigkeit und zulasten nachfolgender Bearbeitergenerationen abzuwälzen. Dieses Vorgehen ist bislang deshalb tolerierbar geblieben, weil Rechnerkapazitäten und Erfahrungen im Umgang mit Hard- und Software dünn gesät waren, und die Kenntnisnahme der Umweltobjekte selbst weit im Vordergrund stand. Wie schon an anderer Stelle gezeigt, ändert sich diese Situation grundlegend durch die zunehmende Verbreitung von GIS-Software, weswegen diese Unzulänglichkeiten künftig etwas deutlicher zu Tage treten und öfter zu stören beginnen werden.

Wenn man über eine wirtschaftliche Möglichkeit nachdenkt, ein Luftbildaufnahmesystem sowohl für hochpräzise Punktbefliegungen als auch für Flächenkartierungen in den von Umweltwissenschaftlern gewohnten Maßstabsbereichen einzusetzen, dann müssen heute diese Umstände angesichts der Forderung einer nachhaltig wirksamen

Datenerhebungsgrundlage berücksichtigt werden. Es wird in dieser Hinsicht beim allgemeinen Umgang mit Geodaten nicht selten übersehen, dass erst mit Beginn des Weltraumzeitalters und der Entwicklung von GPS ein weltweit homogenes Koordinatensystem entstanden ist, welches erlaubt, transkontinental vergleichbare Datensätze mit Dezimetergenauigkeit zu erheben. Vor der GPS-Ära konnten Geodäten und Astronomen die einzelnen Landeskoordinatensysteme über mehrere Kontinente hinweg auf maximal 100 Meter Lagegenauigkeit aneinanderfügen. (Bauer, 1997)

Mancher Leser wird jetzt vielleicht fragen, warum eine weltweit vereinheitlichte Koordinatenbestimmung denn sinnvoll sei angesichts der Bedeutung, die er sich und seiner Arbeit zuschreibt. Doch das ist an dieser Stelle eine unzureichende Überlegung. Durch die ubiquitäre Verbreitung von Computern – und der darauf installierten Software – wird seit 30 Jahren ein Trend deutlich, der in der täglichen Arbeit nicht vordergründig wahrgenommen wird: Die Maßeinheiten und die beobachtbaren Skalen werden in einem globalen Rahmen über die Softwareapplikationen normiert. Die verwendbaren Bezugssysteme, Skalen, Einheiten usw. werden mit der Software direkt zum Endnutzer transportiert. Die Summe der Endnutzer und ihre Investitionsbereitschaft gegenüber einer Vielzahl von Produkten auf dem Weltmarkt entscheidet letztlich darüber, was sich im Verlauf dieses Standardisierungsprozesses als nützlich herauskristallisieren wird. Man ist heute noch immer dabei, lokale und regionale Besonderheiten von Koordinatensystemen in die „Algorithmisierung“ mit aufzunehmen – doch dieser Prozess ist durchaus endlich. Ein gegenläufiger Trend zur Reduktion dieser babylonischen Vielfalt an Koordinatensystemen wird zwangsläufig dann einsetzen, wenn eine gewisse Sättigungsschwelle beim länderweiten Übertrag von historischen analogen Geodaten in digitale Äquivalente überschritten sein wird und die bedeutsamsten Inhalte direkt durch Koordinatentransformation miteinander über zunehmend größeren Raumeinheiten hinweg abgleichbar vorliegen. Beispielsweise entfaltet die Bezugsgrundlage des „World-Geodetic-Survey“ (WGS) in verschiedenen Revisionen (aktuell: WGS84) besonderen Wert, weil die definierten WGS-Rotations-Ellipsoiden historisch erstmals eine für den gesamten Planeten ausgerichtete Land-, See-, und Luftverkehrs-Navigation mit denselben Genauigkeiten und Beschränkungen direkt mit der Gebrauchs-Kartographie und all ihren Sonderprodukten verknüpft. Und zwar um den Faktor 10 besser, als dies zur Mitte des 20. Jh. mit sehr viel mehr Mühe und Aufwand bewerkstelligt hätte werden können. Damit verbindet sich die Hoffnung, eines Tages publizierte Forschungsergebnisse mittels GIS-Datenbank weltweit zu filtern, sortieren, verwalten und deren Aussagen miteinander unter Berücksichtigung lokaler Besonderheiten in sinnvolle Beziehung setzen zu können.

In diesem Kontext ist es beispielsweise nützlich sich einmal die Bedeutung des Gauß-Krüger-Systems zu vergegenwärtigen und danach zu fragen, warum dieses Koordinatensystem überhaupt in dieser Form existiert. Eine einfache Antwort darauf lautet: weil es erlaubt, die Geometrie der Ebene auf einer besonderen Repräsentation der Kugelabbildung vollständig zu retten– notfalls bis zur Millimetergenauigkeit. Dreiecksbestimmung und Entfernungsmessung gelten wie gewohnt:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Die entscheidende Idee bei der Definition dieses Koordinatensystems bestand dabei, die betrachtete Fläche gegenüber der Kugeloberfläche der Erde sehr klein zu halten (500 km pro Meridianstreifen – das entspricht ca. 1,25 % des Erdumfangs). Wofür ist also Gauß-Krüger

bestens geeignet? Für siedlungsgeographische Fragestellungen und der Verkehrswegeerschließung. Der historisch nicht zu unterschätzende Vorteil eines derartigen Systems dürfte für das Militär mit Sicherheit in der taktischen Gefechtsfeldüberwachung (Geländekenntnis und -ansprache) und der Fähigkeit zur Koordination von Artilleriefeuern (wenige 100 m bis max. 150 km Reichweite) gelegen haben. An den Rändern der überlappenden Meridianstreifen ist das System jedoch problematisch und führt zu Mehrdeutigkeiten, weswegen man den uneleganten Weg einer Ost- und einer Westkoordinate für denselben Randpunkt gehen muss. Für Navigationskarten über europäische Distanzen von 2000 - 3000 km hinweg ist dieses unbestritten hochpräzise Koordinatensystem deshalb nicht geeignet. Hier treten stattdessen die Belange der Kugeltrigonometrie und die Idee der Großkreisnavigation in den Vordergrund.

Wie weiter vorne schon mittels graphischer Darstellung eingeführt, sind für derartige Fälle Lambertsche Schnittkegelprojektionen mit zwei Berührungskreisen oder transversale Mercatorprojektionen besser geeignet, wobei v. a. erstere den besten erzielbaren Kompromiss für eine flächen-, winkel- und längentreue Kartenprojektion darstellen. Allerdings – auch hier wieder – mit einem Skaleneffekt auf der nächsthöheren Ebene: Auch diese Karten können lediglich *Teile einer Hemisphäre* hinreichend genau abbilden.*

Ein GPS-Empfänger – nicht wesentlich größer als ein Mobiltelefon – errechnet dagegen seine Position mittels eingebautem Prozessor in Quasi-Echtzeit kugeltrigonometrisch auf jedem beliebig gearteten Rotations-Ellipsoiden†.

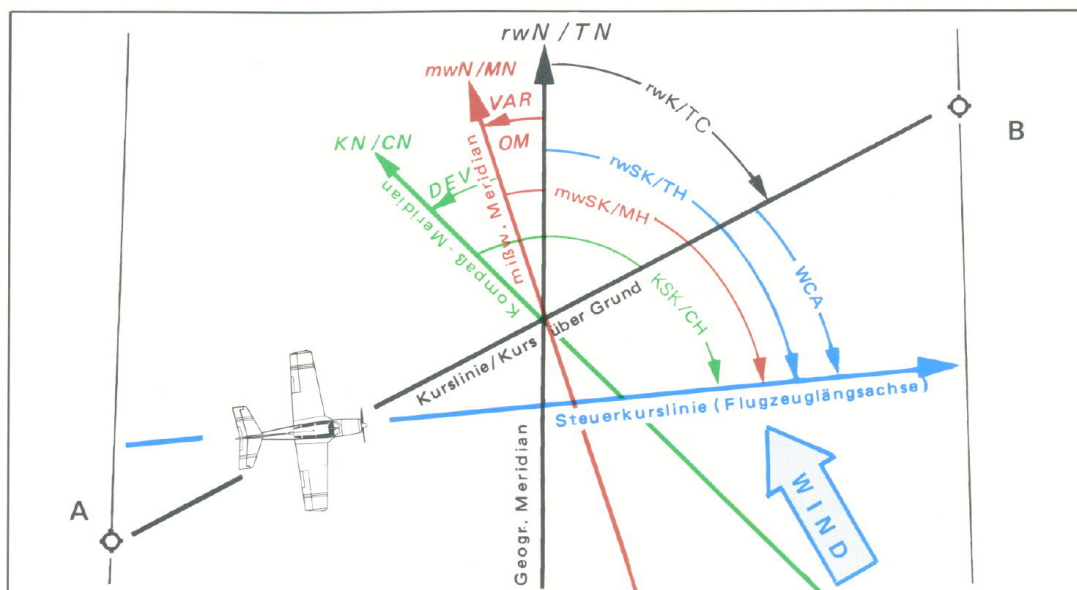


Fig. 173 Das allgemeine Kursschema für die Kompassnavigation unter Berücksichtigung der Abdrift unter Windeinfluss; VAR: Variation (Ortsmissweisung), DEV: Deviation (Kompassfehler); Die Punkte A und B können Start- und Zielort oder Fixes sein (Kühr, 1995)

* Vgl. hierzu die amerikanischen Kartenwerke der Serien „Global Navigation Charts“ (GNC), M 1 : 5 000 000 (Blattgröße 105 x 145 cm!); „Jet Navigation Charts“ (JNC), M 1 : 2 000 000 (Blattgröße 110 x 150 cm); Operational Navigation Charts (ONC), M 1 : 1.000.000 (Blattgröße 146x107cm) und „Tactical Pilotage Charts“ (TPC), M 1 : 500.000 (Blattgröße 146x107cm).

† aufgrund der geringen Laufzeitunterschiede der einfallenden elektromagnetischen Wellen von den GPS-Satelliten erfolgt die Berechnung sogar relativistisch

Verwendet man einen GPS-Empfänger, der über einen mobilen Rechner eine Flugplanungssoftware mit Quasi-Echtzeit-Koordinaten versorgt, dann reicht das allenfalls aus, um die Kamera bei Erreichen geplanter Raumpunkte auszulösen. Im Zuge der anschließenden Post-Processing-Auswertung am Boden wird man dagegen nur wissen, wo sich das Kameraauslösezentrum befunden hat, jedoch nicht, wo genau die optische Achse des Sensors zum Zeitpunkt der Aufnahme hingezigt hat.*

Verwendet ein Pilot eines Messflugzeugs ein GPS-Gerät zur Bildauslösung, hat er jedoch bereits zwei entscheidende Erleichterungen für den Messflugbetrieb gewonnen: Der Windeinfluss auf den Flugzeugkurs über Grund und die daraus resultierenden Geschwindigkeitsänderungen sind eliminiert. Das ist der praktische Hauptvorteil bei der GPS-Navigation:

GPS eliminiert den Windeinfluss!

GPS erhöht die „Seitenführung“ beim Abfliegen beabsichtigter Kurslinien beträchtlich, da die Windkomponente in Quasi-Echtzeit korrigiert werden kann. Auch die wahre Geschwindigkeit über Grund ist für die Datenerfassung solange bedeutungslos, solange die Mindestbildfolgezeit des Sensors (Dwell-Time) kleiner ist als das Bildauslöseintervall, das seinerseits vom gewünschten Bildmaßstab bzw. der gewählten Flughöhe abhängt:

$$M = \frac{c}{H} \quad \text{oder} \quad \text{Maßstabszahl} = \frac{\text{Kammerkonstante}}{\text{Flughöhe}}$$

wobei: Kammerkonstante angegeben durch Brennweite des Linsensystems
und : Flughöhe über der „mittleren Geländehöhe“ als Referenzfläche

Reliefunterschiede führen zwangsläufig zu unterschiedlichen Bildmaßstäben zwischen einzelnen Aufnahmen eines Aufnahmestreifens. Dieses methodische Problem kann flugtechnisch nicht berücksichtigt werden. Vielmehr verwendet der Pilot eine (notfalls temperaturkorrigierte) Druckhöhe, die aus der photogrammetrischen Flugplanung über die sog. „mittlere Geländehöhe“ errechnet wurde, um seinen Kurs auf gleich bleibender Höhe möglichst exakt einzuhalten.† Die mittlere Geländehöhe ist eine wissenschaftliche Simplifizierung.

Mit einer GPS-gesteuerten Digitalkamera lässt sich das Problem der Erreichbarkeit beliebig vorgegebener Punkte im Gelände hinreichend genau lösen. Dieser primäre Anwendungsvorteil von GPS kann gar nicht hoch genug bewertet werden. Vor Einführung

* Der Abstand von Sensor und GPS ist für solche Fälle durchaus vernachlässigbar (Dimension: 0,5 - 3 m), nicht jedoch die Verkantung der optischen Achse des Sensors zwischen Flugzeug und Erdboden (Dimension: Dekameter bis Kilometer).

† Militärischer Tiefstflug kann mit einem Flugzeug wie dem Tornado bis zu einer Mindesthöhe von etwa 75 m über Grund stattfinden, obwohl innerhalb Deutschlands die dafür vorgesehenen sog. „Tieffluggebiete 250ft“ nur im Ausnahmefall benutzt werden. Militärischer Tiefstflug ist definiert als Fliegen unterhalb 2000ft GND. Für Jets gilt hierbei im Regelfall 1000ft Mindestflughöhe. (vgl. MIL-AIP ENR 1.1 bzw. 1.15) Solche Einsatzflugzeuge und entsprechend IFR-ausgerüstete Allwetterflugzeuge verfügen über mehrere, nach unabhängigen Prinzipien funktionierende Höhenmesser (Radar, Luftdruck, INS – über Bordrechner gekoppelt) und dürfen nicht mehr geflogen werden, wenn der Luftdruck-Fein Höhenmesser schlechter als +/- 75 ft (= 22,9 m) anzeigt. Für Photogrammetrie-Flieger gilt innerhalb der freien Atmosphäre ein vergleichbarer Standard von +/- 100 ft. (Read & Graham, 2000)

der Satellitennavigation benötigte man teure Spezialflugzeuge mit Glasboden oder speziellen Navigationseinrichtungen („Navigation Sight“ – eine Art Flugzeugperiskop) und entsprechender „Manpower“ an Bord, um einen exakten Kurs über Grund halten zu können. Heute benötigt man ein GPS-Handheld-Gerät, das man mittels Klemmhalterung auf oder über dem Instrumentenpanel befestigt. Man fliegt als Pilot unabhängig von jeglicher bodengestützter Navigationsinfrastruktur gerade Streckenabschnitte in beliebiger Anzahl und frei wählbarer Länge. Dieser Effekt sorgt derzeit für eine Flexibilisierung des weltweiten kommerziellen Luftverkehrs, da aufgrund der GPS-Ausrüstung und deren Anwendungssicherheit zunehmend Navigationsmarken im freien Raum* definiert und je nach Verkehrssituation angefliegen werden können. Diese Entwicklung umschreibt man mit dem technischen Begriff „R-NAV“ (für „Area-Navigation“). Mit R-NAV wird eine großräumige Entflechtung des dichter werdenden Flugverkehrs angestrebt, die v. a. über siedlungsgeographischen Ballungszentren der verkehrstechnischen Entlastung dienen wird. Wenn dieser Prozess der Umstrukturierung vollständig abgeschlossen sein wird, werden prinzipiell alle Piloten von motorisierten Starrflüglern befähigt sein, ohne aufwändige Zusatzausbildung jeden beliebigen Punkt im Raum auf wenige Dekameter genau anzufliegen.†

Aber GPS reicht alleine noch nicht aus, um das Geocodierungsproblem zu lösen. Wie eingangs betont bestehen Luftbildaufnahmesysteme auf 4 tragenden Säulen.

Der gewaltigste Technologiesprung findet in so einem System nun nicht über den Fernerkundungs-Sensor und seinen spezifischen Vorzügen und Fähigkeiten statt, sondern über die Fähigkeit zur Autogeoreferenzierung. Der entscheidende Schritt besteht hierbei darin den bilderzeugenden Sensor zum Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahme in seiner räumlichen Lage zu bestimmen. Aus fliegerischer Sicht ist deshalb die Hardware für die Autogeoreferenzierung wichtiger als der Bildgeber, denn sie alleine führt zu einer deutlichen Arbeitsentlastung bei der Datenweiterverarbeitung.

Das eigentliche technische Verfahren der direkten Autogeoreferenzierung beruht auf der Synthese von Satellitenortung mittels GPS und der Trägheitsnavigation, einem sog. „autonomen“ Navigationsverfahren. Man spricht von INS/(D)GPS-gestützter, direkter Autogeoreferenzierung. Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf das richtungsweisende Konzept von Heimes, Bäumker, Richter, Brechtken u.a. von der Fachhochschule Bochum, das dort seit fast zwei Dekaden verfolgt und etwa seit Mitte der 90er Jahre propagiert wird.

In der Fliegerei ist die Trägheitsnavigation unter dem Akronym INS (Inertial Navigation System) bekannt, und zwar synonym für die zugehörigen Bordeinrichtungen als auch für die Methode selbst. Autonom ist das Verfahren deshalb, weil zu dessen Einsatz außer der

* Anschaulich gesprochen: „virtuelle Leuchtfeuer“ mit derselben Leitstrahlcharakteristik in Form virtueller Radials, wie bisherige Radionavigationshilfen für die Eigenortung wie z. B. NDB („Non-Directional Beacon“), VOR („Very High Frequency Omnidirectional Range“ = UKW Drehfunkfeuer) oder TACAN („Tactical Air Navigation System“ und seiner militärisch-zivilen Mischausführung VORTAC).

† Die Trennlinie zwischen professionellem Luftraumnutzer und dem interessierten Laien wird innerhalb von ein bis zwei Dekaden technisch lediglich auf den Wissensvorsprung des Ersteren über die grundlegenden Zusammenhänge zusammenschrumpfen, die dieser sich in langen Jahren intensiven Studiums erarbeitet hat. Die Technologisierung folgt demnach etwa demselben Grundschema, wie es heute beispielsweise innerhalb der Astronomie längst allgemein eingestanden wird: Der Amateur ist mit seiner Hobby-Ausrüstung vom Experten und dessen Hochtechnologie-Umgebung potentiell nur etwa fünf Jahre entfernt.

bordseitigen Hardware keine weitere (Boden-)Infrastruktur benötigt wird. In einer „Black Box“ (einer sog. IMU – Inertial Measuring Unit) nutzt man den physikalischen Effekt des Beharrungsvermögens von mechanischen Kreiseln um deren Drehachse. Es ist derselbe Effekt, der aus klassischen Schulversuchen der Physik hinlänglich bekannt sein dürfte und der üblicherweise mit sich drehenden Fahrradfelgen oder einem Gyroskop demonstriert wird: Versucht man, die Drehachse eines rotierenden Kreisels aus seiner Lage zu kippen, so treten Rückstellkräfte auf, die proportional zur auslenkenden Kraft sind. In der Luftfahrt wird das räumliche Beharrungsvermögen von Kreiseln technisch seit langem im sog. „künstlichen Horizont“ ausgenützt, der das einzig verlässliche Instrument zur Neigungsbestimmung von Flugzeugquer- und -längsachse bei der Instrumenten-Navigation darstellt.*

Das INS beruht zwar auf demselben Naturgesetz, ist jedoch technisch wesentlich aufwändiger, da hierbei die Kreiselauslenkung in allen 3 Raumrichtungen messtechnisch quantifiziert wird. Die Änderungsraten dieser Winkel werden zeitlich integriert und daraus räumliche Koordinaten errechnet. Dies alles wird von der IMU erledigt. Sie liefert im Prinzip Koordinatentripel (X, Y, Z), die von beliebiger nachgeordneter Avionik[†] verwendet werden können. Fest an Bord eines LFZ eingebaut liefert eine IMU also dessen Lage im Raum sowie deren Änderungen über die Zeit. Zeichnet man das auf, erhält man einen dreidimensionalen Flugpfad, für den zu jedem Zeitpunkt die Lage der Flugzeugachsen ermittelt werden kann. Montiert man einen beliebig gearteten, abbildenden Sensor nun achsenparallel zum internen Bezugssystem der IMU, so weiß man darüber gleichzeitig mit der Lage des LFZ die Richtung, in die der optische Hauptstrahl des Linsensystems zeigt. Man nennt diese Anordnung „Boresight Alignment“.

Wenn man die Position des LFZ zum Zeitpunkt der jeweiligen Bildaufnahme über einer festgelegten Bezugsebene kennt, dann könnte man aus dieser Anordnung bereits die räumliche Lage der über die Linse einfallenden Strahlenbüschel an verschiedenen Auslösepunkten errechnen. Der hierbei betriebene mathematische Aufwand über Ausgleichsrechnung ist jedoch bereits so hoch, dass man derzeit noch zwei Schritte darüber hinaus geht, um die Ergebnisgenauigkeit während des Postprocessings weiter zu erhöhen (Zeitersparnis-Kriterium -Es wäre durchaus vorteilhaft, einen Teil der anfallenden Arbeitslast bei der Ermittlung von Koordinaten bereits auf den Prozess der Datenerhebung selbst übertragen zu können. Diesem Bemühen liegt eine simple Logik zugrunde: Je weniger Abweichung des aufnehmenden Sensors von seinem geplanten Blickrichtungs-Soll während der Erfassung produziert wird, umso weniger aufwändig ist die Rekonstruktion seiner räumlichen Lage bei der Auswertung, die durch den Arbeitsschritt „Herstellung der äußeren Orientierung“ repräsentiert wird).

* In der Instrumentenflugausbildung wird seit Jahrzehnten gelehrt, dass der durchschnittliche Pilot bei Entzug eines äußeren visuellen Bezugssystems außerhalb seines Flugzeugs (Erd- bzw. Wolkensicht) nach durchschnittlich 6 min seine eigene räumliche Orientierung zu verlieren beginnt. Der Effekt wird durch das Auftreten von Fliehkräften bei Änderungen des Beschleunigungszustandes verstärkt. Der künstliche Horizont, auf den sich der Instrumentenflieger konzentriert, ist das einzige und wichtigste Instrument, das ihm die Lage seines Flugzeugs unabhängig sonstiger physiologischer Fehlwahrnehmungen anzeigt.

† Avionik: Kunstwort aus Aviation und Elektronik. Der Begriff Avionik umfasst üblicherweise die gesamte bordseitige Ausrüstung für alle fortgeschrittenen Navigationsverfahren als Karte, Kompass und Stoppuhr. Es ist in der Fliegerei auf nahezu jeder technischen Ebene möglich, den Wert eines LFZ durch den Einbau von Avionik um einen erheblichen Grad zu steigern, im Extremfall um den Faktor 2 bis 3. Sehr fortgeschrittene Avionik ist modular aufgebaut und mittels zentralem Bordrechner beliebig „skalierbar“. Ausrüstungsbeispiele: HSI (Horizontal Situation Indicator), Radarhöhenmesser, Wetterradar, Doppler Radar, Luftwerterechner etc.

Erstens verwendet man hierfür die in Echtzeit auflaufenden IMU-Signale an Bord des LFZ, um die unvermeidbaren Störbewegungen des LFZ weitestgehend zu eliminieren. Dies geschieht mittels einer sog. „Stabilisierung“ oder „(Kreisel-)Plattform“.* Eine derartige Stabilisierung ist nichts anderes als eine Art Roboterarm†, der über einen computergestützten Regelkreis berechnete Daten für entsprechende Ausgleichsbewegungen erhält.

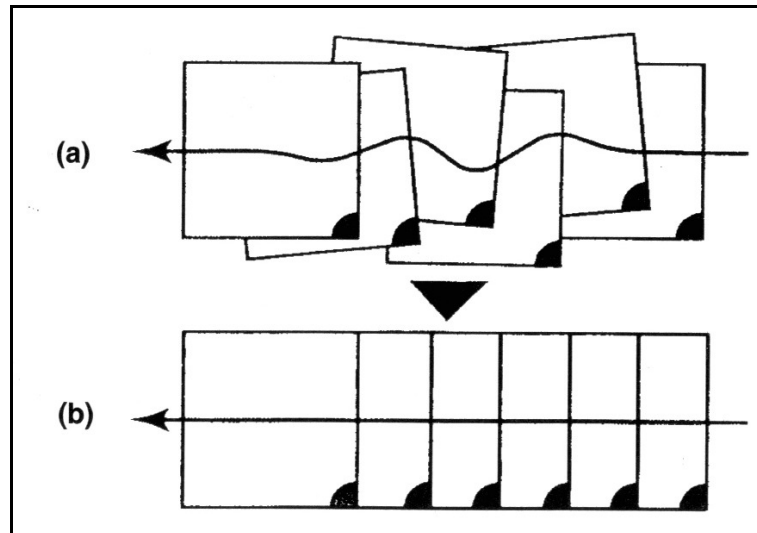


Fig. 174 Der Effekt einer Stabilisierung auf die Fotospur am Boden: a) ungestabilisiert, b) mit INS/(D)GPS stabilisiert – es reicht in letzterem Falle aus, zum jeweiligen Auslösezeitpunkt in etwa an der gewünschten Position zu sein; der 99-prozentige Restanteil des Fluges darf höchst unruhig verlaufen; Graphik aus: (Graham und Read, 2002)

Der dafür erforderliche Input stammt sowohl von der IMU als auch von einem (D)GPS-Empfänger. Der GPS-Empfänger ist deshalb notwendig, weil auch Trägheitssensoren keine idealen Maschinen sind (Perpetuum-mobile-Problem) und aufgrund ihrer bauartbedingten Verluste „driften“, d. h. die ermittelten Positionsdaten unterliegen im Lauf der Zeit einer gewissen Verschlechterung, die sich als Positionsabweichungen bemerkbar machen. Der DGPS-Empfänger fängt diese INS-Signale praktisch ein – und zwar mit niederfrequentem Takt von wenigen Hertz (etwa 10-30).

Aus eigener Erfahrung lässt sich als grobe Kenngröße eine durchschnittliche Positionsdrift eines ungestützten INS von etwa 1 NM/Flugstunde für militärisches Fluggerät angeben (T-43, milit. Version der Boeing-707 für Navigatorenausbildung). Diese grobe Kenngröße wird auch anderweitig bestätigt, beispielsweise in einem Photogrammetrie-Lehrbuch:

„Die Genauigkeit eines Inertialsystems beträgt für die Entfernung etwa 2000 bis 3000m/Flugstunde.“ (Rüger, Pietschner und Regensburger 1987)

Für das im Interkontinentalflugverkehr eingesetzte Langstrecken-Passagierflugzeug Boeing B-747 „Jumbo-Jet“ wird z. B. in einem Flugplanungshandbuch ausgeführt:

* An dieser Stelle sind die Begrifflichkeiten im allg. Sprachgebrauch noch keineswegs geklärt – so mancher versteht unter „fliegender Plattform“ auch das gesamte System aus LFZ und Stabilisierung inkl. aller Sensorikeinrichtungen.

† In den letzten Jahren wurde vermehrt der Begriff „Mechatronik“ verwendet (der synonym eine kombinierte Studienrichtung aus Elektronik und Feinwerktechnik an Fachhochschulen und Universitäten bezeichnet), dennoch erscheint er mir in diesem Kontext zu wenig anschaulich.

„Das Carousel IV berichtigt jedoch – im Gegensatz zum LTN72 System [...], mit dem die DC-10 und B-707-Flugzeuge ausgerüstet sind, nicht durch die Erdfeldrotation hervorgerufene scheinbare Wanderung. Die Plattform mit dem Azimutkreisler präzediert vielmehr kontinuierlich im Azimut mit $15^\circ \cdot h \cdot \sin \varphi$ (earth rate). [lies: $15^\circ/h \cdot \sin(\varphi)$ analog zur Erddrehgeschwindigkeit; Anm. d. Verf.] Ein Korrekturprogramm im Rechner berücksichtigt diese Auswanderung für die Navigationsberechnungen. Da jedoch in der DG-Mode des B747-Kompaßsystems die Headinganzeige auf den RMIs direkt von der Plattform abgeleitet wird, sind die Kursrosen auch der gleichen Auswanderung unterworfen. Bei Kursführung durch das INS wird sich infolgedessen der auf den RMIs unter dem Steuerstrich angezeigte Gradbetrag mit $15^\circ \cdot \sin \varphi / h$ verändern. Da die Plattform auf der Nordhalbkugel nach rechts auswandert, nehmen die angezeigten Kursbeträge ab. Anmerkung: Würde man das Flugzeug nach einer konstanten Kursanzeige auf den RMIs steuern, so würde der verfolgte Flugweg in einer Rechtskurve verlaufen statt geradeaus.“ (F. Hesse, R. Wurster 1987)

Diese Beschreibung befindet sich auf dem technischen Stand von vor etwa 15 bis 20 Jahren. Man entnimmt ihr, dass Langstreckenflugzeuge mit mehreren Kurskreiselsystemen ausgerüstet waren bzw. sind, dass die Driftkorrektur der Kreisler zu jener Zeit analytisch-rechnergesteuert nachgeführt wurde und dass die Abweichung geosynchron* in direkter Abhängigkeit von der geographischen Breite verlief. Diese Flugzeuge kamen etwa mit einer Genauigkeit von 20 NM^\dagger bei einem Flug über den Atlantik an der jeweiligen Küstenlinie des anderen Kontinents an. Bis dahin jedoch wurden sie bereits durch die bodengestützten Peilfunksender gleichsam „aufgefangen“ – weshalb diese methodische Vorgehensweise des 20. Jh. durchaus mit derjenigen vor 500 Jahren im Falle der Hochseeravigation vergleichbar ist.

Heute weiß der Kapitän eines Flugzeugs seinen Standort bezüglich seiner Anzeige nicht mehr aufgrund eines Rechenverfahrens mit frei skalierbaren Interpolationsintervallen, sondern aufgrund einer permanenten, automatischen Quasi-Echtzeitmessung mittels (D)GPS, welches die INS-Drift ausgleicht – ein auf den ersten Blick geringfügig erscheinender, aber dennoch wesentlicher Unterschied. Das verwendete (D)GPS liefert permanent diese Korrekturwerte für die Position, während die IMU präzise Lagewinkel erzeugt. Der Sprung von unkorrigiertem GPS auf (D)GPS bedeutet derzeit eine weitere Genauigkeitserhöhung von durchschnittlich einem Dekameter auf weniger als einen Meter. INS- und GPS-Signale werden mit Hilfe einer aufwändigen Filtermethode miteinander verrechnet (Kalman-Filterung). Diese Vorgehensweise erzeugt Positionsgenauigkeiten, die über beliebige Flugdistanzen hinweg deutlich im Submeterbereich liegen (Driftkompensation).

Noch einmal anders ausgedrückt heißt das: Durch eine Kombination von (D)GPS und INS erreichte man innerhalb der letzten 30 Jahre Entwicklungszeit eine Verbesserung des mittleren Absolutpositionsfehlers von „dynamisch“ 2 km pro Flugstunde (analytisch koppelnavigatorisch ermittelt und kompensiert) auf etwa 0,0005 km „stationär“ in Quasi-Echtzeit bei laufender Messung. Das bedeutet eine Genauigkeitsverbesserung von:

* In Astronomie und Navigation können Zeiten und Winkel verlustlos ineinander umgewandelt werden: $24 \text{ h} = 360^\circ$, daher $1 \text{ h} = 15^\circ$ Erddrotationsgeschwindigkeit.

† Angabe von U. Henke, langjähriger Entwicklungsingenieur für Kreisler-technik, private Korrespondenz, 2005.

$$\Delta \text{ Fehler} = \text{Fehler}_{\text{neu}} / \text{Fehler}_{\text{alt}} = 0,5 / 2000 = 0,00025$$

und entspricht damit einer Leistungsexplosion von:

$$\eta = 1 / \Delta \text{ Fehler} = 4000.$$

Für unkorrigiertes GPS gilt $\eta = 200$, wobei hier eine durchschnittliche Positionsgenauigkeit von 10 m zugrunde liegt.

Was bedeutet das konkret? Diese Zahlen sagen nichts anderes aus, als dass Sie ein noch so gebrechlich wirkendes Sportflugzeug bei Einbau einer Heimesplattform in die Top-Leistungskategorie der Weltluftfahrt katapultieren. Das Einzige, was solche Flugzeuge hinsichtlich ihrer Navigationsleistung noch von den um Zehnerpotenzen teureren Apparaten der Geschäfts- und Militärfliegerei unterscheidet, ist die Art der konstruktiven Auslegung des Einbaus und die fehlende Redundanz. Hochleistungsflugzeuge arbeiten mit mehrfachredundanten Lichtwellenleitern zwischen ihren über die gesamte Flugzeugzelle verteilten Messwertgebern und dem bzw. den Navigationsrechner(n).*

Können Sie an Bord eines Messflugzeugs auf die Redundanz verzichten? Eindeutige Antwort: selbstverständlich! Sie bewegen sich wenige 100 km von „Zuhause“ entfernt bei hellichtem Tage und schönstem Sonnenschein. Bei Totalausfall der (D)GPS/INS-Sensorik rasten Sie eine beliebige Frequenz einer unterstrichenen Flugplatzsignatur auf der Fliegerkarte, lassen sich ein QDM[†] geben und steuern mit dem erhaltenen Kurs den dazugehörigen Flugplatz an. Nach der Landung beheben Sie die Störung und wiederholen den Messflug oder Sie fliegen nach einer Flugneuplanung wie jeder andere Sportflieger zu Ihrem Heimatplatz zurück.

Zweitens wird noch ein Schritt in Richtung Genauigkeitsverbesserung getan, der das letzte Quäntchen Leistung bei der Ermittlung von präzisen Positionsdaten herausholen soll. Bei der beschriebenen Methodik sind die Genauigkeitsanforderungen bereits so hoch, dass die relative Anordnung der einzelnen Sensorelemente eine Rolle zu spielen beginnt. Für höchste Präzision ist beispielsweise die Entfernung der IMU zum Sensor nicht mehr vernachlässigbar. Logische Schlussfolgerung: Es wäre vorteilhaft, IMU und Sensor so dicht wie möglich zusammenzubringen, damit der dazwischenliegende „Hebelweg“ möglichst gering wird. Die Idee ergibt in ihrer Endkonsequenz eine Boresight-Alignment-Anordnung, bei der die IMU direkt über dem Sensor thront und beide Koordinatensysteme praktisch denselben Ursprung (in der X-Y-Ebene) besitzen.

* Beispielsweise besitzen die Langstreckenflugzeuge von Boing und Airbus je zwei völlig unabhängige Inertialsysteme und ein Luftwaffen-Tornado, z. B. fünf unabhängig voneinander arbeitende Navigationssysteme, von denen zwei ebenfalls INS-Anlagen sein dürften. Jede autonom operierende Aufklärungsdrohne, Langstreckenrakete und jeder Marschflugkörper besitzen heute IMUs als Messwertgeber. Schiffsgeschütze und Panzerrohre werden mittels INS-gestützter Regelkreise dynamisch nachgeführt bzw. stabilisiert. Die kompakten faseroptischen Kreisel erobern gerade den industriellen Anlagenbau, indem sie die Walzen von Druckerstraßen oder die Greifarme von Industrierobotern steuern.

† QDM: Kürzel für eine Peilung von einem LFZ zu einer Bodenstation. Die Peilung erfolgt mit Hilfe der Trägerwelle der Flugfunkstation. Der Towerlotse mit QDM-Peilgerät sieht beim Funkkontakt zu jedem beliebigen LFZ augenblicklich dessen Kompass-Standlinie, sobald der Pilot die Sendetaste betätigt. Spricht er abwechselnd mit mehreren LFZ in der Platzrunde, so kann er aufgrund der wechselnden Peilanzeigen erkennen, wo sich das dazugehörige LFZ gerade befindet.



Fig. 175 Die Stabilisierung, oder „Mount“ des Heimesplattform-Konzepts, das unter dem Akronym LEO publiziert wurde (Stand: um 2001; mit freundlicher Genehmigung von R. Johr, Firma IBF-Automation)

Das hat den Nachteil, dass die IMU mitstabilisiert werden muss, weshalb sie nicht beliebig groß sein darf. Es existieren grundsätzlich vier verschiedene Varianten von IMUs und deren bewegungserfassenden Bauelemente (Akzelerometer), die sich historisch nacheinander herausgebildet haben: Gimbaled, Strapped-Down (oder kurz Strapdown), Laserkreisel mittels Prismen und faseroptische (Fibre-optical) Laserkreisel: Während die erste auf rotierenden Kreisel in orthogonal zueinander angeordneten kardanischen Käfigen basiert („gimbaled“ IMUs – z. B. LITEF LCR88*), werden bei der weiterentwickelten zweiten Anordnung, den Strapdown-Systemen, die Kreiselrotationsachsen fest mit dem Fahrzeug verbunden.

„Damit vermeidet man die unvermeidliche Reibung in der Kardanlagerung des Systems. Der Preis dafür ist aber, daß die Kreisel(achsen) jetzt die volle Fahrzeugbewegung um alle 3 Achsen mitmachen müssen: Dazu muß man mit den sog. Torquern ständig ziemlich große Momente auf die Kreisel ausüben. Dicke Ströme machen die Regelelektronik natürlich aufwändig, teuer und anfällig. Die Entwicklung der Lasertechnik brachte dann neue Möglichkeiten: Wenn man 2 Laserstrahlen z. B. auf einer geschlossenen Dreiecksstrecke in entgegengesetzter Richtung laufen läßt, ändert sich ihr Interferenzmuster, wenn sich die Anordnung dreht. Damit hatte man

* Die Firma LITEF GmbH (Lörrach bei Freiburg, www.litef.de) gehört zur Northrop-Grumman Unternehmensgruppe und liefert auch für zivile LFZ-INS-Komponenten (z. B. für Pilatus PC-12, Learjet 31, Learjet 45).

eine neue Möglichkeit, auch ohne mechanische Kreisel Drehbewegungen im Raum zu messen. Sinnvollerweise brachte man gleich 3 entsprechend ausgerichtete Systeme in einem Trägerblock unter. Allerdings ist hoher Aufwand erforderlich, die mechanische Konstanz der Anordnung unter den Umgebungsbedingungen sicherzustellen. Der Endpunkt dieser Entwicklung sind dann die sog. 'Faserkreisel', mit denen man dieses Problem auch noch loswurde. Sie bestehen aus einem Lichtleiter, der 'einfach' auf eine Spule gewickelt wird.“ (U. Henke, langjähriger Entwicklungsingenieur für Kreiseltechnik, private Korrespondenz, 2005)



Fig. 176 Beispiel einer IMU (AeroControl-II, basierend auf LITEF-Komponenten, mit freundlicher Genehmigung von Firma IGI, 2005)

Der zunehmenden baulichen Integrationsdichte trägt man heute bei faseroptischen Kreiseln auch in der Namensgebung Rechnung, z. B. LITEF „LCR92 μ AHRS“ oder „93 μ AHRS“^{*}). Jede der vorgestellten Bauvarianten besitzt sowohl Vor-, als auch Nachteile. Es steht jedoch außer Frage, dass sich für den oben beschriebenen Anwendungsfall die faseroptisch basierten IMUs aufgrund ihrer geringeren Größe, weniger Gewicht, weniger Stromverbrauch und nahezu vollkommener mechanischer

Verschleißfreiheit gegenüber ihren (noch) leicht schlechteren Positionsgenauigkeiten[†] durchsetzen werden.

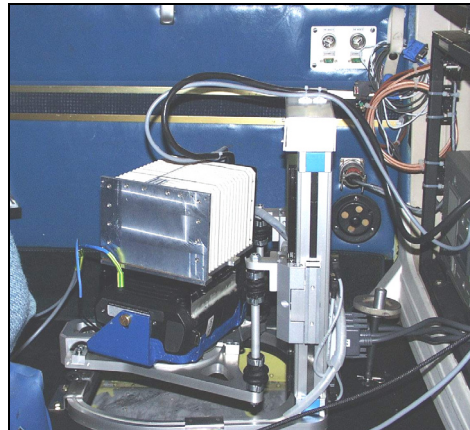


Fig. 177 Eingebaute Heimesplattform (in nicht näher bezeichnetem Erprobungsflugzeug). Deutlich zu erkennen: Die IMU (LITEF LCR-92) sitzt auf der Kameragehäuserückwand, beides befindet sich auf der lagegeregelten Dreiecksfläche (mit freundlicher Genehmigung der Firma IBF, 2002)

^{*} „Attitude-Heading-Reference-System“ (AHRS): weitverbreitetes aeronautisches Synonym für kreiselgestützte Navigation.

[†] In welcher Größenordnung sich diese bauartbedingten Unterschiede bewegen, erschien mir bislang nicht relevant genug für eine detaillierte Recherche. Wichtig ist, zu wissen, dass eine Heimesplattform mit $0,1^\circ$ Genauigkeit in Echtzeit stabilisiert wird, während die bislang eingesetzten IMUs Winkeländerungen im Bereich von $0,01^\circ$ genau erfassen, denn darauf lassen sich Einsatzszenarios berechnen.

In einem Blockdiagramm sieht die Heimesplattform so aus:

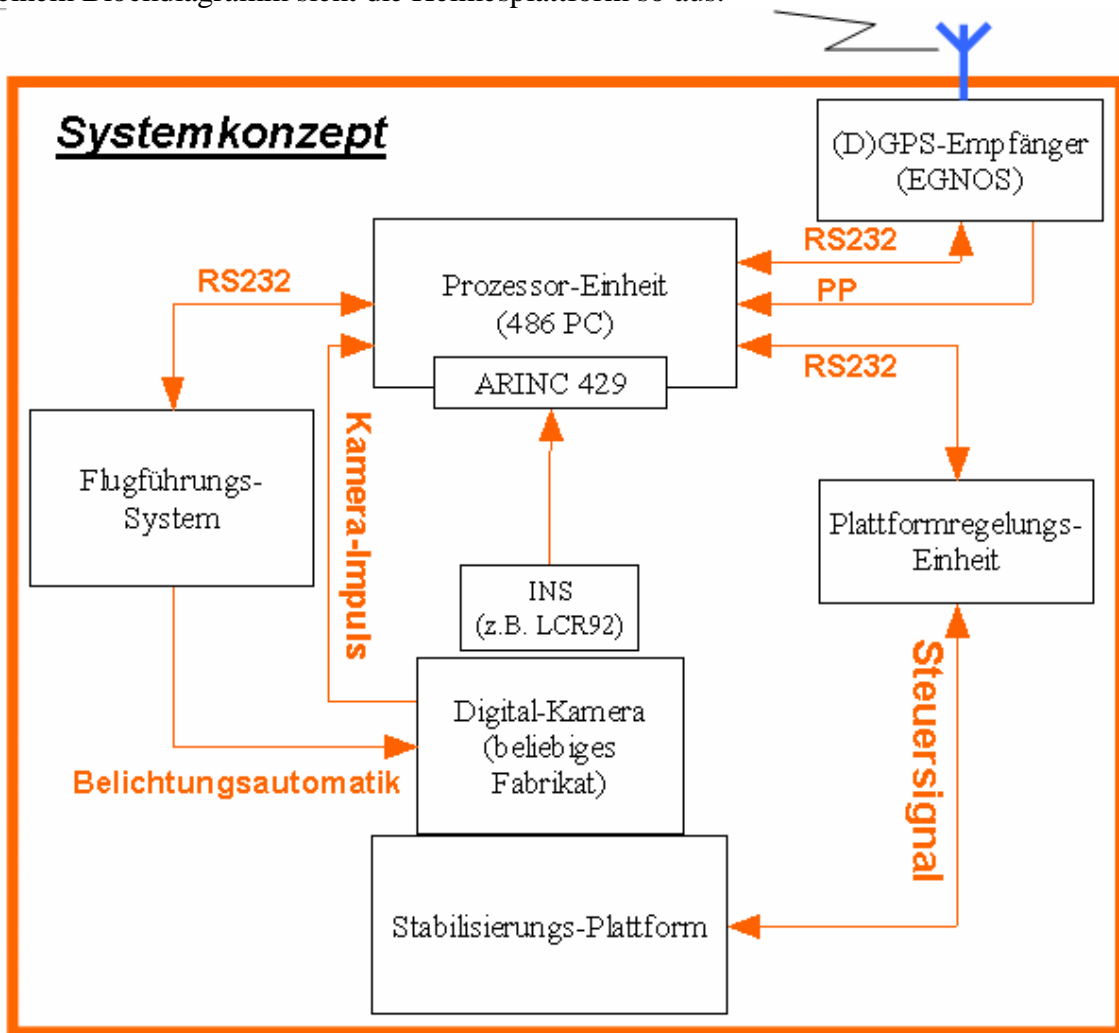


Fig. 178 Blockdiagramm Heimesplattform (eigene Skizze nach Unterlagen aus privater Korrespondenz)

Der Hauptvorteil ergibt sich bei vollständiger INS/(D)GPS-Integration aus der kompletten Elimination von Passpunkten, um Bildblöcke photogrammetrisch automatisiert berechnen zu können. In mehreren Veröffentlichungen haben Heimes et. al. Resultate aus Testbefliegungen mit den bisherigen Prototypen vorgelegt, die eindeutig belegen, wie leistungsfähig das technische Verfahren ist. Aus einem Beitrag zur X. Internationalen Geodätischen Woche in Obergurl (21. - 27. Februar 1999) lassen sich folgende Resultate entnehmen (Heimes, Bäumker, Brechtken und Richter, 1999):

σ_X (cm)	σ_Y (cm)	σ_Z (cm)	Anzahl der Passpunkte	Berücksichtigung der Koordinaten der Projektionszentren
12,2	12,1	32,9	60	Nein
15,4	15,4	33,8	5	Ja
32,5	32,9	48,4	Keine	Ja

Fig. 179 Erzielbare Genauigkeiten mit der Heimesplattform. Versuchsbedingungen: Contax-RTSIII-KB-Kamera (28 mm Brennweite), 35 Fotos, $M = 1 : 25\,000$ bei 60 % Längs- und 30 % Querüberlappung über einem Testgebiet von 2,2 x 2,2 km.

	σ_Y (cm)	σ_Z (cm)	Anzahl der Passpunkte	Berücksichtigung der Koordinaten der Projektionszentren
2,7	2,6	10,3	18	Nein
4,9	4,8	11,0	5	Ja
27,4	27,1	49,5	Keine	Ja

Fig. 180 Erwartungsgemäße Genauigkeitssteigerung unter Verwendung der Mittelformatkamera, Rollei6006 mit 80 mm Brennweite, einem erfliegenen Bildmaßstab von $M = 1 : 5000$ über einem Testgebiet von 600×600 m bei ebenfalls 60 % Längs- und 30 % Querüberlappung.

Die Rechte zur Kommerzialisierung dieser Plattform liegen derzeit in der Hand der AGR* - Unternehmensgruppe, Essen. Die Firma IBF-Automation, Freudenberg, übernahm bislang den Bau der mechanischen Komponenten und Modifikationen, kann jedoch aufgrund der Art des Kerngeschäftsbereichs von IBF keinen Vertrieb leisten (Auskunft: Hr. J. Bitterlich, IBF, Februar 2005). Weltweit sollen laut unabhängiger Aussagen mehrerer Gesprächspartner drei Prototypen existieren. Der erste Geschäftserfolg stellte sich ein, als der „US Fish and Wildlife Service“[†] in einer amerikanischen kontinentalweit durchgeführten Studie zu dem Schluss gelangte, dass in Nordamerika keine vergleichbare Systemleistung (Kompaktheit, Modularität, Funktionalität) beschaffbar sei und zügig einen Kauf durchführte. Inzwischen seien die vereinbarten 3 Jahre Gewährleistungspflicht ohne nennenswerte Störungen vorübergegangen (Auskunft: Hr. Engels, Firma AGR, Februar 2005). Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass die Plattform-Konzeption von Anfang an direkt auf die Belange der ökologischen Umweltforschung hin ausgelegt worden sind:

“The LEO (local Earth observation) project was devised by Prof. Dr. Ing. F.-J. Heimes (Head of the Department of Photogrammetry, University of Bochum, Germany) and Dr. Peter Poole, a Canadian ecologist.” (Warner, Graham und Read, 1996)

So schließt sich der Kreis von Luftbildforschung, Landschaftsökologie und der dazu erforderlichen Technikentwicklung.

Nun kann das idealisierte Eingangsbeispiel zu Beginn des letzten Unterkapitels neu betrachtet werden, um darüber eine Grobabschätzung des Impacts zu ermitteln, den diese Technologie für die Umweltforschung zeitigen wird.

Mittels einer veralteten DCS-460-Digitalkamera mit 6MPx-CCD-Sensor soll ein (zur Vereinfachung: quadratischer) Bildverband von 1000 Aufnahmen erzeugt werden. Welche Fläche können wir damit mit welcher geometrischen Auflösung und durchschnittlichen Pixel-Lagegenauigkeit abbilden? Für unser Beispiel ergäbe sich für 1024 Fotos (da leichter berechenbar – quadratische Blockfläche!) etwa:

* Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet (gegründet 1990, Wurzeln bis 1920, 1500 Mitarbeiter, Leistungsspektrum: Umweltberatung bis Deponietechnik).

† Siehe: <http://www.fws.gov>; angegliedert an das US Innenministerium (www.doi.org).

Flughöhe	Bildmaßstab	Bodenbild-Kantenlängen		Bodenpixel-auflösung		Basis	Streifenlänge	Blockbreite	Blockfläche	32*32 Bilder je 5% Überlappung in x- und y-Richtung	
		DX	DY	DXPx	DYPx					[ha]	[km ²]
[m AGL]	Mittel	[m]	[m]	[cm]	[cm]	[m]	[m]	[m]	[km ²]	[ha]	[km ²]
50	1429	39,43	26,29	1,29	1,29	15,77	504,69	672,91	0,03	95,78	0,10
100	2857	78,86	52,57	2,58	2,58	31,54	1009,37	1345,83	0,14	383,12	0,38
150	4286	118,29	78,86	3,87	3,87	47,31	1514,06	2018,74	0,31	862,03	0,86
200	5714	157,71	105,14	5,15	5,16	63,09	2018,74	2691,66	0,54	1532,49	1,53
250	7143	197,14	131,43	6,44	6,46	78,86	2523,43	3364,57	0,85	2394,52	2,39
300	8571	236,57	157,71	7,73	7,75	94,63	3028,11	4037,49	1,22	3448,11	3,45
350	10000	276,00	184,00	9,02	9,04	110,40	3532,80	4710,40	1,66	4693,25	4,69
400	11429	315,43	210,29	10,31	10,33	126,17	4037,49	5383,31	2,17	6129,96	6,13
450	12857	354,86	236,57	11,60	11,62	141,94	4542,17	6056,23	2,75	7758,24	7,76
500	14286	394,29	262,86	12,89	12,91	157,71	5046,86	6729,14	3,40	9578,07	9,58
550	15714	433,71	289,14	14,17	14,20	173,49	5551,54	7402,06	4,11	11589,46	11,59
600	17143	473,14	315,43	15,46	15,49	189,26	6056,23	8074,97	4,89	13792,42	13,79
650	18571	512,57	341,71	16,75	16,78	205,03	6560,91	8747,89	5,74	16186,94	16,19
700	20000	552,00	368,00	18,04	18,07	220,80	7065,60	9420,80	6,66	18773,02	18,77
750	21429	591,43	394,29	19,33	19,37	236,57	7570,29	10093,71	7,64	21550,66	21,55
800	22857	630,86	420,57	20,62	20,66	252,34	8074,97	10766,63	8,69	24519,86	24,52
850	24286	670,29	446,86	21,90	21,95	268,11	8579,66	11439,54	9,81	27680,62	27,68
900	25714	709,71	473,14	23,19	23,24	283,89	9084,34	12112,46	11,00	31032,95	31,03
950	27143	749,14	499,43	24,48	24,53	299,66	9589,03	12785,37	12,26	34576,83	34,58
1000	28571	788,57	525,71	25,77	25,82	315,43	10093,71	13458,29	13,58	38312,28	38,31
1500	42857	1182,86	788,57	38,66	38,73	473,14	15140,57	20187,43	30,56	86202,63	86,20
2000	57143	1577,14	1051,43	51,54	51,64	630,86	20187,43	26916,57	54,34	153249,11	153,25
2500	71429	1971,43	1314,29	64,43	64,55	788,57	25234,29	33645,71	84,90	239451,74	239,45
3000	85714	2365,71	1577,14	77,31	77,46	946,29	30281,14	40374,86	122,26	344810,51	344,81

Fig. 181 Abschätzung, wie viel 1024 Fotos mit der Kodak DCS-460 ($c = 35 \text{ mm}$) Bodenfläche unter der Annahme bedecken, dass der Block 32×32 Fotos umfasst und mit 60 % Längs- und 20 % Querüberlappung geflogen wird. Die letzten beiden Spalten eröffnen ein neues Szenario mit jeweils 5 % Längs- und Querüberlappung. Laut Testbericht (vgl. www.dpreview.com) besitzt die DCS-460 die Kapazität für kontinuierliche 2 Bilder/s. Das würde bedeuten, dass rein sensortechnisch Flughöhen bei 40 m/s Grundgeschwindigkeit hier noch bis etwa 100 m Höhe über Grund geflogen werden könnten – theoretisch. Am sinnvollsten erscheinen angesichts der erzielbaren Bildmaßstäbe in Relation zu etwa 10 km^2 Fläche jedoch Versuche in Höhen zwischen 700 und 1000 m.

Die obige Tabelle liefert für eine Flughöhe von 1000 m eine Bildbasislänge von 315,43 m. Für eine Planungsfluggeschwindigkeit von 120 km/h (= 33,33 m/s) müsste alle 9,46 s ein Bild ausgelöst werden.

Der kritische Faktor, den es hierbei zu berücksichtigen gilt, ist die Mindestbildfolgezeit des Sensors. Kodak gibt für die DCS-460 eine Mindestbildfolgezeit im Daueraufnahmebetrieb von etwa 12 s^* an. Das bedeutet für den vorliegenden Fall, dass entweder langsamer geflogen, oder aber durch eine größere Höhe die Bildbasis und damit die Zeit zwischen zwei Bildern verlängert werden muss.

* Wohlgeachtet: das entspricht einem technischen Stand um 1995! Heute dürfen durchschnittliche Mindestbildfolgezeiten um die Hälfte dieses Wertes erwartet werden.

Für eine Planungsflughöhe von 1500m und einer daraus resultierenden Bildbasis von 473,14m beträgt die benötigte Mindestbildfolgezeit 14,19 s, was das Beispiel wieder zwischen die Kameraspezifikationsgrenzen rückt. (Es gäbe auch noch andere Wege, um solche Probleme zu lösen, z.B. indem man das Gitter zweimal durchfliegt und dabei jeweils nur jedes zweite, oder im Extremfall n-te, Bild aufnimmt. Aber hier soll nur der einfachste Fall untersucht werden.)

Für die Datenerfassung wären laut Beispiel 32 Flugstreifen zu durchfliegen. Also benötigte ein mit gleichförmiger Geschwindigkeit fliegendes Bildflugzeug auf den Bildflugstreifen von

$$\text{je } 15.140 \text{ m Länge insgesamt } \frac{32 \cdot 15140 \text{ m}}{33,33 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 14536 \text{ s} = 242 \text{ min} = 4 \text{ h } 2 \text{ min} .$$

Allerdings muss zusätzliche Zeit für 180°-Wendemanöver aufgewendet werden, um die parallelen Bildflugstreifen nacheinander abzufliegen. Bei der Ermittlung des Zeitbedarfs dafür sieht man sich in der Theorie vor gewisse Schwierigkeiten gestellt, die einen kleineren Exkurs erforderlich machen:

Ein Instrumentenflug-Standardturn erfolgt mit $3^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ und dauert 2 min (Vollkreis). Ein guter erster Richtwert wird sich also aus der Annahme des halbierten Wertes ergeben – dabei stillschweigend vorausgesetzt, dass der Kurvenradius eines Standardturns in etwa in derselben Größenordnung von zwei benachbarten Bildstreifen liegt.

Für die Sportfliegerei existieren i.a. keine Kurventabellen, aus denen man die fahrtabhängigen Kurvenradien ermitteln könnte. Es werden auch keine entsprechenden Faustformeln gelehrt. Deshalb kann es hier vorerst nur um eine grundlegende erste Näherung gehen, die sicherlich mit entsprechenden Fehlern behaftet ist.

Für die 32 Planungsflugstreifen benötigt man unter den oben genannten Annahmen 31 halbe Vollkreise von jeweils 1min Dauer, insgesamt also 31min zusätzlich.

Man kann über eine Gegenprobe veranschlagen ob die halbe Stunde Kurvenzeit realistisch erscheint: im vorliegenden Beispiel beträgt der Abstand zweier paralleler Bildstreifen mit 20 % Querüberlappung nach der Bildflug-Planungsformel* für den Streifenabstand U

$$U = S \cdot \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad ; \text{ mit } S : \text{Bildkantenlänge} \quad q : \text{Querüberlappung in \%}$$

630,86 m. Das bedeutet, dass bei Veranlagung „perfekter“, d. h. runder Wendekreise ein Kurvenradius von etwa 315 m erfolgen werden müssten.

Nimmt man vereinfachend an, dass ein 315 m Kurvenradius nahe am wahren Wert eines solchen Standardturns liegen wird, dann bedeutet dies für 32 abzufliegende Bildflugstreifen bei rechteckiger Bildanordnung 31 halbe Turns, oder 31 halbe Kreisbogenlängen. Diese errechnen sich gemäß der Formel für den Kreisumfang $U = 2 \cdot \pi \cdot r$ hier zur Gesamtlänge von $31 \cdot \pi \cdot 315 \text{ m} = 30.678 \text{ m}$. Bei gleich bleibender Fahrt benötigte das Bildflugzeug für diese Strecke 920 s, oder 15,3 min.

Dies entspricht jedoch nur der Hälfte der angenommenen Instrumenten-Kreisflugzeiten. Die Gegenprobe zeigt daher, dass Drehraten für den Instrumentenflug nur bedingt als sinnvolle Planungsschätzgröße herangezogen werden können.

* Siehe: (Read und Graham, 2002)

Für das Beispiel ergäbe sich aus diesen Überlegungen eine zu veranschlagende Gesamtflugzeit von 4:17h für die Erhebung von einem Bildblock mit 1024 Bildern über 30,56 km² Fläche.

Nur mit Hilfe eines Flugführungssystems wäre es möglich, diese 1024 Bildauslösepunkte mit der erforderlichen Genauigkeit anzufliegen. Hier kommt ein weiterer Vorteil des Computers zum Tragen: wäre es möglich diese Arbeit des zielgenauen Anfliegens zu leisten, so könnte man auch ohne grundsätzliche Veränderung des Aufwandes in der Luft dazu übergehen statt 60% Längs- und 20%-Querüberlappung ein Szenario mit jeweils 5%-Längs- und Querüberlappung zu fliegen. In so einem Fall würde sich die zu erzielende Fläche unter Inanspruchnahme derselben Flugzeit mit 86,2 km² mehr als verdoppeln!

Soll der Pilot ermüdungsfrei und über lange Strecken entspannt fliegen, so müsste er versuchen, die Wendemanöver ohne nennenswerte Veränderung des Gemisch-Regimes* zu fliegen und die Bildfluggeschwindigkeit so zu wählen, dass sie bei gegebenem Windeinfluss ausreicht, um die zwangsläufig resultierenden Grundgeschwindigkeitsveränderungen beim Ein- und Ausdrehen in und aus dem Gegenwind sowie beim Kurvenflug durch ein gewisse „natürliche Fahrtreserve“ kompensieren zu können. Diese Notwendigkeiten führen zusammen mit unterschiedlich weit auseinander liegenden Bildstreifen für verschiedene Flughöhen in der Praxis zu entarteten Kurven (Teardrops, S-Turns, vgl. nachfolgende Fig. 182). Es handelt sich dabei um manuell zu steuernde Kompromisslösungen aus flachen Kurven (Höhenstabilität) und notfalls zu einem „Ausheben“ der Maschine aus der Fotoflugebene, um das Gemisch-Regime der Maschine nicht antasten zu müssen, wenn schnell geflogen und eng gekurvt werden soll, um für eine optimale Vorfluggeschwindigkeit während der Aufnahmen innerhalb des Bildflugstreifens zu sorgen.

Eine höhere Bildfluggeschwindigkeit bietet neben den ökonomischen Nutzen der rascheren Bildgewinnung auch einen Sicherheitsvorteil, sie wird jedoch von der Mindestbildfolgezeit nach oben hin begrenzt.

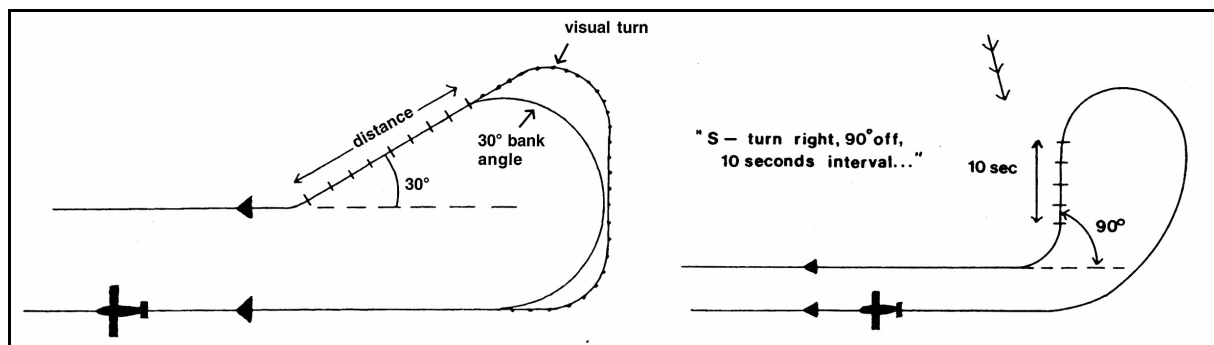


Fig. 182 Teardrop (links) und S-Turn (rechts), um die Bildflugstreifen enger aneinanderzulegen, als dies durch den IFR- Standard-Kurvenradius des Flugzeuges vorgegeben wäre; (Graham und Read, 2002)

Fassen wir diesen Umstand in Zahlen: In 1000 m Höhe sind 20 kts Wind eher die Regel als eine Ausnahmerecheinung, weshalb für eine typisierte Betrachtung dieser Wert hier einmal zugrunde gelegt werden soll. Eine Luftbildreihenaufnahme führt dann zu optimalen Ergebnissen, wenn sie parallel zur erwarteten Hauptwindrichtung verläuft. Es wird prinzipiell versucht, direkt in den Gegenwind hineinzufliegen, um den Vorhaltewinkel (Crab Angle)

* Konstante Stellung des Gas- bzw. Gemischhebels zur kontinuierlichen Leistungsabgabe bei nahezu konstanter Motordrehzahl, vergleichbar mit „Handgas“-Betrieb von agrartechnischen Selbstfahr-Maschinen und schwerem Baugerät.

möglichst gering zu halten, da dieser bei einem starr eingebauten Sensor zu ungünstigen Bildüberlappungen (Flächenverkantung) führt, wie in Fig. 174a gezeigt. Jedoch addieren sich der Eigenvektor des Flugzeugs und der Windvektor zu einem resultierenden Geschwindigkeitsvektor über Grund.

		Effektives Bildfolge- intervall [s]	Limitierende Einflussgröße
Basislänge	315 m		
Planungsgeschwindigkeit	120 km/h	9,45	
Windstärke	20 kts (= 37 km/h)		
Grundgeschwindigkeit auf Gegenwindkurs	83 km/h	13,68	Flugzeugmindestgeschwindigkeit (V_s : Stall speed)
Grundgeschwindigkeit auf Mitwindkurs	157 km/h	7,23	Mindestbildfolgezeit

Fig. 183 Windeinfluss und sich daraus ergebende technische Limits

In obiger Tabelle ist das Beispiel für 1000m Flughöhe aufgegriffen: man liest daraus, dass die veraltete DCS-460 beim jeweiligen Gegenwindanflug die Bilder problemlos hätte aufnehmen können, jedoch wäre die Bildfolge mit Rückenwind um etwa 5 s geringer ausgefallen, als es die Kamera erlaubt hätte.

Wird bei gegebener konstanter Brennweite der Bildmaßstab zu groß gewählt, dann kann es also vorkommen, dass auf der daraus resultierenden geringeren Flughöhe die Mindestbildfolgezeit nicht mehr ausreicht, um die Mitwindgeschwindigkeit zu kompensieren. Demzufolge kann der Wind die Mindestbildfolgezeiten selbst in moderat empfundenen Flugplanungshöhen in Bereiche drängen, die evtl. außerhalb der technischen Möglichkeiten der Sensorik liegen.

Dieser technologische Flaschenhals der Mindestbildfolgezeit wird jedoch mit jeder neuen Kamerageneration auf dem Markt weniger bedeutsam. Wenn man beispielsweise einen Sensor mit den geometrischen Abbildungseigenschaften der DCS-460 aber einer Mindestbildfolgezeit von nur 2 s statt 12 s annimmt, dann würde es dieser erlauben in 250 m Flughöhe über Grund mit M 1:7143 dieselbe Bildanzahl in nur 56min aufzunehmen (Wendezeiten wie oben).

Es existieren diesbezüglich mitunter erhebliche Leistungsunterschiede, die man für bestehende Anforderungen zu identifizieren hat, wie Fig. 185 veranschaulicht.

Noch sinnvoller werden solche grundlegenden Planungsüberlegungen, wenn man berücksichtigt, dass derzeit weltweit vier Hersteller* von sog. „digitalen Rückteilen“ für Mittelformat-Kameras CCD-Sensoren mit bis zu 22 Mio. Pixeln anbieten.

* Hersteller von digitalen Rückteilen im Mittelformat: PhaseOne, IMACON, Leaf/Creo und ILike.

Beispiele (Anf. 2005): IMACON Rückteil: 4x5cm, 22 Mio. Px, 850 Bilder kontinuierlich mit 2s Abstand auslösbar (für Hasselblad H1-MF-Kamera); IMACON XPress96: 4x4cm, 16 Mio. Px für Hasselblad H503/505

10.2 Punktuelle Höchstleistung: die Serienbildfunktion von DSLR-Kameras zur „Burstmode-Befliegung“

Nicht immer wird man gleich 1000 Aufnahmen während eines einzigen Fluges benötigen. Mitunter sind nur wenige hochauflösende Bilder in niedrigen Höhen mit entsprechend großem Maßstab gewünscht.

Dem limitierenden Faktor der Mindestbildfolgegeschwindigkeit von Digitalkameras wurde bislang in einer besonderen Funktionalität mit einer eigenen Hauptzielrichtung Rechnung getragen: Die meisten Digitalkameras erlauben eine kurzfristige Serienbelichtung in der Größenordnung einiger Bilder pro Sekunde – dies jedoch nur für eine beschränkte Bildanzahl. Während man hierzulande diese Kamerafunktionalität „Serienbelichtung“ oder „Serienbildfunktion“ nennt, spricht man bei dieser Betriebsart im Englischen von „Burst“-Modus, „Continuous (Shooting) Mode“ oder auch „Continuous Drive“. Während vor fünf Jahren Bursts von nur etwa einem Dutzend Bildern möglich waren, lassen sich mit einer heutigen Nikon D70 (6,1 MPx, 1.100 EUR) in einem kontinuierlichen Burst von 1 - 2 Bildern/s* bis zum Erreichen der Kapazitätsgrenze des verwendeten Speichermediums aufnehmen. Die willkürlich aus einer 46 Modelle umfassenden Marktanalyse herausgegriffene Einsteiger-SLR†-Kamera erwies sich bei näherer Betrachtung der folgenden Leistungsabschätzung als Glücksgriff‡ (vgl. auch Fig. 185):

„The D70 proved to be an extremely fast camera, Nikon has clearly taken large steps to ensure that in use this camera feels and responds just like a film SLR, and they've achieved that. Startup delay is nonexistent with the camera ready to shoot at the instant the power switch is turned to On. Shutter release lag simply isn't there, the camera responds to your slightest input and the shutter just opens when you depress the button, as you would expect. Thanks to newly a designed buffering system, extremely fast image processing and blistering Compact Flash interface (with the right CF cards) storage times are so short to be of almost no consequence. The D70 literally wipes the floor with the competition for continuous shooting capability, indeed you'll need to spend significantly more to find a digital SLR which is any faster. Kudos Nikon, the D70 sets a new benchmark at its price point.” (Askey, 2004)

* Je nachdem, ob (größere) RAW- oder (kleinere) JPEG-Bilddateien aufgenommen werden (vgl. hierzu die Tabellen weiter unten).

† SLR: Single-Lens-Reflex, geläufiges Akronym für einäugige Spiegelreflexkameras.

‡ SLR-Marktübersichtsartikel (Henniges, 2004). Auf die preisgekrönte D70 der Einsteigerklasse war ich durch eine Aussage zur Serienbildfunktion aufmerksam geworden, die ungewöhnlich hoch erschien: „3 Bilder pro Sekunde bei bis zu 144 Bildern in Serie ohne Unterbrechung“. Dies stellte sich im Rahmen einer Eigenrecherche mit Kontakt zu Kamerahersteller, Autor und Redaktion als falsch heraus. Richtig sind dagegen die etwas komplizierter abzuleitenden Werte, die oben verwendet werden.

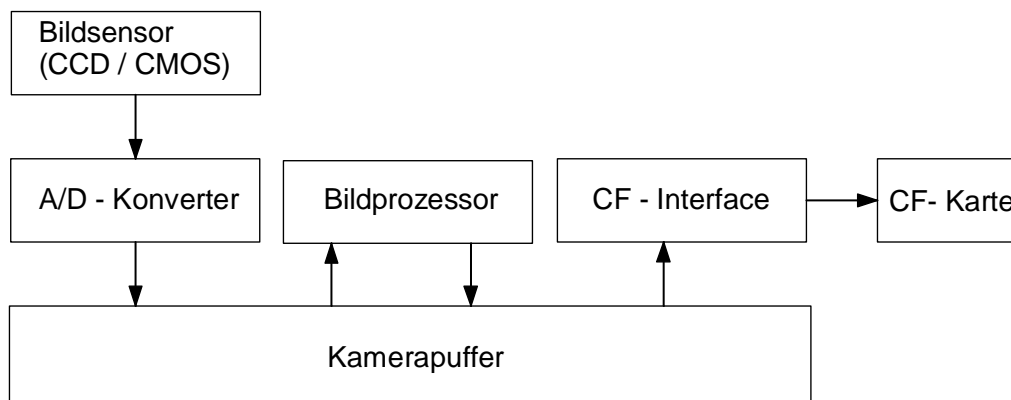


Fig. 184 Schematische Wirkungsweise einer Digitalkamera; umgezeichnet; (Askey, 2004)

Schematische Datenverarbeitungssequenz einer Digitalkamera:

1. Auslesen der Rohdaten, wie sie vom CCD-Sensor geliefert werden (ca. 8,7 MB/Bild bei der D70).
2. Zwischenspeichern dieser Rohdaten im Kamerapuffer.
3. Auslesen des Pufferspeichers und Konvertierung in ein Bildformat (JPEG, NEF etc.).
4. Rückspeicherung dieser prozessierten Bilddatei in den schreibbereiten Puffer.
5. Beschreiben des Speichermediums mit JPEG-/NEF-Bilddateien.

Der wichtige Punkt im Falle der D70-Kamera ist nun, dass diese Digitalkamera in der Lage ist, die Punkte 3 und 5 parallel abzuwickeln. Auf diese Weise wird permanent Pufferspeicher freigegeben, während neue Rohdaten hinzukommen. Deshalb ist die Kamera nicht gezwungen, zu warten, ehe alle Bilddaten vollständig auf das Speichermedium übertragen worden sind. Direkte Folge: Ein Image-Burst bricht nicht ab. Er umfasst prinzipiell eine beliebige Anzahl von Bildern und der Auslöser muss dabei nur einmal gedrückt werden. Im amerikanischen Testartikel (ebd.) wird diese Funktionalität in Anlehnung an die PC-Terminologie „Smart Buffering“ genannt, der Vorgang „Continuous Shooting Mode“. In Deutschland nennen die Fachmagazine diese neuartige Eigenschaft „Endlos-Serienbildfunktion“. Diese Fähigkeiten der Nikon D70 beruhen auf einem schnellen Kameraprozessor, einem schnellen Verschluss, einer guten Pufferspeicherverwaltung und einem hohen Datendurchsatz zum Speichermedium. Es wird berichtet, dass die D70 damit fast die Aufnahmegeschwindigkeit einer um das ca. 4-fache teureren Nikon DH2 erreicht (digitale Profi-Klasse); exzerpiert, übersetzt und ergänzt aus: (Askey, 2004)

Leistungsvergleich einiger Kamera-Speichermedium-Kombinationen

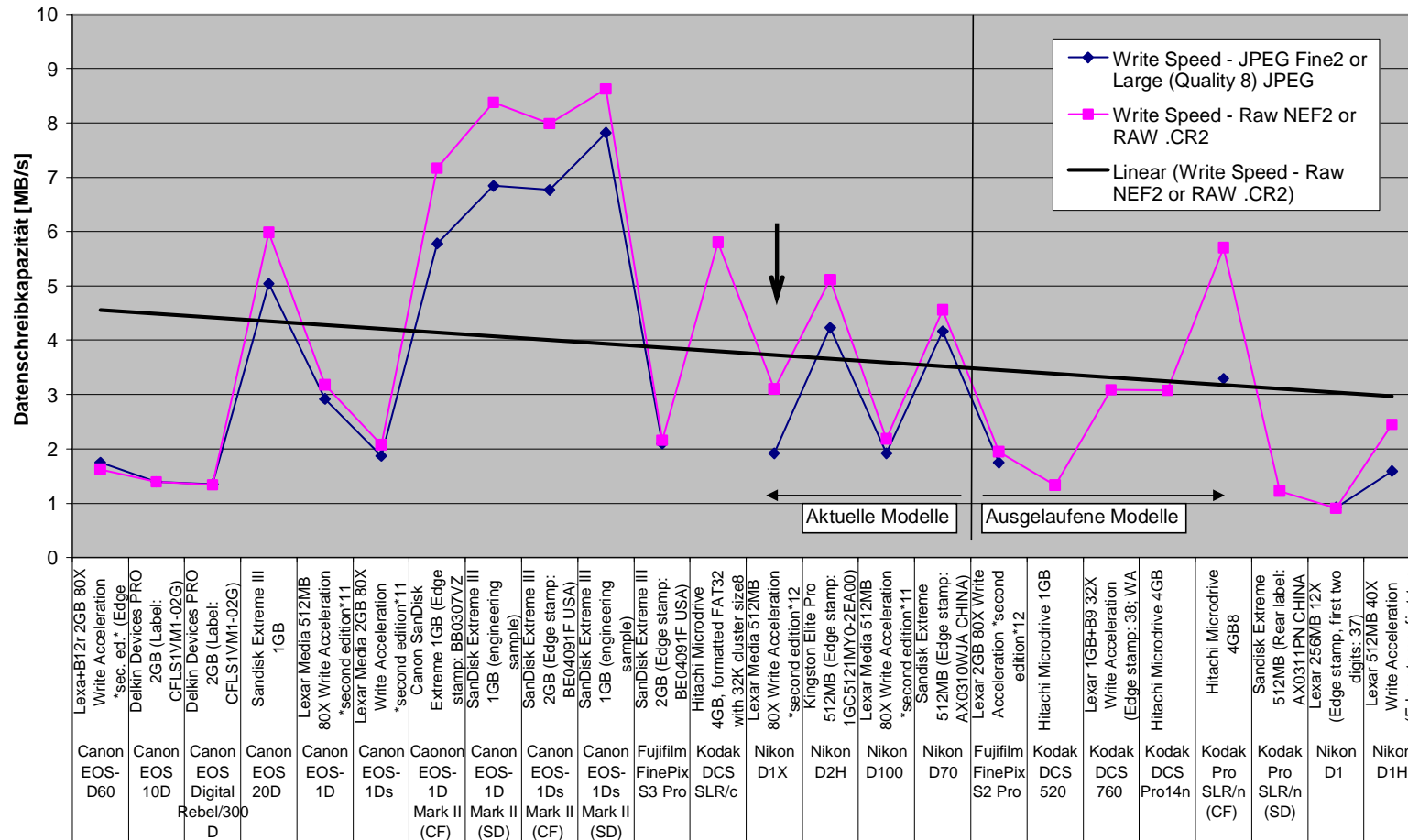


Fig. 185 Geschwindigkeit einiger digitaler DSLR-Kamera-Speichermedien-Kombinationen (mit nach links verlaufendem Zeitstrahl). Der schwarze Pfeil markiert eine Kamera, die innerhalb des Ökologie-Zentrums der Christian-Albrechts-Universität Kiel in der FA Ökotechnik derzeit zur Verfügung steht.

Es ist zu erwarten, dass diese Technologie in Herstellerkreisen schnell Nachahmung finden wird. Die Kamera ist weiterhin mit einem F-Bajonett-Verschluss ausgestattet, der praktisch beliebige Brennweiten von Kleinbildwechselobjektiven zulässt. Rechnen wir daher mit den folgenden Planungsdaten kurz nach, was der Burst-Modus für die kleinformatige Luftbilderkundung bedeuten könnte:

Verschlusszeiten	30 s bis 1/8000 s
Sensorfläche	23,7 x 15,6 mm
Pixelanordnung	3008 x 2000
Brennweitenverlängerungsfaktor	1,5 x

Bei Verwendung eines 50-mm-Objektivs ergibt sich hinsichtlich der geometrischen Bodenpixelauflösung folgende Szenarioabschätzung:

Flughöhe [m AGL]	Mittlerer Bildmaß- stab	Bodenfläche pro Aufnahme ¹⁾ [m x m]	Boden- fläche [ha]	Bodenpixel- Auflösung ²⁾ [cm]
50	1 : 667	15,80 x 10,40	0,016	0,53 x 0,52
100	1 : 1333	31,60 x 20,80	0,066	1,05 x 1,04
250	1 : 3333	79,00 x 52,00	0,411	2,63 x 2,60
500	1 : 6667	158,00 x 104,00	1,643	5,25 x 5,20
1000	1 : 13333	316,00 x 208,00	6,573	10,51 x 10,40
1500	1 : 20000	474,00 x 312,00	14,789	15,76 x 15,60
2000	1 : 26667	632,00 x 416,00	26,291	21,01 x 20,80
2500	1 : 33333	790,00 x 520,00	41,080	26,26 x 26,00
3000	1 : 40000	949,00 x 624,00	59,155	31,52 x 31,20

1) CCD-Chip mit langer Seite längs zur Flugrichtung!

2) Im Sinne der „Ground Sample Distance“ (GSD), wie sie bei der Satellitenfernerkundung angegeben wird:
GSD = m*Px, wobei m = Maßstabszahl und Px = Pixelgröße [µm] (Graham und Koh, 2002)

Die Tabellenwerte sind mit folgenden exemplarischen Nebenrechnungen ermittelt worden:

$$M = \frac{c}{H} = \frac{0,050m \cdot 1,5}{500m} = 1,5 \cdot 10^{-4} \quad ; \quad m = \frac{1}{M} = \frac{H}{c} = 6667$$

Ermittlung der Bodenpixelauflösung (gezeigt für 500m Flughöhe):

3008 Px = 23,7 mm | Alle Pixel auf der langen Sensorkante ...
 6667 x 23,7mm = 158,0079 m | ... entsprechen auf dem Boden dieser Länge.
 mit Dreisatz:
 3008 Px = 158,0079 m | Demnach entsprechen so viele Pixel im Gelände ...
 1 Px = 0,0526 m | ... dieser Rasterauflösung.

Analog setzt man alle übrigen Höhen und die Sensorquerseiten ein und erhält ein Flugplanungsszenario für die gegebene Kamera-Objektiv-Kombination.

Bemerkenswert an den Tabellenwerten ist die Tatsache, dass am Rande der VFR-Fluggrenze, also bei etwa 3000 m über Grund - und damit im ungünstigsten Fall für die gewählten Betrachtungsrahmen - die Bodenpixelauflösung noch immer dreimal so groß ist wie die der derzeit leistungsfähigsten Satellitensysteme mit etwa 1 m x 1 m Bodenpixelauflösung. Eine absolute Auflösungsgrenze vermutet man für Satelliten derzeit bei etwa 10 cm x 10 cm. Sie wird durch die sog. atmosphärische Abberation des Lichts hervorgerufen – der Lichtablenkungen infolge permanent auftretender thermischer Konvektionsvorgänge innerhalb der Troposphäre mit daraus resultierenden Dichte- und Brechzahländerungen.

Wenn wir uns nun ansehen wollen, was die wahre Grundgeschwindigkeit für einen Einfluss auf unser Burst-Szenario liefert, müssen wir weiterrechnen. Die Ermittlung der Länge des Streifens, der durch den Image-Burst fahrtabhängig entstehen, ist aufgrund der notwendigen Fallunterscheidungen etwas aufwändiger. Der Schlüssel für die Berechnung liegt in der Kenntnis der sog. Bildbasis. Das ist der Abstand zwischen den Bildmittelpunkten zweier aufeinander folgender Einzelbilder. Folgende Grafik verdeutlicht die Herleitung eines formelmäßigen Zusammenhangs:

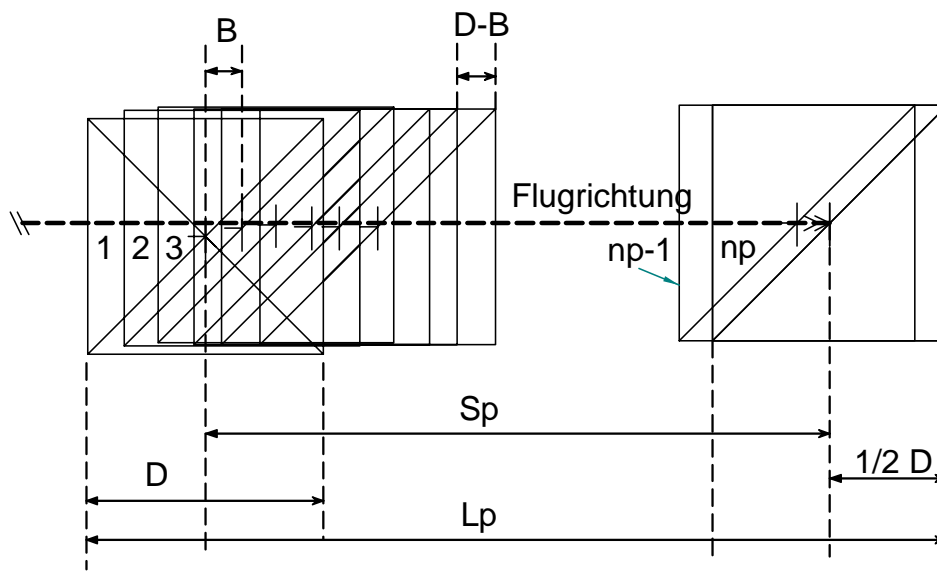


Fig. 186 Bildflugstreifen, mit D : Bodenkantenlänge eines Bildes; S_p : Abstand zwischen erstem und letztem Bildmittelpunkt; n_p : Bildanzahl; L_p : Kantenlänge des Flugstreifens; B : Bildbasis (Abstand der Mittelpunkte zweier aufeinanderfolgender Bilder). Beachte: $B \neq D-B$.

Bildbasis B ist die Strecke, die in der Zeit zwischen 2 Bildern mit der Groundspeed GS zurückgelegt

$$B = GS \cdot BF$$

wird:

mit

GS = Groundspeed m/s

BF = Bildfolge in Sekunden

Abstand zwischen den Bildmittelpunkten des ersten und letzten Bildes S_p :

$$S_p = (n_p - 1) \cdot B$$

mit

n_p = Anzahl Bilder im Burst

Länge des Bildstreifens L_p :

$$\begin{aligned}
 L_p &= Sp + D \\
 &= (np - 1) \cdot B + D \\
 &= (np - 1) \cdot GS \cdot BF + D
 \end{aligned}$$

mit D = Bodenkantenlänge eines Bildes in m
 Mit der GS in km/h wird:

$$L_p = \frac{(np - 1) \cdot GS \cdot BF}{3,6} + D$$

Beispiel:

GS = 80 km/h

H = 1000 m

$D_x(H) = 316$ m (vgl. untenstehende Fig. 189)

np = 180 Bilder pro Burst

BF = 2 Sekunden

ergibt:

$$L_p = \frac{(180 - 1) \cdot 80 \cdot 2}{3,6} + 316 = 8271,56 \text{ m}$$

Die Bildbasis B errechnet sich aus GS und BF beispielsweise mit unterschiedlichen Aufnahmegeschwindigkeiten (hier als Wiederholfrequenz in Hz ausgedrückt) zu:

GS	GS	Bildfolge BF [Hz] und resultierende Bildbasis B [m]												
[km/h]	[m/s]	0,01	0,05	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
80	22,22	2222,22	444,44	222,22	44,44	22,22	14,81	11,11	8,89	7,41	6,35	5,56	4,94	4,44
100	27,78	2777,78	555,56	277,78	55,56	27,78	18,52	13,89	11,11	9,26	7,94	6,94	6,17	5,56
120	33,33	3333,33	666,67	333,33	66,67	33,33	22,22	16,67	13,33	11,11	9,52	8,33	7,41	6,67
140	38,89	3888,89	777,78	388,89	77,78	38,89	25,93	19,44	15,56	12,96	11,11	9,72	8,64	7,78
160	44,44	4444,44	888,89	444,44	88,89	44,44	29,63	22,22	17,78	14,81	12,70	11,11	9,88	8,89

Fig. 187 Bildbasislängen für Nikon D70 mit 50-mm-Objektiv in Abhängigkeit von unterschiedlichen Planungs- bzw. windabhängiger resultierender Grundgeschwindigkeiten

Da die Burst-Länge und damit die Zahl der gemachten Aufnahmen lediglich von der Größe des Speichermediums abhängen, ziehen wir für die weitere Betrachtung eine Compact-Flash-Karte heran, für die Testdaten vorliegen und die sich im Testfeld entsprechend gut platzieren konnte. Die schnellsten Durchsatzraten wurden mit einer 2 GB SanDisk Ultra II (Type I) erzielt (4039 kB/s bei RAW-Burst über eine zeitliche Mess-Strecke von 4 Bildern).

Store	Time, secs (SanDisk)	Time, secs (Microdrive)	Time, secs (Lexar Pro)	Approx. File size	Approx. *1 1 GB card
3008 x 2000 RAW+JPEG	2.5	5.1	2.9	6,100 KB	87
3008 x 2000 RAW	2.2	4.5	2.6	5,400 KB	94
3008 x 2000 Fine JPEG	1.7	3.2	1.9	2,500 KB	291
3008 x 2000 Normal JPEG	1.6	3.0	1.7	1,500 KB	573

*1 Camera estimate

Fig. 188 Nikon-D70-Bilderfassungsleistung in Abhängigkeit von der verwendeten Bildeinstellung (Bilddateigröße); (Quelle: www.dpreview.com, 2005)

Wir können aus dieser Tabelle entnehmen, dass wir für eine Flugplanung annähernd 2 s Mindestbildfolgezeit und entweder ca. 180 „sichere“ RAW-Bilder oder 580 „sichere“ JPEG-

Fine-Bilder für das 2-GB-Sandisk-Speicherelement veranschlagen dürfen. Da jedoch RAW*-Bilder die gesamte Primärinformation darüber liefern, die ein Sensor zum Zeitpunkt der Aufnahme tatsächlich „gesehen“ hat, wird man sich üblicherweise für diese Datenart entscheiden, sofern nicht das zu erwartende Datenvolumen und der damit verbundene Postprocessing-Aufwand dagegen sprechen[†]. Berechnen wir für eine erste Abschätzung also mit 2 s und 180 RAW-Bildern ein flughöhen- und geschwindigkeitsabhängiges Szenario:

Flug-Höhe [m AGL]	Bild- maß- stab M	Bodenbild- kanten- längen		Bodenpixel- Auflösung		Burst- Streifenlänge			Burst- Streifenfläche		
		DX [m]	DY [m]	DXPx [cm]	DYPx [cm]	SL(80) [m]	SL(120) [m]	SL(160) [m]	SF(80) [ha]	SF(120) [ha]	SF(160) [ha]
50	667	15,80	10,40	0,53	0,52	7971,4	11949,1	15926,9	8,29	12,43	16,56
100	1333	31,60	20,80	1,05	1,04	7987,2	11964,9	15942,7	16,61	24,89	33,16
150	2000	47,40	31,20	1,58	1,56	8003,0	11980,7	15958,5	24,97	37,38	49,79
200	2667	63,20	41,60	2,10	2,08	8018,8	11996,5	15974,3	33,36	49,91	66,45
250	3333	79,00	52,00	2,63	2,60	8034,6	12012,3	15990,1	41,78	62,46	83,15
500	6667	158,00	104,00	5,25	5,20	8113,6	12091,3	16069,1	84,38	125,75	167,12
750	10000	237,00	156,00	7,88	7,80	8192,6	12170,3	16148,1	127,80	189,86	251,91
1000	13333	316,00	208,00	10,51	10,40	8271,6	12249,3	16227,1	172,05	254,79	337,52
1500	20000	474,00	312,00	15,76	15,60	8429,6	12407,3	16385,1	263,00	387,11	511,22
2000	26667	632,00	416,00	21,01	20,80	8587,6	12565,3	16543,1	357,24	522,72	688,19
2500	33333	790,00	520,00	26,26	26,00	8745,6	12723,3	16701,1	454,77	661,61	868,46
3000	40000	948,00	624,00	31,52	31,20	8903,6	12881,3	16859,1	555,58	803,80	1052,01

Fig. 189 Burst-Mode-Szenario Nikon D70 mit zu erzielenden Streifenlängen und -flächen

Ohne ein einziges Mal die Einstelldaten der Kamera ändern zu müssen, ergäben sich also bereits ab Flughöhen um 1500 m auf 8,4 km Distanz eine erzielbare „Flächenleistung“ von 263,0 ha (bei 80 km/h) und 511,22 ha (bei 160 km/h).

Um die Frage zu beantworten, was bei diesen Bildern auf diesen Flächen noch erkannt werden kann, muss man die Dynamik der (endlichen) Verschlussgeschwindigkeit des Objektivs und die Grundgeschwindigkeit des Sensors zum Zeitpunkt der Aufnahmen berücksichtigen. Die Pixel werden dabei unvermeidbarerweise längs der Flugrichtung gedehnt. Diesen Effekt nennt man Bewegungsunschärfe. Sie führt zu einer Verschlechterung der Bildqualität. Bei konventionell arbeitenden Luftbild-Reihenmesskammern existieren mechanische Ausgleichseinrichtungen der sog. „scheinbaren Bildwanderung“ (Forward Motion Compensation – FMC). In der digitalen Welt der „Focal Plane Arrays“ wird entweder über die Belichtungszeit ausgeglichen oder über die Algorithmik eines Postprocessing-Verfahrens.

* RAW-Daten kann man als digitales Negativ auffassen. Ähnlich zur Analogfotografie wird der Aufnahmeprozess vor Erstellung der eigentlichen Digitalbilddaten von einigen Parametern beeinflusst: Gammakorrektur, Helligkeit, Kontrast, Schärfe und Weißabgleich. RAW-Daten können verlustlos gespeichert werden; sie weisen keine Fragmente auf. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist der größere Farbumfang. Während JPEG-Bilder mit 8 Bit je Farbe gespeichert werden, liegen RAW-Daten in 12 oder sogar 14 Bit vor.

† Je kleiner die Sensorfläche, umso unbedeutender diese Überlegung. Allerdings würde man bei Verwendung aktueller MF-Datenrückteile bei bis zu 22 Mio. Pixel und 850 in Folge erzielbarer Bilder à 60 MB bereits mehrere Stunden nur für die RAW-Umwandlung in übliche Bildformate veranschlagen müssen!

Flughöhe [m AGL]	Bild- maß- stab M mittel	Bodenpixel- auflösung (in Flugrichtung) DXPx [cm]	Resultierende Pixelgröße durch Bewegungsunschärfe			Effektstärke Δ DXPx		
			DXPx(80) [cm]	DXPx(120) [cm]	DXPx(160) [cm]	DXPx(80) [cm]	DXPx(120) [cm]	DXPx(160) [cm]
50	667	0,5253	0,671	0,744	0,817	0,146	0,219	0,292
100	1333	1,0505	1,342	1,488	1,634	0,292	0,438	0,584
150	2000	1,5758	2,014	2,232	2,451	0,438	0,657	0,875
200	2667	2,1011	2,685	2,977	3,268	0,584	0,875	1,167
250	3333	2,6263	3,356	3,721	4,085	0,730	1,094	1,459
500	6667	5,2527	6,712	7,441	8,171	1,459	2,189	2,918
750	10000	7,8790	10,068	11,162	12,256	2,189	3,283	4,377
1000	13333	10,5053	13,423	14,883	16,342	2,918	4,377	5,836
1500	20000	15,7580	20,135	22,324	24,512	4,377	6,566	8,754
2000	26667	21,0106	26,847	29,765	32,683	5,836	8,754	11,673
2500	33333	26,2633	33,559	37,206	40,854	7,295	10,943	14,591
3000	40000	31,5160	40,270	44,648	49,025	8,754	13,132	17,509

Fig. 190 Burst-Mode-Szenario Nikon D70 bei kürzestmöglicher Belichtungsdauer: 1/8000 s

Die Tabelle beschreibt die zu erwartende Bewegungsunschärfe, wobei Δ DXPx (codiert: Abweichung der Kantenlänge D eines Bodenpixels in X- bzw. Flugrichtung) aussagt, um wie viel Zentimeter das jeweilige Bodenpixel in Abhängigkeit von Grundgeschwindigkeit und Flughöhe gegenüber dem statisch betrachteten Fall verlängert werden würde. Wie man der obigen Tabelle entnimmt, liegt der zu erwartende Wert, um den ein Pixel durch die Belichtungsdauer gedehnt wird, im jeweils schlechtesten Fall zwischen moderaten 3 mm in 50 m Flughöhe und 18 cm in 3000 m Flughöhe. Eine andere Situation ergäbe sich, wenn man mit der für Schrägluftbild-Flüge üblichen Belichtungszeit von 1/500 s aufnehmen würde:

Flughöhe [m AGL]	Bild- maß- stab M mittel	Bodenpixel- auflösung (in Flugrichtung) DXPx [cm]	Resultierende Pixelgröße durch Bewegungsunschärfe			Effektstärke Δ DXPx		
			DXPx(80) [cm]	DXPx(120) [cm]	DXPx(160) [cm]	DXPx(80) [cm]	DXPx(120) [cm]	DXPx(160) [cm]
50	667	0,5253	2,860	4,027	5,194	2,335	3,502	4,669
100	1333	1,0505	5,720	8,054	10,389	4,669	7,004	9,338
150	2000	1,5758	8,579	12,081	15,583	7,004	10,505	14,007
200	2667	2,1011	11,439	16,108	20,777	9,338	14,007	18,676
250	3333	2,6263	14,299	20,135	25,971	11,673	17,509	23,345
500	6667	5,2527	28,598	40,270	51,943	23,345	35,018	46,690
750	10000	7,8790	42,897	60,406	77,914	35,018	52,527	70,035
1000	13333	10,5053	57,196	80,541	103,886	46,690	70,035	93,381
1500	20000	15,7580	85,793	120,811	155,829	70,035	105,053	140,071
2000	26667	21,0106	114,391	161,082	207,772	93,381	140,071	186,761
2500	33333	26,2633	142,989	201,352	259,715	116,726	175,089	233,452
3000	40000	31,5160	171,587	241,622	311,658	140,071	210,106	280,142

Fig. 191 Burst-Mode-Szenario Nikon D70 bei typischer Bildflugbelichtungsdauer: 1/500 s

In so einem Fall würde ein Pixel bei 160 km/h Grundgeschwindigkeit in 3000 m Höhe bereits 3,12 m lang werden! Es wären im Gelände selbst bekannte Objekte mit einer Größe von <3 m bei ungünstigen Kontrastverhältnissen (z. B. Ameisenhügel auf lichtem Waldboden mit Streuauflage oder ein ebenerdiger Kanaldeckel auf gleichfarbigem Untergrund) nicht mehr identifizierbar. Wenn also die Grundgeschwindigkeit durch Starkwindinfluss auf einem

Fotoflug mit mehr als einem Bildflugstreifen stark schwankt, dann zeigt diese Szenariobetrachtung, dass die Erkennbarkeit von Bodenobjekten für die Luftbildinterpretation durchaus „richtungsabhängig“ sein kann, sofern keine weiteren Licht-/Schatteneffekte für eine geometrische Objektbegrenzung sorgen. Entwicklungsingenieure (Fa. Rollei) gehen davon aus, dass für den Idealfall von Digitalaufnahmen diese Bewegungsunschärfe dann tolerierbar bleibt solange gilt:

$$\text{Bewegungsunschärfe FM} < 0,5 \text{ Px}$$

Andererseits liegt der Wert solcher Szenarioabschätzungen darin, theoretisch aufzeigen zu können, dass selbst bei Verwendung relativ „einfältiger“ Sensorik bereits ein nicht unerheblicher Ausschnitt der Erdoberfläche sehr detailliert abgebildet werden kann - die D70 löst in dem Beispiel einfach nur so lange so schnell wie möglich aus, bis das Speichermedium voll ist. Es ist klar, dass der Burst-Mode eher im untersten Höhenband zum Einsatz gelangen würde, weil es keinen Sinn macht, bei nur 30 m/s Fluggeschwindigkeit in 3000 m AGL alle 2 s ein Bild auszulösen. Da jedoch keine weiteren Speicher- bzw. Bearbeitungskosten bei Verwendung von Digitalkameras anfallen, wird es zunehmend schwieriger, eine ökonomisch relevant erscheinende Anwendungsgrenze anzugeben, ohne solche Überlegungen empirisch zu untermauern. Burst-Mode-Befliegung, wie ich sie nenne, stellt eine Extremsituation für die jeweils verfügbare Sensorik ausstattung dar. Dennoch ist die Burst-Mode-(Punkt- oder Streifen-)Befliegung ein sinnvolles Bindeglied zwischen den bisher bekannten Methoden der „Cherry-Picker-Luftbilderkundung“ und der konventionellen luftgestützten Fernerkundung.

Solche Betrachtungen sind flugtechnisch deshalb relevant, weil der Fahrtmesser in einem Flugzeug auf der Messung des Differenzdrucks basiert und lediglich eine relative Geschwindigkeitsanzeige gegenüber der umströmenden Luft liefert.* Mit anderen Worten: Ein Pilot verfügt bei sich ändernden Windverhältnissen trotz genauester Flugplanung während des Bildflugbetriebs auf einem Bildflugstreifen über keine verlässliche Angabe der wahren Grundgeschwindigkeit, sofern er ein konventionell ausgerüstetes Sportflugzeug fliegt. Bei einer Kameraführung, die auf zeitgesteuerter Bildauslösung („Intervalometer“) beruht, kann ein Pilot ohne die Hilfe eines GPS während des Präzisionsfluganteils seiner Mission nicht unmittelbar feststellen, wie sich die abgebildeten Bodenabschnitte in ihrer relativen Lage zueinander verhalten.

* Der Fahrtmesser ist auf die internationale Normal- oder Standardatmosphäre (ISA) geeicht (Druck: 1013,2 hPa, Temperatur: 15 °C, Dichte: 1,225 kg/m³, vertikaler Temperaturgradient: 0,65 °C/100 m). Seine Anzeige ist daher sowohl druck- als auch temperaturabhängig. Die geforderte Instrumentengenauigkeit beträgt dennoch nur etwa +/- 3 km/h bei einer angezeigten Fluggeschwindigkeit von 100 km/h IAS („Indicated Airspeed“). Für Navigation mit Rechenschieber und Bordcomputer unter VFR-Bedingungen reicht dies völlig aus, wenn man bedenkt, dass bei einer typischen „Overhead-Overhead“-Flugplanung von Startflugplatzmitte zu Zielflugplatzmitte die errechneten Ankunftszeiten (Estimated Time of Arrival – ETA) für Kurzstreckenflüge innerhalb Deutschlands trotz sich ändernder Windbedingungen durchschnittlich um weniger als 5 min vom Erwartungswert entfernt liegen. Der Anzeigefehler nimmt für größere Flughöhen um etwa 2 % pro 1000 ft und größere Fluggeschwindigkeiten zu (ab 200 kts muss die sog. Kompressibilitätserwärmung berücksichtigt werden). Daraus resultieren neben der IAS insgesamt zwei weitere Geschwindigkeiten (CAS, EAS – Calibrated/Equivalent Air Speed), aus denen bei der Instrumentenfliegerei die wahre Fluggeschwindigkeit (TAS – True Air Speed) errechnet werden wird.

10.3 Computergestützte Präzisionsflugführung als unverzichtbares Hilfsmittel

In den vorhergehenden Abschnitten wurde mehrfach angesprochen, dass bei einem Photogrammetrieflug der Navigation eine entscheidende Bedeutung zukommt. Die GPS-Navigation spielt dabei eine Schlüsselrolle, weil sie erlaubt, Navigationspunktswolken im freien Raum zu definieren, die als Projektionszentren (Kameraauslösepunkte) dienen. Seit GPS verfügbar ist, benötigt man prinzipiell keine Glasbodenflugzeuge und 3-Mann-Cockpits mehr. Wird ein Sensor über eine GPS-Schnittstelle mit einem Computer verbunden, löst der Rechner ein Bild automatisch aus, sobald man der geplanten Koordinate näher als eine vordefinierte Minimumdistanz gelangt. Auf diese Weise meißelt man die Auslösezentren (die in ihrer Summe die sog. Bildmittenübersicht ergeben) über eine digitale Bildflugplanung förmlich in den Himmel.

Der herausragendste Effekt dabei: GPS erlaubt es, sowohl temporal als auch geometrisch nahezu beliebig aufgelöste Zeitreihen zu erstellen. Man kann damit in der Landschaft einen geometrischen und einen zeitlichen Zoom erzeugen, der innerhalb der oben betrachteten Planungsszenarios liegen wird. Eine Fernerkundungsschwerpunktbildung im Gelände ist damit als auf dem Kopf stehende Pyramide vorstellbar, die aus mehreren Aufnahme-Ebenen besteht, von denen jede einzeln oder aber eine Auswahl der theoretisch zur Verfügung stehenden Möglichkeiten abgeflogen werden kann. Diese Art von Einsatzprofil nenne ich „Schichtgitterbefliegung“:

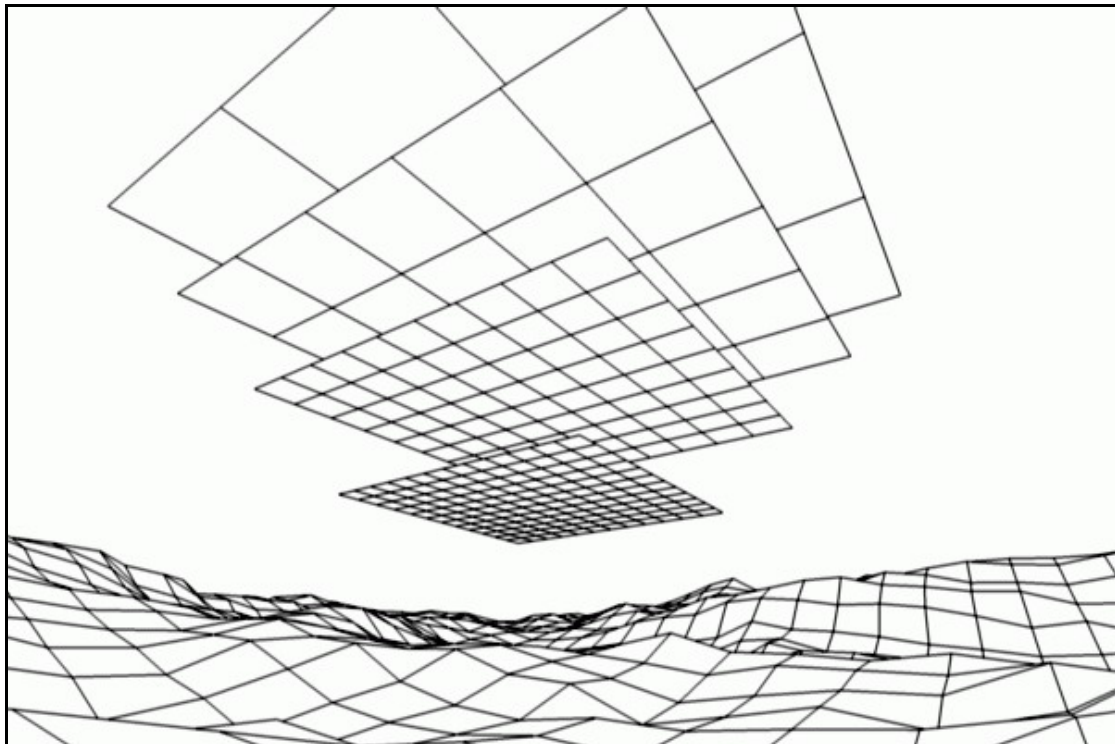


Fig. 192 Schichtgitterbefliegung (schematisch) – die Knotenpunkte der einzelnen Gitter symbolisieren Auslösezentren, also vor Flugantritt festgelegte räumliche Koordinaten. Die Flächensegmente innerhalb der Schichten deuten die unterschiedlichen Maßstäbe an.

Schichtgitter besitzen die operative Eigenschaft der lokalen und regionalen Ortstreue. Sie werden es künftig ermöglichen, methodische Hürden, die sich aus der Maßstabsproblematik ergeben, leichter zu überwinden. Schichtgitter sind methodische Verbindungselemente von

Flächendaten der Satellitenfernerkundung bzw. Ergebnissen der topographischen Landesaufnahme zu punktuellen, terrestrischen Eigenerhebungen und dienen daher der Regionalisierung von Punktdaten in die Fläche.

Flugpraktisch ist es sinnvoll, Schichtgitter von oben nach unten zu durchfliegen, da sich der Pilot langsam an die kürzer werdenden Auslöseintervalle und die geringeren Flughöhen gewöhnen kann. Dabei sind die Lärmemissionen auf ein Minimum beschränkt, da sich ein Flugzeug während des Abstiegs von der einen Messebene zur nächsten bei geringer Motordrehzahl phasenweise sehr leise im Gleitflug bewegen lässt. Dies wird besonders bei „entarteten Gittern“ mit nur wenigen Aufnahmen im Falle von Punktbefliegungen zum Tragen kommen, wie es beispielsweise bei archäologischen Grabungsdokumentationen oder Precision-Farming-Anwendungen der Fall ist. In entarteten Gittern sind Kombinationen von Einzelbildern für die Gewinnung von Überblicksinformationen (z. B. M 1 : 100 000), großmaßstäbige Photogrammetrie-Blockbilder (z. B. M 1 : 15 000) und höchstauflösende Burst-Streifen (z. B. M 1 : 500) denkbar.

Hierzu sagt ein gerätetechnisches Hand- und Lehrbuch der Photogrammetrie (Rüger, Pietschner und Regensburger, 1987) allgemein aus:

„Eine bessere Erfassung und Reduktion zufälliger und systematischer Fehler der Luftbilder im Zuge der Bildtriangulation [...] sind bei doppelter Befliegung der Streifen in umgekehrter Flugrichtung oder rechtwinklig zueinander zu erwarten. In der Praxis des Bildfluges haben sich beide Verfahren infolge des erhöhten Zeit- bzw. Materialaufwandes bisher nicht durchsetzen können.“

Mit entarteten Schichtgittern erreicht man beides: Informationsredundanz und Informationsmehrgewinn durch unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe. Die systematische Verwendung von Schichtgittern hängt in größerem Maße von der gewählten Flugzeug-Sensor-Kombination ab; bestimmte Flugzeug-Sensorkombinationen werden zu bevorzugten Gitterhöhen für Monitoringaufgaben führen. Es ist zu erwarten, dass sich disziplinspezifische Gitterhöhen herausbilden werden.

Es muss empirisch gezeigt werden, dass Schichtgitterbefliegungen dazu geeignet sind, Forschungsaktivitäten in der Kulturlandschaft zu zentrieren oder anderweitig zu unterstützen. Ohne Präzisions-Navigation sind Schichtgitter für Monitoringaufgaben mit kleinformatiger Sensorik nicht sinnvoll: Aufgrund der hohen geometrischen Genauigkeitsanforderungen wären Schichtgitterflüge ohne INS/(D)GPS-Unterstützung nicht durchführbar.

Die INS/(D)GPS-Unterstützung entspricht bei der praktischen Anwendung einem Echtzeit-Soll/Ist-Vergleich von geplantem und tatsächlichem Kurs: man nennt eine technische Einrichtung für diesen Zweck Flugführungssystem. Es gibt verschiedene Anbieter solcher Flugführungssysteme. Im Vergleich zu den weiter vorne vorgestellten GPS-gestützten Moving Maps für die allgemeine Luftfahrt und den Freizeitbereich beherrschen Flugführungssysteme die Navigation mit geodätischer Anspruchsgenauigkeit, sind spezifisch auf Bildfliegerfordernisse ausgelegt und erlauben die Sensorsteuerung. Deshalb sind sie ungleich aufwendiger und teurer. Das erfolgreichste und weitverbreitetste, professionelle System stammt von der Firma IGI* und ist auf Photogrammetrie-Flugführung ausgelegt

* IGI steht bezeichnenderweise für „Ingenieurgesellschaft für Interfaces“.

(CCNS-4). Geliefert wird die komplette Hard-/Software inkl. GPS/INS-Sensor.* Flugführungssysteme sehen im Prinzip alle gleich aus (siehe Fig. 193):

Sie stellen einem Piloten graphisch als wichtigstes Merkmal einen Soll-Kurs (hier: durchgezogene Linie) und einem Ist-Kurs (gestrichelte Linie) zur Verfügung. Im allgemeinen Fall sind dies zwei Linien mit je einem Symbol oder einer Art Nullmarke darauf, wobei ein Symbol auf der Ist-Linie das Flugzeug (also den eigenen Standort) und das andere Symbol auf der Soll-Linie die nächste Wegmarke (hier: ein geplantes Fotoauslösezentrum) markiert. Alle übrigen Anzeigen dienen lediglich dazu, die Soll-Werte effektiver wiederherzustellen oder zu stabilisieren. Darunter ist die wichtigste Information, die XTK/TAE (Crosstrack-Trackangle-Error) – im vorliegenden Beispiel XTD (Crosstrack-Deviation) – genannt: Dieses Maß gibt an, um wie viel Längeneinheiten die gewünschte Kurslinie querab der wahren Position liegt (hier also 1,84 km rechts vom gewünschten Kurs). Die anderen Einblendungen helfen nur, die Gesamtsituation darzustellen.

Das Flugzeug befindet sich in einem Rechtskreis, der zum dritten Fotoflugstreifen führt, und zwar entgegen seiner Flugplanungsrichtung (angedeutet durch das Minus beim Menüeintrag „Line“) und es steuert mit einem derzeitigen True Heading von 240° den Einstiegspunkt der Fotofluglinie („MKR“ – Marker) an, der durch einen kleinen Kreis markiert ist. Diesen Fotoeinstiegspunkt erreicht es mit einem Heading von 246° in 3 NM Entfernung. Das Quadrat auf der Desired Track (DTK-) bzw. Soll-Linie repräsentiert das nächste Fotoauslösezentrum. Es ist das 17. Foto, befindet sich 5 NM voraus („DIS“), und liegt auf 7975 ft Höhe, während momentan mit 139 kts Grundgeschwindigkeit GS in 7825 ft Höhe gekurvt wird. Die ermittelte Drift beträgt 4° rechts (DRIFT SET), das heißt, die Maschine erfährt eine schwache Seitenwindkomponente von links.

Wenn schließlich die Soll-Linie hinreichend genau erreicht wird, verschwindet der senkrechte Pfeil ganz oben links in der Anzeige und es erscheint ein Symbol für das nächste Foto, das die Skala bis zum schwarzen Dreieck herunterwandert, ehe das Bild ausgelöst wird. Das ist deshalb hilfreich, weil durch zahlreiche Umwelteinflüsse das Flugzeug durchaus größeren Störbewegungen unterworfen sein kann, es allerdings der Pilot so einrichten sollte, dass er zum erwarteten Auslöszeitpunkt sich tatsächlich über dem gewünschten Punkt befindet. Diese Anzeige entspricht demnach einer Art Ampelfunktion. Allerdings befindet sich das Luftbildsystem im gezeigten Beispiel in einem Ruhezustand, entweder weil der Computer auf ein entsprechendes Kamerabereitschaftssignal wartet oder weil der Pilot die Anlage gesperrt hat. Anzeigt wird dies durch gleich drei redundante Informationsfelder: Es wird „EXPSTOP“ (Exposure Stop) eingeblendet, das quadratische Symbol für das nächste Bild ist ausgekreuzt und der Waypoint (WPT) ist nach oben und unten mit zwei dicken Balken abgegrenzt. Das System erwartet ein Eintreffen an 14 weiteren Fotoauslösezentren (REM. PHOTO).

* Der Vorläufer CPNS (Computer Photo Navigation System) beruhte auf dem Trident-III-System des französischen Konzerns CSF-Thompson. Die Trident-III-Vorläufersysteme waren ursprünglich auf die Positionierung von Schiffen ausgelegt und ab Anfang der 80er Jahre entwickelt worden.

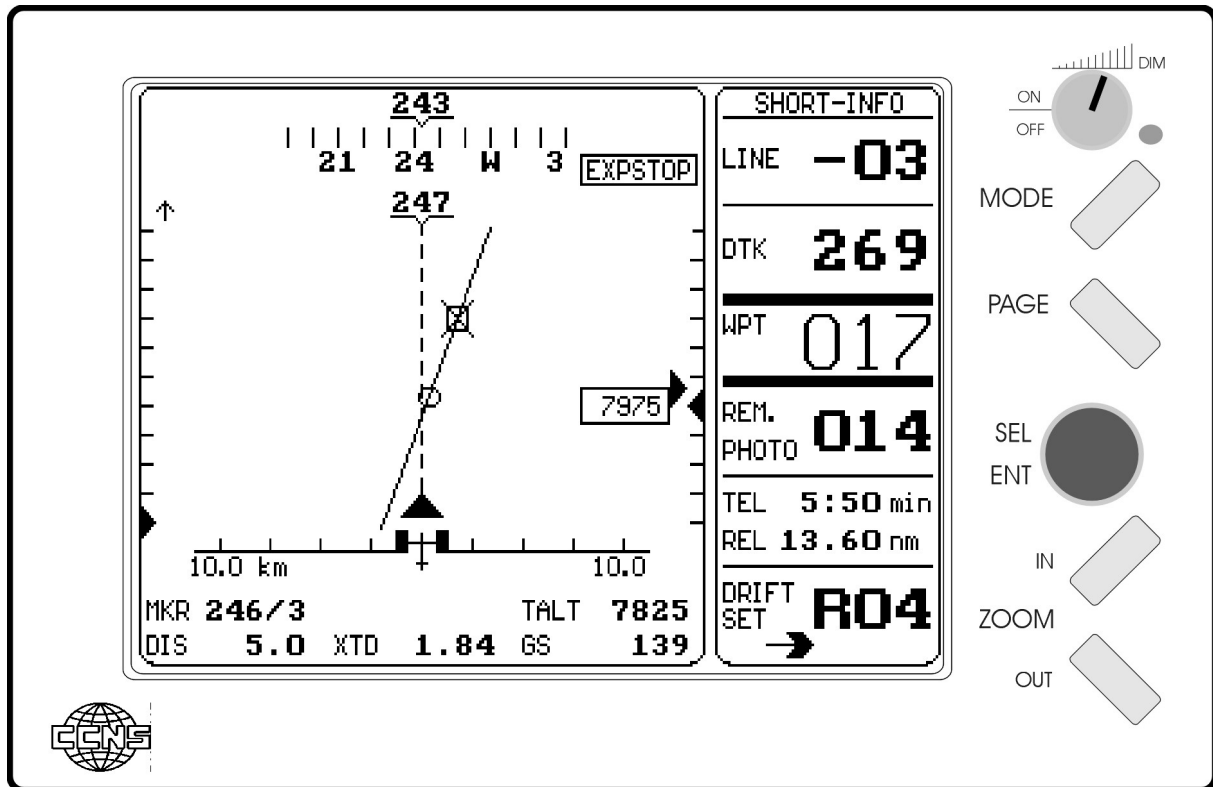


Fig. 193 „WYSIWYG-Anteil“ eines CCNS4-Flugführungssystems in fast naturgetreuer Größe (5" [12,7 cm] TFT), offiziell CDU genannt (Command Display Unit); mit freundlicher Genehmigung (Firma IGI, März 2005)

Ein Flugführungssystem erleichtert das Fliegen um Größenordnungen. V. a. ermöglicht es eine Flugpräzision, die ohne eine solche Anzeige nicht realisierbar wäre. Ergonomisch ist so eine Vorrichtung gleich in mehrfacher Hinsicht. Zum Beispiel ist es sinnvoll, die Flugzeugschneise und die Ist-Kurslinie fest aufeinander abzubilden und den Soll-Kurs beweglich zu halten, denn dann finden Sie diesen als Pilot leichter wieder, wenn er unter Ihrem Flugzeug in eine andere Richtung „durchtaucht“. Weiterhin ist der Menüeintrag MKR (unten links) auch dann eingeblendet, wenn man den Ausschnitt des geplanten Fotofluggurses noch nicht oder nicht mehr sehen kann, wie dies bei einem Erstanflug der Fall ist. Der Computer führt den Piloten direkt an die wesentlichen Eckpunkte eines geplanten Schichtgitters heran. Für Flugverkehrsfreigaben sind schließlich die Angaben TEL (Time to end of line) und REL (Range of line) relevant: Der Pilot sieht, dass sein Streifenende bei der momentanen Geschwindigkeit in knapp 6 min und 14 NM Entfernung erreicht ist. Der Computer beschleunigt das Tempo des Vorausdenkens um Größenordnungen. Über diese Information wird es möglich, bei Bedarf der Flugverkehrskontrolle über Funk eine verzögerungsfreie und exakte Auskunft darüber zu liefern, wie lange man noch auf dem gegenwärtigen Kurs laut Flugdurchführungsplan zu verweilen beabsichtigt. Das ist u. U. notwendig, um kreuzenden Luftverkehr aus der geraden Fotoflughahn des Vermessungsflugzeugs herauszuhalten. Der Lotse kann mit der rasch verfügbaren und sicheren Information eine Nutzenabwägung zur verkehrslenkenden Entscheidungsfindung durchführen.

Die aufregendste Neuerung, die mit der Einführung von INS/(D)GPS-gestützten Plattformen und der damit verbundenen direkten Autogeoreferenzierung einhergeht, betrifft mehr als nur die bloße Arbeitseinsparung während der Bodenauswertephase. So werden beispielsweise punktuelle Präzisionskartierungen in einem wesentlich umfangreicheren Untersuchungsgebiet

denkbar, als dies mit SFAP-Methodik bislang sinnvoll praktikierbar gewesen wäre. Darüber werden sich in absehbarer Zukunft nicht ein paar wenige, sondern gar mehrere Hundert verschiedene Einzelflächen in kurzer zeitlicher Abfolge aufsuchen und photogrammetrisch erfassen lassen. Dies geschieht in etwa nach Art der nachfolgenden Abbildung, die ein Vermessungsprojekt der FH Bochum mit einem Testeinsatz der Heimesplattform über 80 Straßenkreuzungen zeigt.

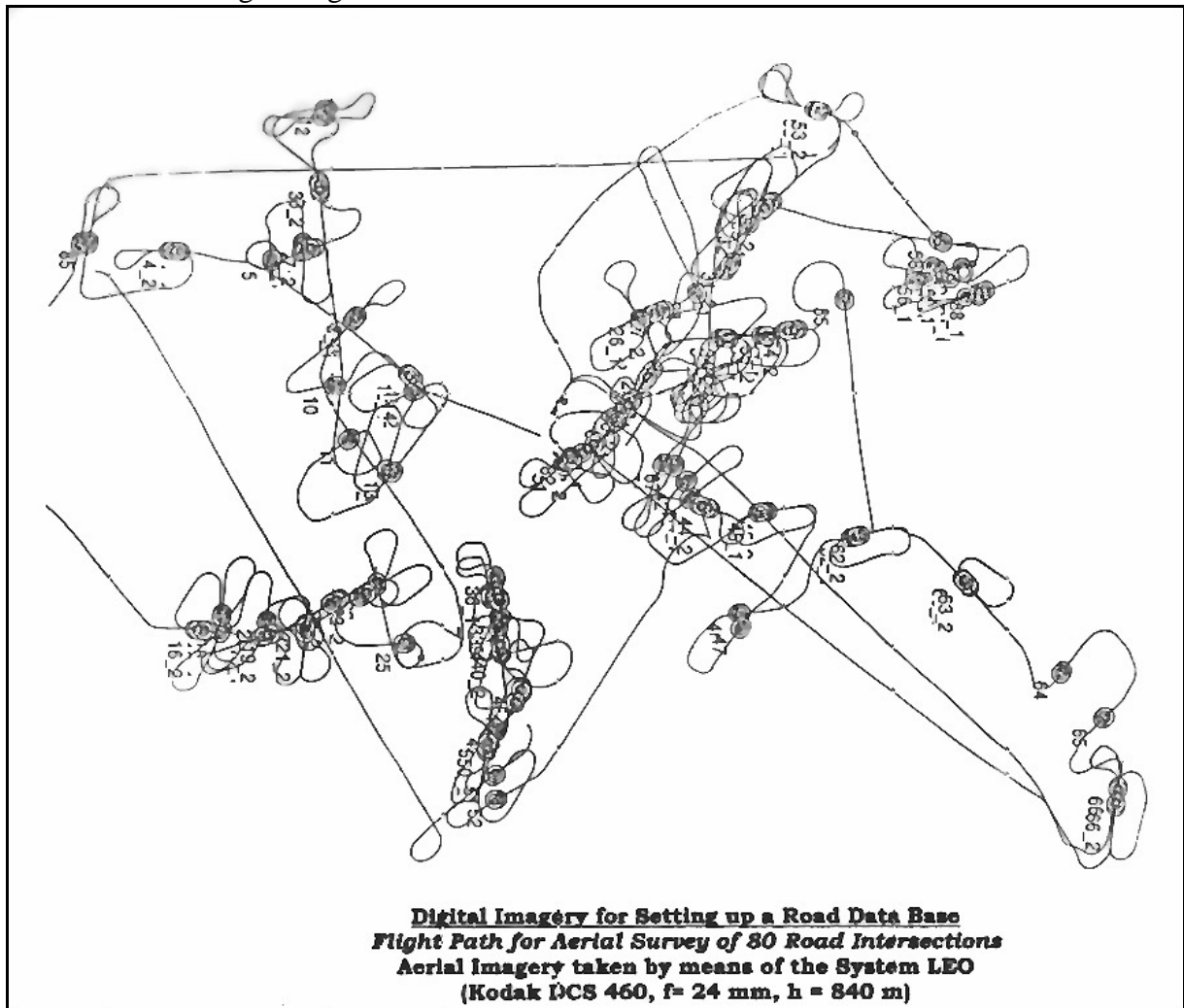


Fig. 194 Vergrößerte GPS-Track-Darstellung einer Befliegung von 80 Straßenkreuzungen zum Aufbau einer Straßendatenbank; LEO-Projekt (Local Earth Observation) Fachhochschule Bochum, (Heimes et al., 1999)

Eine derartige Vorgehensweise wäre mit manuell geführten Kameras ohne Computerunterstützung unter ergonomischen und ökonomischen Aspekten nicht durchführbar, weil alleine die Zuordnung der unterschiedlichen Bilder auf die große Anzahl der angeflogenen (Vergleichs-)Standorte einen entsprechenden Verarbeitungsaufwand nach sich ziehen würde, wenn der Computer die Bilder mit deren Bildmittelpunkten nicht selbständig indizieren könnte. Im Falle der Straßenkreuzungen waren nur 2 - 6 Aufnahmen auf 140 kurzen Flugstreifen über den Kreuzungen nötig (manche Kreuzungen mussten aufgrund der Mindestbildfolgezeit der verwendeten Kamera mehrmals angeflogen werden).

Langfristig werden diese Maßnahmen dennoch nur einen ersten Schritt bedeuten. Flugführungssysteme können beliebig weiterentwickelt und ausgebaut werden: Sinnvoll wäre z. B. das Einspiegeln der Information direkt auf die Flugzeugfrontscheibe oder in eine

Sichtbrille*, die der Pilot trägt. Auch das Verkreuzen von interaktiv zu steuernden Elementen der Flugplanung und der Flugführung würde Sinn machen, um großen Monitoringflügen eine entsprechende offene Komponente hinzuzufügen.

Das Thema Flugführung ist im Zusammenhang zu erläutern, wie sich der heutige Flugverkehr in den gegebenen Luftraum überhaupt einfügt, und wie das Thema Bildflug in der luftrechtlichen Praxis behandelt wird.

10.4 Grundsätzliche fliegerische und luftrechtliche Aspekte

Da nun ein Bild von den Möglichkeiten gezeichnet wurde, die das historische Grundgerüst aus Navigation, GPS, digitaler Sensorik und Software eröffnet, und welches sich in vielfältigen technischen Konvergenzlinien äußert, wenden wir uns der Integration von Umweltbeobachtungsflugzeugen als Ganzheiten in die bestehende Verkehrsinfrastruktur zu. Dazu ist es erforderlich, sich zunächst einen kurzen Überblick über die vorhandene Luftraumstruktur zu verschaffen.

Der Internationale Luftverkehr wird seit der Gründung der ICAO (International Civil Aviation Organization) am 4. April 1947 von dieser Institution global standardisiert. Die wesentlichen Beschlüsse wurden 1944 im sog. „Chicagoer Abkommen“ von 52 Staaten erarbeitet. Deutschland ratifizierte 1956 dieses ICAO-Abkommen und trat im selben Jahr als 67. Mitgliedstaat der ICAO bei. Die ICAO ist heute eine Sonderorganisation der UNO und umfasst mehr als 160 Mitgliedstaaten. Sie schafft in ihren Richtlinien und Empfehlungen (96 Artikel mit 18 Anhängen) einheitliche Regeln für den Luftverkehr. Die Richtlinien sind für die Mitgliedstaaten verbindlich zu befolgende Standards.

Deshalb unterscheiden sich die Lufträume über ganz Europa lediglich durch ihre horizontale Ausdehnung voneinander und sind zum überwiegenden Teil jedem musterzugelassenen Flugzeug in erster Näherung frei zugänglich. „In erster Näherung“ bedeutet hierbei, dass Flugzeuge bezüglich ihrer Bordinstrumentierung luftraumspezifischen Anforderungen gerecht werden müssen. Diese Anforderungsprofile werden im Rahmen einer standardisierten Luftraumklassifizierung mittels Kennbuchstaben kodifiziert.

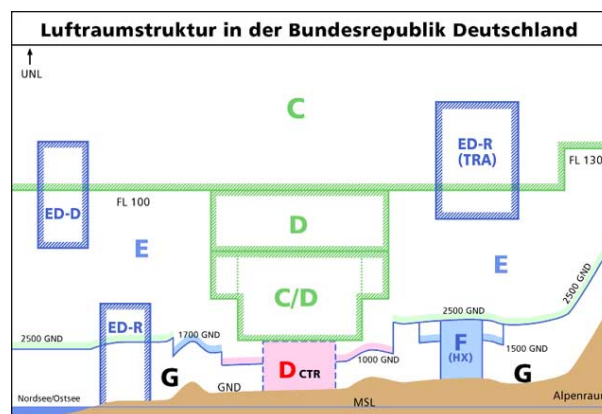


Fig. 195 Schematische Vertikalgliederung des Luftraums nach ICAO-Richtlinien

* Milit. Bezeichnung: HUD – Head-up-Display.

Obige Grafik mag auf den ersten Blick verwirrend erscheinen. Prinzipiell existieren nur einige wesentliche Unterscheidungskriterien: Lufträume werden in zwei Grundklassen eingeteilt, jene für Sichtflugverkehr und jene für Instrumentenflugverkehr (umgangssprachlich noch heute als „Blindflug“ bezeichnet). Die luftrechtlich verankerten Durchführungsbestimmungen für Sichtflug nennt man VFR (Visual Flight Rules), die für Instrumentenflug IFR (Instrument Flight Rules). Der für IFR-Betrieb vorgesehene Luftraum ist jener der Klasse „C“^{*} – er weist die höchsten Anforderungen an Flugzeugtechnik und Flugbetriebskoordination auf. IFR-Navigation beruht im Wesentlichen auf Radiofremd- und Eigenpeilung mit bodenradargestützter An- und Abflugkontrolle und findet grundsätzlich oberhalb von 10 000 ft MSL (oder kurz „Flight Level 100“ – „FL100“) statt. Der Hauptzweck von IFR-Flugbetrieb ist Wetterunabhängigkeit für planbaren Linienflugbetrieb (ökonomischer Fall) oder uneingeschränkte Flexibilität in der Einsatzplanung (militärischer Fall), wobei hinsichtlich der verwendeten Bord- und Navigations- bzw. zunehmend Informationssysteme der oberste Grundsatz „Boden- und Hindernisfreiheit“ lautet.[†]

Eine Ebene darunter existieren lediglich besondere „C“- und „D“-Lufträume, weil Instrumentenflugzeuge auch während ihrer Start- und Landephasen ausreichend von anderen Flugzeugen (hier v. a. VFR-Verkehr) separiert und gestaffelt werden müssen (typ. 2 Min. zeitliche Abstände). Das Trennmaß von 10 000 ft resultiert wahrscheinlich aus historischen Erfahrungen im Umgang mit einer ernstzunehmenden „physiologischen Schwelle“ jenseits dieser 3 km Höhe: Hypoxie (Höhenkrankheit durch Sauerstoffmangel). Diese wird technisch entweder über Bordsauerstoffanlagen oder Druckkabinen ausgeglichen. Heute liegt die flugmedizinisch vorgegebene Pflichtgrenze für Bordsauerstoff aufgrund jüngerer sportwissenschaftlicher Erkenntnisse etwas höher. Die Navigation im Sichtflug (VFR) dagegen beruht auf der Koppelnavigation und findet unterhalb der Sichtfluggrenze von 10 000 ft mit „langsamen“ Fluggeschwindigkeiten statt (in Deutschland unter FL100 max. 250 kts, wobei die Mehrzahl von VFR-Flugzeugen üblicherweise mit deutlich unter 150 kts unterwegs ist). Damit sind für VFR-Flugzeuge die beiden wichtigsten Luftraumklassen „E“ (ausgesprochen: Echo) und „G“ (Golf).

Luftraum „G“ ist im luftrechtlichen Sprachgebrauch sog. „unkontrollierter Luftraum“. D. h., hier entfällt die Notwendigkeit einer Trennung von IFR- und VFR-Verkehr. Ein Flugzeugführer fliegt in Luftraum „G“ lediglich auf sich, seiner eigenen Luftraumbeobachtung und seiner Sichtflug-Navigation gestellt.[‡] Dieser Luftraum erstreckt sich vertikal bis 2500 ft Höhe über Grund (abgekürzt GND – also exakt 762 m oder für übliche Navigationszwecke ausreichend: 750 m). Die folgende Abbildung veranschaulicht, wie groß dieser Luftraum in Relation zur Gesamtfläche tatsächlich ist.

* Buchstaben werden in der allg. Luftfahrtnomenklatur im NATO-Alphabet wiedergegeben. Im vorliegenden Fall würde man also von einem Luftraum der Klasse „Charlie“ sprechen.

† Die Notwendigkeit in letzterem Fall, möglichst unentdeckt zu bleiben, führte historisch ab Mitte des 20. Jh. zur Herausbildung sog. „autonomer“ Navigationsverfahren (RADAR-, INS-Navigation), die einerseits einen erheblichen technischen Mehraufwand für das einzelne LFZ bedeuten, andererseits jedoch die Notwendigkeit von bodengestützten, ortsfesten (oder mobilen) Peilfunksendern reduzieren, die ihrerseits in ihrer Summe erhebliche Kosten für Errichtung und Wartung bedeuten.

‡ In der Praxis fliegt man heute typischerweise mit der gerasteten Funkfrequenz des Fluginformationsdienstes (FIS: Flight Information Service) und hört den Sprechfunkverkehr der Flugsicherungs-Regionalstellen ab, von denen lediglich 5 über Deutschland verteilt sind. Dieser Fluginformationsdienst gibt für Piloten nicht bindende Informationen und Hinweise aus (Wetterwarnungen, milit. Tiefflug, drohende Luftraumverletzungen etc.). Funktechnisch besteht auf Überlandflügen daher kein echter Unterschied zwischen Lufträumen der Klassen „E“ und „G“.

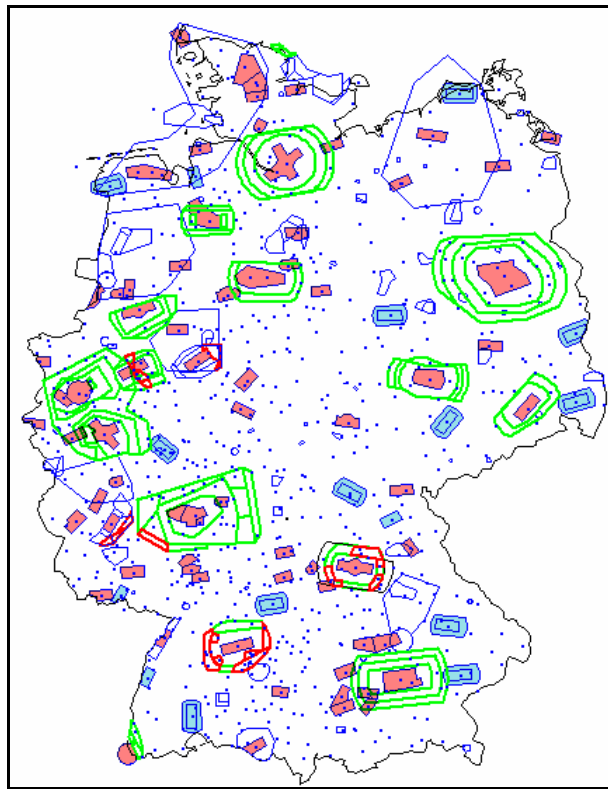


Fig. 196 Horizontale Luftraumgliederung; Komposit zweier Bildschirmfotos der Software „StrePla“ (2004)

Blaue Punktsignaturen: Flughäfen, Verkehrsflugplätze, Sonderlandeplätze und Segelfluggelände. Blaue und rote Flächensignaturen: Kontrollzonen mit Tower-überwachtem An- und Abflugverkehr. Grüne Liniensignaturen: „C“- und „D“- Lufträume als „vertikale Kontrollzonenausläufer“ und blaue Liniensignaturen für übrige Lufträume mit Sonderfunktionen (Luftbeschränkungs- bzw. -sperrgebiete). Wie man der Darstellung entnehmen kann, ist der Großteil der Fläche über der Bundesrepublik Deutschland luftrechtlich unkontrollierter Luftraum.* Unter Einhaltung der Sicht- und Flughöhenmindestgrenzen sind über dieser Fläche Foto- und Messflüge übersetzt in wissenschaftliche Terminologie bis zur Peplopause, der Oberseite der atmosphärischen Grundschicht (ca. 1 km GND Vertikalausdehnung), jederzeit und ohne größere Vorbereitungen möglich. Die Deutsche-Flugsicherungs-GmbH (DFS) mit Sitz in Langen bei Offenbach veröffentlicht darüber hinaus Verfahrenswege zur Genehmigung von Foto- und Messflügen in den übrigen Lufträumen. Die organisatorische Hürde, die es hierbei zu überwinden gilt, beschränkt sich derzeit auf die Abgabe einer formlosen, schriftlichen Absichtserklärung als Fax. Im Übrigen kann während eines Fluges der Status von Lufträumen

* Vor dem Hintergrund der einschneidenden Terrorattacke auf die USA am 11. September 2001 erscheint an dieser Stelle ein ausdrücklicher Hinweis an die Leserschaft ohne Pilotenkenntnisse angebracht, um evtl. aufkeimende, missverständliche Interpretationen des luftrechtlichen Begriffs „unkontrolliert“ klar auszuräumen: „Unkontrolliert“ bedeutet keineswegs, dass Luftfahrzeuge in Flughöhen unter 2500 ft MSL „unbeobachtet“ oder gar „unbemerkt“ operieren könnten. Das Radarnetz der militärischen Flugsicherung ist so leistungsfähig, dass man auch „unkontrollierte VFR-Flüge“, also jene Flüge ohne nennenswerte Funk- und Transponderkontakte zu den entsprechenden zivilen Leitstellen quer durch das ganze Land, praktisch lückenlos auf den Dekameter und die Sekunde genau beobachten bzw. rekonstruieren kann! Ein Jet überquert eine so kleine Staatsfläche wie Deutschland in 10 - 20 min. Es bedarf keiner weiteren Erläuterung, wie engmaschig eine auf solch eine strategische Grundposition ausgerichtete Luftraumüberwachung sein wird.

jederzeit über Funk abgefragt werden, um wetter- und verkehrsabhängig eine Liste von mehreren Einsatzorten flexibel und verzögerungsfrei abarbeiten zu können. Dieser Umstand wird auf technischer Ebene durch die Vorzüge von GPS-Navigationslösungen begünstigt. Mit Ausnahme einiger ganz besonderer Flächen (Kernkraftanlagen, wehrtechnische Anlagen) sind also per Flugzeug mehr als 95 % unserer Staatsfläche direkt erkundbar, und zwar über den gesamten Höhenbereich hinweg, den ein moderner Starr- oder Drehflügler abdecken kann. Im Wesentlichen verhält es sich so für das übrige Mitteleuropa, wobei für Auslandsflüge grundsätzlich formale Flugpläne erforderlich sind*.

Das wichtigste luftrechtliche Kriterium auf dem Wege zum Status quo wird durch den Wegfall einiger empfindlicher Beschränkungen zur Durchführung von Bildflügen markiert, wie sie im Wesentlichen im vierten Abschnitt („Verwendung und Betrieb von Luftfahrtgerät“) der Luftverkehrs-Zulassungsordnung (LuftVZO) verankert waren. Die LuftVZO ist seit dem 13. März 1979 mit einigen Änderungen in Kraft. Die §§ 83 - 89 „Luftbildwesen“ wurden zu Beginn der 90er Jahre aufgehoben. Damit entfielen die restriktiven Verfahren der Genehmigungspflicht für Luftbilder („Luftbildfreigaben“), die als Relikte aus der Ära des Kalten Krieges mit einer weltweiten Blockpolitik keinen Bestand mehr haben.

Ein Bildflugzeug nimmt deshalb nach denselben Regeln und Prinzipien am Luftverkehr teil, wie sie für die gesamte Allgemeine Luftfahrt gelten. Lediglich für die Zeitphase während des Messflugs, die der Datenerfassung gilt, muss durch entsprechende Anmeldung und Ankündigung dafür Sorge getragen werden, dass im Umkreis von wenigen hundert Metern um das Messflugzeug kein übriger Verkehr zu Ausweichmanövern zwingt oder eine sichere und ökonomische Durchführung relativ enger 180°-Wendemanöver verhindert. Mittelfristig werden diese Belange durch die Pflichteinführung von „Mode-C“[†]-Transpondern noch weiter minimiert werden.

10.5 Andere Sensorik – andere Trägerflugzeuge

Bezüglich der Sensorikautomatisierung herrscht heute die größte Mangelsituation. Die im Inland erste, kleinste und bislang am weitesten fortgeschrittene Stabilisierung, die Autogeoreferenzierung bietet, ist die Heimesplattform. Das Besondere im Vergleich zu konventionellen Luftbildaufnahmesystemen besteht darin, dass die Heimesplattform die Rüstmasse um mindestens den Faktor fünf senkt. Diese Plattform wiegt nur etwa 20 - 25 kg, im Gegensatz zu den 115 kg und mehr der bisherigen Luftbildaufnahmesysteme (vgl. Fig. 81) Eine Heimesplattform ist modular mit Sensormassen bis etwa 3 kg bestückbar (also beispielsweise 2 kg für Digitalkamera und 1 kg für IMU). Der Investitionsaufwand liegt in ebensolcher Relation: Es spielt fast keine Rolle, welche Szenarien man sich überlegt; mit der Heimesplattform an Bord eines Flugzeugs geeigneter Größe verwendet ergeben sich deutliche Einsparungsmöglichkeiten für Anschaffung und Betrieb. Die gesamte regelkreisgesteuerte Stabilisierung liefert wegen der prinzipiellen Gleichartigkeit der verwendeten INS-Komponenten direkt mit einer „konventionellen“ Reihennesskammer vergleichbare Messwerte. D. h., man erhält für einen ähnlichen Tätigkeitsaufwand in etwa dieselbe Qualität der Daten, nur über einen formatbedingt (viel) kleineren

* Tatsächlich füllen Jumbo-Kapitän und Leichtflugzeug-Pilot identische Flugplanvordrucke aus!

† Mode-„Charlie“-Transponder beruhen auf Sekundärradar und liefern einem Fluglotsen neben Position und Geschwindigkeitsvektor auch die Flughöhe eines LFZ.

Landschaftsausschnitt, der sich jedoch durchaus über mehrere Hundert Quadratkilometer und mehr erstrecken kann. Das Rohdatenzwischenprodukt unterscheidet sich nur aufgrund der verwendeten Güte der Optiken.

Mit Flugzeug „geeigneter Größe“ ist gemeint, dass es nicht zweckmäßig wäre, eine Heimesplattform mit einer zweimotorigen Geschäftsreisemaschine zu fliegen.

Wie K. Kraus in seiner „Photogrammetrie“ einräumt, lässt sich nahezu jedes beliebige Flugzeug durch Einbau einer Bodenluke zum Bildflugzeug umrüsten. Als Leistungsparameter für Bildflugzeuge werden angegeben (Kraus, 1997):

- Langsamflugfähigkeit für großmaßstäbliche Befliegungen,
- hohe Reisegeschwindigkeit,
- hohe Steiggeschwindigkeit,
- hohe Endurance (max. technische Einsatzdauer),
- Kurzstart- und Landefähigkeit (STOL)
- Bordsauerstoff und Kamerafernbedienung bzw. Druckkabine wären erwünscht.

Aufgrund praktischer Erfahrungen und der allgemeinen Entwicklung in der Fliegerei stimme ich nur bedingt mit ihm und anderen Autoren darin überein, wonach ein Bildflugzeug aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus zwangsläufig IFR-tauglich sein müsse.

Die sich qualitativ nach unten abzeichnende „Markterweiterung“ um kleine lokale Präzisionsfluggeräte benötigt für ihre operativen Umweltmonitoringaufgaben über ausgewählten Regionen im näheren Umkreis vom Stationierungsort lediglich Fotoflugwetterlagen mit einer zeitlichen Fensterbreite von etwa 1 - 3 Tagen, um neue Bildblöcke einzusammeln. Mit neuen, kleinen UL-Flugzeugen sind zwei Tankreichweiten für die Messfliegerei groß genug. Das entspricht je nach Fluggerät etwa 300 - 2000 km. Größere Verlegungsaktionen erfolgen wegen der raschen Abrüstbarkeit von solchen Flugzeugen mittels Straßenanhänger bzw. Seecontainer über beliebige Distanzen hinweg. Dies gilt besonders für ultraleichte Konstruktionen, von denen man auf dem Weltmarkt heute über 550* sehr unterschiedliche Typen finden kann. Druckkabinen sind hierbei nicht erforderlich. Instrumentenflugtauglichkeit kostet in dieser Klasse am meisten, ist jedoch aufgrund der Bauweise und des primären Konstruktionszwecks des überwiegenden Anteils dieser Flugzeuge nur bedingt sinnvoll. Darüber reduziert sich der Kriterienkatalog auf die Hälfte, und der zu erbringende Kostenaufwand auf einen Bruchteil. Bezieht man diese Betrachtungsweise in die Investitionsplanung mit ein, und berücksichtigt man die Einsparungen, die sich durch Verzicht auf hochqualifiziertes IFR-Personal ergeben (siehe Tabelle), wird deutlich, dass sich vollständig integrierte Messflugzeuge inklusive Luftbildaufnahmesystem auf etwa 1/2 bis 1/20 (je nach Feingliederung der verwendeten

* Guter Recherche-Ausgangspunkt: Flügel-der-Welt-Katalog; Erscheinungsweise: jährlich; liefert umfangreiche Materialsammlung zu Themen wie Gleitschirme, Motorschirme, Trikes, UL-Segelflugzeuge, fußstartfähige Gleiter, UL-Fertigflugzeuge, UL-Baukastenentwürfe (Kits), UL-Plannachbauten und maßstäbliche Repliken historischer Muster sowie UL-Helikopter und Autogiros. Dem Verfasser standen die Ausgaben 1994, 1996/97, 1998/99, 2000/01, 2001/02, 2002/03 und 2005/06 zur Verfügung. Aufgrund des Inhaltsreichtums enthalten die Ausgaben beinahe schon legendäre Zuordnungsfehler von Bild- und Textdokumentationen verschiedener Flugapparate.

Kostenschlüssel und Ausbaustufe der verglichenen Systeme) gegenüber konventionellen Investitionskosten reduzieren lassen.*

Bezeichnung	Berechtigt zum Führen von:	Geschätzter Kostenaufwand für den Erwerb [EUR]
PPL-F [Private Pilot's License; wobei „F“ das sog. <i>Beiblatt</i> darstellt]	Gleitsegeln (Gleitschirmen)	1.000 bis 3.000
PPL-C	Segelflugzeugen	1.000 bis 3.000
PPL-B	Motorseglern	4.500 bis 6.000
PPL-A	Motorflugzeugen	7.000 bis 14.000
CPL [Commercial Pilot's License]	LFZ im gewerblichen Betrieb (je nach Type-Rating – d. h. nach spezifischer Mustereinweisung).	15.000 bis 25.000
CPL – IFR [CPL + Instrument Flight Rating]	LFZ im gewerblichen Allwetterflug-Betrieb (Instrumentenflug)	25.000 bis 60.000
ATPL [Air Traffic Pilot's License]	Verkehrsflugzeugen	50.000 bis 143.000

Fig. 197 Fluglizenzen und geschätzte Aufwendungen für deren Erwerb; aus: (Winkler, 2000, unveröff.) – aktualisiert: 2004; beachte: Die tatsächlichen Bezeichnungen und Ausbildungspfade sind trotz neuer Ausbildungsrichtlinien (JAR – Joint Aviation Regulation) in der Praxis wesentlich komplizierter und unübersichtlicher. Die Preisdifferenzen werden nach oben hin immer größer, weil dort die sog. LFZ-Mustereinweisung (Typerating) eine immer größere Rolle zu spielen beginnt. Die vorgeschriebene Pilotenerfahrung wird zwar auf Flugstundenbasis normiert, aber größere, komplexe Flugzeuge verursachen sehr unterschiedliche Betriebskosten.

Die in obiger Tabelle angeführten Kosten schrecken ab. Besonders, wenn man aus professionellen Kreisen vernimmt, dass der CPL heute allmählich an Stellenwert einbüßt. Die großen Luftfahrtbetriebe stellen bevorzugt ATPL-Kandidaten ein, denn damit liegen die Unternehmen langfristig und personalpolitisch betrachtet stets auf der sicheren Seite. Es entsteht ein Lückeneffekt zwischen ATPL und CPL. Diese Qualifikationsspirale ist eng an die Technologiekurve gekoppelt. Es ist allerdings für Umwelteinrichtungen nicht gewinnbringend, direkt in die höchsten Klassen einzusteigen, solange die Vorteile von operationeller Umwelterkundung nicht klar sind. Wenn es sich um langfristige Infrastrukturplanungen mit hohen Anschaffungskosten handelt, ist es weitsichtig, zunächst in einem unteren Bereich der Kostenkurve einzusteigen.

Die interessantesten Ansätze und Entwicklungsimpulse kommen heute im (Sport-)Flugzeugbau aus der UL-Szene[†]. Die Möglichkeiten, die sich hier in zunehmendem Maße bieten, sind so vielfältig, dass alleine deren Aufzählung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Beispielhaft hier nur eine der grundlegendsten deutschen Neuentwicklungen der letzten Jahre, die „Silence Twister“, die derzeit von DG-Flugzeugbau gebaut und vertrieben wird.

* Dies ist eine statische Betrachtung: Dabei werden die reinen Systemkomponentenpreise betrachtet. Entsprechende Aufwendungen für das Integrieren dieser Messtechnik ist hier nicht enthalten und führt zu einer teilweisen Auflösung der Vorteile.

† Offizielle EU-Legislativ-Nomenklatur: „Microlight“ (ML), allerdings im allg. Sprachgebrauch noch nicht verankert; im französischen Sprachgebrauch „ULM“ (Ultra Legere Moteur). Die Marktdynamik ist anhand der noch immer unruhigen Normgebung unverkennbar.



Fig. 198 Silence in Steilflugkurvenlage (Quelle: <http://www.silence-aircraft.de>, 2005)

Die Silence ist insofern einzigartig, da das Flugzeug aufgrund seiner Neukonzeption mehrere technische Innovationen mit einem zeitlosen Design vereint. Das Flugzeug verfügt über einen Glasfaser-Kevlar-Rumpf in Monocoque-Bauweise. Die Zelle besteht vollständig aus Waben mit einer nur zehntel Millimeter dünnen Außenhülle, so dass das Gewicht des gesamten Flugzeugs ohne Motor und Cockpitausbau nur 60 kg beträgt! Primär werden Wankeltriebwerke eingesetzt, die einen leisen und vibrationsarmen Lauf garantieren sollen (allerdings bei höherem spezifischem Kraftstoffverbrauch) und durch die schlanke Bauform die aerodynamisch wirksame Stirnfläche des Rumpfes verringern. Reichweite: 1300 km. Flügelspannweite: 7,5 m. Höchstgeschwindigkeit: 300 km/h. Abreißgeschwindigkeit: 80 km/h.

Steigleistung: 8,5 m/s. Höchstzulässiges Abfluggewicht: 340 kg. Fahrwerk: elektrisch einziehbar. Die konstruktive Auslegung der Flügel-Rumpf-Struktur bedingt hervorragende aerodynamische Leistungen. Das Flugzeug vereint konstruktiv einige der wesentlichen Merkmale der schnellsten Flugzeuge der 40er und 50er Jahre des 20. Jh. Die durchgehend runde Linienführung lässt Einflüsse einer ganzen Reihe von Vorbildern erkennen, am prominentesten darunter die britische Supermarine „Spitfire“ – wie auch die Entwickler selbst angeben. Es liegt nahe, dass der Grund für diese Patenschaft darin begründet ist, dass sich das ursprüngliche Entwicklerteam aus professionellen Modellflugsportlern zusammensetzte. Dieses Flugzeug ist deshalb geradezu ein Paradebeispiel, wie sich technisch Vergangenes in Gegenwärtigem in einem unaufhörlichen Wandlungsprozess bestätigt, wiederholt und optimiert.

Ellipsoide Tragwerksgeometrien wurden allgemein im Flugzeugbau der Nachkriegsära aufgrund von Wirtschaftlichkeitserwägungen trotz der aerodynamischen Überlegenheit gegenüber anderen Bauformen (geringerer induzierter Widerstand*) lange Zeit nicht verbaut. Die Fertigungskosten für den Formenbau ellipsoider Flügel sind sehr viel höher als diejenigen für trapezoide Flügel. Es ist leichter, über 5 m Länge auf einem Positivmodell eine gerade Profilkante einzustraken, als über einer nicht rechteckigen Fläche sowohl in x-, als auch y-

* Induzierter Widerstand entsteht bei bewegten Flügelprofilen durch Randwirbelbildung infolge der Druckverhältnisse zwischen Flügelober-/und -unterseite (Verhältnis ca. 2/3 Sog zu 1/3 Druck). Es gilt: Je kleiner der Randwirbel, umso kleiner der resultierende Widerstand, umso leistungsfähiger der Tragflügel. Die Erfahrung zeigt: Flügel mit großer Spannweite gegenüber der Flügeltiefe (einer „großen Streckung“) besitzen besonders gute Wirkungsgrade. Das ist der ursächliche Zusammenhang für die großen Flügelspannweiten von Segelflugzeugen.

Richtung stetige Oberflächenkrümmungen zu erzeugen. Allerdings bewegt sich die Sportfliegerei überwiegend in einem Geschwindigkeitsbereich, in dem solche Effekte noch nicht spürbar zu Buche schlagen. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf die VFR-Geschwindigkeitsgrenze unterhalb FL100 von 250 kts IAS verwiesen.

Die „Silence“ wird – wie viele andere der UL-Klasse – aus preispolitischen Gründen auch als sog. Baukasten („Kit“) angeboten. Dabei wird das komplette Flugzeug in Einzelteilen ausgeliefert und der Flugzeugeigentümer übernimmt den Zusammenbau in Eigenverantwortung.



Fig. 199 Silence-Kit (Quelle: <http://www.silence-aircraft.de>, 2005)

Eine kurze, willkürlich zusammengestellte Liste von weiteren ULs, bei denen sich ein näherer Blick bezüglich der Verwendung für Umweltmessflugaufgaben anbietet:

Hersteller	Typ	Bemerkungen
B & F	FK12 Comet	Doppeldecker mit ungewöhnlich hoher Reisegeschwindigkeit: 180 km/h. Ein- oder zweisitzig.*
B & F	FK 14 B	Komposit-Tiefdecker V_{Reise} : 250 km/h.
B & F	FK 9 Mark IV	Abgestrebter Hochdecker, auch Utility-Version mit größerem Cockpit, Fenstern etc.
Bella Aviation	Shadow E Series	Bereits mehrfach für Fotoflugaufgaben und geophysikalischen Messflug (Südafrika) eingesetzt. Gute Flugleistungen, angeblich jedoch laut.

* Laut UL-Definition existieren nur höchstens zweisitzige Flugzeuge.

DAR	DAR 21 Vector S	Abgestrebter Ganzmetall-Hochdecker. Tandemsitzer. Gute Panoramasicht nach unten.
Fläming Air	Saphir	Fläming Air arbeitet derzeit auch an einem neuen Motorkonzept und ist Importeur für den Lambada (s. u.).
Flight Design	CT 2K	Schneller, freitragender Hochdecker mit geräumigem Cockpit.
Impulse	Impulse 100/td	Tiefdecker mit starrem Fahrwerk, Side-by-Side-Cockpit und Rundumsichthaube. „td“ verweist auf Spornradfahrwerk.
Oskbes Mai	Aviatika- Mai-890	Russischer UL-Doppeldecker, „SH“-Variante, speziell für Agrarflug.
Remos	G3 600	Abgestrebter Hochdecker, sehr gute Verarbeitung.
SAI	G 97 Spotter	Italienischer Ganzmetall-Hochdecker mit Druckschraube und Rundumverglasung, speziell für Beobachtungsflug ausgelegt. Gute Langsamflugeigenschaften.
Servoplant	Aerocraft	Rumänisches Agrarflugzeug mit sehr hoher Nutzlast (MTOW: 540 kg).
Sky Arrow	Sky Arrow 450 TG	Italienischer Hochdecker mit guter Rundumsicht und Side-Stick. Fliegt auch für US-Wetterdienst als in-situ-Messflugzeug.
Urban Air	Lambada	UL-Motorsegler mit 13 oder 15 m Spannweite.
WD Flugzeugbau	Fascination	Der deutsche Klassiker unter den Hochleistungs-UL (v_{\max} : 290 km/h, Einziehfahrwerk); W. Dallach* revolutionierte den UL-Flugzeugbau hierzulande mit diesem Entwurf, der Tiefdecker erschien fast zeitgleich zum französischen MCR01; auch als VLA mit 650 kg MTOW erhältlich.
WD Flugzeugbau	Sunwheel D3	Robuster Tandem-Doppeldecker mit Kunstflugpotenzial.
WD Flugzeugbau	Evolution	Kunststoffhochdecker mit Einziehfahrwerk.
Zenith	Zodiac CH 701	Abgestrebter Hochdecker mit Vorflügeln und Junkers-Klappen.
Zenith	STOL CH 601 UL bzw. XL	Ganzmetall-Tiefdecker.
Zlin	Savage	Piper J3-Klon aus Tschechien.

Fig. 200 Einige erwähnenswerte deutsche und internationale UL-Flugzeuge

Die erfolgreichsten modernen UL-Flugzeuge folgen jeweils demselben Grundschema: freitragender Tiefdecker mit Bug- oder Spornfahrwerk, Zellenstruktur aus GFK/CFK, geräumiges Side-By-Side-Cockpit mit großer Kuppelhaube ohne Verstrebungen, ein Vierzylinder-Boxer als Antrieb (typischerweise Rotax 912) und eine „elegante, geschwungene Linie“, die sich durch die gesamte Konstruktion zieht. In Abhängigkeit von

* Wolfgang Dallach spezialisierte sich als ehemaliger Wettbewerbs-Kunstflieger auf den Ultraleichtbau und legt bei seinen Konstruktionen Wert auf hohe Robustheit. Walter Extra blickt als Flugzeugbauer ebenfalls auf eine Karriere als Kunstflieger zurück, hat sich jedoch ausschließlich auf die Produktion von Hochleistungs-Kunstflugzeugen (z. B. „Extra300“) und Geschäftsflugzeugen auf einen weltweiten Nischenmarkt konzentriert.

der Zulassungsart und der Zielgruppe ergeben sich noch Modifikationen, wie beispielsweise ein Einziehfahrwerk^{*}, interne Zusatztanks, Glascockpit[†] etc.

Für einen Laien sind daher Flugzeuge Muster MCR01, Fascination, Impulse und eine größere Anzahl von Konkurrenten (Dynamic WT9, Faeta 321, Zephyr 2004C, Vega3000, FK14B, Toxo ULM, Breezer, Esqual VM1, Revenge, Saphir, TL Sting Carbon usw.) nur schwer zu unterscheiden. Die Unterschiede lassen sich durch die „inneren Werte“ feststellen. Das Problem hierbei ist, dass wir heute eher ein Auswahlproblem denn ein Machbarkeitshindernis vor uns haben. Man braucht sehr lange, um sich einzuarbeiten, um die Flugzeuge auf diversen Flugplätzen und Messen live miteinander vergleichen zu können, um die Ergonomie zu studieren und Designschulen voneinander abgrenzen zu lernen. Unverzichtbarer Kunstgriff ist es hierbei, die Blackbox „Flugzeug“ aufzulösen und einen Blick in sein Inneres zu wagen. Es können bezüglich der limitierenden Faktoren stets dieselben Muster angetroffen werden, wie wir sie als Endkunden der Konsum-Elektronik-Branche kennen: Auf bewährte Standards wird mit individuellen Schwerpunkten und Handschriften aufgesetzt. Das seit Jahrhunderten dringlichste Problem für die Luftfahrt sind die Antriebe. Das hat sich bis heute nicht geändert. Man erkennt recht schnell, dass Rotax-Antriebe für Flugzeughersteller heute eine ähnliche Bedeutung besitzen wie Piaggio-Motoren für Leichtkraftrroller auf der Straße. Dies ist ein simples Beispiel, weil so viele Ausnahmen die Regeln bestätigen. Um feinere Zusammenhänge zu erkennen ist jahrelange Beobachtung erforderlich – ein höchst subjektiver und darüber hinaus aufwendiger Prozess in einer Weltluftfahrt, die die Zeiten der Manufaktur angeblich seit Dekaden hinter sich gelassen hat.

Umso revolutionärer waren die UL-Flugzeuge, als sie von den USA nach Europa kamen und große Begeisterung hervorriefen: Zum Fliegen bedarf es eines Flügels mit einem Motor daran, einem offenen Rohr-Rumpfwerk und minimaler Instrumentenausstattung. Jeder sollte sich so ein Flugzeug leisten oder gar selber bauen können – das war die Erwartung, die sich damit verband. Jeder wollte dabei sein. Enthusiasmus regierte über wirtschaftliche Zwänge. Kaum jemand hat in der Anfangszeit bedacht, dass es in Deutschland durchaus unangenehm sein kann, wenn man im Hochsommer mit Skianzug auf einen unverkleideten „Drahtverhau“ klettert, um sich lärmend in die Lüfte zu erheben und dabei in 2000 m über Grund bei 10°C oder weniger Überlandflüge zu bestreiten. In den USA, einem Land mit einer 27-mal größeren Staatsfläche als Deutschland und einer Einwohnerdichte von 29 E*km⁻² (2001) gegenüber 231 E*km⁻² hierzulande, kann diese Ultraleichtflug-Idee völlig anders gelebt werden. Dort fliegt man einen Flugplatz an, indem man eine Meldung per Funk absetzt ohne auf Antwort zu warten. Dort fliegt man auch über Hunderte von Kilometern Überland in geringer Höhe, ohne eine Ortschaft direkt überqueren zu müssen. Es ist klar, dass bei solchen Verhältnissen die ursprüngliche Idee von Ultraleichtflugzeugen zu anderen Ausprägungsgraden geführt hat als in Europa. Ein „Airbike“, wie einer dieser vielen gemachten Entwürfe in Richtung Fahrrad verweist, kann sich hier also nur ungleich schwerer durchsetzen.

Deswegen bestehen die Leistungen der Alten Welt üblicherweise mehr in Detailverbesserungen, die für hohe Fluggeschwindigkeiten, größere Reichweiten und

^{*} Einziehfahrwerke führen zu etwa 18 % weniger sog. Formwiderstand bei einem Flugzeug!

[†] Mit dem Begriff „Glascockpit“ umschreibt man den Versuch, alle flugrelevanten Größen (Navigation, Motorüberwachung etc.) auf möglichst wenigen Displays im Cockpit unterzubringen, also die Anzahl der „Uhren“ systematisch zu verringern.

sparsamere Fluggeräte nützlich sind, während man in den USA, nicht zuletzt vor einem gänzlich anderen kulturellen Wertegebäude, das durch die calvinistischen Einflüsse eine stärkere Individualisierung begünstigt, ein etwas liberaleres Experimentierumfeld vorfindet. Seit Einsetzen der UL-Bewegung kristallisiert sich zunehmend der Trend heraus, dass in Deutschland konstruierte und angebotene Flugzeuge vermehrt in den östlichen Anrainerstaaten produziert werden (v. a. Polen, Tschechien und Rumänien sind seit jeher potente Flugzeugbauländer).

Diese Verlagerung der Produktionsstandorte liegt an den bekanntermaßen hohen Lohnnebenkosten des Wirtschaftsstandorts Deutschland. In der Fliegerei sind die Fähigkeiten zur Automatisierung aufgrund der verwendeten Komposit-Werkstoffe nur beschränkt vorhanden. Deshalb wirkt sich dieses Manko ungünstiger aus als beispielsweise innerhalb der Automobilindustrie und führt zu einer entsprechenden Benachteiligung des Flugzeugs. Die Automatisierung setzte bei Faserverbundwerkstoffen erst relativ spät ein. Die ersten Maschinen, die CFK-Rovings automatisch ziehen konnten, tauchten erst um die Jahrtausendwende auf. CFK-Rovings sind Faserstranglamine mit hoher Dichte (Harz-/Faser-Verhältnis). Aufgrund ihrer Eigenschaften erlauben es CFK-Lamine (gegenüber GFK oder anderen Fliegwerkstoffen), Tragflügel hoher Spannweite bei geringerer Profildicke zu erzeugen.* Dies ist ein maßgeblicher Faktor zur Widerstandssenkung, da der Luftwiderstand quadratisch von der Stirnfläche abhängt:

$$\begin{aligned} W &= c_w \cdot q \cdot F = \\ &= c_w \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2\right) \cdot F = \\ &= \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot v^2 \cdot F \end{aligned}$$

wobei: c_w : form- und strömungsabhängiger Widerstandsbeiwert
 q : Staudruck
 F : Körperstirnfläche (senkrecht zur Strömungsrichtung)
 ρ : Luftdichte
 v : Anströmgeschwindigkeit

Es gilt: doppelte Geschwindigkeit → vierfacher Widerstand → achtfache Antriebsleistung erforderlich!

Ein hypothetisches Beispiel zur Veranschaulichung: Nehmen wir ein durchgängiges Flügelprofil mit 18 m Spannweite, rechteckige Stirnfläche (modellhafte Vereinfachung!) mit konstant 25 cm Höhe (Profildicke = Holmhöhe[†] = Flügeldicke).

Profildicke [m]	Stirnfläche [m ²]	Anteil [%]
0,25	4,50	100

* GFK-Flügel gleicher Abmessungen würden entweder zu schwer werden oder zum gefürchteten Flattern im Schnellflug neigen.

† Flügelholme bilden das Rückgrat eines Tragflügels. Die Belastbarkeit der Holme entscheidet maßgeblich über die Fähigkeit des Flügels, die sog. „Luftkräfte“ aufzunehmen. Deshalb konzentrieren sich die Berechnungsgrundlagen für Tragwerksstatik hauptsächlich auf dieses Bauelement.

0,24	4,32	96
0,23	4,14	92
0,22	3,96	88
0,21	3,78	84
0,20	3,60	80
0,19	3,42	76
0,18	3,24	72
0,17	3,06	68
0,16	2,88	64
0,15	2,70	60

Fig. 201 Lineare Abnahme des Stirnwiderstandes bei Verringerung der Flügeldicke (hypothetisches Beispiel)

Deshalb sind CFK-Flügelholme ein werkstofftechnischer Optimierungspfad für die Erzielung aerodynamischer Güte eines Tragwerks. Es ist daher ein bedeutenderer Pfad, weil die Gesamtwiderstandsverteilung eines Flugzeugs grob gesprochen 40 % auf die Flügel, 20 % auf den Rumpf, und < 10 % auf das Leitwerk entfallen; bezogen auf SEP-Flugzeuge aus der Mitte des 20. Jh. (Meier, 2002). An einem Flugzeug gibt es viele solcher Pfade, die sich mehr oder weniger unabhängig voneinander betrachten lassen, wie sich anhand folgender Tabelle zu einer Flugzeuggesamt-Optimierung zeigen lässt:

Ursache der Erhöhung der Geschwindigkeit	Größe des Geschwindigkeitszuwachses v [km/h]
Verbesserung des Ansaugschachts des Schmierstoffkühlers	15
Verbesserung des Ansaugstutzens	2
Verbesserung der Fahrwerksverkleidung	6
Abdichtung des Rumpfes	5
Verbesserung der Auspuffrohre	2
Verbesserung der Spornradverkleidung	4
Anbringen von Spalten an den Rudern	4
Anbringen von Spalten an der Höhenflosse	3
Verbesserung der Oberflächenbearbeitung der Tragflächen	5
Verringerung des induzierten Widerstandes	4

Fig. 202 Klassische Aerodynamische Optimierungspfade anhand des russischen Jagdflugzeugs La-5 aus dem Zweiten Weltkrieg. Prinzipiell gilt die Unabhängigkeit der Optimierungslinien jedoch für jeden technischen Entwurf. Aus: (Meier, 2002)

Derzeit entwickelt sich der bislang nur aufwändig zu verarbeitende Werkstoff CFK, industrielles Massengut zu werden, wie folgende Belegstelle zeigt:

“Ein entscheidender Kostenfaktor bei der Herstellung von CFK-Strukturen ist der geringe Automatisierungsgrad des Herstellungsprozesses, da die geringe Steifigkeit von Kohlenfasermatten den Einsatz von Industrierobotern im Wege steht. Mit Hilfe eines neuartigen Bindemittelsystems ist es nun möglich, Fertigungsprozesse so zu gestalten, dass sich CFK-Bauteile im Automobilsektor betriebswirtschaftlich rechnen. [...] Im so genannten Resin-Transfer-Verfahren (RTM) müssen die für die Herstellung von CFK-Strukturteilen erforderlichen Kohlenfasermatten wegen ihrer geringen Steifigkeit vor dem Pressen manuell übereinander gestapelt werden. Erst dann können die Matten mit flüssigem Harz versehen und in der Form ausgehärtet werden.

Produktivität wird verdoppelt

Anwendungstechniker bei WACKER fanden nun eine Möglichkeit, wie sich die Taktzeiten in den Pressen drastisch beschleunigen lassen. Schlüssel zum Erfolg war

das Bindemittelsystem VINNEX®. Kern der neuen Bindemittelgeneration ist ein thermoplastisches und zugleich selbstvernetzendes Polymer. Nach dem Ansintern der Pulverkörnchen bei 170 °C und einem nachfolgenden Vorwärmenschritt wird nach der Ausformung der Matten im kalten Presswerkzeug eine Kohlefaser-Preform erhalten. Diese Preforms verfügen – dank des VINNEX-Bindemittelsystems – über eine ausreichende Steifigkeit, um sie mit Hilfe von Industrierobotern in das formgebende Werkzeug einzulegen und im RTM-Prozess weiter zu verarbeiten. Zusammen mit der hohen Reaktionsgeschwindigkeit bei der Selbstvernetzung trägt die Automatisierung entscheidend zur Verkürzung der Taktzeiten bei. Auch wenn sich die Wirtschaftlichkeit noch nicht in Euro und Cent kalkulieren lässt, rechnen Experten [...] in Abhängigkeit von der Komplexität der Strukturen mit einer annähernden Verdoppelung der Produktivität. [...] gehärtete Preforms zeichnen sich nicht nur durch geringere Herstellungskosten, sondern auch durch eine Reihe von verbesserten Materialeigenschaften aus. So lassen sich mit dem Bindesystem beschichtete Gelege und Gewebe problemlos zuschneiden und weiterverarbeiten. Ein besonderer Vorteil [...] tritt erst unter dem Mikroskop zutage. So werden punktuelle Bindungen überall dort geschaffen, wo sich Fasern treffen oder überschneiden. Makroskopisch wirken sich derartige Punktverbindungen in einer erhöhten Stabilität und einer drastisch verringerten Neigung zur Materialermüdung aus.“ (Froböse, 2003)

Erfasst dieser Trend die Flugzeugbaufirmen, könnten die Preise für aerodynamisch hochwertige Fluggeräte geringfügig sinken.

Aus der obigen aerodynamischen Widerstands-Formel kann indirekt eine weitere grundlegende Folgerung abgeleitet werden: Obwohl innerhalb der Atmosphäre die gasförmigen Luftbestandteile konstant sind (ca. 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff und 0,9 % Argon, Rest Edel- und Treibhausgase), nimmt der Partialdruck jeder Gaskomponente mit der Höhe ab. Die Abnahme des Gesamtdrucks ist über die ersten Höhenkilometer besonders groß: In 5500 m Höhe treffen wir nur noch etwa die Hälfte des Normaldrucks von 1013,2 hPa an.* Bei gleich bleibender Gemischaufbereitung (Ansaugvorrichtungen, Vergaserausführung etc.) von Verbrennungsmotoren kommt es daher durch abnehmenden Sauerstoffpartialdruck unvermeidbar zu Leistungseinbußen des Triebwerks.

Der grafischen Darstellung dieses Sachverhalts entnimmt man, dass in 7 km Höhe weniger als 50 % der ursprünglichen Triebwerksgesamtleistung verbleiben, um einem Flugzeug den notwendigen Vortrieb zu verleihen. Das Phänomen gewinnt schließlich eine noch tiefere Bedeutung, wenn man die übrigen Haupteinflussparameter, Lufttemperatur und -feuchte, in die Betrachtung mit einbezieht. Sie können eine so ungünstige Konstellation auf den Antrieb ausüben, dass im Extremfall (große Temperatur, große relative Luftfeuchte) weitere 10 - 20 % Leistungseinbußen bereits in geringeren Flughöhen auftreten.

* In dieser Höhe liegt bereits die Hälfte der Erdatmosphäre verursachenden Gewichtslast unter dem LFZ. In 20 km Höhe sind es bereits 90 %, und in 36 km 99 %. Jets mit Druckkabine bewegen sich bis etwa 12 km Höhe.

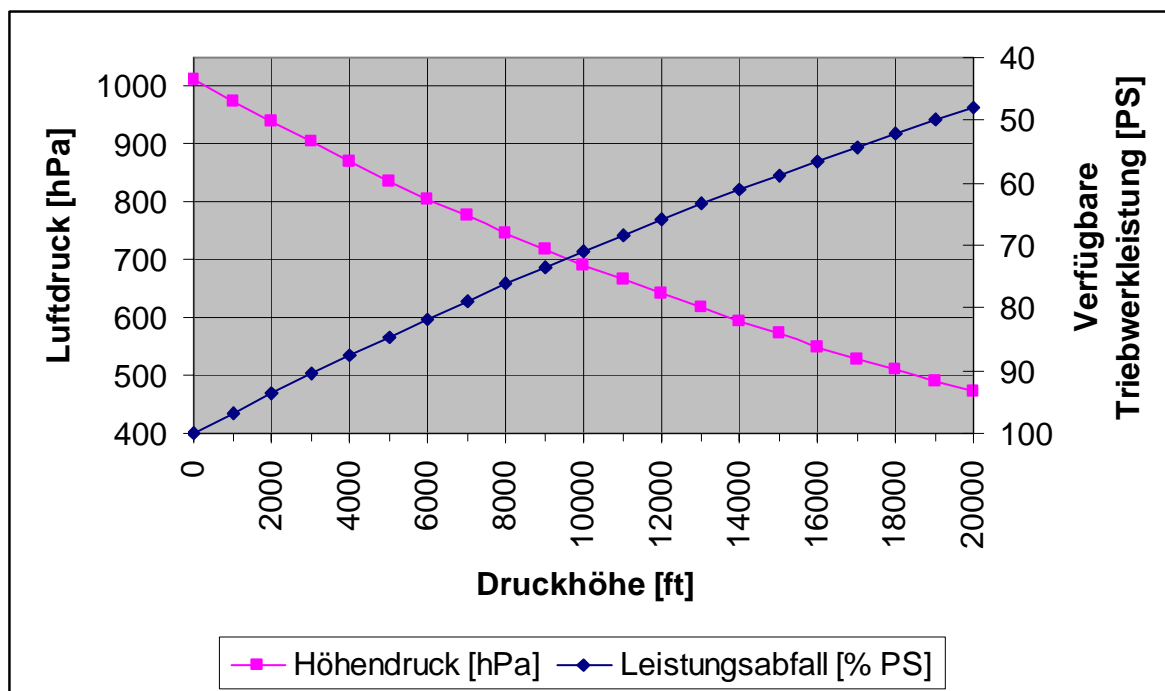


Fig. 203 Luftdichteabhängiger Leistungsverlust in der Normalatmosphäre (ISA); Luftdruckabnahme mittels barometrischer Höhenformel errechnet, Triebwerksdaten nach Lycoming* „Operator’s Manual“; in: (Kühr, 1995b)

„Die früher vertretene Ansicht, daß hohe Luftfeuchtigkeit auch die aerodynamischen Leistungen (Auftrieb und Luftschaubewirkungsgrad) stark beeinflußt, kann nicht länger aufrechterhalten werden. Versuche haben bewiesen, daß dieser Einfluß sehr gering ist.“ (Kühr, 1995b)

In der Summe bedeutet dies alles nichts anderes, als dass ein aerodynamisch günstigeres Flugzeug (große Flügelspannweiten durch hohe Streckung) unabhängig von seiner wahren Flughöhe spürbare Emissions- und Flugleistungs-Vorteile besitzt. Der Ausdruck „Druckhöhe“ besagt: „Höhe über dem 1013,2-hPa-Niveau“. Aus der Abbildung ist weiterhin zu entnehmen, dass die schon in früheren Kapiteln erwähnte VFR-Fluggrenze nicht nur mit der physiologischen Schwelle gekoppelt ist, sondern offensichtlich auch ein vernünftig gewähltes Kompromissmaß darstellt, das auf Wirtschaftlichkeitsüberlegungen beruht (10 000 ft → „nur“ 25 % Leistungsverlust).

Nun zur eigentlichen Verknüpfung zweier qualitativ völlig unterschiedlicher Fakten, aus der sich eine bedeutende Schlussfolgerung ableiten lässt: Segelflugtragwerke weisen geringeren Widerstand auf und die Motorenbasis ist marktweit relativ homogen – damit stellt der Motorsegler die geeignetste konstruktive Ausgangsbasis für Fluggerät dar sofern die vorhandenen Triebwerke darauf verwendet werden können. Auf diese Weise entsteht ein Flugzeug, das einerseits geeignet ist, in große Höhenbereiche vorzudringen und andererseits in niedrigen Flughöhen unter geringeren Emissionen zu operieren. Anders formuliert: Motorsegler besitzen ab dem Moment ein deutlich größeres Leistungsspektrum, ab dem sie aufgrund ihrer Antriebe und aerodynamischen Auslegung in Geschwindigkeitsbereiche

* Die Fa. Lycoming stellt die Standardtriebwerke für konventionelle Motorflugzeuge her (typ. hubraumstarke 6- und 8- Zylinder-Boxermotoren mit 100 bis 350 PS).

vordringen, die mit herkömmlichen Motorflugzeugen konkurrieren können. Das ist der Kerngedanke bei der Entwicklung von leistungsfähigen Umweltmessflugsystemen. Langfristig wird der Motorsegler aufgrund seiner technologischen Vorzüge gewinnen.

Derzeit liegt die maximale Reisegeschwindigkeit für Reisemotorsegler schätzungsweise 100 km/h unter der von Motorflugzeugen. V. a. Flugzeuge vom Typ Stemme sind jedoch prädestiniert, mittelfristig in die Leistungskategorie von Motorflugzeugen einzubrechen. Dieses Potential war bereits mit dem ersten großen Firmenentwurf vorhanden: Für C172 und C152 können wir eine Reisegeschwindigkeit zwischen 120 und 105 kts veranschlagen. Eine „S10VT“ hingegen fliegt auf Meeresspiegelniveau 228 km/h (123 kts) schnell und liefert immer noch 180 km/h (97 kts) bei nur 55 % Powersetting und besitzt dabei eine Reichweite von 1320 km.



Fig. 204 Stemme S10-VT über Berlin; (Quelle: Foto: A. Deffner; Firmenserver: www.stemme.de, 2005)

Die Flugleistung des Hochdecker-Motorseglers „S8“ mit starrem Propeller wird derzeit auf über 250 km/h projiziert. Mit der S10 wurden mehrere Streckenflugweltrekorde in den Anden geflogen. Zwischen 1999 und 2003 hat der Deutsche K. Ohlmann mit einer Stemme S10-VT zwischen 1309 km und 3008 km im sog. Wellensegelflug zurückgelegt („Mountain Wave Project“ begleitet und unterstützt durch OSTIV, der «Organisation Scientifique et Technique du Vol à Voile» – einer Vereinigung, die seit 1948 existiert)*. Mit ihrer besten Gleitzahl $E = 50$ verliert eine S10 bei 107 km/h nur 0,56 m/s im Segelflug. Aus 1 km Höhe ergibt sich eine gestreckte Gleitflughahn von 50 km! Das Besondere der Stemme-Umweltmessflugreihe†: Selbst wenn man zwei Außenlastbehälter unter die Flügel hängt, erreicht ein mit Sensorik ausgestattetes Flugzeug noch immer ein Gleitverhältnis von etwa 1 : 30. Dieser Wert entspricht der durchschnittlichen Segelflugzeugleistung, wie sie heute bei den meisten geflogenen Kunststoffsegelflugzeugen im Vereinsbetrieb angetroffen wird.

* Die OSTIV ging hervor aus der 1930 gegründeten ISTUS (Internationalen Studienkommission für den motorlosen Flug)

† Das Antriebskonzept in Verbindung mit der überragenden Aerodynamik ist die eigentliche Innovation. Es werden im Gegensatz zu miniaturisierten Klapptriebwerken serienmäßige 4-Zylinder-Boxer-Triebwerke (z. B. Rotax 912) verwendet, wie sie für ultraleichte Motorflugzeuge genutzt werden. Die S-10 geht in direkter Linie auf den 35 Jahre alten Entwurf „Calif A-21“ zurück (produziert von Caproni Vizzola, dem ältesten italienischen Segelflugzeughersteller, gegründet 1910). Die Calif A-21 hatte bei 20,38 m Spannweite eine max. Fluggeschwindigkeit von 255 km/h und ein min. Sinken von 0,6 m/s bei 85 km/h. Angaben aus: Jane’s Aircraft Directory, 1975 - 76).

Man kann solche Werte mit historischen Zeitreihen zur aerodynamischen Güte von Flugzeugbaumustern vergleichen. Eine besonders homogene ist die umfangreiche Sammlung technischer Daten von polnischen Segelflugentwürfen des Betriebs Szybowcowy Zakład Doświadczalny (SZD).

Baujahr	Typ	Vmax	E
1951	SZD-8 Jaskolka (Schwalbe)	250	25,4 bei 80
1952	SZD-9 Bocian (Storch)	200	25,4 bei 80
1958	SZD-22 Mucha Standard (Fliege)	250	27,8 bei 75
1960	SZD-24 Foka (Robbe)	260	34 bei 84
1971	SZD-37 Jantar (Bernstein)	250	43 bei 100
1972	SZD-43 Orion	250	40 bei 92
1976	SZD-50 Puchacz (Uhu)	215	30 bei 80
1991	SZD-54 Perkoz (Haubentaucher)	260	35 bei ?
1991	SZD-59 Acro	280	40 bei 124
1993	MDM-1 Fox	293	30 bei 125

Fig. 205 Flugleistungsübersicht bekannter polnischer Segelflugzeuge. E ist die Gleitzahl bei x km/h; (Quelle: <http://www.piotrp.de/SZYBOWCE/dszd.htm>, erstellt und bearbeitet von Piotr Piechowski)

Ergänzend zur obigen Tabelle folgende Anmerkungen: Bei den Flugzeugtypen Bocian, Foka, Jantar und Puchacz spreche ich aus der persönlichen Erfahrung; diese Flugzeuge werden noch immer eingesetzt. Zweitens ist der „Fox“ seit einem Jahrzehnt eines der leistungsfähigsten Segelkunstflugzeuge der Welt*. Zudem wird von E. Marganski eine Weiterentwicklung zum Moto-Fox namens „Malgosia“ betrieben:



Fig. 206 Moto-Fox Experimentalflugzeug von E. Marganski; (Quelle: <http://www.piotrp.de/SZYBOWCE/dszd.htm>, 2005)

Mit zunehmender Flughöhe kommt die aerodynamische Güte eines Flugzeugs zum Tragen, mit abnehmender Flughöhe die Emissionsminderungen bei vergleichbaren Flugleistungen. Diese Flugzeugklasse hat einen Namen: Reisemotorsegler (Touring-Motorglider, „TMG“).

* Der Fox ist das erste Segelflugzeug, das auch doppelsitzig uneingeschränkt für Vollkunstflug zugelassen wurde. MDM steht für die Produktionsgesellschaft Marganski – Dunowski – Makula. Der Konstrukteur Edward Marganski hat auch den Swift entwickelt.

Die oben geschilderten Zusammenhänge erklären, warum der Motorsegler das heimische Technikerherz so sehr erfreut. Sie zeigen ebenfalls auf, warum hochfliegende Langstrecken-Aufklärungsflugzeuge wie Segelflugzeuge aussehen.*

Warum emissionsarme Motorsegler für den Umweltmessflug bislang noch nicht eingesetzt wurden hat den einfachen Grund, dass die Ingenieure aus dem Bildmessflugbereich diese Plattformen für sich noch nicht nutzen konnten, da bislang die Sensorik um eine ganze Größenordnung zu schwer dafür war. Diese Beschränkung ändert sich erst mit der Konversion und Adaption der ursprünglich militärischen faseroptischen IMUs und deren Verbund mit kleineren und leichteren Sensoren. Deshalb markiert historisch betrachtet

- der Werkstoff „Kohlefaser“
- die rechnergestützte, optimierte Konstruktion von aerodynamischen Leistungsflugzeugen,
- leichte verbrauchsarme UL-Triebwerke und
- Anwendungen wie die Heimesplattform

einen Ausgangspunkt für eine grundlegend neue Art der Umwelterkundung mittels Flugzeugen.

Wir können daher in einer Zwischenbilanz aus der umfangreichen historischen Analyse heraus eine sinnvoll erscheinende Schnittmenge für den künftigen Gesamtrahmen von wissenschaftlichen, luftgestützten Umweltmonitoringprogrammen aufspannen: Dem allgemeinen Schema folgend benötigen wir für die vier Tragsäulen eines Messflugsystems:

Komponente	Ausrüstung	Kenndaten	Bemerkung
Flugzeug	Reisemotorsegler (TMG)	15 - 22 m Spannweite, Rotax-Standard-Leichtflugzeugtriebwerk (4-Zylinder-Boxer), Starrer Propeller, 1000 km Reichweite, Dienstgipfelhöhe 20 000 ft Gleitzahl ca. 30	z. B. Diamond Aircraft, Stemme, Grob etc.
Flugführung/ Navigation	INS/(D)GPS- Flugführungssystem, Miniaturbordrechner mit Touchscreen und	Ca. 0,5 m Absolutpositions- genauigkeit, IMU: 0,01° Nadir	Miniaturisierte Heimesplattform weltweit als Vorläufer einer

* Das strategische Höhenaufklärungsflugzeug U-2 lässt sich in direkter Linie auf die größtenteils realisierten Entwürfe DFS 228 (4,1 t schweres Segelflugzeug für Flughöhen bis 25 000 m, Druckkabine (!), ein Dutzend gebaut, 1941), DFS 346 (Flüssigraketentriebenes Segelflugzeug mit Pfeilflügeln - 2 x Raketentriebwerke „HWK109-509 B1“ zu je 2000 kp Schub – rechnerisch bis 2270 km/h und H_{\max} 30 500 m; Spannweite: 8,98 m; Masse unbekannt; Druckkabine; Prototyp 1945) und DFS 582 (2,9 t schweres, düsenbestücktes, ein- oder zweisitziges Stratosphärenflugzeug mit 30 m Spannweite, Nachkriegsentwurf) zurückführen. (DFS: Deutsche Forschungsanstalt für Segelflug). Angegebene Gleitstrecke für die DFS 228: von 12 000 m bis Bodennähe 315 km (Eyer mann, 1963) $\rightarrow E = 315/12 = 26,25$; E (DFS582) = 34,8 bei 114 km/h. Man vergleiche diese Angaben mit den im Text angegebenen Leistungswerten zu Motorseglern und Segelflugzeugen! Weitere Besonderheit: Die beiden ersten Flugzeuge wurden in liegender Position gesteuert.

	Standard-Schnittstellen (USB, Firewire, WLAN etc.), Stabilisierung (kreiseltgeregelte Plattform)	Lageregelung mit 0,1° Nadir	ganzen Generation neuer Anwendungen
Sensorik	Computergesteuerte (D)GPS gestützte Digitalkamera für Schräg- und Vertikalaufnahmen	12 - 21 Mio. Pixel Auflösung, KB oder MF, Mindestbildfolgezeit ca. 2 - 5 s, Speicherkapazität für 500 Bilder	
Bodengestützte Auswerteschiene	Modulares Standardprodukt aus der Geoinformatik-Industrie auf PC-Basis (GIS + FE + CAD); Photogrammetrie-Flugplanung; Standrechner + Notebook	Handelsüblicher PC (evtl. Dualprozessor-Mainboard, IDE-Hardware-Raid) leistungsfähige Graphikkarte (evtl. Dualhead), 21“-Monitor	

Fig. 207 Allgemeines Ausrüstungsschema für Umweltmessflugsysteme zu Beginn des 21. Jh. (aus historisch-technischer Dimensionsanalyse abgeleitet)

Die Flugzeuge, auf denen heute zu großen Teilen die dezimierten Messflugzeugflotten basieren, sind größtenteils technologisch veraltet. Bislang existieren dagegen Umweltfirmen nur singular, die Motorsegler als Hauptarbeitsgerät einsetzen. Die Schweizer Firma „MetAir“ besitzt diesbezüglich für ganz Europa eine herausragende Marktposition.

Die Idee hochwertige und spezifisch angepasste Flugzeuge als Arbeitsgerät für Monitoringaufgaben einzusetzen ist nicht neu. Bislang behinderten jedoch hohe Ausrüstungsgewichte von Sensorkomponenten die Verbreitung dieser Einsatz-Plattformen. Neben dem technischen Grund gibt es auch Einflussfaktoren, die wirtschaftliche Interessen tangieren. Am besten lässt sich ein solcher struktureller Bruch an einer weiteren aeronautischen Singularität aufzeigen: dem Flugzeugtyp „EA7 Optica“ des britischen Konstrukteurs John Edgley zu Beginn der 80er Jahre. Dabei handelte es sich um ein in herausragender Weise an den beabsichtigten Verwendungszweck angepasstes Motorflugzeug: Die Optica war in einer bis heute nicht mehr erreichten Vollkommenheit für die luftgestützte Beobachtung ausgelegt. Sie konnte langsam fliegen, ermöglichte eine bis dahin unbekannte Rundumsicht für eine 3-köpfige Besatzung und stellt den bis dato ungebrochenen Weltrekord in punkto Lautlosigkeit.

Fig. 208 Edgley EA7 Optica; Foto: M. Blott;
(Quelle: www.strangecosmos.com, 2005)



Die konstruktive Überlegenheit resultierte aus der Synthese zweier einzigartiger Merkmale: Anstelle eines normalen Flugzeugcockpits verwendete man erstens eine „handelsübliche“ Hubschrauber-Vollglaskanzel, und zweitens entstand mit der Optica eines von bislang zwei bekannten Mustern mit (5-blättrigem) „Impellerantrieb“, also einer Luftschraube, die ähnlich dem Mantelstromprinzip von Jet-Triebwerken in einer ringförmigen Verkleidung vom vortriebberzeugenden Luftstrom umgeben wird.

“This would make the aircraft very useful in the fields of: police and frontier patrol; pipeline and powerline inspection; forestry and coastal patrol; film, TV and press reporting; and touring. [...] The considerable flap area gave the Optica STOL capabilities and it could be operated from soft ground. The low wing load with pre-set flaps and low stalling speed permitted operations at very low speeds [92 km/h Loitering Speed, Anm. d. Verf.], with an endurance of up to nine hours. The airframe of the first prototype was constructed in a London workshop, moved to Cranfield for final assembly and flew for the first time in the hands of Angus McVitie on 14 December 1979. Powered by a 160 hp O-320-32B engine, the aircraft was registered as G-BGMW with the c/n EA7/001. Production was started at Old Sarum, Salisbury, Wiltshire, and the Optica was certified by the UK Civil Aviation Authority on 12 February 1985. The first two production aircraft were delivered to Air Foyle in March, one of those, G-KATY (c/n EA7/004), was leased to Britain’s Hampshire Constabulary on 14 May 1985 for trails. Unfortunately it crashed the following day, killing both crewmembers; evidence of mechanical or structural failure was not found. In October 1985 the company went into receivership with 6 aircraft completed, 16 sold and 4 in various stages of production. In December a new company, Optica Industries, was formed to enable production to continue. The Optica received 46 refinements, from wing fences, upward curved wingtips to new door locks, and was certified for IFR flight. This all lead to a change in designation, sales calling it the Optica Mk. 2, but officially known as OA7 Series 300. Despite all improvements sales and production progress was slow. On 16 January 1987 the factory was hit by an arson attack [Brandstiftung, Anm. d. Verf.], destroying all final production jigs*, and 8 completed Optica’s, only the pre-production aircraft survived. Within a month the company changed its name to Brooklands Aircraft [...] and was subsequently taken over by FLS Aerospace (Lovaux) Ltd. In 1992 an agreement was made with Utva in Yugoslavia for subcontracting and final assembly of the aircraft.”; Autor: Joh. Visschedijk; (Quelle: www.1000aircraftphotos.com, 2003)

Type	three-seat observation aircraft
Engine	210 hp Avco Lycoming TIO-360 flat four-cylinder engine

* Das eigentliche Produktions-Kapital eines Flugzeug-Herstellerbetriebs sind die Formen zum Anfertigen der Flugzeugteile (Rumpf, Flügel, etc.). Merke: Flugzeugbau ist Formenbau!

Span	39 ft 4 in (11.99 m)
Length	26 ft 9.25 in (8.16 m)
Height	6 ft 3.5in (1.92 m)
Wing area	170.5 sq.ft (15.84 sq.m)
Empty Wt	1,875 lb (851 kg)
Max T/O Wt	2,725 lb (1,236 kg)
Max speed	126 mph (203 km/h)
Loiter speed	57 mph (92 km/h)
Max climb	720 ft (219 m)/min
Ceiling	14,000 ft (4,267 m)
Range	737 ml (1,186 km)

Fig. 209 EA-7 Optica; Technische Daten (ebd.)

Hiermit wird deutlich, dass nach 6 Jahren Entwicklungszeit einem offenbar sehr guten Flugzeug aufgrund eines Absturzunglücks der Sprung in die von Herstellern oftmals angestrebte Kategorie „Behördenfahrzeug“ versagt blieb. So etwas kann passieren – das ist Pech. Nachdenklich stimmt jedoch die zitierte Brandstiftung im Kontext mit einer vertiefenden Betrachtung der „Geschichte der Luftpolizei“ (Schilling und Rettinghaus, 1994). Seit 1962 sei der Polizeihubschrauber nicht mehr aus dem Alltagsdienst wegzudenken. Andere Länder wie Großbritannien, Kanada oder Frankreich hätten schon vor 1954 Hubschrauber in größeren Stückzahlen für einen Dienstflugbetrieb bereitgestellt. Der Hubschrauber habe sich „aufgrund seiner besseren Übersichtsposition zu einem unverzichtbaren Führungs- und Einsatzmittel entwickelt. Zu Anfangszeiten waren die Kosten bereits enorm hoch und beliefen sich auf 280.000 DM bis 3,5 Mill. DM, während 1989 bereits für mittlere Transporthubschrauber des Typs „SA330 Puma“ 20 Mill. DM pro Stück reine Anschaffungskosten erforderlich waren. Zweifelsohne existiert ein nicht weiter kompensierbarer Bedarf an den besonderen Flugeigenschaften von Hubschraubern. Was z. B. den Quotienten Leermasse/Abfluggewicht anbelangt, stehen diese Fluggeräte vom schweren Transporthubschrauber (z. B. CH53G) bis zum leichten Einsatzhubschrauber (z. B. BO105, 1989: weltweit 1200 Stück) ausnahmslos gut da: Das Verhältnis von Nachkriegsmodellen bis in die 90er Jahre hin betrug 1,7 - 2,0, was den Hubschrauber für Rettungs- und Lastenflüge prädestiniert. Man denke hierbei nur an die Hamburger Sturmflutkatastrophe vom Feb. 1962. Allerdings werden für den Bereich Umweltschutz drei sich herauskristallisierende Einsatzschwerpunkte benannt, die auf die spezifischen Vorzüge des Helikopters prinzipiell verzichten können. Es sind dies:

- Gewässerüberwachung
- Überwachung unerlaubten Abbrennens von Abfällen aller Art und die Anlage wilder Müllkippen
- Beobachtung von Waldbränden bei ausgeprägten Trockenlagen.

„Im Rahmen des Gewässerschutzes hatte sich die Zusammenarbeit zwischen Wasserschutzpolizei und Polizei-Hubschrauberstaffeln in den letzten Jahren als besonders erfolgreich erwiesen. Die Verunreinigungen auf den Binnenwasserstrassen Deutschlands konnten in gemeinsamer Arbeit weit zurückgedrängt werden. [...] Im Rahmen eines Kontrollfluges entlang der Flüsse und Ströme können die Hubschrauberbesatzungen jede Gewässerverunreinigung durch Altöl feststellen. [...] Durch Einsatz des Hubschraubers ist

* Die Aussagen in diesem Kontext beziehen sich lediglich auf Deutschland, können jedoch als uneingeschränkt übertragbar gelten.

eine Fühlungshaltung zu dem Verunreiniger (Binnenschiff) ohne Komplikationen über einen längeren Zeitraum möglich. Bei einer solchen Einsatzverwendung stellt sich automatisch die Frage nach der Kosten-Nutzungs-Rechnung. Hier ergeben sich real hohe Flugkosten. Die Flugstunde eines Polizeihubschraubers kostet den Steuerzahler ca. 1.700 DM (1989), die Streifenstunde eines Wasserschutzpolizeibootes ca. 750,00 DM. Stellt man die entstehenden Polizeieinsatzkosten dem Eintritt einer Trinkwasserverschmutzung gegenüber, so steht ohne weitere Kostenaufstellung fest, daß diese Betriebskosten in jedem Fall gerechtfertigt sind. Es gilt größere Umweltschäden in der Entstehungsphase zu begrenzen.“ (Schilling und Rettinghaus, 1994)

Diese angeführten Kostenersparnisse ließen sich noch erheblich ausbauen. Ein langsam fliegendes Beobachtungsflugzeug könnte ebenso gut Fühlung halten und würde bei doppelter Endurance*, doppeltem operativen Radius und einem Bruchteil des Kraftstoffbedarfs bedeutend weniger kosten (einmal ganz von den wesentlich niedrigeren Investitionskosten abgesehen). Darüber hinaus könnte man damit auch die entstehenden Eigenemissionen um Größenordnungen reduzieren! Man darf getrost von einer Vierteltonne Kerosin pro Flugstunde über die Masse der Hubschrauber gegenüber den max. 40 Litern/AVGAS eines sehr durstigen Starrflüglers (SEP) ausgehen. Schließlich sollte man bedenken, dass in derselben Literaturquelle alleine für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Bayern in 20 Jahren Einsatz rund 200 000[†] Flugstunden angefallen sind, während sich gleichzeitig der Trend abzuzeichnen begann, dass es durchaus hohe Anteile im Verwendungsspektrum von Hubschraubern gibt, die nicht zwingend eine Landung vor Ort erfordern (Aufklärungsflüge, Verkehrsüberwachung, Brandschutzflüge etc.). Der Hubschrauber wird sich bei aller berechtigter Kritik künftig nicht mehr aus seinem Gebrauch bei Exekutivorganen eliminieren lassen. Das ist aufgrund seiner besonderen Flugeigenschaften auch gar nicht erstrebenswert. Allerdings läge es durchaus innerhalb der Möglichkeiten von Umwelt-Forschungszentren in einem mittelfristigen Rahmen (10 Jahre) eigene, bessere Lösungen zu erarbeiten, um darüber sinnvolle Vorschläge für Mischstrategien unterbreiten und entsprechende Einsatzformen etablieren zu können. Ein ökologisches Flächenmonitoring per Hubschrauber ist jedenfalls in einem mitteleuropäischen Staat nicht zu verantworten. In den Weiten der Tundra mag temporär etwas anderes gelten.

Es ist also – um den Bezug zur Optica wieder herzustellen – durchaus zulässig, aus diesen Umständen abschließend zu folgern, dass Edgley mit seiner beispiellosen Arbeit historisch gegenüber dem Hubschrauber völlig ungerechtfertigterweise unterlag.

Sehr gut anknüpfen und ausbauen lässt sich das Thema Hubschrauber v. a. hinsichtlich der oft verwendeten „Sensorikugeln“, „Sensorköpfe“ oder „Drehtürme“ (engl. Turrets), die sowohl für den Spezialzweig „Electronic News Gathering“ (ENG), das polizeiliche/paramilitärische „Law Enforcement“ oder das militärische „Battlefield Surveillance“ bzw. „Target Recognition“ (im Kampfhubschrauber) zum Einsatz gelangen. Charakteristisch für derartige Systeme ist, dass sie sich relativ frei schwenken lassen, oftmals zwei oder drei verschiedene optische Sensoren enthalten (typische Kombination: Digitalkamera mit hoher Zoomleistung, Thermalinfrarotsensor und Laser-Rangefinder) und für mehrere Hundert km/h Fluggeschwindigkeit ausgelegt sind. Ein Großteil der bayerischen Polizeihubschrauberstaffel ist mit derartigem Gerät ausgestattet. Für sechs- bis siebenstellige Systempreise und bei 1 - 2 t

* Bo105: 2 - 3,5 h Einsatzdauer („Endurance“), ca. 500 km Reichweite.

[†] Im selben Zeitraum (1970 bis 1994) wurden von der bayerischen Luftpolizei alleine 150 000 Luftbilder angefertigt.

Zuladung pro Hubschrauber verwundert dies heute niemanden mehr. Überraschend ist dagegen die Tatsache, dass die kompaktesten Turrets gerade mal 20 kg wiegen und Abmessungen aufweisen, die selbst für sehr kleine LFZ geeignet erscheinen.

Im Detail soll hier stellvertretend für ganze Produktreihen ein System namens „Ultra 7500“ von „Flir“^{*} Systems“ (www.flir.com) betrachtet werden, einer weltweit marktdominierenden Herstellerfirma von Turrets mit europäischen Niederlassungen in Großbritannien und Schweden.

„Ultra 7500 is the most compact and lightweight turret on the market. At just nine inches and weighing approximately 26 pounds, the fully sealed gimbal [kardanische Aufhängung, Anm. d. Verf.] minimizes drag and provides excellent ground clearance. Its compact size allows increased loads and improved fuel savings for longer flights. It also offers advanced stabilization, enabling clear, detailed images.“ (Firmenprospekt)

Das Sensorpaket wird für folgende Einsatzbereiche beworben:

- . Law Enforcement
- . Search & Rescue
- . EMS[†]
- . Environmental Monitoring

Weiter wird im Prospekt ausgeführt:

“Ultra 7500’s low-light TV camera with 18x optical and 72x digital zoom delivers outstanding daylight imagery and greatly enhances operations during the dusk and dawn hours. Its infrared optics feature continuous zoom, allowing operators to operator’s situational awareness and promoting better and more rapid in-flight decision making. Ultra 7500s direct access functionality eliminates the need to search through frustrating pull down menus to make simple system changes.”

^{*} Der Firmenname ist Programm – das Akronym FLIR steht in der Militärfliegerei für „Forward Looking InfraRed“ und bezeichnet im engeren Sinne Infrarotsichtsysteme, die zu Zeiten des Eisernen Vorhangs für visuellen Allwetter-Tiefflug von Jagdbombern konzipiert wurden. FLIR hat im Cockpit in etwa denselben Anwendungswert wie CIR-Film für die Luftbildaufklärung.

[†] EMS: Emergency Medical Services – etabliertes Luftfahrt-Industrieakronym für Flugzeuge und Hubschrauber der Rettungsflugwachten.

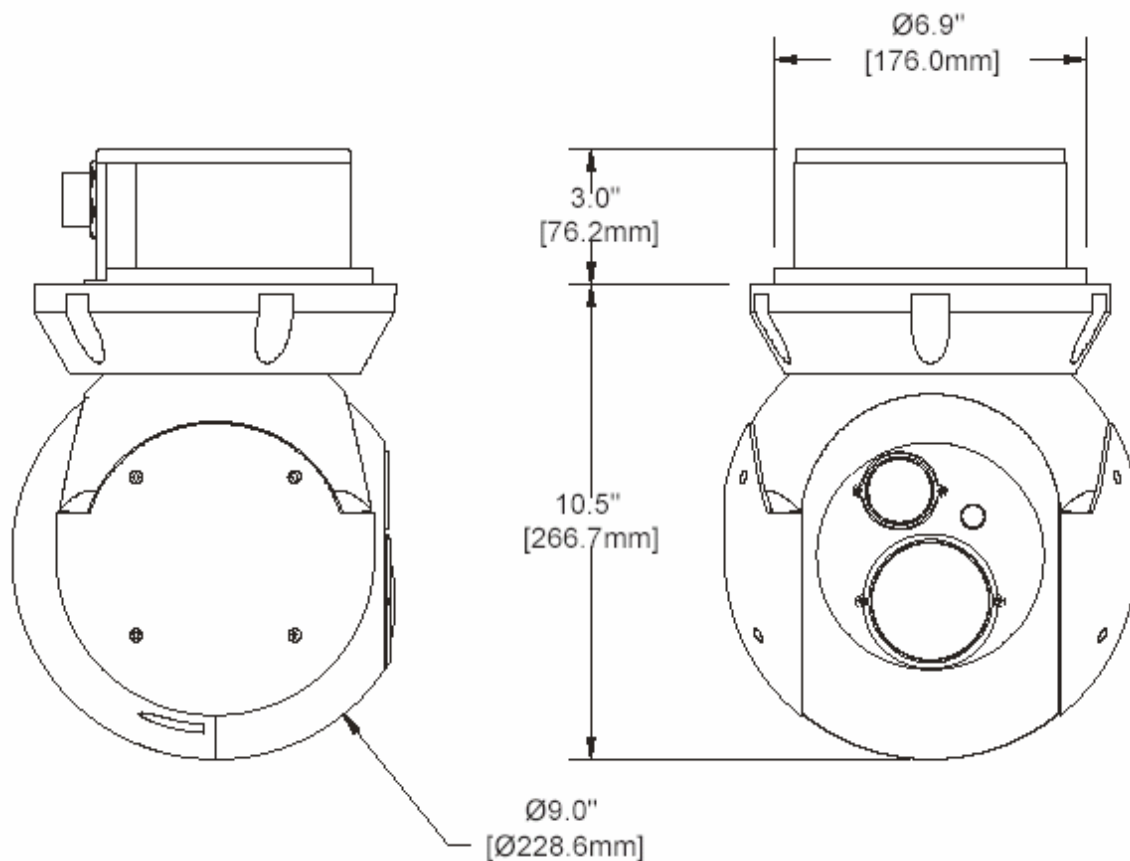


Fig. 210 Ultra7500; (Quelle: www.flir.com)

SYSTEM SPECIFICATIONS	
Turret Size	22,9 x 34,3 cm
Turret Weight	11,8 kg
Field of Regard	360° continous (azimuth / elevation)
Slew Rates	.02° to 50° both axes
Stabilization	Fibre-optic gyro-stabilization
THERMAL IMAGER	
Sensor	320 x 240 InSb focal plane array 3 - 5 µm
Fields of View	22 x 16,5 (10 : 1 continous zoom)
Calibration	Internal Nonuniformity Correction (NUC)
DAYLIGHT IMAGER	
Pixel Arrangement (HxV)	768 x 494 (NTSC) 752 x 582 (PAL)
Resolution	+470 television lines (NTSC) +460 television lines (PAL)
Fields of View (HxV)	Narrow: 0,7° x 0,6° maximum 72x zoom Wide: 48° x 32° 0,2 lux @ f/1,4 w/out filter, 3 lux @ f/1,4 w/filter
ELECTRONIC CONTROL UNIT	
Size	24,21 x 10,00 x 20,32 cm
Weight	4,13 kg
Power Requirements	18 VDC to 32 VDC input
Max Current Requirements	15 amps
Communication Interface	RS-232/422
Video Output	RS-170, NTSC, PAL

LASER ILLUMINATOR/SPOTTER (optional)	
Type	Class IIIb CW diode laser
Bandwidth	0,830 μm
Beam Divergence	0,2 mrad, 2 - 1 aspect ratio
Output Power	30 mW
OPTIONS	
ARINC interface, RS-232 serial GPS interface, radar interface, SLASS interface, PIP monitor	

Fig. 211 Spezifikationen Ultra7500 Multirole-Turret; (ebd.)

Diese Zahlen halte ich für beeindruckend. Das System wiegt insgesamt deutlich unter 20 kg! Für einen Laser-Spotter/Illuminator/Pointer oder Ähnliches besteht für einen wissenschaftlichen Einsatz kaum Notwendigkeit. Für einen Zeiger auf der Basis eines Laser-Rangefinders (Entfernungsmessgerät) sind jedoch einige Applikationen in der Art einer klassischen geographischen Routenaufnahme über spärlich besiedeltem Gebiet (außerhalb Zentraleuropas) durchaus denkbar. Die Fortschrittlichkeit dieser Systeme spiegelt sich u. a. in solchen Merkmalen:

„EMBEDDED AUTO-TRACKER

The auto-tracker keeps designated targets or scenes within the field of view without the need for constant operator input, reducing operator workload and improving overall mission performance.

ERGONOMIC INTERFACE

New on-screen graphics use easily recognizable icons that increase the operator's situational awareness and promote rapid in-flight decision-making.“

(Quelle: <http://www.flir.com/imaging/Airborne/Products/Ultra7500.aspx>, Features & Benefits)

Es überrascht etwas, dass neben entsprechenden Trägerflugzeugen auch keine solcher kompakter Sensoranlagen universitär für die Grundlagenforschung in Zentraleuropa eingesetzt werden (soweit mir dies zum gegenwärtigen Zeitpunkt bekannt ist). Diese Tatsache stimmt angesichts der Zahl von über 40 000 verkauften Einheiten alleine von Flir-System-Turrets etwas nachdenklich. (Quelle: Info-Video auf Firmenwebsite)

Noch unverständlicher ist, dass alljährlich etwa 1500 einmotorige Propellerflugzeuge die weltweiten Produktionsstätten verlassen und es nach eigener Zählung mehr als 550 verschiedene UL-Typen und etwa weitere 200 Sonderkonstruktionen an Motorflugzeugen gibt, die oft über Jahrzehnte in Klein(st)serien produziert werden oder wurden. Kunststoff-Hochleistungsflugzeuge von heimischen Herstellern führen weltweit die sportlichen Wertungslisten an. und dennoch existiert mit Ausnahme der PulsarXP von Prof. Heimes an der FH Bochum kein weiteres mir bekanntes „integriertes Messflugsystem“, das von einer universitären oder außeruniversitären Projektgruppe in einem kleineren Rahmen selbständig für Umweltanalyse und –monitoring eingesetzt werden könnte.

Da die Bestimmung der genannten Pulsar darin liegt, technische Entwicklungspotenziale aufzuzeigen bzw. die dafür notwendigen grundlegenden Algorithmen weiter anzugleichen, nicht aber diese für die Umweltforschung einzusetzen, ist dies alles in allem eine eher ernüchternde Bilanz.



Fig. 212 Pulsar XP (D-EUJF) von F. J. Heimes, FH Bochum (2004)

Mir liegt seit 2002 eine lückenlose Bibliographie zur deutschsprachigen aeronautischen Literatur seit den Anfängen der Fliegerei vor. Von dem zweibändig konzipierten Werk erschien bislang nur Band I in nahezu vernachlässigbarer Auflagenhöhe (< 150 Stück; Selbstverlag von Hans-Joachim Lindstädt; Luftfahrtingenieur, Bremen). In diesem Band I, der den Beginn der Luftfahrt bis 1945 abdeckt, sind auf 367 Seiten 6437 Veröffentlichungen aufgelistet. Der zweite Band wird über 13 000 Einträge enthalten. Durch persönlichen Kontakt zum Autor waren mir die Eintragungen zum Thema Photogrammetrie, Luftbildwesen und Forschungsfliegerei vor der noch ausstehenden Veröffentlichung von Band II zugänglich. Das Gesamtbild, das sich bei der Sichtung dieses Materials ergibt, zeigt klar, dass wir uns in einer Phase befinden, in der optimierte Monitoringfluggeräte für geographische Grundlagenforschung und ökologisches (Flächen-)Monitoring noch nicht definiert, erprobt und in dauerhafte Anwendung überführt worden sind.

Die vielfach erörterte Notwendigkeit zur Nachhaltigkeit im Handeln wird, zumindest was die Fähigkeiten der technischen Raumanalyse mittels GIS und FE anbelangt, in der Umweltforschung offensichtlich in viel zu geringem Maße umgesetzt.

Einerseits liegt das in dem Prinzip der „technischen Unabhängigkeit“* begründet, das für die vier Säulen eines Luftbildaufnahmesystems gilt, und das dazu verleiten kann den „roten Faden“ aus den Augen zu verlieren. Darüber hinaus benötigt man relativ lange, um einige Einfluss- und Wirkgrößen erfassen und einschätzen zu können, was ein weiteres größeres Hemmnis darstellt. 1998/99 recherchierte ich z.B. beim Statistischen Bundesamt und informierte mich zum Thema „Arbeitsflug“ in Deutschland. Das Amt erteilte bereitwillig und umgehend Auskunft, dennoch befanden sich lediglich einige „Pitts-2B Special“ (Standardwettbewerbs-Kunstflugdoppeldecker) und ein paar Bannerschlepper in einer wesentlich kürzeren Liste von Arbeitsflugzeugen als erwartet. Die gesamte Palette an

* In vollständiger Analogie zum physikalischen Unabhängigkeitsprinzip: Beispiel Wurfparabel – die Bewegung eines geworfenen Objekts kann in x- und y-Richtung isoliert voneinander betrachtet und berechnet werden.

Agrarflugzeugen und Fernerkundungsmaschinen war seltsamerweise nicht in der Aufstellung enthalten. Selbst eine intensivere Prüfung am Telefon erbrachte keine weiteren Erkenntnisse. Dieselbe Situation herrscht im Jahr 2005 bei einem erneuten, ergebnislosen Versuch. Wo sind die Dokumentationen zu den Flugzeugen, die man auf einer Fahrt zu einstigen Agrar-Flugzentren im Osten durchaus noch zählen und in Betrieb beobachten kann? Auf welche Weise entziehen sich diese Flugzeuge den Statistiken?

Es wäre definitiv falsch zu behaupten, Flugzeuge würden an Universitäten und Forschungsinstituten keine Rolle spielen. Richtiger erscheint mir die Behauptung, dass diese Institutionen den überwiegenden Anteil von konstruierten, gebauten und betriebenen Fluggeräten bislang lediglich dazu verwendeten, die konstruktiven Grundlagen, neue Werkstoffe, Prüfverfahren und ähnliche luftfahrttechnische Fragen daran zu erforschen. Mir ist nach mehrjähriger, intensiver Forschungsarbeit kein Hochschulinstitut bekannt, das ein Umwelt-Monitoringfluggerät dauerhaft in die Anwendung überführen konnte. Die instrumentenflugtaugliche Cessna des Weltraum-Instituts-Berlin“ (WIB; eingesetzt von R. Furrer, C. Lindemann) war eine Ausnahme. Leider war diese Ära zu kurz, um sie als nachhaltigen Erfolg würdigen zu können. Außerdem sind aufgrund der Projektlängen nur begrenzt Transparenzen zwischen den verschiedenen Ansätzen vorhanden. Die direkte Vergleichbarkeit völlig unterschiedlicher Herangehensweisen gestaltet sich somit schwierig. Drachen, Heißluftballone und –zeppeline, Leiter- und Cherry-Picker-Fernerkundung sind alles rechtmäßig konkurrierende Verfahren und führen zu unanfechtbaren Ergebnissen. Aus den bisherigen Ausführungen dürfte jedoch klar hervorgegangen sein, dass für ein Umweltforschungszentrum mit 50 bis 500 Mitarbeitern Größe die dargelegte Philosophie der Autogeoreferenzierung mittel- und langfristig eindeutig die leistungsfähigere Lösung darstellen wird, da sie weit über einen einzelnen Projektschwerpunkt hinausreicht.

Das sind die auslösenden Gründe dafür, dieses vor Ihnen liegende Werk mit einem so hohen historischen Anteil auszustatten und es eher in Gestalt einer geisteswissenschaftlichen Arbeit zu versehen. Es macht in den Augen eines Pragmatikers nur wenig Sinn, sich mit komplizierter Theorie zu beschäftigen, wenn von Anfang an klar ist, dass die eigentliche Zielrichtung, nämlich die Beobachtung der Kulturlandschaft und ihre darin vorgehenden Veränderungsprozesse sämtlich an Hürden scheitert, die außerhalb physikalisch-technischer Grenzen liegen und von fremdbürtigen Geschäftsmodellen aufgebürdet sind oder methodisch überprägt werden.

Fernerkundung ist für die meisten potentiellen Datenendnutzer noch immer nicht kontrollierbar und damit flexibel verwendbar geworden, obwohl seit wenigstens 1997 die drängendsten technischen Probleme gelöst erscheinen und seit 30 Jahren die politischen Rahmenbedingungen verstärkt die Notwendigkeit dafür begründen. Was heute letztlich noch fehlt ist der entscheidende Schritt die innovativen Sensoren, über die letzten 20 Jahre entstandene, leistungsfähige Software, moderne Klein-Flugzeuge zu integrierten Anwendungen zu verschneiden, und diese unter neuen Aspekten einzusetzen.

10.6 Fernerkundungs-Leistungsklassen (Innovationsstufen)

In diesem Abschnitt kann eine sich aus all dem Vorhergesagten abzeichnende Zwischenbilanz extrahiert werden. Wir haben bislang einige technische Einzelentwicklungen skizziert und diese für eine prinzipielle Verwendbarkeit hin untersucht. Nun setzen wir diese Einzelkomponenten sukzessive zusammen. Das Ziel lautet hierbei, deren

Verbindungsfähigkeit und die daraus resultierende Systemgesamtleistung aufzuzeigen, um Entscheidungsträger bei ihrer Entwicklungsplanung zu unterstützen und die Wirkungen ihrer Entscheidungen aufzuzeigen. Die ausführlich hergeleitete Ausgangsbasis dafür besteht aus den besagten vier Grundkomponenten:

- Fluggerät
- Sensorsystem
- Flugnavigations- bzw. Flugführungslösung (Avionik, Hard-/Software)
- bodengestützte Auswerte-Einheit (Hard-/Software)

Wir wissen, dass Digitalkameras aufgrund ihrer spezifischen Vorteile die besten Voraussetzungen für luftgestützte Sensorik darstellen. Weiterhin wissen wir, dass wir uns um die bodenseitige Computer-Hard- und Software keine allzu großen Gedanken zu machen brauchen. Allerdings benötigen wir einen Plan, wie die fliegenden Komponenten prinzipiell zusammengefügt werden können und was daraus resultiert. Wir brauchen eine Vorstellung darüber, welche Bausteine auf dem Weg zum Messflugzeug benötigt werden und wie sie in einer zeitlichen Abfolge zu einem Gesamtsystem evolutionieren.

Die oben entwickelten Szenarioüberlegungen zu den Bildkapazitäten, Steuerzeiten, Grundgeschwindigkeiten und Kurvenflügen sind vom praktischen Standpunkt her unabdingbar, weil ein Pilot während seines Messflugs wenige Eingriffsmöglichkeiten zur übrigen Ablaufsteuerung besitzt, sofern der Flug unter der ökonomischen Prämisse des „Einhandbetriebs“* durchgeführt werden soll, wie dies speziell in der deutschen und der französischen Luftbildarchäologie beobachtet werden kann. Bezüglich der Datengewinnung wird sich der Einhand-Messflieger im Wesentlichen auf fünf Bereiche zu konzentrieren haben. Es sind dies die steuernde Kontrolle bzw. stetige Überwachung von:

- geplantem Kurs (Kontrolle der „Seitenführung“),
- beabsichtigter Höhen- und Geschwindigkeitsführung (Kontrolle des „Bildvorschubs“),
- sinnvoller Flugstrategie in Abhängigkeit von Wind, Wolken (Lichtverhältnisse), Wetter und Luftraumsituation (Planung der 180°-Wendemanöver),
- angemessener Aufmerksamkeitsverteilung gegenüber der Verkehrssituation im umgebenden Luftraum,
- der Funktionstüchtigkeit von Bordinstrumentierung und Messtechnik.

Im besten Falle wird ein Pilot mit Flugzeug und Kamera daher die „Seitenführung“ eines Flugstreifens durch Driftkompensation mittels geeigneter Steuerbewegungen wirksam kontrollieren. Die Längsüberlappung aufeinander folgender Bilder ist für klein- und mittelformatige Aufnahmen umso schwieriger zu bewerkstelligen, je geringer die Höhe über Grund ist. Obwohl GPS den Windeinfluss eliminiert und es vordergründig betrachtet keine Rolle spielt, wann das Flugzeug tatsächlich am nächsten Auslösepunkt ankommt, existiert

* Das Gesagte gilt auch für Zwei-Mann-Cockpits. Drei Personen erscheinen für alternative Umweltmessflugsysteme jedoch heute schon als zuviel, wie aus der intensiven historischen Analyse hervorgeht. Es soll schließlich auch das Flugzeug und sein damit verbundener Gesamtsystempreis deutlich herabgesetzt werden.

sowohl eine obere (sensorikbedingte) als auch eine untere (aerodynamische) Schranke für die anzusetzende Flugplanungsgeschwindigkeit. Hier steckt bereits eine erste Verzweigung: Fliegt man zeitgesteuert (Intervalometerbetrieb), oder koordinatengesteuert (GPS)?

Dieser Umstand erfordert flexible Flugplanungsinstrumente für eine entsprechende Anpassung der Fotostrecken im Gelände, um die erforderlichen Bildmittelpunkte anhand tatsächlich gegebener Wettersituationen unmittelbar vor Antritt eines Fluges u. U. neu berechnen zu können. In wenigstens einer mir bekannten Photogrammetrie-Flugplanungssoftware aus der professionellen Marktebene ist diese Funktionalität heute voll enthalten („SnapPlan“-Flugplanungsmodul* der Firma Trackair, www.trackair.com).

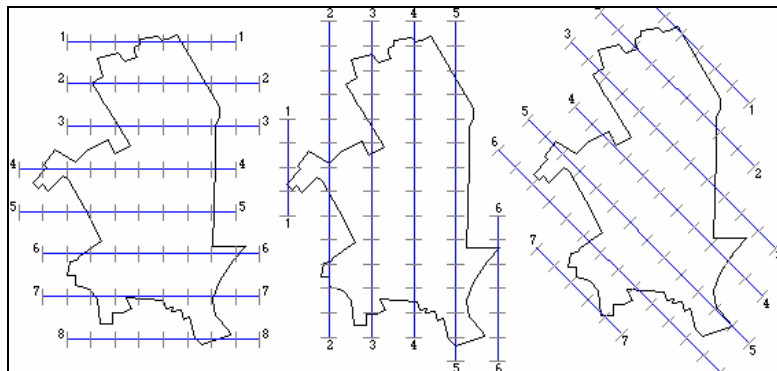


Fig. 213 Automatische Bildflugstreifenplanung mit markierten Bildauslösezentren in SnapPlan/Trackair: der Rechner erzeugt neue Geokoordinaten anzufliegender Bildauslösepunkte in unterschiedlichen Planungsszenarien sekundenschnell; (Quelle: SnapPlan User's Manual, 2004)

Die manuelle Berechnung der Fotoauslösepunkte ist zwar prinzipiell möglich, aber für mehr als ein bis zwei Dutzend Bilder zu aufwändig. Die rechnerintegrierten grafischen Methoden sind der manuellen Flugplanung deutlich überlegen. Die spürbar höhere Flexibilität zeigt sich beispielsweise darin, dass über einem geocodierten Polygonzug die erzielbare Stereofläche direkt ausgewiesen werden kann. Manuell berechnet müsste man auf Karten langwierig konstruieren, um ein derartiges Ergebnis visualisieren zu können.

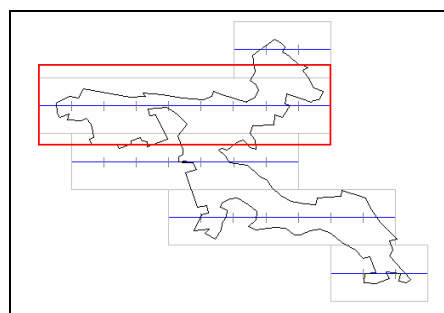


Fig. 214 Der rechteckige Rahmen (zweiter Bildflugstreifen v. o.) markiert die Stereofläche im Block; (Quelle: SnapPlan User's Manual)

Die Automatisierungsstufen greifen auf mehreren Ebenen gleichzeitig, wie man anhand dieser schematischen Darstellung eines Photogrammetrieprojekts sieht:

* Derzeitige Spezifikationen: Bildblöcke mit max. 32 000 Bildern, 150 Flugstreifen (soll künftig auf 500 ausgeweitet werden), 700 Bilder pro Streifen, max. 7 Segmente pro Streifen („Feature-Line-Planning“, z. B. Fotostreifen über mäandrierenden Flußläufen).

- Die Interessengebiete werden mittels Polygonzügen dargestellt und durch (Bildschirm-)Digitalisierung, Scannen oder Import einer Eckpunkt-Koordinatendatei erzeugt.
- Verschiedene Szenarien (Schichtgitter, Flugstreifenrichtungen, Bildüberlappungen etc.) können mittels Computer errechnet werden.
- Die Planungsdateien werden vom bordseitigen Rechner als Flugdurchführungsplan übernommen und in Echtzeit angezeigt.
- Der Pilot steuert das Flugzeug computergeführt in die Nähe der Auslösepunkte und der Rechner löst bei Erreichen eines gewissen „Fangradius“, um eine vorgegebene GPS-Koordinate ein Bild aus.
- Nach einem Daten-Download auf einen bodengestützten Auswerterechner beginnt die teilautomatisierte Geocodierung.

Ein Fotoflug auf dieser Grundlage hat nur noch wenig mit der Gewinnung von Einzelaufnahmen zu Visualisierungszwecken zu tun. GPS-gestützte Primärdatengewinnung verleiht der luftgestützten Fernerkundung eine stark messtechnische Komponente und jedem Bildflug den Charakter eines Feld-Experiments. Daraus ergibt sich der strukturelle Vergleich: Volldigitale INS/DGPS-Integration bedeutet für ein Bildflugzeug etwa denselben Produktivitätsvorteil wie eine digitale Kopierstation gegenüber einer mechanischen Druckerpresse auf Bleiletern-Basis.

Die nachfolgende Tabelle stellt lediglich einen Ordnungsversuch dar. Wir sprechen ausnahmslos von GIS-integrationsfähigen Datensätzen; dabei stillschweigend von der Grundannahme ausgehend: Nicht-geocodierte Datensätze besitzen in einer geoinformatisch geprägten Umweltwissenschaft den Tausch-/Dokumentationswert Null. Außerdem betrachten wir nur digitale Off-the-Shelf-Sensorikkomponenten, wie etwa klein- und mittelformatige Digitalkameras. Die Jahreszahlen geben ebenfalls nur ungefähre Anhaltspunkte wider: Beispielsweise wurden 1991/92 die ersten Firmen für den Vertrieb von GPS-Hardware in Deutschland gegründet (z. B. Firma -„GPS GmbH“, München/Gräfelfing). Zur selben Zeit entschlossen sich Luftfahrtausrüster (z. B. Firma Friebe), die ersten Flug-GPS-Empfänger zu vermarkten. 1995 war schließlich bei Kodak die Rede davon, ein „Solution-Kit“ auf den Markt zu bringen, das aus Digitalkamera und GPS-Empfänger bestehen sollte.

Ausrüstungskategorie	Bevorzugte Aufnahmeart	Typ. Verwendung (Befliegungsart)	Vermutliche Flächen-Leistung (pro Flug)	Beschränkungen	Vorteile	Methodischer Stand (milit./zivil)	Leistungs-klasse
Freihand-Kamera ohne GPS	Schräg-, Steil-aufnahmen	Punkt-befliegung	<< 500 ha	Hoher Arbeitsaufwand ab 10 - 20 Bildern	Minimaler technischer Aufwand	1912 / 1913	X
Freihand-Kamera mit GPS (kamera-/bordseitiges GPS)	Schräg-, Steil-aufnahmen	Punkt/Streifen	Bis 500 ha	Nur bedingt einsetzbar für GIS-Integration	Hervorragend zur Schnelldokumentation geeignet	80er / 1995	IX
Fixierte Kamera ohne GPS (Intervalometer/Fernausslösung)	Senkrecht-aufnahmen	Streifen	Bis 1000 ha	Starke Abhängigkeit von verfügbaren Passpunkten, Problem der Positionierbarkeit (Datenüberhang!)	Rasche Datengrundlage für Luftbildinterpretation größerer Flächen	1915 / 1920	VIII
Fixierte Kamera (nur bordseitiges GPS)	Schräg-, Steil-, Senkrecht-aufnahmen	Flächen	Bis 1000 ha	Foto-Auslösbarkeit?	Bildmittelpunktkoordinaten als Schätzwerte für Bündelblockausgleichung bekannt	80er / 1991	VII
Fixierte Kamera mit GPS (kamera-/bordseitiges GPS)	Schräg-, Steil-, Senkrecht-aufnahmen	Streifen- und Flächen-befliegung	Bis 10 km ²	60/30-Bildüberlappungen notwendig	Bildmittelpunktkoordinaten als Schätzwerte für Bündelblockausgleichung bekannt	80er / 1995	VI
Fixierte Kamera mit Strapdown-INS/GPS	Schräg-, Senkrecht-aufnahmen	Punkt bis Flächen	Bis 50 km ²	Autogeoreferenzierung realisierbar?	Bildmittelpunktkoordinaten als Schätzwerte für Bündelblockausgleichung bekannt	80er / 1997	V
Fixierte Kamera mit Strapdown-INS/(D)GPS	Senkrecht-aufnahmen	Punkt bis Flächen	Bis 50 km ²	Autogeoreferenzierung realisierbar?	Bildmittelpunktkoordinaten als Schätzwerte für Bündelblockausgleichung bekannt	80er / 1997	IV
(Einfache) stabilisierte Plattform mit GPS	Senkrecht-aufnahmen	Punkt bis Flächen	Bis 150 km ²	Systemkosten/-leistung	Homogenes Bildmaterial, Modulare Zwischenausbaustufe	80er / 1997	III
Stabilisierte Plattform mit INS/GPS	Senkrecht-aufnahmen	Punkt bis Flächen	Bis 300 km ²	Geocodierungsleistung vgl.-bar mit HiRes-Sat.	Passpunktfreiheit, geringere Bildüberlappungen notwendig (z. B. 20/10)	80er / 1997	II
Stabilisierte Plattform mit INS/(D)GPS	Senkrecht-aufnahmen	Punkt bis Flächen	Bis 500 km ²	Evtl. Projekt-Verteuerung durch Bezug von DGPS-Daten	Passpunktfreiheit, Bildüberlappungen notwendig (z. B. 20/10), höchste Präzision, höchste Automatisierung	80er / 1997	I

Fig. 215 Die historische Analyse liefert folgende Ausrüstungs-Szenarien (für luftgestützte, optische Fernerkundung), die zu korrespondierenden Leistungsklassen eines Primärdatenerfassungssystems führen (siehe nachfolgende Erläuterungen)

Die in der Tabelle abgesteckten Applikationsgrenzen sind in der Praxis fließend; kein Marktteilnehmer lässt sich gerne in die Karten blicken. Die Spalten mit den vermutlich erzielbaren Flächenleistung und dem methodischen Stand bitte ich daher ausdrücklich nicht allzu wörtlich zu nehmen. V. a. die von mir eingesetzten Zahlenwerte zur jeweiligen Flächenleistung basieren zwar auf intensiven Literaturrecherchen, zahlreichen Gesprächen mit Fachleuten und eigenen Versuchen, können jedoch erheblich von der vorgeschlagenen Linie abweichen. Ich gehe jedoch davon aus, dass sich bei systematischen Untersuchungen in 25 oder 50 Jahren rückblickend herausstellen wird, dass die erzielbare Produktivität (Geocodierungsleistung = Fläche / Zeit) von Luftbildaufnahmesystemen gemäß der hier vorgestellten Charakterisierung bei halblogarithmischer Darstellung einen linearen Verlauf annimmt (exponentieller Leistungsanstieg mit zunehmender Leistungsklasse). Dies wird analog für die Höhe der zu erbringenden Investitionskosten gelten. Die Frage ist nur, wo die größeren Leistungssprünge praktisch liegen werden.* Der Zeitpunkt derartige, Aufgaben systematisch zu untersuchen, ist noch nicht gekommen. Zu wenige Plattformen existieren – zu instabil sind die Geschäftsbereiche – zu unübersichtlich ist der sich wandelnde Markt. Für Entwickler von Messflugsystemen ist es jedoch nützlich, diese Grundüberlegung zu kennen und sie bei der eigenen Planung zu berücksichtigen.

In der Tabelle sind die bedeutenderen Leistungsklassen in Farbe hervorgehoben. Letztlich werden nur I, II, III, V und X in die engere Auswahl gelangen, wenn es um eine mittel- und langfristige Instrumentierungs-Planung zur autonomen Datenerhebung geht. Es gibt praktisch keine militärischen optronischen Systeme mit Navigationsfunktionalität mehr, die sich unterhalb von Leistungsklasse V befinden. Innerhalb der Leistungsklasse V dürfte sich dagegen die überwältigende Mehrzahl von militärischem Erkundungsgerät tummeln. Satellitengestützte Erderkundungssysteme befinden sich heute – um einen wichtigen strukturellen Vergleich anzubringen – ausnahmslos auf dem Niveau von Leistungsklasse I. Die Schrägaufnahmen werden künftig auch für fest eingebaute abbildende Sensoren eine gewisse Rolle bei kleineren Projekten spielen, da hierbei entweder

- a) mit dem gesamten Flugzeug gezielt wird (Auslösung im Kurvenflug) oder
- b) der Starreinbau von Kameras winkelig erfolgt, beispielsweise mit 45°-Schrägsicht[†]

Beide Varianten sind historisch betrachtet üblich. Wenn also ein Umweltforschungszentrum Ambitionen zum Aufbau und den Einsatz von Luftbildaufnahmesystemen hegt, dann lautet meine Empfehlung gemäß dieser Tabelle, eine systematische Einarbeitung über den Pfad X, IX, IV, III, II, I zu wählen, wobei ich persönlich die mir heute optimal erscheinende Entwicklungslinie X – III - I präferieren würde. Leistungsklasse III stellt einen halbwegs sinnvollen Kompromiss zwischen Systemleistung und finanziellem Aufwand dar. Leistungsklasse X hingegen bildet das Grundhandwerkszeug eines Messfliegers und wird auch künftig für lange Zeit unverzichtbar bleiben. Multisensorielle Fernerkundung (insbesondere die Kreuzung von abbildenden Sensoren und in-situ-Messungen) erfordert wenigstens Leistungsklasse V, also den Entwicklungsstand von militärischer Technik zum Ende des Kalten Krieges.

* V. a. die Überwindung von Leistungsklasse X erfordert einen immensen Aufwand!

[†] Dies gilt auch für alle Leistungsklassen ab III aufwärts – sofern ein Betriebsmodus „Stabilization-Lock“, d. h. ein kurzzeitiges Verriegeln der Stabilisierung orthogonal zur x,y-Ebene des Flugzeugs realisierbar ist!

Es spielt bei all diesen Überlegungen keine Rolle, wessen Produkt man verwendet oder mit welchen Kooperationspartnern man zusammenarbeitet*. Wichtig ist einzig und allein zu erkennen, mit welchen Entscheidungen man seine Institution in personeller, als auch instrumenteller Hinsicht, durch die Dekaden steuert und dabei ganze Epochen zu überspringen vermag.

Es ist von keiner Seite aus notwendig, sich in sinnlosen Preisschlachten aufzureiben, die durch den Trend zur Digitalkamera vielerorts eingesetzt haben. Vielmehr wäre es derzeit von Technikerseite aus angezeigt, die aufkommenden Systemebenen systematisch miteinander zu vergleichen und ihre Schwerpunktvorzüge und -nachteile objektiv zu identifizieren. Das wird der Gesamtmarktentwicklung dienlicher sein, als versuchen zu wollen, sich gegen den allgemeinen Trend zu erwehren. Die japanische Selbstverteidigungs-Technik Jiu-Jitsu nutzt die tatsächlich vorhandene Kraft und lenkt sie nur in andere Bahnen um. Es wäre unklug, hohe Kräfte mittels hoher Blockadeanstrengungen vollständig absorbieren zu wollen.

Als Ergebnis dieser evolutorischen Betrachtungen über mehrere Systemebenen hinweg bleibt deshalb noch einmal festzuhalten: Die passpunktfreie, direkte Autogeoreferenzierung stellt die langfristige Zukunft der abbildenden, luftgestützten Messfliegerei dar.

Heimes et al. gebührt der Verdienst, historisch erstmalig die Leistungsfähigkeit einer wesentlichen militärischen Systemkomponente (und deren Miniaturisierungsgrade!) ab 1997 für zivile Zwecke – insbesondere staatliche und halbstaatliche Umweltmonitoringaufgaben – vollständig erschlossen zu haben. Obwohl die Heimesplattform einen technisch bedeutsamen Wendepunkt markiert, wird es künftig doch unerheblich bleiben, mit welchen Produkten welcher Firmen man an den Start geht: Das Grundziel aller Bestrebungen wird jedoch immer Passpunktelimination lauten. Dieser über beliebig viele Entwicklungslinien hinweg verlaufende Pfad beruht auf dem Effekt der „technischen Konvergenz“. Was das Heimes-Konzept so attraktiv macht, ist neben dem geringen Systemgewicht die von Anfang an konsequent verfolgte modulare Systemoffenheit. Es spielt prinzipiell keine Rolle, ob man Videokameras, Laser-Altimeter, CCD-DSLR-Kameras (KB oder MF), TIR-Kameras oder Multispektralscanner daran anpasst. Das macht dieses System im Gegensatz zu einer großen Zahl von „monolithischen“ Sensorikpaketen für unterschiedlichste Aufgaben zukunftsfähig.

10.7 Fernerkundungs-Methodik (Integrationsstufen)

Wenn wir uns über Integrationsstufen unterhalten, dann sprechen wir darüber, wie eng die im Grunde genommen völlig isoliert voneinander betrachtbaren technischen Komponenten der vier Messflug-Säulen zusammenwirken. Dabei bewegen wir uns innerhalb zweier Extreme: Diese liegen zwischen Luftfahrzeugen, die unter visueller Beobachtung (mit dem unbewehrtem Auge) geflogen werden und Fluggeräten mit bordseitig fest verschraubter Sensorik, deren elektronische Ausstattung mehr oder minder automatisiert betrieben werden kann. In letzterem Fall sprechen wir von integrierten Messflugganwendungen. Es existieren bezüglich des Integrationsgrades jedoch erhebliche Unterschiede, die eine aufschlüsselnde

* Es gibt durchaus Alternativen – wenngleich diese noch dünn gesät sind. Z. B. bieten sich leistungsstarke Produkte der deutschen Firma IGI (gegr. von A. Grimm) oder der kanadischen Firma Applanix an, wobei letztere einschränkenderweise auf die professionellen Marktsegmente mit 19"-Ausstattung zielt, also Flugzeuge der Business-Class aufwärts erfordern. IGI ist mit dem CCNS4-System ein weltweit führender Hersteller für Photogrammetrie-Flugführungssysteme.

Betrachtung erfordern. Flugphysikalisch sind hinsichtlich integrierter Applikationen in erster Näherung drei wesentliche Einflussgrößen von Bedeutung:

- Sensorgewicht
- Einbauvolumen
- Energiebedarf

Diese Parameter bestimmen letztlich den erzielbaren Miniaturisierungsgrad. Daneben finden sich auch für die – aufgrund der erzielbaren Miniaturisierungsleistungen immer interessanter werdenden – Multisensor-Konzepte noch ein paar weitere Faktoren, wie etwa:

- Sensorikansteuerung (Fernsteuerung)
- Schnittstellenstandards (und -leistung)
- Mechanische Standardisierung (z. B. 19"-Technik)
- Informationelle Rückkopplung

Diese Punkte werden in der Industrie oft mit dem übergreifenden Stichwort „Data-Fusion^{*} - Concepts“ zum Ausdruck gebracht. Mit Rückkopplung ist gemeint, dass ein Besatzungsmitglied oder der Pilot durch einen informationstechnischen Regelkreis in der Lage sein sollte, zu erkennen, in welchem augenblicklichen Systemzustand sich die Sensorik-Hardware befindet und wie sich das Messfluggeschehen bezüglich eines vorgegebenen/beabsichtigten Soll-Zustandes gegenüber einem Ist-Zustand entwickelt. Computertechnik erschließt hierbei völlig neue Anwendungsgebiete[†], wobei Software als zentrales Integrationselement eingesetzt wird.

Schon heute wäre eine Kombination aus CCNS4, AeroControl (INS/DGPS-Lösung der Firma IGI) und einer Mittelformat-Digitalkamera „kleiner“ als 25 kg Gewicht, 25 Liter Volumen und nur wenige 100 W Strombedarf. Wenn Sie mit einem Flug-GPS und einer Handkamera starten, besitzen Sie ein kleines Flugführungssystem, das für einen Erkundungsflug der Leistungsklasse X völlig ausreicht. Interessant wird es jedoch erst ab Leistungsklasse V, wie wir weiter vorne gesehen haben. In diesem Falle wären also das GPS und die Kamera fest im Flugzeug verbaut, deren Kommunikation von einem Bordcomputer übernommen wird, auf den man einen ergonomischen Zugriff besitzt. Es wäre auch möglich ein, ganzes Bündel von Webcams als Fernerkundungssensoren zu verwenden.

Das Problem dabei ist nun, dass ein derartiger Einbau nicht notwendigerweise die Statik des Flugzeugs verändern muss, jedoch einen Eingriff in die übrige Integrität des Flugzeugs darstellt. Man muss schrauben, kleben, kletten, Halterungen anbringen, Verlegeschächte einbauen, Kabel ziehen etc. Erst ab diesem Aufwand kann ein Fluggerät als „integriert“ gelten. Wie teilt man dagegen die unterschiedlichen Möglichkeiten sinnvoll ein? Ein denkbare 5-stufiges Schema dafür scheint mir zu sein:

* Data-Fusion erfordert regelmäßig sehr große Budgets in der Verteidigungsindustrie, weil letztlich alle Kampfwertsteigerungsprogramme darauf beruhen. In Ein-Mann-Cockpits von Kampfflugzeugen wurden zu Analogzeiten ein Maximum von über 120 Rundinstrumenten erreicht, die ein Pilot zu überblicken hatte, und von denen die meisten nur dazu bestimmt waren, das Flugzeug während verschiedener Betriebszustände in der Luft zu halten.

† Beispielsweise können die Motorgondeln eines Luftschiffs durchaus als Stellglieder eines Regelkreismodells aufgefasst werden; beim „Zeppelin NT“ werden diese Aktuatoren mit Hilfe des TCP/IP-Protokolls auf elegante Weise angesteuert und abgefragt. Übertrieben formuliert heißt das: Sie könnten in einer vernetzten Welt ein Luftschiff von einem normalen Bürogebäude nicht mehr unterscheiden, sofern man diese Regelung mittels typischer Betriebssysteme (Windows/Linux) realisieren würde.

Typ	Kategorie	Kurzbeschreibung	Vorteil(e)	Nachteil(e)
1	Völlig fehlende konstruktive Integration der Aufnahme-/ Messtechnik.	Freihandfotografie (Schrägaufnahme-Technik mit Handapparaten).	Höchste Flexibilität bezüglich der Wahl des Trägerflugzeugs. Keinerlei Aufwand. Punktbefliegungen immer möglich.	Meist nur Schrägbilder erzielbar, d. h. keine Flächendeckung möglich. Luftbildmessung nur mit hohem Auswerteaufwand möglich. Methodik nur bedingt für Einhandbetrieb tauglich (fliegen + vertikal fotografieren alleine praktisch unmöglich).
2	Einbau in LFZ ohne konstruktive Modifikation des LFZ (Teilintegration Stufe 2).	Anbringung eines oder mehrerer Sensorelemente an einem Ausleger (Boom-Mount), Träger (Rack), Festpunktes (Hardpoint) oder in einem Behälter am Rumpf oder unter den Flügeln (Pylon).	Auswahl beliebiger Charterflugzeuge möglich. Methode sehr günstig für unregelmäßigen und zeitlich begrenzten Anwendungsfall.	Auf- und Abrüsten störend für häufigere Einsätze. Installationspunkte gelten streng flugzeugtypspezifisch und verlangen hohen Aufwand in Auswahl und Auslegung der Aufhängevorrichtung.
3	Sensorik-Integration in beliebiges LFZ (Vollintegration Stufe 3).	Wie unter 2, jedoch auch mit Einbau an unzugänglichen Stellen (→ Luken, Deckel, Klappen, Inspektionsöffnungen, Kabelkanäle usw.), meist jedoch Rumpfeinbau.	Vertretbarer Kostenaufwand, Festeinbau der Sensorik.	Flugeigenschaften und Emissionswerte sekundär.
4	Modulare Schnellinstallation konstruktiv voll angepasster Sensorik in ein aufgabenoptimiertes LFZ (Vollintegration Stufe 4).	Das Flugzeug <i>ist</i> das Messgerät.	Hervorragende Flugeigenschaften des Gesamtsystems (geringe Lärm-/Abgasemission), dadurch größte Endurance. Wegen des relativ frei konfigurierbaren LFZ größte Flexibilität in der Auswahl/Zusammenstellung der Sensorik-Komponenten. Operator für Sensorik optional	Bauliche Veränderungen am LFZ setzen nicht unwesentliche Kenntnisse voraus bzw. sind oft kostspielig.

5	Vollintegration eines autonom arbeitenden Flugkörpers (Drohne, UAV*)	Modulare Miniatur-Messtechnik. Flugkörper interaktiv ferngelenkt oder programmiert.	Größtmögliche Konzentration auf die reine Datenstrecke („fire-and-forget“-Prinzip).	Luftrechtlich unrealistisch für zivilen operationellen Flugbetrieb über Mitteleuropa. Sehr hohe Systemkosten (1 Drohne [†] ↔ 5 - 10 Leichtflugzeuge!).
---	--	---	---	---

Fig. 216 Sensorik-Integrationsstufen an Bord von LFZ; ergänzt; aus: (Winkler, 2000, unveröff.)

Diese phänomenologische Klassifizierung ist noch nicht zufrieden stellend, weil sie das eigentliche Problem des Zusammensetzens von FE-Flugzeugen nicht vollständig abbildet. In der Realität durchdringen sich die mechanischen und die computerbasierten Systemebenen gegenseitig und sind so stark voneinander abhängig, dass sich Kosteneffizienz und grundsätzliche Entwicklungspfade nur schwer abbilden oder beziffern lassen. Man kann sich das Ganze auch als Zwiebschalenmodell vorstellen, wobei Software über definierte Schnittstellen die einzelnen Sphären (Black Boxes) zu durchdringen vermag. Der Aufwand nimmt von Stufe 1 nach Stufe 5 überproportional zu. Ebenso steigen technische Integrationsdichte und die Systemgesamtleistung. Faktisch befinden sich die Luftbildarchäologen ausnahmslos auf der Ebene 1, die meisten Bildflugzeuge auf Ebene 3, und der Einsteiger-Experimentalflugbetrieb auf Ebene 2. Man kann diese Tabelle von oben nach unten auch in zeitlicher Abfolge auffassen – und zwar mit der Zeitrichtung von 1 nach 5, wobei Ebene 2 eine Art Trenn- und Filterebene darstellt, die von Individualentwicklungen meist nicht überwunden werden kann. Wer verfügt zu Beginn seiner Arbeit schon über ein vollwertiges Flugzeug und teure Sensorik? Industriell geprägte Forschung dagegen findet ausnahmslos auf den Ebenen 3 und 4 statt, wobei Stufe 4 die höchste „Evolutionsstufe“ darstellt, wenn es um bemannte Flugkörper geht. Stufe 4 entspricht dem Serienbau. Weltraumsonden entsprechen einer nahtlosen Ergänzung von Stufe 5. Für eine zivile Nutzung verbieten sich jedoch innerhalb der unteren Atmosphäre Drohnen, weil sie zu teuer sind, ihr Flight-Envelope relativ gering ist und sie üblicherweise nicht annähernd auf die Lebensdauern von sonstigem Fluggerät ausgerichtet werden (Stichwort: Fallschirmlandungen!). Außerdem – das stellt die bei weitem größte zu überwindende Hürde dar – können sie aufgrund ihrer baulichen und zulassungstechnischen Beschränkungen nicht operationell in den Luftraum eingegliedert werden.

Es bedurfte einiger Zeit, diese Zusammenhänge zu durchleuchten und sie in verallgemeinerbarer Form darzustellen. Der Grund dafür, warum diese Sichtweise hier wiedergegeben wird liegt darin, dass hierüber die Aussicht besteht einem größeren Publikum gegenüber qualitative Aussagen zur Leistungsfähigkeit von Luftbildaufnahmesystemen zu

* UAV: „Unmanned Aerial Vehicle“, modernes international gebräuchliches Acronym für Drohnen.

† Durch die steigende Anzahl bewaffneter Konflikte mit darin involvierten westlichen Demokratien explodierte die Anzahl der internationalen Drohnenhersteller ab Mitte der 90er Jahre förmlich von zuvor nur ein paar wenigen auf über 50 Anbieter (Internationale Luftfahrtmesse Le Bourget, 1999). Ein jüngeres, erfolgreiches Modell aus deutscher Produktion („Luna-X2000“, ca. 4 m Spannweite, 32 kg, Firma EMT) kostete z. B. 500 000. DM, bot allerdings damals nur 20 km Einsatzradius (Stand: ILA Berlin-Schönefeld, 1998). Eine völlig autonom operierende Hubschrauberdrohne aus Österreich („Camcopter“, Firma Schiebel) beherrschte als Weltneuheit dagegen zwar 100 km Terrain-Following, besaß allerdings nur eine Miniaturkamera und eine geringe Gesamtnutzlast von wenigen Kilogramm – bei 1 Mill. DM Stückpreis!

vermitteln. Dabei wird auf einen ausgleichenden Kompromiss zwischen Ingenieuren und Nicht-Technikern abgezielt.

Im Hinblick auf eine Nachhaltigkeitsdiskussion ist es heute angebracht ausnahmslos auf die Zielvorgabe Leistungsklasse I / Stufe 4 hinzuarbeiten. Die persönliche Beobachtung über die letzten 8 Jahre einiger Projekte zeigt, dass sich diese oft höchstens in Leistungsklasse V auf Stufe 2 befinden.

11 Potentielles Anwendungsgebiet Klimageographie

In diesem Kapitel sollen ein paar Fakten dazu anregen, sich die Verwendung volldigitaler, autogeoreferenzierender Luftbildaufnahmesysteme hinsichtlich von Aufgaben vorzustellen, wie sie meines Wissens nach derzeit noch nicht bearbeitet werden.

Im Hinblick auf Naturgefahren entfällt in Deutschland von allen registrierten und versicherungstechnisch bezifferbaren Schadensereignissen der überwiegende Teil auf das Wetter (siehe Fig. 217).

Man stelle sich einmal vor, lokale Umweltschäden vor Ort mit wenigen Stunden Abstand von einem Ereignis entsprechender Magnitude in einem betroffenen Gebiet zeitnah zu kartieren. Der Vorteil des Flugzeugs als Messplattform und Erkundungsvehikel liegt klar auf der Hand, wenn es um die Untersuchung der Reibungszone zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche mit darauf sich abzeichnenden Landschaftsveränderungsprozessen geht. Gegenüber bodengestützten Verfahren ist es bedeutend einfacher, das klimageographische Wirkungsgefüge vor Ort zu erkunden, da im günstigsten Fall sogar Aussicht darauf bestünde, die Ursache-Wirkungs-Kette unmittelbar aus einer rasch und flexibel wählbaren Distanz über einen gewissen Zeitraum hinweg erfassen zu können.

Was nützen Millionen von archivierten Luftbildern, wenn man weiß, dass diese ausschließlich an die besagten Bomberzielkarteien angelehnt sind und evtl. ein Teil der damals als „wertlos“ eingestuften Bilddokumente verloren gegangen ist? Was können uns länderweite Luftbildarchive mit 5-, 10- oder 20-Jahresabständen für die Erosionsforschung nützen, wenn wir die Information *jetzt* und unmittelbar benötigen, weil gerade ein neues vermeintliches Extremereignis stattfand? Was nützen uns die Bildarchivbestände mit evtl. ausreichender Auflösung, wenn wir die Aufnahmen flach gegen die auf- oder untergehende Sonne benötigen, um die archäologischen Bodendenkmäler konturenschärfer über den zeitlichen Jahrgang detektieren zu können (unabhängig davon, wie wir sie dann dokumentarisch festhalten). Der Wert von Archiven und der in sie hineingeflossenen Arbeit ist unbestreitbar hoch. Es geht in diesem Rahmen jedoch darum darauf hinzuweisen, dass unser Forschungsbedarf künftig nicht einmal annähernd vollständig darüber gedeckt werden kann, wenn solche angerissen Fragen vertieft bearbeitet werden sollen.

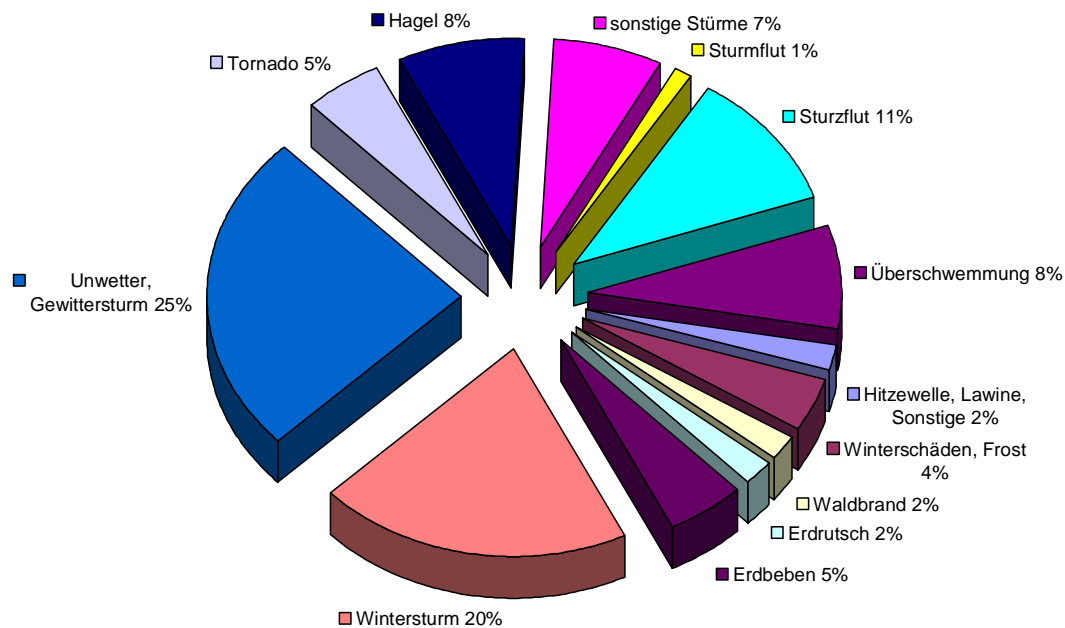


Fig. 217 Prozentuale Verteilung der Auslöser von Naturkatastrophen für Deutschland; Bericht Münchener Rück, 302-01037.pdf, 1999; modifizierte Darstellung: (Quelle: <http://www.muenchenerueck.de>, 2004)

Das Hauptumweltrisiko entfällt in Deutschland auf Stürme. Bei der Gefährdung durch Oberflächenwasser spielen die Sturzfluten* aufgrund ihrer erhöhten Frequenz eine bedeutende Rolle. Wie man obigem Tortendiagramm entnehmen kann, wird es für 66 % der in Deutschland bekannten Naturkatastrophen nötig sein, bei der Erfassung von Umweltzustandsänderungen im Verlauf von wetterbedingten Extremereignissen unter schwierigeren Bedingungen fliegen zu lernen. Das erfordert ein entsprechend vorsichtiges Herantasten und eine langjährige flugmeteorologische Schulung. Das setzt auch eine entsprechend enge Koordination zwischen Messflieger und Flugwetterberatungsstellen bzw. Wetterforschungseinrichtungen voraus. Es ist zu erwarten, dass dies künftig für spezielle Anwendungen mehr und mehr auf Echtzeit- und einer „Online“-Verfahrensbasis geschehen könnte.

In einem so außergewöhnlichen meteorologischen Fall wie bei dem Tornado, der am 23. Juni 2004 den Ort Micheln in Sachsen-Anhalt heimgesucht hat und dabei Verletzte und erhebliche Sachschäden (bis unbewohnbar gewordene Wohnhäuser) verursachte, dürfte eine unmittelbar begleitende Untersuchung allerdings auch künftig nicht möglich sein. Denn der Tornado wurde nach der sechsteiligen Fujita-Skala als "F3" eingestuft. Dabei treten Windgeschwindigkeiten von 250 - 300 km/h auf. Außerdem hatten sich aufgrund von sehr feuchter und milder Luft in Bodennähe zahlreiche Schauer und Gewitter entwickelt. (Angaben aus Meldung vom Samstag, 26. Juni 2004, „Tornado in Sachsen-Anhalt“, www.wetteronline.de, Stand: März 2005)

* Sturzfluten stellen die häufigsten Überschwemmungsursachen dar. Es handelt sich dabei um Starkregenereignisse, bei deren Verlauf das Oberflächenwasser nicht mehr schnell genug versickern oder über natürliche oder künstliche Vorfluter abfließen kann. V. a. verstopfen Drainagen und Kanäle durch herangespültes Material (Verklauserung); in der Folge kommt es beim Zusammenfließen mehrere Abflussströme an oder dicht unter der Oberfläche zu reißenden Wassermassen, deren Schadwirkung durch mitgespülte Gegenstände (z. B. Bäume, Abfalltonnen, Autos etc.) zusätzlich beträchtlich erhöht werden kann.

Fig. 218 Tornado über dem Ort Micheln; (Foto: Th. Fritz)



Deshalb würde es in einem so außergewöhnlichen Fall ausreichen, erst am nächsten oder übernächsten Tag vor Ort einzutreffen (mit einem konventionellen Motorsegler wäre man innerhalb weniger Stunden über jedem beliebigen Geländepunkt in ganz Deutschland), um die Wirkung solcher Ereignisse besser untersuchen und dokumentieren zu lernen. Auf die häufiger zu erwartenden kleineren Events in den kommenden Jahrzehnten kann man sich gezielt vorbereiten, um möglichst viele Echtzeitbestandteile in den zu erhebenden Datenreihen mit zu erfassen.

Merkmals	Quantifizierung	Bemerkungen
Gesamtbilanz	517 Tornados (1587 bis 1999)	Erhoben für die Ausdehnung des heutigen Deutschlands (davon 496 auf Monat oder Tag genau bekannt).
Zeitstatistik (10-Jahresperiode)	3 - 7 Tornados pro Dekade	Seit 1587
Zeitstatistik (10-Jahresperiode)	39 Tornados pro Dekade (Standardabweichung +/- 25 pro Dekade)	Seit 1870 (zunehmende Aufmerksamkeit)
Zeitstatistik (monatlich)	Maximum: Juni (27 % aller Fälle) 2/3 aller Fälle zwischen Juni bis August	Dieser Trend wurde schon 1917 von A. Wegener ermittelt; Tornadoereignisse folgen der jährlichen Gewitteraktivität (gezeigt von Finke & Hauf, 1996; Hagen et al., 1999); Tornados im Winterhalbjahr geknüpft an Durchzug kräftiger Sturmtiefs (vermehrtes Auftreten in der norddt. Tiefebene); Juli und August auch repräsentativ für Wasserhosen (auch Binnenseen!)
Zeitstatistik (tageszeitlich)	1400 - 1800 UTC (> 50 %)	(Wegener, 1917; Finke & Hauf, 1996; Hagen et al., 1999) 200 aller Fälle bekannt mit exakter Uhrzeit
Intensitätsverteilung	65 % schwach, nur 2 - 3 % heftig laut Torro/Fujita-Skalen – bisher beobachtetes Maximum T8/F4	
Geographische Wiederkehrrate	$0,1 - 0,2 \text{ a}^{-1} * 10^4 \text{ km}^{-2}$	Bezogen auf Gesamtstaatsfläche von $356\,984 \text{ km}^2$ Das entspricht österreichischen und schweizer Verhältnissen und ist insgesamt jeweils ca. 20-fach kleiner als im sog. Tornadogürtel der USA.

Fig. 219 Deutsche Tornadobilanz seit dem 16. Jh. (Dotzek, 2000), TorDACH –Kompetenzcenter für lokale Unwetter in Deutschland, Österreich und der Schweiz (www.tordach.org, 2004)

Mit Hilfe von Flugzeugen, die technisch ohne Schwierigkeit einen ganzen Sonnentag lang in der Luft bleiben können, stellt dieser Vorschlag keinen außergewöhnlichen Einfall mehr dar. Bezüglich einer derartigen Forschungsrichtung stehen wir dennoch erst ganz am Anfang der Entwicklung und eines sich nur allmählich herauskristallisierenden allgemeinen Interesses. Und dies, obwohl einige bedeutende Erkenntnisse schon über ein halbes Jahrhundert und länger bekannt sind. Die deutsche Lehrbuchreihe zur Allgemeinen Geographie (Hrsg.: E. Obst, ab Ende 50er Jahre) mag ein gutes Beispiel dafür sein. In Band II, „Allgemeine Klimageographie“ (Blüthgen, 1964), heißt es beispielsweise:

„Der mittlere Westen der USA besitzt die größte Häufigkeit (Kansas 3,2, Arkansas 3,0, Iowa 2,5 bis 2,3 pro Jahr, jedoch ist das Risiko, von einem Tornado betroffen zu werden, gering. Der kleine Durchmesser – im Durchschnitt nur 200 bis 250m – und die kurze Lebensdauer von im Mittel nur etwa 6km Weglänge bewirken, daß die Eintreffwahrscheinlichkeit je Quadratmeile im Hauptgebiet nur 1% pro Jahrhundert beträgt! Die USA zählen jährlich 245 durch Tornados tödlich Verunglückte und 11 Mill. Dollar Schaden. Die wohl größte Tornadokatastrophe in den USA, soweit Aufzeichnungen vorliegen, trat am 19. Februar 1884* ein, als nicht weniger als 57 Tornados an diesem einen Tage einen Schaden von 35 Mill. Dollar und 1200 Todesfälle verursachten. [...] Bei der Engräumigkeit und raschen Veränderlichkeit des Wirbels ist die Warnung jedoch schwierig. Andererseits ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 55 bis 60 km/h nicht übermäßig groß.“

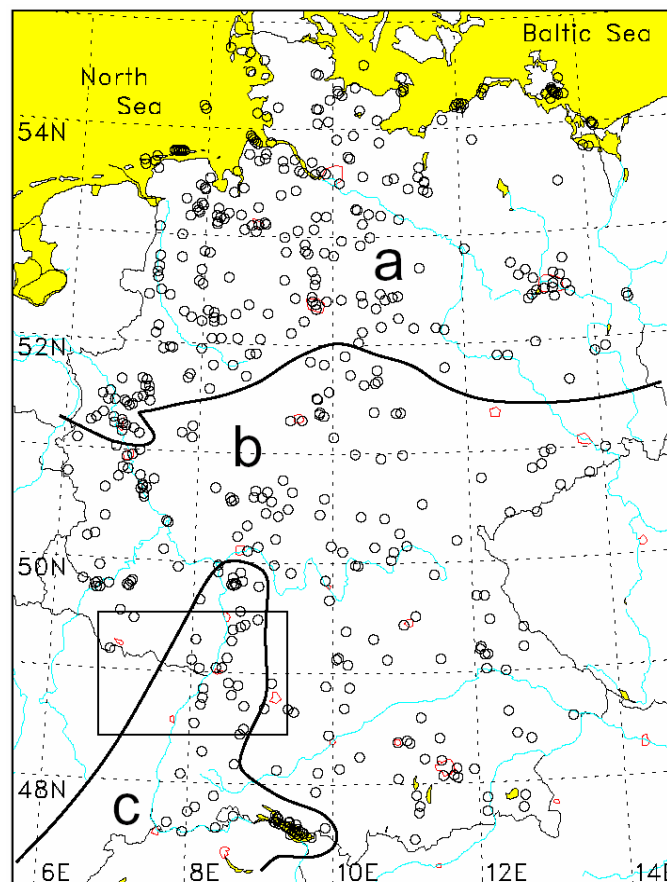


Fig. 220 Historisch lokalisierbare Tornados in Deutschland (1587 - 1999) – Bemerkenswert: Der bekannte Effekt der vermehrten Häufigkeit über Großstädten und Ballungsräumen. (Dotzek, 2000)

* Die Ursprünge der wissenschaftlichen Tornadoforschung werden heute in dem Werk „Tornadoes – What They Are And How To Observe Them; With Practical Suggestions For The Protection Of Life And Property“ von John P. Finley gesehen (erschienen 1887). Er unterbereitet darin erstmals eine US-kontinentalweit erhobene Tornadostatistik mit 1867 Vorkommen über 205 Jahre (1682 - 1886). Bezeichnenderweise war Finley ein Offizier des Signal Corps der US Army und veröffentlichte sein Buch in New York als Mitglied der Société Météorologique de France und als Honorary Fellow of the Royal Society of Science, Letters and Art, London, unter der Herausgeberschaft von „The Insurance Monitor“! (Dem Verfasser liegt eine Scankopie der Originalausgabe als PDF-Datei vor.)

Tornados stellen jedoch nur einen der geringeren Anteile natürlicher Gefährdungspotenziale dar. Die Versicherungsbranche – speziell die global tätigen Rückversicherer – sind in der Lage, die Notwendigkeit für eine zunehmend mobiler werdende Schadensdokumentation anhand registrierter Eintrittsfälle von Umweltkatastrophen detailliert zu belegen:

Datum	Ereignis	Betroffenes Gebiet	Todesopfer	Gesamtschäden in Mio. DM*
16.–17.11.1911	Erdbeben	Schwäbische Alb		200
Aug. 1920	Überschwemmung	Donaugebiet		80
Dez. 1925– Jan. 1926	Überschwemmung	Rheingebiet		80
Juni–Juli 1926	Überschwemmung	Rheingebiet		120
04.07.1929	Hagel	Baden-Württemberg, Bayern		200
14.03.1951	Erdbeben	Nordrhein-Westfalen, Euskirchen		2
31.01.– 02.02.1953	„Hollandflut“, Wintersturm	Gesamtes Bundesgebiet, bes. Nordseeküste		
18.07.1953	Hagel	Bayern		100
12.–14.07.1954	Überschwemmung	Donaugebiet		200
16.–17.02.1962	„Hamburger Sturmflut“	Nordseeküste, Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein	347	2400
21.–23.02.1967	Wintersturm	Gesamtes Bundesgebiet, bes. Schleswig-Holstein, Nordseeküste	40	1200
10.07.1968	Tornado	Baden-Württemberg, Pforzheim	2	125
12.–13.11.1972	„Niedersachsen-Orkan“	Gesamtes Bundesgebiet, bes. Niedersachsen, Harz	47	1340
16.–18.08.1974	Hagel	Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Bayern		150
09.08.– 16.08.1975	Dürre, Waldbrände	Niedersachsen, bes. Lüneburger Heide		40
02.–04.01.1976	„Capella-Orkan“, Sturmflut	Gesamtes Bundesgebiet, bes. Hamburg, Nordseeküste	27	870
22.–26.05.1978	Überschwemmung	Hessen, Baden-Württemberg, Bayern	3	700
3.09.1978	Erdbeben	Baden-Württemberg, Hohenzollerngraben, Albstadt		275
29.12.1978– 04.01.1979	Schneesturm, Frost	Gesamtes Norddeutschland		150
12.07.1984	Hagel	Bayern, München; Baden-Württemberg		3000
25.01.– 01.03.1990	Winterstürme „Daria“, „Herta“, „Vivian“, „Wiebke“	Gesamtdeutschland	64	7100
13.04.1992	Erdbeben Roermond	Nordrhein-Westfalen, Heinsberg		80
Juli 1992	Dürre, Waldbrände	Gesamtdeutschland 80		80
27.–28.05.1993	Hagel	Bayern, Nordrhein-Westfalen		300
21.–27.12.1993	Überschwemmung	Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg	5	1035
27.01.1994	Wintersturm „Lore“	Gesamtdeutschland, bes. Baden-Württemberg, Hamburg	6	700
13.–18.04.1994	Überschwemmung	Sachsen-Anhalt, Thüringen	2	300
Juli 1994	Dürre	Gesamtdeutschland		160
04.07.1994	Hagel, Unwetter	Nordrhein-Westfalen, Köln	5	1000
22.01.– 03.02.1995	Überschwemmung	Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg	5	550
Dez. 1996– Jan. 1997	Kältewelle, Frost	Gesamtdeutschland	45	450
17.07.– 10.08.1997	Überschwemmung	Odergebiet, Ziltendorfer Niederung		650

Fig. 221 Auswahl bedeutender Naturkatastrophen innerhalb des 20. Jh. in Deutschland; Bericht Münchener Rück, 302-01037.pdf, 1999, (Quelle: <http://www.muenchennerrueck.de>, 2004)

Die obige Tabelle umfasst nur die schwersten Ereignisse. Die Zahl der registrierten Fälle ist höher, wie nachfolgendes Diagramm ausweist.

Anzahl der Ereignisse in Deutschland 1970–1998

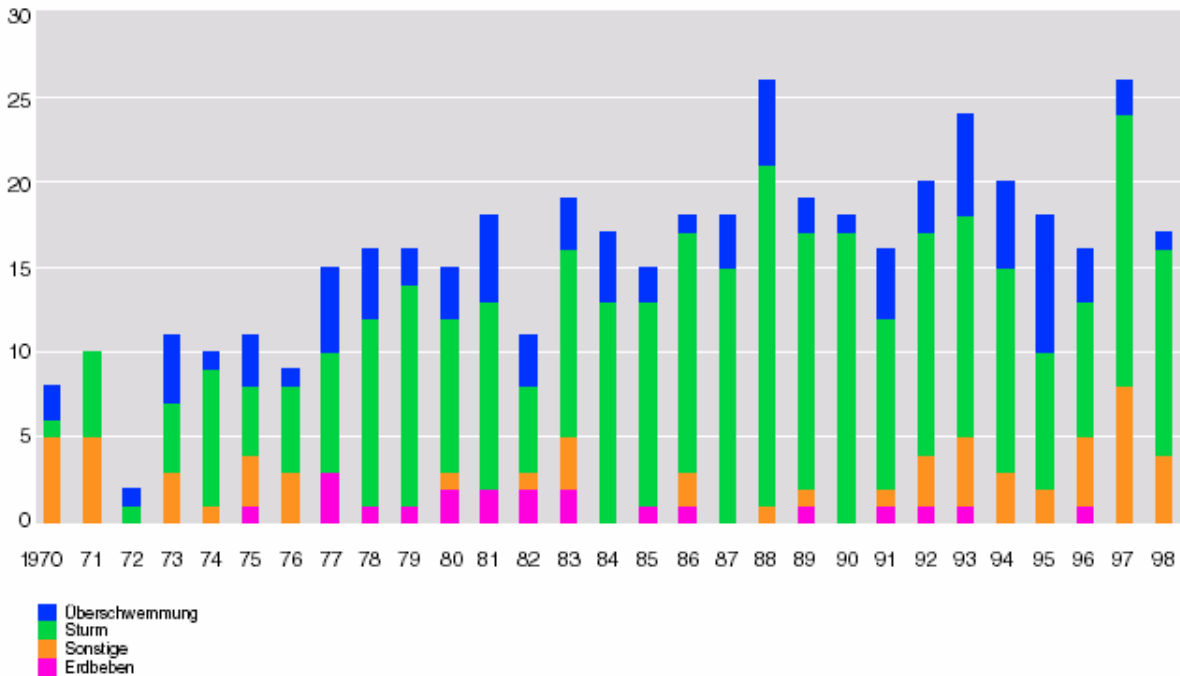


Fig. 222 Jährliche Ereignishäufigkeit nach Schadenskategorie; (ebd.)

Der Jahresgang der schwereren Ereignisse, die dokumentiert werden, ist intensiv erforscht und bekannt.

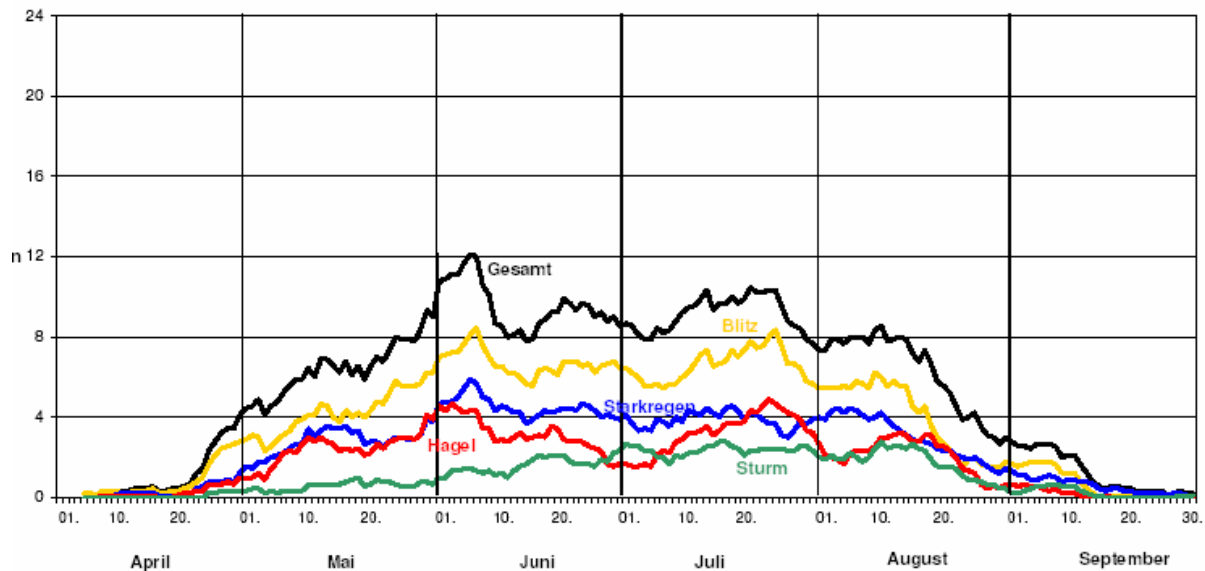


Fig. 223 Typischer Jahresverlauf von Gewitterschadensereignissen (Gesamt-, Blitz-, Starkregen-, Hagel-, Sturmereignisse) für das hessische Berg- und Beckenland und das Rhein-Main-Gebiet im Zeitraum von 1881 - 1980 (ohne 1941 - 1950) (Gudd, 2003).

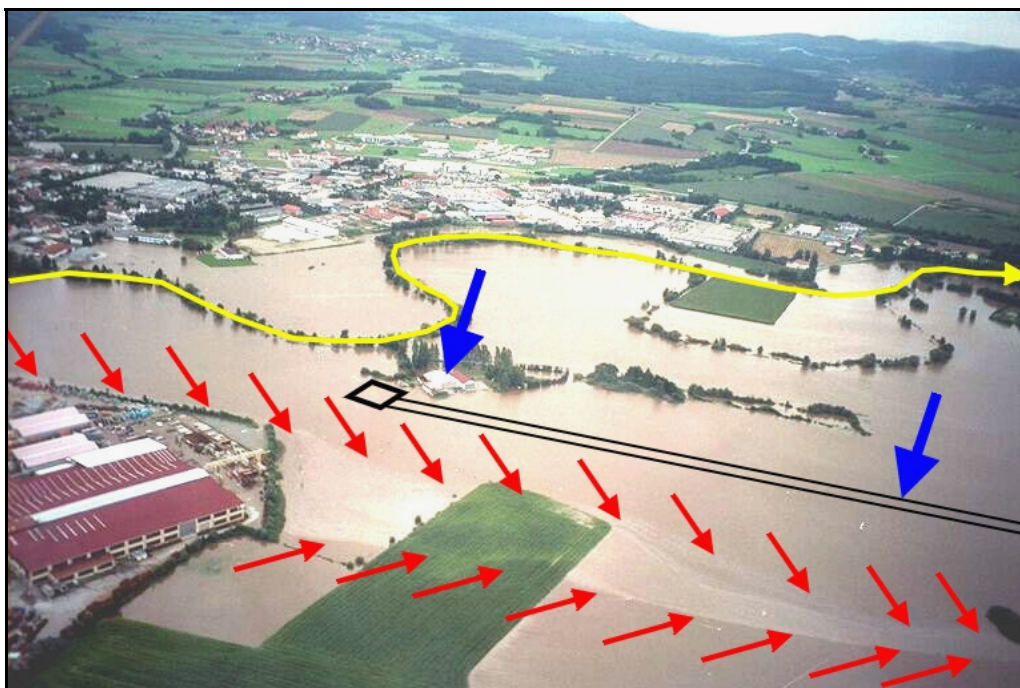
Allerdings sind mir bislang keine systematischen Untersuchungen bekannt geworden, die darauf abzielen, mit zeitlich und räumlich hochauflösender Fernerkundungsmethodik das

landschaftliche Wirkungsgefüge auf der Ebene einer kleineren Arbeitsgruppe abzubilden, wie sie typisch für Forschung und Hochschule gelten kann.

Das Alleinstellungsmerkmal von Universitäten, außeruniversitären Umweltforschungszentren, Fachbehörden und Ingenieurdienstleistern wird in der Verwendung von modularen und multisensoriellen Messanwendungen liegen, die mittels Autogeoreferenzierung weit über die GPS-gestützte Luftbilderhebung hinaus gehen. Das Gütekriterium wird dabei weder auf der erzielbaren geometrischen noch auf der temporalen Auflösung des Sensors liegen. Das Qualitätskriterium wird sich auch nicht nach der effektiven Flächenleistung eines Luftbildaufnahmesystems bemessen, sondern einzig und allein auf der raschen GIS-Integrationsfähigkeit des Primärdatensatzes beruhen.

Mittel- und langfristig betrachtet wird dies das einzige Unterscheidungsmerkmal zwischen staatlicher Forschungseinrichtungen und übriger Initiativen sein, die sich dem Flugzeug als leistungsfähigem Monitoring-Instrument zuwenden*.

Wie man anhand der Einsatzstatistiken von Polizei und anderen mit katastrophenschutzdienstlichen Aufgaben betrauten Einrichtungen zeigen kann, werden Umweltforschungseinrichtungen gegenüber einem derartigen Flugaufkommen nicht annähernd konkurrieren können. Das wäre auch nicht die zu verfolgende Zielstellung. Was getan werden könnte, wäre eine Heranführung von innovativen Messflugzeugen an Brennpunkte des Geschehens, um neben der üblichen fachlichen Koordinierung von Hilfs-, Einsatz- und Bergungskräften entsprechende Orte mit größerer Prozessdynamik auch aus einer grundlagenorientierten, geographischen Sichtweise heraus zeitnah zu erkunden.



* Vgl. hierzu beispielsweise „Luftrettungsstaffel Bayern e. V.“, gegr. 1968 (www.lrst.de)

Fig. 224 Hochwasserkatastrophe in Cham/Opf. (Ostbayern) am 12./13.08.2002 – Blick nach SW über den Flugplatz Cham-Janahof auf 369 m ü. N. N. mit der Stadt im Rücken (blaue Pfeile, schwarze Linien: Lage der Startbahn). Der mäandrierende Seitenarm des Flusses „Regen“ ist gelb markiert. Im Vordergrund ist deutlich ein Ölfilm auf dem Wasser zu erkennen (rote Pfeile), wenige hundert Meter stromaufwärts befand sich eine überschwemmte Tankstelle (mit freundlicher Genehmigung: Joh. Groitl, 2005)

Ob ein oder mehrere Flugzeuge zusätzlich über einem großräumigen Überschwemmungsgebiet kreisen (z.B. Oderbruch 1997 und 2002), macht in der fliegerischen Praxis keinen spürbaren Unterschied und erzeugt deshalb kaum ernstzunehmende Hürden. Für das Verständnis der Mensch-Umwelt-Beziehungen könnten sich darüber in vielfältiger Weise neue Impulse ergeben. Aus dem umfangreichen Zahlenwerk, das mit dieser Arbeit geliefert wird, geht u.a. hervor, dass aus historischer Sicht ein gewisser Bedarf für Luftbildaufnahmesysteme zu bestehen scheint, der nur schwer quantifizierbar ist, da das Thema bislang einer breiteren Öffentlichkeit über Dekaden hinweg verborgen geblieben ist.

12 Schlussfolgerungen

Eine der wichtigsten Erkenntnisse, die sich aus dem Studium der Wissenschafts- und Technikgeschichte ergeben, lautet: Bei äquivalenter, struktureller Vergleichsbetrachtung entspricht ein Fernerkundungs-Flugzeug im 21. Jh. einem Linsenteleskop im 16. Jh.! Landschaftsforschung, Landnutzungsforschung, Kulturlandschaftswandel, klimageographische Untersuchungen, Planungsprojekte und Multimediagrundlagen können unter praxisnahen Bedingungen mittels leichter Umweltmessflugzeuge untersucht und datentechnisch aufbereitet werden. Jedoch herrscht gegenüber der explosiven Zunahme an Datenverarbeitungskapazitäten und allmählich größer werdendem Bedarf (Rohdaten hunger) geradezu ein Vakuum an derartigen Mess-Instrumenten.

Das größte Problem beim Einsatz von Fernerkundungsmethoden stellt der damit zwangsläufig verbundene Geocodierungsaufwand dar. Er belastet die Budgets regelmäßig weitaus am stärksten. Die Geocodierung ist als vorbereitende Maßnahme einer GIS-gestützten Datenveredelung nicht mehr aus den Umwelt- und Geowissenschaften wegzudenken (quantitative Revolution).

Direkte Autogeoreferenzierung in Verbindung mit volldigitaler Photogrammetrie (d. h. lückenlos geschlossene, digitale Prozessketten) werden künftig die beiden wesentlichen Schwerpunkte sein, auf denen die luftgestützte Fernerkundung ruht. Gegenüber einem einfachen konventionellen, analogen Luftbild entspricht das korrespondierende digitale Luftbild eines luftgestützten Primärdatengewinnungssystems dem Endprodukt eines messtechnischen Vorgangs, der wiederum zu einer dramatischen Arbeitsentlastung bei der Geocodierung führt. Einige vorläufige Abschätzungen dazu sind in vorhergehenden Kapiteln enthalten bzw. ergeben sich indirekt über das Gesamtgefüge des hier erhobenen Zahlenmaterials.

Es ist leicht nachvollziehbar, dass die Geoinformatik- und Softwareindustrie mit 10 bis 20 % Marktwachstumsraten mittel- und langfristig das entscheidende Schwungrad für die Primärdaten-Anbietermärkte sein werden. Aufgrund des steilen Anstiegs der Verarbeitungskapazität der sich in den letzten Jahren stark ausbreitenden GIS- und FE-Computer-Arbeitsplätze wird eine steigende Nachfrage nach Geoprimärdaten zur Folge haben, denn es macht wenig Sinn mit leistungsfähiger Bearbeitungssoftware fertige Datenendprodukte zu visualisieren. Den Rohdaten kommt daher eine entscheidende Bedeutung zu. Der Effekt des „Rohdaten hunger“ (um die Geschwindigkeit, mit der dieser Prozess abläuft, zu betonen) wird sogar weiter zunehmen, wenn man davon ausgeht, dass eine weltweite Sättigung mit solchen Arbeitsplätzen heute noch nicht eingetreten ist und in unabsehbarer Ferne liegt.

Methodische Grenzen der Fernerkundung treten dann deutlich hervor, wenn man Daten für eigene, zeitsensitive Fragen aus Archivbeständen heraus beziehen möchte. Die zunehmende Verbreitung von Automatisierungsfunktionen in aktueller Software aus der Geoinformatik verstärkt die allmählich spürbare Kluft zwischen Nutzungsansprüchen und der Datenverfügbarkeit für kleinere Projekte auf lokaler Ebene mit Untersuchungsgebietsgrößen von selten mehr als einigen hundert Hektar. Solche Projekte stehen bezüglich ihrer

Nutzungsansprüche in direktem Einklang mit unterschiedlichsten Industriestudien und –befragungen zur bevorzugten geometrischen Auflösung sowie zur üblicherweise gewünschten Datenverfügbarkeit (wenige Tage).

Für eine unbekannte Masse an potentiellen Nutzern scheint es innerhalb dieser zwiespältigen Gesamtsituation im Moment keine wirtschaftlichen Lösungen zu geben. Zudem geht aus den vorgestellten Marktstudien hervor, wie uneinheitlich die arbeitsintensive und akademisierte Geoinformatik-Industrie beschaffen ist.

In Deutschland verfügen wir derzeit über etwa 20 Fernerkundungsflugzeuge, die in ganz Europa und im Nahen und Mittleren Osten saisonal tätig sind. Der aktuellen Bildflugflotte stehen im deutschsprachigen Raum alleine 181 618 Desktop-GIS-Seats gegenüber (GIS-Report 2003). Ein einziges Bildflugzeug ist imstande, weit mehr an Daten zu erheben, als Bearbeitungskapazität zur Geocodierung des anfallenden Bildmaterials dafür vorhanden wäre, sofern ohne Autogeoreferenzierung geflogen wird und sofern man die Photogrammetrie als dominierende Form der Primärdatenverarbeitung im professionellen Markt anerkennt. Jedes Flugzeugaufnahmesystem erlaubt es mühelos, geometrische Auflösungen zu erreichen, die um das 5-fache besser sind als die der hochauflösendsten heute auf dem freien Markt erhältlichen Satellitendaten. VHRO-Satelliten können nicht mit Bild-Flugzeugen auf eine Stufe gestellt werden und sie werden auch künftig nicht dieselben geometrischen Auflösungsleistungen erbringen können – zumindest nicht, wenn dem Designzweck solcher Satelliten rein kommerzielle Interessen zugrunde liegen (für militärische Aufklärungsergebnisse mag es bedeutungslos sein, den Satelliten aufgrund seiner niedrigen Flugbahn in nur wenigen Wochen durch den Einfluss der Bremsreibung der Erdatmosphäre auf Orbits unter 150 km abschreiben zu müssen).

Die Repetitionsrate von Flugzeugen lässt sich umso eher wiederholen, je kleiner das Projekt ist. Aus diesen Ursachen folgt die Überlegenheit und künftige Unverzichtbarkeit von flugzeuggestützter Fernerkundung. Dies gilt auch hinsichtlich der Langfristperspektive.

Die optische Fernerkundung mittels Flugzeugen ist ein hochgradig kommerzialisiertes Geschäft, über das – ganz im Gegensatz zu staatlichen und kommerziellen Satellitenprogrammen – relativ wenig in Erfahrung zu bringen ist, weshalb man sehr viel Zeit und Energie für die Erarbeitung indirekter Analyseverfahren investieren muss, um ein paar wesentliche Marktcharakteristika zu erfassen. So bedeutet es durchaus ein überraschendes Ergebnis dieser Untersuchung, dass seit dem Beginn der Militärfliegerei vor etwa 100 Jahren weltweit stets bis zu 1/3 aller Militärfluggeräte für die (Bild-)Aufklärung ausgerüstet waren. Es ist erstaunlich, dass so eine Erkenntnis bislang offenbar noch nicht gemacht wurde, um darüber ein paar wenige Flugzeuge für eine Umwelterkundung im wissenschaftlichen Aus- und Weiterbildungsbetrieb zu fordern.

Weiterhin kam bei dem Versuch die historische Grundmenge an Flugzeugen in ihrem absoluten Umfang zu bestimmen das ebenso erstaunliche Ergebnis zustande, nach dem einem heute aktuellen Bestand von mehr als 700 Mill. motorisierten Landfahrzeugen ein historischer Gesamtbestand von nur etwa 3,3 Mill. motorisierter Luftfahrzeuge gegenübersteht. Dazu muss allerdings eingeräumt werden, dass diese erste Abschätzung auf Zahlen beruht, die in sich zwar überschaubare Abweichungen bergen, dafür jedoch auf Einzelstudien beruhen, deren Untersuchungsschwerpunkte größere Abweichungen von der statistischen Grundgesamtheit nicht ausschließen können (eine entsprechende Erhebung mittels historischer Primärquellen wäre gemessen an dem zu erzielenden Aussagewert zu aufwendig und daher nicht sinnvoll). Aber selbst unter Gefahr von Schätzfehlern um 100% und mehr ist

das hier ermittelte Absolutverhältnis unter dem industriewirtschaftlichen Aspekt betrachtet, äußerst aufschlussreich. V.a., wenn man an dem hier zusammengefassten Quellmaterial ablesen kann, dass die wesentlichen Entwicklungs-Impulse für Luftfahrt-Innovationen deutlich im ersten Drittel des 20. Jhs. bis etwa zur Jahrhundertmitte anzutreffen sind. Des Weiteren lässt sich aus der luftfahrthistorischen Zusammenschau die beträchtliche Zunahme der allgemeinen Flugsicherheit herauslesen (ermittelter Verbesserungsfaktor: 170).

Beim Erreichen einer Blüteperiode der technischen Aerodynamik gegen Ende der 50er Jahre (z. B. North-American X15 mit Mach 6,72) war der Weg in den Weltraum durch geopolitische Grundpositionen und militärische Sachzwänge bereits unausweichlich vorgezeichnet. Anhand der Flugzeug- und Raketenentwicklung lässt sich aufzeigen, wie sich die Arbeitsmethoden von punktuellen Kartierschwerpunkten gegen Mitte des 20. Jhs. zur flächendeckenden Methodik mit der Notwendigkeit zur Ableitung von digitalen (3D-)Geländeoberflächen ausweitete. Über zwei Drittel des ersten Jahrhunderts der Fliegerei hinweg haftete der Photogrammetrie dabei etwas Verborgenes, Exklusives und Monopolistisches an, da sie im Wesentlichen (macht-)staatlich motiviert betrieben wurde. Die gesellschaftspolitische Ära des Kalten Krieges ist seit eineinhalb Dekaden vorüber. Eine direkte Auswirkung davon ist weitestgehende geopolitische Transparenz, die auf globaler Ebene offensichtlich mittels Aufklärungssatelliten erzwungen wird bzw. wurde. Vor diesem Hintergrund bricht daher ein grundlegender und überwiegend politisch motivierter Vorbehalt gegenüber dem Bau von Messflugzeugen weg – zumindest, was den modernen Industriestaat der nördlichen Hemisphäre angeht. Seit dem Ende des Kalten Krieges und dem Erscheinen der kommerziellen Satellitenkonkurrenz begann sich dies in einem stetig beschleunigenden und zugleich unumkehrbaren Prozess herauszubilden: die Abgeschlossenheit der Flugzeugfernerkundung bricht auf und wird begleitet vom einsetzenden Aufschwung der Geoinformatik als Industrie.

GIS ist über die letzten 3 Jahrzehnte zu einem zentralen Arbeitsinstrument für die Umweltforschung herangereift. Die Notwendigkeit, in GIS rasterbasierte Datensätze zu verwalten, ergibt sich aus deren ungleich höheren Anschaulichkeit, als derjenigen von Vektortopologien, bestehend aus Punkten und (gerader) Verbindungslinien. Sollen mehrere thematische Ebenen simultan dargestellt und analysiert werden, spielt eine korrekte Georeferenzierung die entscheidende Rolle. Luftbilder werden aufgrund der erzielbaren geometrischen Auflösung und der Anwendungsflexibilität des Flugzeugs im Vergleich zu Satellitendaten auch weiterhin eine dominierende Rolle für die Geoinformatik spielen, da der gesamte Markt bestrebt ist – wie unabhängigen Quellen in einhelliger Übereinstimmung entnommen werden kann – in „Very High Resolution“(VHR)-Bereiche mit geometrischen Auflösungen von weniger als 1,0 m vorzudringen.

Weiterhin haben in der Vergangenheit Flugzeuge ihren Wert gerade in jenen Situationen gezeigt, bei denen rasche Veränderungen in einem Beobachtungsraum stattfinden (wie die geschilderte militärische Herangehensweise veranschaulicht), die einem Bodenbeobachter mitunter nicht in vollständigem Ausmaß zugänglich sind. Für Umweltfragen ergeben sich unter diesem Aspekt zwei entscheidende Anwendungsbereiche: Kalamitätenforschung im Sinne einer Schadens- und Wirkungsdokumentation unerwarteter Einzelereignisse in allen Geokompartimenten (z. B. Wind- und Schneebruch, Überflutungen, Damnbrüche, Hangrutschungen, Erdbeben, Vulkanausbrüche etc.) und Hazardforschung, die langsame, quantifizierbare Veränderungen identifizieren helfen soll (z. B. Dynamik von alpinen Hängen

und marinen Steilküsten, Deich-, Fließgewässer-, Straßenzustandserfassung und die routinemäßige Kontrolle von Versorgungsinfrastruktur jeglicher Art).

Verallgemeinert betrachtet geht es also bezüglich einzelner Forschungsthemen vordergründig darum, das prozessuale Wirkungsgefüge möglichst rasch zu erfassen und in digitaler Form elegant, d. h. mit möglichst geringem Aufwand, aufzubereiten. Der Vorgang des Erfassens selbst wird bereits einen gewissen Nutzwert entfalten können, wenn er entsprechend zügig und zielgerichtet erfolgt. Dieser Schritt entspricht einer ersten Nutzwertstufe, die bei der Erzeugung und bei der Verarbeitung von Fernerkundungsdaten erkannt werden kann. Es ist der Direktwert der Daten (Luftbildinterpretation). Eine zweite Stufe von Nutzwert liegt Fernerkundungsdaten im Erkenntnisgewinn zugrunde, der aus der Ableitung numerischer Simulations- und quantitativer Analyseergebnisse resultiert (Modellierung und Luftbildmessung). Diese Ergebnisse beruhen heute und künftig auf physikochemischen Simulationsmodellen (im Wesentlichen Stofftransport und Energiehaushalt) mit räumlich diskreten 2,5D- bzw. 3D-Modellen, für die sich rasterbasierte Daten zur räumlichen Diskretisierung besser eignen als Vektordaten, weil sie Flächenaussagen erlauben. Für beide genannten „Nutzwertstufen“ von Fernerkundungsdaten ist es gleichermaßen notwendig die tatsächliche Erfassungsleistung der Sensorik zu erhöhen und die zeitliche Komponente (vornehmlich bedingt durch die Geocodierung) drastisch zu senken.

Trotz des drohenden Werteverfalls eines Einzelbildes durch die stetig zunehmende Verbreitung der Digitalkameratechnik steigt der erfassbare Nutzwert von GPS-gestützt erfliegenen Bilddaten an. Integriert in leichte Flugzeuge mit GPS-gekoppelten Flugführungssystemen tragen Luftbilder im Gegensatz zu fotografischen Arbeiten in einem Fotostudio viel eher den Charakter eines messtechnischen Vorgangs. Setzt eine Institution eine (D)GPS/INS-gestützte Plattform ein, so wird jeder Messflug zu einem Experiment, das einem Laborbetrieb in nichts nachsteht (da mittels GPS-Koordinaten jeder „Versuch“ punktscharf reproduziert werden kann). Jede Datenauswertung erfolgt dann in einem zweistufigen Prozess:

- zum einen in Form einer Geocodierung der Bilddaten für direkte GIS-Integration,
- zum anderen durch ein Verfahrensbündel, das aus Luftbildinterpretation, der Verknüpfung von Prozess-Simulationen und dem Aufbereiten von Landschaftsobjekten in 3D-Modelle bestehen kann,

wobei der Stufe 1 (GIS-Integration) die zentrale Bedeutung zukommt.

Im Sinne der technischen Wertigkeiten in den Eingangsbetrachtungen lassen sich anhand der hier zusammengetragenen Informationen folgende subjektive Einzelbewertungen verschiedener Fernerkundungsmethoden aufstellen:

Instrument	Technische Wertigkeit	Methodik	Technische Wertigkeit	Information	Technische Wertigkeit
Ballon-, Zeppelin- und Drachenfernerkundung	0,2	Punktaufnahmen	0,6	Archivluftbilder (für ökosystemare Forschungszwecke!)	0,2
Drohne	0,3	Schräg-Aufnahmen	0,7	KB-Analogbilder	0,4
Flugzeug LK X/Stufe 1	0,4	Airborne Video	0,8	KB-Digitalbilder	0,6
Flugzeug LK VI/Stufe 2 oder 3	0,8	Streifen-Aufnahmen	0,8	MF- Analogbilder	0,7
Flugzeug LK I/ Stufe 4	1,0	Mosaik	1,0	MF-Digitalbilder	0,8
		Vertikal-aufnahmen	1,0	Analogbilder konventionell	0,9
		Multispektral-Fernerkundung	1,0	Digitalbilder Reihenmess-Kameras	1,0
		Multisensorielle Fernerkundung	1,0		

Fig. 225 Subjektive Festlegung technischer Wertigkeiten für einzelne Elemente der luftgestützten Fernerkundung

In der vorliegenden Arbeit wurde u. a. der Versuch unternommen, aufzuzeigen, dass eine luftgestützte Fernerkundung mittels kleiner Sensoren („Small-Format“-Ansatz) bislang operationell unter wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nur begrenzt realisiert werden konnte und sich dies erst mit Einführung der Autogeoreferenzierung grundlegend ändern kann. Die zentrale Idee hierbei: Computergestützte Präzisionsflugführung und automatisierte Geocodierungsschritte gleichen die geometrischen Aufnahme-Beschränkungen kleiner aber finanzierbarer Sensoren aus dem Massenmarkt wirksam aus. Darüber hinaus erzielt man mit der Autogeoreferenzierung in jedem Fall enorme Produktivitätsvorteile, die in der vorliegenden Arbeit exemplarisch vereinfacht umrissen wurden.

Künftige Messflugsysteme ruhen auf 4 unabhängig voneinander betrachtbaren Säulen: Flugzeug, Sensorik, Flugführungssystem und bodengestützter Auswertekomplex. Software ist der integrierende Bestandteil dabei. Autogeoreferenzierung ist die wesentliche Integrationsstufe, die es zu nehmen gilt (Optimalsystem: LKI / Stufe 4).

Es macht zunehmend weniger Sinn, heute noch Firmen- und Forschungskultur künstlich trennen zu wollen. Das, was im 19. Jh. ein Gelehrter an Fortschritt erzielen konnte, benötigt heute ein wirtschaftliches Unternehmen. Es erscheint daher von beschränktem Wert zu sein, eigene technische Lösungen entwickeln zu wollen (eigene Konzepte ja, aber eigene Technologie nur in wenigen Ausnahmefällen). Es ist viel eleganter, die Kraft von globalen Massenmärkten auszunutzen, um deren Produktlinien in neue technische Aggregationen umzuformen. Es macht jedoch unter allen Umständen Sinn, mit staatlichen Fördermitteln kleinskalige Projekte mit Leitbildcharakter zu fördern, da sonst zunehmend die Gefahr droht in der Hochschul-Ausbildung auf praxisrelevante Lehrinhalte aufgrund mangelnden Überblicks gar nicht mehr eingehen zu können.

Die derzeit im weltweiten Vergleich einzigartige Heimesplattform betrachte ich als die zivile Basislösung für wirtschaftlich vertretbare operationelle Umwelt-

Fernerkundungsanwendungen, bei denen nicht die Erzeugung von kommerzialisierbaren Flächenmassendaten im Vordergrund stehen, sondern das ergänzende zielgerichtete Aufspüren von lokalen Umweltanomalien mit der Absicht, das Zusammenwirken von Einflussparametern in ihrer Gesamtwirkung zu studieren. Die Heimesplattform vereint die (D)GPS/INS-Autogeoreferenzierung in einer modularen Umgebung in sich. Die Heimesplattform besitzt daher im historischen Abgleich hinsichtlich kleinskaliger Umweltmonitoring-Projekte heute in etwa denselben Stellenwert wie ein H4-Schiffs-Chronometer für die Hochseefahrt im 18. Jh. Mit der Emergenz dieser Technologie verschwindet im Zuge einer systematisch angelegten und ernsthaft begründeten Herangehensweise jegliche Relevanz, sich instrumentell unterhalb dieser Ebene zu bewegen.

Als ein weiteres bedeutendes Arbeitsergebnis kann festgehalten werden, dass im historischen Gesamtrahmen Flugzeuge als Instrumente für frei planbare Messflüge außerhalb primär kommerzieller Zielstellung und der damit verbundenen Beschränkungen auf staatlicher Ebene bislang nur in marginalem Umfang operationell eingesetzt wurden. So etwas wie ein „freier Messflug“ ist abgesehen von Einzelercheinungen innerhalb der Luftbildarchäologie so gut wie unbekannt. Mit anderen Worten: Außer in der Luftbildarchäologie lässt man sich kaum von landschaftlichen Besonderheiten schon während der Datenerhebung lenken. Eine Vorsortierung des zu erhebenden Datenmaterials findet an Bord von Bildflugzeugen nicht statt. Eine landschaftsbezogene Interaktivität fehlt nahezu gänzlich. Diese Tatsache unterscheidet das Flugzeug als Werkzeug deutlich von allen übrigen Investitionsgütern, die ihren Weg aus der Technikforschung heraus und in eine anwendungsorientierte Forschung zurück gefunden haben. Mit jedem anderen Investitionsgut wird sorgloser und entspannter umgegangen als mit einem Flugzeug, selbst wenn der Gefriertrockenschrank oder das Rasterelektronenmikroskop ein Vielfaches mehr an Investitionsvolumen in sich trägt. Eine gar spielerische Heranführung an das Thema Luftbildforschung ist aus diesen Gründen bis in die Gegenwart hinein praktisch unmöglich – und dies seltsamerweise trotz aller Umwälzungen, der Typus des UL-Flugzeugs mitbrachte.

Für eine Ausweitung der instrumentellen Ökosystemforschung in die dritte Dimension würde der postulierte Rohdaten hunger bedeuten, dass eine wissenschaftlich orientierte Geofernerkundung angesichts der ausführlich geschilderten Bildflugentwicklung mit einigem zeitlichem Versatz und einer nahezu vernachlässigbaren Amplitude bezüglich des gemachten Aufwandes gegenüber den militärischen Entwicklungslinien nacheilen. Wie man aus dem präsentierten Zahlenwerk zusammenfassend ablesen kann, beträgt die Verzögerung etwa 50 - 80 Jahre und tritt mit einer Absoluthäufigkeit (operationell zur Verfügung stehende Messflugzeuge) von mehreren Größenordnungen (10^5 bis 10^6 und schlechter!) auf. Die positive Botschaft hierbei lautet, dass die Umweltforschung dem historischen Gesamt-Prozess in der kommerziellen und militärischen Luftfahrt nicht über alle Skalenebenen und Entwicklungsschritte hinweg zu folgen braucht: Mit leichten propellergetriebenen Motor- oder Dieselflugzeugen mit Triebwerksstärken um 100 – 150 PS, Reisegeschwindigkeiten von etwa 200 km/h und bis zu der (luftrechtlich) bedeutenderen Einsatzhöhengrenze von 3000 m über Grund wird die Entwicklung ein vorläufig als ausreichend anzusehendes Zwischenniveau erreichen. Das entspricht einer Synthese von technischen Möglichkeiten auf und unterhalb des Niveaus der 30er und 40er Jahre im vorigen Jahrhundert.

Die neu zu erschließenden Marktsegmente benötigen aufgrund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen höchstwahrscheinlich keine 2500 PS starken und 750 km/h schnellen Propeller- oder Turbinenflugzeuge (technischer Stand etwa 40er/50er Jahre). Jets

sind für eine operationell betriebene SFAP-Monitoringaufgabe auf lokaler Ebene zu schnell und können darüber hinaus nicht wirtschaftlich genug betrieben werden, wie Erfahrungen aus unterschiedlichen Richtungen belegen.

Unabhängig davon, welches Industrieprodukt man heute erwirbt: Es ist durch strenge Qualitätssicherungsfilterstufen gelaufen. Eine grundsätzliche Idee, die auf dieser Beobachtung beruht, besteht nun darin, dass sich bei immer höher ansteigender Integrationsdichte von Anlagen, immer kleiner werdenden Systemkomponenten und immer vielfältigeren Anwendungen der Zugriff und die unmittelbare Verwendbarkeit von Messtechnik zum operationellen Einsatz für die instrumentelle Umweltsystemforschung kontinuierlich beschleunigt, weil sich diese immer leichter anwenden lassen. Es besteht deshalb die durchaus berechtigte Hoffnung, mehrere unterschiedliche Wirksphären von Technik ohne überproportional ansteigenden Mehraufwand miteinander kombinieren zu können. Ein entsprechender Totalausfall eines Subsystems wirkt sich dadurch weniger dramatisch aus, weil aus der Massenproduktion stammende Großserienelemente entsprechend preiswert ersetzt werden können (extreme Idee: ein ganzes Bündel von bluetooth-fähigen Industrieminiaturkameras als Fernerkundungssensoren in Trimetrogon-Anordnung). Andererseits lässt sich nicht alles käuflich erwerben. Aus diesem Grund muss der entsprechende Hebel (Zeit x Geld = Aufwand) in geeigneter Weise an wenigen kritischen Stellen vernünftig angesetzt werden.

Diese Betrachtung führt langfristig betrachtet geradewegs zum „Multisensor“-Konzept der Fernerkundung, das in dieser Arbeit noch nicht explizit dargelegt wurde, obwohl der logische Schritt dazu klar vorgegeben ist. Die Argumentation folgt etwa dieser Anschauung: Eine IMU als Herzstück einer für die Autogeoreferenzierung notwendigen Stabilisierung kostete zur Jahrtausendwende grob 100.000 Währungseinheiten. Es ist das mit weitem Abstand teuerste Bauteil einer integrierten autogeoreferenzierungstauglichen Flugführungsanlage. Verwendet man jedoch eine solche, dann kann an diese Anlage prinzipiell jeder bildgebende Sensor angepasst werden. Die wissenschaftliche Idee, die sich hinter der Multisensor-Forderung verbirgt, liegt darin, innerhalb der messtechnisch erfassbaren Umwelt eine „n-dimensionale, digitale Signatur der Landschaft“* zu erzeugen, wobei „n“ für die Anzahl der eingesetzten, spezifischen Sensoren steht. Ein Flug – mehrere Datenebenen. Das ist die methodische Herausforderung, die sich daraus für die Zukunft ergibt.

Integrierte Messflugzeuge kosten soviel wie Häuser und sind daher nur mit einigem Aufwand zu realisieren. Es existiert bis heute noch kein etabliertes Messflugzeug „von der Stange“, obwohl weltweit Dutzende von Herstellerfirmen, Komponentenzulieferer und Systemintegratoren bereit stehen eine solche Aufgabe – zumindest technisch - mit Leichtigkeit zu lösen. Jedoch gibt es zu wenig Auftraggeber, die in der Lage wären, das gesamte Prozessgefüge „from-scratch“ zu beurteilen. Jedes einzelne Fluggerät wäre ein Kristallisationskeim für neue Verfahren, würde spezifische Vorteile erbringen und könnte ein (hier nicht näher festgelegtes) Einzugsgebiet mit Geodaten versorgen (Architektur-, Planungsbüros, Behörden, Universitäten, Privatpersonen etc.). Eine Größenordnung von 20 bis 50 SFAP-Maschinen alleine für Deutschland erschiene aufgrund der hier dargelegten

* Den Begriff der „digitalen Signatur“ einer Landschaft habe ich bislang in der einschlägigen Literatur noch nicht angetroffen. Er erscheint mir jedoch im Kontext des GIS-Ebenenmodells aussagekräftig genug, um ihn selbsterklärend zu verwenden.

Zahlen keineswegs als zuviel, wobei allerdings die derzeitigen Finanzierungsmöglichkeiten eine ganz eigene Sprache sprechen.

Der Gesamtprozess wird zwangsläufig dazu führen, Flugzeuge auf eine Weise einzusetzen, wie sie historisch operationell noch zu selten gebraucht wurden: Künftige Generationen von Fluggeräten werden Umweltinformationen nicht nur auf der Grundlage von starr definierten Flugplanungs- und -durchführungsschemata extrahieren, sondern auch solche landschaftsbezogene Naturbeobachtungen GIS-tauglich erfassen können, die ihnen unverhofft – gleichsam zufällig – begegnen werden. Dies wird ein gewaltiger Schritt sein, der einer breiteren Masse von FE-Datennutzern weder auffallen dürfte noch sich planbar gestaltet, weil der qualitative Sprung nicht ohne Weiteres vermittelt werden kann, wenn auf der Empfängerseite keine Referenzerlebnisse für den Inhalt der Botschaft vorhanden sind. Deshalb wird sich dieser Wandel auf einer mehr oder minder zufälligen Basis ergeben müssen. Letztlich wird es jedoch nichts anderes sein, als die Fortsetzung der klassischen feldbiologischen Methode mit anderen Mitteln und über größere räumliche Einheiten hinweg. In scharfem Kontrast zu immer wieder vernehmbaren, unbestimmten Ängsten und Befürchtungen soll hier in aller Entschiedenheit betont werden, dass dieser technische Fortschritt in keinsten Weise dazu geeignet sein wird, Biologen und andere Feldpraktiker aus deren tradierten, angestammten Arbeitsbereichen zu verdrängen. Leichte Bild- bzw. InSitu-Messflugzeuge werden Feldpraktiker über ganze Forschergenerationen hinweg nicht ersetzen. Das können sie nicht, und das werden sie nicht. Man wird SFAP-Flugzeuge über eine lange Zeit hindurch als nützliche, technische Zentrierhilfe für die Schwerpunktbildung von Geländearbeiten wahrnehmen; als Dokumentationswerkzeuge auf Landschaftsebene und – wie soeben dargelegt – als Instrumente für die Überwindung der Starrheit von Geodaten. Raumbezüge aus der Bewegung und aus der unmittelbaren Situation heraus herzustellen wird künftig eine stetig bedeutsamere Aufgabe werden, für die Umweltmessflugzeuge in perfekter Weise geeignet sind. Man könnte sie demzufolge als hochmobile Landschaftsmikroskope für ein ökologisches (Punkt- und Flächen-)Monitoring bezeichnen. Die Forschungs- und Entwicklungs-Strategien hierfür wurden bislang noch nicht aufgeschrieben, weil der treibende Einfluss von Software sich erst seit den 90er Jahren spürbar niederzuschlagen beginnt.

Ein sehr starkes Prinzip, auf das in diesem Kontext verwiesen werden kann, ist jenes der „technischen Kongruenz“: Beinahe jede Technologie lässt sich auf verschiedene technische Maßstabebenen skalieren. Auf dieser elementaren Erfahrung bauen Windkanäle, Strömungsbecken und die Gesamtheit des technischen Modellbaus. Erkennt man dies an und sucht systematisch nach entsprechenden Verkettungen auf verschiedenen Skalenniveaus, stellt man überraschenderweise fest, dass wir heute weder im kommerziellen noch im Umweltforschungsbereich auf eine entsprechend verbreitete und anerkannte Sichtweise zurückgreifen können, die eine nahtlose Transformierbarkeit ohne Widerstand ermöglicht. Wir befinden uns trotz einer schier unendlichen Vielfalt potentieller Möglichkeiten in einer Applikationswüste. (Beim Militär setzt man pragmatischerweise an allen Ebenen gleichzeitig an und experimentiert quer über alle technischen Skalenniveaus hinweg; mit allen Beschränkungen, die solch eine stark hierarchisierte Organisation mit sich bringt – langfristig gesehen ist das ein sehr effizientes Vorgehen, wie die historische Analyse zeigt). Diese Umstände sind in ihrer Summe eindeutig ein schwerer struktureller Mangel, den es abzustellen gilt. Was zählt, ist der Inhalt, nicht die Verpackung. Hohe Miniaturisierungsgrade und geringe Kosten müssen nicht zwangsläufig Minderqualität bedeuten. Das genaue Gegenteil ist oftmals der Fall: Heute werden im zivil-kommerziellen Bereich von relativ wenigen Spezialisten im Zuge der Weiterentwicklung ihrer Hardware Messgenauigkeiten

erreicht, die weit über die ursprünglichen Ansprüche der militärischen Entwicklung hinausgehen – mit einem marginalen Bruchteil der ursprünglichen Kosten. Auf Endanwenderseite wird dies oft nicht honoriert, weil schlicht und ergreifend der Überblick dazu fehlt. Es gibt daher Bereiche, in denen man drastisch einsparen könnte, und andere Felder, an denen man um das Akzeptieren markttypischer begrenzender Gepflogenheiten einfach nicht herumkommt. Diese zu erkennen wird einzig und allein über Verfügbarkeit von ausreichendem Expertenwissen geregelt. Eine objektive „Auswahlmathematik“ gibt es nicht, eine Algorithmisierung kann nur unter definierten Umgebungsbedingungen erfolgen, sprich: Erst wenn eine funktionierende Anwendung mit einem kalkulierbaren Geschäftsmodell vorhanden ist, lohnt es sich überhaupt, zu rechnen bzw. zu optimieren. Der darum herum befindliche größere Anteil ist methodisches Vergleichen (Kausalanalytik) und Empirik, wobei gerade im letzteren Punkt die Schwierigkeiten auch schon anfangen. Wer kann heute schon guten Gewissens behaupten, er hätte uneingeschränkten Zugriff auf ein beliebig verwendbares Luftfahrzeug?

Die hier unterbreiteten Vorschläge der Überarbeitung unserer verwendeten methodischen Richtlinien beim Einsatz von Geoinformatik in der Umweltforschung bedeuten deshalb in ihrer Summe keineswegs einen Einbruch in konventionelle Geschäftsmodelle. Aufgrund der Leistungsunterschiede von den hier beschriebenen kleinen Systemen gegenüber den konventionellen Bildflugmaschinen stellt sich dieses Problem gar nicht. Vielmehr besteht historisch erstmalig die Möglichkeit, im Wesentlichen bekannte Aufgabenfelder qualitativ neu zu erschließen. Und diese Aufgabenfelder werden zu einer „Markterweiterung nach unten“ führen. Man könnte dies auch mit „innerem Marktwachstum“ bezeichnen. Jedoch – und das mag durchaus als bedrohlich empfunden werden – wird darüber zweifelsohne der Grad an Dezentralisierung, Verselbständigung und Unübersichtlichkeit zunehmen. Es lässt sich als ein Untersuchungsergebnis festhalten, dass keinerlei (offen kommunizierte) Karrieremodelle in der Messfliegerei existieren, wobei es nur natürlich wäre, in einer linear strukturierten Wissenschaft zu verschiedenen Lebensabschnitten unterschiedliche Aufgaben mit unterschiedlichen Instrumenten und sich ändernden Zielstellungen wahrzunehmen - demgegenüber steht allerdings der scharfe Kontrast der erlebbaren Wirklichkeit mit ihren sozialen Agglomerationen, künstlichen Hürden und sonstiger Zugangsbeschränkungen – die zumeist mit physikalisch-technischen Grenzen gar nichts gemein haben.

In dem globalen Review zur Fernerkundung, wie er seit einigen Jahren von H. Kramer von der DLR geliefert wird, fanden sich in der 3. Auflage aus dem Jahr 1996 („Observation of the Earth and its Environment - Survey of Missions and Sensors“) etwa 80 europäische Flugzeugfernerkundungsprojekte, von denen die Mehrzahl auf der technischen Masstabsebene eines Turboprop- oder gar Passagierflugzeugs angesiedelt war. Der Umfang dieses Werks hat über die Jahre bis zur aktuell 4. Auflage stetig zugenommen, wobei die Anteile zwischen der Ausweitung von Aktivitäten und dem Recherchezugewinn nicht unterscheidbar sind. Die Möglichkeiten, solche Plattformen in ihrem Einsatzspektrum aktiv mitzusteuern und weiter auszubauen, sind als eher gering einzustufen, wenn man sich darüber lediglich einen unabhängigen Blick in beliebige Landschaftsausschnitte verschaffen möchte. Am anderen Ende des Spektrums stehen Pilotinnen und Piloten, die aus ästhetischen Gründen Luftbilder anfertigen. Über deren Anzahl lässt sich noch weniger aussagen. Allerdings ist es erstaunlich, dass in mehreren Jahren der Recherche so wenig über den Grenzsäum der Professionalisierung zwischen diesen beiden Sphären in Erfahrung zu bringen war. Dies unterstreicht umso mehr die Notwendigkeit, diese offensichtlichen Lücken systematisch zu beleuchten bzw. aufzufüllen.

Bezüglich der Datenkontinuität und –Sicherheit besteht kaum ein Zweifel daran, dass in einer operationellen Umweltfernerkundung künftig der Großteil aller entstehenden Daten untergehen wird: 90 – 99 % wäre nicht tragisch, solange dieser Verlustanteil in einer Art flugzeuggebundenen „Messflugakte“ mit Bildmittenübersichten archiviert würde, damit in nicht abzusehender Zukunft wenigstens ein verbliebener (und veröffentlichter!) Bericht mit dem landschaftlichen Zustand verglichen werden kann. In diesem Bereich gibt es noch einiges zu tun. Die physische Geographie, Siedlungsgeographie, Verkehrsgeographie und Land- und Forstwirtschaft, die Pflanzensoziologie und die Archäologie sind hier herausragende Themenbereiche, die für eine Annäherung besonders lohnenswert erscheinen und in die bislang normierende Verfahren kaum Einzug halten konnten, weil die Enddatennutzung nichts mit der Primärdatenerhebung zu tun hatte. Heute verfügen wir allerdings über die Technologie diesen Umstand sinnvollerweise allmählich zu beseitigen – und zwar für jeden Masstab und jedes Forschungsbudget.

Es könnte sich für die größeren Umweltforschungseinrichtungen zur Deckung des Eigenbedarfs an Umweltdaten als günstig erweisen, die historisch gewachsenen Lücken an Fluggerät mit miniaturisierten Primärdatengebern aufzufüllen, um darüber nicht nur die Qualität der Forschung weiter auszubauen, sondern um im direkten Kontakt mit der Technologie auf einer alltäglichen Basis auch die Qualität der Lehre im Abgleich mit dem Forschungsgegenstand - der Landschaft - permanent zu verbessern. Der Anstieg der Technologiespirale wird unmittelbar von der Flankensteilheit der Computersystemleistung, den zunehmenden Softwareverbreitungsgraden und direkt verfügbarer Softwarefunktionalitäten in deren Summenwirkung gespeist. Man wird sich diesem Kreislauf institutionell nicht wirksam entziehen können. Man kann allerdings proaktiv darauf hinwirken, diesen Prozess verantwortungsbewusst mitzugestalten. Sich dieser Gesamtentwicklung zu entziehen wird deshalb zunehmend schwerer, weil die Softwarehersteller über strategische Entwicklung ihrer Märkte versuchen ihre Produkte – ebenso wie die Hardwareausstatter – zunehmend modular anzubieten. Modularität senkt sowohl Marktentwicklungsrisiken als auch dafür aufzuwendende Kosten beträchtlich und führt insgesamt zu höherer Attraktivität für den Endnutzer. Außerdem lassen sich darauf Diversifikationen von Geschäftsfeldern bedeutend leichter aufsetzen.

Dennoch bedeutet es einen gewaltigen Sprung für eine Institution, mittels digitalen Systemen von wenigen Bildern auf mehrere Hundert Bilder zu gelangen, die für eine Berechnung eines Bildmosaiks herangezogen werden. Und es bedeutet einen weiteren großen Schritt, in die Dimension von mehreren Tausend Bildern vorzudringen, die zwar sequentiell, aber immerhin während einer einzigen Software-Session von Stunden oder gar Tagen Dauer abgearbeitet werden. Für den verwendeten Algorithmus und die Computer-Hardware ist es bedeutungslos, ob dabei nur ein paar Hundert oder gar Milliarden gleichartiger Rechenoperationen auflaufen. Allerdings ist dies mit einem nicht zu unterschätzenden geistigen Entwicklungsschritt in der allgemein geteilten Anschauung verbunden: der Computer entreißt dem Luftbild jede der perspektivischen Abbildung zugesprochene Statik. Man kann sich am Rechner sitzend über beliebige Raumeinheiten und Maßstäbe hinweg relativ frei bewegen und visualisieren.

Demzufolge wird das professionelle Niveau der Informationsbeschaffung von Geodaten über die Hürde der direkten Georeferenzierbarkeit hinaus angehoben werden, denn nur diese ermöglicht die entscheidende Hebelwirkung bereits heute verfügbarer Software. Wer nur Teile der gesamten Prozesskette besitzt, wird die potentiellen Produktivitätsvorteile nicht für die Veränderung von Fragemöglichkeiten einsetzen können. Für eine Institution dagegen, die

sich dazu entschließt, ein eigenes Luftbildaufnahmesystem operationell einzusetzen, werden die daraus resultierende Effizienzsteigerung in der Datenaufbereitung, die erzielbare Unabhängigkeit und letztlich die daraus resultierende vollständige Kontrolle über den Datenstrom entscheidende Handlungsprämisse darstellen. Begünstigt wird dieses strategische Potential durch die bereits heute verfügbare Rechenkapazität und die Art und Funktionalität von vorhandener Software zahlreicher Umweltinstitute. Wie hier aufgezeigt, spricht vom technischen Standpunkt her seit der Jahrtausendwende nichts mehr dagegen, die größeren und bedeutenderen Institute zu einem entscheidenden Schritt nach vorne zu ermuntern.

Aufgrund der Beschleunigungswirkung der Computer lässt sich die Vermutung aufstellen, dass das einzelne Digitalbild zwar künftig als technisches Hilfsmittel der Visualisierung weiterhin Bestand haben, gleichzeitig jedoch als Instrument der Wertschöpfung stetig verlieren wird. Die Tabelle verdeutlicht die schwerste dahinter stehende Aufgabe: die Synthese von Informationsteilströmen zu Datenendprodukten.

Methoden	Zweck
Satellitenbeobachtungen	<ul style="list-style-type: none"> - Kleinmaßstäbige Grobübersichten - Grundkartierung des Untersuchungsraums - Weltweit normierbare Multispektraldaten
Punktuelle, bodengestützte (automatische) Messdatenerfassungen	<ul style="list-style-type: none"> - Lieferung operationeller Stützstellen für die räumliche Dateninterpolation mit der jeweils höchsten erzielbaren Präzision bei hoher Zuverlässigkeit
Feldbegehungen und Geländearbeit	<ul style="list-style-type: none"> - Spezialisten obliegt auch künftig die Verwaltung von nicht formalisierbarem Know-how - Entdeckung neuer Fragestellungen und Möglichkeiten - Laufende Interpretation und methodischer Abgleich
Flugzeuggestützte Untersuchungen	<ul style="list-style-type: none"> - Erzeugung großmaßstäbiger Detailkarten in Untersuchungsräumen - Demonstration/Dokumentation/Beweis - Integrierte Untersuchung, d. h. auf einer Ebene, die über dem einzelnen Betrachter vor Ort ansetzt - Räumliche Zentrierung laufender Forschungsaktivitäten (methodisches Verbindungsglied zwischen der Punktmessung vor Ort und der regionalisierenden Betrachtung)

Fig. 226 Wesentliche Informationspfade bei der Identifikation und Dechiffrierung (kultur-)landschaftlicher Veränderungsprozesse

Es ist in diesem Zusammenhang notwendig, darauf hinzuweisen, dass Umweltmessflug unter Verwendung von neuartiger Sensorik sinnvollerweise ebenso dazu führen muss, eine gewisse Präsenz am Himmel zu erzielen. Wie man einer Analyse der allgemeinen Luftfahrt entnehmen kann, sollten eigene Flugzeuge (konventioneller Bauart) dafür etwa zwischen 250 und 400 Stunden pro Jahr in der Luft sein, um wirtschaftlich als rentabel gelten zu können. Ohne diese Präsenz in der Luft wird es kaum möglich sein, fortschrittlichere, methodische Fragestellungen in das operative Wissen einzukreuzen. Zuerst der Praxisbezug – dann die darauf aufsetzenden Standardverfahren.

Der Hochleistungs-Reisemotorsegler als Umweltmessplattform ist dafür als Universalträger für Sensorik mit beliebigen Anwendungsschwerpunkten hervorragend geeignet. Wie die Altersstruktur der bundesdeutschen Flugzeugflotte der Allgemeinen Luftfahrt beweist, tendiert nicht zuletzt aus dem wirtschaftlich-politischen Rahmen die Flottenentwicklung im Zuge der notwendigen Verjüngung zum Motorsegler. Der Absatzmarkt für Motorsegler

wächst hierzulande im langfristigen Mittel etwa dreimal so schnell wie der für Motorflugzeuge (SEP <2to). Der Motorsegler ist deshalb vom Aufwand-Nutzen-Verhältnis in jeder Hinsicht die erfolgversprechendste Kompromisslösung für jede mittel- bis langfristige Planung. Noch verstärkt wird diese Argumentation durch den Beleg von etwa einem Vierteljahrhundert Flugzeug-Lebensdauer ausgehen zu können. Das macht Motorsegler investitionstechnisch sehr attraktiv. Zusammen mit einer bordseitigen INS/(D)GPS-Flugnavigations- und -führungs-Avionik kann heute ein Motorsegler rein leistungstechnisch betrachtet die vollwertige Basis für ein integriertes Umweltmessflugsystem bilden. Der Stellenwert derartiger Systeme für die prozessbasierte Umweltforschung wird sich eines Tages rückblickend etwa mit der Erfindung des Linsenfernrohrs für die Astronomie oder dem Mikroskop für die Biologie vergleichen lassen.

Es würde der Natur der optischen Fernerkundung schlichtweg widersprechen, eine „fliegende Abteilung“ einer Forschungseinrichtung per se thematisch festzulegen und damit von vornherein zu verkrüppeln. Die der optischen Fernerkundung innewohnende methodische Offenheit könnte missbräuchlich dazu ausgelegt werden, fehlende Wissenschaftlichkeit oder gar Orientierungslosigkeit zu unterstellen. Dabei wird geflissentlich übersehen, dass sich – wenn das ursprüngliche Wesen der Flugzeugfernerkundung erhalten bleibt bzw. wiederhergestellt wird – aufgrund unserer hinzugewonnenen technischen Möglichkeiten qualitativ völlig neue Aufgabenbereiche finanzierbar(!) erschlossen werden können, z. B. das Erfassen von Obstbaumblüten am Rande einer mesoskaligen klimatologischen Störungszone (beispielsweise im Einzugsgebiet des Oberrheingrabens), um nur eine kleine, naive Anregung zu geben. Das setzt allerdings ein gewisses Grundinteresse aus den verschiedenen Teildisziplinen voraus, die man innerhalb der biologisch-geographischen orientierten Ökologie durchaus im Einzelfall antrifft, die jedoch – trotz aller Kommunikationsmöglichkeiten – ganz offensichtlich nur schwer zu bündeln sind.

Das „ursprüngliche Wesen der Flugzeugfernerkundung“ wird dann für Biologen und Umweltwissenschaftler erreicht sein, wenn sie für flugzeugadäquate Untersuchungsräume über Tausende von Quadratkilometern hinweg bestimmen können, wann, was, wieviel und wie oft sie Landschaftsausschnitte bequem in rechnergestützte Modelle überführen wollen. Bislang – so drängt sich der Verdacht auf – ist es noch nicht gelungen, eine spürbare Anzahl von Feldpraktikern in die Lage zu versetzen, ihre Fernerkundungsbemühungen methodisch mitzuprägen und damit den Gesamtprozess persönlich zu kontrollieren. Vor einer individuell basierten Betrachtungsweise mag das im Einzelfall zwar noch tolerierbar erscheinen, auf einer institutionellen Ebene aber muß man diesen Umstand als schweren strukturellen Mangel werten.

Inzwischen ist über die zahlreichen Gefüge-Risse, die seit Beginn der PC-Revolution aufgetreten sind, ein gewisser Stimmungsumschwung bemerkbar geworden. Der damit einhergehende Paradigmenwechsel äußert sich u. a. darin, die hohe Normierungskraft, wie sie von Software ausgeht, im Rahmen einschlägiger Veranstaltungen zu schwerpunktmäßigen Themen zu erheben, wie beispielsweise während der 23. wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e. V. (DGPF) vom 9. - 11. September 2003 in Bochum: „Auf dem Weg zu operationellen Prozessketten in Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation“. Es setzt sich in Expertenkreisen allmählich die Erkenntnis durch, dass die Automatisierung im Verbund mit Miniaturisierung wahrscheinlich zu einer tief greifenden Neuerschließung von Märkten führen wird – und dies trotz einer fast 3 Jahrzehnte andauernden, wirtschaftlich unter Druck geratenen Luftbildbranche aufgrund der Satelliteneuphorie. Die Regeln für diese neue

Expansion „nach innen“, wie ich diesen Trend bezeichne, sind noch nicht bekannt. Nach der derzeitigen Entwicklungsgeschwindigkeit zu urteilen kann es Jahre oder gar Jahrzehnte dauern, bis diese Gedanken zur „Selbstverständlichkeit“ geworden sind – trotz Internet und des angeblich so schnelllebigen Informationszeitalters.

Es hat 10 Jahre intensiver Recherche gekostet, diese Materialsammlung zum Stand und zur Wirkungsweise luftgestützter Fernerkundung zusammenzutragen. Wenn man einmal von diesem skizzierten Überblick ausgeht, dann erscheint es unverständlich, warum an Umweltforschungseinrichtungen methodisch-technisch noch immer auf dem Stand von 1910 (also 95 Jahre hinter unserer Zeit!) mit über der Bordwand geführten Handkamera geübt und überzeugt werden muss, obwohl jährlich pro geographischem Institut an den Hochschulen 4- bis 6-stellige Beträge in die bestehende Hard- und Software-Infrastruktur investiert werden. Irgendetwas stimmt hier nicht mehr ganz. Funktionalanalytisch betrachtet existieren vielerorts schon 50 % der notwendigen Technik: Digitalkameras, Auswerterechner und leistungsfähige Software sind typischerweise vorhanden. Was fehlt sind lediglich einfache Flugzeuge und integrierte Flugführungssysteme.

Man darf deshalb heute voller Neugier und Zuversicht in ein mächtiges technisches Potentialgebirge blicken, das sich hier vor uns auftürmt. Wir werden in den kommenden Jahrzehnten spannenden und herausfordernden Zeiten entgegengehen. Wir sollten die Einladung, die sich über zahlreiche direkt verwendbare Potentiale ergibt, in aufmerksamer Erwartung annehmen, um darüber mehr über unsere Umwelt zu erfahren. Es besteht zunehmend die Möglichkeit mittels der verlängernden Reichweite und Wirkung von Computern unablässiger und unmittelbarer an und innerhalb unserer Umwelt zu forschen, um somit unsere Vorstellungen über sie in der Praxis zu erproben und zu messen.

Die zentrale Bedeutung, die von der Autogeoreferenzierung ausgehen wird, steht gänzlich außer Frage. Es ist zu erwarten, dass diese neue Technologie zumindest das erste Jahrhundert der Geoinformatik entscheidend beeinflussen wird. Es ist sogar der weiterführende Gedanke angebracht für die INS-Technologie in Bezug auf Themen wie Mobilität und Individualverkehr in den nächsten Jahrhunderten einen Alltagsgebrauchswert zu antizipieren, wie wir ihn heute beispielsweise einem Magnetkompass zuschreiben.

Vorerst bedarf es jedoch noch einiger Überzeugungsarbeit, um das Thema Flugzeugfernerkundung für einen breiteren Nutzerkreis methodisch zu öffnen. Am Ende dieser Arbeit ist mir klar, dies ohne entsprechend ökonomische Bewertungsgrundlagen nicht erfolgreich oder glaubhaft durchführen zu können. Deshalb wird einer ökonomischen Kosten-/Nutzenabwägung künftig noch breitere Aufmerksamkeit geschenkt werden müssen.

Es besteht grundsätzlich die Gefahr dabei, einige kreative Potentiale ungenutzt zu lassen und – noch schlimmer – die vielen denkbaren über die Autogeoreferenzierung neu entstehenden Fragen nicht in dem praktischen Maße zu erschließen, wie sie vor einem rein-technischen Hintergrund betrachtet möglich erschienen.

Noch vor zwei Jahrhunderten bedurfte es einer Idee, Geld, Zeit und Glück um einen geschickten Graveur zu finden, damit ein wissenschaftliches Instrument gebaut werden konnte und in die Anwendung gelangte. Heute dagegen benötigt man für einen stetig kleiner werdenden Erkenntnisgewinn – wenn man die vier Säulen eines Messflugsystems zugrundelegt – wenigstens vier ausgewachsene Hersteller-Firmen, die ihrerseits das in einem vielschichtigen Technikbezugsrahmen umsetzen, was ein einzelner Gelehrter des 19. Jhs. zu leisten imstande war. Ein ganzes Beziehungsgeflecht von Kooperationen unterschiedlichster

Formen und Ausprägungsgrade sind heute oftmals notwendig, um sich einen praktischen Methodeneinblick überhaupt erst verschaffen zu können.

Wo also sind die modernen Graveure in einer veränderten Gesellschaft und wie arbeiten sie? Wer ist heute Stückegießer? Wie erlangen wir die Kontrolle über die zu verwendenden Methoden? Wie erhalten wir den unmittelbaren Bezug zu unserer Arbeit?

Das sind alles Fragen außerhalb bloßer technischer Realitäten. Sie betreffen auch nicht direkt eine aus Einzeldisziplinen bestehende, naturwissenschaftlich begründete Umweltforschung. Aber letztlich werden es die Antworten auf diese Fragen sein, die langfristig gegenüber jeder Einzelaussage und jedem einzelner Messwert dominieren werden.

Einige Antworten auf diese Fragen sind – jedenfalls soweit es die Flugzeugfernerkundung betrifft – aus dem hier präsentierten Material ableitbar. Sie lauten:

Innerhalb der ersten 100 Jahre des kontrollierten Motorflugs ist die Umweltwissenschaft methodisch noch nicht soweit ausgebaut worden, als dass sie den vollen Nutzwert von Fernerkundungsdaten erzeugen und ausnutzen könnte. Der Zugewinn würde sich nur über eine Operationalisierung eines entsprechenden Flugbetriebes erzielen lassen. Der Flugbetrieb kann nur getragen werden, wenn außer der verwendeten Sensorik auch bezüglich der eingesetzten Flugzeuge alternative Wege beschritten werden und die thematische Offenheit der Flugzeugfernerkundung akzeptiert wird. Eine methodisch vollständige Kontrolle über die luftgestützte Fernerkundung verspricht nur digitale Photogrammetrie in Verbindung mit Autogeoreferenzierung. Nur weil es diese Technologien bis ca. Mitte der 90er Jahre des vergangenen Jhs. (zivil) nicht existierten, verbot sich die Beschaffung und Eingliederung von Flugzeugen in entsprechende Umweltforschungszentren. Durch die geometrischen Einschränkungen von kleineren Bild- bzw. Sensorformaten konnte sich SFAP in dieser Form bislang auch nicht als ernstzunehmende Alternative bei Ingenieurdienstleistern herauskristallisieren. Diese Beschränkungen fallen durch die Verbreitung von integrierenden Softwarelösungen allmählich weg. Wir tauschen Sensorfläche gegen Rechenleistung. Verfügbare Rechnerkapazität und Flugkilometerleistung, Flugzeit und Bildvolumina sind in Summe betrachtet nichts anderes ein methodischer Nettogewinn.

Heute kommt es daher auf die Steigerung des Wirkungsgrades von lediglich einem einzigen Parameter längst nicht mehr an. Vielmehr bestehen in einem globalisierten Umfeld Fluch und Segen unserer Zeit darin, die Vielfalt der Systemleistungsverbesserungen des beschleunigten 20. Jhs. integrierend dazu verwenden zu können, um qualitativ eigenständige, belastbare Standpunkte und Neukenntnisse zu finden.

Seit 1997 bin ich damit beschäftigt die Idee zeitnah GIS-integrierbarer Umweltbeobachtungsdaten, basierend auf den richtungsweisenden Arbeiten an der FH Bochum unter Federführung von F.-J. Heimes, praktisch zu verwirklichen. Aus rein finanziellen Gründen war es dazu notwendig über eine sehr lange Durststrecke hinweg ein emissionsarmes, preiswertes und technisch beherrschbares Forschungsflugzeug selbst zu aufzubauen, weshalb es heute als glücklicher Umstand gelten kann, diese Sichtweise unter Berücksichtigung von Aspekten aus der persönlichen militärischen Flugpraxis, sportlichen Flugerfahrungen, geoinformatischen Studiengrundlagen und praktisch maschinenbau-technischer Kenntnisse, die zwangsläufig während des Experimentalflugzeugbaus aufgetreten sind, zu begründen. Ursprünglich war geplant das Projekt bis zur höchsten Ausbaustufe (Direkte Autogeoreferenzierung) voranzutreiben. Inzwischen hat es sich jedoch gezeigt, dass der dazu erforderliche methodische Einblick und ein gewisser Grundkonsens darüber, was flugtechnisch und photogrammetrisch verwirklichtbar ist, in der Forschungspraxis von geographischen Hochschulinstituten oder außeruniversitärer Umweltforschungseinrichtungen

nicht in ausreichendem Maße vorhanden zu sein scheint. Die umfangreiche Luftbild-Literatur vermag durchaus einen anderen Eindruck zu vermitteln, doch diese Wahrnehmung trägt meiner persönlichen Erfahrung nach, die universitär bis auf das Jahr 1994 zurückreicht.

Deshalb musste mit dieser Arbeit zunächst eine brauchbare Diskussionsgrundlage geschaffen werden, die ein greifbares Konzept auf einem verständlichen Niveau darstellt, und zugleich den Abgleich mit der Gesamthistorie liefert.

Vielleicht wird sich der ein oder andere Leser aufgrund der zahlreichen militärischen Bezüge etwas irritiert zeigen. Aber es stellt sich eben mit regelmäßiger Zuverlässigkeit heraus, dass es in mancherlei Hinsicht nützlich sein kann einige Schwerpunktthemen unter einem militärhistorischen Aspekt zu beleuchten, um mögliche (mitunter gesellschaftspolitische) Transformationspotentiale von Einzeltechnologien zu antizipieren. Darüber hinaus ist es eine interessante Angelegenheit das entscheidende militärische Konversionsprodukt für die Direkte Autogeoreferenzierung, nämlich die Trägheitstechnologie, nach dem Kalten Krieg auf seinem Weg in einen neuen Anwendungszweig hinein beobachtend zu begleiten.

Für die übrige Argumentation galt es den Balanceakte zwischen Verständlichkeit, Klarheit und Objektivierbarkeit zu finden, der aus der Sicht eines Geodäten mit Sicherheit nur sehr bedingt als gelungen anzusehen sein dürfte: über die Grundrechenarten und die Trigonometrie geht diese Arbeit für die Methodenbeschreibung nicht hinaus. Der Einstieg in die höhere Geodäsie für die Darlegung des Problems der Erdmessung oder die Methoden der geophysikalischen Prospektion liegen weit jenseits der hier vorgestellten Erklärungen. Außerdem wurden hier keine Rechenverfahren der Photogrammetrie aufgenommen. Das hat einen guten Grund: Die erschließbare Literatur auf diesen speziellen Wissensgebieten ist erheblich umfangreicher als diejenige von überblickstiftenden Zusammenfassungen und Status quo- Erhebungen, die sich darüber hinaus genau im Überlappungsbereich zwischen kommerziellen und rein akademischen Interessen ansiedeln.

Wichtig erscheint mir in diesem Zusammenhang der Verweis darauf, dass trotz aller Notwendigkeit zur Spezialisierung die Geographie gerade aufgrund ihrer methodischen Offenheit diesen ihr tief innewohnenden Hauptvorteil an den Hochschulen (an-)erkennen und entsprechend weiter ausbauen sollte: wir werden künftig nicht jede bedeutende Firma oder jedes bahnbrechende Produkt oder jede entscheidende Modulverbesserung unmittelbar zu quantifizieren oder zu würdigen lernen. Dazu ist diese Welt bereits zu weit fortgeschritten. Aber es sollte darin möglich sein, von den wirkenden Prinzipien im Kontext exemplifizierter historischer Begebenheiten ein paar wesentliche Vorzugsrichtungen und –methoden herauszupräparieren und diese in quantifizierender Weise verständlich aufzubereiten, um die Summenwirkung von Entwicklungsprozessen aufzeigen zu können. Darüber hinaus bin ich nach wie vor der festen Meinung, dass diese Exemplifikation für eine Erforschung der Kulturlandschaft auch praktisch zu erfolgen hat. Fast jedes menschliche Betätigungsfeld hat unvergleichlich mehr an Instrumenten für die Nachwuchsförderung, -schulung und -ausbildung hervorgebracht als eine wissenschaftlich orientierte Fliegerei, obwohl man an den Hochschulen die Luftbildmethodik bereits seit geraumer Zeit gerne als leicht angestaubten „Klassiker“ herabwürdigt. Das exakte Gegenteil ist der Fall - die Luftbildmethodik hat sich 100 Jahre lang hartnäckig einer Integration in den laufenden geographischen Feldforschungsbetrieb widersetzt und tritt erst jetzt in eine neue und sehr spannende Phase ein!

Ich bin der festen Überzeugung, dass sich dieses Spiel der Möglichkeiten und wahrgenommenen Wirklichkeiten auch im 3. und 4. Jh. nach Lilienthal und seinen ersten Sprüngen in Stölln-Rhinow unvermindert aufregend gestalten wird und selbst in dieser fernen

Zukunft noch Lücken existieren werden, die es zu füllen gilt. Alles was hier dargelegt wurde ist und bleibt daher letztlich Generationenwerk. Für die Flugtechnik gilt dies deutlicher als für die meisten anderen Stränge der allgemeinen Technologieentwicklung.

13 Glossar und Abkürzungsverzeichnis

(D)GPS	Differential Global Position System (Satellitenortung mit Ausgleichssignal)
A/C	Flugzeug (Aircraft)
AARG	Aerial Archeological Research Group
AGL	Above Ground Level: (Höhe) über Grund
AHRS	Attitude Heading Reference System
AIP	Aeronautical Information Publication (Luftfahrthandbuch)
ARA	Airborne Research Australia
ASL	Above Sea Level: Höhe über N.N.
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ATPL	Airline Transport Pilot's License (Berufspilotenlizenz / Linienverkehr)
BFU	Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung
BRT	Brutto-Registertonne
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAS	Close Air Support (Luftnahunterstützung)
CAU	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
CCNS4	Computer Controlled Navigation System (weit verbreitetes Vermessungs-Flugführungssystem)
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CIR	Color-Infrared
CPL	Commercial Pilot's License (Geschäftspilotenlizenz / Charter- und Werksflugverkehr)
DGM	Digitales Geländemodell
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DPW	Digital Photogrammetric Workstation
DSLR:	digitale, einäugige Spiegelreflexkamera
DV	Digital Video
DWD	Deutscher Wetterdienst
ENG	Electronic News Gathering
EO	Earth Observation
FA	Fachabteilung
FAI	(Fédération Aéronautique Internationale / World Air Sports Federation) Internationaler Luftsportverband
FE	Fernerkundung (auch RS: Remote Sensing)
FIS	Flight Information Service
FL100	Flight Level 100 (10.000 ft)
FLIR	Forward-Looking Infrared
FLOPS	Floating Point Operations Per Second
FMC	Forward Motion Compensation
FSB	Front Side Bus
GAMA	General Aircraft Manufacturers Association
GCP	Ground Control Point (Bild-)“Passpunkt” mit bekannten Koordinaten
GIS	Geographical Information System
GND	Ground (Geländeoberfläche)
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphical Processing Unit (Grafikchip einer VGA-Karte)
GUI	Graphical User Interface
HRO	High Resolution Optical (Data)
HUD	Head up Display
IAS	Indicated Airspeed
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICT	Information and Communications Technology
IFR	Instrument Flight Rules
.igc	Verschlüsselte GPS-Logdatei-Endung (International Gliding Commission)

IGC	Internationale Segelflugkommission
IMU	Inertial Measuring Unit
INS	Inertial Navigation System
IRS	Indian remote sensing satellite
ISA	International Standard Atmosphere
ISO	International Organisation for Standardization
ISO 9001	Quality management systems standard
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
JRC	Joint Research Centre
KFZ	Kraftfahrzeug
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
LEO	Local Earth Observation, (im Satellitenkontext: Low Earth Orbit)
LFZ	Luftfahrzeug
LRO	Low Resolution Optical (Data)
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
MIPS	Millions Instructions Per Second
MRO	Medium Resolution Optical (Data)
MSL	Mean Sea Level - entspr. kartografisch N.N.
MTBF	Meantime between Failure (durchschnittliche Ausfallzeit)
MTOW	Maximum Take-Off Weight (Höchstzulässiges Abfluggewicht)
N	Norden (analog: S, W, E)
N. N.	Normal Null
NASA	US National Aeronautics and Space Administration
NDB	Non Directional Beacon – ungerichteter Funkfeuer
NIMA	National Image and Mapping Agency
NMEA	National Marine Electronics Association (US)
NM	Seemeile
NOAA	US National Oceanic and Atmospheric Administration
PPL	Private Pilot's License (Privatpilotenlizenz / Sportflugschein)
QDM	Peilung vom Flugzeug zur Station
QM	Quality Management
QNH	Auf Meereshöhe reduzierter Stations(luft-)druck
Quickbird	Digital Globe's satellite, panchromatic and multispectral images
RADAR	Radiation Detection and Ranging
Radarsat	RADAR SATellite
Radial	Kurs-/Standlinie von oder zu einer bodengestützten Navigationseinrichtung (NDB, VOR etc.)
RAF	Royal Air Force (auch R.A.F.)
R-NAV	Area Navigation (GPS-Navigationsverfahren)
RoW	Rest of World
RS	Remote Sensing
RSPSoc	Remote Sensing and Photogrammetry Society
SEP	Single-Engine-Piston
SFAP	Small Format Aerial Photography
SLR	Single-Lens-Reflex, „einäugige“ Spiegelreflexkamera (nur 1 Objektiv)
STOL	Short Take off and Landing
TACAN	Tactical Air Navigation (bodengestützte Peilfunkanlage, zivil nur die Entfernungsmessung zur Station möglich, keine Peilmöglichkeit)
TAS	True Airspeed
TBO	Time Between Overhaul: Wartungsintervall meistens in [Flugstunden]
TC	True Course
TH	True Heading
TIN	Triangulated Irregular Network
TMG	Touring Motorglider
TN	True North (geographisch, Nord)
TP	Trigonometrischer Punkt
TR	Taschenrechner
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Drohne)
USAF	US Air Force

USD	US-Dollar
UTC	Universal Time Coordinated (entspr. Greenwich Mean Time)
VAC	Value-Adding Company
VFR	Visual Flight Rules
VGA	Video Graphics Array – urspr. Grafikstandard, gebräuchliche Abkürzung für Grafikkarten
VHF	Very High Frequency
VHR	Very high resolution
VHRO	Very High Resolution Optical (Data)
VOR	VHF Omnidirectional Range (UKW-Drehfunkfeuer)
VORTAC	VOR-Navigationsanlage mit Möglichkeit der Entfernungsmessung
WCA	Wind Correction Angle
WGS	World Geodetic Survey
WPT	Waypoint
XTD	Crosstrack-Deviation
XTK/TAE	Crosstrack-/Trackangle-Error

14 Einheiten und Größen

Å	Ångström (veraltete atomphysik. Längeneinheit: 10^{-10} m)
a	Jahr
AE	Astronomische Einheit (1AE = mittl. Erd-Sonnenentfernung $149,6 \cdot 10^6$ km)
DM	Deutsche Mark; zwischen 21.6.1948 und 31.12.2001 gesetzliches Zahlungsmittel in der Bundesrepublik Deutschland
E	Gleitzahl
Eu	Euro (auch: EU, EUR) – Europäische Einheitswährung (seit 1.1.2002)
FL	Flight Level: Höhenangabe für Motorfliegerei bezogen auf die Druckfläche 1013,25 hPa (FL 100 = 10 000 ft über der Bezugsfläche)
ft	Fuß: gebräuchliches Maß in der Motorfliegerei für Höhenangaben 1 ft = 0,3048 m (Faustformel für Umrechnung Fuß in Meter: Fuß = Meter/3 + 10 %)
h	Stunde
ha	Hektar
Hz	Hertz [$1 \cdot s^{-1}$]
In	Inch (dt.: Zoll) 2,54 cm
kt	Knoten 1 kt = $1 \text{ NM} \cdot \text{h}^{-1}$, Plural: kts
k_	Tausend (auch K_)
min	Minute
M	Mark (auch: Marc, Marke) – ursprüngl. germanische Masseeinheit, die ab dem 11. Jh. mit dem Pfund als Edelmetall- und Münzgewicht konkurrierte. Die Mark, aus der u.a. Gold- und Silbermark abgeleitet wurden, führte man am 9.7.1873 als offiziellen Ersatz für Taler, Gulden und Kreuzer in den deutschen Ländern ein.
M_	Million (auch Mill., Mio.)
NM	Nautische Meile, Seemeile: 1 NM = 1,852 km
s	Sekunde
SM	Statute Mile, engl. Landmeile: 1 SM = 1,654 km (auch ML)
RM	Reichsmark; zwischen 30.8.1924 und 20.6.1948 gesetzliches Zahlungsmittel in der Weimarer Republik und im Deutschen Reich
sqft	Square-Feet

15 Abbildungsverzeichnis

Fig. 1 Das angeführte Konzept vom „inneren Wert“ wird bei den Ingenieuren im sog. „technischen Stärke-Diagramm“ ausgedrückt:	7
Fig. 2 „Wissensschöpfung erfolgt parallel zum operativen Geschäft.“	8
Fig. 3 Dichotomie der Technologieentwicklung	9
Fig. 4 Verschachtelung von Dichotomien zu „integrierten Anwendungen“	10
Fig. 5 Die C309 „Pontresina“	11
Fig. 6 Das geometrische Einschneideverfahren in der Photogrammetrie;	17
Fig. 7 Beispiel für stürzende Linien	18
Fig. 8 Stereographische Projektion eines Kreises	22

Fig. 9 Das Liniensystem einer Portolankarte des Schwarzen Meeres aus dem Jahre 1318	22
Fig. 10 Loxodrome und Großkreis	23
Fig. 11 Navigationsschema Winddreieck	24
Fig. 12 Jakobsstab (links) und Astrolabium	25
Fig. 13 Hadleyscher Sextant	25
Fig. 14. Back-Staff (links) und Cross-Staff (rechts)	26
Fig. 15. Rechenschieber ARISTO Aviat Nr. 617	27
Fig. 16 Deutsche Flugkarte.....	29
Fig. 17 Himmelskugel (links) und Erdkugel (rechts);.....	31
Fig. 18 Graphische Ergebniskontrolle mittels Flugplanungssoftware FlightPlanner 5.0.....	34
Fig. 19 Messnetz 1. Ordnung.....	36
Fig. 20 Messnetz höherer Ordnung	37
Fig. 21 Virtuelles Geländemodell	37
Fig. 22 Bildmontage aus drei Screendumps eines Hyper-NURBS modellierten Würfels	38
Fig. 23 Zwei Screendumps (Software: Cinema4D) desselben Frames (Nr.19).....	39
Fig. 24 Raytracing-Versuche; durch die „schwarzweiße-Phase“	39
Fig. 25 Rapa Nui – die Osterinsel mit den 3 Inselschwerpunkten.....	40
Fig. 26 Zusammenhang zwischen Gelände, Geländeansicht, Karte	41
Fig. 27 Wesentliche Kartennetzentwürfe (Ritter und Strzygowski, 1970)	43
Fig. 28 Merkatorprojektion – (Kühr, 1995a).....	43
Fig. 29 Die Lambertsche Schnittkegelprojektion inkl. ihrer Maßstabs-Verzerrungen	44
Fig. 30 Graphische Konstruktion eines sphärischen Dreiecks für die Navigation.	45
Fig. 31 Beispielanwendung des Messtisches.....	47
Fig. 32 Ballonaufstieg von Biot und Gay-Lussac	52
Fig. 33 Der Wright Flyer; Aufriß.....	57
Fig. 34 Luftfahrtstatistik für Johannisthal 1911 - 1913.....	59
Fig. 35 Kumulierte Anzahl der Flugunfälle im Inland über 14-Jahresperiode.....	60
Fig. 36 Verteilung der Unfälle auf die LFZ-Arten.....	60
Fig. 37 Unfälle und schwere Störungen mit Luftfahrzeugen im In- und Ausland	62
Fig. 38 Zwei Flugzeuge der LVG auf Transportfahrzeugen	64
Fig. 39 Allgemeiner Produktzyklus	67
Fig. 40 Allgemeines Regelkreismodell	69
Fig. 41 Aus der Werbung für die Klemm-Leichtflugzeugbauweise	71
Fig. 42 Die Klemm KL25 im Dreiseiten-Riss	72
Fig. 43 Der Aufstieg der amerikanischen Elektronikindustrie	74
Fig. 44 Leitlinien des deutschen Flugzeugbaus – Teil I	76
Fig. 45 Leitlinien des deutschen Flugzeugbaus – Teil II	77
Fig. 46 US-amerikanischer Konsolidierungsprozess der Luft- und Raumfahrtindustrie.....	78
Fig. 47 Europäische Konzernverflechtung in der Luft- und Raumfahrtindustrie	79
Fig. 48 Stärke der Luftflotten der Welt Ende 1910.....	84
Fig. 49 Flugzeugbestände der wichtigsten Länder im Jahre 1912.....	84
Fig. 50 Flugrekorde bis zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs	85
Fig. 51 Höhenflugweltrekorde (1909 – 1939).....	86
Fig. 52 Die Flugzeugproduktion der Großmächte während des Ersten Weltkriegs	86
Fig. 53 Entwicklung der französischen Luftstreitkräfte 1918 - 1928	87
Fig. 54 Die Entwicklung der britischen Luftstreitkräfte 1918 - 1932.....	87
Fig. 55 Bestand an Aufklärungsflugzeugen in den Luftflotten am 11. November 1918.....	87
Fig. 56 Datengrundlage zur Grobabschätzung des anzusetzenden Durchschnittsgehalts eines Facharbeiters zur Jahrtausendwende	89

Fig. 57 Die Flugzeugproduktion der großen Luftfahrerstaaten (1930 - 1939).....	90
Fig. 58 Die Flugzeugproduktion in den am Zweiten Weltkrieg beteiligten Hauptmächten	92
Fig. 59 Abschätzung einer weltweiten, umfassenden Produktionsbilanz	93
Fig. 60 Flugzeugbestandsentwicklung in Deutschland	94
Fig. 61 Bestandsentwicklung Motorflugzeuge und Motorsegler (1975 – 1995).....	95
Fig. 62 Altersstruktur von deutschen Motorflugzeugen und Motorseglern	96
Fig. 63 GAMA Jahresstatistiken 2000 - 2003 der US-Produktion für Flugzeuge (A/C) der Allgemeinen Luftfahrt	97
Fig. 64 GAMA Statistik zur weltweiten A/C-Produktion für die Allgemeine Luftfahrt - 1	97
Fig. 65 GAMA Statistik zur weltweiten A/C-Produktion für die Allgemeine Luftfahrt - 2	97
Fig. 66 Produktion der amerikanischen General-Aviation-Industrie seit 1946	99
Fig. 67 Folgen der Produkthaftung in den USA auf die Allgemeine Luftfahrt	100
Fig. 68 US Experimental Aircraft Fleet	101
Fig. 69 Preisentwicklung militärischer Flugzeuge	103
Fig. 70 Bestand einsatzbereiter Militärflugzeuge in den USA (1945 - 1050).....	103
Fig. 71 Bestandsveränderungen von Traktoren	105
Fig. 72 Luftverkehrsstatistik für 2003	107
Fig. 73 Entwicklung der perspektivischen Geometrie	109
Fig. 74 Geometrische Perspektive in einem Lehrbuch des frühen 20. Jh.	110
Fig. 75 Multiplikationstafel nach Schwerdt (Lehrbuch der Nomographie, 1924).....	111
Fig. 76 Projektiv verzerrte Netztafel	112
Fig. 77 Beispiel für eine Flieger-Hand-Kamera: ca. 1920	120
Fig. 78 Die erfolgreiche Avro Anson	125
Fig. 79 LET-410UVP	126
Fig. 80 LET-410UVP in einer Funktionalgliederung	127
Fig. 81 Technische Daten einiger Reihenmesskammern; minimal verändert	128
Fig. 82 Anzahl verkaufter, metrischer Kamerasysteme	128
Fig. 83 Abschätzung der weltweiten Primärdatenerfassungssysteme.....	128
Fig. 84 Kommerzielle Fernerkundungs-Flugzeuge in Deutschland	130
Fig. 85 C172	131
Fig. 86 Cessna C206, auch "TU206"— "Transport Utility".....	131
Fig. 87 PA31, hier als geophysikalisches Messflugzeug der Firma Fugro	131
Fig. 88 C404 Titan	131
Fig. 89 Cessna C208 Caravan.....	131
Fig. 90 Do27 des Luftsportvereins Kiel	131
Fig. 91 Seitenansichten der Myasishchev M-17 „Stratosfera“	132
Fig. 92 Grob Egrett	133
Fig. 93 Beispiel für eine schematische Payload-Übersicht	134
Fig. 94 Spezifikationen zu den internen Ladebuchten an Bord der „VH-ARA“.....	134
Fig. 95 Highres earth observation satellite launches 2000 - 2004	141
Fig. 96 Current Launch Price per Pound by Market Sector	146
Fig. 97 Historische Marktentwicklung für Satellitenbilddaten.....	147
Fig. 98 Angestrebte Ausweitung der Märkte für die Weltraumindustrie (ebd.).....	147
Fig. 99 Marktsegmente der Weltraumindustrie	149
Fig. 100 Langjähriges Startaufkommen [Anzahl Starts pro Jahr]	151
Fig. 101 Strategischer Jahresrückblick zur Lage der kommerziellen Weltraumindustrie 2004 aus der marktanalytischen Sicht von Futron Corp. („2004 Pros and Cons“).....	152
Fig. 102 Szenariobetrachtung zur Entwicklung der FE-Industrie (1995)	157
Fig. 103 Schwerpunktuntersuchungsbereiche der beauftragten Unternehmen	159

Fig. 104 Gesamtrahmen FE-Industrie in Europa 1998	159
Fig. 105 Summary Statistics	161
Fig. 106 Jährlicher Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie	162
Fig. 107 Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie 1997	163
Fig. 108 Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie 1994	163
Fig. 109 Gesamtumsatz der Europäischen FE-Industrie 1990	163
Fig. 110 Jährliche Gesamtumsätze der Europäischen FE-Industrie nach Geschäftsaktivität.	164
Fig. 111 Jährliches Umsatzverhältnis von mehrwerterzeugenden und zusätzlichen Diensten im Vergleich zum Umsatzerlös von Daten der Einheit 1	164
Fig. 112 Geschäftsfeldverhältnis – Vergleich zwischen 1990 und 1997	165
Fig. 113 Veränderung des durchschnittlichen FE-Umsatzes zwischen 1994 und 1997 pro Angestellter und Geschäftsfeld.....	166
Fig. 114 Diversifikation der Geschäftsfelder im Vergleich 1994 und 1997	167
Fig. 115 Geographische Verteilung der Umsätze 1994 und 1997	168
Fig. 116 Marktsegmentierung.....	170
Fig. 117 Allgemeine Trends und erwartete Entwicklungen	171
Fig. 118 Beschränkungen für die FE-Marktentwicklung	172
Fig. 119 Antizipierte zukünftige Marktchancen	173
Fig. 120 Zwischenstand der europäischen Fernerkundungs-Industrie, 2003	175
Fig. 121 Grösse der EO VACs.....	176
Fig. 122 EO Products data sources (VHRO: Very High Resolution Optical, analog M... Medium...)	177
Fig. 123 Herkunft von Datensätzen (non-EO Data).....	177
Fig. 124 Uverwendung von zusammengesetzten Produkten und Modellierung	177
Fig. 125 Einige für Fernerkundungs-Applikationen relevant erscheinende Marktanalysen..	178
Fig. 126 Entwicklung von Desktop-GIS seit 1997 in den D.A.CH-Ländern	179
Fig. 127 Aufgliederung von GIS nach Produktparten; (GIS-Report 2003).....	180
Fig. 128 Mitarbeiteranzahl von Büros einer repräsentativen GIS-Anwendergruppe	180
Fig. 129 Einführungsgrade verschiedener Softwareapplikationen; (GIS-Report 2003)	181
Fig. 130 Spezifische DPW-Produkte (Stand: 2000)	183
Fig. 131 Fernerkundungspakete mit GIS-, und Photogrammetriefunktionalität	184
Fig. 132 Kurzabriss der Entwicklung der Luftbildarchäologie	191
Fig. 133 Bedeutende Publikationen der luftbildarchäologischen Methode.....	191
Fig. 134 Typische GPS-Tracks von English-Heritage: York und Oxford	194
Fig. 135 Aerial-Reconnaissance Aktivitäten (East Lothian) von RCAHMS seit 1993.	196
Fig. 136 Gecharterte Cessna 185RG (RG: Retractable Gear),	197
Fig. 137 Allg. Technologieentwicklung der Computerindustrie:	200
Fig. 138 Schematische Grundarchitektur des modernen „Wintel“-PCs;	202
Fig. 139 Grafikkarten-Entwicklung	205
Fig. 140 Grafikkbussysteme	206
Fig. 141 Datentransportleistung / Bandbreite	206
Fig. 142 CPU-Entwicklung seit den Anfängen vor 35 Jahren.....	204
Fig. 143 Entwicklung der Speicherbandbreite.....	208
Fig. 144 Die Entwicklung von IDE-Festplatten	209
Fig. 145 Normalverteilung mit Standardabweichungen σ vom Mittelwert.....	210
Fig. 146 Graphische Veranschaulichung des Six-Sigma-Effekts	211
Fig. 147 Screendump Flightplanner / ICAO mit Route/Flugplanung NW Berlins (2004)	214
Fig. 148 „Spurtreue“ in rein visuell geflogenen Platzrunden (ohne GPS-Referenz)	215
Fig. 149 Der Ausnahmefall: „Wegkippen“ des GPS-Signals.....	216

Fig. 150 VW-Bus mit Toshiba-Laptop anlässlich einer Tagungsexkursion	217
Fig. 151 Der Compaq iPaq als Grundlage für ein Moving-Map-System.....	219
Fig. 152 OLC-Statistiken Deutschland	220
Fig. 153 Historie der Deutschen Meisterschaft im Streckensegelflug (DMSt)	221
Fig. 154 Dreiseitenriss eines typischen Hochleistungssegelflugzeugs DG-800B	222
Fig. 155 Vertikalprofil eines Wertungsfluges mit Zeitleiste	222
Fig. 156 Automatisch generierte Ansicht einer igc-Logdatei.....	223
Fig. 157 D-KUHE, 25. August 2003, 13:08 UTC, Luftraumdarstellung.....	225
Fig. 158 Luftraumstruktur (frei erhältliche Vektordaten).	226
Fig. 159 D-KUHE, 25. August 2003, 13:08 UTC, ICAO	227
Fig. 160 D-KUHE, 25. August 2003, 13:09 UTC, Deutsche Generalkarte (M 1 : 200 000).227	
Fig. 161 D-KUHE, 25. August 2003, 13:09 UTC, 3-D-Animationssequenz, Blickrichtung SW, Kartenbild: ICAO M 1 : 500 000.....	229
Fig. 162 Größenvergleich von Standardluftbildformat und Kleinbildformat.....	233
Fig. 163 Theoretischer Mission-Envelope (der Kodak DCS-460)	235
Fig. 164 Prinzipskizze eines Messbildrahmens mit kreuzförmigen Rahmenmarken	237
Fig. 165 Grundprinzip der Bündelblockausgleichung	238
Fig. 166 Prinzipdarstellung der Orthobilderzeugung (ebd.).....	239
Fig. 167 Theoretische Flächenleistung bei 1000 Aufnahmen mit Kodak DCS-460.....	240
Fig. 168 Zusammenhang zwischen jährlichem Flugstundenaufkommen und resultierenden Gesamtkosten pro Flugstunde	241
Fig. 169 Erhöhung der Flankensteilheit um den Faktor 2 bei kaufmännischer Kalkulation..	241
Fig. 170 Optimale Passpunktverteilung im Bildblock	243
Fig. 171 Fachgerechte Flugstreifenplanung zur Erfassung linienhafter Geländeelemente....	245
Fig. 172 Ein typisches Senkrechtbild	246
Fig. 173 Das allgemeine Kursschema für die Kompaßnavigation	249
Fig. 174 Der Effekt einer Stabilisierung auf die Fotospur am Boden.....	253
Fig. 175 Die Stabilisierung, oder „Mount“ des Heimesplattform-Konzepts.....	256
Fig. 176 Beispiel einer IMU (AeroControl-IIId, Fa. IGI, 2005).....	257
Fig. 177 Eingebaute Heimesplattform.....	257
Fig. 178 Blockdiagramm Heimesplattform.....	258
Fig. 179 Erzielbare Pixellagegenauigkeiten (LEO-System, Bochum).....	258
Fig. 180 Erwartungsgemäße Genauigkeitssteigerung mit Rollei6006 / 80 mm Brennweite, 259	
Fig. 181 Aufnahmefläche eines 1024 Fotos umfassenden Blocks mit der Kodak DCS-460.260	
Fig. 182 Teardrop (links) und S-Turn (rechts)	262
Fig. 183 Windeinfluss und sich daraus ergebende Fotoflug-Limits	263
Fig. 184 Schematische Wirkungsweise einer Digitalkamera	265
Fig. 185 Geschwindigkeit digitaler DSLR-Kamera-Speichermedien-Kombinationen.....	266
Fig. 186 Bildflugstreifen	268
Fig. 187 Bildbasislängen für Nikon D70 mit 50-mm-Objektiv	269
Fig. 188 Nikon-D70-Bilderfassungsleistung	269
Fig. 189 Burst-Mode-Szenario Nikon D70 mit zu erzielenden Streifenlängen.....	270
Fig. 190 Burst-Mode-Szenario Nikon D70 für 1/8000 s.....	271
Fig. 191 Burst-Mode-Szenario Nikon D70 für 1/500 s.....	271
Fig. 192 Schichtgitterbefliegung (schematisch)	273
Fig. 193 CCNS4 – Anzeigemodul (CDU).....	276
Fig. 194 Vergrößerte GPS-Track-Darstellung von 80 Straßenkreuzungen; LEO-Projekt.....	277
Fig. 195 Schematische Vertikalgliederung des Luftraums nach ICAO-Richtlinien.....	278
Fig. 196 Horizontale Luftraumgliederung.....	280

Fig. 197 Fluglizenzen und geschätzte Aufwändungen für deren Erwerb.	283
Fig. 198 UL-Flugzeug Silence „Twister“ in Steilflugkurvenlage	284
Fig. 199 Silence-Twister in der Bausatzversion (Kit)	285
Fig. 200 Einige erwähnenswerte deutsche und internationale UL-Flugzeuge	286
Fig. 201 Lineare Abnahme des Stirnwiderstandes bei Verringerung der Flügeldicke	289
Fig. 202 Klassische Aerodynamische Optimierungspfade.....	289
Fig. 203 Luftdichteabhängiger Leistungsverlust	291
Fig. 204 Stemme S10-VT über Berlin.....	292
Fig. 205 Flugleistungsübersicht bekannter polnischer Segelflugzeuge	293
Fig. 206 Moto-Fox Experimentalflugzeug von E. Marganski.....	293
Fig. 207 Allgemeines Ausrüstungsschema für Umweltmessflugsysteme	295
Fig. 208 Edgley EA7 Optica; Foto: M. Blott.....	296
Fig. 209 EA-7 Optica; Technische Daten (ebd.).....	297
Fig. 210 Ultra7500; (Quelle: www.flir.com).....	300
Fig. 211 Spezifikationen Ultra7500 Multirole-Turret; (ebd.).....	301
Fig. 212 Pulsar XP (D-EUJF) von F. J Heimes, FH Bochum (2004).....	302
Fig. 213 Automatische Bildflugstreifenplanung im Planungsmodul SnapPlan/Trackair	305
Fig. 214 Rechteckiger Rahmen zur Markierung der Stereofläche im Bild-Block.....	305
Fig. 215 Ausrüstungs-Szenarien auf Grundlage der historischen Vergleichsanalyse.....	307
Fig. 216 Sensorik-Integrationsstufen an Bord von LFZ.....	312
Fig. 217 Prozentuale Verteilung der Auslöser von Naturkatastrophen für Deutschland	315
Fig. 218 Tornado über dem Ort Micheln.....	316
Fig. 219 Deutsche Tornadobilanz seit dem 16. Jh.	316
Fig. 220 Historisch lokalisierbare Tornados in Deutschland (1587 - 1999)	317
Fig. 221 Auswahl bedeutender Naturkatastrophen innerhalb des 20. Jh. in Deutschland	318
Fig. 222 Jährliche Ereignishäufigkeit nach Schadenskategorie.....	319
Fig. 223 Typischer Jahresverlauf von Gewitterschadensereignissen.....	319
Fig. 224 Hochwasserkatastrophe in Cham/Opf. (Ostbayern) am 12./13.08.2002	321
Fig. 225 Technische Wertigkeiten für einzelne Elemente der luftgestützten Fernerkundung	326
Fig. 226 Informationspfade bei der Dechiffrierung landschaftlicher Veränderungsprozesse	332

16 Quellennachweis

Verwendete Software:

ARCVIEW 3.3, 2002, ESRI Deutschland

Fischer Weltalmanach, 2003, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt a. M.

Fischer Weltalmanach, 2004, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt a. M.

Encyclopaedia Britannica DeluxeEdition, 2003, Encyclopaedia Britannica, London

FlightPlanner V. 5.0 (V 5.1.6. vom 9.2.2004), ifos GmbH, Darmstadt;

Kartenmaterial: Lower Airspace - Streckenkarte 1:1.000.000,

Anflugkarten - Anflugkarten aus AIP VFR

ICAO D2004 - Luftfahrtkarte ICAO 1:500.000 (alle Karten mit Genehmigung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH)

VFR France 01 - VFR+GPS Chart 1:500.000 © Jeppesen Inc.

Strepla/Pocket-StrePla V. 3.2 (build 2157), 2005, 8F-Computer GmbH, Bad Homburg

Cinema4D Release 6 CE (V.6.303) , 2003, Maxon GmbH, Friedrichsdorf

National Geographic 3D-Globus, 2004, United Soft Media GmbH, München

Verwendete Literatur:

Abiodun, A. A., 1998, Remote Sensing in the information age. Space Policy, 14(1998), 229-238.

Adams, G., 1985, Geometrische und graphische Versuche oder Beschreibung der mathematischen Instrumente, deren man sich in der Geometrie, der Zivil- und Militär-Vermessung, beim Nivellieren und in der Perspektive bedient. Nach der deutschen Ausgabe von 1795. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

Airbus S.A.S (2003) GMF - Global Market Forecast 2003 – 2022, Blagnac-Cedex, France

Albertz, J., 1991, Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern - eine Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

Angelucci, E., 1972, Flugzeuge - 1000 Maschinen aus aller Welt mit sämtlichen technischen Daten - Vom ersten Fluggerät bis zum Überschalljet. Falken-Verlag, Wiesbaden.

Angelucci, E., 1981, Weltenzyklopädie der Flugzeuge - Band 2. Zivilflugzeuge von den Anfängen bis heute. Südwest Verlag, München.

Askey, P., 2004, Nikon D70 Review. www.dpreview.com, 1-28, Digital Photography Review. Ref. Type: Electronic Citation

Bachmann, P., 1996, Einmotorige und zweimotorige Flugzeuge. Bilder - Daten – Kosten. Air Report Verlag, Höchst/Odenwald.

-
- Bastian, O. und Schreiber, K.-F. [Hrsg.], 1999, Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg.
- Bauer, M., 1997, Vermessung und Ortung mit Satelliten. NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme - eine Einführung in die Praxis. Wichmann, Heidelberg.
- Bauer, S. J., Gutdeutsch, R., Hantel, M., Reuter, H., Rucker, H. O., Siedler, G., Spohn, T., Steinacker, R. und Zenk, W., 1997, Erde und Planeten. deGruyter, Berlin, New York.
- Baumer, H., 1987, Sferics - Die Entdeckung der Wetterstrahlung. Rowohlt Verlag GmbH, Reinbek bei Hamburg.
- Bäumker, M., Brechtken, R., Heimes, F.-J. und Richter, T., 1999, Direkte Georeferenzierung mit dem Luftbildaufnahmesystem LEO. 1-13. 21-2-1999. Obergurgl. Photogrammetrische Woche. 21-2-1999. Ref. Type: Conference Proceeding
- Becker, H., 1996, Archäologische Prospektion - Luftbildarchäologie und Geophysik. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, 1-331, München, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege. Ref. Type: Serial (Book, Monograph)
- Bellis, M., 2005, History of the Digital Camera;
<http://inventors.about.com/library/inventors/bldigitalcamera.htm>, p.1.
<http://inventors.about.com>; Ref. Type: Electronic Citation
- Bergius, C. C., 1969, Die Straße der Piloten im Bild. Bertelsmann Sachbuchverlag, Gütersloh.
- Bewley, R., Donaghue, D., Gaffney, V., vanLeusen, M. und Wise, A., 1999, Archiving Aerial Photography and Remote Sensing Data - A Guide to Good Practice. Archaeology Data Service, Oxford.
- Billig D. und Meyer M., 2003, Flugzeuge der DDR – Typenbuch der Militär- und Zivilluftfahrt, Bd. III bis 1990, 1. Aufl., Motorbuch-Verlag, Berlin
- Blüthgen, J., 1964, Allgemeine Klimageographie, 1-599, Berlin, Walter de Gruyter & Co. Lehrbuch der Allgemeinen Geographie. Obst, E. [Hrsg.] Ref. Type: Serial (Book, Monograph)
- Boing Commercial Airplanes, 2004, Summary of Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 – 2003; Airplane Safety Boing Commercial Airplanes, www.boeing.com/news/techissues, Washington. Ref. Type: Electronic Citation
- Braun, H.-J. und Kaiser, W., 1997, Energiewirtschaft, Automatisierung, Information seit 1914. Reihe Propyläen Technikgeschichte, Propyläen Verlag, Berlin.
- Brinkmann, G., Gersdorff, K. v., und Schwipps, W., 1995, Sport- und Reiseflugzeuge - Leitlinien einer vielfältigen Entwicklung. Bernard & Graefe Verlag, Bonn.
- Buhmann, E. und Wiesel, J., 2003, GIS Report. Software - Daten - Firmen. Bernhard Harzer Verlag.
- Burrows, W. E., 2001, By Any Means Necessary - America's Secret Air War In The Cold War. Farrar, Straus and Giroux, New York.
- Carter, N., 2002, Computer Architecture (Schaum's outline of). McGraw-Hill, New York
- Clancy, T., 2000, Airborne – Die Fallschirmjäger-Eingreiftruppe der U.S. Army (Originaltitel. Airborne - A Guided Tour of an Airborne Task Force). Heyne Verlag, München.
- Clancy, T., 2001, Supercarrier - Die Welt der amerikanischen Flugzeugträger (Originaltitel. Carrier - A guided Tour of an Aircraft Carrier). Heyne Verlag, München.
- Conrad, K.-J. (Hrsg.), 2004, Taschenbuch der Konstruktionstechnik, Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Verlag, München
- Curtis, Ph. und Knops, F., 2004, The State and Health of the European and Canadian EO

-
- Service Industry Technical Report September 2004, European Space Agency, Contract No. 16400/02/I-IW; Doc.-Ref . EOMD.REP.018, Issue-Date: 24 September 2004, p.354; VEGA Group PLC, Welwyn Garden City/UK
- Dallinger, G., 2002, Datenreport 2002. Zahlen und Fakten für die Bundesrepublik Deutschland - In Zusammenarbeit mit WZB und ZUMA. Bundeszentrale für politische Bildung, Statistisches Bundesamt, Bonn.
- Delbrück, H., 2003, Geschichte der Kriegskunst. Nikol Verlagsgesellschaft, Hamburg.
- DePriest, D., 2003, A GPS User Manual - Working With Garmin Receivers. 1st Books (Authorhouse), Central Milton Keynes, GB.
- Deuel, L., 1977, Flug ins Gestern. das Abenteuer der Luftarchäologie. Beck, München.
- Dotzek, N., 2000, Tornadoes in Germany. [Special Issue. Proc. 1st Conf. on European Tornadoes and Severe Storms], 1-29, Wessling, Oberpfaffenhofen, DLR - Inst. f. Physik der Atmosphäre. Atmospheric Research. Ref. Type: Conference Proceeding
- Eyermann, K.-H., 1963, Luftspionage. Deutscher Militärverlag Berlin, Berlin.
- Fritzler, M., 1997, Ökologie und Umweltpolitik. Bundeszentrale für politische Bildung, Bonn.
- Froböse, R., 2003, Automatisierung erschließt Karbonfasern neue Potenziale. <http://www.innovations-report.de/html/berichte/materialwissenschaften/bericht-23556.html>, 1-3. 2003. Wacker-Chemie. Ref. Type: Electronic Citation
- GAMA, 2004, General Aviation Statistical Databook 2003, General Aviation Manufacturers Association (GAMA), Washington
- Giemulla, E. und Schmid, R., 1996, Recht der Luftfahrt - Textsammlung (2., erw. Aufl.). Luchterhand, Berlin.
- Giesecke, F. E., Mitchel, A., Spencer, H. C., Hill, I. L., Loving, R. O., Dygdon, J. T., Novak, J. E., und Lockhart, S., 1998, Engineering Graphics. Upper Saddle River, NJ.
- Gießübel, J., 1991, Gewässerzustandserfassung und -bewertung mittels Fernerkundung – ein rechnergestütztes Verfahren zur Umweltbeobachtung und für die Naturschutzplanung. Natur und Landschaft 66 (1991)[12], 579-583. Ref. Type: Magazine Article
- Gießübel, J., 1993, Erfassung und Bewertung von Fließgewässern durch Luftbilddauswertung. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 37, Bonn-Bad Godesberg, Bundesanstalt für Naturschutz und Landschaftsökologie. Ref. Type: Magazine Article
- Graham, R. und Koh, A., 2002, Digital Aerial Survey - Theory and Practice. Whittles Publishing, Caithness, Scotland.
- Graham, R. W. und Read, R. E., 2002, Manual of Aerial Survey - Primary Data Acquisition. Whittles Publishing Services, Caithness, Scotland.
- Graham, R. W., 1988, Small Format Aerial Survey from Light and Microlight Platforms. Photogrammetric Record, 12(71), 561-573.
- Griffiths, A., 2004, RCAHMW Corporate Plan 2005 - 2008. 1-19. 2004. Ceredigion, Wales, RCAHMW. Ref. Type: Electronic Citation
- Grimm, A., 2003, 25 Jahre IGI, vom CPNS zu CCNS und AEROcontrol. Fa. IGI Systems. Ref. Type: Electronic Citation
- Groehler, O., 1981, Geschichte des Luftkriegs 1910 bis 1980. Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin.
- Grün, A., 2000, Potential and Limitations of Highresolution Satellite Imagery. 1-14. 4-12-2000. Taipei, Taiwan. 4-12-2000. Ref. Type: Conference Proceeding
- Gudd, M., 2003, Gewitter und Gewitterschäden im südlichen hessischen Berg- und Beckenland und im Rhein-Main-Tiefland 1881 bis 1980 - Eine Auswertung mit Hilfe von Schadensdaten -. 1-583. 18-9-2003. Fachbereich 22 - Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz. Ref. Type: Dissertation

-
- Gunston, B., 1999, Die Flugzeuge des 2. Weltkriegs - Risszeichnungen. Über 60 Flugzeuge und Triebwerke in dreidimensionalen Zeichnungen mit Details und Erläuterungen. Heel Verlag GmbH, Königswinter.
- Hägermann, D. und Schneider, H., 1997, Landbau und Handwerk. 750 v.Chr. bis 1000 n.Chr.. Propyläen, Berlin.
- Halse, B. H., 2003, The European Aerospace Industry - Facts & Figures 2002. www.aecma.org [AECMA Publication RP 246], 1-40. AECMA . Ref. Type: Electronic Citation
- Hemphill, J. und Estes, J. E.. History of Aerial Photographic Interpretation; <http://www.r-s-c.org/rsc/v1m1.html>; 2003; Ref. Type: Electronic Citation
- Henniges, H., 2004, Fotografie pur – Alle Spiegelreflexkameras. S.30 – 47, fotoMagazin, Hamburg
- Hildebrandt, A. D., 1909, Die Brüder Wright - Eine Studie über die Entwicklung der Flugmaschine von Lilienthal bis Wright. Berlin. Ref. Type: Electronic Citation
- Hoffmann, F., 2005, Grundbegriffe und Grundlagen der Regelungstechnik V.12.04.05. <http://esr.e-technik.uni-dortmund.de/Downloads/StuR12/Folien/Grundlagen.pdf> [V.12.04.05], 1-95, Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Universität Dortmund. Ref. Type: Electronic Citation
- Käsmann, F. C. W., 1999, Weltrekordflugzeuge - die schnellsten Flugzeuge der Welt von 1906 bis heute. Aviatic Verlag, Oberhaching.
- Koch, R. H., 1989, BI-Lexikon Uhren und Zeitmessung. VEB Bibliographisches Institut, Leipzig.
- Konecny, Gottfried; 1998; Photogrammetry and Remote Sensing in Transition to Geoinformatics; Zeitschrift. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG); Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V.; Schweizerbart'sche Verlagbuchhandlung; Stuttgart; Jg. 98/6; 1432-8364
- Kramer, H. J., 1994, Observation of the Earth and its Environment - Survey of Missions and Sensors. Springer Verlag, Berlin.
- Kraus, K., 1997, Photogrammetrie - Band1. Grundlagen und Standardverfahren; 6. Aufl.; Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- Kühr, W., 1995, Flugnavigation – Bd. 4A, Reihe: Der Privatflugzeugführer, Luftfahrtverlag Friedrich Schiffmann, Bergisch-Gladbach., Ref. Type: Serial (Book, Monograph)
- Kühr, W., 1994, Funknavigation – Bd. 4B, Reihe: Der Privatflugzeugführer, Luftfahrtverlag Friedrich Schiffmann, Bergisch-Gladbach. Ref. Type: Serial (Book, Monograph)
- Kupzog, J., 1999, Satellitennavigation – Bd. 4C, Reihe: Der Privatflugzeugführer, Luftfahrtverlag Friedrich Schiffmann, Bergisch-Gladbach. Ref. Type: Serial (Book, Monograph)
- Lang, G., 2000, Flugzeugkatalog 2000 – Militärflugzeuge, München, GeraNova Zeitschriftenverlag; Ref. Type: Catalog
- Leser, H., 1997, Landschaftsökologie - Ansatz, Modelle, Methodik, Anwendung. Ulmer Taschenbuch Verlag UTB, Stuttgart.
- Linder, W., 2003, Digital Photogrammetry - Theory and Applications. Springer Verlag, Berlin.
- Lindstädt, H.-J., 2002, Bibliographie deutschsprachiger aeronautischer Literatur – Band 1. Von den Anfängen bis 1945, Selbstverlag, Bremen
- Lindstädt, H.-J., noch nicht erschienen, Bibliographie deutschsprachiger aeronautischer Literatur – Band 2. Von 1945 bis heute, Selbstverlag, Bremen
- Mankiewicz, R., 2000, Zeitreise Mathematik - Vom Ursprung der Zahlen bis zur

-
- Chaostheorie. vgs verlagsgesellschaft, Köln.
- Mason, H. M., 1973, Die Luftwaffe 1918-1945. Wiener Verlag, Wien.
- Meckenstock, H. J. und Wittke, H., 1998, Geodätische Rechen-Übungen - 200 Aufgaben aus Examen und Praxis, mit Lösungen und Lösungswegen zum Selbststudium. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn.
- Meier, G. und Zschweigert, H., 1997, Die Hochkultur der Megalithzeit. verschwiegene Zeugnisse aus Europas großer Vergangenheit. Grabert-Verlag, Tübingen.
- Meier, R. H., 2002, Praktische Aerodynamik (Reprint des gleichnamigen sowj. Lehrbuchs aus dem Jahre 1946). Elbe-Dnjepr-Verlag, Klitzschen.
- Meisel, F., 1908, Lehrbuch der Perspektive - zum Gebrauche an mittleren und höheren technischen Lehranstalten, Kunstgewerbe- und Kunstschulen, sowie bei eigenem Studium. Verlag von Seemann & Co., Leipzig.
- Meyer, M. P., History of Small Format Aerial Photography - U.S. View. Proceedings of The First North American Symposium on Small Format Aerial Photography. 1997. Maryland, ASPRS. Ref. Type: Conference Proceeding
- Munafo, R., 2004, Computer History. <http://home.earthlink.net/~mrob/pub/computer-history.html>, S.13, Ref. Type: Electronic Citation
- Müller, H. M., 1996, Schlaglichter der Weltgeschichte. Bundeszentrale für politische Bildung in Zusammenarbeit mit Meyers Lexikonredaktion, Bonn.
- Münchener Rück., 1999,. Naturkatastrophen in Deutschland - Schadenerfahrungen und Schadenpotentiale. 4-99. Best.-nr. 2798-E-d; Datei. 302-01037.pdf, 1999. München, Münchener Rückversicherung; Ref. Type: Electronic Citation
- Nickles, M., 2004, PC Report 2004. Franzis Verlag, Poing.
- Nowakowski, G.. Alle zwei Wochen ein Absturz. TAZ. 10-1-1989. Ref. Type: In Press
- Ogrissek, R., 1983, Kartenkunde. VEB F.A. Brockhaus, Leipzig.
- Petit, E., 1993, Histoire de L'Aviation, Presses Universitaires de France, Paris.
- Petrie, G. und Walker, S., 2000, Digital Photogrammetric Systems Approach Maturity - A Global Survey of System Suppliers. Geo-Informatics - Magazine for Geo-IT Professionals in Europe 3, 18-25. Emmeloord, Geoinformatics. Ref. Type: Magazine Article
- Piekalkiewicz, J., 1978, Luftkrieg 1939-1945. Südwest Verlag, München.
- Pirani, M. und Fischer, J., 1957, Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik. Walter de Gruyter & Co., Berlin.
- Rüger, W., Pietschner, J., und Regensburger, K., 1987, Photogrammetrie - Verfahren und Geräte zur Kartenherstellung. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Safina, C., 2004, Ein Albatros namens Amelia - Aus dem Leben eines Sturmvogels. marebuchverlag, Hamburg.
- Schilling, F. und Rettinghaus, H., 1994, Die Geschichte der Luftpolizei. Flugzeug Publikations GmbH, Illertissen.
- Schmid, P. und Töpelt, B., 2004, Rauf und runter - Einfluss der Speichertimings auf die Performance. www.tomshardware.de , 1-20. 23-1-2004. TG Publishing AG, Unterföhring/München. Ref. Type: Electronic Citation
- Scholz, R., 1995, Die Entwicklung und Bedeutung des Kleinflugzeugmarktes in Westdeutschland nach 1955. 1-295. Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät der Universität zu Köln. Ref. Type: Inauguraldissertation
- Schrader, S. und Pouncey, R., 1997, ERDAS Field Guide. ERDAS Inc., Atlanta, Georgia.
- Schreyer, W., 1961, Die Piratenchronik - Dramatische Szenen und Berichte aus der Geschichte der Luftspionage. Kongress-Verlag Berlin, Leipzig.
- Schreyer, W., 1967, Augen am Himmel. Deutscher Militärverlag, Berlin.

-
- Schwanhauser, R., Blidberg, R. D., Toscano, M., Ferguson, J., Zaloga, S. J. und Gage, D. W., 1997, 1997-1998 International Guide to UV-Unmanned Vehicles. Air..., Land..., Sea... - A Joint Venture Production of Aviation Week & Space Technology and the Association for Unmanned Vehicle Systems International - A Publication of The MacGraw-Hill Companies. International Guide to Unmanned Vehicles, Vol.1, 1-176.
- Schwedt, G., 1996, Taschenatlas der Umweltchemie. Thieme Verlag, Stuttgart.
- Seelmann, D., 1973, Illustrierte Geschichte der Fliegerei, pp. 1-196, Verlag Manfred Pawlak, Herrsching
- Seewald, O., 1999, Naturschutz- und Landschaftspflegerecht; <http://www.jura.uni-passau.de/fakultaet/lehrstuehle/Seewald/skripten/nsin.pdf>, 1-5., Universität Passau, Lehrstuhl für Staats- und Verwaltungsrecht, insbesondere Sozialrecht; 2005.
- Simonyi, K., 1986, Kulturgeschichte der Physik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt.
- Tarrusov, A., Dubois, J.-M. M. und Wenzl, M., 1996, Les systèmes légers de télédétection aéroportée pour les sciences de la Terre. International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, 2699-2718.
- Taubman, P., 2003, Secret Empire - Eisenhower, the CIA, and the Hidden Story of America's Space Espionage. Simon & Schuster, New York.
- Taylor, M. J. H., 1999, Milestones of Flight - C.843 B.C. to the Present. Chancellor Press, London.
- Thaller, G. E., 1999, Spionagesatelliten - Unsere Augen im All. Verlag f. Technik und Handwerk, Baden-Baden.
- Walker, R. S., Peters, W. F., Aldrin, B., Bolen, E. M., Buffenbarger, T. R., Douglass, J. W., Fowler, T. K., Hamre, J. J., Schneider, W. Jr., Stevens, R. J., Tyson, N. d. und Wood, H. R., 2002, Final Report Of The Commission On The United States Aerospace Industry. 1-319. Arlington, Virginia, The Commission On The United States Aerospace Industry. Ref. Type: Electronic Citation
- Walz, P., 2004, Neue Entwicklungen bei 24 x 36 mm. <http://www.image-scene.de>. 12-3-2004. Ref. Type: Electronic Citation
- Warner, W. S., Graham, R. W. und Read, R. E., 1996, Small Format Aerial Photography. Whittles Publishing Services, Latheronwheel, Caithness, Scotland UK.
- Watt, A., 2002, 3D-Computergrafik, 3. Aufl., Addison-Wesley, München.
- Westphal, W., 1996, Kursbuch 20. Jahrhundert - Der synchronoptische Überblick. Chronik Verlag, Gütersloh.
- White, R., 2004, So funktionieren Computer - Ein Streifzug durch den Computer & alles, was dazu gehört, Markt+Technik Verlag, München.
- Wisniewski, M., 1996, Quantitative Methods For Decision Makers. MacMillan India LTD, New Delhi.
- Wissmann, G., 1979, Geschichte der Luftfahrt von Ikarus bis zur Gegenwart - Eine Darstellung der Entwicklung des Fluggedankens und der Luftfahrttechnik. VEB Verlag Technik, Berlin.
- Zsilinsky, V. G., 1997, History of Small Format Aerial Photography. A Canadian View. Proceedings of The First North American Symposium on Small Format Aerial Photography. Maryland, ASPRS, Ref. Type: Conference Proceeding

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet. Die Arbeit wurde weder als Ganzes noch in Teilen zuvor an einer anderen Hochschule im Rahmen eines Promotionsprüfungsverfahrens eingereicht oder veröffentlicht.

Kiel, den 24.5. 2005

Günther Winkler

Lebenslauf

Persönliche Angaben

- Name: **Günther Winkler**
- Geburtsdatum: 21.3.1970
- Geburtsort: Regensburg / Bayern



Tätigkeitsprofil

Praktische luftgestützte Fernerkundung in allen Facetten

Werdegang

- 1976 - 1981 Grundschule
- 1981 - 1990 Joseph-von-Fraunhofer-Gymnasium in Cham/Oberpfalz; Bayern
- 1990 - 1994 Fliegerische Ausbildung (Jet) Luftwaffe: Offizierausbildung in Fürstenfeldbruck b. München und Roth b. Nürnberg; Instrumentenflugausbildung in Mather AFB/Kalifornien
- 1994 - 2000 Studium an der Universität Potsdam; Diplom-Geoökologie und Vertiefungsrichtungen: Physik und Geoinformatik
- 1997 - 2000 Selbstbau eines ultraleichten Motorseglers in Gemischtbauweise (Holz/GFK/CFK)
- 1998 / 99 Flugausbildung PPL-A mit AZF (6 Wochen Theorie/Praxis) in Kyritz (ehem. Agrarflugzentrum DDR); Anfang 1999 PPL-B
- 1998 Einweisung als Bildflugoperator auf Cessna TU-206 mit der Luftbildmesskammer von Carl Zeiss, Jena, LMK 15/30 in der Firma Berliner Spezialflug (BSF).
- 1998 - 2000 Firmenmitarbeiter UMS-Umwelt-Messflugsysteme (Tochter der Stemme-Gruppe) Strausberg/Brandenburg: Teilnahme an einem DBU-Förderprojekt für ein leichtes Messflugzeug auf Motorsegler-Basis (modulares Messflugsystem „S-15“).
- März 2000 Abgabe der Diplomarbeit im Diplomstudiengang Geoökologie – Thema: „Geoökologische Fernerkundung mit leichten Meßflugzeugen“
- April 2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Ökologie-Zentrum der CAU Kiel (ÖZK FA Ökotechnik)
- Mitte 1999 Beginn eigener Befliegungsexperimente mit freihandstabilisierten Kleinbild- und Digitalkameras; parallel hierzu Einarbeitung in GIS, Kartografie, GPS, Geodäsie, digitaler Photogrammetrie etc.
- 24.11.2002 Erstflug des Experimentals ULF-2 (Wk-nr.032) durch bestellten OUV-Testpiloten; am selben Tag eigener Einweisungsflug.
- Mitte 2003 Verlegung des Flugzeugs von Kyritz nach Kiel und Abwicklung des qualitativen Testflugprogramms als Erprobungspilot (ca. 30 Testflugstunden)
- Aug. 2003 Segelkunstflug-Ausbildung in Pasewalk (Meck.-Pom.)
- bis 2005 vertiefte praktische Einarbeitung in Fototechnik, digitale Photogrammetrie, digitale Bildverarbeitung, GIS, GPS und 3D-Computergrafik anhand von 25 selbständig geplanten und durchgeführten Bild(mess-)flügen.

