

# **Das Methodenpaket IeMAX mit dem Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS**

Entwicklung und Anwendung eines Entscheidungsunterstützungssystems  
für die integrative Raumplanung

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



***Christof Herzog***

Kiel

2002

Referent/in: ..... Prof. Dr. O. Fränze

Korreferent/in: ..... Prof. Dr. P. Kandzia

Tag der mündlichen Prüfung ..... 06. Mai 2002

Zum Druck genehmigt: Kiel, ..... 08. Mai 2002

.....  
Prof. Dr. Th. Bauer (Dekan)

*...und das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile!*

## **Vorwort**

Die Dissertation entstand im Zeitraum April 1999 bis März 2002 und wurde im Rahmen des DFG-geförderten Graduiertenkollegs ‚Integrative Umweltbewertung‘ an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel angefertigt.

Zu den besonderen Kennzeichen dieses Graduiertenkollegs zählt das fachübergreifende Zusammenwirken der Professoren und Stipendiaten aus den Bereichen Ökosystemforschung, Ökonomie, Rechtswissenschaften, Informatik und Mathematik.

Die vorliegende Arbeit war mit einem ökosystemaren Schwerpunkt und Methoden und Werkzeugen aus der Informatik im interdisziplinären Themenbereich Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssysteme angesiedelt.

## **Danksagung**

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Aufnahme in das Graduiertenkolleg, die finanzielle Förderung und die Gelegenheit mit Vorträgen und Posterpräsentationen auf nationalen und internationalen Tagungen am Gedankenaustausch mit Wissenschaftlern anderer Universitäten teilzunehmen.

Herrn Professor Dr. O. Fränzle danke ich sehr herzlich für die wissenschaftliche Betreuung als Doktorvater und als Förderer des Denkens in inter- und transdisziplinären Zusammenhängen. Seine stete Diskussionsbereitschaft und das ausgewogene Verhältnis zwischen kritischer Reflexion und freier Entfaltung innovativer Ideen förderten eigenständiges, wissenschaftliches Arbeiten.

Für die Begleitung während der Promotionszeit und Gespräche über Systeme zur Informationsverarbeitung und der Künstlichen Intelligenz danke ich Herrn Professor Dr. P. Kandzia. Meinem Mentor zu Fuzzy-Methoden, Herrn Dr. Arkadiusz Salski, gebührt mein Dank für zahlreiche Diskussionen und für die Bereitstellung des Fuzzy-Modellierungsunterstützungssystems xFLEco. Für eine unkomplizierte Zusammenarbeit bei der Weiterentwicklung und dem prototypischen Einsatz dieser Software-Umgebung danke ich Dipl.-Inform. Christian Lemster. Für Ratschläge bei der Entwicklung und dem Einsatz von Fuzzy Logic und Expertensystemen in der Planungspraxis danke ich Dr. Meinolf Asshoff und Dr. Martin Friedrichs. Allen Mitarbeitern des ÖZKs sei für ein harmonisches Miteinander und die unbürokratische Arbeitsumgebung gedankt.

Meinen Kollegen Dr. Ulrike Middelhoff und Dr. Jan Barkmann bin ich dankbar für ihre stete Diskussionsbereitschaft und die angenehme Büroatmosphäre.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Wissenschaftstheoretische Stellung des Themas.....	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit .....	4
<b><u>TEIL I</u></b>	<b><u>THEORETISCHE GRUNDLAGEN</u></b>
<b>2 NACHHALTIGE RAUMENTWICKLUNG.....</b>	<b>5</b>
2.1 Ziele und Aufgaben.....	5
2.2 Organisation und Planungsebenen.....	6
<b>3 ENTSCHEIDUNGSFINDUNG BEI RAUMNUTZUNGSKONFLIKTEN .....</b>	<b>9</b>
3.1 Grundlagen und Einflussfaktoren .....	9
3.1.1 Definitionen.....	9
3.1.2 Raumnutzungskonflikte um natürliche Lebensgrundlagen .....	13
3.1.3 Komplexität ökosystemarer Sachverhalte.....	15
3.1.4 Entscheidungstheorie und der Strukturierungsgrad von Entscheidungssituationen .....	16
3.2 Unterstützungssysteme.....	19
3.2.1 Aufgaben und Entwicklungsstadien .....	19
3.2.2 Entscheidungsunterstützungssysteme.....	22
3.2.3 Führungsinformationssysteme .....	23
3.3 Unsicherheiten .....	24
3.3.1 Definitionen.....	24
3.3.2 Ursachen.....	28
3.3.3 Folgen für die Indikatorbildung .....	32
3.3.4 Folgen für den Einsatz von Statistik und Erklärungsmodellen .....	34
<b><u>TEIL II</u></b>	<b><u>METHODEN UND TECHNIKEN</u></b>
<b>4 DAS METHODENPAKET IEMAX: INTEGRATED ENVIRONMENTAL MODELLING AND ASSESSMENT WITH A FUZZY LOGIC EXPERT SYSTEM.....</b>	<b>36</b>
4.1 Ziel und Aufbau .....	36
4.2 Systemanalyse und Parametrisierung .....	38
4.2.1 Messbarkeit und Skalenniveaus (öko-)systemarer Sachverhalte.....	38
4.2.2 Systemdynamik und DPSIR-Wirkungskreise .....	40
4.2.3 Funktionalisierung ökologischer Sachverhalte .....	41
4.2.4 Materialspektrum: Daten, Information, Wissen .....	46
4.3 Modellierung und Simulation.....	51
4.3.1 Wissensmanagement .....	54
4.3.2 Künstliche Intelligenz und Expertensystemtechnik.....	58
4.3.3 Soft Computing, Fuzzy Logic und Fuzzy-Modellierung .....	68
4.3.4 Szenariotechnik.....	84
4.4 Werte, Bewertung und Entscheidung .....	87
4.4.1 Werte und Maßstäbe einer Gesellschaft .....	87
4.4.2 Integrative Bewertung: ökologisch, ökonomisch, rechtlich und sozial .....	89
4.5 Integration der Methoden zur Entscheidungsunterstützung.....	93

**TEIL III**

**FALLSTUDIE**

<b>5</b>	<b>TRANSDISZIPLINÄRE KENNZEICHNUNG MÖGLICHER KONFLIKTE ZWISCHEN LANDWIRTSCHAFT, SIEDLUNGSENTWICKLUNG UND WASSERWIRTSCHAFT.....</b>	<b>95</b>
5.1	Transdisziplinäre Wissensakquisition und Herleitung der Entscheidungssituation als Konflikttripel .....	95
5.2	Landwirtschaft .....	98
5.2.1	Agrarökosysteme .....	98
5.2.2	Sozioökonomische Werte und Ziele.....	99
5.2.3	Rechtsgrundlagen und umweltpolitische Steuerungsinstrumente .....	101
5.3	Siedlungsentwicklung .....	104
5.3.1	Siedlungsökosysteme .....	104
5.3.2	Sozioökonomische Werte und Ziele.....	104
5.3.3	Rechtsgrundlagen und umweltpolitische Steuerungsinstrumente .....	105
5.4	Wasserwirtschaft.....	106
5.4.1	Gewässerökosysteme.....	106
5.4.2	Sozioökonomische Werte und Ziele.....	107
5.4.3	Rechtsgrundlagen und umweltpolitische Steuerungsinstrumente .....	109
5.5	Zusammenführung aktorsbezogener Kenngrößen mittels DPSIR-Wirkungskreise .	110
5.6	Ökosystemare Multifunktionalität und Sicherung nachhaltiger Raumentwicklung...	112
5.7	Wissensmanagement und Handlungssteuerung.....	113
<b>6</b>	<b>ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG DES FUZZY-SIMULATIONSMODELLS FLUCS .....</b>	<b>115</b>
6.1	Modellstruktur und Software-Umgebung .....	115
6.2	Wissensbasis und regelbasierte Wissensrepräsentation.....	117
6.2.1	Deklaration und Fuzzifizierung linguistischer Variablen .....	117
6.2.2	Regelbasierte Wissensrepräsentation .....	127
6.3	Anwendung des Modellsystems und Interpretation der Simulationsergebnisse der Szenarienmodellierung.....	132
6.3.1	Best-Case-Szenario: Uneingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung.....	132
6.3.2	Trend-Szenario: Eingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung .....	135
6.3.3	Worst-Case-Szenario: Umweltbelastende monofunktionale Nutzungsstruktur .....	137
6.3.4	Zusammenfassende Interpretation der Simulationsergebnisse der drei Szenarien .....	139
6.4	Vergleichende Software-Experimente und Interpretationen verschiedener Modellierungstechniken.....	142
6.4.1	Variabilität der Simulationsergebnisse bei Input in linguistischer und numerischer Form.....	142
6.4.2	Einfluss konventioneller und unscharfer Klassengrenzen auf das Simulationsergebnis.....	149
<b>7</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK .....</b>	<b>153</b>
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>156</b>
<b>9</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>156</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>157</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Zeithorizonte von Planung und Entscheidung.....	10
Abb. 2: Management Support Systeme im Wandel der Zeit .....	20
Abb. 3: Das Methodenpaket IeMAX.....	37
Abb. 4: Eigenschaften und Zusammenhänge von Daten, Wissen und Verarbeitungsschritten.....	49
Abb. 5: Raumzeitliche Veränderungen und Modellierungsebenen.....	53
Abb. 6: Modellformen, Modellierungszwecke und Aussageformen.....	54
Abb. 7: Disziplinen und Phasen zur Analyse und Modellierung von Wissen .....	56
Abb. 8: Bausteine und Säulen des Wissensmanagements.....	57
Abb. 9: Komponenten eines Expertensystems .....	59
Abb. 10: Wirkungsweise von Fuzzy-Mengenoperatoren .....	73
Abb. 11: Wirkungsweise von Modifikatoren .....	73
Abb. 12: Schritte der Fuzzy-Modellierung.....	74
Abb. 13: Exemplarischer Ablauf einer Fuzzy-Inferenz .....	78
Abb. 14: Darstellung der regelbasierten Wissensrepräsentation und die drei fuzzifizierten Variablen.....	81
Abb. 15: Spektrum des Regelsystems in 3-D und Beispiele in 2-D Darstellung.....	82
Abb. 16: Schema eines Umweltbewertungssystems mit Sach-, Wertmodell und Bewertungsregeln .....	90
Abb. 17: Der DPSIR-Wirkungskreis der Landwirtschaft.....	110
Abb. 18: Der DPSIR-Wirkungskreis der Siedlungsentwicklung.....	111
Abb. 19: Der DPSIR-Wirkungskreis der Wasserwirtschaft .....	111
Abb. 20: Wissensmanagement für Entscheidungsfindungen beim Konflikttripel .....	114
Abb. 21: Das Simulationsmodell: Sachmodell, Wertmodell und Nutzungskategorien .....	115
Abb. 22: Struktur des Simulationsmodells: Teilmodelle und Variablen .....	116
Abb. 23: Deklarationen der Input-Variablen.....	119
Abb. 24: Deklarationen der Zwischengrößen und Output-Variablen.....	123
Abb. 25: Darstellung der Simulation des Best-Case Szenarios (Input in linguistischer Form) .....	133
Abb. 26: Darstellung der Simulation des Trend-Szenarios (Input in linguistischer Form) .....	136
Abb. 27: Darstellung der Simulation des Worst-Case Szenarios (Input in linguistischer Form).....	138
Abb. 28: Prozentuale Abweichungen vom Trend-Szenario .....	141
Abb. 29: Darstellung der Simulation des Best-Case Szenarios (Input in numerischer Form).....	143
Abb. 30: Schwankungsbreite der Variablen des Best-Case Szenarios (Input: numerische vs. ling. Form).....	144
Abb. 31: Darstellung der Simulation des Trend-Szenarios (Input in numerischer Form) .....	145
Abb. 32: Schwankungsbreite der Variablen des Trend-Szenarios (Input: numerische vs. linguistische Form)..	146
Abb. 33: Darstellung der Simulation des Worst-Case Szenarios (Input in numerischer Form).....	147
Abb. 34: Schwankungsbreite der Variablen des Worst-Case Szenarios (Input: numerische vs. ling. Form) .....	148
Abb. 35: Gegenüberstellung unscharfer und konventioneller Klassengrenzen der Minereraldüngermenge .....	149
Abb. 36: Einfluss von konventionellen u. unscharfen Klassengrenzen auf das Simulationsergebnis (2x Input)	151
Abb. 37: Unterschiede zwischen konventionellen (,crisp‘) u. unscharfen (,fuzzy‘) Klassengrenzen (Verlauf).	152



## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Planungsräume, Programme und Planungsmaßstäbe .....	8
Tab. 2: Die drei Handlungsformen ‚Ordnen‘, ‚Ausgleichen‘ und ‚Entwickeln‘ in der Raumplanung.....	10
Tab. 3: Anforderungen an Bewertungen und Entscheidungen .....	11
Tab. 4: Gegenüberstellung von Raumnutzungen und Klassen von Ökosystemen .....	13
Tab. 5: Grundkonzepte der Raumentwicklung .....	15
Tab. 6: Merkmale der deskriptiven und präskriptiven Entscheidungstheorie.....	18
Tab. 7: Übersicht von Begriffen im Umfeld von ‚Unsicherheit‘ .....	27
Tab. 8: Unsicherheiten in Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystemen .....	28
Tab. 9: Multivariate Analyseverfahren .....	35
Tab. 10: Skalenniveaus und Merkmalsausprägungen .....	39
Tab. 11: Funktionen der natürlichen Umwelt.....	43
Tab. 12: Funktion und Leistungsfähigkeit des Landschaftshaushaltes .....	44
Tab. 13: Funktionsräumliche Betrachtungsweise von Landschaften .....	45
Tab. 14: Gesellschaft und Arbeit im Wandel .....	48
Tab. 15: Definitionen von Wissen, Information, Daten und Zeichen .....	48
Tab. 16: Von der Datenverarbeitung zum Wissensmanagement .....	55
Tab. 17: Allgemeine Aufgabenbereiche von Expertensystemen .....	63
Tab. 18: Neuere Expertensysteme in den Umweltwissenschaften.....	64
Tab. 19: Anforderungen bei der Entwicklung von Expertensystemen.....	65
Tab. 20: Entwicklungsdauer von Expertensystemen .....	67
Tab. 21: Kosten für die Entwicklung von Expertensystemen.....	67
Tab. 22: Gegenüberstellung von Techniken des Soft Computings .....	68
Tab. 23: Formen von Handlungen auf ontischer und deontischer Basis .....	70
Tab. 24: Grafische Formen von Fuzzy-Sets (linear).....	71
Tab. 25: Fuzzy-Mengenoperatoren.....	72
Tab. 26: Typen von linguistischen Termen.....	75
Tab. 27: Schemata logischen Schlussfolgerns.....	76
Tab. 28: Eigenschaften von Szenarien .....	84
Tab. 29: Werte einer Gesellschaft .....	87
Tab. 30: Gegenüberstellung von Flächennutzungskategorien und Daseinsgrundfunktionen .....	89
Tab. 31: Veränderung der Flächennutzung in Deutschland 1993-97.....	95
Tab. 32: Entscheidungsrelevante Grund- und Strukturdaten Deutschlands.....	97
Tab. 33: Neun Prinzipien einer nachhaltigen Wasserwirtschaft .....	108
Tab. 34: Analogien von Bewertungen, Funktionen und Herangehensweisen .....	112
Tab. 35: Gegenüberstellung von Nutzungskategorien, Teilfunktionen und Zielen.....	113
Tab. 36: Klassen und Wertebereiche der Bodenart.....	119
Tab. 37: Klassen und Wertebereiche der Variable Hangneigung .....	119
Tab. 38: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Flurabstand .....	120
Tab. 39: Mineraldüngeraufwand in Schleswig-Holstein.....	120
Tab. 40: Klassen und Wertebereiche der Variable Mineraldüngergabe.....	120
Tab. 41: Klassen und Wertebereiche der Variable Bodenbedeckung .....	121
Tab. 42: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Förderung.....	121
Tab. 43: Klassen und Wertebereiche der Variable Ertrag .....	122
Tab. 44: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Neubildungsrate .....	124
Tab. 45: Klassen und Wertebereiche der Variable potentielle Nitratauswaschung.....	124
Tab. 46: Klassen und Wertebereiche der Variable Landwirtschaftsform.....	125

Tab. 47: Klassen und Wertebereiche der Variable Reduzierung der Düngemenge .....	126
Tab. 48: Klassen und Wertebereiche der Variable Anteil der organischen Substanz in Böden.....	126
Tab. 49: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Qualität .....	126
Tab. 50: Klassen und Wertebereiche der Variable Wirtschaftlichkeit .....	127
Tab. 51: Klassen und Wertebereiche der Variable Flächenumwidmung .....	127
Tab. 52: Regelsystem des Teilmodells 1: Naturräumliche Ausstattung.....	128
Tab. 53: Regelsystem des Teilmodells 2: Bodennutzung.....	129
Tab. 54: Regelsystem des Teilmodells 2: Ergebnisse .....	130
Tab. 55: Regelsystem des Teilmodells 3: Wasserwirtschaft .....	130
Tab. 56: Regelsystem des Teilmodells 3: Landwirtschaft.....	131
Tab. 57: Regelsystem des Teilmodells 3: Gesamtergebnis .....	131
Tab. 58: Simulationsergebnisse der drei Szenarien .....	140
Tab. 59: Abweichungen vom Trend-Szenario.....	140

# 1 Einführung und Zielsetzung

## 1.1 Wissenschaftstheoretische Stellung des Themas

Gegenstand der Raum- und Umweltplanung in Deutschland ist die Anpassung von Ansprüchen unterschiedlicher Nutzergruppen, wie z.B. der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft oder der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung, an natürliche Lebensgrundlagen. Eine Maxime einer nachhaltigen Raumentwicklung ist die Sicherung bzw. Schaffung gleichwertiger Lebensbedingungen zur Erfüllung menschlicher Bedürfnisse (BBR 2000, BMR 1996, FRÄNZLE et al. 1992). Doch defizitär sind bisherige Erkenntnisse über die ausgewogene Verknüpfung steigender gesellschaftlicher Raumansprüche mit dem Gedanken des Paradigmas ‚**Nachhaltige Entwicklung**‘ und dem Aktions- und Handlungsprogramm ‚Agenda 21‘ zum Schutz eines nachhaltigen funktions- und leistungsfähigen Naturhaushaltes als Lebensgrundlage für den Menschen (BMU 1997, UBA 2000).

Nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development) ist definiert als: ‚Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs‘ (BRUNDTLAND-BERICHT 1987). Nachhaltige Entwicklung versteht sich somit als deontisches Leitbild. Denn menschliches Denken und Handeln *sollte* sich so verhalten, dass die Bedürfnisse der Menschen heute befriedigt werden, ohne dabei zukünftigen Generationen diese Möglichkeit zu nehmen, d.h. ihnen eine auf Dauer für alle unter menschenwürdigen, sicheren Verhältnissen bewohnbare Erde zu erhalten. Nachhaltige Entwicklung spiegelt die notwendigerweise zu berücksichtigende Vernetzung mehrerer Dimensionen wider. Die Ökonomie betrachtet eine Internationalisierung der Warenströme und Produktionssorte als Folge des wachsenden Konkurrenz- und Wettbewerbsdrucks zur Befriedigung einer steigenden Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen. Die Ökologie analysiert Nutzungen natürlicher Ressourcen und versucht ökosystemare Wechselwirkungen zu erfassen. Die sozialen Aspekte Nachhaltiger Entwicklung, wie die Schaffung gleichwertiger Lebensbedingungen und Abschaffung von Einkommensdiskrepanzen, gehen einher mit Forderungen nach mehr Gerechtigkeit durch den Abbau von Disparitäten.

Stoßen nun gegensätzliche Nutzungsinteressen an natürliche Lebensgrundlagen, so prägen **Konfliktsituationen** das Bild der Planungspraxis. Diese Situationen unterliegen einem Wandel, der ausgehen kann von sich wechselseitig beeinflussenden Randbedingungen, wie:

- ökosystemaren Gegebenheiten (z.B. Strukturen, Wasser- und Stoffkreisläufe),
- wirtschaftlichen Impulsen (z.B. Duales System Deutschland, kraftstoffsparende Pkws),
- politischen Signalen (z.B. Ökosteuer, Restriktionen, ökologischer Landbau),
- sozialen Veränderungen (z.B. Arbeitslosigkeit, Singlehaushalte) und
- technischen Revolutionen (z.B. WWW, Künstliche Intelligenz).

In Auszügen findet dieser Wandel Niederschlag in aktuellen Umweltberichten, -programmen und Nachhaltigkeitsberichten, die insbesondere auf die rezente und zukünftige **Konflikt- und Entscheidungsproblematik** in der Raumplanung Deutschlands, nämlich der tendenziellen Zunahme von Siedlungs- und Verkehrsflächen von 7 % (1950) auf 13,3 % (1997) zu Ungunsten der Landwirtschaftsflächen verweisen (BBR 2000, BMBF 1998, BML 2000a, MUNF 1999, SRU 2000, UBA 2000). Ein Grund ist der gesellschaftliche Wohlstandswandel, der sich in einer durchschnittlichen täglichen Versiegelung von bundesweit 120 ha ausdrückt. Dieser sozioökonomische Impuls führt zu Veränderungen in der Dynamik von Mensch-Umwelt-Interaktionen. Mit jeder Versiegelung wird Landwirtschaftsfläche aus der Nutzung genommen, der regionale Wasserkreislauf unterbrochen und lokale Grundwasserneubildung unterbunden. **Nachhaltige Raumentwicklung** bedeutet, derartig vernetzte Raumnutzungskonflikte ins Bewertungs- und Entscheidungskalkül einzubeziehen (FRÄNZLE 1990, FRÄNZLE & FRÄNZLE 1993, POSCHMANN 1999, SCHRÖDER 1996, SCHRÖDER et al. 1998, ZÖLITZ-MÖLLER 1994, ZÖLITZ-MÖLLER et al. 1998). Nun bieten analoge oder monodisziplinäre Bewertungsverfahren für die Reduzierung der Komplexität vernetzter Umweltprobleme und die adäquate Erfassung der o.g. Randbedingungen wie auch für eine angemessene Einhaltung von Anforderungen an Bewertungen und Entscheidungen, wie z.B. intersubjektive Überprüfbarkeit, Strukturkonsistenz oder Flexibilität und zügige Abwicklung *keine* geeigneten Lösungen. Der Entscheidungsproblematik zwischen der Landwirtschaft, der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung und der Wasserwirtschaft ist daher mit rechnerbasierten Unterstützungssystemen für Bewertungen und Entscheidungen zu begegnen. Diese unterscheiden sich von Informationssystemen dadurch, dass sie nicht nur Fakten sammeln, systematisieren und speichern, sondern die Fakten vernetzen, daraus Schlussfolgerungen ziehen und somit zur Unterstützung bei Entscheidungsfindungen beitragen.

Der Einsatz von **Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystemen** hat sich vor allem in den Wirtschaftswissenschaften für Managementaufgaben durchgesetzt, weniger in der Ökosystemforschung und noch seltener in der problemnahen Planungspraxis (BRECKLING & ASSHOFF 1996, POSCHMANN 1998, STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999, WERNER 1992). Seit Jahren werden Untersuchungen zu Vorteilen und Grenzen der Entwicklung von Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystemen aus den Umweltwissenschaften gefordert (BECHMANN 1981, FINKE 1994, FRÄNZLE & FRÄNZLE 1993b, SCHRÖDER 1994, SCHRÖDER 1996). Aus diesen Gründen werden die bisherigen Ansätze kritisch hinterfragt, um neue Erkenntnisse zum besseren Verständnis von umweltbezogenen Entscheidungssituationen zu erörtern und Lösungsmöglichkeiten mit einem exemplarisch implementierten Simulationsmodell aufzuzeigen. Ausgehend vom bundesdeutschen Planungsmaßstab richtet sich der Blick auf aktuelle und zukünftige Veränderungen in der Raumnutzung, die auf schleswig-holsteinische Verhältnisse übertragen und mit dem Einsatz von aus der Mathematik und Informatik kommenden Theorien, Methoden und Werkzeugen für ein Unterstützungssystem realisiert werden. Neben dem Hard Computing, also der überwiegend quantitativen Verar-

beitung von Fakten, eröffnet das so genannte Soft Computing, d.h. die Verarbeitung von qualitativen Fakten, wie z.B. sprachlich formuliertem Wissen oder Problemlösungswissen, dazu schätzenswerte Ansätze (ALIEV et al. 2000). Soft Computing versteht sich als Untergruppe der Künstlichen Intelligenz (KI), deren Ziel u.a. eine rechnergestützte Erfassung und Simulation menschlich-intelligenten Verhaltens zur Bildung so genannter intelligenter Systeme ist (ALIEV et al. 2000, GÖRZ 1995). Zu den intelligenten Methoden zählen die Fuzzy Logic und die Expertensystemtechnik. Die Fuzzy Logic erlaubt, Schwankungsintensitäten und fließende Klassenübergänge von Variablenausprägungen zu modellieren. Die Modellklasse von Expertensystemen ermöglicht, umgangssprachliches Wissen zu verrechnen und daraus in Kombination mit der Fuzzy Logic als Fuzzy-Expertensysteme approximativ zu schlussfolgern.

Vor dem Hintergrund des Nachhaltigkeitsparadigmas und der fünf skizzierten Randbedingungen gesellschaftlicher Konfliktsituationen, besteht die Herausforderung einer modellbasierten Bewertungs- und Entscheidungsunterstützung in der Identifizierung und Hervorhebung interdisziplinärer und methodischer Zusammenhänge, die in der Summe eine rationale Konfliktlösungsstrategie bilden. Im einzelnen liefert die **Ökosystemforschung** dabei Erkenntnisse über Struktur, Funktion und Dynamik ökologischer Systeme (FRÄNZLE 1997a). Diese sind bei umweltbezogenen Bewertungen und Entscheidungen essentiell, da sie als Wertträger aufgefasst werden (HERZOG 2000). Den **Wirtschaftswissenschaften** kommt mit Beiträgen zur Entscheidungslehre, dem strategischen Management und dem Operations-Research sowie langjährigen Erfahrungen bei der Entwicklung und dem Einsatz von Entscheidungsunterstützungssystemen ein gewisser Vorbildcharakter zu (ABTS & MÜLDER 2000, EISENFÜHR & WEBER 1994, LAUX 1998). Eine sachgerechte Reduktion von Komplexität unstrukturierter Entscheidungssituationen, die Speicherung und Formalisierung von Problemlösungswissen gelingt durch die Integration von Methoden der **Informatik** und **Mathematik** (GÖRZ 1995, HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999, KRUSE et al. 1995). Hierbei geht es um Kenntnisse zu wissensbasierten Systemen, der Fuzzy-Set-Theorie oder Schlussfolgerungsmechanismen. Adressaten von Methoden und Systemen zur Entscheidungsfindung sind entweder in den **Planungswissenschaften** wie der Raumplanung und Umweltplanung, der Umweltverwaltung oder ökologieorientierten Unternehmen zu finden (ABTS et al. 2000, BUCHWALD & ENGELHARDT 1996, FIGGE 2000, JESSEL 1998). Eine disziplintheoretische Sonderstellung nehmen die Methoden der Modellierung, des Wissensmanagements und der Szenariotechnik ein, denn ihnen kommt eine Brückenfunktion zu.

## 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der Dissertation liegt in der Verbesserung und rechnerbasierten Unterstützung von Bewertungen und Entscheidungsfindungen im Rahmen einer integrativen Raumplanung. Abgehoben wird auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der adäquaten Erfassung der hohen Komplexität und des probabilistischen Charakters ökologischer Systeme einerseits und der entscheidungswirksamen Formulierung der Simulationsergebnisse andererseits. Untersucht wird daher, inwieweit unstrukturierte und mit Unsicherheiten behaftete Entscheidungssituationen für die Ziele einer nachhaltigen Raumentwicklung systematisiert und in Rechnersystemen formalisiert abgebildet werden können. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich dementsprechend an fünf Teilzielen:

1. **Zusammenstellung** wesentlicher Grundlagen und Einflussfaktoren für rechnergestützte Entscheidungsfindungen bei Raumnutzungskonflikten und ihre Harmonisierung mit den Zielen einer nachhaltigen Raumentwicklung.
2. **Konzeption** eines Methodenpaketes zur Modellierung und integrativen Bewertung von Raumnutzungsänderungen unter Einsatz von Fuzzy Logic und Expertensystemtechnik.
3. **Herleitung** einer praxisnahen Bewertungs- und Entscheidungssituation i. S. eines Konfliktripels zwischen Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft; Analyse der ökosystemaren, umweltpolitischen, –ökonomischen und –rechtlichen Voraussetzungen für eine nachhaltige Raumentwicklung.
4. **Entwicklung** eines Simulationsmodells unter Verwendung des Methodenpaketes und Implementierung des akquirierten Wissens.
5. **Anwendung** des Simulationsmodells und Durchführung von Szenariosimulationen sowie vergleichende Software-Experimente und Interpretationen unterschiedlicher Modellierungstechniken.

## 2 Nachhaltige Raumentwicklung

### 2.1 Ziele und Aufgaben

Die Maxime einer nachhaltigen Raumentwicklung ist die Entwicklung und Förderung von Polyzentralität und Disparitätenausgleich. Teilziele sind die Schaffung gleichwertiger Lebensverhältnisse, Sicherung natürlicher Lebensgrundlagen, Nutzung und Stärkung regionaler Eigenkräfte, Ressourcenbündelung sowie eine nachhaltige Siedlungsentwicklung (BMR 1996). Umweltökonomisch ausgedrückt verfolgt eine nachhaltige Raumentwicklung, natürliche Ressourcen effizient zu nutzen und diesen Nutzen gerecht zu verteilen, also für eine ausgewogene Allokation zu sorgen. Das Adjektiv ‚**nachhaltig**‘ wird im Kontext nachhaltiger Raumentwicklung gleichgesetzt mit wirtschaftlich tragfähig, dauerhaft umweltgerecht, sozialverträglich, partizipativ und ist als Leitvorstellung im Bundesraumordnungsgesetz § 1 Abs. 2 Satz 2 manifestiert. Demnach sollen die sozialen und wirtschaftlichen Ansprüche an den Raum mit seinen ökologischen Funktionen in Einklang gebracht werden, um eine dauerhafte, großräumig ausgewogene Ordnung des Raumes herbeizuführen. Nachhaltige Raumentwicklung versteht sich damit als leitendes Handlungsziel, das einer langfristigen Planung folgt. Die nachfolgenden politischen Berichte und Programme bestätigen die Bemühungen um den Schutz eines nachhaltigen funktions- und leistungsfähigen Naturhaushalt als Lebensgrundlage für den Menschen und fordern eine ressourcenschonende, nachhaltige Raumentwicklung in Europa:

- Environmental Assessment Report 1999 No. 2: European Environmental Agency (EEA)
- Umweltgutachten Mai 2000: Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)
- Nachhaltigkeitsstrategie für die Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft in Deutschland Februar 2000: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft u. Forsten (BML)
- Jahresbericht 2000: Umweltbundesamt (UBA)
- Landschaftsprogramm SH 1999 : Ministerium f. Umwelt, Natur u. Forsten d. L. SH (MUNF)

Im Detail setzen sich die Forderungen und Aufgaben der Raumordnung aus den bereits eingangs erwähnten Dimensionen der Ökonomie, der Ökologie und der sozialen Gerechtigkeit zusammen. Wie eine gedankliche Klammer werden diese Aspekte von solidarisch-ethischen Elementen zusammengehalten (BLACH & IRMEN 1999).

Solidarität in der Gesellschaft

- Gewährleistung der Menschenwürde und der freien Entfaltung der Persönlichkeit
- Wahrung der Leistungen einer solidarischen Gesellschaft
- Förderung des individuellen solidarischen Beitrages für die Gesellschaft
- Förderung der internationalen Zusammenarbeit

### Ökonomische Wettbewerbsfähigkeit und nachhaltiges Wirtschaften

- Erhalt und Verbesserung der wirtschaftlichen Leistungskraft und Wettbewerbsfähigkeit
- Erhalt und Schaffung einer vielfältigen Wirtschaftsstruktur und Ausgleich zwischen wirtschaftsstarken und wirtschaftsschwachen Regionen
- Erhalt und Verbesserung des Humankapitals
- Verbesserung der Ressourcenproduktivität der Wirtschaft

### Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen

- Erhaltung einer differenzierten Landschaft und Verknüpfung von Nutzung und Schutz ökologischer Systeme als oberste Maxime
- Rückgang der Nutzung nicht-regenerativer Ressourcen
- Verringerung der Nutzungsrate regenerativer Ressourcen zum Erhalt der natürlichen Regenerationsfähigkeit
- Schutz der biologischen Vielfalt

### Soziale und räumliche Gerechtigkeit

- Befriedigung der individuellen Bedürfnisse
- Sicherung der sozialen Stabilität
- Wahrung der Entwicklungschancen für die junge Generation
- Gleichberechtigter Zugang zu Arbeit und gesellschaftlichem Leben

## 2.2 Organisation und Planungsebenen

In Europa werden Entscheidungen über die Inanspruchnahme von Flächen durch Programme und Pläne organisiert und gesteuert. Diese Instrumente bieten Gestaltungsmöglichkeit, bestimmen Handlungsbedarf und enthalten Empfehlungen für künftige Lebensräume in Text und Kartenform. Das System der Raumplanung in Europa operiert entsprechend dem Subsidiaritätsprinzip und praktiziert das Gegenstromprinzip (zirkuläre Planung zwischen top-down und bottom-up). Die nachfolgende Übersicht beschreibt Programme und Betrachtungsmaßstäbe, Abstraktionsgrad und Handlungsanweisung der europäischen Raumordnung, Bundesraumordnung, Landesplanung und kommunale Planungen (BMR 1996, EUROPÄISCHE KOMMISSION 1999, HERZOG 1998, JACOBY 2000, LENDI 1995).

**Europäische Raumordnung** wird im Planungsmaßstab von 1:10.000.000 betrieben. Das Europäische Raumentwicklungskonzept (EUREK) wurde 1997 als erster Entwurf den Vertretern der Europäischen Kommission vorgelegt. Es versteht sich als Instrument der europäischen Raumentwicklungspolitik und besitzt somit für die einzelnen Mitgliedsstaaten Leitbildcharakter. Das Ziel von EUREK ist eine dezentrale bzw. polyzentrische Raumentwicklung mit einer größtmöglichen Ausgewogenheit des Siedlungssystems und einer Kooperation zwischen Stadt und Umland. EUREK beschreibt mögliche Zukünfte und sollte weder als fünfte



Planungsebene noch als neues Planungs- und Koordinierungsinstrument auf europäischer Ebene missverstanden werden. Der Abstraktionsgrad ist hoch, Handlungsanweisungen sind unbestimmt und Planungsaussagen sind bewusst pauschal gehalten und geben damit Gestaltungsspielraum für Bundes- und Länderebenen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 1999, JACOBY 2000). Die Europäische Kommission weist in ihrem 6. Umweltaktionsprogramm ‚Umwelt 2010: Unsere Zukunft liegt in unserer Hand‘ ausdrücklich auf ein besseres Verständnis der Nutzung von Ökosystemen und Flächen hin. Unsachgerechte Eingriffe können zu Verlusten von Habitaten oder zu Veränderungen ganzer Landschaften (z.B. Berg-, Tagebau) führen. Das ureigenste Verständnis von Nachhaltiger Entwicklung wird durch die Priorität ‚Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen und Bewirtschaftung von Abfällen‘ erreicht. Dabei wird auch ein umweltökonomischer Gedanke aufgegriffen, nämlich der der Ressourcenökonomie (BLEISCHWITZ 1998). Das Ziel ist die Erreichung eines stabilen Fließgleichgewichtes, bei dem die Tragfähigkeit ökologischer Systeme durch den Verbrauch von erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen nicht gefährdet ist. Weitere Forderungen gehen von notwendigerweise stärkeren Bemühungen aus, Umweltbelange umfassender in wirtschafts- und sozialpolitische Maßnahmen einzubinden. Den Bürgern ist Information über die Qualität ihrer Umwelt verständlich zu vermitteln und gleichzeitig ihr Interesse und Verantwortung für den Umweltschutz und aktive Partizipation an Planungsprozessen zu wecken (‚Lokale Agenda 21‘). Mit NATURA 2000 wird erstmals in diesem Maßstab versucht, ein europäisches Netz von Naturschutzflächen auszubauen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2001, WCED 1987).

**Bundesraumordnung** wird in den Planungsmaßstäben von 1:1.000.000 bis 1:4.000.000 betrieben. Zu ihren Instrumenten zählen der raumordnungspolitische Orientierungs- und Handlungsrahmen und das Raumordnungsgesetz des Bundes (ROG). Der Orientierungsrahmen kennzeichnet die künftige Raumstruktur anhand der fünf Leitbilder: Siedlungsstruktur, Umwelt und Raumnutzung, Verkehr, Europa, Ordnung und Entwicklung. Der Handlungsrahmen beschreibt die Vorgehensweise bei der Umsetzung des Orientierungsrahmens (BMR 1996). Das Gesetz gibt den Rahmen für Aufgaben und Leitvorstellungen einer nachhaltigen bundesweiten Raumentwicklung vor. Das Baugesetzbuch (BauGB) regelt die Verfahren, Grundsätze und Aufgaben einer nachhaltigen städtebaulichen Entwicklung. Weitere Instrumente für Entscheidungsträger sind u.a. die Umweltberichte des Sachverständigenrates für Umweltfragen und der Nationalbericht Deutschland zur Konferenz HABITAT II ‚Siedlungsentwicklung und Siedlungspolitik‘ (BECK-TEXTE UMWELTRECHT 1999, BMU 1998, BMU 1997, SRU 2000, SRU 1998). Zu den Aufgaben der Bundesraumordnung gehören die Ausweisung von Funktionsräumen und Räumen mit Vorrangfunktionen. Erstere werden im Raumordnungssystem als diejenigen Räume bezeichnet, die verschiedene anthropozentrische Unterziele verfolgen: Erhaltung und Förderung des Arbeitsplatzangebotes, genügend Wohnfläche, genügend Freizeit- und Erholungsangebote und ein ausreichendes Angebot nicht transportabler Dienstleistungen. Vorrangfunktion bei der Flächennutzung haben beispielsweise die Landwirtschaft oder ökologische Ausgleichsräume (BMR 1996). Die **Landesplanung** der einzelnen 16 Länder

Deutschlands konkretisiert die Vorgaben des Bundes für ihre speziellen Gegebenheiten in differenzierten Programmen und Plänen. Diese sind entsprechend der Planungsebenen nachfolgend zusammengefasst (HERZOG 1998).

PLANUNGSRAUM	GESAMTPLANUNG	LANDSCHAFTSPLANUNG	PLANUNGS- MAßSTAB
Land	Landesraumordnungsprogramm*	Landschaftsprogramm*	1: 500.000 1: 200.000
Kreis, Region, Reg.-Bez.	Regionalplan*	Landschaftsrahmenplan*	1: 50.000 1: 25.000
Gemeinde	Flächennutzungsplan	Landschaftsplan	1: 10.000 1: 5.000
Teil d. Gemeindegebietes	Bebauungsplan	Grünordnungsplan	1: 2.500 1: 1.000

\* Die Planwerke werden in den Bundesländern z.T. anders bezeichnet

Tab. 1: Planungsräume, Programme und Planungsmaßstäbe

**Kommunale Planwerke** werden in den Maßstäben 1:5.000 bis 1:1.000 erstellt. Empfehlungen für Handlungen konkretisieren sich in verbindlichen Flächennutzungs- und Bebauungsplänen. Planerische Bedeutung gewinnen dabei zunehmend Stadtentwicklungspläne sowie Prozesse der Lokalen Agenda 21 (DIEFENBACHER et al. 2000, HERZOG et al. 2001).

### 3 Entscheidungsfindung bei Raumnutzungskonflikten

Konfliktsituationen um Nutzungen des ökosystemaren Raumes und ihre Lösung und Findung von gerechten Entscheidungen gehen einher mit einem breiten Spektrum an fachübergreifenden Einflussfaktoren, unterschiedlichen Anforderungen, der Komplexität der ökosystemaren Gegenstände, der Berücksichtigung auftretender Unsicherheiten und dem Einsatz hilfreicher Unterstützungssysteme.

#### 3.1 Grundlagen und Einflussfaktoren

##### 3.1.1 Definitionen

Planung, Entscheidung und Handlung bilden ein inhaltlich eng miteinander verknüpftes Begriffstripel. **Planung** bedeutet vorausschauendes, systematisches Durchdenken und Vorbereiten zielgerichteten Handelns durch die im Konsens getroffene Entscheidung. **Entscheidungsfindung** (engl. = decision making) ist eine Phase der Planung, in der nach der Bewertung von Handlungsalternativen diejenige Alternative oder Problemlösung ausgewählt wird, die unter gegebenen Randbedingungen als optimal erscheint (BECHMANN 1981, LAUX 1998, LENDI 1995). Rationale Entscheidungen setzen existierende Vorstellungen über Ziele und Präferenzen voraus, mit deren Hilfe die erwogenen Alternativen hinsichtlich ihrer Konsequenzen miteinander verglichen werden (BRAUCHLIN & HEENE 1995). Ziele sind dabei Aussagen mit normativem Charakter, die einen zukünftigen gewünschten Zustand der Realität beschreiben und sich notwendigerweise vom gegenwärtigen (Ausgangs-)Zustand unterscheiden. Wertsysteme (in Form von Werturteilen, Zielsetzungen, Prämissen, ethischen und moralischen Prinzipien) können durch einen räumlichen, zeitlichen und personellen Bezug differenziert beschrieben werden (LAUX 1998). Da Zielsysteme im Entscheidungskalkül eine zentrale Rolle einnehmen und das Ergebnis wesentlich beeinflussen, sollten sie folgenden Anforderungen entsprechen: Vollständigkeit, Freiheit von Redundanz, Messbarkeit und Berücksichtigung von Organisationsebenen. Beispiele von Zielaussagen können einerseits die Maximierung der Zielgröße (z.B. Ernteertrag in der Landwirtschaft), andererseits das Anstreben eines genau fixierten Wertes für die Zielgröße sein (z.B. Population einer Art). **Präferenzen** bezeichnen das eindeutige Bevorzugen eines Zieles vor einem anderen und werden meist durch binäre Relationen dargestellt, z.B. schwache Präferenz (,mindestens so gut wie‘), starke Präferenz (,besser als‘) und Indifferenz (,genauso gut wie‘). Die Präferenzen eines Entscheidungsträgers sind meist nicht a priori gegeben, sondern müssen aus dessen Zielsystem abgeleitet werden. Sie bilden eine Bedingung für die Herleitung von Handlungsalternativen. Die Auswahl zwischen mindestens zwei Alternativen ist Voraussetzung eines Entscheidungsmodells. Dabei müssen sich einzelne Alternativen gegenseitig ausschließen (EISENFÜHR & WEBER 1994, LAUX 1998).

Generell existiert ein Entscheidungsproblem, wenn ein Individuum oder eine Gruppe eine Verbesserung ihrer gegenwärtigen Situation in der Zukunft erwartet. Konkurrierende Interessen oder Nutzungskonflikte sind häufig Ausgangspunkte von Entscheidungsproblemen und ungerechtfertigte Handlungen. Jede **Handlung** ist eine bewusste, auf ein bestimmtes Ziel hin orientierte Tätigkeit und bedingt die Abwägung unterschiedlicher Optionen durch Präferenzen und Entscheidungen. Handeln aus dem Blickwinkel einer nachhaltigen Raumentwicklung umfasst die drei Planungs- und Entwicklungsprinzipien: Ordnen, Ausgleichen und Entwickeln.

HANDLUNG	ERLÄUTERUNG	BEISPIEL
Ordnen	bestehende Nutzungen räumlich planen	Wohnlichkeit und Eigenständigkeit erhalten und ausbauen
Ausgleichen	Auftreten bei Mehrzieloptimierungen mit eindeutigen Prioritäten. Unveränderbare Eingriffe und Belastungen raumnah substituieren	Qualität der ländlichen Wohn- und Wirtschaftsstandorte erhalten und ausbauen
Entwickeln	Positive Tendenzen erkennen, planerisch begleitend fördern	Lebens- und Wirtschaftsraum erhalten und stärken

Tab. 2: Die drei Handlungsformen ‚Ordnen‘, ‚Ausgleichen‘ und ‚Entwickeln‘ in der Raumplanung

Bei diesen Handlungen sind vorsorgende Interessen wahrzunehmen und ist Konfliktvermeidung zwischen unterschiedlichen Nutzungsansprüchen anzustreben. Der jeweilige konkrete Raumbezug der Planung trägt dem Gedanken einer ausgeglichenen Entwicklung sozialer und wirtschaftlicher Ansprüche und einer angemessenen Nutzung der ökologischen Systeme Rechnung (BBR 2000, BMR 1996, BLACH & IRMEN 1999).

Analysen, Bewertungen, Entscheidungen und Handlungen sind Phasen im Planungsprozess. Sie sind zukunftsgerichtet, verstehen sich als repetitive Abläufe und beziehen sich auf drei ineinandergreifende Zeithorizonte (BECHMANN 1981, modifiziert).

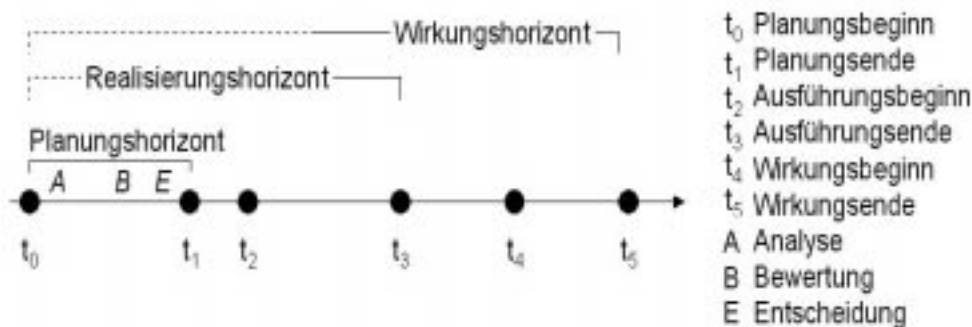


Abb. 1: Zeithorizonte von Planung und Entscheidung

Als Zeithorizonte existieren der Planungs-, der Realisierungs- und der Wirkungshorizont. Der Planungshorizont bezeichnet die Zeit, die mit dem Planungsende abgelaufen ist und umschließt Phasen der Analyse (A), Bewertung (B) und Entscheidung (E). Das Ende des Realisierungshorizonts begrenzt die Ausführungen der Planungen. Es folgt eine Phase der Wirkungen und Konsequenzen von ausgewählten Alternativen und getroffenen Entscheidungen (Wirkungshorizont).

Das Durchführen von Bewertungen und Entscheidungen in der Praxis von Raum- und Umweltplanung ist geprägt von unterschiedlichen **Anforderungen**. Diese fasst die nachfolgende Tabelle zusammen (BECHMANN 1981, FRÄNZLE & FRÄNZLE 1993, JACOBY 2000, POSCHMANN 1999, THEOBALD 1998).

ANFORDERUNGEN AN BEWERTUNGEN UND ENTSCHEIDUNGEN		
prozedural	planungsorientiert	extern
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objektivität</li> <li>• Reliabilität</li> <li>• Validität</li> <li>• Repräsentativität</li> <li>• Formalisierung</li> <li>• Strukturkonsistenz</li> <li>• Rationalität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachvollziehbarkeit</li> <li>• Transparenz</li> <li>• Offenheit</li> <li>• Akzeptanz</li> <li>• Flexibilität</li> <li>• Vollständigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergebnisorientierung</li> <li>• Zügige Abwicklung</li> <li>• Minimale Kosten</li> <li>• Übertragbarkeit der Ergebnisse</li> <li>• Dokumentation der Bewertungsschritte</li> </ul>

Tab. 3: Anforderungen an Bewertungen und Entscheidungen

Objektivität, Reliabilität und Validität sind drei Gütekriterien von Mess- und Bewertungsverfahren (FRÄNZLE & FRÄNZLE 1993c). Werden räumliche Analysen durchgeführt, kommt die Repräsentativität hinzu:

- **Objektivität** (Intersubjektivität): Nach der Festlegung von Wertmodell und Bewertungsregel sollen die Ergebnisse von der Person des Anwenders unabhängig sein.
- **Reliabilität** (Verlässlichkeit, Reproduzierbarkeit): Ein wiederholter Durchlauf der Methode unter gleichen Rahmenbedingungen muss zu den gleichen Ergebnissen führen.
- **Validität**: Dem Sachverhalt angemessen, einzig das bewertend, was im Hinblick auf das Zielsystem und in Abhängigkeit vom Wertsystem notwendig ist. In den Werturteilen müssen sich die Inhalte und Prioritäten des zugrunde gelegten Zielsystems widerspiegeln.
- **Repräsentativität**: Die Auswahl von Wert- und Sachmodell und ihre Parameter genügen der Abbildung des jeweiligen Raumausschnittes im Sinne seiner Extrapolationsmöglichkeit.

**Formalisierung**: Die Form von Bewertungs- und Entscheidungsprozessen wird im Gegensatz zum Inhalt betont (SCHOLZ 1998). Der Formalisierungsgrad korreliert dabei mit der Übertragbarkeit der Methoden und Ergebnisse. Mit steigendem Grad der Formalisierung können Be-

wertungs- und Entscheidungsmethoden flexibel auf vergleichbare Situationen angewandt werden. Dies deutet eine nomothetische Wissenschaftsaussage (=Auffindung von Gesetzmäßigkeiten und Regelmäßigkeiten) im Gegensatz zur idiographischen (= das Singuläre beschreibend) an. **Nachvollziehbarkeit** und **Transparenz** meint, dass alle Bewertungsschritte für Gutachter, Verfahrensbeteiligte, Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit durchschaubar und übersichtlich dargelegt sind. Die Bewertungsstruktur soll formal konsistent sein und zu einer konsistenten Ordnung der zu bewertenden Alternativen führen (**Strukturkonsistenz**). **Vollständigkeit** beschreibt die Berücksichtigung aller entscheidungsrelevanter Sachverhalte in angemessener Form.

In der Praxis von Umweltverwaltung und -planung ist die Einhaltung aller 18 Anforderungen an Bewertungen und Entscheidungen aus verschiedenen Gründen ein schwieriges Unterfangen. Häufig genannte Probleme und Unzulänglichkeiten bei Bewertungen von ökosystemaren Parametern, Partialkomplexen und Ökosystemen sind (BASTIAN & SCHREIBER 1999, FINKE 1994, LESER 1997, MARKS et al. 1992, modifiziert):

- Zu große Komplexität bei fehlender Transparenz und mangelhafter Beachtungen ökologischer Zusammenhänge (Systemverständnis)
- Das Vortäuschen von Objektivität durch Quantifizierung von Sachverhalten.
- Rückständige Entwicklung von rechnergestützten Bewertungs- und Entscheidungsmodellen und fehlende Integration von innovativen Erkenntnissen der Ökosystemforschung. Selbst lückenhafte Sachkenntnisse über Dynamiken innerhalb von Ökosystemen sollten aufbereitet, mit Rechnersystemen erschlossen und in der Form von Problemlösungswissen für Entscheidungshilfen bereitgestellt werden.

**Naturalistische Fehlschlüsse** sind ein weiteres Bewertungsdefizit, wobei logisch vom bestehenden Sein (,ontologisch‘) auf präskriptives Sollen (,deontisch‘) geschlossen wird (SEIFFERT 1992). Es wird ein objektiv gegebener Sachverhalt mit einer normativen Aussage verbunden und damit ein schwerwiegender Fehler begangen, wenn es etwa bei Arten- und Biotoptypenbewertungen heißt: „Das ist das letzte Vorkommen von X und muss daher erhalten werden“. Selbstverständlich sollen und müssen wertende Aussagen getroffen und Maßnahmen vorgeschlagen werden, doch ist darauf zu achten, dass zuerst eindeutige Fakten wissenschaftlich dargestellt und dann gesellschaftliche Konsequenzen gezogen werden. Planern obliegt es nicht zu diktieren oder Vorschläge aus ihrer Sicht zu suggerieren, sondern z.B. an so genannten Runden Tischen mit den Betroffenen zu diskutieren. Diese Form der Partizipation kann Entscheidungsakzeptanz durch konsensuale Lösungen erhöhen.

### 3.1.2 Raumnutzungskonflikte um natürliche Lebensgrundlagen

Raumnutzungskonflikte entwickeln sich durch den Widerstreit unterschiedlicher Nutzungsinteressen und Ansprüchen an natürliche Lebensgrundlagen von Personen und Gruppen. Für deutsche Verhältnisse fasst die nachfolgende Tabelle die klassischen Nutzungskategorien, ihre Flächengrößen und relativen Anteile, sowie Adaptation der Nutzungen an unterschiedliche Klassen von Ökosystemen zusammen (BMU 1997, FRÄNZLE et al. 1992, HABER 1998).

<b>GEGENÜBERSTELLUNG VON RAUMNUTZUNGEN UND KLASSEN VON ÖKOSYSTEMEN</b>				
<b>Raumnutzung</b>	<b>Fläche [km<sup>2</sup>]</b>	<b>Relativ [%]</b>	<b>Terminologie der ökologisch- orientierten Planung (FRÄNZLE et al. 1992)</b>	<b>Klassen von Ökosystemen (HABER 1998)</b>
Fläche v. Deutschland	356 970	100,00		
Landwirtschaftsfläche	195 433	54,70	Landwirtschaftliche N. (LW)	Agrar-ÖS
Waldfläche	104 326	29,20	Forstwirtschaftliche N. (FN)	Wald-ÖS
Siedlungs- und Freiflächen	20 657	5,80	Landschaftsverbrauchende N. (LVN)	Techno-ÖS
Verkehrsfläche	16 327	4,60	Landschaftsverbrauchende N.	Techno-ÖS
Wasserfläche	7 798	2,20	Wasserwirtschaftliche N. (WW)	Gewässer-ÖS
Betriebsfläche	2 428	0,70	Landschaftsverbrauchende N.	Techno-ÖS
Erholungsfläche	2 307	0,60	Erholungsnutzung (EHN)	unbestimmt
Flächen anderer Nutzung	7 694	2,20	Entsorgende Nutzung (ESN) Ökologische Nutzung (ÖN)	Techno-ÖS naturnah

Tab. 4: Gegenüberstellung von Raumnutzungen und Klassen von Ökosystemen

Neben natur- und planungswissenschaftlichen Disziplinen widmen sich vor dem Hintergrund des Nachhaltigkeitsparadigmas verstärkt auch rechtswissenschaftliche sowie sozioökonomische Disziplinen der Analyse und Gestaltung einer nachhaltigen Raumentwicklung. Ausgangspunkt aller Bemühungen ist das Verständnis ökologischer Systeme und insbesondere der Böden als direkter ‚Adressat‘ und potentieller Belastungspuffer von Flächennutzungen und Gewässern. Die nachfolgenden Ansätze zum ressourcenschonenden Flächenmanagement und zur nachhaltigen Bodennutzung sind aus der Sicht sowohl planerischer, bodenkundlicher, raumordnungspolitischer als auch integrativer Umweltbeobachtung entstanden und chronologisch geordnet.

<b>GRUNDKONZEPTE DER RAUMENTWICKLUNG</b>	
<b>QUELLE</b>	<b>MERKMALE</b>
SRU - Sachverständigenrat für Umweltfragen: Umweltgutachten	Ökologisch-ökonomische Herangehensweise: Ökologisch wirksam und ökonomisch effiziente Reduzierung von Flächeninanspruchnahme und Versiegelung, durch: handelbare Flächenverbrauchsrechte, Erhebung einer Versiegelungsabgabe, Ökologisierung des kommunalen

(2000) 40 Absatz 85	Finanzausgleichs, Einbau von Anreizen zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme
BMR: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (1996) Raumordnungspolitischer Orientierungsrahmen mit 5 Leitbildern für die künftige Raumstruktur	<p><i>Leitbild Siedlungsstruktur:</i> Strukturprobleme beheben (ländliche Räume und Grenzregionen), Schaffung gleichwertiger Lebensbedingungen</p> <p><i>Leitbild Umwelt und Raumnutzung:</i> langfristige Sicherung natürlicher Lebensgrundlagen, Abbau von Umweltbeeinträchtigungen, ökologischer Ausgleich im Umfeld von Verdichtungsräumen, Vernetzung im europäischen Kontext, Grenzregionen der europäischen Union (EU)</p> <p><i>Leitbild Ordnung und Entwicklung:</i> Verdeutlichung von Planungsaufgaben, Förderprioritäten, ausgewogenes Verhältnis von Umwelt- zu Lebensqualität</p> <p><i>Leitbild Verkehr:</i> Transportkorridore, Verkehrsverlagerung, CO<sub>2</sub>-Reduzierung, keine Versiegelung wertvoller Ökosystemkomplexe</p> <p><i>Leitbild Europa:</i> grenzüberschreitende Zusammenarbeit</p>
FRÄNZLE, O. & FRÄNZLE, U. (1993) Integrierte Umweltbeobachtung und -bewertung In: CORDES, G. (Hrsg.)(1993) Geographie-Umwelt-Erziehung. Festschrift H. Kersberg. Bochum. 165-188.	<p>Förderung einer ökosystemaren und gesellschaftlichen Umweltbeobachtung und -bewertung als Grundlage des Umweltschutzes (IUBB). Ihre Aufgabe besteht a) in der Analyse des Zustandes und von Veränderungen ökologischer Systeme als Folge natürlicher Vorgänge und menschlicher Beeinflussungen und b) ihrer Bewertung und c) der planungsrelevanten Vorhersage des Systemverhaltens.</p> <p>Unterschiedliche Nutzungsansprüche sind in einem Bewertungsverfahren zu modellieren. Dabei sind Bewertungsverfahren und Messverfahren analog aufgebaut und setzen sich aus Modellen zusammen. Die Richtigkeit von Modellen ist anhand der logischen Struktur, der inhaltlichen Konsistenz sowie durch die drei Prüfkriterien Objektivität, Reliabilität und Validität festzustellen.</p>
FRÄNZLE et al. (1992) Ökologisch orientierte Planung und regionalisierende Umweltbeobachtung (IUBB)	Erarbeitung und Erprobung einer Konzeption für die ökologisch orientierte Planung auf der Grundlage der regionalisierenden Umweltbeobachtung am Beispiel Schleswig-Holsteins. Entwicklung einer potentiellen Konfliktmatrix mit sieben Nutzungskategorien und ihrer Analyse und Modellierung mittels Bewertungs- und Simulationsmodellen, GIS und Datenbanken.
HABER (1979): Ökologische Orientierung der Raumplanung	Kern einer ökologisch orientierten Raumplanung ist die Berücksichtigung der Erkenntnisse über Strukturen und Klassen von Ökosystemen und ihrer wesentlichen systemimmanenten Leistungen/Funktionen. Bodenfunktionen gelten dabei als zentrale terrestrische Systemgrößen.
BACHFISCHER (1978) Ökologische	Ausgangspunkt sind konkurrierende Raumnutzungen des Menschen. Kern ist die Bewertung anthropogen beeinträchtigter natürlicher Res-



Wirkungs- und Risikoanalyse (ÖRA)	sources in ihrer Qualität und Quantität. Kritisch betrachtet werden bei der ÖRA indirekte Wirkungen und Synergismen unsachgemäß eingeschätzt (FRÄNZLE & FRÄNZLE 1993).
HABER (1973) Theorie der differenzierten Bodennutzung als Raumordnungskonzept	Zielvorstellung ist eine räumliche Organisation und ökologische Stabilisierung der gesamten Kulturlandschaft durch geschickte Zuordnung und Mischung von ökologisch unterschiedlich stabilen Nutzungstypen. Drei Nutzungstypen bzw. Ökosystemklassen bilden sich heraus: a) Naturnah, nur extensiv oder nicht genutztes Ökosystem, b) intensiv genutztes Agrarökosystem und c) das urban-industrielle Ökosystem.

Tab. 5: Grundkonzepte der Raumentwicklung

Diese Ansätze zum Management der Raumentwicklung spiegeln spezifische Betrachtungsweisen aus unterschiedlichen Disziplinen, den jeweiligen zeitlichen Stand von Forschung und Entwicklung und insbesondere den gelegentlich defizitären Einsatz von technischen Werkzeugen, wider.

### 3.1.3 Komplexität ökosystemarer Sachverhalte

Ein weiterer Einflussfaktor für Modellierungen von Entscheidungsfindungen bei Raumnutzungskonflikten ist die Sichtweise auf den Konfliktgegenstand. Ausgehend von der allgemeinen Systemtheorie (v. BERTALANFFY 1968) wird versucht, den Einfluss der Komplexität ökosystemarer Sachverhalte auf Entscheidungsfindungen zu verdeutlichen. Diese systemwissenschaftliche Sichtweise sieht in **Systemen** (griech. systema, das Zusammengesetzte) einen ganzheitlichen Zusammenhang von Subsystemen, ihrer Elemente und der zwischen ihnen bestehenden Relationen. Ein Spezifikum von Systemen sind emergente Eigenschaften, die auftreten durch das Zusammenwirken von internen Parametern mit der Umgebung und wenn dieses Phänomen bei einzelnen Systembestandteilen nicht zu beobachten ist (KRIEGER 1996, MATHES et al. 1996). Das Ziel dieser systemwissenschaftlichen Sichtweise ist es, zu einem ganzheitlichen Verständnis des Verhaltens von Systemen zu gelangen, Problemverlagerungen zu verhindern und das wechselseitige Zusammenwirken von Systemen zu untersuchen. Die Untersuchungsgegenstände der **Ökosystem**forschung werden epistemologisch unterschiedlich definiert (FRÄNZLE 1997, JAX et al. 1992, MÜLLER et al. 1997):

- Ökosysteme stellen reale Raumeinheiten dar und sind als solche abgrenzbar.
- Ökosysteme bestehen aus wechselwirkenden abiotischen und biotischen Komponenten.
- Ökosysteme sind Konstrukte des Betrachters.
- Ökosysteme befinden sich im Zustand eines Fließgleichgewichts oder streben einen solchen an.
- Ökosysteme sind kybernetische Systeme mit einer (begrenzten) Fähigkeit zur Selbstregulation.

Die **Komplexität** von Ökosystemen korreliert mit der Anzahl von Subsystemen, Elementen und Relationen sowie spezifischen Systemeigenschaften (BOSEL 1994, FRÄNZLE 2000). Die **Heterogenität** beschreibt eine Ungleichartigkeit von Systemkomponenten, wie abiotischen und biotischen Komponenten in räumlicher wie zeitlicher Hinsicht. Aus dem Blickwinkel der Informatik meint Heterogenität die Form von Daten und Wissen, die es zu repräsentieren gilt; z.B. numerische, symbolische und linguistische Variablen. Konsequenzen für Bewertungen und Entscheidungsfindungen sind die vordergründige Unvergleichbarkeit von Bewertungsobjekten, wie u.a. Individuen, Partialkomplexe oder ganzer Ökosysteme, aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsweisen und anthropogener Eingriffe. **Rückkopplungen** bei Systemen folgen dem kybernetischen Regelungsprinzip und ergeben sich, wenn der Output als Input eingespeist wird. Rückgekoppelte Systeme sind in der Lage, sich selbst zu regulieren, entweder unmittelbar, oder mit Hilfe anderer Systeme. Intensitäten von Rückkopplungsverhalten bestimmen die weitere Dynamik und Entwicklung des Systems. Positive Rückkopplungen verstärken bestehende Impulse und führen zu Wachstum, später jedoch zu Instabilität und letztlich zu einem Kollaps des Systems. Negative Rückkopplungen wirken einschränkend und dienen der Aufrechterhaltung und damit der Stabilität im Sinne eines dynamischen Fließgleichgewichtes (MÜLLER et al. 1998, REICHE 1991, WIRTH 1979). So sind z.B. Stoffflüsse und der Wasserhaushalt in ökologischen Systemen stetigem Wandel unterworfen. Ihre **Variabilität** ist bei der Analyse und insbesondere bei der Abschätzung von Folgewirkungen anthropogener Handlungen und ökosystemarer Reaktionen zu berücksichtigen. Der Einsatz der Fuzzy Logic bietet hier Möglichkeiten einer adäquaten Berücksichtigung und Formalisierung (SALSKI 1999).

### 3.1.4 Entscheidungstheorie und der Strukturierungsgrad von Entscheidungssituationen

Den theoretischen Hintergrund von Entscheidungsfindungen untersucht die betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie (HEINEN 1971). Dieser entscheidungstheoretische Ansatz aus dem Jahr 1962 legt den Grundstein für das heutige Verständnis über den Ablauf und die Bedeutung von Entscheidungen in Wissenschaft, Verwaltung und Unternehmen. Nach HEINEN (1971) ist nicht die Kombination der Produktionsfaktoren Boden, Arbeit und Kapital das Wesentliche, sondern die Findung und Durchführung von Entscheidungen. Im Zentrum der Betrachtung liegt nicht, *dass* entschieden wird, sondern *wie* entschieden werden soll. Entscheidungstheoretische Untersuchungen werden in der Absicht vorgenommen, beschreibende (deskriptive) oder vorschreibende (präskriptive) Aussagen zu gewinnen. Entsprechend bildeten sich in der Folgezeit zwei Varianten der Entscheidungstheorie heraus. Einerseits die realtheoretische, empirische (auch deskriptive) Entscheidungstheorie und andererseits die idealtheoretische, normative (auch präskriptive) Entscheidungslogik. Die **deskriptive Entscheidungstheorie** untersucht das typische Verhalten von Individuen in gegebenen Situationen und fragt *wie* entschieden wird. Ziel ist die Erfassung, Modellierung und Prognose tatsächlichen Entscheidungsverhaltens und die Generierung *praktikabler* Lösungen. Die **präskriptive Ent-**

**scheidungstheorie** untersucht, wie sich Individuen in einer gegebenen Situation verhalten und entscheiden *sollten* (deontisch). Zukunftsgerichtete Untersuchungen stehen hier im Vordergrund, und es werden Rationalitätspostulate und deren Implikationen erarbeitet. Ziel ist die Entscheidungsunterstützung und Entwicklung vorwiegend normativer ökonomischer Modelle zur Generierung *formal* richtiger Lösungen. Die nachfolgende Tabelle enthält eine Gegenüberstellung der Details der deskriptiven und präskriptiven Entscheidungstheorie (EISENFÜHR & WEBER 1994, LAUX 1998, SCHNECK 1993).

MERKMALE DER DESKRIPTIVEN UND PRÄSKRIPTIVEN ENTSCHEIDUNGSTHEORIE		
Merkmal	deskriptiv	präskriptiv
Ziel des Ansatzes	Beschreibung, Erklärung und Prognose des tatsächlichen Entscheidungsverhaltens in Organisationen, Generierung <i>praktikabler</i> Lösungen	Optimale Gestaltung der Entscheidungsfindung in Organisationen, Generierung <i>formal</i> richtiger Lösungen
Entstehung des Entscheidungsproblems	Die Entscheidungsphase des Entscheidungsproblems wird in die Betrachtung miteinbezogen	Keine Erklärung, warum bzw. wie das Entscheidungsproblem entsteht.
Annahmen über die konstitutiven Elemente des Entscheides (Umwelt, Alternativen, Konsequenzen, Ziele)	Die Erkennungs-, Wahrnehmungs-, Denk- und Lernprozesse (kognitive Prozesse) zur Gewinnung und Verarbeitung der Informationen über die konstitutiven Elemente werden ebenfalls untersucht	Keine Erklärung, wie der jeweilige Informationsstand erreicht wird. Umweltsituationen, Alternativen, Konsequenzen und Ziele sind gegeben
Annahmen über den Ablauf des Entscheidungsprozesses	Berücksichtigung empirischer Erkenntnisse über das Entscheidungsverhalten; Berücksichtigung von Einflüssen der Umwelt auf den Entscheidungsträger während der Entscheidungsfindung	Ablauf des Prozesses, wie er sich aufgrund der Entscheidungslogik bei rationalem Verhalten ergibt
Annahmen über den Entscheidungsträger	Die Entscheidungsträger (sowie die Art ihrer Einflussnahme auf den Entschluss) können bestimmt werden; die multipersonale Entscheidung steht im Vordergrund	Die Entscheidungsträger sind vorbestimmt, oft wird von Individualentscheidungen ausgegangen
Annahmen über die Entscheidungsregeln und das Rationalverhalten	Der Entscheidungsträger handelt immer dann rational, wenn der Entschluss das Resultat eines systematischen Entscheidungsfindungsprozesses ist	Der Entscheidungsträger handelt dann rational, wenn er den Nutzen maximiert, d.h. von mehreren Alternativen im Falle der Sicher-

	dungsprozesses ist. Rationales Handeln ist dann gegeben, wenn befriedigende Lösungen aufgrund subjektiv wahrgenommener Informationen und unter Berücksichtigung individueller Ziele und kollektiver Normen gewählt werden.	heit jene wählt, die den höchsten Nutzen aufweist. Er basiert dabei auf objektiv feststellbaren Informationen und von außen gegebenen Zielen (homo oeconomicus).
Generelle Ausrichtung	Realtheoretisch, geringe formale Durchdringung und Übertragbarkeit, höherer Komplexitätsgrad der Entscheidungssituation	Idealtheoretisch, hohe formale Aufbereitung des Entscheidungsverlaufs bei geringem Komplexitätsgrad der Entscheidungssituation

Tab. 6: Merkmale der deskriptiven und präskriptiven Entscheidungstheorie

Für eine Simulation von Entscheidungsfindungen bei Raumnutzungskonflikten für eine nachhaltige Raumentwicklung bietet sich eine möglichst gleichzeitige Beachtung beider obiger theoretischer Ansätze an. Zum einen ist bei integrativen Untersuchungen von einem hohen Komplexitätsgrad und einer hohen Variablenanzahl auszugehen, andererseits handelt es sich im Sinne ausgleichender Raumplanung um multipersonale Entscheidungen.

Entscheidungssituationen können nach dem **Grad ihrer Strukturierung** unterschieden werden (LAUX 1998). *Strukturierte* Entscheidungen gehen einher mit Gewohnheiten, bekannten Vorgehensweisen, klaren Organisationsstrukturen und messbaren Entscheidungsgrößen. Ihre Informationsgrundlage ist vorwiegend quantitativ, so dass sich der Einsatz relationaler Datenbankmanagementsysteme oder Statistiksoftware für eine Systematisierung des Entscheidungsablaufes anbietet. *Unstrukturierte* Entscheidungen sind gekennzeichnet durch unvollkommene oder mangelhafte Informationsgrundlagen. Zu den Ursachen zählen die o.g. Komplexität und Vernetzung ökosystemarer Sachverhalte, fehlende Messbarkeit von Systemzuständen und fachübergreifende Sichtweisen, die den Parametrisierungsaufwand zusätzlich erhöhen. Zur Repräsentation und Formalisierung derartiger Entscheidungssituationen wird versucht, mittels heuristischen Problemlösungstechniken, Experten typischem Urteilsvermögen eine Systematik und Automation des Entscheidungsverlaufs zu generieren. Derartigen rechnerbasierten Unterstützungssystemen und Methoden der Künstlichen Intelligenz wird in der Zukunft in wirtschaftlichen, wie umweltbezogenen Verwaltungen und Unternehmensbereichen eine große Rolle eingeräumt (STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999, WEISSENFLUH 1990).

## 3.2 Unterstützungssysteme

### 3.2.1 Aufgaben und Entwicklungsstadien

Entscheidungen stellen im Alltag von Verwaltungen und Unternehmen immer wieder zu bewältigende Aufgaben dar. Vorwiegend die Wirtschaftsinformatik hat sich diesen Aufgaben als wissenschaftliche Disziplin angenommen und versucht Entscheidungssituationen in Form rechnergestützter Systeme zu formalisieren und repräsentieren, um damit Entscheidungsträgern hilfreich und entlastend auf Urteile vorzubereiten. Längst muss Datenverarbeitung nicht mehr das Durchforsten des Papierbestandes sein, sondern lässt sich z.B. durch RDBMS (Relationale Datenbank Management-Systeme) automatisieren. Diese Automation ist erfolgversprechend bei strukturierten und überwiegend quantitativen Daten, stößt jedoch an ihre Grenzen bei der Verarbeitung von Problemlösungswissen.

In Unternehmen und Verwaltungen werden die Gesamtheit aller Systeme und leistungsfähiger EDV-Werkzeuge zur Unterstützung des Managements mit dem Oberbegriff Management Support Systeme (MSS), zu deutsch Managementunterstützungssysteme bzw. Management Informations Systeme, beschrieben. Ihre zentrale Aufgabe liegt nicht in der Automation von Verarbeitungsroutinen, sondern in der Unterstützung und Assistenz von Entscheidungsträgern durch sachgerechte Aufbereitung von Ausprägungen der Entscheidungsvariablen. Auf einen Punkt gebracht: Assistenz statt Automation und Unterstützung statt Ersatz. Bewertungen und Entscheidungsfindungen lassen sich nie vollständig objektivieren und ebenso wenig vollständig automatisieren; dafür ist der Gegenstand – ökologische Systeme – zu komplex und sein Verhalten noch längst nicht abschließend erforscht (BASTIAN & SCHREIBER 1999, FRÄNZLE 1997a, LESER 1997).

Das Aufgabenspektrum von MSS ist vielfältig. Wesentlich dienen MSS dazu, den Leitbildern bzw. der Unternehmensphilosophie eine konkrete Entwicklungsrichtung zu geben und Konsequenzen transparent zu machen. Des weiteren dienen sie dazu, Zugang zu Informationen zu verschaffen, Kapazitäten für Modellrechnungen vorzuhalten und durch gezielte Verdichtung und Aggregation von Daten und Wissen, Entscheidungen optimal vorzubereiten. Leider ist die Anzahl von MSS in deutschen Umweltverwaltungen, die diese Ziele erfüllen und für die Praxis vorgefertigte Auswertungen bieten, rar (HERZOG 1998, HERZOG 2001a, HILTY & GILGEN 2001). Nachfolgend wird somit verstärkt auf die bereits seit Jahren im Einsatz befindlichen Systeme in der Wirtschaft Bezug genommen. Vor allem hier sollen MSS benutzerfreundlich, wirtschaftlich und flexible einsetzbar sein und eine hinreichende Qualität der Daten sicherstellen. Dafür müssen folgende grundsätzliche Anforderungen an rechnergestützte Informationsverarbeitung gestellt werden (ABTS & MÜLDER 2000, HERZOG 1998):

1. Stimmigkeit (*Konsistenz*): Die Daten sollten durchgehend interpretierbar sein.
2. Dauerhaftigkeit (*Persistenz*): Die Datenbasis muss potenziell unbegrenzt lange aufbewahrt werden können.

3. Robustheit (*Resistenz*): Stimmigkeit und Dauerhaftigkeit der Datenbasis dürfen auch bei Störungen nicht verloren gehen.
4. Leistungsfähigkeit (*Effizienz*): Der Datenzugriff muss auch bei großen Datenmengen und intensiver Nutzung ausreichend schnell sein.

Allen Systemklassen von MSS gemeinsam ist die Aufgabe, einen *formalisierten* Informationsüberblick der verschiedenen Organisations- und Planungsebenen zu geben. Dabei bedeutet Formalisierung einerseits, den Anforderungen an Bewertung und Entscheidung zu entsprechen, andererseits aber auch die Präferenz der Form vor dem Inhalt (SCHOLZ 1998). Informationsüberblick bedeutet z.B. im Falle eines Ministeriums, über Arbeiten und Ergebnisse nachgeordneter Behörden differenziert informiert zu sein. So ist dem Niedersächsischen Umweltministerium das Niedersächsische Landesamt für Ökologie mit den Abteilungen Naturschutz, Wasser, Abfall, Immissionsschutz und in Schleswig-Holstein ist dem Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten, das Landesamt für Umwelt und Natur und andere Behörden und Einrichtungen, nachgeordnet.

Die Entwicklung und Anwendung von Management-Support-Systemen (MSS) ist ein junges Forschungsgebiet, vornehmlich der Wirtschaftswissenschaften und Informatik. Bis in die 60er Jahre reichen die Wurzeln zurück. Zu dieser Zeit entstanden mit den so genannten Transaction Processing Systems (TPS) erste ‚totale Informationssysteme‘ (Totalsysteme) für den Bereich der Unternehmensführung. Sie gelten als Vorläufer der heutigen MSS.

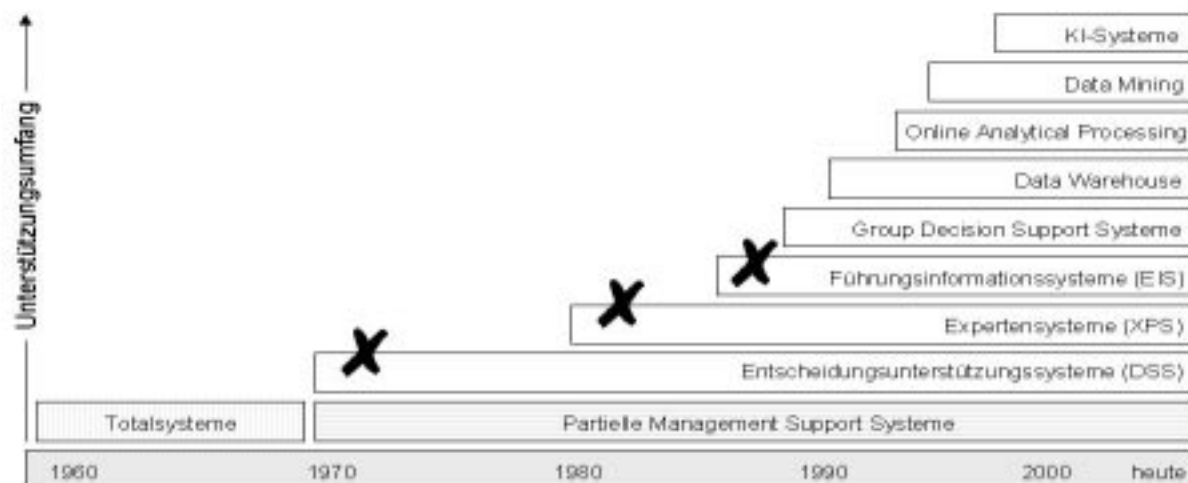


Abb. 2: Management Support Systeme im Wandel der Zeit

Das Einsatzgebiet von Totalsystemen war begrenzt auf die Datenerfassung, wie z.B. Lohnbuchhaltung und Lagerverwaltung. Damals war man bestrebt, den Einsatz von Informationsverarbeitungssystemen über die damals vorherrschenden Abrechnungssysteme hinaus auszuweiten. Zugleich erhobene Forderungen, Totalsysteme müssten das ganze Unternehmen umfassen, führten zum Scheitern dieser Systeme. Das damalige Ideal einer permanenten Verdichtung und Aufbereitung von Daten aller Unternehmensbereiche und –ebenen für umfas-

sende Kennzahlensysteme und Simulationsmodelle als Basis eines ‚Realzeit-Managements‘ war aus technischen, konzeptionellen und personellen Gründen nicht praktikabel. Weitere Argumente liegen in der Komplexität, der Vernetzung und Vielschichtigkeit der Gegenstände, in den Unternehmensstrukturen und Entscheidungssituationen selbst (HANSEN 1996, STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999). Verantwortlich für das Scheitern von MSS waren vorwiegend der hohe Entwicklungs- und Pflegeaufwand solcher Systeme, mangelnde Zusammenarbeit zwischen Wissensingenieuren, den Experten und den späteren Nutzern, sowie das Fehlen leistungsfähiger Expertensystemshells und anderer informationstechnischer Voraussetzungen (ABTS & MÜLDER 2000, GAUSEMEIER & FINK 1999, WERNER 1992).

In den 70er Jahren konnte eine Dezentralisierung der Datenverarbeitung durch Terminals am Arbeitsplatz nach dem Motto ‚small is beautiful‘ erfolgreich Fuß fassen. In den Folgejahren wurden MSS nur noch als so genannte partielle Informationssysteme auf konkrete betriebliche Funktionen bzw. Aufgaben ausgerichtet (z.B. Vertriebs- oder Projekt-Informationssystem). Die mittlerweile bestehenden technischen Voraussetzungen (Speichermedium mit hoher Kapazität und schnellem direkten Zugriff, Rechnernetze, grafische Benutzeroberflächen, Datenbankverwaltungssysteme, Online-Dienste) förderten den Siegeszug von MSS in den letzten Jahren. Mitte der 80er Jahre erhielten die bislang prototypischen Systeme Software-Reife. Seitdem nahmen der Aufgabenumfang und die Funktionalität weiter zu. Das Spektrum reicht von Bürokommunikation, über interne und externe Datenbanken zur Gewinnung problembezogener Informationen bis zu Anwendungssystemen der Künstlichen Intelligenz wie Expertensystemen, die insbesondere bei schlecht strukturierten Problemen zum Einsatz gelangen (ABTS & MÜLDER 2000, GÖRZ et al. 2000, PUPPE 1999).

In methodischer Hinsicht existiert eine nahezu verwirrende Vielzahl von Begriffen und Systemen, die mit immer neuen Akronymen belegt werden, für die wiederum unterschiedliche Interpretationen gelten. Mehrheitlich kristallisieren sich in letzter Zeit zwei Systemklassen heraus, die sich durch den Aufgabenzweck, die Art ihrer Unterstützung, die Adressaten und Entscheidungsspielräume, die technische Systemarchitektur und den Grad der Aufbereitung des Informationsangebotes unterscheiden (ABTS & MÜLDER 2000, STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999)(vgl. in obiger Abbildung die mit einem ‚X‘ markierten Techniken).

- Für Entscheidungs-, Planung-, und Kontrollprozesse benötigen Entscheidungsträger zusätzliche Modelle und Methoden; diese werden von Entscheidungsunterstützungssystemen (EUS), so genannten Decision Support Systemen (DSS) bereitgestellt.
- Personen in Führungspositionen benötigen interne und externe Informationen, diese werden von Führungsinformationssystemen, so genannten Executive Information Systemen (EIS) bereitgestellt.

### 3.2.2 Entscheidungsunterstützungssysteme

Unter Entscheidungsunterstützungssystemen werden computergestützte, interaktive Systeme verstanden, die Entscheidungsträgern in Organisation und Verwaltung mit Modellen und Methoden bei der Lösung von zumeist komplexen und schlecht strukturierten (strukturierbaren) Entscheidungssituationen helfen (‘decision support’) (STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999, WERNER 1992). Zur Unterstützung von Entscheidungsfindungen reicht es nicht mehr, nur Informationen zu erhalten, sondern den Systemen obliegt die Aufgabe, selbstständig relevante Daten zu extrahieren und Optionen bzw. Antworten auf Fragen des Managements anzubieten. Längst verfolgt man nicht mehr den Ursprungsgedanken hochintegrierter Totalsysteme, die den Menschen ersetzen sollten (aber nicht konnten), sondern den der teilintegrierten Partialsysteme, die Personen bei Entscheidungen unterstützen sollen.

Im Mittelpunkt steht eine Hilfestellung bei wichtigen Entscheidungen in Teilphasen des Managementprozesses, wie der Problemerkennung und –analyse, der Generierung von Alternativen und ihrer Bewertung sowie die Zielerreichung und Kontrolle von Projekten (ASSHOFF 1999, BEA & HAAS 1995, HANSEN 1996). In den Wirtschaftswissenschaften sind Experten des Operations-Research mit der Entwicklung von DSS vertraut (ABTS & MÜLDER 2000). Dabei wird das Verfahren des Multi-Criteria Decision Making verwendet, das sich in die Untergruppen Multi-Objective Decision Making (MODM) und Multi-Attribute Decision Making (MADM) aufgliedert (POSCHMANN et al. 1998). Dieser Ansatz zu mehrkriterieller Bewertung und Entscheidung geht davon aus, dass eine direkte Vergleichbarkeit der verschiedenen Kriterien und damit ihre gegenseitige Substituierbarkeit nicht gegeben ist. MODM-Verfahren arbeiten mit kontinuierlichen Entscheidungsräumen; die Ziele sind durch quantifizierbare Zielfunktionen gegeben und Lösungen werden meist durch Vektoroptimierungsmodelle ermittelt. Ziel von MADM ist eine Präferenzordnung der Alternativen, auf deren Grundlage die optimale Entscheidung getroffen werden kann. Aus diesem Grunde ist es durchaus möglich, dass es keine Entscheidungssituation gibt, in der alle Kriterien gleichzeitig optimiert werden (FIGGE 2000).

In den Umweltwissenschaften und der Umweltinformatik bieten sich u.a. Werkzeuge der Künstlichen Intelligenz wie der Expertensysteme für die Entwicklung von DSS an. Ihre Architektur und Komponenten sowie die Eigenschaft, Wissen im Gegensatz zu Daten oder Informationen zu speichern, zu verarbeiten und zu Problemlösungen zu aggregieren, sind hervorzuheben (BRECKLING & ASSHOFF 1996, HERZOG 2001a, HILTY & GILGEN 2001, SIMON & PIETSCH 1998). Prototypische Beispiele sind das Beratungssystem PRO\_PLANT für den umweltschonenden Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft (STREIT 1996), das in der Probephase befindliche, als ein fuzzy-regelbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem für Nutzungskonflikte in Küstenzonen realisierte DSS SimCoast (KANNEN 2000), oder das Beratungssystem für das Management von Feuchtwiesenvegetation (ASSHOFF 1999).



### 3.2.3 Führungsinformationssysteme

Führungsinformationssysteme haben die Aufgabe, Führungskräften die für den Führungs- und Entscheidungsprozess relevanten Informationen rechtzeitig und in geeigneter Form zur Verfügung zu stellen („data support“). Synonyme sind auch Executive Information System (EIS), Chefinformationssystem (CIS) oder Vorstandinformationssystem (VIS). Im Gegensatz zu den o.g. DSS, die als teilintegrierte Partialsysteme spezifische Entscheidungssituationen unterstützen, verfolgen die EIS die Ursprungsidee des integrierten Gesamtsystems (BEA & HAAS 1995). Sie gelten als besonders einfach zu bedienendes, grafisch orientiertes Abfrage- und datengetriebenes Berichtssystem, das dem Top-Management Informationsversorgung „auf Knopfdruck“ bietet. Entscheidend für den Erfolg von EIS ist ihre Konstruktion für bestimmte Personen in Entscheidungsebenen und nicht für spezifische Entscheidungssituationen. Eine schnelle Verfügbarkeit aktueller Informationen ist zudem wichtig, um strategische Entscheidungen treffen zu können und sich ggf. rasch für Reden und öffentliche Auftritte vorbereiten zu können. Die Betonung und damit Unterscheidung zu DSS liegt bei EIS in der Art und Weise der Informationsverarbeitung und –bereitstellung (BEA & HAAS 1995, STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999). Sie müssen (führungs-)relevant, rechtzeitig und in geeigneter Form, neben quantitativen auch qualitative Informationen verarbeiten und bereitstellen. Umgangssprachlich führt dies zu der praktischen Forderung: Richtige Information zur richtigen Zeit in der richtigen Form am richtigen Platz. EIS besitzen einfache Auswertungsmöglichkeiten, denn typischerweise sind sie berichtsorientiert und verfügen gleichzeitig über ausgeprägte Kommunikationselemente. Durch die mengen- und wertmäßige Darstellung von Zielen, Mitteleinsatz und Leistungen, soll die Transparenz des gesamten Verwaltungsapparates und Unternehmens verbessert und dieses effizienter gesteuert werden können. Durch Kombination mit wissensbasierten Techniken, wie u.a. der Bildung von Produktionsregeln, oder Schlussfolgerungsmechanismen (HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999) entstehen Expertisesysteme, die Berichte aufgrund individueller Inhalte gestalten und anschließende Auswertungen (z.B. Diagnosen) situationsbezogen vorbereiten. Darüber hinaus ist ihnen eine intuitive Bedienung und managementgerechte Informationspräsentation zu eigen. Diese helfen dem Entscheidungsträger, selektierte Informationen mit eigenen Kommentaren zu versehen und an Mitarbeiter per E-Mail weiterzuleiten. Zu den konkreten Einsatzzwecken zählen interne und externe Strategieplanung, Bereitstellung tagesaktueller Kennzahlen, Berichtswesen, Erfolgsrechnung, Gesamtunternehmensplanung, sowie strategisches wie operatives Controlling. Globaler Marktführer ist die SAP-Softwarefirma mit ihrem betriebswirtschaftlichen Produkt SAP/R3 und EC-EIS Führungsinformationssystem für eine flexible Konsolidierung im Konzernberichtswesen. EIS werden überwiegend in Unternehmen mit einem Jahresumsatz von mehr als einer Milliarde US\$ eingesetzt. Dominierende Branchen sind die Industrie (37 % aller Implementierungen), die Finanzdienstleister (24 %) und das Verkehrswesen (16 %) (HANSEN 1996; URL: <http://www.sap.com>).

Aus inhaltlicher Sicht bilden die MSS zusammen mit den Planungssystemen die Führungssysteme des Managements. Damit grenzen sich EIS deutlich von den Administrations- oder Dispositionssystemen der operativen Ebenen ab (STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999). Die Entwicklung von EIS ist detailliert zu planen und als Prototyping-Methode rasch zu entwickeln. HANSEN (1996) weist ausdrücklich darauf hin, dass neben einem EIS-Entwicklungsteam auch ein permanentes Betreuungsteam den Charakter von Unterstützungs- statt von Ersatzsystemen, prägen. Als weitere Systeme zur Förderung von Kommunikation, Koordination und Kooperation sind Workflow-Management-Systeme (engl. workflow management system; eher seltene deutsche Übersetzung: Vorgangsbearbeitungssystem) angeführt (,communication support')(ABTS & MÜLDER 2000). Sie unterstützen bei dokumentenintensiven Vorgängen die Zusammenarbeit der Beteiligten nach festgelegten Regeln und Methoden. Der Ablauf kann streng vorgeschrieben oder hinsichtlich Bearbeitungsreihenfolge und -bedingungen flexibel gestaltet werden. Workflow-Management-Systeme fördern somit Kommunikation, Kooperation und Koordination innerbetrieblich, wie auch interbetrieblich. Diese Systeme wecken Hoffnungen auf größere Flexibilität in der Reaktion auf geänderte Marktsituationen.

### 3.3 Unsicherheiten

Entscheidungsfindungen bei Raumnutzungskonflikten gehen einher mit unterschiedlichen Formen von Unsicherheiten. Ihre Berücksichtigung ist gerade bei der beabsichtigten rechnergestützten Simulation einer exemplarischen Entscheidungssituation von wesentlicher Bedeutung.

#### 3.3.1 Definitionen

Das Begriffsspektrum von ,Unsicherheiten' erstreckt sich auf die informale, lexikalische und stochastische Unsicherheit (BACKHAUS et al. 1996, KAHLERT & FRANK 1994):

1. **Informale Unsicherheit**, auch als epistemische Unsicherheit bezeichnet, ist bedingt durch mangelndes oder unvollständiges Wissen sowie fehlende Informationen, die häufig auch nicht zu beschaffen sind (,Missing Value-Problem'). Gründe können Schwierigkeiten bei direkten Messungen von Komplexität, Heterogenität, Dynamik und insbesondere Parametervariabilitäten von Ökosystemeigenschaften, sowie Messfehler oder gänzliche Nicht-Messbarkeit (Indikator-Indikandum-Phänomen) sein. Damit einhergehen Grenzen der Erkenntnis und der stets zu beachtende objektive Stand von Wissenschaft und Technik. Informale Unsicherheit umfasst sowohl inhaltlich-semantische Untersuchungen, als auch geometrische Unschärfe geographischer Objekte und ihre Lagebeziehungen im Raum. Für derartige räumliche Analysen bieten sich Modellkopplungen mit Geographischen Informationssystemen (GIS) an.

2. **Lexikalische Unsicherheit**, auch sprachliche oder intrinsische Unschärfe genannt (*große Tiere, schöne Landschaft*), kann im Kontext oft zu Begriffsdefinitionen verdichtet werden (*Bodenschätzung, Steuerschätzung*). Der Kontext ist bei dieser Art von Unschärfe von besonderer Bedeutung für das Verständnis.
3. **Stochastische Unsicherheit**, Betrachtung von zufallsabhängigen (probabilistischen) Ereignissen und Messungen als Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses.

Im semantischen Umfeld des Terminus ‚Unsicherheit‘ und der Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie ist eine Darlegung und Unterscheidung der sechs Begriffe: fuzzy (zu deutsch: unscharf), uncertain (unsicher, ungewiss), imprecise, inexact (ungenau, nicht exakt), vague (vage), incomplete (unvollständig) und general (verallgemeinert, generell) hilfreich (SPERLBAUM 1991, verändert und ergänzt).

<b>FUZZY</b> (unscharf)		
<i>Beschreibung</i>	<i>Bemerkungen/Hintergründe</i>	<i>Beispiel</i>
Der Wert eines Parameters wird durch ein Intervall mit unscharf definierten Grenzen und fließenden Übergängen angegeben und durch einen linguistischen Begriff ausgedrückt. Fuzzy ist eine sachbezogene Facette die gleichzeitig Unschärfe über eine Sache verbreitet. Ziel ist eine sachgemäße Transformation scharfer Klassengrenzen.	1965 wurde der Begriff ‚Fuzziness‘ von L. A. ZADEH geprägt. Er bestimmt damit den Grad der Zugehörigkeit eines Objektes zu einer Menge. Unscharfe Grenzen können Folge von Informationsmangel (ungenügender Datenqualität oder unvollständiger Daten) und dem Vorhandensein unscharfer Objekte sein. Nach BUCKLES und PETRY (1982) wird Fuzziness dort benutzt, wo eine präzise Formulierung nicht möglich ist und die Ungenauigkeit in den Problemparametern nicht durch eine wahrscheinlichkeitstheoretische Ungenauigkeit ersetzt werden kann.	Der Grundwasser-Flurabstand ist ‚hoch‘.
<b>UNCERTAIN</b> (unsicher, ungewiss)		
<i>Beschreibung</i>	<i>Bemerkungen/Hintergründe</i>	<i>Beispiel</i>
Eine Information ist unsicher, wenn sie nicht mit absoluter Sicherheit zutrifft. Die Sicherheit kann mit so genannten Sicherheitsfaktoren (engl. Certainty factors, CF) (HEINSOHN &	Einsatz in Fuzzy-Systemen zur Beurteilung (Gewichtung) der Sicherheit des Wissens mit dem die Regeln aufgestellt wurden. Der Faktor beeinflusst das Resultat. Die Metho-	Der Grundwasser-Flurabstand ist ‚hoch‘ mit einer Sicher-

<p>SOCHER-AMBROSIUS 1996) angegeben werden. CF können dazu verwendet werden, die Sicherheit von Fakten, die nicht als definitiv wahr oder falsch bekannt sind, auf quantitativer Basis zu bewerten. Im Modell der Sicherheitsfaktoren verwendet man dabei Zahlen aus dem Intervall [-1, 1]. Die Zahl -1 bedeutet dabei definitiv falsch, die Zahl 1 definitiv wahr, die Zahl 0 repräsentiert eine Ungewissheit.</p>	<p>de der Certainty-Factors behandelt Informationen, deren Zutreffen durch einen Sicherheitsfaktor angegeben wird (=Wissenslücken).</p>	<p>heit von 0.8 und Unsicherheit von 0.2</p>
<p><b>IMPRECISE, INEXACT</b> (ungenau, nicht exakt)</p>		
<p><i>Beschreibung</i></p>	<p><i>Bemerkungen/Hintergründe</i></p>	<p><i>Beispiel</i></p>
<p>Der Wert eines Parameters ist nicht genau bekannt. Er kann durch ein Toleranzintervall angegeben werden. Dieses drückt dann die Menge aller möglichen Werte des Parameters aus.</p>	<p>Das Toleranzintervall hat scharfe (,crisp') Grenzen. Fuzziness im eigentlichen Sinn taucht erst dann auf, wenn dieses Intervall keine scharfen Grenzen besitzt. Diesen Typ der Unsicherheit führte ZADEH (1978) unter der Bezeichnung ,imprecise' ein. Er betrifft überwiegend die Erhebung und Gewinnung von Daten durch Messverfahren, unter spezieller Berücksichtigung von Variabilität und Heterogenität dynamischer Systemeigenschaften.</p>	<p>Der Grundwasser-Flurabstand schwankt um <math>10\text{ m} \pm 1\text{ m}</math>.</p>
<p><b>VAGUE</b> (vage)</p>		
<p><i>Beschreibung</i></p>	<p><i>Bemerkungen/Hintergründe</i></p>	<p><i>Beispiel</i></p>
<p>Ein Datenwert ist vage, falls über den Wert nur eine Vermutung (Einschätzung) vorliegt. Synonym zu unbestimmt, ungewiss.</p>	<p>BLACK (1937) benutzt den Begriff der ,vagueness' im Sinne der ,fuzziness'. ZADEH gebraucht die Bezeichnung ,vagueness' um eine Art ,uncertainty' auszudrücken, die sowohl fuzzy als auch <i>mehrdeutig</i> ist (DUBOIS/PRADE 1980). Semantische Nähe zu Faustformeln, Heuristiken.</p>	<p>Der Grundwasser-Flurabstand beträgt ungefähr 10 bis 15 m.</p>

INCOMPLETE (unvollständig)		
Beschreibung	Bemerkungen/Hintergründe	Beispiel
Es ist nur ein Teil einer Menge von Daten vorhanden.	DUBOIS und PRADE (1980) beziehen die Unvollständigkeit einer Information auf die Unvollständigkeit eines Datenwertes insofern, als für diesen Wert nur die Zugehörigkeit zu einer <i>Teilmenge</i> des Attributwertebereichs bekannt ist (=Datenlücken).	Der Grundwasser-Flurabstand am Montag beträgt 10 m und am Mittwoch 15 m.
GENERAL (verallgemeinert, pauschal)		
Beschreibung	Bemerkungen/Hintergründe	Beispiel
Eine Verallgemeinerung einer Information bezüglich eines Datenwertes liegt vor, wenn dieser Wert für mehrere Aussagen verwendet wird.	Diese Art der Unpräzision benutzt BLACK (1937) aus DUBOIS/PRADE 1980.	Weite Teile des östlichen Seen- und Hügellandes von Schleswig-Holstein, wiesen einen ähnlichen Grundwasser-Flurabstand auf.

Tab. 7: Übersicht von Begriffen im Umfeld von ‚Unsicherheit‘

Die Beschreibung der einzelnen Begriffe kann nicht in jeder Situation streng voneinander getrennt werden. Abweichungen ergeben sich z.B. durch disziplinäre Betrachtungswinkel und verschiedenartige Problemkontexte. Weitere Begriffe im sprachlichen Umfeld von Unsicherheit sind ‚Scheinpräzision‘ (Wahrheit vs. nicht realistische Daten) und ‚Ultrafuzzy‘. Mit **Scheinpräzision** werden Sachverhalte bezeichnet, bei denen unter Vernachlässigung einer real vorhandenen Ungenauigkeit, aber auch aufgrund von Unwissen, eine überpräzise Datendarstellung (z.B. mittels Kommastellen) verwendet wird. **Ultrafuzzy** (TRAEGER 1994) bezeichnet die Zuordnung eines Elementes  $x_0$  zum Zugehörigkeitsgrad  $\mu_a(x_0)$ , das selbst unscharf im Intervall  $[0,1]$  ist.

### 3.3.2 Ursachen

Die Entwicklung, Realisierung und Anwendung von Entscheidungsunterstützungssystemen verlangt eine den Bewertungsgegenständen – ökologische Systeme – adäquate Herangehensweise und Beachtung von Ursachen von Unsicherheiten. Am Anfang bereiten Messungen und Beobachtungen des Systemverhaltens die **Systemanalyse** vor. Darauf folgt die Phase der **Modellierung**, in der die vorhandenen Fakten in ein rechnergestütztes Modell zur anschließenden Simulation überführt werden. Der **Bewertung** fällt eine besondere Rolle zu. Diese drei essentiellen Phasen bilden den Rahmen für eine Systematisierung der Ursachen von Unsicherheiten, die zugleich auf System-, Modell-, Daten-, Ergebnis- und Entscheidungsebenen auftreten. Zur Einteilung der Ursachen dient die bereits erläuterte Unterteilung in informale, lexikalische und stochastische Unsicherheit, die Stellung der Phase im wissenschaftlichen Forschungs- und Modellbildungsprozess und letztlich eine disziplinäre Betrachtungsweise (HERZOG 2001b, modifiziert).

UNSICHERHEITEN IN BEWERTUNGS- UND ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNGSSYSTEMEN			
Unsicherheit bei der...	Analyse	Modellierung	Bewertung
Ursachen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vielfalt u. Vernetzung natürlicher u. anthropogener Systeme</li> <li>• Dynamik von Parametern in Zeit und Raum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sachgemäße Repräsentation und Formalisierung integrativer Fakten</li> <li>• Aussagebereich der Simulationsergebnisse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformation von Beobachtungen auf Maßstäbe</li> <li>• Integration und Synthese interdisziplinärer Bezüge und Wissen</li> </ul>
Begründung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systemtheoretische Komplexität und Heterogenität</li> <li>• Ökosystemkontinuum und kybernetische Veränderungsprozesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwierigkeit der Parametrisierung</li> <li>• Unterscheidung zwischen Daten, Informationen und Wissen</li> <li>• Abgrenzung des Modellzwecks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uneinheitliche Bewertungsmaßstäbe</li> <li>• Defizite bei der Formalisierung von Bewertungsschritten</li> <li>• Heuristische Faustformeln als Input</li> </ul>
Folgen und Probleme	Messbarkeit Akquisition Parametrisierung	Randbedingungen Datentypen Identifikation	Bewertungssituation Umgang mit Schätzungen
Klassen	stochastisch, informal	lexikalisch, informal	lexikalisch
Wissensquellen und Disziplinen	Systemwissenschaft, Ökosystemforschung	Mathematik, Informatik, Ökosystemforschung	Raum- und Umweltplanung, Wirtschaft- und Sozialwissenschaft, Jura

Tab. 8: Unsicherheiten in Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystemen

### **Messbarkeit des Systemverhaltens**

Mittels Systemanalysen lassen sich Struktur, Funktion und Verhalten von Systemen untersuchen. Systeme werden in Subsysteme, Elemente und Relationen differenziert, ohne jedoch den Systemzusammenhang zu vernachlässigen. Messungen von Systemgrößen und Sammlung quantitativer Daten stehen am Anfang. Sie können die Heterogenität, Vernetzung und die Systemdynamik sowie die Bewertungssituation nur unter vorher festzulegenden Annahmen beschreiben. Sie sind somit nicht als absolute, die Wahrheit betreffende Größen, sondern als mit Unsicherheiten und Toleranzen behaftete Parameter zu verstehen (ALIEV et al. 2000, GÖRZ et al. 2000). Mit informaler Unsicherheit behaftete Messgrößen werden häufig mit Toleranzgrenzen als Ausdruck von Variabilitäten angegeben, z.B. Temperatur  $10^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Sind direkte Messungen zu kosten- und zeitaufwendig, oder nicht möglich (bei Indikanda), werden zum einen statistische Verfahren zur Abschätzung von Stichproben aus einer Grundgesamtheit angewandt, zum anderen Expertenschätzungen und in Faustformeln formuliertes, implizites Wissen herangezogen. In der Umweltpolitik und dem Umweltrecht werden durch normative Setzungen Toleranzen und Unsicherheiten vordergründig negiert. Die Trinkwasserverordnung beschreibt den höchstzulässigen Grenzwert von Nitrat ( $\text{NO}_3$ -) im Trinkwasser mit exakt 50 mg/l. Umweltprogramme der Bundesländer legen Flächenmindestgrößen in Prozent fest: dem Naturschutz wird 15 % zugesprochen; der Waldanteil soll auf 10 % anwachsen. Die Vielfalt und die Vernetzung natürlicher und anthropogener Systeme erschwert die Auswahl adäquater Modellierungsparameter und führt zu informaler und lexikalischer Unsicherheit. Diese geht einher mit Defiziten einer präzisen Erfassung von Systemgrößen. Lexikalische Unsicherheit entsteht, wenn exakte sprachliche Abgrenzungen von Objekten durch ihre Vernetzung und aufgrund disziplinärer Sichtweisen, nicht eindeutig gegeben sind (z.B. Bodenschutz ist ebenso Schutz des Grundwassers). Zeitliche Auflösungen von beispielsweise Fließgewässergütedaten, oder Flächenversiegelungen besitzen informale Unsicherheiten bezüglich ihres Adressaten auf lokalen bis bundesplanerischen Ebenen. Die Ursachen für stochastische und informale Unsicherheit bei der Systemanalyse liegen begründet in der Dynamik und Variabilität von Parameterausprägungen in Zeit und Raum. Räumliche Variabilitäten und Veränderungsprozesse können schwerlich in identischen Differenzierungsgraden für jede Organisations- und Planungsebene detailliert und quantifizierbar ohne Informationsverlust angegeben werden (z.B. Klimaeinflüsse auf Ameisen, Rolle des Frosches für die Lärmbelastung). Dafür sind die natürlichen Schwankungen, subjektive Einflüsse beim Messverfahren, oder die gewünschte Aussage zu verschieden (induktive/deduktive Herangehensweise). Ökosystemkomplexe weisen, definiert als zusammenhängende Ökosysteme, räumlich wie zeitlich Übergänge auf. Ökotope sind Übergangszonen zwischen zwei Ökosystemen und vielfach gekennzeichnet durch höhere Biodiversität. Identifizierungen derartiger Übergänge gehen einher mit dem Forschungskontext, fachlicher Betrachtungsweise und sind daher mit *lexikalischer* Unsicherheit behaftet.

Eine begründete Auswahl systembeschreibender Eingangsgrößen in Computermodellen, und damit der jeweilige spezifische Differenzierungs-, bzw. Abstraktionsgrad von Modellkomponenten, bestimmt die Simulationsergebnisse und mitunter auch die Verarbeitungsweisen. Im Sprachgebrauch von Expertensystemen wird gerne von den Phasen der Wissensakquisition und Wissensrepräsentation gesprochen (GÖRZ 1995, PUPPE 1991). Hier liegt also eine Schnittstelle zwischen den Phasen der Systemanalyse und der Modellierung. Im Zeitalter digitaler Umweltdaten, von denen immer noch zu wenige als konsistente Datenpools vorliegen, ist die wissensbasierte Modellierung auf dem Wege, natürlich-sprachliche Fakten zu verarbeiten. Diesen Daten, die als Wissen aus abgesicherten Erkenntnissen von Experten aus Forschungserfahrung, Lehre oder Literatur gewonnen werden, fällt dabei eine große Bedeutung bei der Verringerung von informaler Unsicherheiten zu (HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999, SIMON et al. 1992, SIMON & PIETSCH 1998). Zusammengefasst liegen die Ursachen für Unsicherheiten bei der Systemanalyse begründet in der Messbarkeit von Eigenschaften sowie der Komplexität, Heterogenität, Vernetzung und Dynamik ökologischer Systeme.

### **Repräsentation und Formalisierung**

Modellierung bezeichnet den Prozess der Verhaltensnachbildung eines Systems. Die Art und Weise einer sachgerechten Repräsentation und Verarbeitung, der durch die Systemanalyse gewonnenen Fakten, sind Ursache informaler und lexikalischer Unsicherheiten. Die Auswahl der Form der Wissensrepräsentation ist abhängig davon, ob es sich um vorwiegend numerische Daten aus z.B. Messungen, oder um überwiegend linguistische Daten aus z.B. Schätzungen oder Befragungen handelt. Dementsprechend breit ist das Spektrum vorhandener Modellierungstechniken. Limitierender Faktor bei der Modellierung ist die Verfügbarkeit und Finanzierbarkeit hinreichend präziser Rohdaten und Wissen in problemstellungsadäquater Qualität und Quantität. Mit der rechnergestützten Abbildung ist die so genannte Formalisierung des zu simulierenden Systemverhaltens verknüpft. Dies kann mittels Gleichungssystemen oder auch durch Formalisierungsmuster, wie Produktionsregeln („Wenn-Dann“) und die in diesen Regeln enthaltenden Begriffe mit Fuzzy-Sets erfolgen. Umgangssprachlich formuliertes Sach- und Bewertungswissen kann auf diese Weise einer Formalisierung zugeführt werden. Mit der Komplexität eines Realsystems kann das Formalisierungsmuster und der Abstraktionsgrad korrelieren. Bei der Modellierung wird gemäß der Anzahl verwendeter Systemgrößen und fachlichem Durchdringungsgrad zwischen black-box, grey-box und white-box Modellen unterschieden (LESER 1997). White-Box-Modelle bilden den idealen Typ, der Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Bewertungsvorgängen bietet. Doch bislang divergieren bei realisierten Modellen einerseits differenzierte Erklärungen des Systemverhaltens mit andererseits nachvollziehbaren Simulationsbeschreibungen. Lexikalische Unsicherheit bei Klassifikationen umfangreicher, vorwiegend quantifizierter Daten, geht einher mit der Festlegung der Klassenanzahl und der Klassengrenzen auf adäquaten Skalen. So sind z.B. bundeseinheitlich definierte Grenzen der Feldkapazität, lt. bodenkundlicher Kartieranleitung KA 4, nicht automatisch für die Komplexität und Variabilität unterschiedlicher lokaler Naturräume



gültig (HERZOG 1998). Ein generelles, mit Unsicherheit der lexikalischen Form behaftetes Problem bildet die Abgrenzung des Modellzwecks, d.h. des Aussagebereiches und der Übertragbarkeit von Simulationsergebnissen. Selten können Anwendungsbereiche mit klaren zweiwertigen Aussagen wie ja oder nein belegt werden. Bei der Übertragbarkeit von Ergebnissen ist auf vergleichbare Naturraumausstattungen und Randbedingungen zu achten, denn die Artenvielfalt eines Gebietes kann, als Maßstab verstanden, verschwindend gering gegenüber der eines anderen Gebietes sein. Die Simulationsergebnisse eines provinziellen Ackerbaubetriebes können für globale Aussagen nicht genügen. Bezogen auf eine informale und stochastische Unsicherheit stellt sich auch die grundsätzliche Frage, ob es gelingen kann, ein globales Modell für eine Nachhaltige Entwicklung zu entwickeln. Zusammengefasst liegen die Ursachen von Unsicherheiten bei der Modellierung vorwiegend begründet in der Verfügbarkeit sowie Quantität und Qualität von Daten, der Form der Wissensrepräsentation, der durchgeführten Systemanalyse und der angemessenen Berücksichtigung von Systemgrenzen im Abstraktionsgrad des Modells.

### **Maßstabsbildung, Skalentransformation und Problemverlagerung**

Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssysteme bilden in ihrem Kern Werteigenschaften auf Objekte im Sinne von Ökosystemen ab. Diese Transformation von Messungen auf der Sachebene mit Wertmaßstäben auf der Wertebene geht einher mit lexikalischer und informaler Unsicherheit. Entsprechend des allgemeinen Schemas der Umweltbewertung ist die Skalentransformation ein iterativer Prozess, der zwischen den beiden Ebenen abläuft. Die Entwicklung von Bewertungsregeln und Bewertungsmaßstäben ist mit lexikalischer Unsicherheit behaftet. Sprachliche Zuordnungen und Alternativenvergleiche können selten auf klare ja/nein-Aussagen reduziert werden, sondern bewegen sich auf ordinalen Skalen. Je weniger ein sprachlich formuliertes Ziel (Indikandum) auf der Sachebene messbar ist, desto größer ist die Unsicherheit. Die Balance zwischen qualitativen Leitbildern mit Zielaussagen (z.B. Begrenzung des Verkehrsaufkommens, Reduzierung von Flächenversiegelungen) und quantitativen Umweltqualitätszielen spiegelt dieses Dilemma wider. Leitbilder, Szenarien und Prognosen (z.B. zum Raumnutzungswandel) werden häufig umgangssprachlich formuliert, denn ihrer Quantifizierung sind Grenzen durch informale Unsicherheiten gesetzt. Holistische Systemauffassungen sind von der Systemtheorie, als auch von der Umweltpolitik gewollt, jedoch mit unterschiedlichen Konsequenzen behaftet. Die Integration und Synthese interdisziplinärer Zusammenhänge dient der Vermeidung von Problemverlagerungen und einem ausgewogenen Verhältnis nachhaltiger Raumentwicklung, geht allerdings in diesem Sinne einher mit lexikalischer Unsicherheit. Das Umweltrecht enthält dafür zahllose Beispiele so genannter ‚unbestimmter Rechtsbegriffe‘ (z.B. es ‚liegt im Ermessen‘, ‚schädigende Einwirkung‘, ‚Gute fachliche Praxis‘, ‚Stand von Wissenschaft und Technik‘). Steigt die Datenmenge sind Verdichtungen durch Selektion oder Aggregation nicht zu vermeiden. Mit Aggregationen wird allerdings wiederum nur ein Teil des Sachverhaltes in einem bestimmten Kontext wiedergegeben und ist vergleichbar dem Prinzip von Meta- und Objektsprache (z.B. Baum und Eiche;

Gewässer: undifferenziert, meint Still- und Fließgewässer). Die Verwendung qualitativen Bewertungswissens in der Form heuristischer Faustformeln ist in den Fällen von Datenmangel der einzig mögliche Modellinput. Für Entscheidungsfindungen sind diese Erkenntnisse von großem Wert. Zusammenfassend lassen sich die Ursachen von Unsicherheiten bei Bewertungen und Entscheidungen zurückführen auf sachgerechte Skalentransformationen, Aggregationen sowie unterschiedlich transparente Schlussfolgerungen.

### 3.3.3 Folgen für die Indikatorbildung

Die Folgen von Unsicherheiten in Entscheidungssituationen sind vielfältig. Sie betreffen vorwiegend im Bereich der Systemanalyse die Bildung von Indikatoren, die quantitative Datenverarbeitung und letztlich die Aussagekraft von Erklärungen von z.B. Simulationsoutputs.

**Indikatoren** sind Hilfsgrößen zur Messung selbst nicht direkt messbarer Phänomene (=Indikanda). Sie bezeichnen einen Tatbestand, von dem aus auf ein Ereignis geschlossen werden kann. Aus wissenschaftstheoretischen Erwägungen, wie die Analogie zu Explanans und Explanandum der deduktiv-nomologischen und des induktiv-statistischen Erklärungsmodells zeigt, ist eine Interdependenz zwischen Indikator und Indikandum zwingend. Ihr Zusammenhang ist möglichst hinreichend transparent anzugeben. Die Güte von Korrelationen zwischen einem Indikandum und einem Indikator ist maßgeblich für die Aussagekraft des Indikators als Anzeiger für bestimmte Sachverhalte. Doch gerade diese Korrelation ist nicht immer kausal begründbar und empirisch belegbar. Somit herrscht hier eine stochastische, wie auch informale und lexikalische Unsicherheit. Dieser Unsicherheit wird mit der Erhöhung der Indikatorenanzahl versucht entgegenzuwirken, denn u.U. kann die Anzahl der in Indikatoren-sätzen enthaltenden Indikatoren die Gesamtaussage beeinflussen.

Das **Ziel** von Indikatoren ist eine Komplexitätsreduktion von Ereignissen in dynamischen Systemen (BARKMANN 2001, BIRKMANN et al. 1999, HERZOG et al. 2001). Die Erstellung von Indikatoren fußt auf messbaren Merkmalsausprägungen von Parametern, Variablen oder Systemgrößen, denen je nach Fragestellung der Charakter eines Anzeigers für nicht messbare Ereignisse zugesprochen werden kann. Bei der Erstellung von Indikatoren sind folgende **Anforderungen** zu beachten:

- eine leichte und nachvollziehbare Messbarkeit und statistische Differenzierbarkeit
- angemessene technische Realisierung und Kosten der Datenerhebung
- hohe Aussagekraft und deutlicher und naher Zusammenhang zu dem zu indizierenden Indikandum zur Verringerung von Unsicherheiten
- eindeutige Adressaten (Forschung vs. Praxis, Bund vs. Kommune)
- transparente Bildung und interpretierbare Angabe des Abstraktionsgrades
- praktische Umsetzbarkeit

Dementsprechend sind die **Eigenschaften** von Indikatoren sehr vielfältig. Verallgemeinerungsfähig sind etwa: die Beschreibung von Systemzuständen, Veränderungen, Konsequenzen prognostisch anzuzeigen und Sachverhalte unter bewusster Dimensionsreduktion zu aggregieren. Für handlungsorientierten Einsatz sind Indikatoren im gesellschaftlichen Dialog zu formulieren und politisch zu legitimieren. Indikatoren werden eingesetzt als Prüfgröße für Zielerreichung (normativer Indikator mit Soll-Ist-Vergleich, mit direktem Bezug zu politischen Zielen bzw. Referenzwertsetzungen), als Ausdruck für politischen Konsens oder als Instrument des Monitorings und der Erfolgskontrolle. Als ein Beispiel auf der umweltbundespolitischen Ebene sei der Deutsche Umwelt Index (DUX URL: <http://www.umweltbundesamt.de/dux/>) genannt.

**Nachhaltigkeitsindikatoren** sind Messgrößen, die Informationen aus dem Spektrum ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Systeme belegen, zusammenfassen und Auskunft geben über Annäherungen an bzw. Entfernungen von definierten und legitimierten Zielen Nachhaltiger Entwicklung. Globaler Hauptvertreter für die Entwicklung von Indikatoren für eine Nachhaltige Entwicklung ist die CSD Kommission der UN (United Nations Commission on Sustainable Development)(CSD 2001). Kernelement des CSD-Arbeitsprogramms ist eine Indikatorenliste mit 134 Einzelindikatoren für die Themen bzw. Kapitel der Agenda 21, die in die vier Kategorien ökonomische, soziale, ökologische und institutionelle Indikatoren eingeteilt sind. Institutionelle Indikatoren beschreiben notwendige administrative strukturelle Wandlungsprozesse, Integration von Umwelt und Entwicklung, Forschung, Informationen für Entscheidungsfindung, Stärkung gesellschaftlicher Gruppen und internationale Mechanismen/Instrumente. Bei weiteren zielgruppenspezifischen Differenzierungen spricht man von Umweltindikatoren, Wirtschaftsindikatoren und Gesellschaftsindikatoren (CSD 2001). Anhand von Nachhaltigkeitsindikatoren soll die Umsetzung der Agenda 21 dokumentiert, Trends beschrieben und Informationen für Öffentlichkeit und Entscheidungsträger bereitgestellt werden (SRU 1998).

Die Notwendigkeit der Entwicklung derartiger Indikatorensysteme kann wie folgt begründet werden:

- Transformation des breiten Nachhaltigkeitsdiskurses in konkreten Handlungsbedarf und empfehlende Maßnahmen
- Fehlende Transparenz bei (Nicht-) Nachhaltiger Entwicklung, bei Nutzungs- und Handlungsfolgen
- Förderung eines partizipativen Diskurses bei Planungen von Raum- und Umweltentwicklungen
- Prioritätensetzung im Licht gesellschaftlicher Wert- und Zielsysteme
- Überwindung von technischen und akzeptorischen Defiziten bei der Handhabung von Indikatorensystemen und Auswahl problemspezifischer Indikatoren.

**Defizite** der Indikatorenforschung liegen derzeit bei der Entwicklung einer einheitlichen Systematik, einer Balance zwischen Aggregation und Aussagegehalt, Formalisierungen für spezielle Problemfälle (Dringlichkeit, Routine), Anwendungsfeldern sowie Bezügen zu weiteren (umwelt-) politischen, rechtlichen und planerischen Instrumenten (Informations-, Bewertungssysteme) und bei den vielfach (zu-) unscharfen Beziehungen zwischen Indikator und Indikandum (BARKMANN 2001, BIRKMANN et al. 1999, BBR 2000, HERZOG et al. 2001).

### 3.3.4 Folgen für den Einsatz von Statistik und Erklärungsmodellen

Ziel der Statistik ist die *zahlenmäßige* Erfassung und Verarbeitung bestimmter Sachverhalte. Sie erfasst und wertet Massenerscheinungen aus, also Vorkommnisse, die die Gesamtheit vieler Objekte beobachtbar macht. Die deskriptive Statistik beschäftigt sich damit, empirisches Material über Zufallsgrößen zu sammeln, geeignet darzustellen und zu charakterisieren. Umfangreiche Datenbestände versucht man durch wenige einfache Maßzahlen, wie Mittelwerte oder Varianz zu repräsentieren. Diese Verdichtung von Informationen ist nicht unumstritten, gehen doch stichprobenartige Aussagen mit Unsicherheiten über ihren Geltungsbereich, sprich Grundgesamtheit, einher. Die Aufgabe der analytischen (beurteilenden) Statistik besteht darin, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung aus dem statistischen Material Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zu ziehen, z.B. Schätzen von Wahrscheinlichkeiten, Testen von Hypothesen. Sie baut auf Zufallsmodellen und Zufallsgesetzen auf und versucht unter anderem, möglichst einfache und begründete statistische Modelle an die Daten anzupassen und die Güte der Anpassung zu prüfen. Im strengen Sinne entspricht die analytische Statistik der Umkehrung der Wahrscheinlichkeitstheorie, denn sie geht von den Beobachtungen aus und versucht Schlüsse auf das zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsmodell zu ziehen. Die Wahrscheinlichkeitstheorie dagegen geht von Wahrscheinlichkeitsmodellen aus und berechnet die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Beobachtungen. Verschiedene statistische Verfahren werden bei der Ermittlung von Zusammenhängen angewendet. Nachfolgend ist eine Reihe multivariater Analyseverfahren mit Anwendungsbeispielen aufgeführt (BACKHAUS et al. 1996, SACHS 1997).

VERFAHREN	ANWENDUNGSBEISPIEL
Regressionsanalyse	Abhängigkeit der Absatzmenge eines Produktes von Preis, Werbeausgaben und Einkommen (3 Variablen), Vergleich zur Sensitivitätsanalyse
Varianzanalyse	Wirkung alternativer Verpackungsgestaltungen auf die Absatzmenge des Produktes
Diskriminanzanalyse	Unterscheidung der Wähler der verschiedenen Parteien hinsichtlich soziodemographischer und psychographischer Merkmale
Kontingenzanalyse	Zusammenhang zwischen Rauchen und Lungenerkrankungen
Faktorenanalyse	Verdichtung einer Vielzahl von Eigenschaftsbeurteilungen auf zu-

	grunde liegende Beurteilungsdimensionen
Clusteranalyse	Bildung von Persönlichkeitstypen auf der Basis der psychographischen Merkmale von Personen
Multidimensionale Skalierung	Positionierung von konkurrierenden Produktmarken im Wahrnehmungsraum der Konsumenten

Tab. 9: Multivariate Analyseverfahren

Die o.g. multivariaten Analyseverfahren dienen dem Ziel der beschreibenden und analytischen Statistik, nämlich der Analyse umfangreicher Datenstrukturen unter Berücksichtigung probabilistischer Schwankungen. Alle aufgeführten Verfahren erfordern quantitative, also *numerische* Daten, um Schätzungen realistisch zu repräsentieren, Unsicherheiten zu verringern und das Unwahrscheinliche vom Wahrscheinlichen zu trennen. Beim Vorhandensein qualitativer, also sprachlicher Variablen, stoßen statistische Verfahren an ihre Grenzen. Auch ein übertriebener Quantifizierungsdrang führt nicht notwendigerweise zu besseren Ergebnissen, sondern geht einher mit Unsicherheiten vielfältiger Art. *Geschätzte* Größen werden verarbeitet und mit einer Genauigkeit von z.B. Hundertstelprozent ausgedrückt. Hierbei handelt es sich um Scheinpräzision. Gelegentlich entbehren formal richtige Zusammenhänge und Berechnungen von Mittelwerten, Median oder Signifikanz jedweder inhaltlichen, an der Realität geprüften Wahrheit. Dies verdeutlicht beispielsweise die statistische Korrelation zwischen der menschlichen Geburtenrate und der Häufigkeit von Störchen.

Wie die statistischen Aspekte zeigen, geht Unsicherheit mit Zusammenhängen von Variablen einerseits und mit Messungen und Erklärungen andererseits einher. Wissenschaftliche Erklärungen bestehen aus der Argumentation eines Sachverhaltes mit logischer Struktur, die korrekt und empirisch überprüfbar sein sollte. Das **deduktiv-nomologische Erklärungsmodell** (DN) beschreibt einen Zusammenhang von Explanans und Explanandum. Dabei steht das Explanandum für einen empirischen Sachverhalt bzw. ein singuläres zu erklärendes Ereignis und das Explanans für einen erklärenden Teil. Der Ablauf der Erklärung von Phänomenen erfolgt beim DN vom Allgemeinen zum Besonderen. Dabei ist die Beziehung zwischen Explanans und Explanandum nicht immer kausal begründbar, sondern geht einher mit einem gewissen Grad an Unsicherheit. Die Einhaltung von folgenden Bedingungen kann die Unsicherheit im deduktiv-nomologischen Erklärungsmodell verringern: das Explanandum muss logisch korrekt aus dem Explanans abgeleitet sein, das Explanans ein Gesetz enthalten und wahr sein sowie mindestens eine empirisch prüfbare Hypothese aufweisen. Ein zweites Modell für wissenschaftliche Erklärungen und Argumentationen ist das **induktiv-statistische Erklärungsmodell** (IS). Wiederum besteht dieses Denkmodell aus einem Explanans und einem Explanandum. Das Erklärungsprinzip ist gegenläufig zu dem des DN-Modells und basiert auf Einzelfalluntersuchungen, deren Ergebnisse es zu verallgemeinern gilt (BAMBERG 2000, PETERS 1998, VETTER et al. 1996).

## 4 Das Methodenpaket IeMAX: Integrated environmental Modelling and Assessment with a Fuzzy Logic Expert System

### 4.1 Ziel und Aufbau

Das Methodenpaket IeMAX (Integrated environmental Modelling and Assessment with a Fuzzy Logic Expert System) ist eine Zusammenstellung und Weiterentwicklung fachübergreifender Methoden und Techniken zur praxisnahen Lösung von Nutzungskonflikten im Rahmen einer integrativen Raumplanung.

Vor dem Hintergrund komplexer und mit Unsicherheit behafteter Bewertungs- und Entscheidungssituationen, zielt IeMAX auf eine formalisierte Bewertung und rechnergestützte Simulation von Nutzungsalternativen ab. Damit dient die Anwendung der Methoden der vorbereitenden und unterstützenden Entscheidungsfindung im Sinne von Entscheidungsunterstützungssystemen. Die Betonung liegt auf der *integrativen* Modellierung quantitativer *und* qualitativer Zusammenhänge und der fachübergreifenden Bewertung planerischen Handelns. Die Konzeption von IeMAX ist eine forschungslogische Konsequenz aus der defizitären Lage zwischen theoriegeleiteter Forschung und praktischer Anwendung. IeMAX spiegelt insoweit das Bemühen um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen:

- a) einer sachgerechten Verarbeitung von Ökosystemparametern, hoher Komplexität und Unsicherheit, und
- b) Berücksichtigung der Aussagekraft von Bewertungsergebnissen für umweltgerechtes Handeln wider.

Der Aufbau von IeMAX ist durch die drei aufeinander abgestimmten Bausteine Systemanalyse, Modellierung und Bewertung bestimmt:

- Systemanalyse: Welche Variablen charakterisieren die Struktur und Dynamik des Systemverhalten? In welchem Zusammenhang stehen sie und auf welchen Skalen können sie gemessen werden?
- Modellierung: Welche Ansätze können die Komplexität und Variabilität des Verhaltens von Systemen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten angemessen rechnergestützt formalisiert wiedergeben? Welche Parameter weisen einen Indikatorcharakter auf und sind daher für das Simulationsmodell relevant?
- Bewertung: Welche gesellschaftlichen Werte und Maßstäbe für umweltgerechtes Handeln bestehen? Wie kann heterogenes, quantitatives und qualitatives Sach- und Bewertungswissen zusammengeführt werden?

Aus diesen Fragestellungen resultiert die in der folgenden Abbildung wiedergegebene Struktur des Methodenpaketes IeMAX, das im Folgenden erläutert wird.

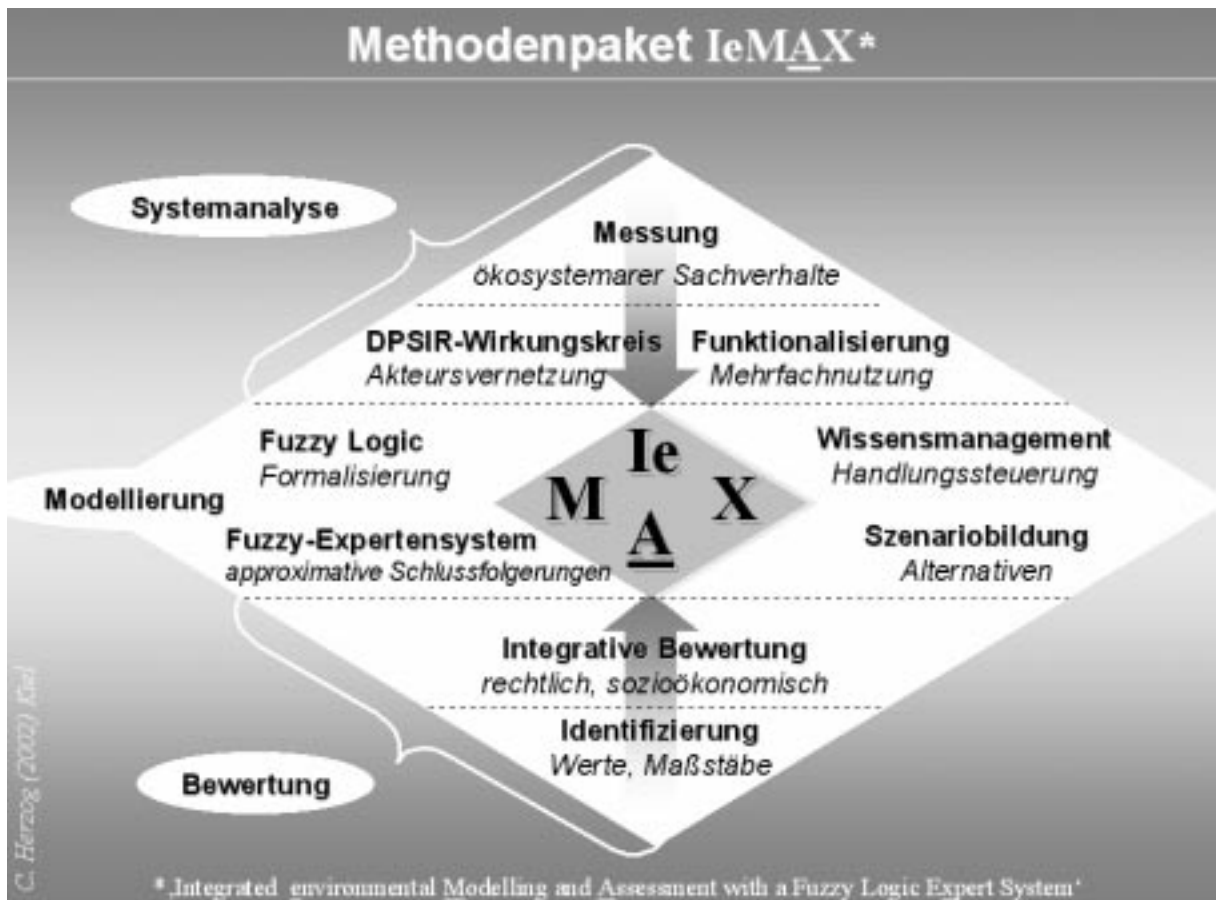


Abb. 3: Das Methodenpaket IeMAX

## 4.2 Systemanalyse und Parametrisierung

Der Baustein Systemanalyse befasst sich mit der Messbarkeit und Parametrisierung ökosystemarer Sachverhalte. Damit verbunden ist die Untersuchung der Beschaffenheit des für Bewertungen und Entscheidungsfindungen notwendigen Materials. Die Indikation von anthropogenen und ökosystemaren Wechselwirkungen wird mittels der DPSIR-Methode als vorbereitende Systematisierung für die nachfolgenden Modellierungen erörtert. Im Hinblick auf eine Zusammenführung von Methoden der Systemanalyse und Bewertung wird die so genannte Funktionalisierung ökosystemarer Sachverhalte diskutiert.

### 4.2.1 Messbarkeit und Skalenniveaus (öko-)systemarer Sachverhalte

Messungen und Beobachtungen von Ökosystemveränderungen können ein breites Spektrum an Merkmalsausprägungen auf kategorialen und metrischen Skalen einnehmen. Von einfachen ja/nein Aussagen, wie beispielsweise bei dem Vorhandensein gefährdeter Vogelarten der Roten Liste, über Unterscheidungen von Baumgrößen und –alter bis zu Stoffkonzentrationen im Wasserhaushalt von Grund- und Fließgewässern.

Die Statistik hält für diese unterschiedlichen Variablen mit mathematischer Strenge hierarchisch-geordnete Skalenniveaus bereit (BACKHAUS et al. 1996, SACHS 1997, ergänzt).

SKALENNIVEAUS UND MERKMALSAUSPRÄGUNGEN				
	Nominalskala	Ordinalskala	Intervallskala	Ratioskala
Relationen u. Operationen	= ≠ jede eindeutige Operation	= ≠ < > nur monotone, rangerhaltende Operation	= ≠ < > + - lineare Transformation	= ≠ < > + - * / Ähnlichkeitstransformation
Merkmalsausprägung [MA]	$MA_1 = MA_2$ $MA_1 \neq MA_2$	$MA_1 < MA_2$ $MA_2 < MA_1$ + Nominalskala	$MA_1 = MA_2 + a$ + Ordinalskala	$MA_1 = MA_2 * a$ + Intervallskala
Maßzahlen und Verfahren	Modus, Kontingenzmaße	Median, Rangkorrelation	arithmetisches Mittel, Varianz, t-Test, F-Test	geometrisches Mittel
Aussage	Feststellung von Identitäten Gleichheit oder Ungleichheit	Feststellung von größeren oder kleineren Werten, Ordnung: allerdings keine Differenzierung innerhalb von Klassen	Feststellung der Gleichheit von Intervallen oder Differenzen	Feststellung eines Verhältnisses zweier Werte, differenzierte Klassenbildung und Verrechnung



Interpretation	Unterscheidung von Werten, keine Rangfolge Beschreibung und Typisierung von Vor- oder Nicht-Vorhandensein und liefern Häufigkeiten als statistische Information	Unterscheidung und Rangfolge ohne Abstand, jedoch mit Richtung Realistische, dem Denken nachempfundene Skala	Unterscheidung nicht nur durch Rangfolge, sondern durch Größenunterschiede. Mit definitorisch festgelegtem Nullpunkt ist kein absolutes Ranking möglich, jedoch sind Abstände messbar	Ausprägungen nicht nur nach Größenunterschieden, sondern auch nach Größenverhältnissen der Ausprägungen abbilden. Messskala besitzt einen physikalischen absoluten Nullpunkt und erlaubt damit multiplikatives Ranking
Statistische Auswertungen	Auszählung von Häufigkeiten	U-Test, Rangkorrelation	t-Test, Korrelation, Varianzanalyse	t-Test, Korrelation, Varianzanalyse
Beispiele	Binärcode 0/1, $\in/\notin$ , ja/nein gut/schlecht	1,2,3,4 hoch, mittel, gering, Schulnoten	Celsius-Temperatur-Skala	Kelvin: $0\text{ K} = -273,13^\circ\text{C}$ , Zeit, Distanzen, Längen
Wissensmanagement	Wissen linguistisch, numerisch, symbolisch	Information, Daten, numerisch, linguistisch, symbolisch	Daten, Information numerisch	Daten numerisch
	kategorial/qualitativ		metrisch/quantitativ	

Tab. 10: Skalenniveaus und Merkmalsausprägungen

In der Reihenfolge Nominal-, Ordinal-, Intervall- und Ratioskala nimmt der Informationsgehalt und der Umfang möglicher mathematischer Operationen zu. Transformationen von Messwerten zwischen den Skalen sind nicht ohne weiteres möglich. Wenn Parameter innerhalb von Skalengrenzen transformierbar sind, werden diese durch die Reichweite ihrer Gültigkeit, die Frequenz der Änderung und ihren zeitlichen Verlauf bestimmt. Fraktale sind ein besonderes Beispiel der Skalentransformation mit Selbstähnlichkeit und quasi Skalenunabhängigkeit. In Abhängigkeit von dem Skalenniveau und der Repräsentanz können die Mess- und Simulationsergebnisse auch auf andere geographische Räume und Sachverhalte übertragen werden.

Die Messtheorie versucht Fragen zur Aussagekraft empirischer Messungen zu beantworten und Lösungen für Repräsentanz-, Eindeutigkeits- und Bedeutsamkeitsprobleme zu finden.

Ersteres fragt nach, ob es überhaupt möglich ist, zu einem gegebenen empirischen System, ein geeignetes numerisches System zu finden. Das Eindeutigkeitsproblem beschreibt, wie die Gesamtheit aller zulässigen Messungen aussieht und mit welchen Transformationen sich diese Messungen ineinander überführen lassen. Das Bedeutsamkeitsproblem hinterfragt die Verwendung der gewählten Messung und steht in engem Zusammenhang mit Diskussionen über adäquate Skalenniveaus der erhobenen Daten.

#### 4.2.2 Systemdynamik und DPSIR-Wirkungskreise

Neben der Beobachtung und Messung von Parametern sind ihr systemarer Zusammenhang und gegenseitige steuernden Einflüsse von großem Interesse. Eine Methode ist das Pressure-State-Response-Modell (PSR) der OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (1993). Die Methode ist für die Beschreibung von Mensch-Umwelt-Interaktionen konzipiert und die verwendeten Parameter besitzen Indikatorcharakter. Der Zustand der Umwelt (state) steht dabei im Mittelpunkt. Anthropogene Eingriffe werden als Druck und Belastung (pressure) aufgefasst und vom ökologischen System in unterschiedlicher Weise reflektiert (response). Im Detail unterscheidet das Konzept drei Indikatoren:

- Belastungsindikator (pressure-indicator): Hierbei handelt es sich um Indikatoren, die die Belastungen der Umwelt durch menschliche Aktivitäten anzeigen, z.B. Raumnutzung, Entnahme von Ressourcen, Abgabe von Abfällen oder Emissionen.
- Umweltzustandsindikatoren (state-indicator): Diese Indikatoren beschreiben die Umweltqualität.
- Reaktions- oder Handlungsindikatoren (response-indicator): Hierbei handelt es sich um Indikatoren zur Beschreibung gesellschaftlicher Reaktionen.

Das OECD-Konzept orientiert sich dabei nicht mehr an den klassischen Umweltbereichen: Boden, Wasser und Luft, sondern betrachtet Mensch-Umwelt-Systeme. Weniger das Detailwissen, als vielmehr die Nützlichkeit des entwickelten PSR-Schemas für den Anwender stehen im Vordergrund. Neben der Nützlichkeit sind z.B. die politische Relevanz, Messbarkeit und wissenschaftliche Fundiertheit Auswahlkriterien für Indikatoren. Die europäische Umweltagentur hat das PSR-Schema aufgegriffen und um zwei Statusgruppen zum **Driving forces-Pressure-State-Impact-Response** (DPSIR) Schema erweitert (EEA 1999). Neben Umweltindikatoren bezieht es gleichfalls ökonomische und soziale Indikatoren mit ein. Die Indikatoren besitzen dynamische Eigenschaften zur Abbildung zyklischer Systemzusammenhänge. Im Vergleich zum PSR-Schema ergänzt das DPSIR-Schema den Terminus *pressure* um das Begriffspaar *driving forces*. Die DPSIR-Methode beschreibt damit, im Gegensatz zum PSR-Schema, Sach- und Wertebene differenzierter und gleichfalls systemdynamische Wirkungskreise von Mensch-Umwelt-Interaktionen umfassender. Die fünf Statusgruppen stehen einander in Relation, ohne jedoch zwingend streng kausal aufeinander zu wirken. *Driving force* steht dabei für die treibenden Kräfte, wie gesellschaftliche Visionen sowie Wert- und

Zielsysteme. *Pressure* beschreibt die von den Driving forces ausgehenden Aktivitäten und möglichen Belastungen auf ökologische Systeme. *State* bezeichnet den Zustand im Sinne der Umweltqualität in einem bestimmten Landschaftsausschnitt und zu einem bestimmten Zeitpunkt. Aus den Zuständen folgen als *Impact* erste Rückkopplungen. *Response* schließlich deutet Verhaltensänderungen der Driving forces Parameter an und erörtert u.a. Maßnahmen und rechtliche Bestimmungen.

### 4.2.3 Funktionalisierung ökologischer Sachverhalte

Ökosysteme lassen sich anhand von Struktur und Dynamik charakterisieren. Die Struktur von Ökosystemen beschreibt den Aufbau, die Dynamik das Verhalten von Ökosystemen. Im Vordergrund von strukturellen Systemanalysen stehen u. a. Standortfaktoren, die Anzahl von Teilsystemen (Partialkomplexe), Organisations- und Hierarchieebenen oder Interaktionen zwischen Biotop und Biozönose (FINKE 1994). Der Biotop ist der Lebensraum einer Biozönose, der durch eine spezielle Kombination von abiotischen Umwelt-/Standortfaktoren geprägt ist und sich dadurch von benachbarten Lebensräumen abhebt. Zu den Faktoren zählen Relief, Klima, Topographie und ferner Böden und Gewässer. Diese Faktoren beteiligen sich an ökologischen Prozessen mit ihren Eigenschaften, Energie und Stoffe zu transportieren, zu puffern und zu speichern (BLUME 1992, FRÄNZLE et al. 1993). Die Biozönose setzt sich aus Primärproduzenten, Konsumenten und Destruenten zusammen. Primärproduzenten (=Aufbauende) sind die Lebewesen, die aus anorganischen Substanzen mit Hilfe von Sonnenenergie Biomasse aufbauen. Hierbei handelt es sich vorwiegend um grüne Pflanzen, die beim Prozess der Photosynthese zusätzlich Sauerstoff produzieren. In der Nahrungskette folgen die Konsumenten (=Verzehrende) und die Destruenten (=Abbauende).

Das Verhalten von Ökosystemen kann durch die Dynamik und Beziehung von Stoff- und Energieflüssen oder von Populationen („Räuber-Beute-Systeme“) als Veränderungen in Raum und Zeit erfasst werden. Zu den fließenden oder zirkulierenden Stoffen in Ökosystemen zählen: Wasser, Sauerstoff, Kohlenstoff und Nährstoffe, die auf diese Weise Biotop und Biozönose verbinden (FINKE 1994, HABER 1993). Im Rahmen der Bewertung von anthropogenen Aktivitäten in Bezug zu ökologischen Eigenschaften kommt ergänzend dem Begriff ‚**Funktion**‘ eine wesentliche Bedeutung zu. Der allgemeine Funktionsbegriff wird umschrieben mit Tätigkeit, Amt, Wirken, oder Zweck. In der Mathematik ist Funktion eine Zuordnungsvorschrift. Die Auffassung von Funktionen ökologischer Systeme oder einzelner Kompartimente ist stark geprägt von disziplinären Blickwinkeln (JAX 2000a, ergänzt):

**1. Funktionsbegriff bei Individuen und Arten:** Individuen und Arten werden aufgrund interaktionsrelevanter Eigenschaften zu Gruppen, wie beispielsweise Produzenten, Konsumenten und Destruenten zusammengefasst. Diese Funktionsauffassung ist im Naturschutzmilieu üblich. Dabei wird Funktion als *Rolle* innerhalb von Prozessen eines Gesamtsystems verstanden.

**2. Funktionsbegriff im ganzen System:** Aus dem Blickwinkel komplexerer, ökologischer und Mensch-Umwelt-Systeme wird dem Funktionsbegriff eine Wertbestimmung beigelegt. Dies birgt die Gefahr anzunehmen, ökologische Systeme besäßen inhärente Ziele (JAX 2000a). Daher sei an dieser Stelle betont, dass das jeweilige Referenzsystem zur Funktionalitätsbetrachtung stets vom Betrachter im Sinne einer Fragestellung bzw. eines Nutzungsinteresses gesehen wird. Bei Bewertungssystemen bedeutet dies die Unterscheidung zwischen wertfreier Sachebene und normativer Wert- und Zielebene. Problematisch sind die Ansichten, dass Referenzzustände von der Natur vorgegeben sind, denn von einem Sein auf das Sollen zu schließen bedeutet einen ‚naturalistischen Fehlschluss‘ zu begehen. Funktionen basieren auf objektiv messbaren Strukturen von Systemen, die vom Beobachter fragestellungsabhängig und nahezu beliebig definierbar sind. Wird von Funktionen innerhalb eines Ganzen gesprochen, so sollte das jeweilige System abgegrenzt und definiert werden. Darin lassen sich dann Funktionen oder *Rollen* identifizieren, die typisch oder auch unentbehrlich für das System sind. Einen starken Einfluss auf die Interpretation von Funktionen ökologischer Systeme besitzt daher stets das Bezugssystem des Betrachters und der Kontext der Fragestellung.

**3. Funktionsbegriff und anthropozentrisches Ökosystemverständnis:** Mit der ausdrücklichen Hinzunahme des Menschen erfährt der Funktionsbegriff einen eindeutig anthropozentrischen Schwerpunkt. Demnach werden Funktionen ökologischer Systeme an ihrem Nutzen zur Erfüllung menschlicher Bedürfnisse gemessen. Dieser utilitaristische Gedanke versteht natürliche Lebensgrundlagen als Ökosystem-Güter und –Dienstleistungen (BIRNBACHER 1998), deren Nutzung hinsichtlich Nutzungsgrad und –intensität unterschieden werden kann. Der Nutzungsgrad beschreibt beispielsweise bei der Wasserversorgung das Verhältnis der genutzten Wassermenge zum natürlichen oder anthropogen begrenzten Wasserdargebot, ist also ein Relativwert zum Maximum des Dargebotes bzw. der Funktionsleistung ökologischer Systeme. Die Nutzungsintensität ist ein allgemeiner Ausdruck für das Maß einer ökonomischen Nutzung bzw. Ausnutzung eines Raumes. In der Landwirtschaft gilt die betriebene Landnutzung als Maß für die Summe der zur Förderung der Ertragsleistungen eingesetzten Aufwendungen.

Analog zur bipolaren Begriffsbeziehung des Erklärungsmodells Explanans/Explanandum und dem Nachweiskonstrukt Indikator und Indikandum, existieren **Funktionen** nur mit **Funktionssträgern** (HERZOG 2001a). Als Beispiel für die Kontextabhängigkeit und die notwendige Interdependenz von Funktion und Funktionsträger sei auf den Bereich der Abfallentsorgung und –wiederverwertung hingewiesen. Recycling (Rezyklierung) dient in der Technik der Wiederverwendung von Abfällen, Nebenprodukten oder verbrauchten Endprodukten (Funktionsträger) der Konsumgüter-Industrie als sekundäre Rohstoffquelle für die Herstellung neuer Produkte. Mit einer Änderung der Funktionszuweisung wird aus Abfall, ein werttragender Rohstoff.

In den vergangenen Jahren gab es einen Trend zu immer mehr funktionsbezogenen Betrachtungen ökologischer Systeme. Zu den bekannteren Konzepten zählt das von de GROOT (1992), das kombinierte Funktions- und Potentialkonzept nach MARKS et al. (1992), ferner das von

BASTIAN & SCHREIBER (1999). FRÄNZLE et al. (1993), HABER (1993, 1979) und SCHROEDER (1992) beschreiben Funktionen ökologischer Systeme, insbesondere der Partialkomplexe Böden und Gewässer. De GROOT (1992) unterteilt ökologische Systeme in vier Hauptgruppen von Funktionen. Ihre Bezeichnungen beschreiben die Wesenszüge der Gruppen: die (1) stärker ökologisch-natürliche Regulationsfunktion, die (2) utilitaristische Produktionsfunktion, die (3) stark anthropozentrische Bereitstellungsfunktion und die (4) Informations- bzw. Archivfunktion.

<b>FUNKTIONEN DER NATÜRLICHEN UMWELT NACH DE GROOT (1992)</b>	
<b>REGULATIONSfunktionen (inkl. Speicherung, Transformation)</b>	<b>BEREITSTELLUNGSfunktion</b>
1.1 Regulation von Energiebilanzen	3.1 Wohnung und Siedlung
1.2 R. der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre	3.2 Kultivierung, Land- und Forstwirtschaft
1.3 R. der chemischen Zusammensetzung der Ozeane	3.3 Energiebereitstellung und -speicherung
1.4 R. des lokalen und globalen Klimas	3.4 Erholung und Tourismus
1.5 R. von Abflussregime und Hochwasserschutz	3.5 Naturschutz
1.6 R. der Wasserspeicherung im Grund- u. Oberflächenwasser	
1.7 R. von Runoff-Ereignissen, Erosion und Sedimenttransport	
1.8 R. der Bodenbildung und Bodenfruchtbarkeit	
1.9 Fixierung der Sonnenstrahlung und Biomasseproduktion	
1.10 Speicherung und Rezyklierung organischer Substanz	
1.11 S. und Rezyklierung von Nährstoffen	
1.12 S. und Rezyklierung menschlicher Abfälle	
1.13 R. biologischer Kontrollmechanismen	
1.14 Bildung v. Habitaten f. migrierende u. heranwachsende Organismen	
1.16 Erhaltung der Biodiversität	
<b>PRODUKTIONSfunktion</b>	<b>INFORMATIONSFunktion</b>
2.1 Sauerstoff	4.1 Historische Information
2.2 Wasser	4.2 Ästhetische Information
2.3 Nahrung	4.3 Kulturelle Information
2.4 Genetische Ressourcen	4.4 Wissenschaftliche und pädagogische Information
2.5 Medizinische Ressourcen	4.5 Spirituelle und religiöse Information
2.6 Rohstoffe für Haushalt und Kleidung	
2.7 Rohstoffe für Industrie und Gewerbe	
2.8 Biologische Chemikalien	
2.9 Treibstoff und Energie	
2.10 Futter und Dünger	
2.11 Schmuckwaren	

Tab. 11: Funktionen der natürlichen Umwelt

Im semantischen Umfeld von Funktionen ökologischer Systeme liegen die Termini Leistungsfähigkeit des Landschaftshaushaltes und Naturraumpotential (MARKS et al. 1999, BASTIAN & SCHREIBER 1999). Die **Leistungsfähigkeit des Landschaftshaushaltes** beschreibt das aus

räumlich-materiellen Strukturen, Funktionen und Dynamiken sowie aus den Substanzen, Energien und Prozessen von Ökosystemen resultierende Vermögen zur Erbringung ökologischer Leistungen. MARKS et al. (1992) klassifizieren landschaftliche Funktionen und Potentialarten in ebenfalls vier Funktionen:

1. Ausgleichsfunktion: Ausgleichswirkung in benachbarten/entfernten Systemen
2. Ersatzfunktion (Substitution): Ersatz der Funktion einer benachbarten Raumeinheit
3. Entwicklungsfunktion: Regenerations- bzw. Steigerungsfähigkeit verschiedener Funktionen
4. Schutzfunktion: Verminderung/Verhinderung von Belastungseinwirkungen

Zentraler Kern des Konzeptes ist die Leistungsfähigkeit des Landschaftshaushaltes als Ausgangspunkt jedweder Funktions- bzw. Potentialbestimmung. Ihr Konzept unterscheidet zwischen detaillierten Funktionen und abstrakteren Potentialen (MARKS et al. 1992).

<b>FUNKTION UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT DES LANDSCHAFTSHAUSHALTES</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filter-, Puffer- und Transformatorfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, den Untergrund vor dem Eindringen unerwünschter Stoffe zu schützen oder diese Stoffe abzubauen</li> <li>• Grundwasserneubildungsfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, Grundwasservorkommen zu regenerieren</li> <li>• Grundwasserschutzfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, Grundwasserlagerstätten vor dem Eindringen unerwünschter Stoffe zu schützen</li> <li>• Abflussregulationsfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, Oberflächenwasser zurückzuhalten und den Direktabfluss zu verringern</li> <li>• Erosionswiderstandsfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, eine über das natürliche Maß hinausgehende Bodenabtragung zu verhindern</li> <li>• Immissionsschutzfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, gas- und staubförmige Verunreinigungen der Luft sowie unerwünschte Schallausbreitung zu vermindern/abzubauen</li> <li>• Klimameliorations- und bioklimatische Funktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, eine wirksame Verbesserung von anthropogen hervorgerufenen klimatischen Zuständen und Prozessen zu erreichen</li> <li>• Ökotoptbildungs- und Naturschutzfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, den Lebensgemeinschaften Lebensstätten zu bieten und die Lebensprozesse positiv zu steuern, aufrechtzuerhalten und ggf. wiederherzustellen</li> <li>• Erholungsfunktion: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, beim Menschen eine körperliche und seelische Regeneration hervorzurufen, und den Menschen durch ein ansprechendes Landschaftsbild positiv zu stimulieren</li> </ul>
<b>POTENTIALE</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserdargebotspotential: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, nutzbare Grund- und Oberflächenwasser bereitzuhalten</li> <li>• Biotisches Ertragspotential: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, verwertbare Biomasse zu erzeugen und die Wiederholbarkeit dieses Vorgangs zu gewährleisten</li> <li>• Landeskundliches Potential: Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes, schutzwürdige Objekte bereitzustellen</li> </ul>

Tab. 12: Funktion und Leistungsfähigkeit des Landschaftshaushaltes

Bei den in der obigen Tabelle skizzierten Funktionen und Leistungsfähigkeiten des Landschaftshaushaltes schließt sich die Frage der exakten Definition und entsprechende Beobachtbarkeit und vor allem Messbarkeit spezifischer Parameter an. Funktionen von Böden als Teile von Ökosystemen zur Bewertung ihrer Belastung und Belastbarkeit definieren FRÄNZLE et al. (1993). Zu den ökologischen Funktionen zählen die Regulations-, Lebensraum- und Produktionsfunktionen, wobei die Produktionsfunktion bereits ein anthropogenes Nutzungsziel vermuten lässt (z.B. Land-, Forstwirtschaft). Böden weisen weiterhin anthropozentrische Funktionen auf: Rohstofflieferant, Standort im Sinne der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung sowie der Erholung, Abfalldeponie oder landschaftsgeschichtliche ‚Urkunde‘.

Zu ähnlichen funktionsräumlichen Betrachtungsweisen von Ökosystemen gelangen **BASTIAN & SCHREIBER** (1999) mit ihrer Differenzierung in Regulations-, Produktions- und Lebensraumfunktion.

REGULATIONSFUNKTIONEN	PRODUKTIONSFUNKTIONEN	LEBENSRAUMFUNKTIONEN
Schwerpunkt Ökologie	Schwerpunkte Ökonomie	Schwerpunkte Soziologie
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulation von Stoff- und Energiekreisläufen</li> <li>• Hydrologische Funktionen, z.B. Grundwasserneubildung</li> <li>• Meteorologische Funktionen</li> <li>• Regulation und Regeneration von Populationen und Biozönosen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfügbarkeit erneuerbarer Ressourcen</li> <li>• Wasser, Oberflächenwasser, Grundwasser</li> <li>• Boden Ressource, Wasser/Winderosion</li> <li>• Biomasse: Pflanzliche Biomasse, wie Ackerbau, Dauergrünland, Sonderkulturen, Holz, tierische Biomasse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erholungsfunktion (als Komplex psychologischer und humanökologischer Funktionen)</li> <li>• Informationsfunktion: Archiv für Wissenschaft und Bildung, zudem Bioindikator von Umweltzuständen</li> <li>• Bioklimatische Wirkungen</li> </ul>

Tab. 13: Funktionsräumliche Betrachtungsweise von Landschaften

Auch **HABER** (1993, 1979) kommt zu einer vierteiligen Gliederung von Leistungen ökologischer Systeme: a) Regelungsleistungen (z.B. Stabilität, Filterfunktion, Adsorption), b) Trägerleistungen (z.B. Infrastruktur), c) Informationsleistung (z.B. Identifikation von Umweltverschmutzung, Belastungen) und d) Produktionsleistungen (z.B. Produkte und Güter aus Rohstoffen). **SCHROEDER** (1992) definiert sechs Funktionen von Böden. Zu den ökologischen Funktionen zählen die Filter-, Puffer- und Transformationsfunktion, die land- und forstwirtschaftliche Produktionsfunktion und die Genschutz- und Genreservfunktion. Die drei technisch-industriellen, sozioökonomischen und kulturellen Funktionen sind die Infrastruktur-, Rohstoff- und Kulturfunktion. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 1997) gliedert Funktionen von Gewässern und Böden in fünf Klassen: a) Regelungsfunktion: Landschaftswasserhaushalt, Abfluss, Verdunstung, Stofftransport; b) Produktionsfunktion: Biomasse, Fische; c) Lebensraumfunktionen: Flora, Fauna, d) Rohstofffunktion: Brauchwasser, Uferfiltrat (Trinkwasser); e) Kulturfunktion: Erholung.

#### 4.2.4 Materialspektrum: Daten, Information, Wissen

Entscheidungen werden anhand von Fakten über den zu entscheiden Sachverhalt getroffen. Doch welche Beschaffenheit besitzen diese Fakten? Das Spektrum unterschiedlicher Informationsgrundlagen reicht von quantitativen Daten bis zu qualitativem Wissen. Erstere stammen vornehmlich aus den Natur- und Wirtschaftswissenschaften und letztere aus den Rechts- und Sozialwissenschaften. Für eine räumliche Orientierung sind topographische Angaben geeignet. Sie können in einem GIS gespeichert und verarbeitet werden. Zu den wesentlichen Angaben zählen z.B. Landesgrenzen, Fließgewässereinzugsgebiete, Naturräume, Wasserschutzgebiete, Straßennetze oder aber auch Karten der Bodenschätzung und Flächennutzungspläne. Als weitere Quelle für quantitative Angaben mit Raumbezug können Erhebungen aus Messnetzen oder Katastern herangezogen werden (z.B. Depositionsmessnetz, Schwermetallkataster). Amtliche digitale Kartenwerke der Landesvermessungsämter, wie z.B. das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS), sind als Basisdaten sehr gut geeignet (HERZOG 1998). Für Systemanalysen ökologischer Sachebenen werden als Informationspools die Umweltprobenbank des Bundes, digitale Umweltbeobachtungen, existierende Modellsysteme oder auch Umweltinformationssysteme (UIS) des Bundes und der Länder sowie analoge Karten von z.B. naturräumlichen Gliederungen, angesehen (FRÄNZLE & FRÄNZLE 1993, ZÖLITZ-MÖLLER & NACHBAR 1996). Die UIS der einzelnen Bundesländer existieren in unterschiedlich weit entwickelter Form. Sie speichern Daten und Angaben zum Zustand und Eigenschaften von Ökosystemen, z.B. Grundwasserstand, Biotopkartierung, Fauna, Landschaftsbild, Relief und Böden. Darüber hinaus geben diese Datenbestände Auskunft über vorhandene Schutzprogramme, wie z.B. Moor-, Fließgewässer- oder Bodenschutzprogramme. Für Sachinformationen mit langen Zeitreihen sind Statistiken eine Wahl. Dazu zählen Agrar-, Gemeindestatistiken, Verkehrsdaten oder Klimakenndaten (FRÄNZLE et al. 1992). Basisdaten zur gesellschaftlichen Entwicklung Deutschlands sind beim Statistischen Bundesamt Deutschland (URL <http://www.destatis.de>) oder den statistischen Landesämtern der Bundesländer erhältlich. Zu den Daten zählen Angaben zur Geographie, Bevölkerung, volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei wie auch zur umweltökonomischen Gesamtrechnung oder dem Verkehr.

Fakten zu Wertebenen und Bewertungsmaßstäben der Gesellschaft sind ursprünglich quantitativ, werden jedoch gerade bei rechtlichen Interpretationen qualitativ ausgelegt. Quantitative Bewertungsmaßstäbe sind ein Bestandteil der vom Umweltbundesamt geschaffenen Pyramiden von Zustand und Qualität der Umwelt (Kap. 4.4). An ihrer Spitze steht das allgemein formulierte Leitbild, das sich in Leitlinien aufgliedert und anschließend in Umweltqualitätszielen (UQZ) und -standards (UQS) konkretisiert. UQZ sind abgeleitete Aussagen und geben bestimmte, sachlich, räumlich und zeitlich definierte Qualitäten von Schutzgütern (Ressourcen, Potentialen oder Funktionen) an, die in konkreten Situationen erhalten oder entwickelt werden sollen. UQS sind konkrete Bewertungsmaßstäbe, die Umweltqualitätsziele oder unbe-



stimmte Rechtsbegriffe operationalisieren, indem sie für einen bestimmten Parameter oder Indikator die angestrebte Ausprägung, das Messverfahren und die Rahmenbedingungen festlegen. Sie können metrisch (z.B. Grenzwert für SO<sub>2</sub>), ordinal (z.B. Gefährdung nach den Roten Listen) oder nominal (z.B. schutzwürdige Biotope nach § 20c BNatSchG) skaliert sein. Ihre rechtliche Bindung ist definiert als Grenz-, Richt- oder Orientierungswert. Grenzwerte gelten dabei als verbindlich festgelegte Standards eines Gesetzes, einer Verordnung oder einer Verwaltungsvorschrift, der bei über- bzw. unterschreiten ein Verschlechterungsverbot markiert. Richtwert und Orientierungswert werden von Fachleuten vorgeschlagen und besitzen geringere rechtliche Verbindlichkeit. Zu den rechtlichen Informationsgrundlagen für das exemplarische Konflikttripel können vornehmlich folgende Gesetzesstellen mit Bewertungszusammenhang herangezogen werden (Kap. 5).

- Landwirtschaft: Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) §§ 1, 2, 4, 17; § 324 a Strafgesetzbuch für Bodenschutzzwecke; Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)(§§ 1, 2, 8)
- Siedlung-/Verkehrsentwicklung: BNatSchG § 12; BBodSchG § 5; Baugesetzbuch (BauGB) § 1a, § 179
- Wasserwirtschaft: Wasserhaushaltsgesetz (WHG) §§ 1, 3, 19, 22

Dort wo keine quantitativen Daten vorhanden sind, oder ihre Erhebung aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich ist, bleibt die Wahl qualitatives Wissen mittels so genannter wissensbasierter Modellierung ins Bewertungs- und Entscheidungskalkül einzubeziehen. Diese komplementäre Herangehensweise wurde bei der Entwicklung des Methodenpaketes IeMAX berücksichtigt und im so genannten Wissensmanagement weiterentwickelt.

**Wissen** zählt in den Industrienationen neben den klassischen Produktionsfaktoren Boden, Arbeit und Kapital verstärkt zum Erfolgsfaktor von Wirtschaft und Verwaltung. Dabei ist Wissen neben Kapital der Produktionsfaktor, der sich durch Verwendung vermehrt und in lernenden Organisationen durch geschicktes Management zur Schaffung von Wettbewerbsvorteilen genutzt wird. Ein gravierender Wandel im Bewusstsein von Arbeit, Beruf und Bildung durchzieht die Gesellschaft in heutiger Zeit. Wie die nachfolgende Tabelle belegt, waren vor einem Jahrhundert ein Großteil der Beschäftigten im Primärsektor (Agrargesellschaft) tätig. Ihr Anteil schmolz zu Gunsten des Sekundärsektors (Industriegesellschaft) und des Tertiärsektors (Informations-/Dienstleistungsgesellschaft). Noch schnelleres Wachstum, bei verringerter Halbwertszeit von Wissen, prägt den so genannten Quartärsektor (Wissensgesellschaft) als Haupterwerbsquelle der Gesellschaft. Die prozentualen Angaben zu den Beschäftigten und der Wertschöpfung werden von unterschiedlichen Autoren mit unterschiedlichen Jahresangaben belegt. Dementsprechend kann aus der nachfolgenden Tabelle lediglich ein allgemeiner Trend abgelesen werden (e=erwartet)(DELLA SCHIAVA & REES 1999, KOOPMANN 2001, STEWART 1998).

JAHR/GESELLSCHAFTSFORM	PRODUKTION	PERSONAL- WESEN	LEITUNG u. VERWALTUNG	TECHNIK, F&E
~ 2020 Wissensgesellschaft	e21,2	e13,3	e46,4	e19,1
~ 1980 Informationsgesellschaft	34,2	13,3	36,2	16,3
~ 1940 Industriegesellschaft	57,2	11,7	23,6	7,5
~ 1880 Agrargesellschaft	73,4 (45)	9,0	13,3 (20)	4,3

Tab. 14: Gesellschaft und Arbeit im Wandel

In den vergangenen Jahren zeichnet sich ein Wandel von der klassischen Datenverarbeitung zum innovativen Wissensmanagement ab (BÜRGEL 1998, DELLA SCHIAVA & REES 1999). Nicht mehr das schlichte Sammeln und Speichern von Fakten steht im Vordergrund, sondern eine frühzeitige Auswahl von Systemgrößen unter Berücksichtigung ihres Aussagegehaltes wird verstärkt verfolgt. Dazu zählt insbesondere die Repräsentation von Problemlösungswissen mittels Werkzeugen der Künstlichen Intelligenz (HERZOG 2001b). Eine Unterscheidung zwischen Daten und Wissen ist somit sowohl bei den jeweiligen Messungen bzw. Beobachtungen, Akquisitionen und rechnergestützten Repräsentationen notwendig, als auch bei ihrer Verarbeitung und Anwendung hinsichtlich ihres Aussagegehaltes. Weit verbreitet ist die Auffassung, Wissen sei ein an eine Person gebundener, geistiger Zustand, der sich bestimmter Denkobjekte bewusst ist (STAHLKNECHT & HASENKAMP 1999). Die nachfolgende Tabelle beschreibt die Begriffe Wissen, Information, Daten und Zeichen.

DEFINITIONEN VON WISSEN, INFORMATION, DATEN UND ZEICHEN		
<b>WISSEN</b>		
Wissen bezeichnet alle kumulierten, abgesicherten Informationen, die durch Intelligenz, Erfahrung und Lernen erworben wurden. Das kann u.a. durch empirische Überprüfung von Hypothesen, oder wissenschaftlichen Konsens geschehen. Wissen intendiert stets eine bestimmte Zielanwendung (Kontextabhängigkeit). Aus Informationen wird Wissen mit Wert und bildet so eine Basis für zukünftiges Denken, Bewerten, Entscheiden und Handeln.		
<b>ZEICHEN</b>	<b>DATEN</b>	<b>INFORMATION</b>
Jede wahrnehmbare Gegebenheit, die mit einem bestimmten, vereinbarten Bedeutungs- bzw. Informationsinhalt als Signal oder Symbol auftritt.	Allgemeine Bezeichnung für Zahlenwerte der Merkmalsgrößen von physikalisch-technischen Objekten, Ereignissen, Prozessen und Abläufen.	Bezeichnung für Daten, wenn diese eine logisch in sich geschlossene und geordnete Einheit bilden.

Tab. 15: Definitionen von Wissen, Information, Daten und Zeichen

Wie die obige Tabelle zeigt, unterscheiden sich Wissen, Information, Daten und Zeichen, z.B. durch ihre Allgemeingültigkeit im Fall von Zeichen und Daten und ihre stärkere Kontextabhängigkeit im Fall von Informationen und Wissen. Die nachfolgende Abbildung skizziert Ei-

genschaften und Zusammenhänge diesen Materials und entsprechende Verarbeitungsschritte (GAUSEMEIER & FINK 1999, STAHLKNECHT & HASENKAMP 1998).

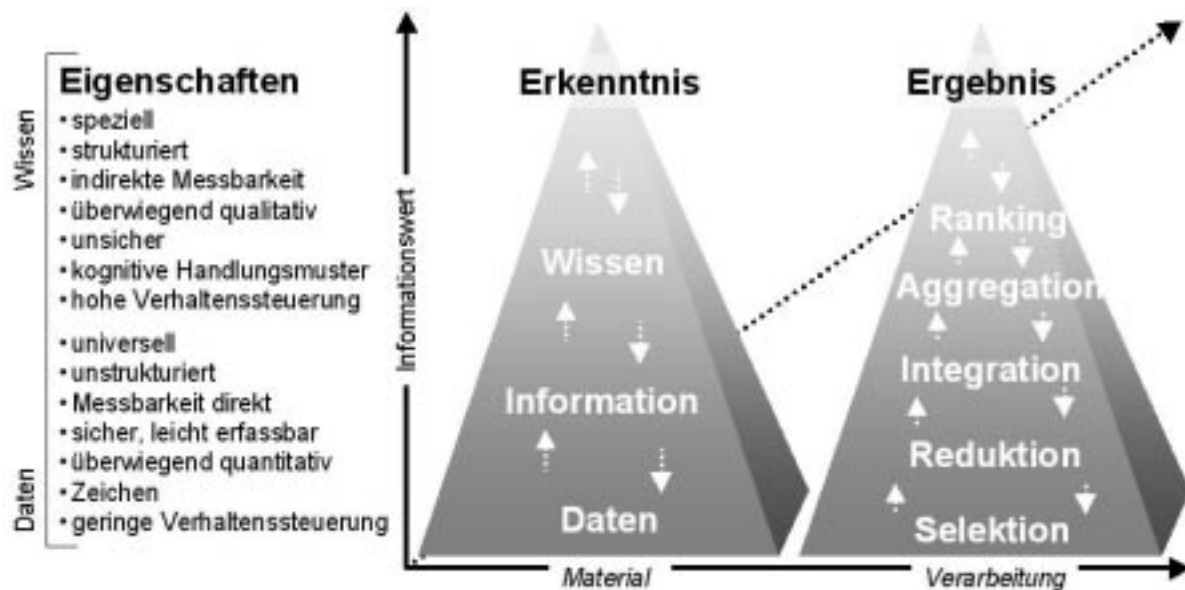


Abb. 4: Eigenschaften und Zusammenhänge von Daten, Wissen und Verarbeitungsschritten

Das Spektrum von **Wissensformen** entfaltet sich zwischen den zwei Polen von Sachwissen und Handlungswissen. Sachwissen (kennen: Know that) besteht aus Kenntnissen über Sachverhalte, ist statischer Natur und lässt sich zum großen Teil verbalisieren. Daher bildet es die Grundlage der Wissensweitergabe zwischen Menschen, aber auch von Menschen an Maschinen (E- und M-Commerce). Synonyme aus der (Wirtschafts-)Informatik sind: *explizites* oder *deklaratives* Wissen. Handlungswissen (können: Know how) umfasst Fertigkeiten und Fähigkeiten und wird häufig in Verbindung mit dem Begriff Problemlösungswissen gebracht. Diese Art von Wissen ist nicht direkt mittels technischer Geräte messbar, sondern kann über das Verhalten von Systemen, d.h. seiner Prozesse oder der Beobachtung anthropogener Handlungen (z.B. Umfragen) explizit gemacht werden. Handlungswissen wird durch das Ausführen von Tätigkeiten erworben und steht damit direkt in Verbindung zum Merkmal Handlungsbezogenheit (Problemlösungswissen). Synonyme aus der (Wirtschafts-) Informatik sind: *implizites* oder *prozedurales* Wissen. Im Gegensatz zu Daten oder Sachwissen, besitzt Handlungswissen eine komplexere Struktur und ist lediglich mit großem Aufwand rechnergestützt zu repräsentieren.

Ein kleines **Beispiel** zur landwirtschaftlichen Ökosystemnutzung soll die Gegensätze verdeutlichen. Die Korngrößenverteilung lässt sich mittels Sieb- und Pipettanalysen messen. Welche Konsequenzen resultieren aus diesen Daten für die Möglichkeit eines profitablen Ackerbaus, welche Gefahren gehen davon für die Qualität des Grundwasser aus? In diesem Beispiel beschreibt Sachwissen die standörtlichen Gegebenheiten in statischer Weise. Handlungswissen würde z.B. in so genannten ‚Wenn-Dann-Regeln‘, die Auswirkungen einer starken Düngung für eine intensive ackerbauliche Nutzung repräsentieren und im Sinne von Pro-

blemlösungswissen Vorkehrungen zum Schutz des Grundwassers beschreiben. Eine Transformation von Daten zu Handlungen bedingt die Hinzunahme von prozeduralem Wissen und drückt sich in den Verarbeitungsschritten: Integration und Aggregation aus.

Neben den genannten Wissensformen wird in Organisationen und Unternehmen häufig von Meta-Wissen, bzw. Meta-Informationen gesprochen, was lediglich Auskunft über die Existenz detaillierteren Wissens gibt und damit als Navigator dient und den Gebrauch von Wissen steuert und gliedert. Nachfolgend sind einige Wissensformen aufgeführt, die das Spektrum seiner Quellen und Anwendungen grob umreißen: Expertenwissen, Führungswissen, Produktwissen, Milieuwissen und gesellschaftliches Wissen (BÜRCEL 1998, DELLA SCHIAVA & REES 1999, MAG 1977). Expertenwissen umfasst das Wissen über relevante Eigenschaften von technischen, natürlichen oder Mischsystemen. Die Auswahl und Bereitstellung von Expertenwissen ist meist spezialisiert, d.h. bestimmten Abteilungen, Stellen oder auch externen Beratern vorbehalten. Dieses Wissen ist notwendigerweise explizit und beinhaltet Informationen darüber, wie z.B. betriebswirtschaftliche Elemente in Organisationen anders als bisher gestaltet werden können. Führungswissen bezieht sich auf die realen hierarchischen Strukturen von Verwaltung und Organisation sowie die tatsächliche Koordination der Arbeitsteilung, die organisationsspezifischen Standards von Autorität und Disziplin und auf die Motivationsmöglichkeiten von Mitarbeitern. Als Meta-Wissen leitet es mittelbar das Handeln und bestimmt, wie mit dem Experten- und Produktwissen in der Organisation verfahren wird. Führungswissen ist selten explizites Wissen. Produktwissen ist expliziter Natur und bezieht sich auf Produkte, Verfahren und die bedienten Märkte eines Unternehmens. Inhaltlich ist es von der Fragestellung bestimmt, zu welcher Problemlösung ein Produkt in welcher Form beiträgt, welche Technik im Sinne einer möglichst fehlerfreien und kostenschonenden Produktion geeignet ist. Es beinhaltet weiterhin, in welcher Reihenfolge die Produktionsschritte ablaufen müssen, um eine ausreichende Standardisierung, unter Beibehaltung von Variationsmöglichkeiten, zu gewährleisten. Schließlich wird zum Produktwissen auch die unternehmerische Fähigkeit gezählt, einschätzen zu können, zu welchem Zeitpunkt der Beitrag eines Produktes zu einer Problemlösung nicht mehr ausreichend und der Produktabsatz damit nicht mehr gewährleistet ist. Produktwissen stammt in einer Organisation aus unterschiedlichen Quellen: von Mitarbeitern mit unterschiedlichsten Berufen, Funktionen und Aufgaben, von Kunden, Beratern und Partnern. Gesellschaftliches Wissen (=Alltagswissen) wirkt als permanente Rahmenbedingung aller Wahrnehmungen und Interpretationen beim Wissensmanagement und der Entwicklung intelligenter Systeme mit. Entsprechend wirkt das gesellschaftliche Wissen wie selbstverständlich und kaum einmal wird erkannt, wie es Entscheidungsprozesse beeinflusst.

### 4.3 Modellierung und Simulation

Im Zentrum systemwissenschaftlicher Methoden steht die bereits erläuterte Systemanalyse und rechnergestützte Modellbildung. Ein Modell ist allgemein ein durch Abstraktion gewonnenes Abbild oder die gedankliche Konstruktion eines bestimmten Ausschnitts der Wirklichkeit. Wird die Wirklichkeit als Systemkonstrukt aufgefasst, sind Modelle Beschreibungsmittel des Systemverhaltens und tragen im Sinne der allgemeinen Modelltheorie STACHOWIAKS (1973) zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn bei (JOPP 2001, PETERS 1999). Modellbildung ist der Prozess der formalisierten Abbildung eines als System erfassten Objektes und wird heutzutage vielfach rechnergestützt durchgeführt. Grundsätzlich hat die Wahl von Modellierungstechniken im Einklang mit dem Untersuchungsgegenstand und dem Modellzweck zu erfolgen. Üblicherweise werden im Modell nur solche Ereignisse und Randbedingungen abgebildet, die auch mit deterministischen oder statistischen Gesetzen in Verbindung zu bringen und damit wissenschaftlich erklärbar sind.

Die Entwicklung und die Anwendung von rechnergestützten Modellen (**Simulationsmodellen**) ist im Vergleich zu statistischen Verfahren in den Umweltwissenschaften verhältnismäßig jung und hat sich bezüglich des methodischen Inventars seit kurzem stark erweitert (FRÄNZLE 1998). Zu den Zielen der Entwicklung und Anwendung rechnergestützter Modelle zählt u.a. die Verarbeitung komplexer Sachverhalte, Simulation empirisch nicht praktikabler Situationen und Lösungen eines bestimmten Problems überschaubar und verfügbar (operationalisierbar) zu machen. Das Produkt aus Systemanalyse, Modellbildung und Simulation ist somit eine Verhaltensbeschreibung von Ausschnitten von Realsystemen und gliedert sich in vier Phasen mit insgesamt 14 Arbeitsschritten (BOSSEL 1994, BRECKLING & ASSHOFF 1996, LESER 1997, MÜLLER 1999, ODUM 1999).

#### Systemanalyse

1. Problem und Hypothesen
2. Modellzweck und Realsystem (Beobachtung)
3. Systemgrenze, d.h. Maßstab und Komplexität
4. Systemelemente und Relationen: Eingangs-, Ausgangs-, interne, externe Größen festlegen
5. Wortmodell: Verbale Beschreibung gleichsinniger und gegensinniger Wirkungen

#### Modellierung

6. Systemstruktur
7. Wirkungsdiagramm: Graphische Darstellung der Dynamik des Systems
8. Funktionale Beziehungen: Untersuchung und Angabe von Rückkopplungskreisen
9. Auswahl des Modelltyps: Implementierung und Programmierung
10. Quantifizierungen: Mathematische Beschreibung durch Gleichungen

## Simulation

11. Simulationsdiagramm und Simulationsprogramm
12. Simulation und Prognostik: Wahl des Szenarios, des Simulationszeitraumes, des Rechenverfahrens und der Schrittweite

## Interpretation

13. Gültigkeitsprüfung: Sensitivitätsanalyse, Kalibrierung und Validierung sowie Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse
14. Anwendung für den Modellzweck

Das Spektrum von Simulationsmodellen in den Umweltwissenschaften ist sehr vielfältig. Als Unterscheidungs- und Ordnungskriterien können u.a. herangezogen werden: räumliche Maßstäbe (geographische Dimensionen), Modellierungsgegenstand, der Abstraktionsgrad der Wirklichkeit (black-, grey-, white-box), interdisziplinäre Bezüge (sozioökonomisch-ökologisches Modell, ‚Nachhaltigkeitsmodell‘) und Modellierungstechniken (BRECKLING & ASSHOFF 1996, JOPP 2001, LESER 1997).

Mit dem räumlichen Maßstab sind häufig der Modellierungsgegenstand (z.B. Organismen, Habitate, Stoffflüsse) sowie der Abstraktionsgrad und spezielle Modellierungstechniken verknüpft.

- **Prozessebene:** Dient der Aufklärung von Wirkungszusammenhängen und Verknüpfungen kleinräumiger, ökologischer Beziehungen (Maßstab 1: 5.000) und verwendet vorwiegend gleichungsorientierte oder individuenbasierte Modellierungstechniken.
- **Ökosystemebene:** Integrierende Messgrößen und qualitative Beziehungen stehen im räumlichen, ökosystemaren Zusammenhang (Maßstab ca. 1: 10.000) und werden mit Modellen der Prozessebene und zusätzlichen Geographischen Informationssystemen (GIS) und qualitativer Modellierungsmethoden, wie der Fuzzy Logic und Expertensystemen beschrieben.
- **Einzugsgebietebene:** Bezeichnet den gesamten geographischen Raum (Maßstab kleiner 1:10.000), der über Vorfluter entwässert wird. Die Ebene setzt sich in der Regel aus unterschiedlichen Typen von Ökosystemen zusammen und bildet eine Einheit aufgrund des durch den Wasserfluss bewirkten Transports und der Verlagerung von Nährstoffen. Diese Prozesse lassen sich am besten durch gleichungsorientierte Modelle in Kopplung mit GIS und Fuzzy-Expertensystemen darstellen.

Das Spektrum von Modellierungsebenen erstreckt sich zwischen vorwiegend induktiver und deduktiver Forschungsrichtung. Induktive Forschung, wie bspw. die grundlagenorientierte Ökosystemforschung, ist auf der Prozessebene angesiedelt und versucht aufgrund von Einzeleignissen induktiv auf größere Gesamtheiten zu schließen. Deduktive Forschung, wie

bspw. die Raumforschung, geht von kleineren Maßstabs- und Planungsebenen aus und versucht aus Gesamtzusammenhängen, Einzelereignisse deduktiv abzuleiten.

RAUM	global			<i>Einzugsgebiet</i>	Treibhauseffekt, Plattendrift
			<i>Ökosystemebene</i>	Waldsterben, Artenverlust	
	lokal	<i>Prozessebene</i>	Eutrophierung, Bodenverbrauch		
		Luft-/ Gewässer- belastung, Lärm			
		kurzfristig	langfristig		
ZEIT					

Abb. 5: Raumzeitliche Veränderungen und Modellierungsebenen

Kleinräumigere Modellierungsebenen können durchaus in höheren Ebenen enthalten sein, jedoch bedingt dies einen höheren Arbeits- und Modellierungsaufwand. Mit einem Sprung auf eine andere Modellierungsebene weiten, bzw. verengen sich disziplinäre Bezüge (z.B. Atommodell der Physik vs. Weltmodell – als Synthese aus Ökologie, Ökonomie, Soziologie, Rechtswissenschaften). Es gibt eine große Vielfalt umweltwissenschaftlicher Modellformen, die sich nach Modellzweck und Aussageform unterscheiden. Die Abbildung der Modellformen dient der Einordnung von Bewertungs- und Entscheidungsmodellen in die Vielfalt umweltwissenschaftlicher Modelle.

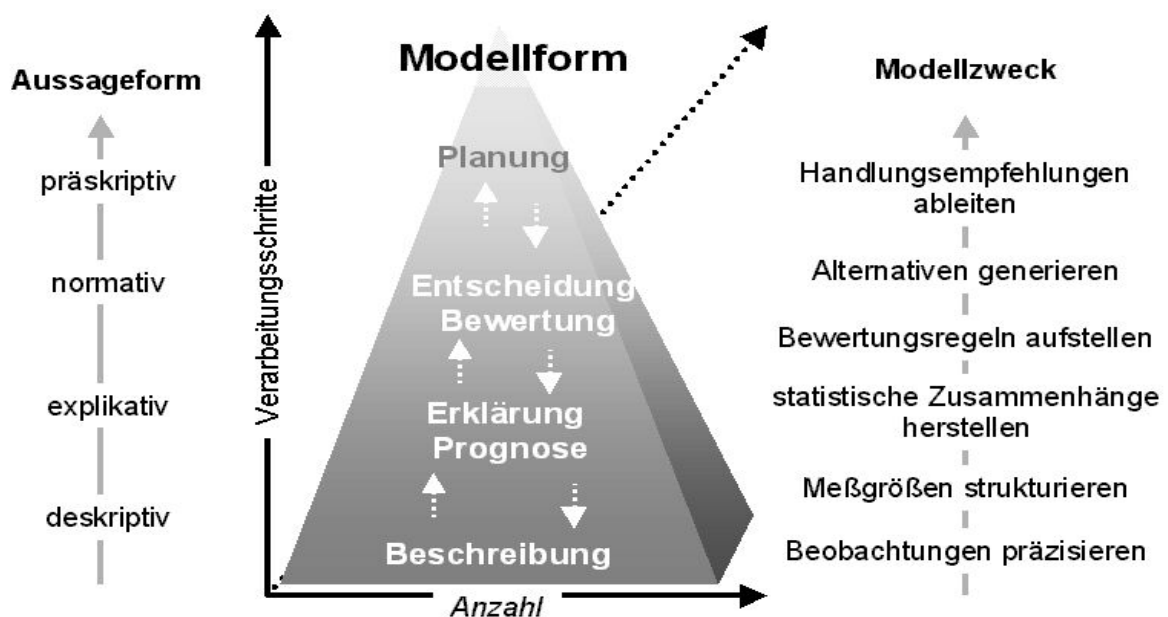


Abb. 6: Modellformen, Modellierungszwecke und Aussageformen

Wie die Abbildung zeigt, korrelieren mit der Form der Modelle ihr Zweck, die Aussageform und auch ihre bisherige Verfügbarkeit. Während beschreibende Modelle, die Beobachtungen erfassen, speichern und verwalten, in einer Vielzahl existieren, sind im Gegensatz dazu Planungsmodelle mit normativen Inhalten und präskriptiven Aussagen eher rar (BECHMANN 1981, BOSSEL 1994, BRECKLING & ASSHOFF 1996, EEA 1998, GRÜTZNER 1997, KANNEN 2000, MÜLLER 1999, PETERS 1999, WIRTH 1979, WITTMANN & BERNARD 2001).

Das Spektrum von **Modellierungstechniken** ist vielfältig und stammt aus unterschiedlichen Disziplinen wie der Mathematik, der Informatik oder auch der Operations-Research. Dazu zählen Modellierungstechniken für *quantitative* Fakten wie Differentialgleichungen (REICHE et al. 1999), objektorientierte Programmierung, zelluläre Automaten, spezielle Programmiersprachen zur Modellentwicklung (z.B. SIMULA, UML)(HILTY & GILGEN 2001, JOPP 2001). Für räumliche Analysen haben sich Geographische Informationssysteme (GIS) etabliert. Als Modellierungstechniken für vorwiegend *qualitative* Fakten existieren u.a. Expertensysteme oder Methoden des Soft Computings, wie Fuzzy Logic (BRECKLING & ASSHOFF 1996, FRÄNZLE 1998, HERZOG 2000, JOPP 2001).

#### 4.3.1 Wissensmanagement

Dort, wo quantitative Fakten nicht vorhanden sind oder mangelhafte Qualität aufweisen, steigt die Bedeutung von Wissen als Modellierungsgrundlage. Das Management von Wissen oder Wissensmanagement (engl. Knowledge Management) ist eine innovative Methode für eine zweckorientierte Selektion von Informationen für die systematische Gewinnung von Erkenntnissen.

Das **Ziel** von Wissensmanagement ist es, *Wissen in wertschöpfendes Handeln umzusetzen*. Damit ist nicht das Sach- oder Handlungswissen an sich Ziel des Wissensmanagements, sondern die kontinuierliche (Weiter-) Entwicklung einer formalisierten Basis, um damit Innovationsprozesse zu beschleunigen und intellektuelles Kapital für zielgerichtete Entscheidungen und profitable Handlungen verfügbar zu machen. In Organisationen ist Knowledge Management zu einem strategischen Führungskonzept geworden. Unternehmen ist es damit möglich, relevantes Wissen ganzheitlich, ziel- und zukunftsorientiert als wertsteigernde Ressource langfristig zu gestalten.

In Bezug zu Bewertungs- und Entscheidungssystemen spielt der Wert und damit die verbundene Aussagekraft der einzelnen Fakten und die Bestimmung der Unsicherheit bei ihrer Verarbeitung eine zentrale Rolle und bedarf eines angemessenen Managements. Da die Methode des Wissensmanagements in den Umweltwissenschaften ein Novum darstellt, sei einführend das Beispiel des Getränkeautomatengeschäfts für einen mehrfachen Generationen- und Produktwechsel dargestellt (DELLA SCHIAVA & REES 1999). Dieses spiegelt den Wandel von ei-



nem einfach strukturiertem technischen System zu einem umfassenden sozioökonomischen System („Cateringservices“) wider.

GENERATION KAFFEEAUTOMAT		
1	Focus Heißgetränk	Daten
2	Focus Produktqualität	Daten/Information
3	Focus Informationsverarbeitung	Information
4	Focus Bedienungskomfort	Wissen

Tab. 16: Von der Datenverarbeitung zum Wissensmanagement

Ursprüngliche Erwartungen an eine Kaffeemaschine sind längst überholt. Beschrieben wird die technische Revolution als ‚denkender Kaffeeautomat‘. Neue Geschäftsfelder und Arbeitsplätze konnten durch den Fortschritt entstehen und Wissensprodukte, wie Service- und Dienstleistungssysteme veränderten z.B. die Logistikbranche (DELLA SCHIAVA & REES 1999).

Wissen ist häufig nicht nur in Dokumenten und Speichern enthalten, sondern ebenso eingebettet in organisatorischen Routinen, Prozessen, Praktiken und besonders in Personen. Eine Wissensbasis ist entsprechend aktiv und systematisch mit individuellem und kollektivem Wissen so zu entwickeln, dass sie zum Erreichen der Firmenziele beiträgt. Effizient eingesetzt führt Knowledge Management zu Lösungen von Problemen (Wissen als Problemlöser!). Zudem unterstützt es Formulierungen zum Erreichen strategischer Ziele und unterstützt Entscheidungen auf der Ebene des Top-Managements von Organisationen. Durch geschickte Synthese von Methoden und Werkzeugen der Wirtschaftswissenschaften und Informatik entwickeln sich lernende Organisationen (ABTS & MÜLDER 2000). Das Wissensmanagement wird unterstützt durch Szenariotechniken, Lernwerkstätten oder Benchmarking (BÜRCEL 1998).

Nachfolgend aufgeführt sind **Aufgaben** und **Einzelziele** des Knowledge Managements, bzw. was erfolgreiches Wissensmanagement auszeichnet:

- Erfahrungswissen als Basis für Problemlösungen zu nutzen und zu entwickeln
- Transformation von Wissen in Handlungen vollzieht sich in zwei Schritten:
  - a) Als Ergebnis von Wissen entsteht Können, also in der Wissensform: Handlungswissen
  - b) Wertschöpfendes Handeln wird erreicht, wenn Können sinnvoll angewendet wird
- Verknüpfung von ‚Wissensinseln‘ (Verbesserung von Organisations- und Kommunikationsformen)
- Bedarfsgerechte Bereitstellung und Wiederverwendung von Wissen (zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Form (Wissensformen) (Wissen schafft Wissen)
- Kosten- und Zeitersparnis und Erleichterung von Entscheidungen
- Mitarbeiterzufriedenheit und –qualifizierung

- Erfolgreiche Marktführerschaft durch Kundenorientierung und/–zufriedenheit

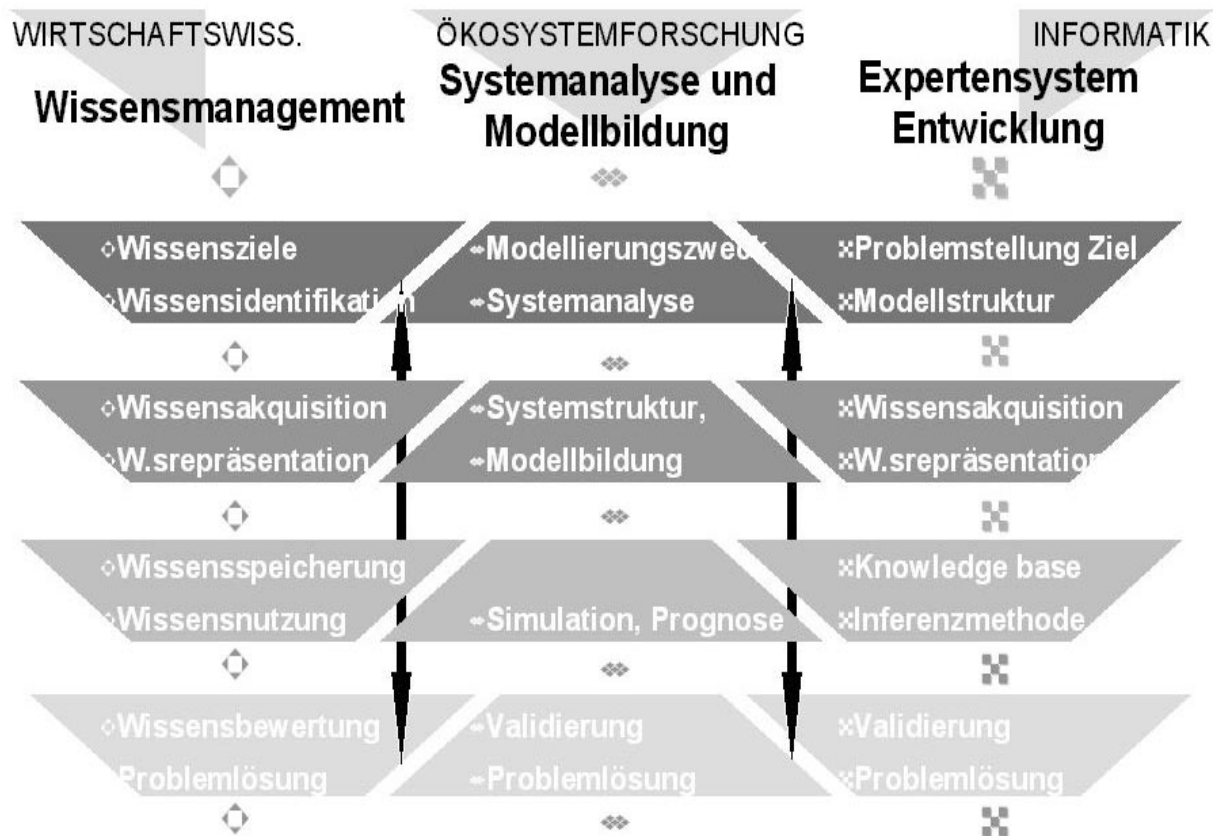
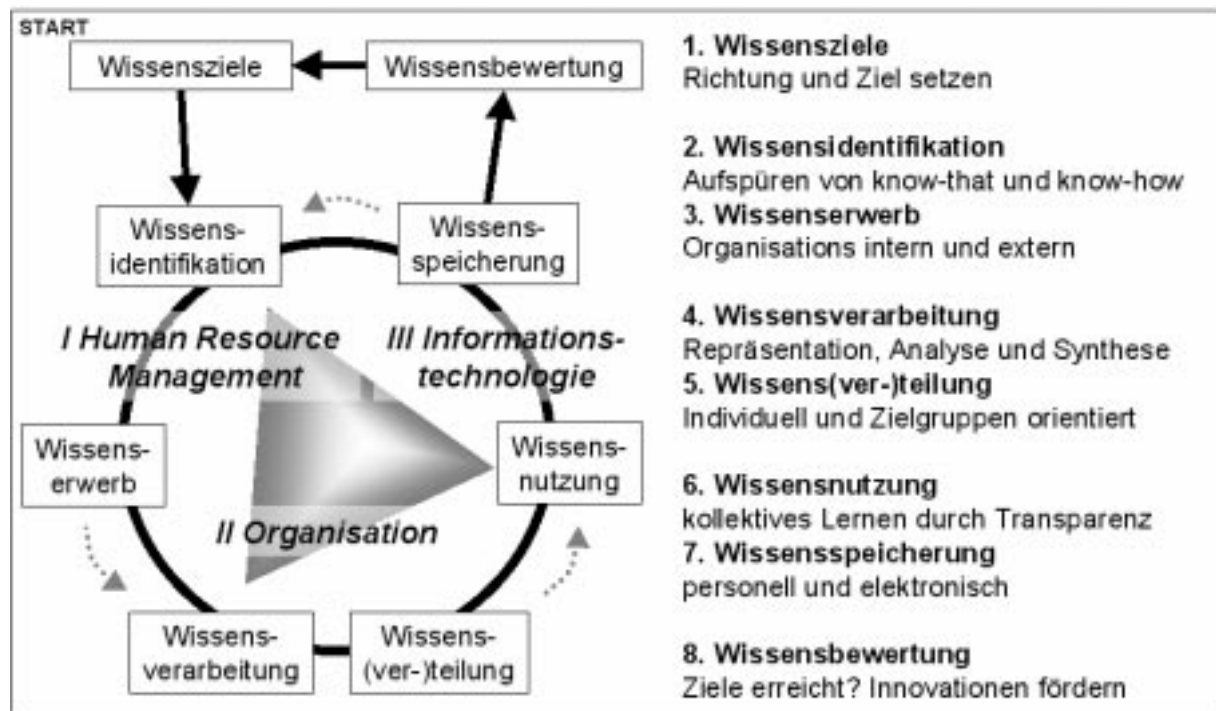


Abb. 7: Disziplinen und Phasen zur Analyse und Modellierung von Wissen

Die obige Abbildung ordnet die bislang vorwiegend betriebswirtschaftlich eingesetzte Methode ‚Wissensmanagement‘ Methoden der Ökosystemforschung und Informatik zu. Begriffliche Gemeinsamkeiten ergeben sich zwischen den Wirtschaftswissenschaften und der Informatik. Inhaltlich harmonisieren die Wissensrepräsentation und rechnergestützte Modellbildung in der Ökosystemforschung. Die Verknüpfung führt zur Integration interdisziplinären Wissens, sachgemäßer Komplexitätsreduzierung und Unterstützung bei Entscheidungsfindungen. Die Informationstechnologie liefert mittlerweile Systeme zum Wissensmanagement, die Entscheidungsabläufe beschreiben, konstruieren und nachvollziehen lassen. Sehr einfache und weit verbreitete Systeme mit leichter Verfügbarkeit sind internetbasierte Kommunikation und Informationsselektion via E-Mail und Multimedia-basierten Datenbanken. Komplexer und aufwendiger in ihrer Konzeption und Realisierung sind wissensbasierte Systeme, Content-Management-Systeme und Redaktionssysteme (ABTS & MÜLDER 2000, SIMON & PIETSCH 1998). Zu den beteiligten Personen zählen Experten mit Fach- und Problemlösungswissen, der Wissensingenieur, sowie künftige Systemanwender und Personen in Entscheidungspositionen.

Der Ablauf des Wissensmanagements ist bestimmt durch acht Bausteine (BÜRGELE 1998, DELLA SCHIAVA & REES 1999). Diese können sequentiell, aber auch parallel bearbeitet werden. Als Vorüberlegung ist über so genannte ‚W-Fragen‘, die in Verbindung mit dem klassischen Projektmanagement stehen, nachzudenken. Welches Wissen wird gesucht? Woher

kommt es? Wie ist es verfügbar? Wer benötigt es? Welche Werkzeuge gibt es? Wie wird es verändert? Die Phasen harmonisieren gleichzeitig mit den unternehmerischen und verwaltungstechnischen Bestandteilen des Personalmanagements (Human Resource Management), der Organisation selbst und der Informationstechnologie (DELLA SCHIAVA & REES 1999). Wissensmanagement versteht sich als iterativer Prozess über die Verarbeitung und Anwendung der Ressource Wissen. Einige der acht Bausteine sind identisch mit Entwicklungsphasen



von Expertensystemen (BÜRCEL 1998, GAUSEMEIER & FINK 1999).

Abb. 8: Bausteine und Säulen des Wissensmanagements

Zentrale Bedeutung kommt dabei dem Terminus ‚knowledge engineering‘ zu, denn er steht für den verknüpfenden Prozess der Expertensystem-Entwicklung mit den fünf Bestandteilen: Wissensbasis, Wissensakquisitionskomponente, Inferenz-, Interviewer- und Erklärungskomponente miteinander (DELLA SCHIAVA & REES 1999, HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999, PUPPE 1991). Eine Wissensbasis ist aktiv und systematisch mit individuellem und kollektivem Wissen so zu entwickeln, dass sie zum Erreichen der normativen Ziele von Unternehmen und Verwaltung beiträgt. Rechnergestütztes Wissensmanagement bietet die Möglichkeit relevantes Wissen ganzheitlich, ziel- und zukunftsorientiert als wertsteigernde Ressource zu entwickeln. Darüber hinaus führt Wissensmanagement, effizient eingesetzt, zu Lösungen von Problemen, unterstützt die Formulierung sowie das Erreichen strategischer Ziele und fördert Entscheidungen auf den höheren Ebenen von Organisationen und Verwaltungen. Resümierend können Gemeinsamkeiten von Wissens- und Entscheidungshierarchien und Schnittpunkte bei den Verarbeitungsweisen von Daten und Wissen der drei Disziplinen: Wirtschaftswissenschaften, Ökosystemforschung und Informatik konstatiert werden.

### 4.3.2 Künstliche Intelligenz und Expertensystemtechnik

Das Forschungsgebiet Künstliche Intelligenz (KI) untersucht, wie menschlich intelligentes Verhalten (z.B. Erklären, Verhandeln, Problemlösen, Lernen) rechnergestützt erfasst und nachvollzogen werden können. Die Vorgehensweise der KI sieht eine Reduktion der Komplexität der realen Situation durch die Einschränkung auf Problembereiche und Vereinfachungen der Problemumgebungen vor, d.h. geht von Annahmen aus. Die KI ist ein junges Wissenschaftsgebiet und entstand in den 60er Jahren. Ursprüngliches Ziel war es, einen allgemeinen Problemlöser (engl. general problem solver) zu entwerfen, der beispielsweise Standardintelligenztests oder Rätselaufgaben lösen konnte. Die Forschung konzentrierte sich damals auf das so genannte Suchproblem und damit auf die Entwicklung effizienter Suchstrategien, wie z.B. das Verkehrsroutenproblem des ‚travelling salesman‘. Die Anwendungsgebiete der KI erstrecken sich u.a. auf Expertensysteme, Robotik, Sprachverarbeitung, KI-Programmiersprachen und Bildverarbeitung. Zu den eingesetzten Methoden zählen u.a.: Fuzzy Logic, Wissensrepräsentation, Schließen und Folgern, Problemlösen und Planen, Generische Algorithmen und Multi-Agenten-Systeme (GÖRZ 1995). Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Anwendung der KI bei der Entwicklung und der Anwendung von Expertensystemen.

**Expertensysteme** (ES, engl. expert system, XPS) zählen als so genannte intelligente Systeme zu der Klasse wissensbasierter Systeme, einem innovativen Bereich der KI. Das Ziel von Expertensystemen besteht darin, eine möglichst realistische Repräsentation menschlichen (Problemlösungs-) Wissens und die Simulationen von Schlussfolgerungsfähigkeiten rechnergestützt vorzunehmen. Zudem gelten sie als Werkzeug zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Kommunikation durch natürlichsprachliche Dialoge. Die wesentlichsten Charakteristika und Komponenten sind (GÖRZ 1995, PUPPE 1991): Verfügbares Material zu einem Thema

1. zu erwerben (Komponente: Wissensakquisition)
2. strukturiert zu speichern (Wissensbasis und Wissensrepräsentation)
3. daraus mit der Inferenzkomponente logische Schlussfolgerungen zu ziehen und mit dem neu generierten Wissen für Problemstellungen des betreffenden Gebietes Lösungen vorzuschlagen (Inferenzmechanismus).

Diese Eigenschaften sind Folge der spezifischen Architektur und des abgestimmten Zusammenwirkens der fünf Komponenten bei Expertensystemen: Die Wissensbasis, der Inferenzmechanismus, die Wissensakquisition-/Modellentwicklungskomponente, die Erklärungskomponente und die Benutzerschnittstelle. Drei Personengruppen können an der Entwicklung und der Anwendung von Expertensystemen beteiligt sein. Sie verfügen über unterschiedliche Rechte. Die Rechte des Experten und des Wissensingenieurs umfassen i.d.R. die Entwicklung und Änderung des Modells mit Hilfe der Wissensakquisitionskomponente. Zur

Entwicklung des Modells gehört die Erstellung der Wissensbasis und die Auswahl der von der Inferenzkomponente angebotenen Inferenzmethoden. Der Anwender hat keine Rechte zum Ändern des Modells oder der Wissensbasis, sondern kommuniziert über die Benutzerschnittstelle. Die nachfolgende Abbildung belegt die Komponenten eines Expertensystems und demonstriert ihr Zusammenwirken (PUPPE 1991, modifiziert).

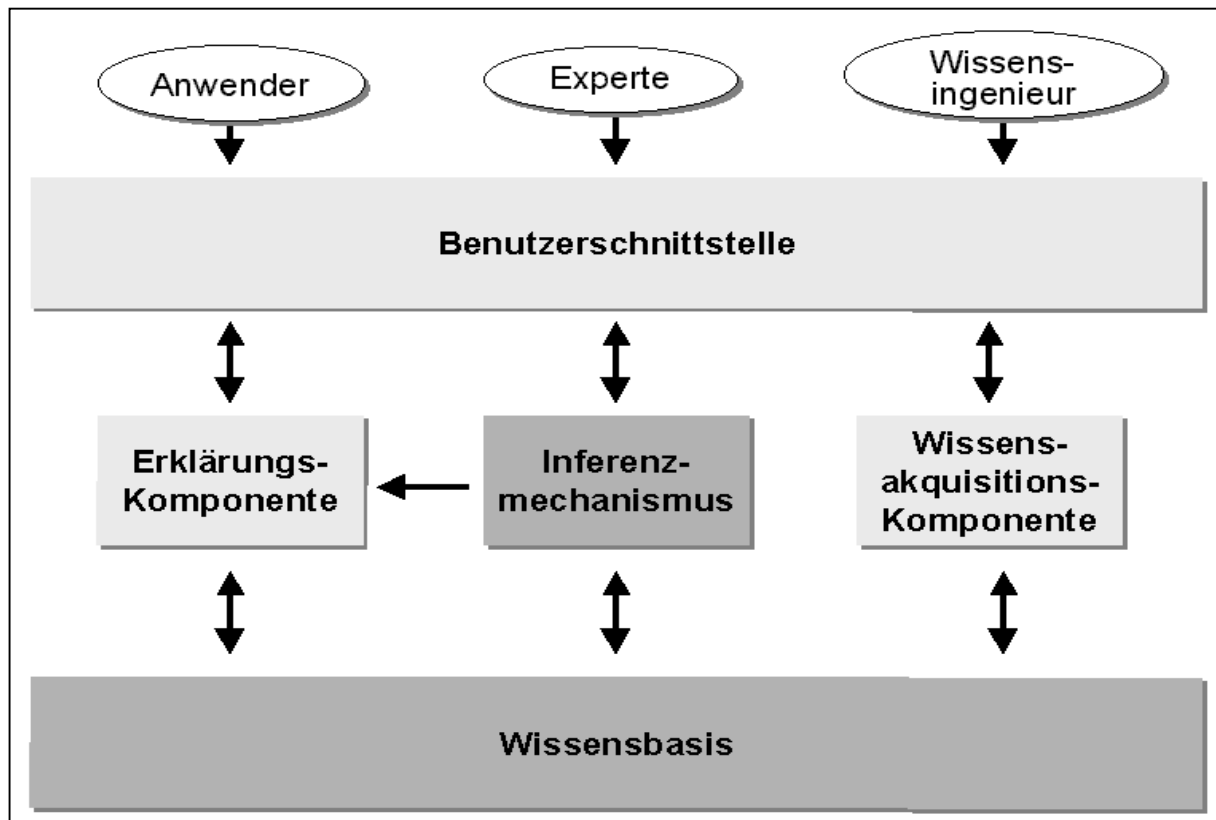


Abb. 9: Komponenten eines Expertensystems

Die **Wissensbasis** enthält Wissen als Grundstoff aller Programmläufe, welches sich in bereichs- und fallbezogenes Wissen unterscheidet. Ersteres ist weiter gefasst und letzteres betrifft exakt den exemplarischen Fall. Zudem speichert die Wissensbasis Regelmengen, sowie Zwischen- und Endergebnisse von Simulationsläufen und Problemlösungen. Dem **Inferenz-mechanismus**, auch Problemlösungs-, oder Schlussfolgerungskomponente genannt, obliegt die Ablaufsteuerung und das so genannte ‚Feuern‘ von Regeln. Damit besitzt der Inferenzmechanismus innerhalb der fünf Komponenten eine entscheidende Rolle, denn er interpretiert das Expertenwissen zur Lösung des vom Anwender spezifizierten Problems. Der Mechanismus steuert die Auswahl und Verknüpfung bestehenden Wissens durch die Erfüllung der Prämissen einzelner Regeln. So wird aus vorhandenem Wissen versucht, auf neues Wissen zu schließen, weitgehend selbständige Lösungswege zu ermitteln und Lösungen darzustellen. Bei regelbasierten Repräsentationen ist eine der Hauptfragen, ob die Regeln vorwärts- oder rückwärtsverkettet bearbeitet werden. Bei der Vorwärtsverkettung (engl. forward chaining) wird der Aktionsteil einer Regel ausgeführt, d.h. die Regel ‚feuert‘ wenn ihre Prämisse erfüllt ist und ihr Folgerungsteil zur Ausführung gebracht wird. Im Fall von Fuzzy-Expertensystemen kann auch eine teilerfüllte Prämisse den Folgerungsteil zur Ausführung bringen. Die Prozedur

der Vorwärtsverkettung wird solange wiederholt, bis keine Prämisse mehr erfüllbar und keine Regel mehr anwendbar ist. Diese datengetriebene Strategie ist vorteilhaft, wenn alle Daten von Anfang an vorhanden sind bzw. wenn auf neu hinzukommende Fakten reagiert werden muss. Rückwärtsverkettende (engl. backward chaining) Systeme agieren zielgerichtet, d.h. bei feststehenden Zielen wird geprüft, ob rückwärtsgerichtet abgeleitet werden kann oder fehlende Inputdaten erfragt werden müssen. Bei der Abarbeitung wird das gesamte Produktionssystem betrachtet. Die Relationen zwischen den einzelnen Regeln führen dazu, dass ausgehend von einer Konklusion entsprechende Prämissen gesucht werden. Handelt es sich dabei wiederum um Konklusionen, dann wird der Regelbaum rückwärts abgearbeitet und Unterziele bestimmt. Als dritte Variante von Schlussfolgerungsschemata existiert die Kombination aus Vorwärts- und Rückwärtsverkettung. Zuerst erfolgt eine Auswertung der Regelbasis aufgrund von gültigen Prämissen der Inputgrößen mittels Vorwärtsverkettung. Existieren noch weitere Regeln, deren Vorbedingungen erfüllt sind, so werden die nicht erfüllten Prämissen unter Anwendung der Rückwärtsverkettung hergeleitet.

Unter **Wissensakquisition** versteht man die Transformation und damit Überführung von menschlichem Wissen in maschinell-verfügbares Wissen. Wissensakquisition ist der Versuch, das Wissen eines Experten bzw. einer Gruppe in formaler Weise niederzulegen. Zum Wissen eines Experten können ganz verschiedene Dinge gehören, z.B. beschreibende Fakten (deklaratives Wissen), Überzeugungen, Methoden, Heuristiken und nicht zuletzt Problemlösungs- und Handlungswissen (prozedurales Wissen) (HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999). Wissensakquisitionen können indirekt, direkt und automatisch erfolgen. Indirekte Wissensakquisition bedarf der Unterstützung des Experten, um sein relevantes fachliches Wissen durch den Wissensingenieur zu identifizieren, zu strukturieren und zu formalisieren. Das Wissen eines Experten explizit zu machen, ist in vielen Fällen aufwendig. Andere Wissensquellen neben dem Experten können für den Wissensingenieur eigenes Fachwissen, sowie Fallstudien oder entsprechende Literatur sein. Bei der direkten Wissensakquisition identifiziert und formalisiert der Experte sein Wissen selbst. Die vorliegende Arbeit geht hiernach vor. Eine leicht bedienbare Wissensakquisitionskomponente einer Expertensystemshell kann dabei den Vorgang erheblich erleichtern. Automatische Wissensakquisition verlangt selbständige Extraktion von Fachwissen aus verfügbaren Falldatenbanken, Informationssystemen oder Datenpools. Diese Art der ‚Füllung‘ der Wissensbasis kann in Kombination mit selbstlernenden Techniken, wie Neuronalen Netzen (NN), Generischer Algorithmen (GA) zielerreichend sein, ist bislang jedoch selten realisiert.

Bei der **Wissensrepräsentation** wird verstärkt die Formalisierung und Verknüpfung der Fakten vorgenommen. Zu den Formen der Wissensrepräsentation in Expertensystemen zählen: Produktionsregeln, Aussagen- und Prädikatenlogik, Fuzzy Logic, Frames/Objekte, Neuronale Netze (NN), prozedurale Repräsentationen (HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999, PUPPE 1999, SOMBE 1993). Die ersten zu Beginn der 70er Jahre entwickelten Expertensysteme waren regelbasiert. Auch heute sind Regelsysteme häufig die Methode der Wahl (GÖRZ

1995, HERZOG 2001a, PUPPE 1991, SALSKI & KANDZIA 1996). Sie bestehen aus: Produktionsregeln, Kontext und Steuerungskomponente (LEMSTER 2001):

- a) Menge von Produktionsregeln: Jede Produktionsregel setzt sich aus einer Prämisse (Vorbereitung) und einer Konklusion (Schlussfolgerung) zusammen. Die Prämisse skizziert den Umstand, der eintreten muss, damit die entsprechende Regel ‚feuert‘. Prämissen können aus mehreren elementaren Aussagen bestehen und mit logischen Operatoren verknüpft sein. Die Konklusion liefert die Grundlage für die Ausführung einer Aktion.
- b) Kontext: Der Kontext gibt den inhaltlichen Rahmen für die Modellanwendung vor. Er beschreibt die Wertebereiche der einzelnen in der Wissensbasis genannten Variablen eines Regelsystems. Eine Regel ‚feuert‘, wenn ihre Prämisse durch den Kontext zum Wahrheitswert ‚wahr‘ ausgewertet werden kann.
- c) Steuerungskomponente: Sie bestimmt die jeweils nächste auszuwertende Regel.

Input-Variablen von Modellen sind durch Regeln mit den Variablen der Zwischenergebnisse und der Endergebnisse verknüpft. In diesen ‚Wenn-Dann-Regeln‘ steckt ‚intelligentes‘ Wissen und sieht der Form nach so aus: *IF (Bedingung erfüllt), dann (Folgerung gültig)*

Beispiel:

```

IF    ‚GW-Flurabstand‘ IS ‚hoch‘
AND  ‚Bodenart‘ IS ‚S‘
AND  ‚Hangneigung IS ‚hoch‘
THEN ‚GW-Neu‘ IS ‚mittel‘

```

Alle Produktionsregeln zusammengenommen bilden einen Regelbaum, der die gegenseitigen Abhängigkeiten der Variablen darstellt. Jeder Knoten präsentiert darin eine Regel, die die Relation zwischen den Input-, bzw. Zwischenwerten der Regeln (Zweige oder Blätter) und der Output-Variablen der Regel (Stamm oder Wurzel) beschreibt. In Fuzzy-Expertensystemen wird mit approximativen Inferenzschemata neues Wissen aus bestehenden Fuzzy-Sets und Regeln generiert.

Die **Erklärungskomponente** macht die Vorgehensweise bei Konsultationen des Expertensystems transparent. Dem Anwender hilft sie, vorgeschlagene Problemlösungen zu begründen und Rechtfertigungen zu geben. Mögliche Fehler in der Wissensbasis lassen sich für den Experten sichtbar machen und lokalisieren. Die Erklärungskomponente liefert als Antwort zu meist eine Art Protokoll der Inferenzschritte mit: z.B. der Anzahl gefeuerter Regeln oder Erfülltheit der Prämissen von Regeln. Dieses Protokoll wird oft noch aus Gründen der Verständlichkeit weiter aufbereitet, da das einfache Mitschreiben der Inferenzschritte für den Anwender nicht oder nur sehr schwer verständlich ist.

Die **Benutzerschnittstelle** sollte aus zwei Sichten konstruiert werden: Zum einen die Sicht für den Experten bzw. Wissensingenieur beim Aufbau und der Wartung der Wissensbank, zum anderen die Sicht des Nutzers in der Anwendung des Systems.

### **Vorteile und Grenzen der Entwicklung und des Einsatzes von Expertensystemen**

Als vorteilhaft erweisen sich Expertensysteme, wenn (SIMON et al. 1992, SIMON & PIETSCH 1998):

- Die Problemstruktur so komplex ist, dass sie von Menschen ohne technische oder andere Hilfsmittel nicht mehr oder nur eingeschränkt bewältigt werden kann
- Probleme zu lösen sind, für die keine exakten Theorien oder Algorithmen bekannt sind
- integrative und interdisziplinär zu lösende Problemsituationen vorliegen
- Expertenwissen personenunabhängig anwendbar und erhalten bleiben soll
- menschliche Experten knapp sind

Im Vergleich zu anderen Modelltypen wie gleichungsorientierten, individuenbasierten oder objektorientierten weisen Expertensysteme aufgrund ihrer Architektur folgende Vorteile auf (BRECKLING & ASSHOFF 1996, SALSKI & KANDZIA 1996):

- Zusammenführung und Speicherung disziplinübergreifenden Wissens (Wissensbasis)
- Optimierung und Beschleunigung von Entscheidungsfindungen durch umgangssprachlich, leicht verständliche Simulationsergebnisse (Wissensrepräsentation)
- Modellierung ‚intelligenten‘, auf Erfahrung beruhenden Problemlösungswissens (Wissensrepräsentation)
- Logisches Schlussfolgern und Problemlösungskompetenz (Inferenzmechanismus)
- die Reproduzierbarkeit und Vereinheitlichung des Problemlösungsprozesses durch Formalisierungen (Wissensbasis, Wissensrepräsentation, Inferenzmechanismus)
- die Unterstützung in komplexen Entscheidungssituationen bei gleichzeitiger Entlastung bei Routinetätigkeiten (Inferenzmechanismus)
- Anwenderfreundlichkeit (Benutzerkomponente)

Expertensystemen weisen gegenüber menschlichen Experten eine deutliche Überlegenheit auf, da sie keiner schwankenden Leistungsfähigkeit, keinem Verlust von Wissen durch Vergessen oder hohen Personalkosten unterworfen sind. Zudem garantiert digitale Wissensspeicherung eine lange Lebensdauer und ist gleichzeitig beliebig oft vervielfältigbar, d.h. der Einsatz des Systems ist an mehreren Orten gleichzeitig möglich. Die **Grenzen** der Entwicklung und des Einsatzes von Expertensystemen gehen einher mit der Verfügbarkeit des zu implementierenden Wissens sowie einer offenen Kommunikation zwischen Experte, Wissensingenieur und späterem Anwender. Des Weiteren ‚weiß‘ das intelligente System nicht, was es nicht weiß und darf folglich nur für den vorgesehenen Aufgabenbereich eingesetzt werden. Bei Expertensystemen gilt die so genannte ‚closed world assumption‘, d.h. Alltags- oder Allgemeinwissen ist in einem System nicht implementiert.



Zu dem was Expertensysteme **nicht** leisten können, zählt (HARMON et al. 1989, KURBEL 1989, SIMON & PIETSCH 1998):

- die Auswahl der Form der Wissensrepräsentation zu übernehmen
- die Kontrolle der Datenqualität und –validität zu übernehmen
- Probleme zu lösen, für die Welt- und Alltagswissen benötigt wird
- Menschliche Experten überflüssig zu machen

In der Gegenüberstellung von Vorteilen und Grenzen der Entwicklung und des Einsatzes von Expertensystemen sei erwähnt, dass auch menschliche Experten nicht unfehlbar sind und daher Expertensysteme dies ebenfalls nicht sein können und damit notwendigerweise eine gewisse Unvollkommenheit aufweisen.

### **Einsatzbereiche von Expertensystemen**

Die Einsatzbereiche von Expertensystemen können entsprechend ihrer Aufgabengebiete wie folgt beschrieben werden. Überschneidung von Aufgaben sind durchaus üblich (KARBACHER & LINSTER 1990, KURBEL 1989, PUPPE 1991, PUPPE 1998, SIMON et al. 1992).

<b>AUFGABE</b>	<b>EINSATZ</b>
Simulation	Aus dem Ausgangszustand werden Folgezustände hergeleitet
Entscheidung	Entscheidungsunterstützung bei vorgegebenen Randbedingungen
Konstruktion	Die Lösung wird aus kleinen Bausteinen zusammengesetzt
Prognostik	Ableitung von möglichen Konsequenzen gegebener Situationen. Aus dem Verhalten des Systems in der Vergangenheit und der Gegenwart wird auf den Zustand des Systems in der Zukunft geschlossen.
Planung	Entwurf einer Folge von Aktionen zum Erreichen eines Zieles. Planung ist das Überlegen, wie man zielgerichtet handeln kann, um bestimmte Ziele zu erreichen.
Überwachung	Erkennen von fehlerhaften Systemzuständen in Echtzeit, d.h. Vergleich von Beobachtungen und Sollwerten (Umweltmonitoring und Mangementgedanken), und damit die permanente Interpretation von Daten und das Auslösen von Alarm, wenn bestimmte auslösende Datenkonstellationen erreicht werden.
Diagnostik	Ursachenforschung bei Systemfehlern durch Dateninterpretation. Ableitung von Systemfehlern aus Beobachtungen, wobei die Lösung aus einer Menge vorgegebener Alternativen ausgewählt wird. Hierbei findet eine Suche nach einer Fehlerursache statt, die auf der Interpretation von Daten basiert.
Interpretation	Dateninterpretation durch Metawissen. Einem Satz von Daten wird eine Bedeutung zugeordnet.
Design	Konfiguration von Objekten unter Berücksichtigung besonderer Anforderungen.

Tab. 17: Allgemeine Aufgabenbereiche von Expertensystemen

Die dargelegten Einsatzbereiche von Expertensystemen nehmen unterschiedliche Rollen ein, z.B. in der Grundlagenforschung, im Managementbereich und bei Entscheidungsfindungen oder im Rahmen von Informationssystemen. In der **Grundlagenforschung** dienen Expertensysteme zur Modellierungshilfe und zur Erklärungsunterstützung bei wissenschaftlichen Fragestellungen. Im **Managementbereich und bei Entscheidungsfindungen** dienen Expertensysteme der Assistenz bei wiederkehrenden Simulationsroutinen. Als Beispiele seien genannt das Expertensystem PRO\_PLANT, welches dem umweltschonenden Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft dient (STREIT 1996) oder das Expertensystem zum Management der Feuchtwiesenvegetation (ASSHOFF 1999). Bei der **digitalen Datenverarbeitung und in Informationssystemen** sind Expertensysteme integrierender Bestandteil und übernehmen Teilaufgaben größerer DV-Lösungen. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Anwendungsbereiche und den jeweiligen Projektstatus von Expertensystemen und intelligenter Methoden in den Umweltwissenschaften.

NEUERE EXPERTENSYSTEME IN DEN UMWELTWISSENSCHAFTEN
PRO_PLANT Beratungssystem für den umweltschonenden Einsatz von Pestiziden in der Landwirtschaft (P)
GISPAD Programmsystem zur Erfassung und Fortschreibung raumbezogener Daten auf feldtauglichen Computern (P)
TECIS Informations- und Beratungssystem für die Abwasserentsorgung in ländlich strukturierten Gebieten (P)
COSAP Computergestützte Schwachstellenanalyse in produzierenden Betrieben (p)
Stoffstrommanagement im Verbund von KMU (p)
Beratungssystem für umweltfreundliche Umgestaltung von Lackierbetrieben (p)
GeoMed: Geographical Mediation www-basierte Assistenz für Stadt- und Regionalplanung, EU-Projekt GMD (p)
Modellierungsunterstützung und Modellverwaltung für Migrationsprozesse (p)
Expertensystem zur Sukzessionslenkung von Feuchtgrünland, Universität Kiel (p)
CLEAN Innovative Technologien in der automatisierten Kontrolle von Müllverbrennungsprozessen (p)
Assistenzsystem für kommunale Umweltbilanzen (S)
PIUS Verbundvorhaben zur Untersuchung der Umsetzbarkeit von produktionsintegrierter Umweltschutztechnik (K/S)
Status des Projektes: (K)=Konzept, (S)=Studie, (p)=Prototyp, P=(Produkt) (RANZE, C. URL: <a href="http://www.tzi.de/IS/Kiumwelt/anwend.html">http://www.tzi.de/IS/Kiumwelt/anwend.html</a> Oktober 1999)

Tab. 18: Neuere Expertensysteme in den Umweltwissenschaften

Die Tabelle belegt, dass lediglich drei Expertensysteme Produktreife erlangt haben. Weitere Projekte besitzen den Konzept-, Studien- oder Prototyp-Status und kommen überwiegend aus dem Bereich der Umwelttechnik.

### Anforderungen, Werkzeuge und Kosten bei der Erstellung von Expertensystemen

Der Einsatz von Expertensystemen verlangt nach einer sowohl für den Experten als auch für den Wissensingenieur realistischen Herangehensweise unter Zurückweisung voreiliger anwendungsseitiger Euphorien. Analog zu den o.g. Modellierungstechniken bleibt es auch bei Expertensystemen noch immer dem Modellierer überlassen, die Kompetenz des Simulationsmodells einzuschätzen (BRECKLING & ASSHOFF 1996, REICHE 1991). Ebenso obliegt es ihm, Welt- und Alltagswissen zur Lösung bereitzustellen, die Sinnhaftigkeit der Ergebnisse und die Verhältnismäßigkeit von Kosten-Nutzen zu prüfen und letztlich den Gültigkeitsbereich des Modells zu definieren. Somit gilt es auch, beim Entwurf und der Realisierung von (Fuzzy-) Expertensystemen Vorüberlegungen anzustellen und Anforderungen zu beachten (SIMON 1992, KURBEL 1989):

- Der Aufgabenbereich sollte deutlich abgrenzbar sein und bereits einen gewissen Grad wissenschaftlicher Durchdringung und Systematisierung aufweisen.
- Hauptquelle des Problemlösungswissens und der Leistung der Experten sollten Spezialwissen, Erfahrung und geschultes, differenziertes Beurteilungsvermögen sein.
- Es sollte mindestens ein anerkannter menschlicher Experte, der sich auf die betreffenden Aufgabenklassen versteht, verfügbar und in der Lage sein, sein Wissen mitzuteilen.

ANFORDERUNGEN BEI DER ENTWICKLUNG VON EXPERTENSYSTEMEN	
I Notwendige Eigenschaften	II Wünschenswerte Eigenschaften
<i>Nutzerbezogen</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Nutzen des Instruments</li> <li>• realistische Erwartung bzgl. Reichweite und Grenzen des Systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• das System bezieht den Nutzer in den Arbeitsablauf ein</li> <li>• das System kann seine Vorgehensweise erläutern (Erklärungskomponente)</li> </ul>
<i>Problembezogen</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ein Spektrum von Testanwendungen ist verfügbar</li> <li>• die Aufgabe wird auch in Zukunft zu bearbeiten sein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• die Aufgabenstellung gleicht solchen, die bereits früher erfolgreich mit XPS bearbeitet wurden (Erfahrungen einbringen)</li> <li>• die Problemlösung kann erläutert und interaktiv beeinflusst werden</li> </ul>
<i>Expertenbezogen</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• es gibt einen Experten für die gestellte Aufgabe der kooperationsbereit ist und sein Wissen ausformulieren kann</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eine Vorstrukturierung der Wissensbasis liegt vor</li> <li>• die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Operationalisierung steigt mit der Verfügbarkeit adäquater Daten und Wissen</li> </ul>

Tab. 19: Anforderungen bei der Entwicklung von Expertensystemen

Für die Entwicklung von Expertensystemen existieren vier verschiedene komplementäre **Werkzeuge** (GÖRZ 2000, PUPPE 1991, PUPPE 1998). Diese sind hinsichtlich ihres Einsatzgebietes und der Verfügbarkeit anzuwenden bzw. weiterzuentwickeln. Zeitlich sehr aufwendig werden im allgemeinen die Entwicklungen mit KI-Programmiersprachen (1), wie LISP,

PROLOG oder KEE, aufgefasst. Mit ihnen sind alle fünf Komponenten von Expertensystemen zu entwickeln. Einfache und hybride Werkzeuge zur Wissensrepräsentation (2) tragen zur Zeitersparnis bei. Wesentlich weiterentwickelt sind problemspezifische Werkzeuge, sogenannte Shells (3). Sie besitzen die wesentlichen Bestandteile von Expertensystemen: Wissensakquisitions-, Interviewer-, Inferenz- und Erklärungskomponente. Die Anwender können hier das genaue Wissensgebiet selbst festlegen indem sie die Wissensbasis mit dem nötigen Wissen auffüllen. An dieser Stelle sei auf das durch die Kieler Ökosystemforschung in Kooperation mit dem Institut für Informatik und Praktische Mathematik der Universität Kiel entwickelte Modellierungsunterstützungssystem xFLEco verwiesen (Kap. 6). Als viertes Werkzeug, das zu einer enormen Zeitersparnis beiträgt, dienen Shells mit Basiswissen. Diese sind allerdings selten bzw. nicht für jedes Einsatzgebiet geeignet.

Die Wahl der o. g. Werkzeuge zur Konzeption und Implementierung ist entscheidend für den zeitlichen und finanziellen Aufwand bei der Entwicklung von Expertensystemen. In den einzelnen **Entwicklungsphasen** sind Entscheidungen zu treffen, die nicht unabhängig voneinander stehen. Da ist zum einen die Frage, ob eine bereits existierende Expertensystem-Shell zur Implementation verwendet werden soll. Dies kann eine enorme Zeitersparnis bedeuten, schränkt jedoch die Arten der Wissensrepräsentation und der Inferenzmethoden auf die in dieser Shell implementierten ein. Ein typisches systematisches Vorgehen beim Erstellen von Expertensystemen kümmert sich nacheinander um die Bausteine und lässt sich somit in einem siebenstufigen Phasenplan skizzieren (HARMON et al. 1989, KARBACH & LINSTER 1990, SALSKI & KANDZIA 1996):

#### Phase 1 Vorstudie

- Problem identifizieren, Kosten/Nutzen ermitteln
- Unterstützung späterer Anwender, bzw. des Managements sicherstellen

#### Phase 2 Aufgabenanalyse /Wissensakquisition

- Bestimmung von Modellstruktur, Teilmodelle sowie Eingabe- und Ausgabevariablen
- Wissensakquisition und Wissensbasis

#### Phase 3 Entwicklung des Prototyps

- Systementwurf (Komponenten entwerfen, Programmiersprache/Shell auswählen )
- Programmierphase (Wissensrepräsentation, Inferenzmethode, Benutzerschnittstelle)

#### Phase 4 Entwicklung des Systems

- Modellierung: mentales konzeptionelles Modell und Simulationsmodell
- Festlegung der Inferenzkomponente

#### Phase 5 Implementierung und Erprobung

- Repräsentation und Modellentwicklung am Rechner
- Simulation durchführen und ggf. Modellparameter anpassen
- System mit seinen eigentlichen Anwendern testen

## Phase 6 Anwendung

- System auf die für den praktischen Einsatz vorgesehene Hardware portieren
- Anwender in der Bedienung des Systems ausbilden

## Phase 7 Wartung

- Verfahren für die Aktualisierung des Systems festlegen
- System nötigenfalls aktualisieren

Die letzte Phase ist ein zyklischer Prozess, in dem Endbenutzer und Experten eine dominierende Rolle spielen. Typischerweise wird ein Expertensystem schrittweise programmiert. Das heißt, ein Prototyp mit wenig Regeln, der nur die Standardfälle lösen kann, wird erstellt. Dann wird die Wissensbasis laufend erweitert, um weitere Fälle zu erfassen. Diese Phase kann Jahre dauern. Auch im laufenden Betrieb wird häufig die Wissensbasis weiter ergänzt. Die **Entwicklungsdauer** von Expertensystemen korreliert dabei mit der Struktur und Komplexität des Problems sowie der Wahl des Werkzeugs (KURBEL 1989).

SCHWIERIGKEITSGRAD DES PROBLEMS	MANNJAHRE
Mäßig schwierig / komplex	6
Schwierig / komplex	15
Sehr schwierig / komplex	30

Tab. 20: Entwicklungsdauer von Expertensystemen

Eine Barriere für die Entscheidung zur Entwicklung von Expertensysteme ist die relativ lange Entwicklungszeit, die immer in der Größenordnung von Jahren angegeben wird. Engpässe ergeben sich bei eingeschränkter Verfügbarkeit der Experten, bzw. Beschaffung des Wissens aus anderen Quellen (Wissensakquisition und Wissensbasis), als auch bei der problemadäquaten Wissensrepräsentation und Implementierung. Beispiele für den zeitlichen Entwicklungsaufwand bedeutender Expertensysteme aus dem Bereich der Medizin sind die Anfang der 70er Jahre entwickelten Systeme DENDRAL (ca. 38 Mannjahre) oder MYCIN (ca. 20 Mannjahre). Der Erfolg der Erstellung von Expertensystemen ist neben den Werkzeugen, der Planungsphasen und der Entwicklungsdauer abhängig von den **Kosten**.

EXPERTENSYSTEMGRÖßE	ANZAHL DER REGELN	GESCHÄTZT \$ (1989)
Kleine Systeme	50-350	40.000-60.000
Große Systeme	500-3.000	50.000 – 1. Mill.
Sehr große Systeme	10.000	2-5 Mill.

Tab. 21: Kosten für die Entwicklung von Expertensystemen

Die Entwicklung von Expertensystemen ist neben hohem zeitlichem Aufwand mit hohen Kosten verbunden. Neben den Kosten für die Hard- und Software bilden die Personalkosten des Experten und des Wissensingenieurs einen wesentlichen Anteil an den gesamten Entwicklungskosten.

### 4.3.3 Soft Computing, Fuzzy Logic und Fuzzy-Modellierung

Aus der Sicht der Informatik lassen sich die Zweige der quantitativen und qualitativen Forschung und Modellierung in das klassische **Hard Computing** und das zunehmend angewendete **Soft Computing** („weiches“ Rechnen) einteilen. Hard Computing geht von überwiegend bekanntem und durchschaubarem Systemverhalten und von strukturierten Problemen oder Entscheidungssituationen aus. Hard Computing setzt dabei auf zahlenmäßige Erfassung und quantitative Modellierung. Bei komplexeren Systemen, wie dies gerade bei ökologischen Systemen und integrativen Bewertungen anthropogener Aktivitäten der Fall ist, eröffnet das Soft Computing mit der ergänzenden Verarbeitung von qualitativen Fakten, wie z.B. sprachlich formuliertem Wissen neue Einsatzbereiche.

GEGENÜBERSTELLUNG VON TECHNIKEN DES SOFT COMPUTINGS			
	Fuzzy Logic (FL)	Neuronale Netze (NN)	Generische Algorithmen (GA)
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpretationsfähigkeiten, Schlussfolgerungen</li> <li>• Transparenz und Verständlichkeit</li> <li>• Modellbildung und Simulation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lernfähigkeit</li> <li>• Adaption</li> <li>• Verallgemeinerung</li> <li>• Approximationsfähig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berechnungseffektivität</li> <li>• Globale Optimierung</li> </ul>
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wissensgewinnung ist aufwendig</li> <li>• keine Lernfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Black Box</li> <li>• Interpretationsmöglichkeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Codierung</li> <li>• Berechnungsgeschwindigkeit</li> </ul>

Tab. 22: Gegenüberstellung von Techniken des Soft Computings

**Ziel** des Soft Computing ist u.a. die rechnergestützte Erfassung und Simulation menschlich-intelligenten Verhaltens und die Bildung intelligenter Systeme von realen Gegebenheiten. Der Oberbegriff Soft Computing fasst die neuen, intelligenten Paradigmen, wie die Fuzzy Logic, Neuronale Netze und genetische Algorithmen zusammen. Neuronale Netze bieten die Möglichkeit aus Erfahrungen der Vergangenheit bei Simulationsläufen selbständig hinzuzulernen (ALIEW 2001, GÖRZ et al. 2000). Expertensysteme und ihre Kombination mit Fuzzy-Methoden eignen sich in der Form von Fuzzy-Expertensystemen zur Erfassung und zum Nachvollziehen (Simulation) menschlichen Verhaltens zur rechnergestützten Strukturierung und Formalisierung von Konflikts- und Entscheidungssituationen (GÖRZ et al. 2000, PUPPE 1999, SIMON & PIETSCH 1998, SIMON et al. 1992). Etablierten sich Fuzzy-Methoden in den 60er und 70er Jahren zuerst in ingenieurwissenschaftlichen Gebieten (Mess- und Regelungstechnik), so ist seit den 80er und 90er Jahren eine Ausweitung des Einsatz auf wirtschafts- und auch naturwissenschaftliche Disziplinen zu verfolgen.

### Formalismen und klassische Logik

Logik ist die Wissenschaft von der Struktur und den Gesetzen des folgerichtigen Denkens, Argumentierens und Handelns. Die aristotelische formale Logik basiert auf dem Grundsatz der Zweiwertigkeit (Bivalenzprinzip). Dieser kann mit zwei Prinzipien wie folgt ausgedrückt werden:

1. das Prinzip vom ausgeschlossenen Widerspruch (Kontradiktionsprinzip). Es besagt: Keine Aussage ist zugleich wahr und falsch, unabhängig von der Fähigkeit, den Wahrheitsgehalt festzustellen, und
2. das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten, besagt: Jede Aussage ist wahr oder falsch.

Die theoretische Grundlage bildet die von Cantor begründete Mengenlehre. Demnach kann die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu$  eines Elementes  $x$  der Teilmenge  $A$  der Grundmenge  $X$  nur zwei Werte annehmen:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \notin A \\ 1 & \text{für } x \in A \end{cases}$$

Auf diese zweiwertige Logik wird bei der Behandlung der Fuzzy Logic zurückgegriffen. Die konventionelle Logik mit ihren Teilgebieten der **Aussagenlogik** (AL) und **Prädikatenlogik** (PL) analysiert Schlussfolgerungen aufgrund gegebener Aussagen und verwendet dafür jeweils unterschiedliche mathematische Formelzeichen und Symbole. Die Zusammensetzung von Aussagen erfolgt in der Aussagenlogik mittels den atomaren sprachlichen Gebilden ‚und‘, ‚oder‘, ‚nicht‘, den so genannten Junktoren (Verknüpfungszeichen). Im Sinne der AL ist eine Aussage ein sprachlich sinnvoller Satz (d.h. eine atomare Aussage), wenn die Wahrheitswerte, ‚wahr‘ oder ‚falsch‘ feststellbar sind; z.B. ‚der Mond kreist um die Erde‘; keine atomare Aussage ist ‚ $k = 13$ ‘. Eine Erweiterung der Aussagenlogik um Quantoren, Funktions- und Prädikatensymbole führt zur Prädikatenlogik. Diese beschreibt Allaussagen (Generalisationen) mit dem Allquantor  $\forall$ : Für alle  $x$  (der Menge  $M$ ) gilt  $F$ . Existenzaussagen (Partikularisationen) werden mit dem Existenzquantor  $\exists$  formalisiert: Es gibt mindestens ein  $x$  (der Menge  $M$ ), für das  $F$  gilt. Die formale Logik hat wegen ihrer Grundforderungen der Eindeutigkeit und ihres hohen Grades an Effizienz in den exakten Wissenschaften eine große Bedeutung. Zunehmend werden Formalisierungen (Kalkülisierung) der Logik durch Zeichensymbole und Operationsregeln auch in deskriptiven Wissenschaften eingesetzt (COPI 1998, KANDZIA & KLEIN 1993, SCHÖNING 2000). Im Rahmen von Entscheidungsfindungen und umweltgerechtem Handeln, seinen zudem die Modallogik und die deontische Logik erwähnt. Die **Modallogik** (Modus= ‚Art‘, und ‚Weise‘) ist ein Zweig der mathematischen Logik. Sie untersucht die Beschaffenheit des Handelns und die Gültigkeit der Verbindung von Subjekt und Prädikat, insofern diese möglich, gewünscht, gefordert oder als wirksam gelten kann und nicht Tatsachen betrifft. Als Beispiel seien der Indikativ, Imperativ und der Optativ genannt (SEIFFERT 1992, SOMBE 1992). Die Modallogik ist zugleich das ‚Standardsystem‘ deontischer Logik.

**Deontische Logik** ist ein formales System, in dem Ausdrucksmittel für deontische Prädikate wie ‚obligatorisch‘, ‚erlaubt‘ und ‚verboten‘ bereitgestellt werden. Eine zentrale Rolle spielen logische Analysen von Handlungen und Normen (BUCK 1987, SEIFFERT 1992). Die nachfolgende Tabelle stellt ontische und deontische Prädikate den entsprechenden Handlungen gegenüber.

ONTISCH	DEONTISCH	HANDLUNG
seiend, d.h. unabhängig vom Bewusstsein existierend	sollen und Hilfsverben	
Notwendig	Geboten (muss)	= nicht freigestellt
Nicht notwendig	Nicht geboten (muss nicht)	= freigestellt
Möglich	Erlaubt (darf)	= nicht verboten
Nicht möglich	Nicht erlaubt (darf nicht)	= verboten

Tab. 23: Formen von Handlungen auf ontischer und deontischer Basis

Die nachfolgende Auflistung gibt eine ergänzende Auswahl der neben der Fuzzy Logic existierenden Logiken und Formalismen wider:

- Temporallogik: um Zeitabläufe und zeitliche Abhängigkeiten beschreiben zu können (HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999)
- Nichtmonotone Logiken: um auftretende Widersprüche behandeln zu können (Belief Revision) und Annahmen im Zweifelsfall zu machen = default reasoning (HEINSOHN & SOCHER-AMBROSIUS 1999)
- Meta-Logik: philosophische Disziplin, die sich mit den Voraussetzungen und Grundlagen der Logik befasst (SEIFFERT 1992)

### **Mathematische Grundlagen zum Verständnis der Fuzzy-Set-Theorie**

Die Fuzzy-Set-Theorie ist eine 1965 von Lotfi A. ZADEH entwickelte ‚Theorie unscharfer Mengen‘. Diese versucht sprachliche Aussagen mit enthaltenden unsicheren Informationen in rechnergestützten Algorithmen zu repräsentieren. Zadeh führte den Begriff ‚fuzzy set‘ (unscharfe, verschwommene Mengen) ein und definierte ihn mathematisch wie folgt:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$

Demnach ist die Abbildung  $\mu_A(x)$  betrachteter Elemente  $x$  in einem Universum  $X$  im Einheitsintervall  $[0,1]$  gültig.  $A$  ist dabei eine unscharfe Menge. Der Grundsatz der Zweiwertigkeit wird für nichtklassische Logiken zurückgewiesen oder verändert, indem auf das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten verzichtet und angenommen wird, dass Aussagen mehr als zwei Wahrheitswerte besitzen (mehrwertige Logik)(ZADEH 1965).



Der **Zugehörigkeitsgrad** ist ein quantitatives Maß dafür, inwieweit ein betrachtetes Element die Eigenschaften einer unscharfen Menge erfüllt. Im Folgenden wird von einer normalisierten Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_F$  als Zuordnungsvorschrift einer Grundmenge  $X$  im Einheitsintervall  $[0,1]$  ausgegangen. Fuzzy-Sets können in den nachfolgenden drei Formen dargestellt werden (KAHLERT & FRANK 1994, KRUSE et al. 1995):

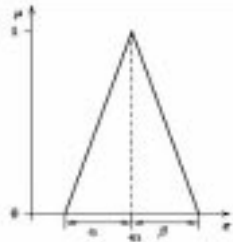
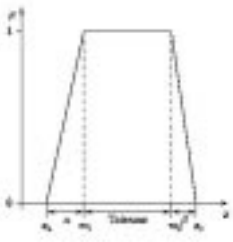
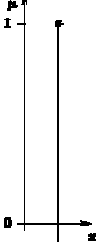
1. Darstellung als Summe: Es sei  $A$  eine unscharfe Menge und  $x_i$  die Elemente mit ihren Zugehörigkeitsgraden  $\mu_i(x)$  zu  $A$

$$A = \mu(x_1)/x_1 + \mu(x_2)/x_2 = \sum \mu(x_i)/x_i \quad \forall x_i \in X$$

2. Darstellung als Menge geordneter Paare:

$$A = \{(x_1, \mu_A(x_1)), (x_2, \mu_A(x_2)), \dots\} = \{(x_i; \mu_A(x_i))\} \quad \forall x_i \in X$$

3. Die gebräuchlichste und zugleich softwareseitig unterstützte Darstellungsform von Fuzzy-Sets ist die grafische Form (KAHLERT & FRANK 1994).

GRAFISCHE FORMEN VON FUZZY-SETS (linear)		
Dreiecksform	Trapezform	Fuzzy-, Singleton'
		
<p>Der Wert <math>m</math> des Abszissenabschnitts des Fuzzy-Sets <math>F</math> entspricht hier in der Mitte des Trägers dem Zugehörigkeitsgrad <math>\mu_F(m) = 1</math>. Die seitlichen Flanken, bzw. Kennlinien des Dreiecks beschreiben mit ihrer Neigung die ‚Unschärfe‘ der Menge.</p>	<p>Der Zugehörigkeitsgrad im Abszissenintervall von <math>m_1</math> bis <math>m_2</math> nimmt hier die Werte im Kern gleich eins an. Linear ansteigende und abfallende Kennlinien markierten den Übergangsbereich <math>\alpha</math> und <math>\beta</math>.</p>	<p>Die ‚Fuzzifizierung‘ des Crisp-Wertes <math>m</math> mit dem Zugehörigkeitsgrad <math>\mu_F(m) = 1</math> (Sonderfall).</p>

Tab. 24: Grafische Formen von Fuzzy-Sets (linear)

Neben den linearen Formen können u. U. auch nichtlineare Zugehörigkeitsfunktionen einen Sachverhalt adäquat beschreiben. Die grafischen Darstellungsformen von Fuzzy-Sets werden durch die zwei Kenngrößen Kern und Träger charakterisiert:

**Definition Kern:** Ist  $\mu_F$  eine unscharfe Menge in  $X$ , so heißt das Intervall

$$[m_1, m_2] = \{x | \mu_F(x) = 1\}$$

Kern des Fuzzy-Sets  $\mu_F$  in  $X$ .

Definition **Träger**: Ist  $\mu_F$  eine unscharfe Menge in  $X$ , so heißt

$$\text{supp}(\mu_F) = \{x | x \in X, \mu_F(x) > 0\}$$

Träger (Synonyme: *Support*, Einflussbreite) des Fuzzy-Sets  $\mu_F$  in  $X$ .

Beide Definitionen beziehen sich auf die in Tab. 24 skizzierten dreiecks- und trapezförmigen Darstellungsformen. In der Fuzzy-Terminologie beschreibt bei dreiecksförmigen Darstellungen die Spitze mit  $\mu_F(m) = 1$  z.B. einen Messwert und gibt entsprechend des Trägers die Variabilität der Merkmalsausprägung der Klasse an. Das in Tab. 24 dargestellte Singleton ist ein Spezialfall. Er verdeutlicht die Berücksichtigung der klassischen Mengenlehre als Sonderfall der Fuzzy-Set-Theorie. In Fuzzy-Controllern treten Singletons häufig als Eingangs- und Ausgangsgrößen auf (KRUSE et al. 1995). Die Konstruktion der grafischen Formen von Fuzzy-Sets mit ihren charakteristischen dreieck- oder trapezförmigen Kennlinien liegt im Ermessen des Modellierers und basiert zugleich auf dem Wissen des Experten über den zu bewertenden Sachverhalt.

### Fuzzy-Mengenoperatoren

Die Verknüpfung von Fuzzy-Mengen und ihren Elementen ist durch Fuzzy-Mengenoperatoren wie folgt definiert (KAHLERT & FRANK 1994, KRUSE et al. 1995).

FUZZY-MENGENOPERATOREN		
Mengenalgebra	Verknüpfung	Fuzzy-logische Operatoren mit $\forall x \in X, \mu_A(x) \in [0,1]$
Durchschnitt $\cap$	UND	$\mu_{A \cap B}(x) = \text{def } \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$
Vereinigung $\cup$	ODER	$\mu_{A \cup B}(x) = \text{def } \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$
Komplement $\bar{\phantom{x}}$		$\mu_{\bar{A}}(x) = \text{def } 1 - \mu_A(x)$

Tab. 25: Fuzzy-Mengenoperatoren

Wie Tab. 25 zeigt, sind die Fuzzy-Mengenoperatoren mit den mengentheoretischen Basisoperatoren der klassischen Logik Durchschnitt, Vereinigung und Komplementbildung, verwandt. Für die Modellierung des Durchschnitts zweier Mengen  $A \cap B$  (lies ‚A geschnitten mit B‘) wird der fuzzy-logische Minimum-Operator eingesetzt. Die Vereinigung zweier Mengen als  $A \cup B$  (lies ‚A vereinigt mit B‘) wird analog zur Fuzzy-Schnittmenge eingeführt. Statt der Minimumfunktion wird hier die Maximumfunktion genutzt.

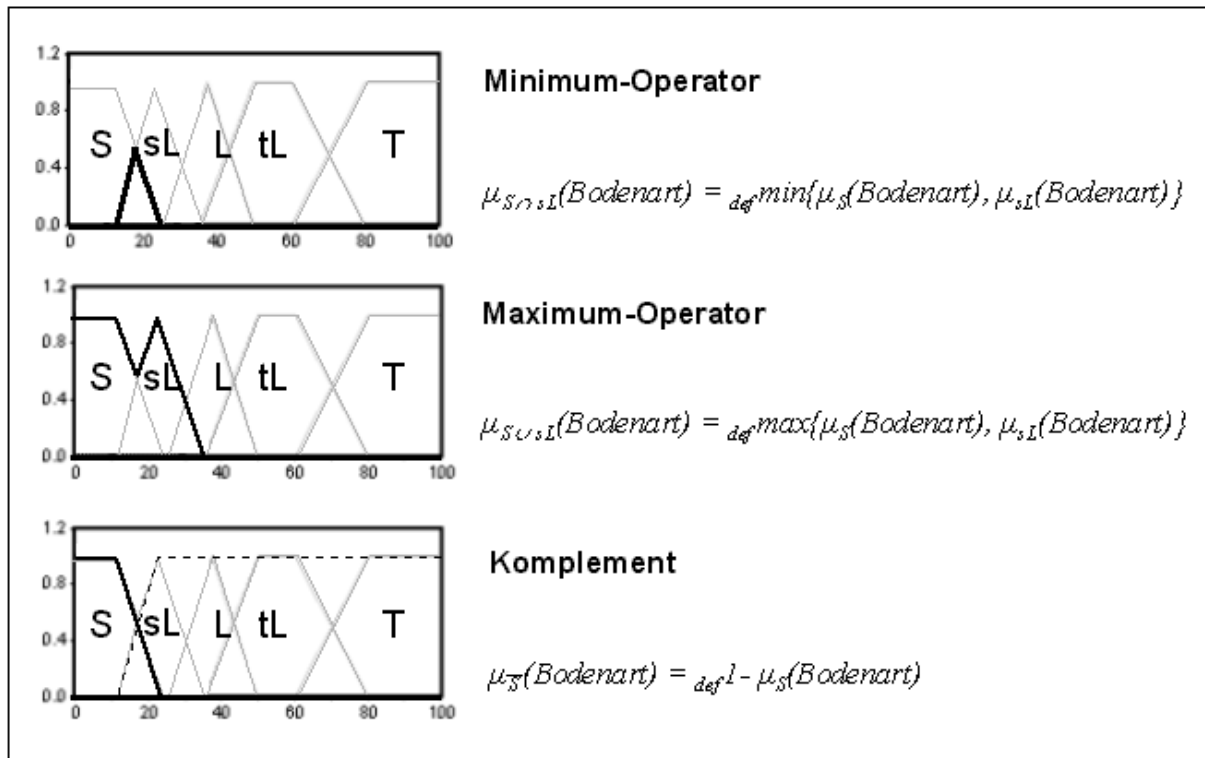


Abb. 10: Wirkungsweise von Fuzzy-Mengenoperatoren

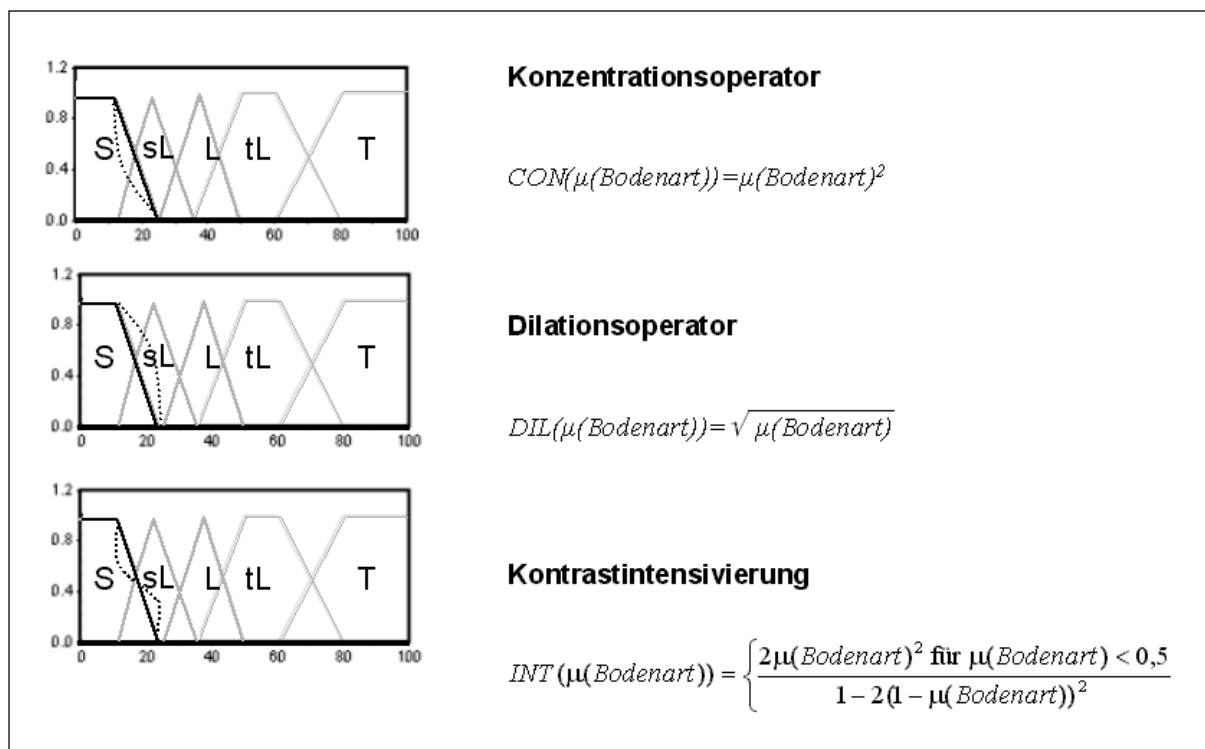


Abb. 11: Wirkungsweise von Modifikatoren

In der Abb. 10 sind die Wirkungsweisen der drei Fuzzy-Mengenoperatoren am Beispiel der modellierten Variablen Bodenart, d.h. dem prozentualen Gehalt der Böden an der Fraktion < 0,01 mm, dargestellt. Der Durchschnitt von sandiger und sandig lehmiger Bodenart wird mit dem Minimum-Operator gebildet. Für die Vereinigung von sandiger und sandig lehmiger

Bodenart wird der Maximum-Operator eingesetzt. Das Komplement der Bodenart *Sand* definiert die verbleibenden Terme *sandiger Lehm*, *Lehm*, *toniger Lehm* und *Ton*. Für alle drei Fuzzy-Mengenoperatoren sind die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen in der Abbildung markiert. Für die Feinmodellierung bestehender Regelsysteme in Fuzzy-(Experten-)systemen können so genannte Modifikatoren, eine spezielle Art von Operatoren, eingesetzt werden (Abb. 11). Sie erlauben eine differenzierte Verarbeitung von linguistischen Variablen und Termen und bilden mit spezifischen Formen von nichtlinearen Fuzzy-Sets Begriffe wie: *sehr*, *viel*, *mehr*, *weniger*, *stark*, *ziemlich*, *etwas* ab (KAHLERT & FRANK 1994, TRAEGER 1994).

### Fuzzy-Modellierung

Kennzeichen der Fuzzy-Modellierung ist die Berücksichtigung der mathematischen Grundlagen der Fuzzy-Set-Theorie und ihre Verknüpfung mit Kenntnissen der wissensbasierten Modellierung zur Entwicklung von Fuzzy-(Experten-)Systemen. Grundsätzlich ist die Modellierung von der Simulation zu unterscheiden. Bei der Modellierung stehen die Entwicklungsschritte eines Modells im Vordergrund. Die Simulation ist die Anwendung des Modells mit einer bestimmten Fragestellung und wird auch für Kalibrierung und Validierung des Modells verwendet.

Die vier Entwicklungsschritte eines Fuzzy-Modells illustriert die Abb. 12 (KAHLERT & FRANK 1994, modifiziert).

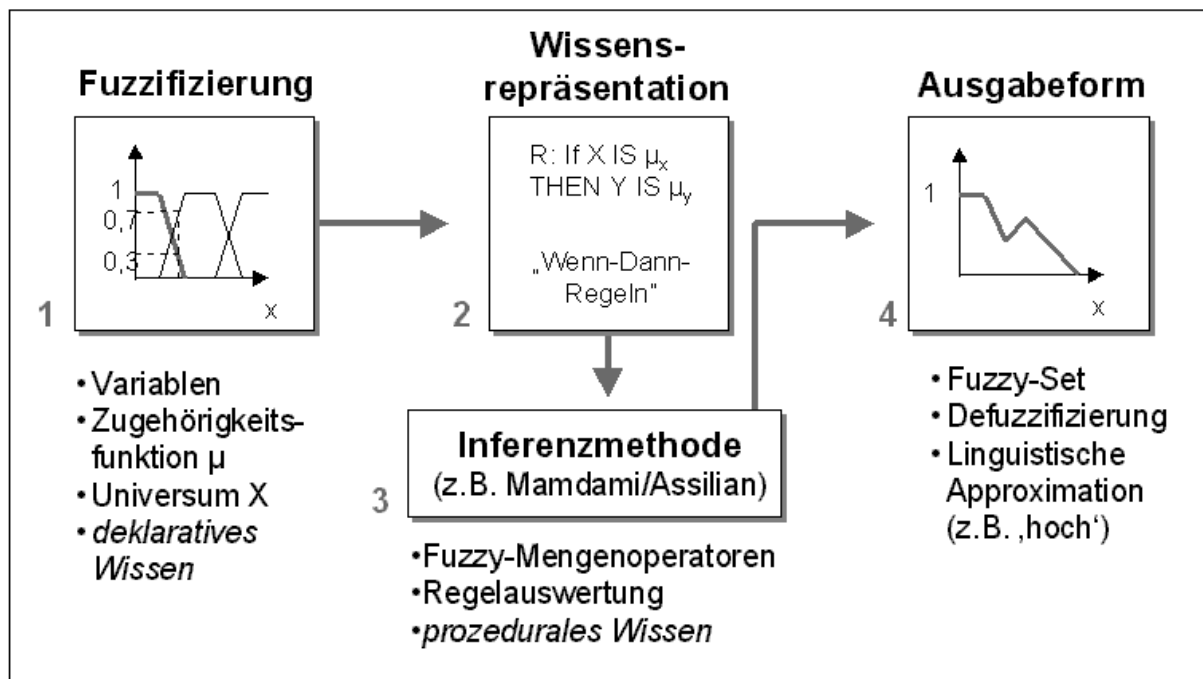


Abb. 12: Schritte der Fuzzy-Modellierung

Zu Beginn der Fuzzy-Modellierung steht die Deklaration der zu implementierenden Variablen. Hierbei handelt es sich um das deklarative Wissen, das eine numerische, symbolische oder linguistische Form aufweisen kann. Eine numerische Deklaration bedeutet, einer Variable einen festen Zahlenwert zuzuschreiben. Von einer symbolischen Deklaration spricht man, wenn Begriffe deklariert werden. Die Besonderheit von Fuzzy-Systemen besteht in der Deklaration von linguistischen Variablen. Eine linguistische Variable ist definiert als eine Variable, die Werte, die mit Bezeichnungen versehen sind (Terme), aus  $F(x)$  annehmen darf, wobei  $F(x)$  die Menge aller Fuzzy-Sets über dem Universum  $X$  bezeichnet.

**Fuzzifizierung** bezeichnet die Überführung von sprachlich formuliertem Wissen in algorithmische Berechnungsverfahren. Zur Charakterisierung einer Kenngröße wird i. A. ein ganzer Satz (zwei bis sieben) von Fuzzy-Sets benötigt. Die Bezeichnungen können sehr verschieden sein (PEDRYCZ 1996).

TYPEN VON LINGUISTISCHEN TERMEN	
LINGUISTISCHE VARIABLE	BEISPIEL FÜR TERME
Fuzzy modifiers	Sehr, mehr oder weniger, viel
Fuzzy predicates	Niedrig, jung, fair, moderate
Fuzzy probabilities	Häufig, gewöhnlich, selten, gelegentlich
Fuzzy possibilities	Ziemlich möglich, überwiegend unmöglich, plausibel
Fuzzy truth values	Sehr wahr, ziemlich wahr, größtenteils unwahr
Fuzzy relational operators	Größer, näher, weniger, mehr, jünger, älter

Tab. 26: Typen von linguistischen Termen

Der zweite Schritt der Fuzzy-Modellierung ist die Wissensrepräsentation, bei der mit z.B. ‚Wenn-Dann-Regeln‘ prozedurales Wissen in der Wissensbasis ablegt wird. Der dritte Fuzzy-Modellierungsschritt ist die Festlegung der **Inferenzmethode**.

Die Wahl der Ausgabeform ist der vierte Schritt der Fuzzy-Modellierung. Wie die obige Abbildung zeigt, kann dies auf unterschiedliche Weise geschehen. Einmal in grafischer Form als neu generiertes Fuzzy-Set oder als linguistische Approximation. Bei der linguistischen Approximation wird aus dem neu generierten Fuzzy-Set auf einen Term der linguistischen Variable geschlossen. Eine übliche Form der Ausgabekodierung in Fuzzy-Systemen ist die **Defuzzifizierung** (KAHLERT & FRANK 1994, TRAEGER 1994). Dabei wird ein generiertes Fuzzy-Set der Output-Größe mittels unterschiedlicher Defuzzifizierungsmethoden in numerische Werte überführt. Bei den meisten Fuzzy-Projekten ist die Flächenschwerpunktmethode (Center-of-Area, CoA) die am häufigsten eingesetzte. Weitere Methoden sind die ‚Center-of-Maximum‘ (CoM) oder die ‚Mean-of-Maximum‘ (MoM). Die Wahl der Defuzzifizierungsmethode beeinflusst den Ergebniswert. Liefern die CoA und die CoM Verfahren den besten Kompromiss, so liefert die MoM Methode die plausibelste Lösung.

### Fuzzy-Inferenzmethoden

Mathematisch betrachtet und wissenschaftstheoretisch argumentiert, bedingt logisches Schließen mindestens dreier Feststellungen: Eine Prämisse (1) als Bedingungsteil einer Regel, führt über einem Faktum (2), zu einer Konklusion (3). Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über Schlussfolgerungsschemata (SEIFFERT 1992).

SCHEMATA LOGISCHEN SCHLUSSFOLGERNS		
DEDUKTION	INDUKTION	ABDUKTION
1. Regel	1. Fall	1. Resultat
2. Fall	2. Resultat	2. Regel
3. Resultat	3. Regel	3. Fall
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beweisführung und Herleitung des Besonderen aus dem Allgemeinen</li> <li>• Sicheres Vorgehen (Grundgesamtheit (GG) <math>\tau</math> singuläres Ereignis, damit ist singuläres Ereignis Element von GG)</li> <li>• Ohne empirischen Gehalt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Induktion ist der Schritt vom Einzelnen (Besonderen) zum Allgemeinen. Die Induktion sucht nach dem Gemeinsamen innerhalb einer Gattung.</li> <li>• Unsicher Vorgehen (singuläres Ereignis <math>\tau</math> GG, Inter-, Extrapolation)</li> <li>• Mit empirischem Gehalt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beweisführung in Form erklärender Hypothesen.</li> <li>• Im Unterschied zur Deduktion ist der Schluss nur wahrscheinlich (wie bei der Induktion), erweitert aber die Erkenntnis, da er eine neue Idee im Denken hervorbringt und daher neue wissenschaftliche Konzeptionen ermöglicht.</li> </ul>

Tab. 27: Schemata logischen Schlussfolgerns

Beim deduktiven Schlussfolgern wird vom Allgemeinen das Besondere abgeleitet. Bei der Induktion erfolgt die Beweisführung umgekehrt. Von Abduktion spricht man bei einer Beweisführung in Form erklärender Hypothesen. In Analogie zu den in Tab. 27 aufgeführten logischen Schlussfolgerungsschemata entspricht der Modus ponendo ponens ( $A \rightarrow B, A \sim_{AL} B$ ) [lies: wenn A dann B, dem Fall A folgt aussagenlogisch (AL) B] dem deduktiven Schema. Hierbei resultieren aus wahren Prämissen wahre Konklusionen. Der Modus tollendo tollens ( $A \vee B, \neg B \sim_{AL} A$ ) [lies: A oder B, ist Fall nicht B, folgt aussagenlogisch A] entspricht dem induktiven Vorgehen. Modus tollens bedeutet ausschließendes Folgern (Fehlschluss), wie bspw. Fische haben Flossen. Ein Delphin hat Flossen, also ist ein Delphin ein Fisch. Falsch, denn Delphine sind eine Familie der Wale und damit Meeressäuger.

Die Schlussfolgerungsschemata in der Fuzzy Logic werden als Fuzzy-Inferenzmethoden bezeichnet. Sie sind Verarbeitungsvorschriften für Regeln bzw. ganze Gruppen von Regeln, die auf unscharfen Aussagen basieren. Die Wahl von ‚Wenn-Dann-Regeln‘ (‚If-then‘) als Wissensrepräsentationsformen hat sich in Fuzzy-Systemen als erfolgreich für approximatives

Schließen erwiesen. Der generalisierte Modus ponens hat die Form (SALSKI & KANDZIA 1996):

Regel	If x is A then y is B
Prämisse	x is A'
Schlussfolgerung	y is B'

Die Mengen A, A', B und B' sind Fuzzy-Sets. Im o. g. Fall kann A' die Prämisse A vollständig sowie auch nur teilweise erfüllen, so dass  $B' = A' \otimes R$ , mit dem Kompositionsoperator  $[\otimes]$  und der Fuzzy-Relation R ist. Der bedeutende Unterschied zur formalen Logik liegt in dem Vermögen der Fuzzy-Inferenz, auch ein Faktum, das unvollständig eine Prämisse erfüllt (z.B. A'), zu berücksichtigen und daraus approximativ zu schlussfolgern.

Aus dem Spektrum an Fuzzy-Inferenzmethoden hat sich in der Modellierungspraxis die nach Mamdami/Assilian bewährt. Seien X, Y Mengen und A eine Fuzzy-Menge über X, B eine Fuzzy-Menge über Y, so ist der Fuzzy-Implikationsoperator von Mamdami/Assilian definiert durch:

$$\text{imp}(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\} \quad x \in X, y \in Y$$

Auch im Fuzzy-Modellierungsunterstützungssystem xFLEco ist diese Fuzzy-Inferenzmethode implementiert (SALSKI & KANDZIA 1996, LEMSTER 2001). Die Software-Umgebung xFLEco wird in Kapitel 6 erläutert und kommt für die Modellierung und Simulation des hergeleiteten Konfliktripels Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft zum Einsatz. Das nachfolgende Beispiel demonstriert anhand von vier Variablen und zwei Regeln Schritte der Fuzzy-Inferenz.

Startbedingungen - crisp - : Bodenart: 20 %, Hangneigung: 5 %; GW-Flurabstand: 10 m gesucht: GW-Neubildung (TM 1)

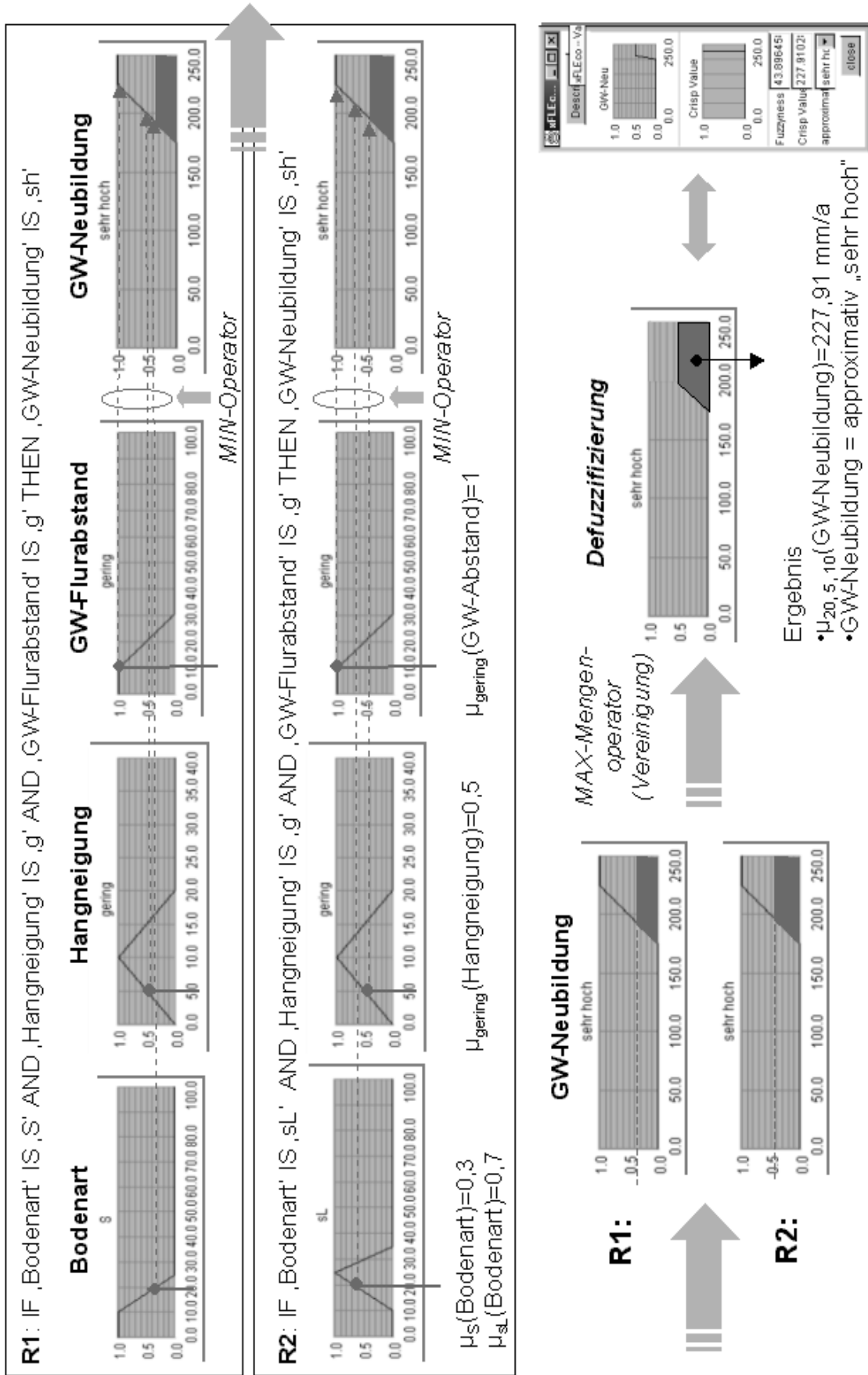


Abb. 13: Exemplarischer Ablauf einer Fuzzy-Inferenz



Für die exemplarische Fuzzy-Inferenz gelten numerische Startbedingungen. Aus den drei linguistischen Variablen: Bodenart, Hangneigung und Grundwasser-Flurabstand wird approximativ auf die Grundwasser-Neubildung geschlossen. Die linguistischen Variablen stammen aus dem implementierten Teilmodell 1 (Kap. 6). Die Prämissen der zwei dargestellten Regeln (R1, R2) sind in diesem Fall durch die Startbedingungen teilweise erfüllt und führen zum so genannten ‚Feuern‘ der Regeln. Die Auswertung der einzelnen Regeln erfolgt mit dem Minimum-Operator (Tab. 25), ihre Relation wird mit dem Maximum-Operator modelliert, woraus sich ein *gekapptes* Fuzzy-Set der Grundwasser-Neubildung resultiert. Die Defuzzifizierung mit der Flächenschwerpunktmethode berechnet einen Wert von 227, 91 mm/a. Die linguistische Approximation belegt eine *sehr hohe* Grundwasser-Neubildung.

Nachfolgend wird versucht, das in ‚Wenn-Dann-Regeln‘ gespeicherte Wissen zu veranschaulichen und damit verbundenen Aussagen nachzugehen. Für diesen exemplarischen Zweck wurden 20 Regeln und drei linguistische Variablen implementiert.

- a) Input-Variable: der Anteil der Bodenart an der Fraktion  $< 0,01$  mm mit den linguistischen Termen: Sand, sandiger Lehm, Lehm, lehmiger Ton und Ton
- b) Input-Variable: der Einsatz von Mineraldünger (kg/ha) mit den linguistischen Termen: sehr gering, gering, mittel und hoch
- c) Output-Variable: der landwirtschaftliche Ertrag (%) mit den linguistischen Termen: gering, mittel und hoch

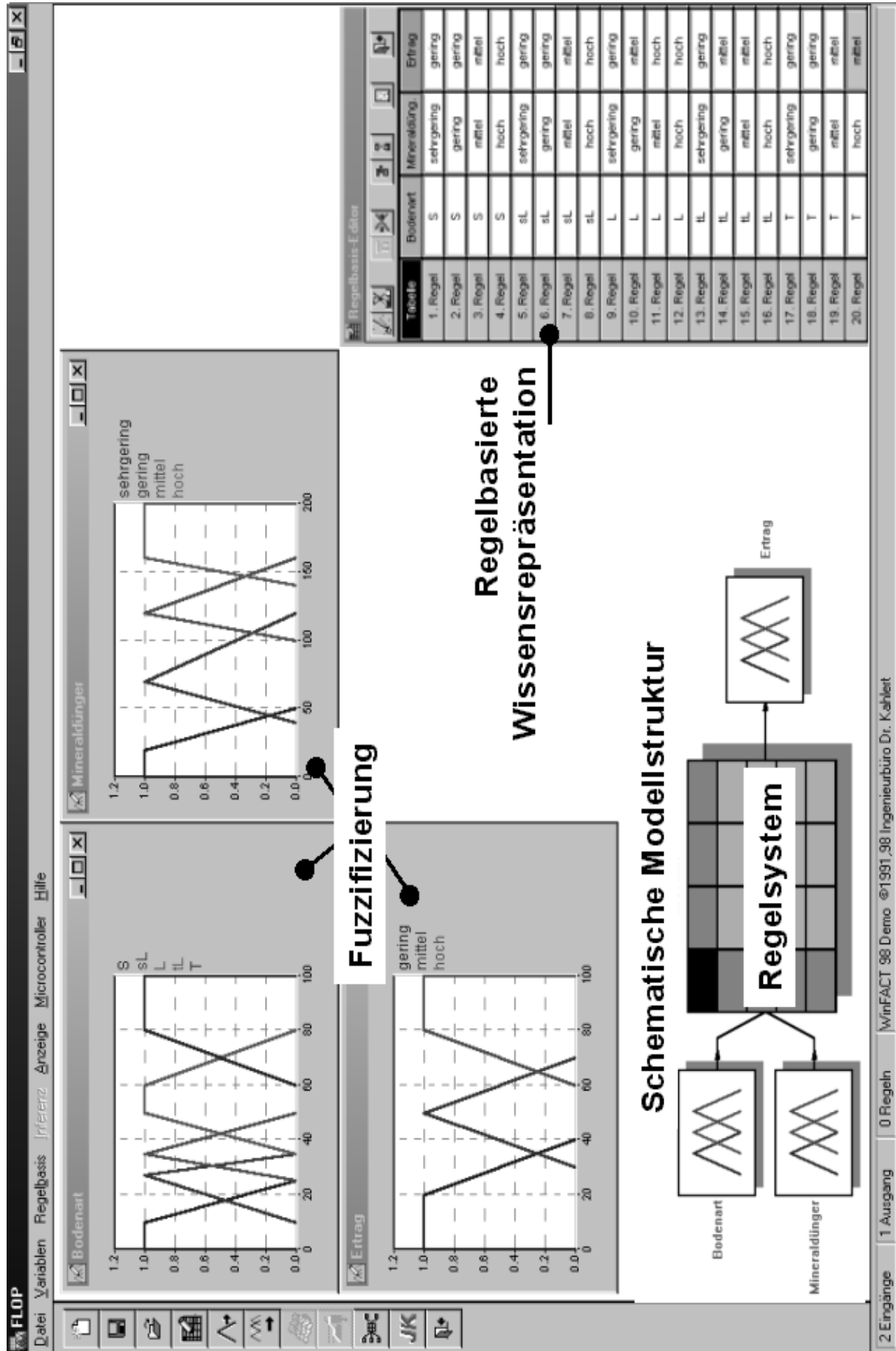


Abb. 14: Darstellung der regelbasierten Wissensrepräsentation und die drei fuzzifizierten Variablen

Die Wirkungsweise der Input-Größen auf die Output-Größe, repräsentieren, wie die Abb. 14 zeigt, 20 implementierte Regeln, die die 12 Terme der drei Variablen miteinander verknüpfen. Die nachfolgende Abbildung illustriert in 3-D Darstellung und anhand von drei Beispielen in der Draufsicht mit Isolinien die umgangssprachlich deklarierten ‚Wenn-Dann-Regeln‘. Flache Niveaus bedeuten vergleichbare Erträge bei minimalen Schwankungen der Eingangswerte. Steile Hänge bilden Gradienten des Ertrags aus und sind ein Beleg für veränderte Wertebelegungen und Klassenzugehörigkeiten der Input-Größen. Sanfte Anstiege repräsentieren unscharfe Klassenübergänge und sind ein Kennzeichen der Fuzzy-Modellierung.

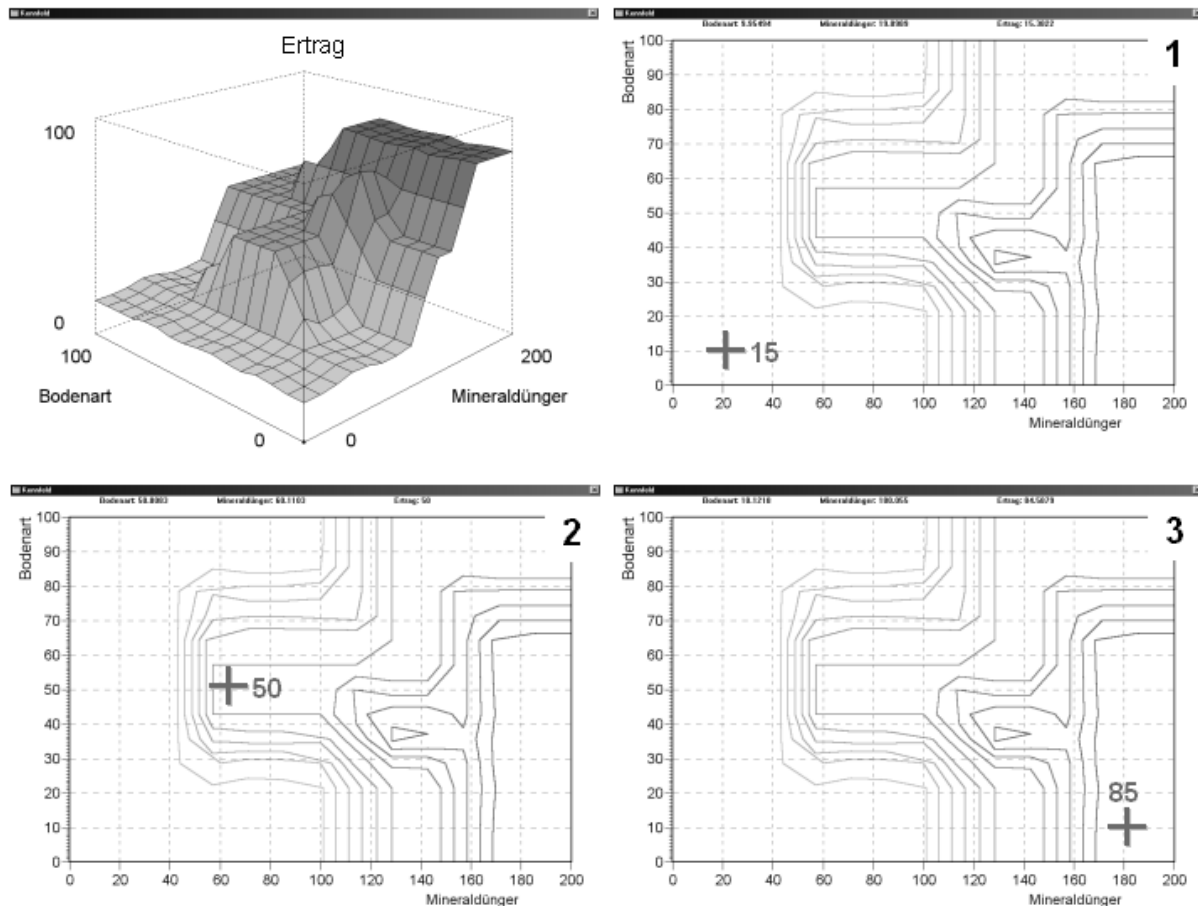


Abb. 15: Spektrum des Regelsystems in 3-D und Beispiele in 2-D Darstellung

Wie dem Beispiel 1 zu entnehmen ist, hat der Eintrag von bis zu 40 kg/ha Mineraldünger bei einem *lehmigen* Boden keinen wesentlichen Effekt auf den zu erwartenden Ertrag. Dargestellt ist die Situation mit 20 kg/ha Mineraldüngereintrag und einer sandigen Fläche. Ab einem Eintrag von größer 40 kg/ha (*gering*) steigt auf *lehmigen* Böden der Ertrag (50). Auf sandigen oder tonhaltigen Standorten ist dies erst ab einem *mittleren* Eintrag der Fall (Bsp. 2). Die Konstellation eines *hohen* Ertrages (85) im Beispiel 3, tritt nur ein, wenn der Mineraldüngereinsatz *mittel* oder *hoch* ist und zugleich die Bodenart *Lehm*, *lehmiger Sand* oder *Sand* ist. Die 3-D und 2-D Darstellungsweise des Regelsystems ist bei der Modellbildung eine unterstützende Technik, um die Konsistenz und Wirkungsweisen der implementierten Regeln zu verfolgen.

Der Einsatz der Fuzzy Logic bei der Datenverarbeitung oder Modellierung hat sich bewährt, wenn keine mathematischen Modelle existieren oder deren Entwicklung zu kosten- und zeitaufwendig ist sowie die Verfügbarkeit von Daten knapp oder die Qualität von Daten nicht hinreichend ist.

Die **Einsatzbereiche** der Fuzzy Logic waren zu Beginn der 70er Jahre überwiegend die Ingenieurwissenschaften in Japan und den USA. Erste Einsatzgebiete waren die Steuerungs- und Regelungstechnik (Fuzzy-Control) und Roboter-Sensorik (z.B. selbstregulierende Klimaanlage, Beschleunigung/Abbremsung der U-Bahn von Sendai in Japan, Kransteuerung in Häfen, Sensortechnik in Waschmaschinen, verwackelungsfreie Videokameras oder elektronische Blutdruckmessgeräte)(DRÖSSER 1996). Später kamen Einsatzgebiete in der medizinischen Bildverarbeitung, Schriftzeichenerkennung in der Logistikbranche (z.B. Postzustellung) und in den Wirtschaftswissenschaften (FIGGE 2000) hinzu.

In den Umweltwissenschaften und speziell in der Ökosystemforschung waren Kieler Experimente zur Fuzzy-Klassifikation, –Clusterung, –Modellierung und –Optimierung durch zahlreiche Untersuchungen wegweisend (BAI-LIAN 1996, BARTELS 1997, BOCK & SALSKI 1998, BUI 1993, DAUNICHT et. al 1996, FÖRSTER 1998, NEUBERT 1995, NÖHR 1995, PAASCH 1994, SALSKI & KANDZIA 1996, SALSKI 2000, SALSKI & NOELL 2001, SCHEPERS 1991, SPERLBAUM 1991). Weitere Konzeptionen und Modellsysteme stammen aus den Bereichen der Ökotoxikologie (FRIEDRICHS 1999), der Lärmbelästigung (BUDELL 1998), der Habitatmodellierung (LUTZE & WIELAND 1997), der raumbezogenen Landschaftsbewertung (GRABAUM & STEINHARDT 1998, ZHENG 2001), der Stickstoffmodellierung (MERTENS 2000) und Ökobilanzierung (POHL 1999, ROS 1998).

#### 4.3.4 Szenariotechnik

Szenarien beschreiben mögliche Entwicklungen in der Zukunft. Durch ihre Mischung aus analytischen und kreativen Elementen sind Szenarien mit Unsicherheit behaftet. Sie gleichen keiner statischen Beschreibung eines zukünftigen Zustandes, wie es *Leitbilder* tun, sondern beschreiben das Verhalten von Systemen als dynamische Ableitung alternativer Vorstellungen. Im Detail erläutert die nachfolgende Tabelle die Eigenschaften eines Szenarios (GAUSEMEIER & FINK 1999, STIENS 1996).

	SZENARIO IST...	... IST NICHT
<b>Ziel</b>	tiefere Verstandnis der Grenzen und Möglichkeiten zur Lösung des Problems	exaktes Wissen über die Zukunft
<b>Vorgehen</b>	problemnah und kontextorientierter Informationssammel- und Kommunikationsprozess	Daten- und Informationssammlung
<b>Methode</b>	systematische Problemstrukturierung unter Berücksichtigung externer Einflüsse und Entwicklungstendenzen	selektive Extrapolation von Einzel-trends und Prognose globaler Entwicklungen und Abschätzungen
<b>Ergebnis</b>	Handlungsoptionen vor dem Hintergrund alternativer Umfeldler	Handlungsanweisung zur Problemlösung
<b>Verwendung</b>	Entscheidungsgrundlage	Entscheidung

Tab. 28: Eigenschaften von Szenarien

Die **Ziele** der Szenariotechnik liegen in einem tieferen Verständnis des dynamischen Systemverhaltens in einer sich ändernden Systemumwelt (SCHOLLES 2001, STIENS 1996). Szenarien tragen mit ihrem holistischen Anspruch

- zum besseren Systemverständnis bei,
- motivieren zum Dialog zwischen Planern und Betroffenen,
- fördern eine Konsenskultur durch das Aufzeigen von Alternativen,
- können komplizierte Sachverhalte und Entwicklungen anschaulich darstellen und Wechselwirkungen identifizieren
- und verknüpfen quantitative mit qualitativen Fakten.

Anders als bei der Fortschreibung und Extrapolation historischer Zeitreihen, die auf rein quantitativen Fakten beruhen und von Einzelereignissen aus Prognosen berechnen, verknüpfen Szenarien quantitative Daten mit qualitativen Angaben zu einem umfassenden zukünftigen Systembild. Diese Visionen fußen überwiegend auf Einschätzungen und Meinungen, die

umgangssprachlich formuliert sind und qualitativen Charakter besitzen. Dabei beachten Szenarien externe gesellschaftliche Randbedingungen und interne wechselseitige Wirkungszusammenhänge. Eingesetzt werden Szenarien in Entscheidungssituationen umweltwissenschaftlicher Planungsverfahren, strategischer Unternehmensplanung und der Markt- und Meinungsforschung (GAUSEMEIER & FINK 1999, SCHOLLES 2001). Ihre Eigenschaft, aus ganzheitlichen Analysen mehrere denkbare alternative Handlungen abzuleiten, machen sie gerade in Zeiten raschen Wandels gesellschaftlich kritischer Bereiche wie dem Zustand der Umwelt, der Planung von Raumnutzungen oder Standortentscheidungen interessant. Szenarien müssen eine hohe Informationstransparenz besitzen und flexible und iterative Anpassungen an Systemveränderungen erlauben. Sie können die Entwicklung in eine bestimmte Richtung beschleunigen, allerdings sollten sie nicht zur ‚self-fulfilling prophecy‘ missbraucht werden.

Szenarien können nach folgendem Phasenschema entwickelt werden (GAUSEMEIER & FINK 1999, SCHOLLES 2001):

1. Aufgaben- und Problemanalyse, Definition des Szenariofeldes
2. Zerlegung des Szenariofeldes in einzelne Einflussbereiche mit Deskriptorenbestimmung: Deskriptoren bzw. Kenngrößen beschreiben die Einflussdynamik der Einflussfaktoren. Diese können quantitativ (z.B. Anzahl der Pkw pro 100 Einwohner, Pkw-Dichte) oder qualitativ (z.B. Einstellung der Bevölkerung zum Auto: ‚positiv‘, ‚neutral‘, ‚negativ‘) sein. Im Sinne einer Stärken-Schwächen-Analyse lassen sich zwei Extremsituationen (Best-/Worst-Case) identifizieren.
3. Trendprojektionen und Faktorenbündelung: Bündelung der Faktoren, in die, die sich gegenseitig unterstützen und verstärken, diejenigen, die sich gegenseitig neutralisieren, und diejenigen, die sich gegenseitig in Einflussmatrizen ausschließen. Darin lassen sich Aktiv- und Passivsumme bilden. Erstere zeigt an wie stark ein Einflussfaktor auf andere Faktoren insgesamt Wirkung zeigt. Letztere beschreibt die Intensität, mit der andere Faktoren von einem Einflussfaktor beeinträchtigt werden. Die Ergebnisse können der Übersichtlichkeit wegen in einem so genanntem System-Grid mit Koordinatenkreuz dargestellt werden. Dieses Koordinatenkreuz unterteilt das Grid in vier, je nach Situation, unterschiedlich große Bereiche. Die Trennlinien zwischen den vier Bereichen definieren sich durch die mittlere Aktiv- bzw. Passivsumme aller Einflussfaktoren.
4. Szenarioentwicklung und –interpretation: Synthese der Fakten der vorangegangenen Phasen und Aufspannen eines Szenarienspektrums zwischen einem Best- und einem Worst-Case-Szenario. Ableiten von Trendpfaden, räumlichen Grenzen und Zeithorizonten.
5. Maßnahmen und Handlungsmöglichkeiten: Ableitung möglicher Konsequenzen und konkreter Handlungen, die die normativ gesetzten Entwicklungslinien unterstützen.

Das Spektrum von Szenarientypen ist sehr groß. Ein Unterscheidungsfaktor ist die Variable Zeit. Handelt es sich um die Darstellung eines festen Zeitpunktes, dann spricht man von einem Punktszenario bzw. Situationsszenario. Sind Zeiträume Gegenstand der Analyse, dann

führt die Entwicklung zu Pfadszenarien oder Prozessszenarien. Im Allgemeinen sind Szenarien explikativ, sind von einem Status Quo aus in die Zukunft gerichtet, bieten sich zur Entscheidungsunterstützung an und zeigen konkrete Handlungsmöglichkeiten auf. Antizipativ ist ein Szenario, wenn zukünftige Zustände vorweggenommen werden und rückwärtsgerichtet nach den Entwicklungsverläufen gefragt wird. Analog zu unterschiedlichen Aussageformen von Modellen und betriebswirtschaftlicher Entscheidungstheorie, sind Szenarien zu differenzieren in deskriptive und normative, besitzen also einen präskriptiven Charakter. Erstgenannte entsprechen einer möglichst objektiven Analyse, während letztgenannte bereits gesetzte Ziele implizieren.

Drei Grundtypen von Szenarien werden unterschieden:

- Best-Case-Szenario: Dieses positive Extremszenario bezeichnet die günstigste Zukunftsentwicklung
- Trend-Szenario: Der Begriff wird hier und im Folgenden im eingeschränkten Sinne verwendet und bezeichnet die Fortschreibung der heutigen Situation in die Zukunft
- Worst-Case-Szenario: Dieses negative Extremszenario bezeichnet den schlechtestmöglichen Entwicklungsverlauf und stellt damit den Gegenpol zum Best-Case-Szenario dar.

Die Bündelung von einzelnen Trends zu Trendclustern, führt jeweils in einzelnen Teilbereichen der Gesellschaft zu disziplinären ‚Visionspuzzleteilen‘, die dann zusammengesetzt zu möglichen vorausschauenden Leitbildern künftiger Gesellschaften generiert werden können. Diese Art von Szenarien kommt den Trendextrapolationen und punktuellen Prognosen methodisch nah. Alternativszenarien gehen von so genannten ‚Was-wäre-wenn-Fragen‘ aus und ‚spielen‘ Entwicklungsmöglichkeiten unter hypothetischen Annahmen und Rahmenbedingungen durch.

**Nachteilig** bei der Szenariotechnik ist ihr relativ geringes theoretisches Fundament, ihr geringer Formalismus, sowie der hohe Zeit- und Kostenaufwand durch Einbeziehung von Experten und Befragungen. Die Technik ist nicht vollkommen wertfrei und zeigt damit qualitativen und subjektiv geprägten Charakter (GAUSEMEIER & FINK 1999).

## 4.4 Werte, Bewertung und Entscheidung

### 4.4.1 Werte und Maßstäbe einer Gesellschaft

Werte und Ziele einer Gesellschaft unterliegen einem dynamischen Wandel. Politik und Rechtsform eines Staats gelten dabei vorwiegend als Rahmenbedingungen. Die nachfolgende Tabelle fasst unterschiedliche Werte, Kriterien und Beispiele zusammen (FÜRST & KIEMSTEDT 1997, THEOBALD 1998).

WERTE EINER GESELLSCHAFT		
WERT	KRITERIUM	BEISPIELE
ökonomisch	materieller Nutzen	Nahrung, Rohstoffe
ökologisch	ökologische Funktion	Bodenbildung, Sauerstoffproduktion
sozial	Mitmenschlichkeit	Gemeinschaft, Kooperation, Gerechtigkeit
ästhetisch	Schönheit, Seltenheit	Artenvielfalt, Rote Liste
psychisch	Wohlbefinden	Phänologische Landschaftsgliederung
rekreativ	Erholung	Naherholungs- und Urlaubsgebiete, Parks

Tab. 29: Werte einer Gesellschaft

In der Identifizierung dieser Werte und Abgleich mit ihrer Erfüllung liegt der Schlüssel für zahlreiche ökologische Probleme und Chancen für eine Konkretisierung und Operationalisierung Nachhaltiger Entwicklung. Menschen streben Idealen nach, die sich in Wohlstand oder Lebensqualität äußern, jedoch in ihren Auswirkungen die Struktur, das Verhalten und die Dynamik ökologischer Systeme verändern und belasten können. Zwei wissenschaftstheoretische Positionen beschreiben den Spannungsbogen zwischen Mensch und Natur. Diese sind einerseits der utilitaristische und andererseits der ökozentrische Standpunkt. Letzterer sieht die Natur mit Flora und Fauna im Mittelpunkt und räumt ihr grundsätzlich gegenüber menschlichen Bedürfnissen einen Vorrang ein. Der utilitaristische Standpunkt verfolgt bei jedem Denken und Handeln stets einen Nutzen. Diese, der Nützlichkeitslehre folgende Sichtweise, liegt inhaltlich nahe dem in der obigen Tabelle beschriebenen ökonomischen Wert. Vergleichbar der oben so genannten Funktionalisierung von Bestandteilen ökologischer Systeme, werden selbige erst durch menschliche Bedürfnisse und Wertschätzungen zur ausbeutbaren Ressource. BIRNBACHER (1998) spricht in diesem Zusammenhang von instrumentellen Naturwerten.

**Leitbilder** (=ideale, richtungsweisende Vorstellungen) beschreiben immer einen Zielzustand, der notwendigerweise in der Zukunft liegen muss. Unter Zuhilfenahme von Metaphern können Vorstellungen über einen wünschenswerten *Sollzustand* erreicht werden. Wesentlich dabei ist, dass es sich nicht um isolierte Forderungen handelt, sondern dass damit richtungsweisende Vorstellungen (Visionen) verbunden sind. Leitbilder werden mit langfristiger Per-



spektive formuliert, im gesellschaftlichen Konsens beschlossen und gleichen überwiegend normativen Setzungen. Als globales Leitbild wurde 1987 die Nachhaltige Entwicklung manifestiert (WCED 1987). **Wert- und Zielsysteme** enthalten eine strukturierte Menge von Zielaussagen, die hierarchisch auf verschiedenen Konkretisierungsebenen (z.B. Ober-, Unter-, Teilziel) angeordnet ist und auf (überwiegend visionären) Wertvorstellungen beruht (BECHMANN 1981, FÜRST & KIEMSTEDT 1997).

Das Umweltbundesamt in Deutschland hat Leitbilder und Indikatoren in einer Hierarchie entsprechend ihres Abstraktionsgrades und Fristigkeit geordnet (SRU 2000, UBA 1999). Leitlinien konkretisieren Leitbilder und beschränken sich bewusst auf ausgewählte Problemfelder und Disziplinen. Umweltqualitätsziele (UQZ) charakterisieren eine angestrebte Qualität der Umwelt näher und enthalten sowohl naturwissenschaftliche als auch gesellschaftliche Aspekte. Umweltqualitätsstandards (UQS) sind aus UQZ abgeleitete und operationalisierte bzw. quantifizierte Werte. Umwelthandlungsziele (UHZ) beschreiben notwendige Schritte, um die durch Umweltqualitätsziele vorgegebenen Zustände und Eigenschaften der Umwelt zu erreichen. UHZ setzen an quantitativen Zielvorgaben an und beziehen sich auf Verursacherebereiche, also in der Regel die Emittenten. Umwelthandlungsziele sind damit konkrete Bewertungsmaßstäbe zur Bestimmung von Schutzwürdigkeit und angestrebter Qualität, indem sie für einen bestimmten Parameter bzw. Indikator Ausprägung, Messverfahren und Rahmenbedingungen festlegen. Voraussetzung für die Standardsetzung ist also die Existenz eines Parameters oder Indikators (z.B. SO<sub>2</sub> oder Wassergüte), der gemessen werden kann (z.B. mit Messgeräten oder Saprobien) (FÜRST & KIEMSTEDT 1992).

Kernaussage des Paradigmas einer Nachhaltigen Entwicklung ist ein ausgewogenes Gleichgewicht von wirtschaftlichem Wachstum, gesellschaftlichem Wohlstand und intakter Umwelt. Darin einordnen lassen sich die so genannten **Daseinsgrundfunktionen**. Diese entsprechen fundamentalen menschlichen Daseinsäußerungen bzw. Aktivitäten, die allen sozialen Schichten immanent und räumlich und zeitlich messbar sind. Sie stellen o. g. Werte als Raumansprüche dar und bilden sozialgruppenspezifische sowie regional differenzierte Struktur- und Prozessmuster. In der Raumforschung ebenso wie in der Humangeographie dienen sie als Ordnungsschema für eine inhaltliche Gliederung nach funktionsbezogenen Teildisziplinen (LESER 1997, PARTZSCH 1970). Zu den fünf Daseinsgrundfunktionen zählen: Wohnen, Bilden, Arbeiten, Versorgen und Erholen. Mobil sein und Kommunizieren sind als Grundbedürfnisse raumbedeutsamen Handelns nachträglich hinzugekommen. Alle sieben stehen mindestens mit einer aktuellen Flächennutzungskategorie im Ordnungszusammenhang (FRÄNZLE et al. 1992, PARTZSCH 1970, STABU 2001).

<b>GEGENÜBERSTELLUNG VON NUTZUNGSKATEGORIEN UND TYPEN VON ÖKOSYSTEMEN</b>				
<b>Nutzungskategorie</b>	<b>Fläche [km<sup>2</sup>]</b>	<b>Anteil [%]</b>	<b>Terminologie der ökologisch orientierten Planung (FRÄNZLE et al. 1992)</b>	<b>Daseinsgrundfunktionen</b>
Fläche v. Deutschland	356 970	100,00		
Landwirtschaftsfläche	195 433	54,70	Landwirtschaftliche Nutzung	<u>Versorgen</u> , Arbeiten
Waldfläche	104 326	29,20	Forstwirtschaftliche Nutzung	Arbeiten, Er- holen,
Siedlungs- und Freiflächen	20 657	5,80	Landschaftsverbrauchende Nutzung	<u>Wohnen</u> , Ar- beiten, Ver- sorgen, Bilden
Verkehrsfläche	16 327	4,60	Landschaftsverbrauchende Nutzung	<u>Mobilität</u> , Erholen
Wasserfläche	7 798	2,20	Wasserwirtschaftliche Nutzung	<u>Versorgen</u> , Erholen
Betriebsfläche	2 428	0,70	Landschaftsverbrauchende N.	Arbeiten
Erholungsfläche	2 307	0,60	Erholungsnutzung	Erholung
Flächen anderer N.	7 694	2,20	Entsorgende Nutzung	div.

Tab. 30: Gegenüberstellung von Flächennutzungskategorien und Daseinsgrundfunktionen

#### 4.4.2 Integrative Bewertung: ökologisch, ökonomisch, rechtlich und sozial

Bewertungen haben im Rahmen raum- und umweltplanerischer Arbeitsschritte und wissenschaftlicher Forschungsabläufe eine bestimmte Stellung inne. Vereinfacht lassen sie sich in einer idealisierten Assoziationskette beschreiben: Problemwahrnehmung, Fragestellung, Hypothesenbildung, Messung, Systemanalyse, Modellierung, *Bewertung*, Simulation, Kalibrierung, Validierung, Prognose, Problemlösung, Interpretation, Empfehlung, *Entscheidung*, Handlung und Umsetzung (BECHMANN 1981, HERZOG 2000). Die einzelnen Arbeitsschritte bedingen jeweils den vorherigen, weshalb planungsrelevante Bewertungs- und Entscheidungsmodelle in der Hierarchie der Modellklassen sehr weit oben angesiedelt sind.

Bewerten bedeutet: Etwas mit einem Wert, z.B. monetär, ästhetisch, emotional, religiös, logisch (wahr oder falsch) oder Güterwert zu belegen. Werte sind somit theoretische Konstrukte, die sich aus Zielen ergeben, d.h. Werte implizieren Ziele (z.B. Schutz, Erhaltung, Nutzung). Es handelt sich dabei um axiologische Aussagen (Wertaussagen), die dieselbe logische Struktur wie Sollensaussagen (deontologische Aussagen) besitzen: Ein empirisch beschreibbarer Sachverhalt hat einen Wert, und positiv bewertete Sachverhalte dienen als Ziel der Verhaltenssteuerung. Der Vorgang des Bewertens kann als eine mindestens vierstellige Relation aufgefasst werden: Jemand (1)(Subjekt) bewertet etwas (2)(Objekt/Sachmodell) anhand bestimmter Kriterien (3)(Maßstäbe) mit einem bestimmten Ziel (4)(Wertmodell).

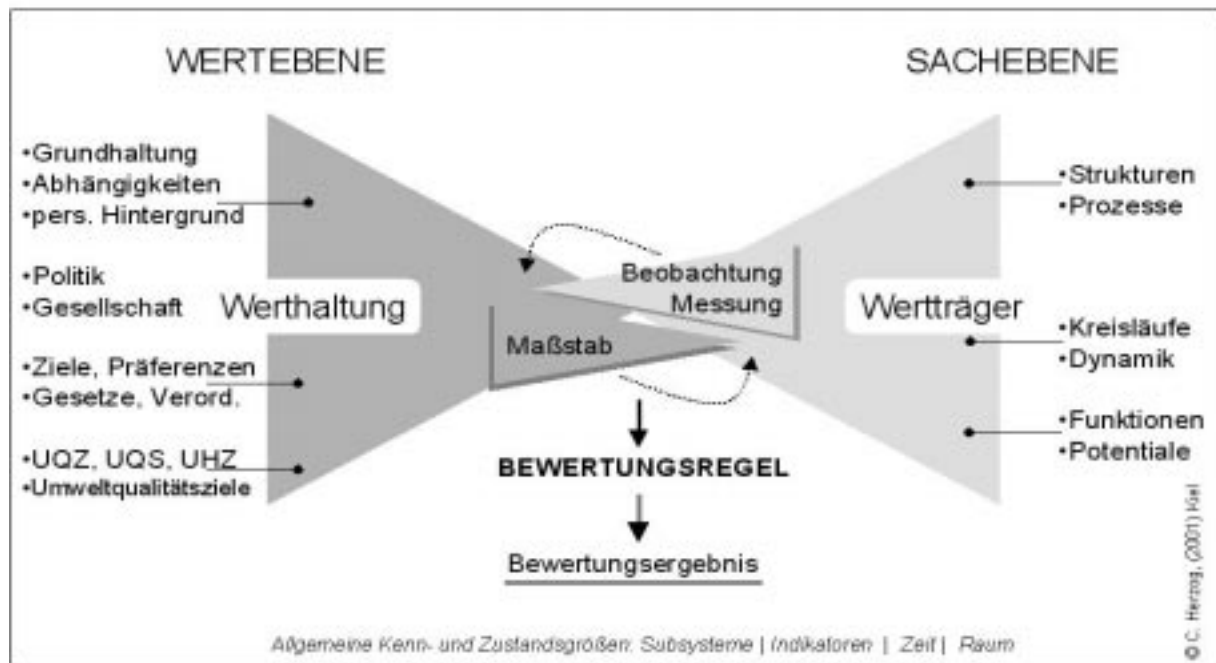


Abb. 16: Schema eines Umweltbewertungssystems mit Sach-, Wertmodell und Bewertungsregeln

Die obige Abbildung skizziert rechtsseitig das zu bewertende Objekt, welches sich aus mehreren Komponenten auf der Sachebene, möglichst den Gütekriterien von Mess- und Bewertungsverfahren genügend, zu einem Sachmodell zusammensetzt. Ein **Sachmodell** besitzt keinen normativen Charakter, sondern beschreibt den Untersuchungsgegenstand möglichst objektiv und wertfrei und ist intersubjektiv überprüfbar zu konstruieren (FRÄNZLE & FRÄNZLE 1993, POSCHMANN et al. 1998, THEOBALD 1998). Im Verständnis von Umweltbewertungssystemen können Ökosysteme als natürliche Wertträger, d.h. natürliche Lebensgrundlagen und Ressourcen im Sinne von Ökosystem-Gütern und Ökosystem-Dienstleistungen, Bestandteile von Sachmodellen sein. Das linksseitig abgebildete **Wertmodell** beinhaltet Werthaltungen und –maßstäbe, die auf subjektiven Grundhaltungen und Präferenzen beruhen. Diese können z.B. Umweltqualitätsziele, umweltpolitische Forderungen oder rechtliche Rahmenbedingungen sein. Diese vorwiegend im gesellschaftlichen Konsens oder in Gesetzen niedergeschriebenen Werte, bilden die Grundlage für Maßstäbe. Bewertungsmaßstäbe sind skalierbare Verbindungen zwischen Wert- und Sachebene. Die jeweilige Beschaffenheit des Maßstabes verlangt einen adäquaten Umgang mit den Variablen und steht in engem Verhältnis zu den Wertsystemen und der Messbarkeit von Merkmalsausprägungen des Sachverhaltes. Der eigentliche Bewertungsschritt erfolgt in der Abbildung des Ergebnisses einer Messung oder Beobachtung anhand von Bewertungskriterien auf einen Maßstab. Die ineinandergreifenden kleinen Dreiecke und gepunkteten Pfeile deuten diesen Sachverhalt an. Daraus lassen sich Bewertungsregeln ableiten, die dann zum Bewertungsergebnis führen.

Bei **integrativen Bewertungen** ist die adjektivistische Kennzeichnung in zweifacher Hinsicht auslegbar. Zum einen in der Zusammenführung verschiedener relevanter Bewertungsaspekte, wie beispielsweise umweltrechtlicher Rahmenbedingungen und sozioökonomischer Bezüge

und zum anderen im system- und modelltheoretischen Verständnis bei der Umweltmedien übergreifenden Betrachtung der Bewertungsgegenstände – Ökosysteme – und ihrer Parametrisierung. Die Durchführung von Bewertungen und Entscheidungen unter Beachtung rechtlicher Belange setzt die Kenntnis der aktuellen Rechtslage in Deutschland voraus. Bislang beschreiben und interpretieren die Rechtswissenschaften den Untersuchungsgegenstand Ökosysteme vorwiegend getrennt nach ihren Kompartimenten, z.B. Bodenschutzrecht, Gewässerschutzrecht (KAHL & VOBKUHLE 1998). Ein großes Defizit besteht in der weit verbreiteten systemaren, vernetzten Sichtweise der Untersuchungsgegenstände in der Ökosystemforschung und der bislang unzureichend in ähnlichem Umfang zu leistenden rechtlichen Umsetzung (z.B. ‚Ökosystemenschutzrecht‘).

Im Hinblick auf das in dieser Untersuchung durchgeführte Fallbeispiel (Konflikttripel: Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung, Wasserwirtschaft (Kap. 5, 6) werden nun rechtliche Bezüge zum Boden als wesentlichem Funktionsträger dargelegt. VON MUTIUS & STÜBER (1998) bekräftigen aus juristischer Sicht die Schützensmöglichkeit und –würdigkeit von Umweltgütern. Sie heben zugleich hervor, dass Umweltgüter nicht per se Rechtsgüter sind, sondern dies erst durch **Verrechtlichung** werden. Dieser Schritt, nämlich die Unterschützstellung ökosystemarer Sachverhalte, bedarf im strengen Sinne der Detailkenntnis des zu schützenden Gutes und damit dem notwendigen Zusammenwirken von Personen aus den natur-, rechts-, sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Disziplinen. VON MUTIUS (1992) verdeutlicht dies am Beispiel des Bodens durch das Zusammenwirken von Werten und Sachgütern bei unmittelbaren Vorschriften, wie z.B. im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), Bundesberggesetz (BBergG). Mittelbare Vorschriften sind im Bundeswaldgesetz (BWaldG) zu finden. Weiterhin kann die Güte des Bodens geschützt werden durch Planungsnormen. Für Siedlungs-, Verkehrs- und Gewerbeziele existieren Vorschriften z.B. im Raumordnungsgesetz (ROG) und Baugesetzbuch (BauGB). Weitere insgesamt 28 Rechtsvorschriften mit bodenschützendem Inhalt sind HERZOG (1998) zu entnehmen. Gemäß MUTIUS (1992) ist mit dem Boden entsprechend der Umweltgüter Luft und Wasser zu verfahren. Gemäß dem Grundsatz ‚ein Gegenstand – ein Gesetz‘ ist mittlerweile mit dem erlassenen Bundes-Bodenschutzgesetz (17.03.1998) nun auch der Schutz dieses Mediums als Funktions- und Wertträger geregelt. Die Verrechtlichung von Umweltgütern geht einher mit der Frage der Normierbarkeit (v. MUTIUS & STÜBER 1998). Aufgrund der komplexen und vielschichtigen Struktur, Dynamik und Funktion von Ökosystemen bedingt die Normierung eine abstrakt-generelle Rechtsprechung. Dies führt zu metasprachlichen Vereinfachungen und semantischen Verdichtungen von Umweltqualitätszielen zu Normwerten unterschiedlicher Bindungsstärke (Orientierungs-, Richtlinien-, Grenzwerte).

Somit sieht sich der praktische Planer bei der Rechtsanwendung zahlreichen so genannten **unbestimmten Rechtsbegriffen** gegenüber. Ein Dissens entsteht bei der Anwendung der Rechtsvorschriften im praktischen Vollzug und dem Versuch der Auslegung oder messbaren

Unterschutzstellung von Semantiken unbestimmter Rechtsbegriffe. Als Beispiele seien z.B. ‚Schutz der Nutzungsfunktion des Bodens (BBodSchG §2)‘, oder ‚Nutzungsfähigkeit der Naturgüter (BNatSchG §1)‘ genannt. Zu diesen Begriffen existiert rechtlich keine eindeutige Definition. Die Gesetzesanwendung liegt somit häufig im Ermessen des Bearbeiters und der jeweiligen Fragestellung der Untersuchung. Damit ist jedoch auch belegt, dass gesetzliche Reglementierungen menschliches Verhalten nur eingeschränkt zu steuern vermögen. Unbestimmte Rechtsbegriffe können im übertragenen Sinne nach LINNEWEBER & KALS 1999 als eine Kommunikationsbarriere wirken, denn sie hemmen das von vielen Seiten geforderte transdisziplinäre Verständnis. Als Folge könnten Nichtbeachtungen rechtlicher Belange bei Bewertungen und Entscheidungen auftreten und mit einer Zuwendung zu monodisziplinärer und sektoraler Umweltbewertung einhergehen.

**Umweltgerechtes Handeln** kann sich somit verbessern, indem das Bewusstsein jedes einzelnen Akteurs für die Problematik sensibilisiert und mögliche Folgen prognostiziert werden. Für die Förderung eines umweltgerechten Handelns bieten sich neben der Integration umweltrechtlicher auch umweltökonomische an. Dieser Thematik und einer möglichen Monetarisierung von Umweltgütern widmet sich HAMPICKE (1998). Bei der **Monetarisierung** besteht eine Analogie zum eben erwähnten Ablauf der Verrechtlichung von Umweltgütern und stärkt damit das Prinzip, dass disziplinäre Sichtweisen die Wahrnehmung der Umwelt und ihrer Bewertung bestimmen. Ökonomische Bewertungen fußen überwiegend auf der sehr individualistischen neoklassischen Werttheorie. Sie geht davon aus, dass ein Akteur seine Wertschätzungen ausdrücken und gegenüber Substituten abwägen kann. Im neoklassischen Bewertungsansatz übernimmt Geld die Rolle eines praktischen Tauschmittels und dient der vergleichenden Verrechnung unterschiedlicher Ausprägungen auf einer absoluten Skala. Dies fördert stringente und nachvollziehbare Bewertungen als Grundlage von Entscheidungen. Problematisch und zugleich unscharf wird die Monetarisierung von Funktionen oder Eigenschaften von Ökosystemen, deren Veränderungen oder anthropogener Nutzen nicht direkt messbar sind. HAMPICKE (1998) spricht in diesem Zusammenhang von Grenzen der Monetarisierung durch u.a. Unberechenbarkeiten ökosystemarer Sachverhalte, wie z.B. Naturschönheit oder Erholungserlebnis. Weitere Grenzen der umweltökonomischen Bewertung belegen Nichtsubstituierbarkeiten von Gütern, die für Menschen lebensnotwendig sind, wie saubere Luft, Trinkwasser und Böden. Aus ökonomischer Sicht kann Bewertung als eine Grundlage für umweltgerechtes Handeln gefördert werden durch die Ermittlung von Zahlungsbereitschaft für die Verbesserung von Umweltgütern (z.B. Gewässerqualität) oder die Unterschutzstellung von Landschaften (z.B. Nationalpark), oder auch durch ökonomische Anreizmittel, wie z.B. Emissionszertifikate, oder steuerliche Erleichterungen (BINDER 1999).

## 4.5 Integration der Methoden zur Entscheidungsunterstützung

Das Methodenpaket IeMAX geht von einem ökonomischen Bedarf an begrenzt zur Verfügung stehenden natürlichen Ressourcen aus. Seine Spezifika liegen einerseits in der Zusammenstellung der Methoden selbst und andererseits in dem Zusammenwirken über die Bausteine Systemanalyse, Modellierung und Bewertung hinaus.

Beginnend mit der **Systemanalyse** werden Messbarkeit und Parametrisierung des Verhaltens von z.B. Agrar-, Gewässer- und Siedlungsökosystemen geprüft. Mit einer Differenzierung von quantitativen und qualitativen Systemgrößen wird auf die Komplexität ökosystemarer Sachverhalte und den Grad der Strukturierung der Entscheidungssituation reflektiert. Der DPSIR-Wirkungskreis dient der Darlegung von steuernden und reagierenden Kenngrößen. Die fünf Statusgruppen Driving force, Pressure, State, Impact und Response, belegen Zusammenhänge im Systemverhalten und dienen als Schnittstelle zwischen den Bausteinen Modellierung und Bewertung. Die so genannte Funktionalisierung dient der Feststellung von Zweckmäßigkeiten und Zuschreibungen anthropogener Ansprüche an natürliche Ressourcen. Für eine nachhaltige Raumentwicklung wird als Indikandum die ökosystemare Multifunktionalität anhand spezieller Teilfunktionen, wie z.B. Produktionsfunktion (Landwirtschaft), Regulationsfunktion (Wasserwirtschaft) und Infrastrukturfunktion (Siedlungsentwicklung) als Bewertungsmaßstab konstruiert. Diese Funktionalisierung dient zugleich als Scharnier zwischen Sach- und Wertebene in einem Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystem.

Der Baustein **Modellierung** steht im Zentrum von IeMAX. Mit der Fuzzy Logic, der Expertensystemtechnik, der Szenariotechnik und dem Wissensmanagement ist eine Formalisierung und Simulation von Entscheidungssituationen das Ziel. Das Wissensmanagement erlaubt eine komplementäre Verarbeitung von quantitativen und qualitativen Fakten. Im Rahmen von IeMAX fällt dem Wissensmanagement eine besondere Rolle zu, denn beabsichtigt ist eine ebenso sachgerechte wie entscheidungsrelevante Komplexitätsreduktion von Entscheidungssituationen. Das bedeutet, das Problemlösungswissen für möglichst alle Beteiligten am Raumnutzungskonflikt zur Grundlage wertschöpfenden Handelns zu machen. Aus dem Forschungsbereich der Künstlichen Intelligenz ist es die Expertensystemtechnik, die zur Verarbeitung von Problemlösungswissen prädestiniert ist. Kombiniert mit der Fuzzy Logic führt dies zur wissensbasierten Fuzzy-Modellierung. Der Fuzzy Logic obliegt die Formalisierung von Parametervariabilitäten und Berücksichtigung von Unsicherheiten in Entscheidungssituationen. Bei der Fuzzifizierung werden linguistische Variablen mittels Fuzzy-Sets, z.B. in Dreiecks- oder Trapezform als deklaratives Wissen repräsentiert. Somit bietet IeMAX die Möglichkeit, begriffliche Klassen- und Variablenbezeichnungen einer mathematischen Verrechnung zuzuführen. Handlungs- und Problemlösungswissen wird als prozedurales Wissen mittels ‚Wenn-Dann-Regeln‘ formalisiert. Die Besonderheit von Fuzzy-Expertensystemen

liegt in der Schlussfolgerungsfähigkeit bei lediglich gradueller Erfüllung von Prämissen einer Regel, diese mit in das Entscheidungskalkül zu ziehen. Die Szenariotechnik ist als vorausschauende Planungsmethode verantwortlich für die Bildung von Handlungsalternativen. Auf diese Art und Weise können z.B. Trend-, Best- und Wort-Case-Szenarien generiert und Konsequenzen von Bewertungen und Entscheidungen simuliert werden.

Der Baustein **Bewertung** umfasst die Identifizierung von Werten und Maßstäben einer Gesellschaft. Auf diesem Wege können ökonomische Kennzahlen (z.B. Erträge, Gewinne), soziale Belange (z.B. Präferenzen, Betroffenheitsgrad) und umweltrechtliche Grenzwerte (z.B. 50 mg/l NO<sub>3</sub>-Wasserhaushaltsgesetz) ins Entscheidungskalkül gezogen werden. Der formale Bewertungsvorgang wird erörtert und eine Vermeidung von Problemverlagerungen vor dem Hintergrund der Trias ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltiger Entwicklung vorgestellt.

Das wesentliche Spezifikum des Methodenpakets IeMAX liegt in dem aufeinander abgestimmten Integrations- und Formalisierungscharakter. Dieser äußert sich in:

- einer komplementären Verarbeitung von quantitativen *und* qualitativen Informationsgrundlagen
- einer Modellierung von sozioökonomischen *und* umweltrechtlichen Rahmenbedingungen
- einer zugleich nachsorgenden Konfliktlösung *und* vorsorgenden Konfliktvermeidung
- einer flexiblen Anwendung der Methoden, die sich an den Untersuchungsgegenstand anpassen und nicht umgekehrt.

## 5 Transdisziplinäre Kennzeichnung möglicher Konflikte zwischen Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft

Für das Konfliktripel Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft beschreibt dieses Kapitel die Wert- und Zielsysteme sowie den rechtlichen Schutz der jeweiligen natürlichen Systeme. Aussagen zum Schutz einzelner Umweltmedien bzw. ganzer Wirkungsgefüge stammen sowohl aus umweltrechtlichen Gesetzestexten als auch aus aktuellen Berichten der Umweltpolitik (BBR 2000, BMBF 1998, BML 2000a, MUNF 1999, SRU 2000, UBA 2000).

### 5.1 Transdisziplinäre Wissensakquisition und Herleitung der Entscheidungssituation als Konfliktripel

Gesellschaftlicher Wandel wird angetrieben durch menschliche Bedürfnisse. Welche Determinanten bestimmen den Wandel und beeinflussen zugleich individuelle Entscheidungen und sind kennzeichnend für zukünftige nachhaltige Raumentwicklungen? Dieser Abschnitt analysiert diese Thematik und leitet daraus aktuelle und künftige konkurrierende Nutzungsinteressen ab. Im Vordergrund stehen Veränderungen, die großflächig von Bedeutung sind und mögliche, mehrfache Nutzungen und damit grundsätzliche Multifunktionalitäten ökologischer Systeme verhindern. Die nachfolgende Tabelle enthält Veränderungen der Flächennutzungen in Deutschland in den Jahren 1993 bis 1997 (STABU 2001, Grund- und Strukturdaten der amtlichen Statistik URL: <http://www.destatis.de>).

VERÄNDERUNG DER FLÄCHENNUTZUNG IN DEUTSCHLAND 1993-97				
Nutzungskategorie	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Relativ [%]	Bilanz	Ten- denz
Landesfläche insgesamt	356 970	100,00		
Landwirtschaftsfläche (inkl. Moor u. Heide)	195 433	54,70	-1,8	-
Waldfläche	104 326	29,20	0,6	0
Siedlungs- und Freiflächen	20 657	5,80	6,2	+++
Verkehrsfläche	16 327	4,60	2,8	++
Wasserfläche	7 798	2,20	1,8	+
Betriebsfläche	2 428	0,70	3,6	++
Erholungsfläche	2 307	0,60	2,9	++
Flächen anderer Nutzung	7 694	2,20	-3,5	--

Tab. 31: Veränderung der Flächennutzung in Deutschland 1993-97



Im Lichte dieser Situation wird versucht mittels des Methodenpakets IeMAX aus Zeitreihen Initialpunkte raumplanerisch bedeutsamer Ökosystemnutzungen in Schleswig-Holstein abzuleiten. Messbare Veränderungen sind aus den Grund- und Strukturdaten der amtlichen Statistik abgeleitet. Darunter fallen u.a. die Bevölkerungsentwicklung, Altersverteilung, volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Unternehmen, Gewerbe- und Insolvenzmeldungen, Erwerbstätigkeit, Löhne und Gehälter, Verbraucherpreise, Bautätigkeit und Wohnen, Verkehr, Umwelt und umweltökonomische Gesamtrechnungen.

Die nachfolgende Tabelle führt Indikatorgrößen für die genannten Statistiken auf, die für die Herleitung des so genannten Konflikttripels kritischer Ökosystemnutzungen herangezogen werden. Die symbolischen Angaben zu Tendenzen und Trends können als Frühindikatoren mögliche Folgen und Konsequenzen erahnen lassen. Die Referenzzustände der prognostischen Angaben beziehen sich bei den Tendenzen auf die Unterschiede zwischen den beiden letzten Messjahren; der Trend geht vom ersten Erhebungspunkt aus. Die Daten stammen aus aktuellen Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes (STABU 2001) und weiterer Bundesbehörden (BBR 2000, BML 2000, BMU 2001).

<b>ENTSCHEIDUNGSRELEVANTE GRUND- UND STRUKTURDATEN DEUTSCHLANDS</b>					
<b>PARAMETER/INDIKATOR D. WANDELS</b>				<b>TENDENZ</b>	<b>TREND</b>
Bevölkerung [Mio.]	1997:	1998:	1999:		
Bevölkerungsdichte $\varnothing = 230/\text{km}^2$	82,057	82,037	82,163	+	++
Bruttosozialprodukt [Mrd. DM] Synonym: Bruttosozialeinkommen, BIP plus Löhne	1998:	1999:	2000:		
	3758,61	3845,87	3946,92	++	+++
Bruttoinlandsprodukt [Mrd. DM]	1998:	1999:	2000:		
Wertsumme aller im Inland erzeugter Güter und Dienstleistungen	3784,40	3877,20	3976,10	++	+++
<b>LANDWIRTSCHAFT UND DÜNGEMITTELVERBRAUCH</b>					
Anzahl der Landwirte bis 1989 altes Bundesgebiet	1950:	1960:	1998:		
	3,5 Mio.	2,4 Mio.	0,6 Mio.	---	---
Durchschnittlich bearbeitete Fläche (ha) pro Landwirt	1950:	1960:	1998:		
	3,6	9,3	33,4	+++	+++
Durchschnittlich versorgte Verbraucher pro Landwirt	1950:	1960:	1998:		
	10	17	124	+++	+++
Inlandsabsatz von Stickstoff in Deutschland [1000 t]	1990/91	1995/96	1998/99		
	1885,3	1769,2	1903,3	+	+
Inlandsabsatz von Phosphat in Deutschland [1000 t]	1990/91	1995/96	1998/99		
	672,2	401,7	406,8	-	0

SIEDLUNGS-, VERKEHRSENTWICKLUNG UND MOBILITÄT					
Flächenverbrauch durch Versiegelung [ha/Tag] 129 ha = rd. 200 Fußballfelder	1981: 113	1990: 80	1999: 129	++	+
Bautätigkeit und Wohnungsbestand [in 1000]	1996: 36492,3	1997: 37050,4	1998: 37529,2	+	++
Wohnfläche je Einwohner [Ausdruck für Lebensqualität]	1996: 38,3 m <sup>2</sup>	1997: 38,8 m <sup>2</sup>	1998: 39,3 m <sup>2</sup>	+	+
Verkehrsinfrastruktur auf allen Ver- kehrswegen [in 1000 km]	1998: 517,2	1999: 516,3	2000: 516,3	<b>0</b>	<b>0</b>
Straßen des überörtlichen Verkehrs [km]	1991: 226300		1998: 230700	++	++
Beförderte Personen aller Verkehrs- mittel [Mio.]	1998: 60506,1	1999: 61286,1	2000: 60831,5	-	+
Personenverkehrsleistung in Deutsch- land, gesamt [Mrd. Pkm]	1991: 876,6	1995: 927,4	1999: 955,6	+++	++
Bestand an Verkehrsmitteln [in 1000]	1998: 49586,5	1999: 50609,1	2000: 51364,7	+	++
Pkw und Kombi, schadstoffarm [Mio.]	1992: 17,8	1995: 30,8	1999: 39,0	+++	+++
FÖRDERUNG UND VERBRAUCH VON GRUNDWASSER					
Grundwasserförderung in Deutschland [Mio. m <sup>3</sup> ]	1991: 4138	1998: 3569	1999: 3560	---	<b>0</b>
Spezifischer Wasserverbrauch je Ein- wohner [l/Tag] (durchschnittlich)	1990: 145	1998: 130	1999: 130	-	<b>0</b>
Durchschnittlicher Trinkwasserpreis [DM / m <sup>3</sup> ]	1992: 2,31	1998: 3,21	1999: 3,26	+++	<b>0</b>
Legende: +++ = (> + 5 %), ++ = (+ 2 bis 5 %), += (0 bis 2 %), 0 Stagnation (bzw. innerjährliche Schwankungen kompensieren sich), - = (0 bis -2 %), -- = (- 2 bis -5 %), --- = (> - 5 %)					

Tab. 32: Entscheidungsrelevante Grund- und Strukturdaten Deutschlands

Neuere nationale und internationale Umweltberichte belegen die Problematik um Konkurrenzsituationen im Bereich von Landwirtschaft (LW), Siedlungs- und Verkehrsentwicklung (SE) sowie Wasserwirtschaft (WW) (BML 2000, BBR 2000, EEA 2000, EEA 1999, MUNF 2000, SRU 2000). Allen dreien gemeinsam ist die Nutzung bzw. Belastung von Böden und Gewässern. Im Bereich landwirtschaftlich genutzter Flächen stellen Stickstoffüberschüsse mit 120 kg/ha ein Problem in zweifacher Hinsicht dar. Einerseits spricht dies nicht gerade für einen effizienten Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln im umweltökonomischen Sinne und andererseits ist davon die Brauch- und Trinkwassergewinnung in Qualität und Quantität betroffen (BBR 2000, UBA 2000). Eine Reduzierung der Stickstoffüberschüsse auf 40 kg/ha bis 2005 wird anvisiert, um nicht zuletzt auch potentielle Auswaschungen in Grund-

wässer zu vermeiden. In ländlichen Gebieten Schleswig-Holsteins konnten Nitratgehalte von deutlich über 50 mg/l in Grundwässern nachgewiesen werden (HERZOG & ZÖLITZ-MÖLLER 1999).

Ein besonders instruktives Fallbeispiel für eine derartige planungsrelevante Konfliktsituation stellt der Bereich der Bornhöveder Seenkette im Allgemeinen und speziell das Gebiet der benachbarten Gemeinden Wankendorf und Ruhwinkel dar (HERZOG 1998, HERZOG 1997a/1997b). Glaziale Formungsprozesse führten zur Ausbildung eines kuppigen Reliefs mit engräumigem Wechsel von Gewässern, Äckern, Grünländern, Wäldern und für Schleswig-Holstein typischen Knicks (Wallhecken). Eine intensive Landwirtschaft konkurriert mit den zunehmenden Interessen der Siedlungsentwicklung und der Wasserwirtschaft. Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Struktur, die Dynamik und Funktionen der ökologischen Systeme des Konflikttripels, im Sinne von Wertträgern und erläutert dann das Konflikttripel unter dem Blickwinkel der Wert- und Zielebene.

## **5.2 Landwirtschaft**

### **5.2.1 Agrarökosysteme**

In Deutschland kommt Agrarökosystemen mit ihrer Stellung zwischen naturnahen und stärker anthropogen geprägten Ökosystemen flächenhaft eine besondere Rolle zu (HABER 1998). Nach ODUM (1991) ist die Selbstorganisationsfähigkeit von Agrarökosystemen stark eingeschränkt. Ihre Energie beziehen sie, analog zu natürlichen oder naturnahen Ökosystemen, überwiegend von der Sonne und zusätzlich durch menschliche Arbeit und stoffliche Einträge. Für das Hauptziel der Landwirtschaft, die Produktionsmaximierung von Nahrungsmitteln, sind wesentlich: die Bodenart bzw. der Bodentyp, die Hangneigung, der Grundwasserflurabstand, die Feldkapazität, der Humusgehalt, der pH-Wert, die Niederschlagsmenge, die Grundwasserneubildungsrate und das geologische Ausgangsgestein. Diese Größen prägen zugleich den Wasser- und Stoffhaushalt (BLUME 1992, FRÄNZLE et al. 1993, FRÄNZLE et al. 1987). Mögliche Belastungen und die Balance zwischen natürlicher Ressourcennutzung und anthropogener Steuerung betreffen überwiegend den Stoffhaushalt. Der ist bei intensiver Landwirtschaft nämlich bestimmend für die Pufferung und Transformation von Wirtschafts- und Kunstdünger sowie Pflanzenschutzmitteln. Agrarökosysteme sind anfällig für Störungen oder sogar Zerstörungen durch extreme Umweltbedingungen. Gefahren fußen auf Fehleinschätzungen des Anteils natürlichen Systemverhaltens und so genannter unsachgemäßer Bearbeitung von Agrarökosystemen. Als strukturverändernde Beispiele seien Bodenerosion und Hangdenudation mit Stoffeintrag in angrenzende Gewässer genannt. Stoffliche Gefahren gehen einher mit Dünge- und Pflanzenschutzmittelmaßnahmen, z.B. Einträgen von Stickstoff, Phosphat, Kali oder Kalk und ihrem lateralen Transport in angrenzende Gewässer oder Versickerung und Zufuhr zu Grundwasserleitern. Lediglich in wenigen Fällen sind diese Prozesse

reversibel (HERZOG 1998, ODUM 1991). In jüngster Zeit entwickelt sich daher eine *nachhaltige* Landwirtschaft mit dem Ziel der Erhaltung und Förderung der biologischen Vielfalt aus Naturschutzgesichtspunkten im Einklang mit den wirtschaftlichen Maximen der Gruppe der Landwirte (BML 2000c, BML 1999c).

### 5.2.2 Sozioökonomische Werte und Ziele

In einer Gesellschaft obliegt der Landwirtschaft die dauerhafte Sicherung der Produktion hochwertiger Nahrungsmittel. Eine dauerhafte Erreichung des Ziels erfordert dabei die gleichzeitige Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte (BML 2000, BML 1999d, BMVEL 2001).

#### Ökonomische Aspekte

- Sicherung der Einkommensmöglichkeiten aus landwirtschaftlicher Produktion durch Erhöhung des Einkommens, der Produktivität und Verbesserung der Rentabilität
- Produktion nachwachsender Rohstoffe, die als klimaschonende Energiequellen und umweltfreundliche Grundstoffe für den industriellen Bereich Verwendung finden
- Sicherung der wirtschaftlichen Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit der landwirtschaftlichen Betriebe und der landschaftspflegerischen und ökologischen Leistungen der Land- und Forstwirtschaft
- Stärkung und Strukturförderung des ländlichen Raumes als Wirtschaftsstandort

#### Ökologische Aspekte

- Erhalt und Verbesserung der Produktionsgrundlagen jetziger und künftiger Generationen. Dazu Sicherung der Bodenfruchtbarkeit, Pufferfunktion und Nährstoffpools von Böden und Einhaltung der Grundsätze guter fachlicher Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung und des Pflanzenbaus (BML 1998)
- Schonung endlicher Produktionsressourcen und Beachtung kritischer Belastungsgrenzen durch flächen- und standortgerechte Nutzungs- und Bearbeitungsformen, z.B. Agrarmanagement mit neuen Techniken und Beachtung der Heterogenität der Landschaft, d.h. differenzierte Landnutzungsformen (KAHLENBORN & KRAEMER 1999).
- Erhaltung abwechslungsreicher Landschaften von hohem ökologischem Wert, sprich einer großen Vielfalt von Arten und Biotopen, wie z.B. Feuchtgrünland, Trockenrasen, Saumbiotope

#### Soziale Aspekte

- Erhaltung und Verbesserung der Lebensqualität, u.a. gekennzeichnet durch eine gesicherte Versorgung mit gesunden und rückstandsfreien Produkten sowie Erhaltung und Förderung der Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion der Kulturlandschaft

- Erhaltung oder Steigerung der Arbeitsplätze in der Landwirtschaft und der nachgeordneten Ernährungswirtschaft
- Teilhabe der Menschen in ländlichen Räumen und der im Agrarsektor Beschäftigten an gesellschaftlichen und politischen Entscheidungsprozessen („Partizipation“)

Im Rahmen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung Deutschlands trugen die Land-, Forstwirtschaft und Fischerei im Jahre 2001 mit einer Bruttowertschöpfung von 23,25 Mrd. EUR, lediglich rd. 1,2 % zur Bruttowertschöpfung bei (1.920,56 Mrd. EUR) (STABU 2002). Die Zahl der in der Landwirtschaft Beschäftigten ist in Deutschland wie in allen anderen Industrieländern tendenziell rückläufig. Im gesamten Agribusiness sind rd. 4 Mio. Menschen beschäftigt, davon allein rd. 3 Mio. in den nachgelagerten Wirtschaftsbereichen, wie z.B. Nahrungsmittelproduktion, Ernährungsindustrie und Gastgewerbe (BMVEL 2001). Der Anteil der land- und forstwirtschaftlichen Flächennutzung beträgt in Deutschland 80 %. Differenziert ergibt sich damit für 1998 173.270 km<sup>2</sup> (=54,1 % der Bodenfläche in Deutschland) als landwirtschaftliche Nutzfläche; davon entfallen auf Ackerland 68,3 %, Dauergrünland 30,4 %, oder Gartenbau 0,7 % und Weinbau 0,6 % (BMVEL 2001, UBA 2001).

Zusammenhänge zwischen einem ökonomischen und ökologischen Wertesystem lassen sich am Beispiel der Agrarumweltmaßnahme des Ökologischen Landbaus verdeutlichen. Vor den siebziger Jahren wurden in der Landwirtschaft und Industrie kaum Aspekte des Umwelt-, Natur- und Landschaftsschutzes berücksichtigt. Dies hatte und hat bis heute schwerwiegende negative Konsequenzen für die Vielfalt der Tier- und Pflanzenarten, ihre Lebensgemeinschaften und das Landschaftsbild, insbesondere im ländlichen Raum. In Deutschland wurde Ende 1998 ca. 2,4 % der Anbaufläche nach den Prinzipien des Ökologischen Landbaus bewirtschaftet. Diese Bewirtschaftungsmethoden tragen zu deutlich verringerten anthropogenen Eingriffen in ökologische Systeme bei. Dies wird erreicht durch den Verzicht auf chemisch-synthetische Pflanzenbehandlungsmittel und Stickstoffdünger. Die soziale Komponente Nachhaltiger Entwicklung schafft durch Marketingstrategien ein ökologisches Bewusstsein und entsprechendes Kaufverhalten der Verbraucher. Dabei ist eine staatliche Förderung bei Erzeugung und Vermarktung hilfreich (BML 1998). Das skizzierte Leitbild der Landwirtschaft als nutzungsbezogener Beitrag zu einer Nachhaltigen Entwicklung der Gesellschaft besteht zu Recht aus einem Mosaik vernetzter Ziele und Aufgabenfelder. Zukünftige Schwerpunkte beschreibt der Forschungsrahmenplan des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Landwirtschaft, Forsten und Ernährung (1997). Diese führen einerseits zur Vertiefung des Verständnisses über ökosystemare Zusammenhänge mit Ökosystemkomplexen (z.B. Bodenwasserhaushalt, Fließgewässer, Grundwasser) und andererseits, über Wechselwirkungen und Folgen, zu Mensch-Umwelt-Interaktionen in ländlichen Räumen.

In **Schleswig-Holstein** ist die Bedeutung des Wirtschaftssektors Landwirtschaft messbar am Anteil genutzter Flächen. Dieser liegt in Schleswig-Holstein bei 73,5 % (HERZOG 1998). Er liegt damit deutlich über bundesdeutschen Verhältnissen (54 % Landwirtschaftsfläche). Stoffausträge und Emissionen durch die landwirtschaftliche Produktion sind in Schleswig-Holstein rückläufig (MUNF 1999). Als Gründe können modernisierte Verfahren und betriebswirtschaftliche Zwänge genannt werden. Auch im Rahmen der Tierproduktion konnten, von wenigen lokalen Ausnahmen abgesehen, Fortschritte erzielt werden. In Schleswig-Holstein gibt es mit 1,6 Großvieheinheiten pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Tierhaltung und Flächen. Dieser Vorteil spiegelt sich im Erhalt natürlicher Leistungsfähigkeit in Agrarökosystemen wider und fördert partnerschaftliche Kooperationen zwischen Landwirtschaft und Naturschutz. In Ergänzung wurden das Konzept der ‚Honorierung ökologischer Leistungen der Landwirtschaft‘ und unterschiedliche Variationen des Vertrags-Naturschutzes entworfen (BML 1999d, BML 1998). Neue Entwässerungsmaßnahmen im landwirtschaftlich genutzten Raum sollen in sensiblen und für den Naturschutz wertvollen Bereichen vermieden werden. Das natürliche Wasserregime soll insbesondere in entwässerten Hoch- und Niedermooren möglichst großflächig wiederhergestellt werden (MUNF 1999).

Bei der Unterschätzung stehen Böden an vorderster Stelle. Zudem fungieren Böden als Indikator für verschiedene Nutzungseignungen, beispielsweise als Indikator für die Nutzungsfähigkeit durch die Landwirtschaft in Agrarökosystemen oder als Indikator für die Regulationsleistung im Rahmen der Grundwasserbewirtschaftung. Um eine agrarische Raumnutzung in Einklang mit ökologischen Schutzziele zu bringen, schlagen WERNER & SEYFARTH (2000) den Weg über Umweltqualitätsziele (UQZ) vor. Dazu zählen der Stickstoffeintrag in das Grundwasser, die Grundwasser-Neubildung sowie die Wasser- und Winderosion.

### 5.2.3 Rechtsgrundlagen und umweltpolitische Steuerungsinstrumente

Im **Bundes-Bodenschutzgesetz** (BBodSchG) (Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17. März 1998 Artikel 1 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten) sind für landwirtschaftliche Ökosystemnutzungen, insbesondere die Inhalte der §§ 1, 2, 4 und 17 von Relevanz. § 1 regelt die Zwecke und Grundsätze des Gesetzes und fordert, eine nachhaltige Sicherung oder Wiederherstellung der Funktionen des Bodens sowie Vorsorge gegenüber nachteiligen und schädigenden Bodenveränderungen zu treffen. Der § 2 spricht ausdrücklich von Böden und ihren Nutzungsfunktionen als Flächen für Siedlungen, Standorte für Land- und Forstwirtschaft, wie auch als Lebensraum für Mensch, Tier, Pflanzen, Bodenorganismen. Gegenüber den angrenzenden ökologischen Systemen weisen Böden Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften auf. Diese dienen („Dienstleistung“) insbesondere auch dem Schutz von Grundwasser. Im § 4 wird die Pflicht zur Gefahrenabwehr und nachsorgenden Sanierung festgelegt. Dies ist dann der Fall, wenn bodenschädigende Veränderungen einerseits, oder überschrittene Belastungskennwerte andererseits nachgewiesen

werden. Der § 17 („Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft“) hat die Sicherung der Bodenfruchtbarkeit als Produktionsgrundlage der Landwirtschaft zum Ziel. Verboten sind u.a. die Bodenverdichtungen, sowie unsachgerechte und witterungswidrige Düngung.

Im Laufe der Diskussion über das Bundes-Bodenschutzgesetz und dessen Inhalte wurden vertiefend neben den o.g. Rechtsvorschriften mit bodenschützendem Inhalt solche mit strafrechtlichem Charakter untersucht. Der Anwendungsbereich des § 324a Strafgesetzbuch für Bodenschutzzwecke berücksichtigt dabei das Einleiten und Eindringenlassen von Stoffen in den Boden. Die unwiederbringliche Reduzierung bzw. Zerstörung einer bestimmten Bodenfläche und ihrer internen Prozesse, z.B. beim Bau eines Hauses ohne Baugenehmigung wird durch das Strafrecht nicht berührt. Zur Abschätzung des Tatbestandes verlangt das Strafrecht die Quantifizierung ökologischer Veränderungen, Prozesse und Wechselwirkungen im System Boden, die allerdings nach dem derzeitigen Forschungsstand nicht realisierbar sind. Der § 324a StGB vernachlässigt die ökosystemaren Grundlagen der Bodenkunde und Systemwissenschaft, wodurch Tatbestandsmerkmale normiert wurden, die einer tatsächlichen Feststellbarkeit von Bodenverunreinigungen genügen, jedoch in der Regel für einen Strafbestand weder ausgelegt sind noch angewendet werden können (HOFMANN 1996).

Die Inhalte des **Bundesnaturschutzgesetzes** (BNatSchG) (Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege Bundesnaturschutzgesetz, 21. September 1998) sind für landwirtschaftliche Nutzungen insofern von Relevanz, als hier die Nutzungsfähigkeit ökologischer Systeme in einem holistischen Sinne betrachtet wird. Der § 1 legt die Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege dar. Demnach ist Natur und Landschaft im besiedelten und unbesiedelten Bereich so zu schützen, zu pflegen und zu entwickeln, dass (1) die Leistungsfähigkeit des Naturhaushalts, (2) die Nutzungsfähigkeit der Naturgüter, (3) die Pflanzen- und Tierwelt sowie (4) die Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Natur und Landschaft, als Lebensgrundlagen des Menschen und als Voraussetzung für seine Erholung in Natur und Landschaft nachhaltig gesichert sind. Der § 2 verstärkt die Forderung aus dem BBodSchG, einen Verlust der natürlichen Fruchtbarkeit von Böden zu vermeiden und mit Naturgütern sparsam umzugehen. Gewässer sind vor Verunreinigungen zu schützen und die Erhaltung der natürlichen Selbstreinigungskraft zu fördern. § 8 duldet die Nutzung von Natur und Landschaft durch eine land-, forst- und fischereiwirtschaftliche Bodennutzung. Diese Nutzungen stellen keinen Eingriff dar. Diese Aussage ist insofern kritisch zu betrachten, als keine Angaben über Form und Intensität der Nutzung gemacht werden.

Die **Agenda 21** (Kap. 10 Integrierter Ansatz für die Planung und Bewirtschaftung der Bodenressourcen) sieht eine Vielzahl von Leistungen von ökologischen Systemen für die Erfüllung von anthropogenen Ansprüchen vor. In Bezug auf die Nutzung der Bodenressourcen wird versucht, die begrenzte Ressource dadurch zu schützen, dass einer massiven Inanspruchnahme und Ausdehnung wirtschaftlicher Aktivitäten entgegenzuwirken ist. Vorausschauend müs-

sen Konkurrenzsituationen und Nutzungskonflikte einer mitunter suboptimalen Nutzung von Flächen und Interessenskonsensen zugeführt werden. Eine integrierte Raum- und Flächennutzungsplanung und Bodenwirtschaft bietet eine geradezu ideale Möglichkeit, dies zu erreichen. Durch eine integrierte Überprüfung aller Flächennutzungen ist die Möglichkeit gegeben, divergierende Nutzungsansprüche auf ein Minimum zu reduzieren, ein möglichst hohes Maß an gegenseitiger Abstimmung zu erreichen, und die soziale und wirtschaftliche Entwicklung mit dem Schutz und der Gesunderhaltung der Umwelt zu verknüpfen, um so zur Verwirklichung der Ziele einer Nachhaltigen Entwicklung beizutragen. Die wesentlichen Elemente des integrierten Ansatzes kommen in der Koordinierung der mit den verschiedenen Aspekten der Bodennutzung und der Bodenressourcen befassten sektoralen Planungs- und Managementaufgaben zum Ausdruck.

Der **Sachverständigenrat für Umweltfragen der Bundesregierung** (SRU 2000) fordert für die land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung eine ökologische Ausrichtung, etwa im Sinne des Ökologischen Landbaus bzw. des Prinzips der Multifunktionalität. Als politisches Ziel gilt die Einrichtung einer internationalen Bodenschutzkonvention („Übereinkommen zum nachhaltigen Umgang mit Boden“). Das **Landschaftsprogramm Schleswig-Holsteins** (1999) geht ebenso von einer bodenschützenden Planungserfordernis aus. Geologisch bedingt, verfügt Schleswig-Holstein über oberflächennahe große Kieslagerstätten. Die Rohstoffgewinnung ist für die Bauwirtschaft erforderlich und als volkswirtschaftlicher Faktor von großem Wert. Zugleich ist die Entnahme der Oberschichten des belebten Bodens als irreversibler Eingriff in natürliche Stoffkreisläufe und Lebensräume zu betrachten. Durch den oberflächennahen Abbau ist auf lange Sicht jegliche landwirtschaftliche Nutzung unterbunden. Daneben verursacht die fehlende gewachsene Bodenschicht als Schadstofffilter eine Beeinträchtigung des Grundwassers in Qualität und Quantität. Auch das **Landesnaturschutzgesetz** (LNatSchG Schleswig-Holstein) sieht im Boden eine unverzichtbare Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen und fordert den prioritären Schutz sämtlicher Bodenfunktionen. Zudem ist Bodenschutz vielmehr auch Grundwasserschutz.



## 5.3 Siedlungsentwicklung

### 5.3.1 Siedlungssysteme

Neben der Landwirtschaft zählt die Siedlungsentwicklung zum Konflikttripel. Siedlungssysteme ähneln Agrarökosystemen in ihrer ausgeprägten Wechselwirkung auf externe Systeme. Zu den prägendsten Veränderungen des Menschen zählen Beeinträchtigungen des Artengefüges, die Zufuhr systemfremden, organischen und anorganischen Materials und eine durch hohe Entropie verursachte Systemdynamik (SCHULTE 1995). Demnach zählen Siedlungssysteme zu der Gruppe der anthropogen-technischen Ökosysteme (HABER 1998); sie sind aus überwiegend nichtbiologischen, technischen Bestandteilen ‚künstlich‘ zusammengesetzt. Charakteristisch ist ein Miteinander von Infrastruktur-, Wohn- und Bildungseinrichtung und ökologischen Erholungszone. Sie basieren auf der Qualität und Quantität klassischer Geofaktoren wie Böden, Klima und Vegetation im Umfeld des Menschen. Dabei werden Fließgewässer reguliert bzw. kanalisiert, Alleen werden im Wuchs begrenzt und Bodenbildung durch hohe Verdichtung minimiert. **Versiegelungen** bilden die massivste Form des menschlichen Eingriffs und blockieren die Versickerung des Niederschlagswassers und führen zu erhöhten Abfluss- und Verdunstungsraten (SUKOPP 1990). Der Grundwasserspiegel ist in Großstädten oftmals sehr viel niedriger als im Umland, so dass mangelnde Verfügbarkeit des in der Bodenzone gebundenen Wassers aufgrund fehlender Versickerungsflächen für die städtische Flora zu Stresssituationen führen kann. Versiegelungen gelten auch als Indikator für die Dynamik der Verstädterung und Ausweitung von Agglomerationsräumen (HAGGETT 1991).

### 5.3.2 Sozioökonomische Werte und Ziele

Ziel der deutschen Siedlungspolitik ist die Deckung des für den Siedlungsbau bestimmten Flächenbedarfs durch eine umweltverträgliche Raumplanung. Die Erschließung von Neuland und der Ausbau von Verkehrswegen hat zum Ziel, notwendige Mobilität auf der Schiene, der Straße und in der Luft dauerhaft zu sichern. Spezifische Grundsätze und Ziele einer nachhaltigen Siedlungspolitik in Deutschland sind (BMR 1996, BBR 2000, UBA 2001):

- Aufbau eines deutschlandweiten städtischen Siedlungssystems mit eng vernetztem, polyzentrischem Gefüge von größeren und kleineren Städten und Stadtregionen
- Sicherung der Grundversorgung mit Wohnungen und Infrastruktureinrichtungen und Förderung von Funktionsmischungen, z.B. Wohnen, Arbeiten, Versorgen und Erholen in lokaler Nachbarschaft (‚multifunktionale Nutzungseinheiten‘)
- Entlastung natürlicher Lebensgrundlagen durch Förderung nachhaltiger Flächennutzungsplanung und Flächenbewirtschaftung
- Flächenentsiegelung und Flächenrecycling in Stadt und Stadt-Umland-Bereichen als sparsamer Umgang mit der Ressource Boden, sprich Prioritäten bei der Innenentwicklung setzen

Das Erreichen dieser Ziele kann durch umweltpolitische Instrumente gefördert werden, frei nach der Kurzformel: ‚Preise statt Pläne‘. Förderlich mit Lenkungswirkung sind Steuern und Subventionen. Dazu zählen eine transparente Flächenwirtschaftspolitik, fiskalische Anreize und handelbare Flächenausweisungsrechte (SRU 2000). Im ländlichen Raum unterstützen die Ziele eine Verbindung zwischen Dorf und umgebender Landschaft unter Beachtung ökologischer und kulturhistorischer Aspekte.

### 5.3.3 Rechtsgrundlagen und umweltpolitische Steuerungsinstrumente

Rechtliche Instrumente zur Vermeidung von Flächenneuanspruchnahmen bestehen im Bundes-Bodenschutzgesetz, dem Bundesbaugesetz, wie auch dem Bundesnaturschutzgesetz.

Das **Bundes-Bodenschutzgesetz** sieht eine Entsiegelungspflicht nach § 5 und dem spezielleren § 179 BauGB vor. Nach § 1a Abs. 1 BauGB soll mit Grund und Boden sparsam und schonend umgegangen werden; Bodenversiegelungen sind dabei auf das notwendige Maß zu begrenzen. BauGB § 179 sieht die Möglichkeit vor, bauliche Anlagen zu beseitigen und damit eine Entsiegelung der Fläche zu erreichen. Schwierigkeiten bei der Umsetzung der baurechtlichen Entsiegelungsvorschrift ergeben sich vor allem daraus, dass der Eigentümer nur zur Duldung der Entsiegelung, nicht aber zu deren Durchführung verpflichtet werden kann.

Das **Bundesnaturschutzgesetz** sieht eine Schutzgebietsausweisung nach § 12 ff BNatSchG vor, die einzelne Flächen einem besonderen Schutz unterstellen und diese somit einer Ausweisung als Baugebiete oder sonstige Nutzungen entziehen.

Der **Sachverständigenrat für Umweltfragen der Bundesregierung** (SRU 2000) vertritt die Meinung, dass die Siedlungs- und Verkehrsentwicklung ursächlich für eine umweltschonende Flächennutzung und Bodenversiegelung verantwortlich zu machen ist. Demnach sind Neuversiegelungen stets auf ihre Notwendigkeit zu prüfen und Landschaftszersiedlungen zu vermeiden.

Der **wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für globale Umweltveränderungen** (WBGU 1994) schreibt in seinem Jahresgutachten 1994 zum Thema Böden diesen eine bedeutende Stellung im Wirkungsgefüge von Ökosystemen und Folgen anthropogener Veränderungen zu. In der industrialisierten Welt nehmen Versiegelungen als Folge der Ansprüche von Siedlungs- und Verkehrsentwicklung massiv zu.

## 5.4 Wasserwirtschaft

### 5.4.1 Gewässerökosysteme

Zum Verständnis der dritten Komponente des Konfliktripels, der Wasserwirtschaft, wird hier auf Gewässerökosysteme eingegangen. Diese können in stehende (Seen), fließende (Flüsse), unterirdische (Grundwasser) und Küstengewässer eingeteilt werden. Ihre Inanspruchnahme ist entsprechend der vielfältigen Erscheinungsformen außerordentlich hoch. Oberflächengewässer sind Verkehrs- und Transportwege, Grundwässer und Oberflächengewässer dienen der Versorgung mit Trink- und Brauchwasser und werden als Ressource für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen und zur Gewinnung von Energie genutzt. Fließgewässer und stehende Gewässer, einschließlich der ufernahen Bereiche, werden zu Freizeitzielen und als bevorzugte Siedlungsstandorte genutzt. Die Qualität und Quantität von Gewässern ist abhängig von der Ausprägung der einzelnen Komponenten der erweiterten Wasserhaushaltsgleichung ( $N = A + V \pm R \pm B$ ). Der Niederschlag ist im langjährigen Mittel die Summe des oberirdischen Abflusses und der Verdunstung unter Berücksichtigung der Retention und des Verbrauchs. In Deutschland liegt die durchschnittliche Niederschlagsmenge bei rd. 800 mm/a. Die Verdunstung ist regional sehr verschieden und variiert zwischen 400 bis 500 mm/a (FREDE & DABBERT 1999, URL [www.dwd.de](http://www.dwd.de)). Daraus ergibt sich eine positive Wasserbilanz, d.h. Wasser steht zur Speicherung in der Bodenzone oder zum Verbrauch zur Verfügung. Die Qualität von oberirdischen Gewässern wird international anhand von Trophiestufen gemessen (ODUM 1992). Diese bezeichnen die Intensität der pflanzlichen Produktion in Gewässern. Ein Gewässer ist oligotroph bei schwacher Produktion auf Grund geringer Verfügbarkeit von Nährstoffen, d.h. die Phytoplanktonentwicklung ist ganzjährig gering. Mesotroph ist ein Gewässer, wenn eine höhere Verfügbarkeit von Nährstoffen als in oligotrophen Gewässern herrscht. Die Phytoplanktonentwicklung ist bei großer Artenvielfalt mäßig und hat ihr Maximum im Frühjahr. Der Zustand eutropher Gewässer lässt auf eine gute Verfügbarkeit von Nährstoffen schließen. Stickstoffhaltige Einträge aus der **Landwirtschaft** oder dem Luftwege führen zu einer hohen Phytoplanktonentwicklung, was im Tiefenwasser jahreszeitlich geschichteter (holomiktisch-dimiktischer) Seen regelmäßig starken Sauerstoffmangel zur Folge hat. Ein wichtiger Selbstreinigungsprozess ist die Sedimentation von partikulärem Material. Vor allem in tiefen Seen werden Nährstoffe nach der Sedimentation dauerhaft im Sediment festgelegt und so dem Nährstoffkreislauf entzogen.

**Grundwasser** ist in Deutschland die wichtigste Ressource für die Versorgung mit Trink- und Brauchwasser (BICK 1993, ODUM 1992). Rund 70 % des benötigten Trinkwassers werden aus dem Grundwasser entnommen. Die Grundwasserneubildung ist dabei abhängig vom Aufbau des Bodens, dem Grundwasserabstand zur Geländeoberfläche, der Struktur der wasserführenden (Aquifer) und sperrenden (Aquitarde) Schichten, dem oberirdischen Zufluss sowie den

Niederschlägen. In Schleswig-Holstein liegt die Grundwasserneubildung bei etwa 150 bis 200 mm jährlich. Als wesentliche Gefährdung des Grundwassers ist auch die dauerhafte, flächenhafte Einwirkung landwirtschaftlicher Nutzungen mit den dabei unvermeidlich entstehenden Stoffeinträgen zu beurteilen. Insbesondere Stickstoff und Pflanzenschutzmittel stellen durch lateralen Eintrag erhebliche Gefahrenpotentiale dar. Der Gefahr entgegenwirkend, haben sich lokal vorsorgende Maßnahmen zum Gewässerschutz durch das Anlegen so genannter Fließgewässerschutzstreifen bewährt (FREDE & DABBERT 1999, HERZOG 1998).

#### 5.4.2 Sozioökonomische Werte und Ziele

Wasserwirtschaft beinhaltet die Umverteilung des natürlichen Wasserdargebotes in Zeit und Raum gemäß den Bedürfnissen der Gesellschaft nach Wassermenge und Wassergüte. Das Wasserdargebot beschreibt die Menge an Grund- und Oberflächenwasser, das pro Jahr durch Niederschläge abzüglich der Verdunstung und durch Zufluss aus den Nachbarstaaten theoretisch verfügbar ist. Das Wasserdargebot differiert hinsichtlich Niederschlagsmenge, Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen oder Verfügbarkeit von Oberflächengewässern. Eine Diskrepanz herrscht zwischen natürlichem Angebot und anthropogener Nachfrage in räumlichem Bezug. Dort, wo der Wasserbedarf besonders groß ist, in den Ballungsgebieten, herrscht durch Versiegelung nur eine geringe Neubildung des Grundwassers, dessen natürliche Beschaffenheit variiert, sich entweder überhaupt nicht als Trinkwasser eignet, oder eines großen Aufwandes zur Reinigung bedarf. Die Bedürfnisse teilen sich einerseits in Maßnahmen der Wassernutzung (z.B. Trinkwasser, Bewässerung, Wasserkraft) und andererseits in den Schutz vor dem Wasser (z.B. Hochwasser).

Jede Entnahme von Wasser, vor allem die von Grundwasser, ist ein Eingriff in ein Ökosystem mit verändernden Auswirkungen. Daher bedürfen Wasserentnahmen in der Regel einer Erlaubnis nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Für den Grundwasserschutz bestehen daher folgende Ziele (BMVEL 2001, MUNF 1999, MUNF 1998):

- Erhaltung des Grundwasserdargebotes in seiner Beschaffenheit als Bestandteil natürlicher Lebensgrundlagen.
- Schutz des Grundwassers vor Verunreinigungen (z.B. Pflanzenschutz- und Düngemitteln der Landwirtschaft und von Baumschulen) oder sonstigen nachteiligen Veränderungen seiner Eigenschaften in seiner natürlichen Beschaffenheit.
- Grundwasser ist vorsorgend und flächendeckend zu schützen und seine Bewirtschaftung muss im Einklang mit dem Naturhaushalt erfolgen.

Eine **nachhaltige Wasserwirtschaft** versteht sich als integrierte Bewirtschaftung aller natürlichen und künstlichen Wasser(teil)kreisläufe unter Beachtung (a) des langfristigen Schutzes von Wasser als Lebensraum bzw. als zentrales Element aquatischer und terrestrischer Ökosysteme, der (b) Sicherung von Wasser in seinen verschiedenen Facetten als Ressource für die jetzige als auch für nachfolgenden Generationen und (c) der Erschließung von Optionen für

eine dauerhafte naturverträgliche, wirtschaftliche und soziale Entwicklung. Analog zur Landwirtschaft ist also die Versorgung der Gesellschaft mit Trink- und Brauchwasser in hinreichender Qualität und Quantität zu gewährleisten. Aus diesen Zielsetzungen resultiert ein ausgewogenes Management zwischen Bedürfnissen und Dargebot, dass sich an neun Prinzipien nachhaltiger Wasserwirtschaft orientiert (KAHLENBORN & KRAEMER 1999).

NEUN PRINZIPIEN EINER NACHHALTIGEN WASSERWIRTSCHAFT	
Verursacherprinzip	Die Kosten von Verschmutzung und Ressourcennutzung sind dem Verursacher anzulasten.
Vorsorgeprinzip	Extremschäden u. unbekannte Risiken müssen ausgeschlossen werden.
Regionalitätsprinzip	Die regionalen Ressourcen und Lebensräume sind zu schützen, räumliche Umweltexternalitäten zu vermeiden.
Integrationsprinzip	Wasser ist als Einheit und in seinem Nexus mit den anderen Umweltmedien zu bewirtschaften. Wasserwirtschaftliche Belange müssen in die anderen Fachpolitiken integriert werden.
Kooperations- und Partizipationsprinzip	Bei wasserwirtschaftlichen Entscheidungen müssen alle Interessen berücksichtigt werden. Die Möglichkeit zur Selbstorganisation und zur Mitwirkung bei wasserwirtschaftlichen Maßnahmen ist zu fördern.
Ressourcenminimierungsprinzip	Der direkte und indirekte Ressourcen- und Energieverbrauch der Wasserwirtschaft ist kontinuierlich zu vermindern.
Quellenreduktionsprinzip	Emissionen von Schadstoffen sind am Ort des Entstehens zu unterbinden.
Reversibilitätsprinzip	Wasserwirtschaftliche Maßnahmen müssen modifizierbar, ihre Folgen reversibel sein.
Intergenerationsprinzip	Der zeitliche Betrachtungshorizont bei wasserwirtschaftlichen Planungen und Entscheidungen muss dem zeitlichen Wirkungshorizont entsprechen.

Tab. 33: Neun Prinzipien einer nachhaltigen Wasserwirtschaft

In **Schleswig-Holstein** beruht die Versorgung der Bevölkerung, der Industrie und Landwirtschaft mit Wasser in Trinkwasserqualität zu 100 Prozent auf der Nutzung des Grundwassers. Insgesamt können rund 600 Millionen Kubikmeter Grundwasser gefördert werden, ohne dass es zu nachteiligen Auswirkungen für den Natur- und Wasserhaushalt kommt (MUNF 1998). Allerdings können diese Grundwassermengen nicht überall im Land im selben Umfang genutzt werden. Das Grundwasser für die Trinkwasserversorgung wird vielfach aus tieferen Grundwasserleitern entnommen (Bornhöveder Seenkette rd. 80 m Tiefe) (THOMSEN 1991). Dort sind meistens noch keine Belastungen festzustellen. Das Grundwasser in oberflächennäheren Schichten wird in zunehmendem Maße durch Einträge von Nitrat und Pestiziden aus landwirtschaftlichen Nutzflächen belastet (MUNF 1998).

### 5.4.3 Rechtsgrundlagen und umweltpolitische Steuerungsinstrumente

Der rechtliche Schutz von Gewässern wird in Europa durch Gesetze, Richtlinien und Berichte geregelt. Für die europäische Ebene ist am 22.12.2000 die **Europäische Wasserrahmenrichtlinie** in Kraft getreten. Sie stellt erstmals einen Rahmen für eine zusammenhängende Gewässerschutzpolitik in Europa, die auch über Staats- und Ländergrenzen hinweg eine koordinierte Bewirtschaftung der Gewässer innerhalb der Flusseinzugsgebiete bewirken wird, dar. Das Novum der Richtlinie liegt in einer ganzheitlichen Betrachtung der Gewässer (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2000).

Das **Wasserhaushaltsgesetz (WHG)**(Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts in der Fassung der Bekanntmachung vom 12. November 1996) regelt die wasserwirtschaftliche Ordnung, insbesondere die Benutzung der Oberflächengewässer und des Grundwassers. Nach § 1 und 3 muss sich eine Nutzung der Wasserressourcen im Einklang mit dem natürlichen Wasserhaushalt befinden. Mit dem Wasserdargebot ist sparsam umzugehen und die Leistungsfähigkeit des Wasserhaushaltes zu erhalten. Vermeidbare Beeinträchtigungen von ökologischen Funktionen sind zu unterlassen. Eingriffe in den Wasserhaushalt müssen deshalb sorgfältig beurteilt und zielgerichtet gesteuert werden. Nach § 3 sind dies die Förderung von Grundwässern und Benutzungen mit der dadurch häufigen Bildung von Absenkungstrichtern. Wasserschutzgebiete (§ 19) dienen dem Erhalt eines qualitativ und quantitativ hochwertigen Wasserdargebotes, so dass landwirtschaftliche Aktivitäten an Auflagen gebunden sind. Der § 22 skizziert Haftung für Änderungen der Beschaffenheit des Wassers. Demnach hat der Verursacher für die Beseitigung seines Schadens zu sorgen, der durch die Einleitung von Stoffen, wie z.B. Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, entstanden ist.

Im Umweltgutachten 2000 formuliert der **Sachverständigenrat der Bundesregierung für Umweltfragen** (SRU 2000) Ziele und Grundsätze für einen ökosystemaren Schutz und eine nachhaltige Nutzung der Ressource Wasser. Demnach gilt es das Selbstreinigungsvermögen und den Stoffhaushalt der Gewässer zu verbessern und vor punktuellen und flächenhaften Immissionen, z.B. durch die Landwirtschaft zu schützen. Eine standortangepasste Landnutzung ist ebenso gefordert wie eine Betrachtung der Gewässer in ihrer Gesamtheit.

In **Schleswig-Holstein** sind in den Regionen, wo Grundwasser für die Trinkwasserversorgung gewonnen wird und ungünstige hydrogeologische Verhältnisse vorherrschen, zum Schutz des Grundwassers 53 Wasserschutzgebiete ausgewiesen. Zur Zeit sind weitere Ausweisungen von Wasserschutzgebieten für 81 Wasserwerke in Bearbeitung oder werden geplant. Diese umfassen eine Fläche von rund 106.000 Hektar, das heißt etwa sieben Prozent der Landesfläche (MUNF 1998).

### 5.5 Zusammenführung akteursbezogener Kenngrößen mittels DPSIR-Wirkungskreise

Mittels der DPSIR-Wirkungskreise (Kap. 4.2.2) wird nun versucht das akquirierte Wissen der Akteure des Konflikttripels miteinander in Beziehung zu setzen. Dabei wird der Idee von Bewertungssystemen folgend die Kenngrößen der Sach- und Wertebene (Kap. 5.2, 5.3, 5.4) den Zuständen Driving forces-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) zugeordnet.

Die nachfolgenden grafischen Darstellungen führen somit ökosystemare, ökonomische, rechtliche und soziale Aspekte der Raumnutzer des Konflikttripels Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft zusammen. Die DPSIR-Methode bietet in formalisierter Weise eine Erweiterung der von der Modellbildungsseite her bekannten Wortmodelle und Wirkungsgraphen und fördert die Identifizierung interagierender Steuerungsgrößen. Dieser Schritt der Akteursvernetzung dient zugleich der Vorbereitung für die Modellbildung und ist im Methodenpaket IeMAX Bestandteil der Systemanalyse.

Die Abb. 17 zeigt die Kenngrößen der Landwirtschaft im Rahmen des DPSIR-Wirkungskreises.

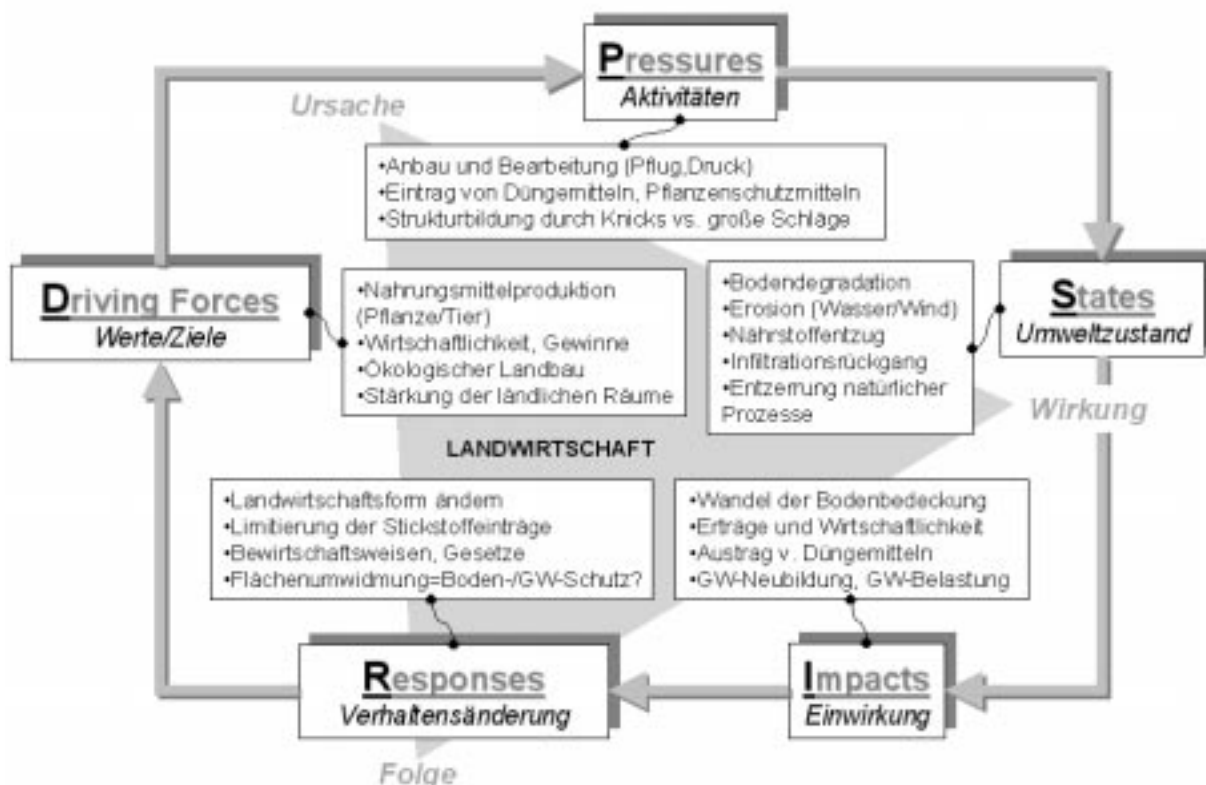


Abb. 17: Der DPSIR-Wirkungskreis der Landwirtschaft

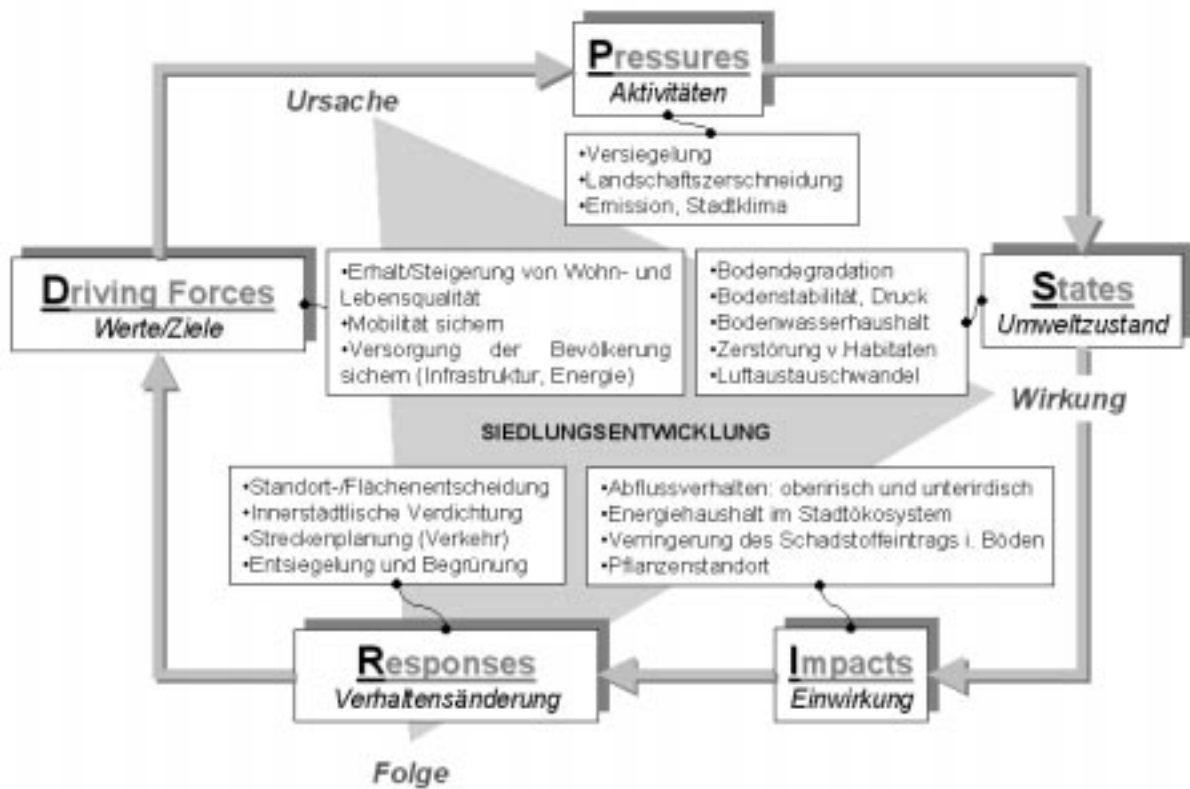


Abb. 18: Der DPSIR-Wirkungskreis der Siedlungsentwicklung

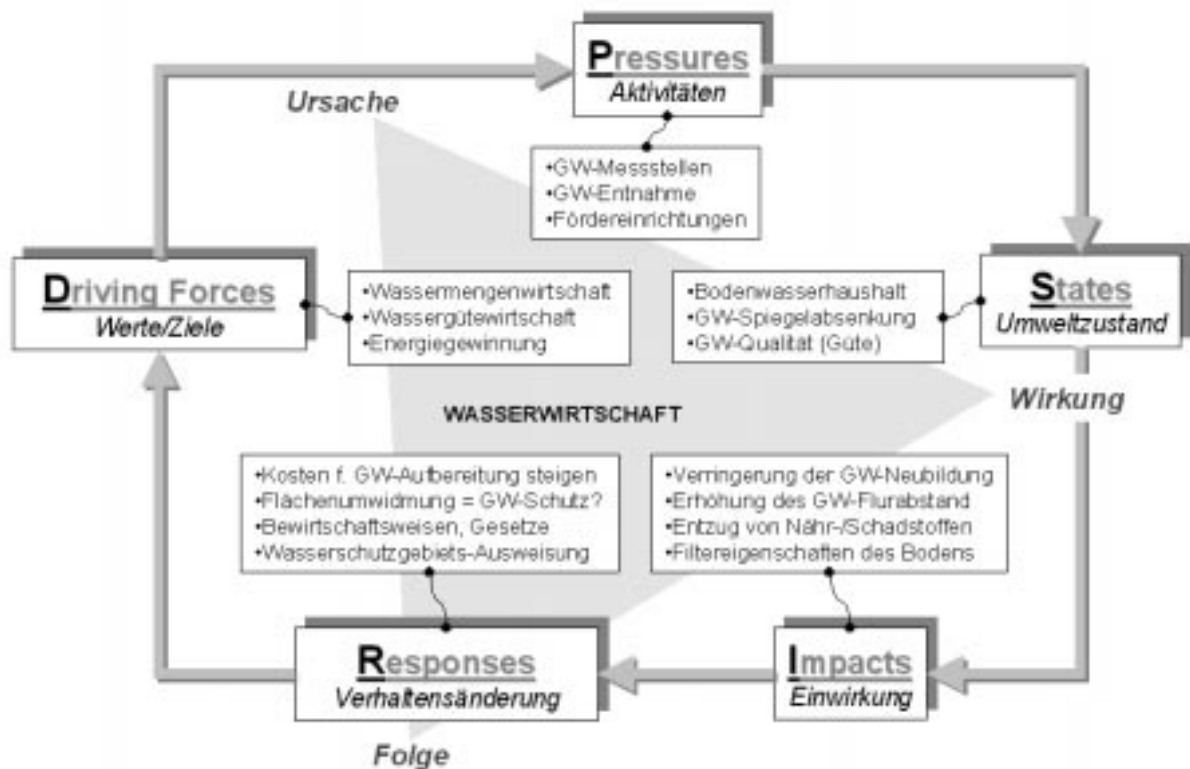


Abb. 19: Der DPSIR-Wirkungskreis der Wasserwirtschaft



**Zusammenfassend** beschreiben die DPSIR-Wirkungskreise mit den fünf Status Driving forces-Pressure-State-Impact-Response auf formalisierte Weise Mensch-Umwelt-Interaktionen und zeigen Ansatzpunkte für Verhaltensänderungen und Steuerungsmöglichkeiten zur Verbesserung des Umweltzustandes auf. Synoptisch fällt auf, dass die drei Kreisläufe der Ökosystemnutzer auf ökosystemarer Seite über die Pedo- und Hydrosphäre verbunden sind und sich die Bodenart und der Grundwasser-Flurabstand als Schlüsselgrößen für die Erfüllung der treibenden Kräfte erweisen. Weitere Schnittstellen der drei DPSIR-Wirkungskreise können der Parameter Anteil der organischen Substanz im Boden als Speicher und Puffer für Nährstoffe und Bodenwasser sein oder die Mineraldüngermenge. Im Rahmen integrativer Raumplanung lassen sich mittels der DPSIR-Methode der Problemkreis der Landwirtschaft hinsichtlich degradierter Böden, belastetem Grundwasser und reduzierter Wirtschaftlichkeit mit dem der Wasserwirtschaft, ausgedrückt durch niedrige Grundwasserqualität oder –Menge mit dem Problemkreis der Siedlungsentwicklung, nämlich der Versiegelung und Entkopplung natürlicher Prozesse in Beziehung setzen.

## 5.6 Ökosystemare Multifunktionalität und Sicherung nachhaltiger Raumentwicklung

Wie im allgemeinen Teil des Methodenpaketes IeMAX erläutert, zählt die so genannte Funktionalisierung ökosystemarer Sachverhalte zu den Methoden der Systemanalyse. Angewandt auf das vorliegende Konfliktripel wurde die so genannte ökosystemare Multifunktionalität wie folgt eingeführt: Ökosystemare Multifunktionalität (ÖSMU) steht für ein methodisches Brückenkonstrukt zur Entwicklung und Sicherung einer nachhaltigen Raumentwicklung. Der Terminus verbindet den Ansatz integrativer Umweltbewertung mit dem Versuch eines ganzheitlichen Schutzes und einer zukunftsfähigen Entwicklung ökologischer Systeme. Es wird versucht, die Dynamik von Mensch-Umwelt-Interaktionen zu erklären und zur rationalen Nutzung ökologischer Systeme beizutragen.

**Multifunktionalität** beschreibt mehrere Funktionen (z.B. Bodenfunktionen, Selbstreinigungsvermögen, Selbstorganisation) und meint in diesem Sinne mögliche mehrfache, jedoch raum- und zeitgleich mindestens zwei Ansprüchen genügende Nutzungen. In Bewertungssystemen verbindet der funktionale Ansatz die Sachebene mit der Wertebene und ihren normativen Implikationen. Die Sachebene kann auch als Bezugssystem und die Wertebene als Referenzzustand und Maßstab der Funktionen ökologischer Systeme aufgefasst werden. Die nachfolgende Tabelle fasst methodische Analogien von Bewertung, Funktion und Herangehensweisen zusammen.

BEWERTUNGSSCHEMA	FUNKTIONEN	HERANGEHENSWEISEN
Eignungsbewertung	monofunktional	sektoral
Konfliktbewertung	multifunktional	integrativ

Tab. 34: Analogien von Bewertungen, Funktionen und Herangehensweisen

Eine Multifunktionalität von Ökosystemen setzt sich im Fall des Konfliktripels aus drei Teilfunktionen zusammen (Anmerk: GW=Grundwasser).

NUTZUNGSKATEGORIE	TEILFUNKTION	ZIELE
Landwirtschaft	Produktionsfunktion (PF)	Steigerung ackerbaulicher Erträge
Siedlungsentwicklung	Infrastrukturfunktion (IF)	Verbesserung v. Infrastruktur/Mobilität
Wasserwirtschaft	Regulationsfunktion (RF)	Verbesserung von GW-Menge/–Qualität

Tab. 35: Gegenüberstellung von Nutzungskategorien, Teilfunktionen und Zielen

Die Teilfunktionen sind hauptsächlich den Zielen zugeordnet. Für eine quantitative Erfassung von Regulations- und Produktionsfunktionen bieten sich z.B. pedologische und hydrologische Parameter an (FRÄNZLE et al. 1993, HERZOG 1998). Die Messung der Infrastrukturfunktion ließe sich mit dem Indikator des Versiegelungsgrades oder der Zunahme der Flächenversiegelung und damit in Anlehnung an den Deutschen Umweltindex (DUX) durchführen (UBA 2001).

Die Sicherung multifunktionaler Landschaften, im Sinne einer nachhaltigen Raumentwicklung, kann durch den **Schutz** natürlicher Lebensgrundlagen auf der Basis von Rechtsvorschriften gründen. Zu den Rechtsvorschriften in Deutschland zählen u.a. die jüngste Novelle des Bundesnaturschutzgesetzes, das Wasserhaushaltsgesetz oder das Bundesbodenschutzgesetz (BECK-TEXTE UMWELTRECHT 1999). In diesem Zusammenhang sei ergänzend auf das Kapitel 4.4.2 im Methodenpaket IeMAX und die Kapitel 5.2.3, 5.3.3 und 5.4.3 hingewiesen. Die bisherigen Rechtstexte beziehen sich häufig auf den Schutz einzelner Umweltmedien oder sind derart vage formuliert, dass sie in keiner Verwaltungsvorschrift zu restriktiven Handlungen führen. Als Beispiele seien genannt: Artenschutz, Biotopschutz, Prozessschutz, Bodenschutz, Ressourcenschutz und Klimaschutz. Holistischer Ökosystemschutz bezieht sich dabei zuvorderst auf die Förderung eines flächenhaften Schutzsystems mit spezifischen Eigenschaften, z.B. Emergenz, Selbstorganisationsfähigkeit, Pufferungsvermögen und Dienstleistungen wie Filterung und Speicherung (MÜLLER et al. 1997). Für eine nachhaltige Raumentwicklung bilden Schutzkonzepte einen gestalterischen Rahmen, der auf Werten und rechtlichen Grundlagen einer Gesellschaft fußt.

## 5.7 Wissensmanagement und Handlungssteuerung

Die Methode des Wissensmanagements zielt als Grundlage von Entscheidungen darauf ab, Wissen in umweltschonendes bzw. wertschöpfendes Handeln der Ökosystemnutzer zu transformieren. Wie im Methodenpaket IeMAX dargelegt, bezeichnet Wissen alle kumulierten, abgesicherten Informationen, die durch bisherige Erfahrungen erworben wurden. Wissen im Rahmen von Wissensmanagement bezeichnet eine fließende Mischung aus Fachkenntnissen,

Fähigkeiten und Fertigkeiten, die zum Lösen von Aufgaben eingesetzt werden (Problemlösungswissen).

Wissen intendiert damit stets eine bestimmte Zielanwendung mit klarer Kontextabhängigkeit und erfährt eine gewisse subjektive Färbung, da der jeweilige disziplinäre Blickwinkel andere Deutungen zulässt. Daten und Wissen können, wie die nachfolgende Abbildung zeigt, sowohl nach ihrer Aussagekraft zur Unterstützung von Entscheidungen als auch nach ihrer modelltechnischen Bedeutung unterschieden werden. Bei den Daten handelt es sich um Größen, die quantitativ verarbeitet werden können, jedoch ohne Kontext keine Handlungssteuerung beinhalten. Dies ist das Fall bei Kenngrößen des Sachmodells, wie z.B. Luft- oder Wassertemperatur, der Hangneigung [ $^{\circ}$ ; %], dem Anteil der Bodenart an der Fraktion  $< 0,01$  mm [%] oder dem Grundwasser-Flurabstand [m]. Auf der Stufe der Informationen werden einzelne Messwerte bereits verarbeitet und direkte Bestimmungen mittels Wert- und Zielsystemen zugeordnet.

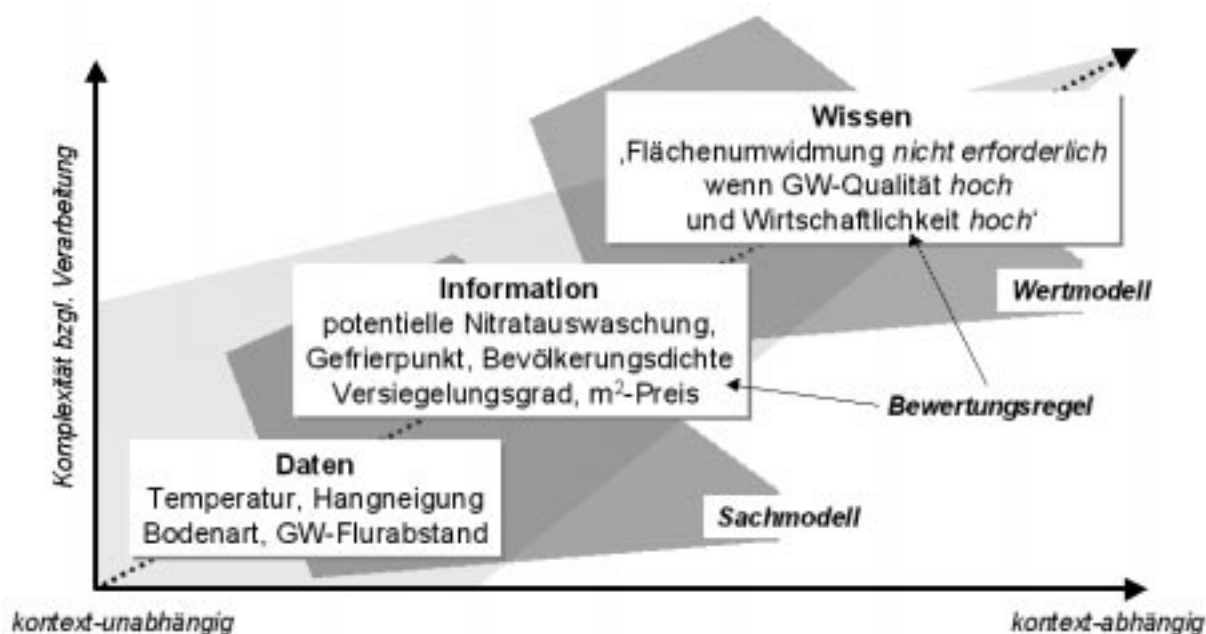


Abb. 20: Wissensmanagement für Entscheidungsfindungen beim Konfliktripel

Die potentielle Nitratauswaschung [%] könnte z.B. ein Indikator für den Verlust von Düngemitteln, aber auch ein Warnsignal für die potentielle Gefährdung des Grundwassers sein. Weitere Informationen im Sinne des Wissensmanagements sind die Bevölkerungsdichte, der Versiegelungsgrad und der Quadratmeterpreis z.B. für Bauland. Den höchsten Kontextbezug und direkte Steuerungswirkung weist Wissen auf. Es kann in Leitbildern natürlichsprachlich formuliert sein, kausale Wirkungsketten beschreiben und damit die Dynamik von Systemen erklären, Nutzungsgrenzen definieren, Angaben zu Restriktionen für Ökosystemnutzer enthalten oder letztlich als entscheidungswirksame Kenngröße Flächenumwidmungen mit den Klassen: *nicht erforderlich*, *bedingt erforderlich*, *zwingend erforderlich*, modellieren (Abb. 20).

## 6 Entwicklung und Anwendung des Fuzzy-Simulationsmodells FLUCS

Gegenstand dieses Kapitels ist die exemplarische Anwendung des Methodenpakets **IeMAX** (**I**ntegrated **e**nvironmental **M**odelling and **A**ssessment with a Fuzzy Logic **E**xpert System) auf die für das noch immer stark agrarisch geprägte Schleswig-Holstein typische Bewertungs- und Entscheidungssituation im Bereich der Gemeinden Ruhwinkel und Wankendorf. Die ökosystemar orientierte Fuzzy-Modellierung mündet in dem implementierten Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS (**F**uzzy Logic based agricultural land use change Simulation **S**ystem). Anschließend erfolgt die Anwendung von FLUCS für die Simulation dreier Raumnutzungsszenarien. Am Ende des Kapitels wird eine Analyse methodischer Unterschiede zwischen konventionellen und Fuzzy Logic-Modellierungstechniken auf der Basis der Simulationsergebnisse durchgeführt.

### 6.1 Modellstruktur und Software-Umgebung

Die Grundstruktur des aus drei Komponenten bestehenden Bewertungssystems ist in der folgenden Abbildung zusammengefasst.

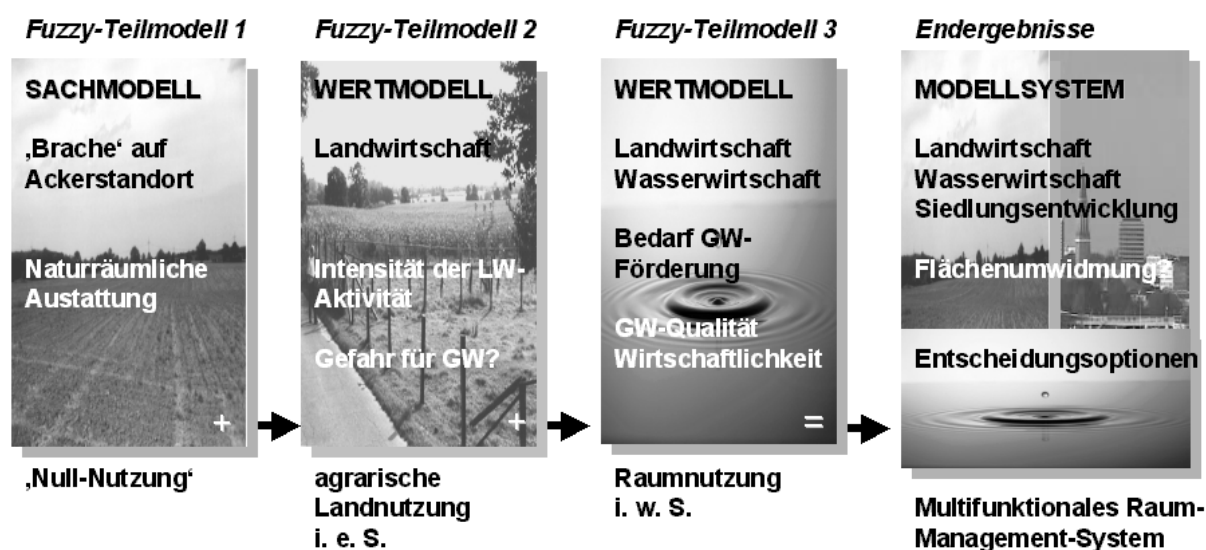


Abb. 21: Das Simulationsmodell: Sachmodell, Wertmodell und Nutzungskategorien

Das Fuzzy-Teilmodell 1 simuliert im Sachmodell die naturräumliche Ausstattung und geht von einem gemäß dem Konzept der potentiellen natürlichen Vegetation gefassten Standort bzw. einer Fläche aus. Ackerbauliche Aktivitäten als Folge eines Wert- und Zielsystems der Landwirtschaft verändern diesen Zustand mit möglichen Gefährdungen für angrenzende Ökosystemkompartimente, wie z.B. Grundwasser oder Bodenwasserhaushalt (Teilmodell 2). Im Teilmodell 3 wird das Wert- und Zielsystem der Wasserwirtschaft, insbesondere der Grund-



nente, sowie eine Benutzerschnittstelle. Als Fuzzy-Inferenzmethode ist die von Mamdani/Assilian implementierte zu nennen. XFLEco 3.1 bietet aus Anwendersicht u.a. die Vorteile, numerische, symbolische und linguistische Variablen zu deklarieren, Startbedingungen zu speichern, Teilmodelle zu entwickeln und eine große Anzahl von Variablen zu verarbeiten. Zudem kann ein so genannter Fuzziness Degree ermittelt werden. Dieser ist definiert als Unschärfegrad einer nichtleeren Menge  $A$  über  $X$  als Quotient zwischen ihrer Kardinalität und ihrer Höhe (BUI 1993).

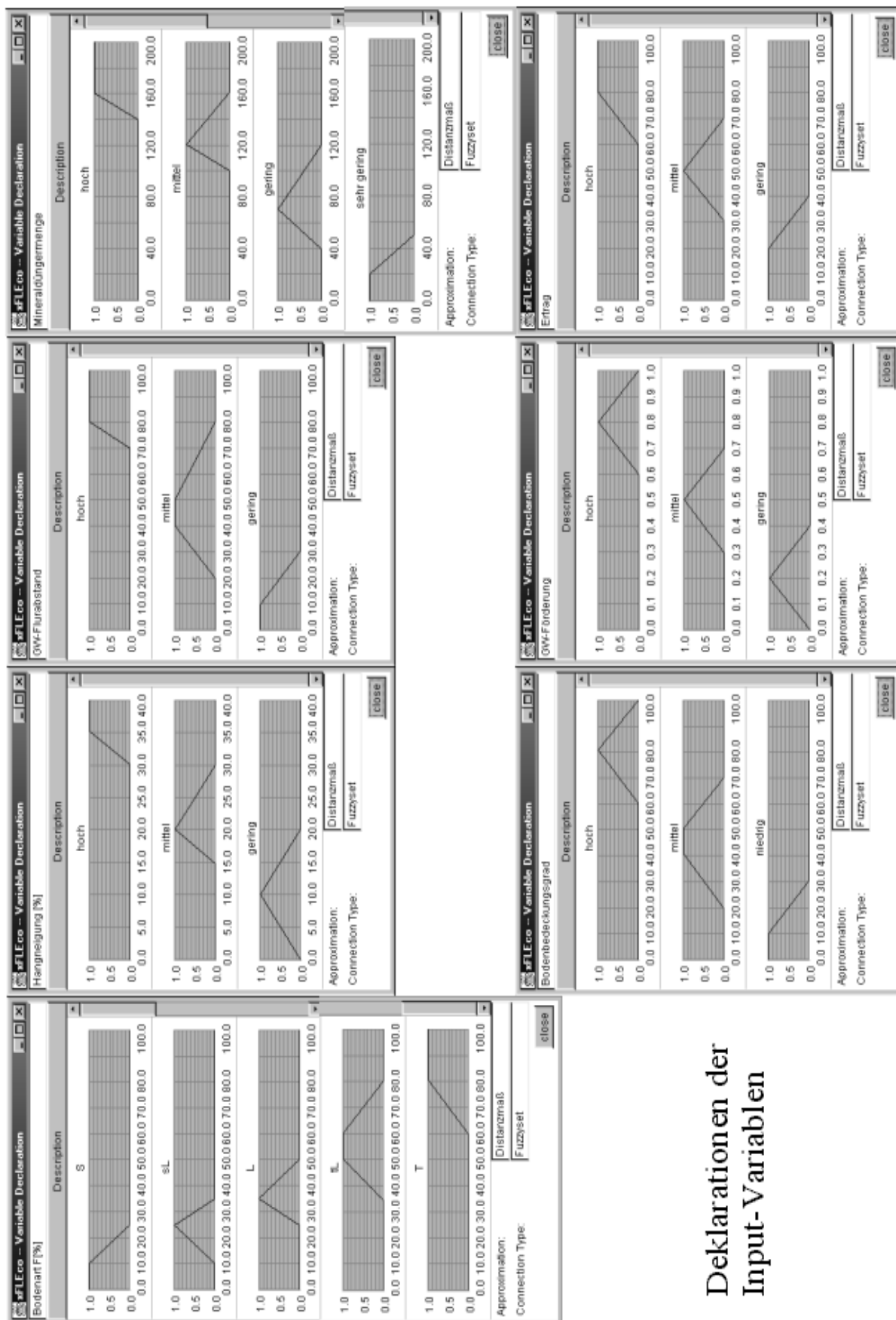
## 6.2 Wissensbasis und regelbasierte Wissensrepräsentation

Die Wissensbasis des Modellsystems speichert die in Teil 2 der Arbeit entwickelten Kenngrößen als Fuzzy-Sets (deklaratives Wissen) und Regelmengen (prozedurales Wissen).

### 6.2.1 Deklaration und Fuzzifizierung linguistischer Variablen

Nachfolgend sind alle Variablen des Modellsystems aufgelistet. Die Definitionen und ihre Rolle in den Teilmodellen und im Gesamtmodell werden dargelegt und dienen als prozedurales Wissen für die anschließende regelbasierte Wissensrepräsentation.

Die **Input-Variablen** beziehen sich auf das gesamte Modellsystems. Sie sind unabhängige Variablen, regeln die Ausprägung der Zwischengrößen und steuern das Systemverhalten der nachfolgenden Teilmodelle. Sie beschreiben das deklarative Wissen („know-that“) in der Form von Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu$  und wurden in Dreieck- oder Trapezform mit linearen Kennlinien modelliert. Die Deklarationen der sieben Input-Variablen mit insgesamt 24 Termen zeigt die Abb. 23.



## Deklarationen der Input-Variablen

Abb. 23: Deklarationen der Input-Variablen

Zu den Inputgrößen des Teilmodells 1 zählen die Bodenart, die Hangneigung und der Grundwasser-Flurabstand (Abb. 22). Die **Bodenart**, d.h. der prozentuale Gehalt der Böden an der Fraktion  $< 0,01$  mm, ist mit fünf Klassen (Terme) und ihren entsprechenden Fuzzy-Sets, in Anlehnung an die Einteilung nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992), wie folgt gefasst.

VARIABLE	KLASSEN	ABKÜRZUNG	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Bodenart	Sand	S	$<19$	[%]
	sandiger Lehm	sL	$19<30$	
	Lehm	L	$30<45$	
	toniger Lehm	tL	$45<60$	
	Ton	T	$>60$	

Tab. 36: Klassen und Wertebereiche der Bodenart

Bodenarten bilden eine übergeordnete Steuergröße in der Pedosphäre und beeinflussen das Wasserspeichungsvermögen von Böden. Eine abnehmende Wasserleitfähigkeit führt zum Absinken der Nitrat-Auswaschung, so dass die nitrathaltige Bodenlösung länger im durchwurzelbaren Raum gegen die Schwerkraft festgehalten werden kann. Bei Sandböden wirkt neben dem Substrat auch die geringere Durchwurzelungstiefe förderlich für die Nitrat-Auswaschung, weshalb Grundwasser unter Sandstandorten besonders gefährdet ist. Dabei bestimmt überwiegend die Bodenart und der Gehalt an organischer Substanz die Höhe des Wasserspeichungsvermögens eines Bodens.

Die **Hangneigung** [%] skizziert als relative Größe das Gefälle in der Landschaft zwischen zwei Betrachtungspunkten. Das östliche Seen- und Hügelland Schleswig-Holsteins ist geformt durch die letzte Eiszeit (Weichseleiszeit), die das Relief und damit auch die Hangneigung landwirtschaftlicher Nutzflächen prägt und lokal stark variieren kann. Große Hangneigung führt zu einer reduzierten Versickerung von Niederschlagswasser und erhöht die Möglichkeit oberflächlicher Abschwemmungen (Wassererosion) von dem für die Landwirtschaft wertvollen Bodenmaterial. Geringe Hangneigung lässt Niederschlagswasser ebenso wie auch ausgebrachte Düng- und Pflanzenschutzmittel leichter in den Boden versickern (BASTIAN & SCHREIBER (1999)).

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Hangneigung	hoch	$>35$	[%]
	mittel	$10<35$	
	gering	$<10$	

Tab. 37: Klassen und Wertebereiche der Variable Hangneigung

Der **Grundwasser-Flurabstand** [m] kennzeichnet die vertikale Differenz zwischen einer Geländeoberfläche und der Oberfläche eines Grundwasserkörpers. Die drei Klassen des Grundwasser-Flurabstands orientieren sich an den Untersuchungen (PIOTROWSKI 1999) im Bereich der Bornhöveder Seenkette.



VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
GW-Flurabstand	hoch	>60	[m]
	mittel	10<60	
	gering	<10	

Tab. 38: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Flurabstand

Input-Variablen des Teilmodells 2 sind die Ausbringung von Mineraldünger und der Grad der Bodenbedeckung; ferner fließt die Zwischengröße Grundwasser-Neubildung als berechneter Summenparameter ein.

Die **Mineraldüngergabe** [kg/ha] hat sich in den Jahren 1979-1993 in der in folgender Tabelle zusammengefassten Weise verändert (MELFF 1995).

NÄHRSTOFFE AUF LANDWIRTSCHAFTSFLÄCHEN IN SCHLESWIG-HOLSTEIN (kg/ha)				
Nährstoff	1979	1989	1993	1979-1993
Stickstoff (N)	149	166	158	158
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	91	55	27	58
Kali (K <sub>2</sub> O)	99	85	48	78
Kalk (CaO)	115	116	92	108

Tab. 39: Mineraldüngeraufwand in Schleswig-Holstein

Hat sich bei den Mineraldüngerarten Phosphat, Kalium und Kalk eine deutliche Abnahme ergeben, zeigt sich bei Stickstoffdünger ein anderes Bild. Leichte Schwankungen auf hohem Niveau und ein Wert von 158 kg/ha im Jahr 1993, der dem 14jährigen Mittelwert entspricht, kennzeichnen den sehr hohen Stickstoffeinsatz durch die Landwirtschaft. Die vier Klassen der Variable Mineraldüngermenge orientieren sich an den konventionellen Klassengrenzen (MELFF 1995).

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Mineraldüngergabe	hoch	>150	[kg/ha]
	mittel	100<150	
	gering	50<100	
	sehr gering	<50	

Tab. 40: Klassen und Wertebereiche der Variable Mineraldüngergabe

Die **Bodenbedeckung** beschreibt die Abdeckung eines Bodenkörpers mit landwirtschaftlichen Feldfrüchten (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Bodenbedeckungsgrad	hoch	>60	[%]
	mittel	30<60	
	niedrig	<30	

Tab. 41: Klassen und Wertebereiche der Variable Bodenbedeckung

Input-Variablen des Teilmodells 3 sind zum einen die Grundwasser-Förderung, abgeleitet auf der Basis des Wert- und Zielsystems der Wasserwirtschaft, zum anderen Schätzungen zum landwirtschaftlichen Ertrag. Als dritte Größe fließt die Variable potentielle Nitratauswaschung (PdN) in das Teilmodell 3 ein.

Die **Grundwasser-Förderung** zur öffentlichen Wasserversorgung in Schleswig-Holstein betrug im Jahr 2000, 227,88 Mio. m<sup>3</sup> (URL: <http://www.nuis.landsh.de/nuis/wafis/gwentnahme.htm>). Das Grundwasser wird beispielsweise aus den Rückschmelzsanden der Saale-Vereisung gewonnen. Mit ca. 80 m Tiefe unter Geländeoberfläche im Gebiet der Bornhöveder Seenkette stellen sie den zweiten Aquifer dar. Glazifluviale Ablagerungen des ersten weichseleiszeitlichen Vorstoßes liegen auf einem Meeresniveau von ca. 20 m; zusammen mit den darüber liegenden, stark sandigen bis kiesigen Sedimenten des Kalübbes Sanders stellen sie den oberen Aquifer dar (PIOTROWSKI 1991).

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
GW-Förderung	hoch	s. Abb. 23	[%]
	mittel	s. Abb. 23	
	gering	s. Abb. 23	

Tab. 42: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Förderung

Neben den auftretenden Bodenarten und Bodentypen bestimmen die Substratverhältnisse der Sanderflächen die Durchlässigkeit für Schadstoffe in den Untergrund. Die Substrate des Kalübbes Sanders, in denen die Förderbrunnen für Trinkwasser der Gemeinde Wankendorf liegen, begünstigen unter einer relativ geringmächtigen Geschiebemergelaufgabe die rasche Stoffverlagerung in den Untergrund und begründen nachweislich hohe Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Amtes Wankendorf. Im südlichen Untersuchungsraum Ruhwinkel ist die Grundmoränendecke weniger mächtig, so dass die Trinkwasserfördergebiete bereits 15 bis 20 m unter der Geländeoberfläche liegen und Durchschnittswerte von 75 mg/l Nitrat aufweisen (PIOTROWSKI 1991, THOMSEN 1991). Die skizzierte Situation wurde bei der Deklaration der linguistischen Variable GW-Flurabstand berücksichtigt.

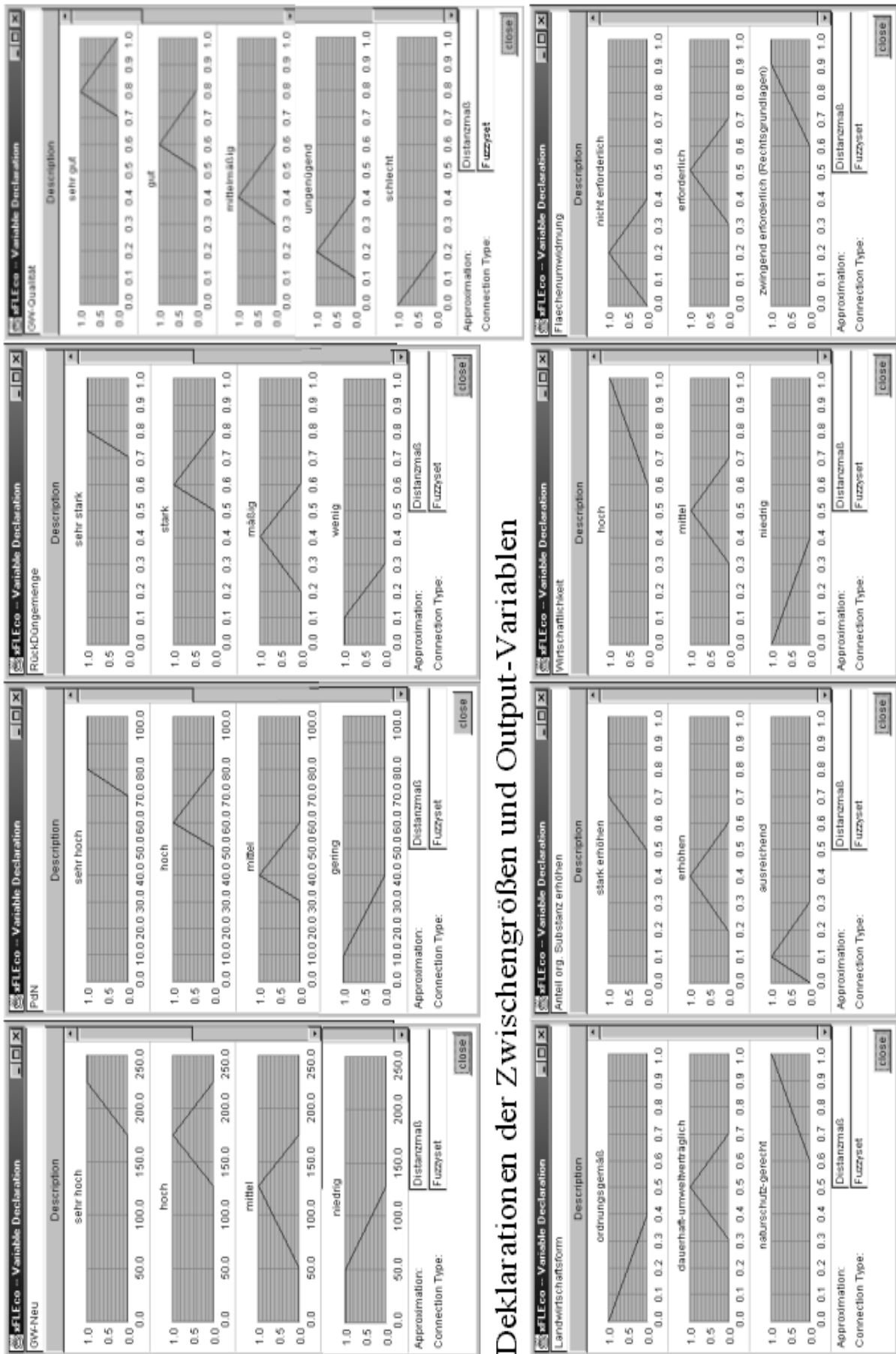
Der **landwirtschaftliche Ertrag** ist ein Maß für die Erntemenge von Feldfrüchten pro Flächeneinheit und wird gemessen in Dezitonnen pro Hektar Anbaufläche (dt/ha). Die statisti-

schen Durchschnittswerte des landwirtschaftlichen Ertrags der Jahre 1991 bis 1998 bilden die Grundlage für die linguistischen Terme (=Klassen) des Ertrags (STALA URL: [http://www.statistik-sh.de/M4/M4\\_7K11T11.htm](http://www.statistik-sh.de/M4/M4_7K11T11.htm)).

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Ertrag	hoch	>70	[dt/ha]
	mittel	20<70	
	gering	<20	

Tab. 43: Klassen und Wertebereiche der Variable Ertrag

Ergebnisse der Modellrechnungen werden als Werte von **Zwischengrößen** und **Output-Variablen** ausgegeben. Die Output-Variablen sind abhängige Variablen, d.h. ihre Ausprägungen werden durch andere Variablen beeinflusst. Die Zwischengrößen weisen einen doppelten Charakter auf. In den Teilmodellen 1 und 2 sind sie abhängige Variablen und als Input-Variablen der Teilmodelle 2 und 3 unabhängige Variablen. Im Teilmodell 1 resultiert die Grundwasser-Neubildungsrate aus einer Verknüpfung der Input-Variablen Bodenart, Hangneigung und GW-Abstand.



**Deklarationen der Zwischengrößen und Output-Variablen**

Abb. 24: Deklarationen der Zwischengrößen und Output-Variablen

Die **Grundwasserneubildungsrate** [mm/a] definiert den Zustrom von Niederschlags- oder lateralem Zuflusswasser zum Aquifer. Neben dem Niederschlag hängt sie maßgeblich von den Standortfaktoren: Bodenart, der Hangneigung des Geländes und dem Abstand zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel ab (GW-Flurabstand). Die GW-Neubildungsrate bildet das Zwischenergebnis aus den Verrechnungen der Variablenausprägungen im Teilmodell 1 und ist gleichzeitig Input für das Teilmodell 2 (Abb. 22)(SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
GW-Neubildungsrate	sehr hoch	>200	[mm/a]
	hoch	150<200	
	mittel	100<150	
	niedrig	<100	

Tab. 44: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Neubildungsrate

Aus der Mineraldüngermenge, dem Grad der Bodenbedeckung und der Zwischengröße GW-Neubildungsrate berechnet FLUCS die potentielle Nitratauswaschung. Diese linguistische Variable spielt im Modellsystem eine zentrale Rolle. Sie steuert mit direkter Verknüpfung die Output-Variablen: Landwirtschaftsform, Rückgabe-Düngemenge, Anteil der organischen Substanz und ist zugleich Input-Größe für das Teilmodell 3.

Die **potentielle Nitratauswaschung (PdN)** beschreibt den Verlust von Nitrat aus der Bodenzone ins Grundwasser. Stickstoffspezies unterliegen in Böden einer kontinuierlichen Umwandlung zwischen anorganischen und organischen N-Verbindungen. Nitrat wird im Stickstoffkreislauf durch die Nitrifizierung mikrobiell gebildet oder als Mineraldünger eingebracht und kann entweder von den Anbaupflanzen als Nährstoff aufgenommen, mittels Denitrifizierung umgebaut und an die Atmosphäre gelangen, oder aus der Bodenzone ausgewaschen und dem Grundwasser zugeführt werden. Die Systemgröße PdN bildet das Zwischenergebnis aus den Verrechnungen der Variablenausprägungen im Teilmodell 2 und ist gleichzeitig Input für das Teilmodell 3.

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Potentielle	sehr hoch	>75	[%]
Nitratauswaschung (PdN)	hoch	50<75	
	mittel	30<50	
	gering	< 30	

Tab. 45: Klassen und Wertebereiche der Variable potentielle Nitratauswaschung

Die nachfolgenden Systemgrößen sind Ergebnisse von Berechnungen aus den Teilmodellen 1 und 2 und besitzen den Charakter von Empfehlungen für die agrarische Landnutzung. Gemeinsam ist den Größen Landwirtschaftsform, Verringerung der Düngemenge und Veränderungen des Anteils organischer Substanz im Boden, die jeweilige ordinale Werteskala.

Die Output-Größe **Landwirtschaftsform** resultiert aus der potentiellen Nitratauswaschung und damit dem Teilmodell 2. Sie ist ein verbales Bilanzmaß zwischen landwirtschaftlichen Produktionsweisen und der Beachtung von Umweltschutzaspekten, z.B. der umweltrechtlichen Forderung der ‚Guten fachlichen Praxis‘. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die implementierten linguistischen Terme (KLEIN et al. 1997, TOBIAS 1997).

LANDWIRTSCHAFTSFORMEN UND UMWELTSCHUTZASPEKTE	
Ordnungsgemäße Landwirtschaft	Entspricht einer angewandten landwirtschaftlichen Produktionsmethode für Tier- und Pflanzenproduktion, dem jeweiligen agrarwissenschaftlichen Kenntnisstand gemäß. Gesichtspunkte des Natur- und Umweltschutzes bleiben unbeachtet. Verbesserungsvorschläge sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln zu reduzieren,</li> <li>• bisherige extensive Produktionsformen fortzuführen und Ackerland in extensives Grünland umzuwandeln,</li> <li>• Anwendung landwirtschaftlicher Praktiken, die mit dem Schutz der Umwelt und natürlicher Ressourcen vereinbar sind, z.B. ökologische Landbauverfahren.</li> </ul>
Dauerhaft umweltgerechte Landwirtschaft	Formen der landwirtschaftlichen Nutzung, die: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Belastungen und Qualitätsminderungen der natürlichen, abiotischen Ressourcen, wie Boden, Wasser, Luft weitgehend vermeiden,</li> <li>• zukunftsfähige Auswirkungen auf angrenzende Ökosysteme haben (entspricht dem Nachhaltigkeitsprinzip im ökologischen Sinne).</li> </ul>
Naturschutzgerechte Landwirtschaft	Formen landwirtschaftlicher Nutzung, die: <ul style="list-style-type: none"> <li>• den speziellen naturschutzfachlichen Zielen für betroffene Flächen dienen,</li> <li>• den Erhalt der typischen Lebensgemeinschaften auf den betroffenen Flächen gewährleisten,</li> <li>• Förderung, Bildung und Erhaltung von Naturschutzsystemen schaffen,</li> <li>• zu einer Erhaltung und Regeneration von Biotopverbundsystemen mit regionalen und überregionalen Verbundachsen zwischen anthropogen genutzten und ungenutzten, meist naturnahen Lebensräumen, führen.</li> </ul>

Tab. 46: Klassen und Wertebereiche der Variable Landwirtschaftsform

Die Ergebnisgröße **Verringerung der Mineraldüngermenge** (RückDüngemenge) ist eine direkte Rückkopplungsgröße aus den berechneten Werten der potentiellen Nitratauswaschung und deutet auf entsprechendes Verhalten des Landwirts in Teilmodell 2 hin. Aus kybernetischem Blickwinkel betrachtet, fallen dieser Systemgröße zwei Aufgaben zu: Einerseits *regelt* (mit externem Ziel) die RückDüngemenge die Wirtschaftsweise. Ist die potentielle Nitratauswaschung ‚hoch‘ und der Ertrag ‚gering‘, ist der Einsatz von Mineraldünger aus umweltöko-

nomischen Gründen ‚stark zu reduzieren‘. Andererseits gehen von dieser Variable *steuernde* Wirkungen auf die Nährstoffkreisläufe in der Bodenzone und im Boden- und Grundwasser aus.

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Reduzierung der Mineraldüngermenge	sehr stark	s. Abb. 24	[%]
	stark	s. Abb. 24	
	mäßig	s. Abb. 24	
	wenig	s. Abb. 24	

Tab. 47: Klassen und Wertebereiche der Variable Reduzierung der Düngemenge

Der **Anteil der organischen Substanz** in Böden definiert alle in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe sowie deren organische Umwandlungsprodukte (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992). Bei FLUCS bezieht sich die Systemgröße überwiegend auf anthropogen leicht steuerbare Anteile pflanzlicher Substanz, d.h. Ernterückstände und Wirtschaftsdünger. Im Boden bindet der Anteil der organischen Substanz Bodenwasser sowie Nährstoffe und erlangt damit für die landwirtschaftliche Nutzung eine hohe puffernde Bedeutung. Die Variable Anteil der organischen Substanz ist auf einer ordinalen Skala mit den drei Termen: ‚stark erhöhen‘, ‚erhöhen‘ und ‚ausreichend‘, modelliert.

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Anteil der organischen Substanz in Böden	stark erhöhen	s. Abb. 24	[%]
	erhöhen	s. Abb. 24	
	ausreichend	s. Abb. 24	

Tab. 48: Klassen und Wertebereiche der Variable Anteil der organischen Substanz in Böden

Die **Grundwasser-Qualität** ist ein Summenindikator. Die relative Skalierung orientiert sich am maximal zulässigen Nitratgehalt in Grundwässern für die Förderung und Weiterverarbeitung als Trink- und Brauchwasser (ROHMANN & SONTHEIMER 1985).

VARIABLE	KLASSEN (im Sinne von)	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
GW-Qualität (für Trink- und Brauchwasser)	sehr gut	<10	[mg NO <sub>3</sub> /l]
	gut	10<20	
	mittelmäßig (ausreichend)	20<50	
	ungenügend (mangelhaft)	50<100	
	schlecht (ungenügend)	>100	

Tab. 49: Klassen und Wertebereiche der Variable Grundwasser-Qualität

Die Besonderheit dieser Variable mit ihren fünf Klassen ist die doppelte Stellung innerhalb der Produktionsregeln; denn sie steht sowohl in der Konklusion, als auch in der Prämisse im Teilmodell 3 (Abb. 22).

Die **Wirtschaftlichkeit** („Effizienz“) ermittelt sich aus der Relation zwischen der Mineraldüngergabe (TM 2) und dem Ertrag (TM 3) und besitzt den oben erwähnten Charakter einer empfehlenden qualitativen Aussage. Gleichzeitig ist die Wirtschaftlichkeit ein Konklusionswert der potenziellen Nitratauswaschung sowohl in Relation zum Ertrag wie auch als zweite Prämisse im Konklusionsteil Flächenumwidmung neben der Variable Grundwasser-Qualität.

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Wirtschaftlichkeit	hoch	s. Abb. 24	[%]
	mittel	s. Abb. 24	
	niedrig	s. Abb. 24	

Tab. 50: Klassen und Wertebereiche der Variable Wirtschaftlichkeit

Die abhängige Variable **Flächenumwidmung** liefert als Gesamtergebnis von FLUCS Handlungsoptionen für unterschiedliche Raumnutzungen. Jede Umwidmung von Flächen geht einher mit Veränderungen im Naturhaushalt von Landschaften. Sie erstrecken sich über ein breites Spektrum von Nutzungsformen, beginnend mit dem Brachestadium („Null-Nutzung“) und endend beim hochintensiven Ackerbau mit modernsten Bewirtschaftungstechniken. Die Deklaration erfolgt mit dreieckigen Fuzzy-Sets auf einer relativen Skala von 0 bis 1. Als Terme für die Konklusion wurden ‚nicht erforderlich‘, ‚bedingt erforderlich‘ und ‚zwingend erforderlich‘ implementiert (Tab. 51). Da es sich hier nicht um eine metrische Systemgröße handelt, erscheinen drei mögliche Handlungsoptionen für die Entscheidungsfindung als geeignet. Jede weitere Hinzunahme einer Klasse würde nicht unbedingt die Aussage als solche verbessern. Bei den Gesamtergebnissen können, positiv gesehen, Zustände erkannt und im Umkehrschluss negative Wirkungen ausgeschlossen werden.

VARIABLE	KLASSEN	WERTEBEREICHE	EINHEIT/SKALA
Flächenumwidmung	nicht erforderlich	s. Abb. 24	[%]
	bedingt erforderlich	s. Abb. 24	
	zwingend erforderlich	s. Abb. 24	

Tab. 51: Klassen und Wertebereiche der Variable Flächenumwidmung

## 6.2.2 Regelbasierte Wissensrepräsentation

Im Modellsystem sind insgesamt 136 Regeln implementiert. Diese repräsentieren den Ablauf ökosystemarer Prozesse und die Wirkung menschlichen Handelns. Nachfolgend sind die Regelmengen, getrennt nach Teilmodellen und Input-, Zwischen- und Outputgrößen, aufgeführt. Die Tabelle des Teilmodells 1 erfasst ökosystemare Strukturen und Prozesse in 45 ‚Wenn-Dann-Regeln‘. Die Regelmenge für die Sachebene bezieht sich auf die vier Variablen: Bodenart, Grundwasser-Flurabstand, Hangneigung und Grundwasser-Neubildung.



NATURRÄUMLICHE AUSSTATTUNG				
	PRÄMISSE	PRÄMISSE	PRÄMISSE	KONKLUSION
Nr.	Bodenart	GW-Flurabstand	Hangneigung	GW-Neubildung
1	s	h	h	m
2	s	h	m	h
3	s	h	g	h
4	sL	h	h	m
5	sL	h	m	m
6	sL	h	g	h
7	L	h	h	m
8	L	h	m	m
9	L	h	g	m
10	IT	h	h	n
11	IT	h	m	m
12	IT	h	g	m
13	T	h	h	n
14	T	h	m	n
15	T	h	g	m
16	s	m	h	h
17	s	m	m	sh
18	s	m	g	sh
19	sL	m	h	h
20	sL	m	m	h
21	sL	m	g	sh
22	L	m	h	h
23	L	m	m	h
24	L	m	g	h
25	IT	m	h	m
26	IT	m	m	h
27	IT	m	g	h
28	T	m	h	m
29	T	m	m	m
30	T	m	g	h
31	s	g	h	sh
32	s	g	m	sh
33	s	g	g	sh
34	sL	g	h	h
35	sL	g	m	sh
36	sL	g	g	sh
37	L	g	h	h
38	L	g	m	h
39	L	g	g	sh
40	IT	g	h	h
41	IT	g	m	h
42	IT	g	g	h
43	T	g	h	m
44	T	g	m	m
45	T	g	g	h

sh=sehr hoch, h=hoch, m=mittel, g=gering, n= niedrig, s=Sand, sL=sandiger Lehm, L=Lehm, IT=lehmgiger Ton, T=Ton

Tab. 52: Regelsystem des Teilmodells 1: Naturräumliche Ausstattung

**Bodennutzung und potentielle Grundwasserbeeinträchtigung**

Im Teilmodell 2 repräsentieren 48 ‚Wenn-Dann-Regeln‘ den Einfluss der Landnutzung (Mineraldüngung, Bodenbedeckung) und bestimmen, unter Berücksichtigung der berechneten Grundwasser-Neubildung aus Teilmodell 1, die potentielle Nitratauswaschung (PdN).

LANDWIRTSCHAFTLICHE AKTIVITÄTEN UND POTENTIELLE GRUNDWASSERBEEINTRÄCHTIGUNGEN				
	PRÄMISSE	PRÄMISSE	PRÄMISSE	KONKLUSION
Nr.	Bodenbedeckungsgrad	GW-Neubildung	Mineraldünger	PdN
1	h	sh	h	h
2	h	sh	m	h
3	h	sh	g	h
4	h	sh	sg	m
5	h	h	h	h
6	h	h	m	m
7	h	h	g	m
8	h	h	sg	g
9	h	m	h	m
10	h	m	m	m
11	h	m	g	m
12	h	m	sg	g
13	h	n	h	m
14	h	n	m	g
15	h	n	g	g
16	h	n	sg	g
17	m	sh	h	sh
18	m	sh	m	h
19	m	sh	g	h
20	m	sh	sg	m
21	m	h	h	h
22	m	h	m	h
23	m	h	g	m
24	m	h	sg	m
25	m	m	h	h
26	m	m	m	m
27	m	m	g	m
28	m	m	sg	m
29	m	n	h	m
30	m	n	m	m
31	m	n	g	g
32	m	n	sg	g
33	n	sh	h	sh
34	n	sh	m	sh
35	n	sh	g	h
36	n	sh	sg	h
37	n	h	h	sh
38	n	h	m	h
39	n	h	g	h
40	n	h	sg	m
41	n	m	h	h
42	n	m	m	h
43	n	m	g	m
44	n	m	sg	m
45	n	n	h	m
46	n	n	m	m
47	n	n	g	m
48	n	n	sg	g

sh=sehr hoch, h=hoch, m=mittel, n= niedrig, g=gering, sg=sehr gering

Tab. 53: Regelsystem des Teilmodells 2: Bodennutzung

Aus der berechneten potentiellen Nitratauswaschung werden als Ergebnisgrößen die Landwirtschaftsform, der Anteil der organischen Substanz im Boden, und die Notwendigkeit der Reduzierung der Düngemenge abgeleitet und in vier Regeln repräsentiert.

ERGEBNISSE DES TEILMODELLS 2				
	PRÄMISSE	KONKLUSION	KONKLUSION	KONKLUSION
Nr.	PdN	Landwirtschaftsform	Anteil org. Substanz	RückDüngemenge
1	sh	ordnungsgemäß	stark erhöhen	sehr stark reduzieren
2	h	dauerhaft- umweltgerecht	erhöhen	stark
3	m	naturschutzgerecht	ausreichend	mäßig
4	g	naturschutzgerecht	ausreichend	wenig

Tab. 54: Regelsystem des Teilmodells 2: Ergebnisse

### Konflikttripel: Landwirtschaft, Wasserwirtschaft und Siedlungsentwicklung

Im Teilmodell 3 sind insgesamt 39 Regeln implementiert. Aus der potentiellen Nitratauswaschung wird, unter Hinzunahme von Werten der Grundwasser-Förderung, die Zwischengröße Grundwasser-Qualität berechnet. Sie spiegelt mit ihren drei Klassen die Spannbreite der Ziele der Wasserwirtschaft wider und dementsprechend ist die Grundwasser-Qualität eine Bewertungsgrundlage für die Siedlungs- und Verkehrsentwicklung und damit Input-Größe für die Berechnung der Variable Flächenumwidmung.

WASSERWIRTSCHAFT			
	PRÄMISSE	PRÄMISSE	KONKLUSION
Nr.	PdN	GW-Förderung	GW-Qualität
1	sh	h	m
2	sh	m	u
3	sh	g	s
4	h	h	g
5	h	m	s
6	h	g	m
7	m	h	sg
8	m	m	g
9	m	g	u
10	g	h	sg
11	g	m	g
12	g	g	m

sh=sehr hoch, h=hoch, m=mittel, g=gering; GW-Qualität sg=sehr gut, g=gut, m=mittel, u=ungenügend, s=schlecht

Tab. 55: Regelsystem des Teilmodells 3: Wasserwirtschaft

Als Vergleichsmaßstab für die Landwirtschaft berechnet FLUCS über 12 Regeln die so genannte Wirtschaftlichkeit. Sie korreliert mit der potentiellen Nitratauswaschung und dem ackerbaulichen Ertrag.

LANDWIRTSCHAFT			
	PRÄMISSE	PRÄMISSE	KONKLUSION
Nr.	PdN	Ertrag	Wirtschaftlichkeit
1	sh	h	m
2	sh	m	m
3	sh	g	g
4	h	h	h
5	h	m	m
6	h	g	n
7	m	h	h
8	m	m	m
9	m	g	n
10	g	h	h
11	g	m	h
12	g	g	m

sh=sehr hoch, h=hoch, m=mittel, n= niedrig, g=gering

Tab. 56: Regelsystem des Teilmodells 3: Landwirtschaft

FLUCS liefert als Gesamtergebnis Merkmalsausprägungen der Variable Flächenumwidmung und damit Argumente für oder wider einer Siedlungsentwicklung. Die Flächenumwidmung resultiert aus den Werten der Wirtschaftlichkeit und der Grundwasser-Qualität und ist in der nachfolgenden Tabelle mit 15 Regeln dargestellt.

GESAMTERGEBNIS			
	PRÄMISSE	PRÄMISSE	KONKLUSION
Nr.	Wirtschaftlichkeit	GW-Qualität	Flächenumwidmung
1	hoch	sehr gut	nicht erforderlich
2	hoch	gut	nicht erforderlich
3	hoch	mittelmäßig	bedingt erforderlich
4	hoch	ungenügend	bedingt erforderlich
5	hoch	schlecht	zwingend erforderlich
6	mittel	sehr gut	nicht erforderlich
7	mittel	gut	bedingt erforderlich
8	mittel	mittelmäßig	bedingt erforderlich
9	mittel	ungenügend	zwingend erforderlich
10	mittel	schlecht	zwingend erforderlich
11	niedrig	sehr gut	bedingt erforderlich
12	niedrig	gut	bedingt erforderlich
13	niedrig	mittelmäßig	zwingend erforderlich
14	niedrig	ungenügend	zwingend erforderlich
15	niedrig	schlecht	zwingend erforderlich

Tab. 57: Regelsystem des Teilmodells 3: Gesamtergebnis

### 6.3 Anwendung des Modellsystems und Interpretation der Simulationsergebnisse der Szenarienmodellierung

Die Anwendung von FLUCS, die Darstellung der Simulationen und die Interpretation der Ergebnisse erfolgt einerseits in fachlicher und andererseits in methodischer Hinsicht. **Fachlich:** Die Verbindung von Szenariotechnik und Fuzzy-Modellierung strebt an, auch weniger präzise Vorstellungen in Hinblick auf zukünftige Raumentwicklungen im Modellsystem zu berücksichtigen. Zugleich werden eventuelle Gefahren verdeutlicht sowie Entscheidungspfade und vernetzte Strategien für eine nachhaltig-multifunktionale Raumentwicklung aufgezeigt. Die Durchführung von Best-Case, Ist- und Worst-Case Szenarios veranschaulicht das Spektrum möglicher Anwendungsbereiche des Modellsystems (Kapitel 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3).

In **methodischer** Hinsicht stehen zwei Software-Experimente im Vordergrund:

1. Variabilität der Simulationsergebnisse bei Input in linguistischer und in numerischer Form (Kap. 6.4.1)
2. Modellierung konventioneller und unscharfer Klassengrenzen (Kap. 6.4.2)

Die Simulationsergebnisse werden als Zwischenergebnisse und Output-Größen des Modellsystems in dreifacher Weise ausgegeben: a) in grafischer Form als neu generiertes Fuzzy-Set, b) per linguistischer Approximation als umgangssprachlicher Ausdruck und c) als durch Defuzzifizierung ermittelter numerischer Wert. Für die Defuzzifizierung wird die von xFLEco 3.1 unterstützte Flächenschwerpunktmethode angewendet.

#### 6.3.1 Best-Case-Szenario: Uneingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung

Im Zentrum des Best-Case-Szenarios steht die zukünftige Entwicklung von Mensch-Umwelt-Interaktionen hin zu einer uneingeschränkt-multifunktionalen Raumnutzung. Die Simulation möglicher Flächenumwidmungen geht von mäßiger bzw. extensiver Ackernutzung auf günstigen Standorten/Flächen des östlichen Seen- und Hügellandes Schleswig-Holsteins aus. Geprüft wird, inwieweit diese Nutzungsform mit dem Wertesystem der Wasserwirtschaft harmonisiert und ob Flächenumwidmungen als Handlungsoptionen für eine Siedlungsentwicklung erforderlich sind.

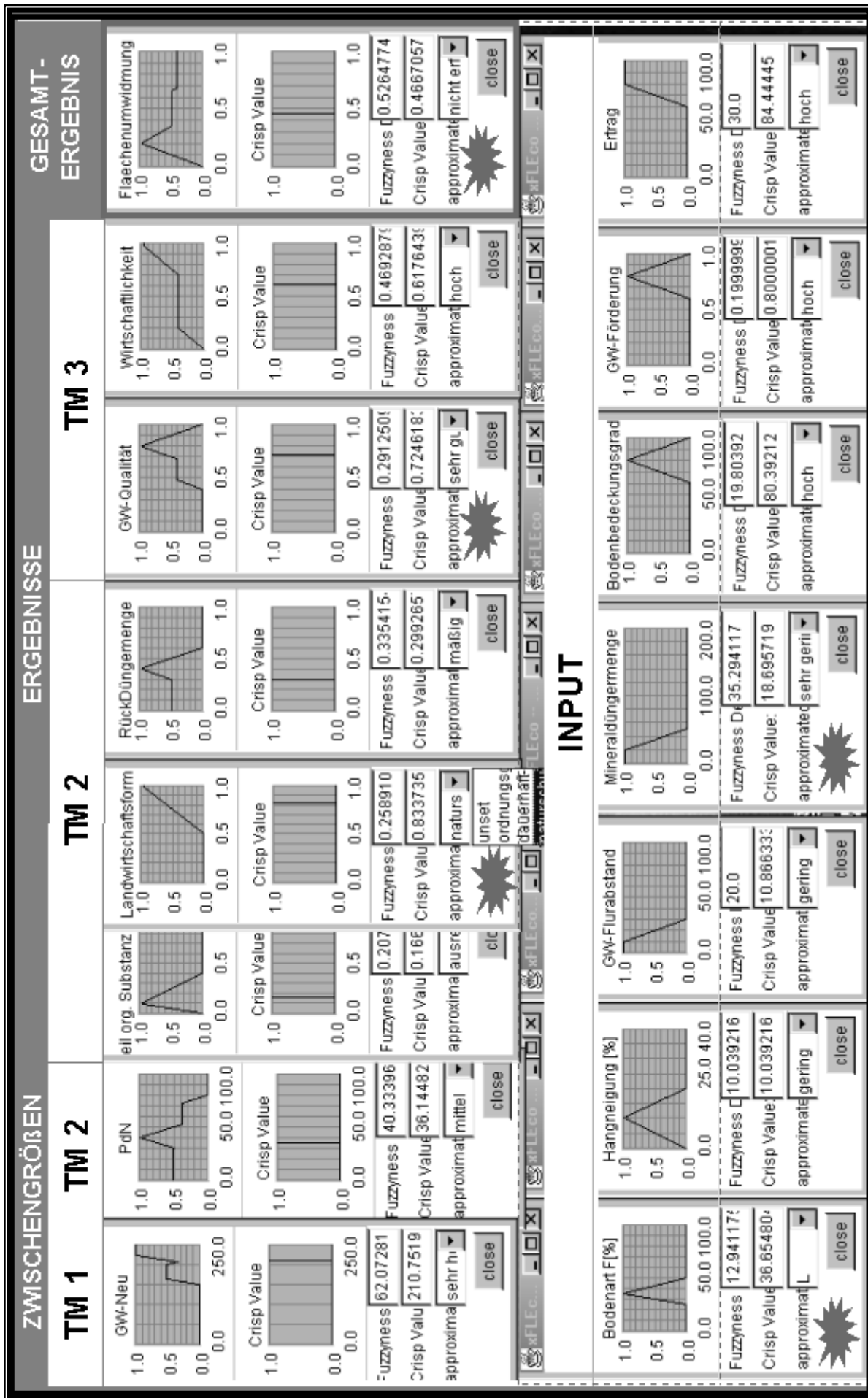


Abb. 25: Darstellung der Simulation des Best-Case Szenarios (Input in linguistischer Form)

Die Abb. 25 zeigt die Startbedingungen und **Ergebnisse** des Best-Case Szenarios. Die Startbedingungen der Input-Variablen, die Ergebnisse der Zwischengrößen sowie das Gesamtergebnis sind jeweils auf dreifache Weise dargestellt: Als Fuzzy-Set, als approximierter Term und als Crisp Value. Alle 15 Variablen und ihre 53 Terme sind entsprechend der Modellstruktur in Teilmodellen angeordnet. In das Sachmodell fließen in linguistischer Form die Bodenart *Lehm*, eine *geringe* Hangneigung und ein *geringer* Grundwasser-Flurabstand ein. Das Simulationsmodell prüft, den Input-Bedingungen entsprechend, die Erfüllung der jeweiligen Prämissen der Regelmenge des Sachmodells und lässt sie ‚feuern‘. Als Zwischengröße berechnet FLUCS eine *sehr hohe* Grundwasser-Neubildung. In das Teilmodell 2 fließen als Input-Variablen mittels eines trapezförmigen Fuzzy-Sets eine *sehr geringe* Mineraldüngermenge, ein *hoher* Bodenbedeckungsgrad und das Ergebnis der Grundwasser-Neubildung. Ein Zwischenergebnis des kombinierten Sach- und Wertmodells landwirtschaftlicher Nutzung ist eine *mittlere* Tendenz zur Nitratverlagerung. Davon abgeleitet und durch approximatives Schließen berechnet, ergeben sich drei Ergebnisgrößen des Teilmodells 2: die Landwirtschaftsform ist *naturschutzgerecht*, die Notwendigkeit einer Reduzierung der Düngermenge wird als *mäßig* eingestuft und der Anteil der organischen Substanz im Boden ist *ausreichend*. Input-Variablen des Teilmodells 3 sind eine *hohe* Grundwasser-Förderung und ein *hoher* ackerbaulicher Ertrag. Die Verknüpfung mit der potentiellen Nitratauswaschung (PdN) liefert die Zwischengrößen *sehr gute* Grundwasser-Qualität und *hohe* Wirtschaftlichkeit. Als Gesamtergebnis berechnet FLUCS, dass eine Flächenumwidmung *nicht erforderlich* ist.

**Interpretation:** Dieser Simulationslauf demonstriert den Einsatz des Fuzzy-Modellsystems in einem Best-Case Szenario für eine uneingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung durch Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft. Ausgangsbasis ist ein wertfreies Sachmodell, das den Stoff- und Wasserhaushalt eines im Brache-Stadium befindlichen Standortes mit quantitativen Kenngrößen widerspiegelt. In das Teilmodell 2 fließen Fakten über agrarökosystemare Grundlagen der Wissensakquisition des Kapitels 5 ein. Dieses Sach- und Bewertungswissen ist in prozeduraler Form in den Regelmengen des Teilmodells 2 implementiert. Die Ergebnisse der linguistischen Variablen Landwirtschaftsform, Anteil der organischen Substanz im Boden und Reduzierung der Düngermenge bieten eine Orientierungshilfe für die Interaktionen im Mensch-Umwelt-System und gelten als erste Grundlage für Entscheidungen in der Raum- und Umweltplanung. In das Teilmodell 3 gehen, ergänzend zu den landwirtschaftlichen Wert- und Zielvorstellungen die der Wasserwirtschaft, insbesondere der Grundwasserwirtschaft, ein. Eine parallele Betrachtung von an ähnlichen ökologischen Funktionen interessierten Raumnutzungen spiegelt sich in den Ergebnisgrößen der Grundwasser-Qualität und der Wirtschaftlichkeit als eine quasi pareto-optimale Bewertungssituation wider. Ein *ausreichender* Anteil der organischen Substanz puffert die Mineraldüngermenge, der Lehmstandort filtert das Niederschlagswasser, die Hangneigung beeinflusst die Infiltration in Bezug auf Grundwasserneubildung *positiv* und mit *hohen* Erträgen werden die ackerbaulichen Interessen simuliert. Die neu generierte Zugehörigkeitsfunktion des Gesamt-

ergebnisses Flächenumwidmung bildet ein linkslastiges Fuzzy-Set aus. Mit der Flächenschwerpunktmethode ermittelt das Modellsystem bei der Defuzzifizierung einen numerischen Wert von 0,47, der einer *nicht erforderlichen* Flächenumwidmung entspricht. Bei dieser Variable wird deutlich, dass nicht nur der Träger der Zugehörigkeitsfunktion, sondern gleichfalls die Höhe des Fuzzy-Sets Einfluss auf das Schlussfolgerungsergebnis besitzt. Aufgrund der Ergebnisse des Teilmodells 3 wird weder aus der Sicht der Landwirtschaft noch aus der Sicht der Wasserwirtschaft eine Flächenumwidmung für erforderlich gehalten. Hätte die Siedlungsentwicklung dennoch Interesse an einer Nutzung und Versiegelung, so würde dies nicht zu einer Verringerung der ohnehin *mittleren* Tendenz zur Nitratauswaschung führen. Unter diesen Umständen deuten die Simulationsergebnisse des Best-Case Szenarios auf eine uneingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung hin.

### 6.3.2 Trend-Szenario: Eingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung

Das Trend-Szenario geht von einer Beibehaltung menschlicher Wert- und Zielvorstellungen aus und extrapoliert diese für zukünftige Raumentwicklungen. Die Bodennutzung ist von mittlerer Intensität, der Einsatz der Mineraldüngermenge schwankt um einen *mittleren* Wert von 127 kg/ha, und es herrscht eine *mittlere* Bodenbedeckung vor. Der Bedarf für die Förderung von Grundwasser wird ebenfalls auf einen mittleren Wert geschätzt. Entsprechend dieser Startzustände werden als Entscheidungsgrundlage die Ergebnisse aus Teilmodell 2 und als Gesamtergebnis die Variable Flächenumwidmung als steuerbare Faktoren berechnet.

Die Abb. 26 zeigt die Startbedingungen und **Ergebnisse** des Trend-Szenarios. Der Aufbau der Abbildung und die Darstellungsarten der Variablen und Ergebnisse sind identisch mit denen des Best-Case Szenarios. Das Sachmodell beschreibt die Beschaffenheit des Standortes mit der Bodenart *Sand*, einer *geringen* Hangneigung, einem *mittleren* Grundwasser-Flurabstand und schließt daraus approximativ auf eine *mittlere* Grundwasser-Neubildung. Im Teilmodell 2 bilden eine *mittlere* Mineraldüngermenge und ein in Trapezform modellierter *mittlerer* Bodenbedeckungsgrad die Input-Größen zur Berechnung einer *geringen* Tendenz zu Nitratauswaschung. Die Ergebnisse des Teilmodells 2 sind ein generiertes Fuzzy-Set, das mit seinem breiten Träger für eine *naturschutzgerechte* Landwirtschaft steht; es verweist auf eine *mäßige* Notwendigkeit, den Einsatz von Mineraldünger zu reduzieren sowie einen *ausreichenden* Anteil organischer Substanz im Boden.



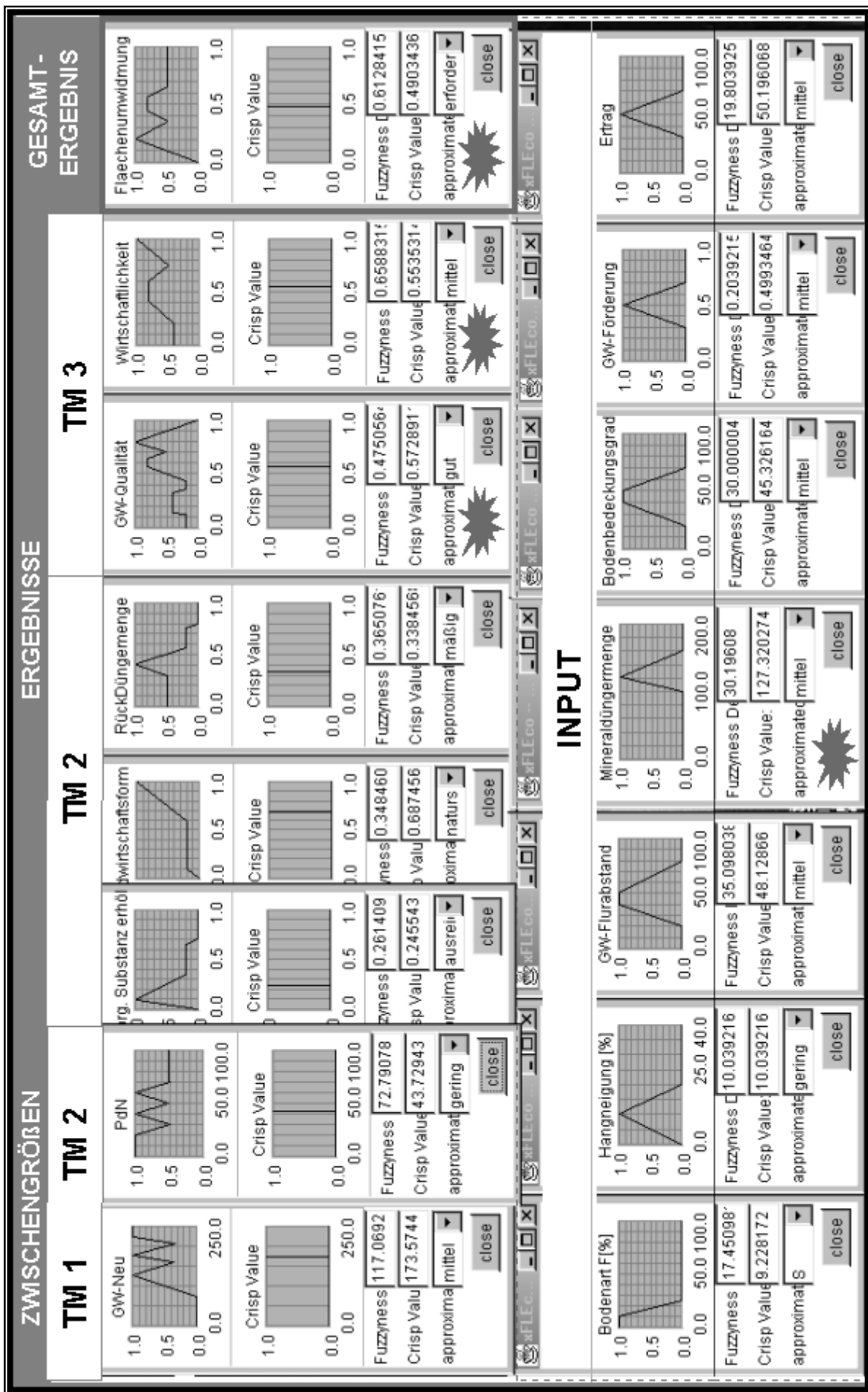


Abb. 26: Darstellung der Simulation des Trend-Szenarios (Input in linguistischer Form)

In das Teilmodell 3 fließen als dreiecksförmige Fuzzy-Sets eine *mittlere* Grundwasser-Förderung und ein *mittlerer* Ertrag ein. Als Ergebnisse mit neu generierten Fuzzy-Sets ergeben sich eine *gute* Grundwasser-Qualität und *mittlere* Wirtschaftlichkeit. Die qualitative Merkmalsausprägung des Gesamtergebnisses lässt eine Flächenumwidmung bedingt *erforderlich* erscheinen.

**Interpretation:** Dieser Simulationslauf demonstriert den Einsatz von FLUCS in einem Trend-Szenario für eine eingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung. Der Trend, auch unter ungünstigen naturräumlichen Bedingungen Landwirtschaft zu betreiben, wird im Teilmodell 1 simuliert. Dadurch, dass überwiegend durchschnittliche (oder mittlere) Merkmalsausprägungen der linguistischen Variablen für das Trend-Szenario angenommen werden, werden mehrere Prämissen in dem Regelsystem zum Teil erfüllt, so dass deutlich mehr Regeln ‚feuern‘ und deswegen bei den Zwischengrößen Fuzzy-Sets generiert werden, die nahezu den gesamten Wertebereich abdecken. Die Tendenz zur Nitratauswaschung ist *gering*. Dies resultiert aus *mittleren* Merkmalsausprägungen der beiden Input-Größen im Teilmodell 2, dem Einsatz der Mineraldüngermenge und dem Bodenbedeckungsgrad. Die Variable Landwirtschaftsform weist mit dem defuzzifizierten Wert von 0,68 zu 0,83 und dem den gesamten Wertebereich abdeckenden Fuzzy-Set mit deutlichen Tendenzen zum mittelmäßigen Term den Charakter umweltgerechten Wirtschaftens auf. Die dreiecksförmigen Input-Größen: Grundwasser-Förderung und Ertrag des Teilmodells 3 führen bei einer *mittleren* Nitratauswaschung zu einer *guten* Grundwasser-Qualität und einer *mittleren* Wirtschaftlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung. Für dieses Trend-Szenario mit durchschnittlichen landwirtschaftlichen und wasserwirtschaftlichen Aktivitäten und dementsprechend eingeschränkt-multifunktionaler Raumnutzung, ergibt sich aufgrund des Fuzzy-Sets mit ‚gekappter‘ Menge in der Mitte und einem defuzzifizierten Wert von 0,49 als Gesamtergebnis eine nur bedingt *erforderliche* Flächenumwidmung.

### 6.3.3 Worst-Case-Szenario: Umweltbelastende monofunktionale Nutzungsstruktur

Das Worst-Case Szenario basiert auf der Annahme einer intensiven ackerbaulichen Tätigkeit in Agrarökosystemen und untersucht die Auswirkungen auf die Ansprüche der Wasserwirtschaft sowie mögliche positive Konsequenzen von Flächenumwidmungen für die Siedlungs- und Verkehrsentwicklung.

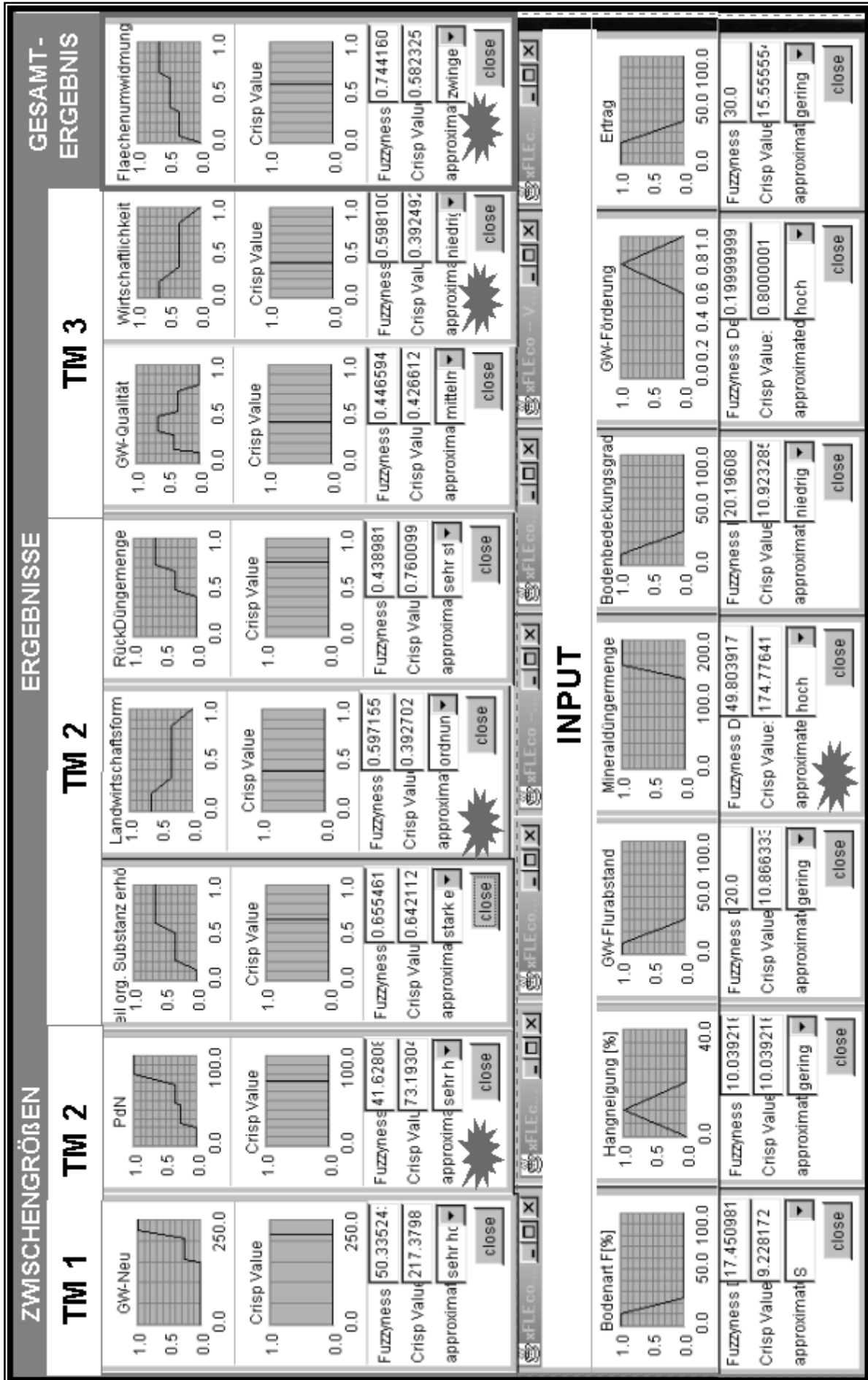


Abb. 27: Darstellung der Simulation des Worst-Case Szenarios (Input in linguistischer Form)

Die Abb. 27 zeigt die Startbedingungen und **Ergebnisse** des Worst-Case Szenarios. Der Aufbau der Abbildung und die Darstellungsarten der Variablen und Ergebnisse sind identisch mit denen des Best-Case- und denen des Trend-Szenarios. Das Sachmodell beschreibt die Beschaffenheit des Standortes mit der Bodenart *Sand*, einer *geringen* Hangneigung, einem *geringen* Grundwasser-Flurabstand und schließt daraus approximativ auf eine *sehr hohe* Grundwasser-Neubildung. Eine *hohe* Mineraldüngermenge und *mittlerer* Bodenbedeckungsgrad, modelliert in Trapezform, sind die Input-Größen des Teilmodells 2. Zwischengröße ist eine *sehr hohe* potentielle Nitratauswaschung. Diese fließt mit den Input-Größen, einer *hohen* Grundwasser-Förderung und einem *geringen* Ertrag in das Teilmodell 3 ein. Ergebnis ist eine *mittlere* Grundwasser-Qualität, dargestellt als ‚gekapptes‘, solitär stehendes Fuzzy-Set und eine *niedrige* Wirtschaftlichkeit. Das Gesamtergebnis des Worst-Case Szenarios beschreibt die Flächenumwidmung als *zwingend erforderlich*. Das neu generierte Fuzzy-Set deckt den gesamten Wertebereich der Flächenumwidmung ab. Gekappte, dreieckförmige Fuzzy-Sets führen zu der grafischen Ansicht einer ‚getreppten‘ Zugehörigkeitsfunktion, aus der sich gemäß der Flächenschwerpunktmethodem bei der Defuzzifizierung ein numerischer Wert von 0,58 berechnet. Insgesamt ‚feuern‘ weniger Regeln als beim Trend-Szenario und die jeweiligen Fuzzy-Sets der Zwischengrößen, –ergebnisse und des Gesamtergebnisses decken nicht den gesamten Wertebereich der jeweiligen Variablen ab.

**Interpretation:** Dieser Simulationslauf demonstriert den Einsatz des Fuzzy-Modellsystems in einem Worst-Case Szenario für eine umweltbelastende, monofunktionale Nutzungsstruktur des Konfliktripels Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft. Wenn auch unter ungünstigen naturräumlichen Rahmenbedingungen Ertragslandwirtschaft ausgeübt werden sollte, wäre dies mit einem stark erhöhten Einsatz von Mineraldünger möglich. Bei gleichzeitig geringem Bodenbedeckungsgrad steigt die Tendenz zur Nitratauswaschung, was sich als Grundwasser belastend und damit bei einer eventuellen Grundwassernutzung erschwerend auswirken würde. Das Worst-Case Szenario skizziert konkurrierende Raumnutzungen und schlägt aufgrund handlungsorientierten Problemlösungswissens eine Flächenumwidmung als *zwingend erforderlich* vor. Dies beinhaltet, dass bspw. bei einer weitergehenden Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsstruktur auch ein Boden- und Grundwasserschutz erfolgen muss, um die Qualität des Grundwassers mindestens zu sichern.

#### 6.3.4 Zusammenfassende Interpretation der Simulationsergebnisse der drei Szenarien

Bei der Eingabe der Werte der Input-Variablen in linguistischer Form ergeben sich bei den Best-Case- und Worst-Case Szenarien unterschiedliche relative Abweichungen vom Trend-Szenario. Daraus lassen sich Sensitivitäten der Variablen hinsichtlich des Gesamtergebnisses bestimmen. Die nachfolgende Tabelle fasst die Simulationsergebnisse aller drei Szenarien zusammen und ordnet die 15 Variablen den drei Teilmodellen als Input bzw. Output-Variablen zu.

SIMULATIONSERGEBNISSE DER DREI SZENARIEN							
	Variablen	best-case	Trend	worst-case	Einheit	In	Out
1	Bodenart	36,65	9,23	9,23	[%]	TM 1	
2	Hangneigung	10,04	10,04	10,04	[°]	TM 1	
3	GW-Flurabstand	10,87	48,13	10,87	[m]	TM 1	
4	GW-Neubildung	210,75	173,57	217,38	[mm/a]		TM 1
5	Mineraldüngung	18,70	127,32	174,78	[kg/ha]	TM 2	
6	Bodenbedeckung	80,39	45,33	10,92	[%]	TM 2	
7	Potentielle Nitratauswaschung	36,14	43,73	73,19	[%]		TM 2
8	Landwirtschaftsform	83,00	69,00	39,00	rel.		TM 2
9	Rückgabe Düngemenge	30,00	34,00	76,00	rel.		TM 2
10	Anteil d. organischen Substanz	17,00	25,00	64,00	rel.		TM 2
11	GW-Förderung	80,00	50,00	80,00	rel.	TM 3	
12	Ertrag	84,44	50,20	15,56	[dt/ha]	TM 3	
13	GW-Qualität	72,00	57,00	43,00	[mg/NO <sub>3</sub> /l]		TM 3
14	Wirtschaftlichkeit	62,00	55,00	39,00	rel.		TM 3
15	Flächenumwidmung	47,00	49,00	58,00	rel.		GE

Tab. 58: Simulationsergebnisse der drei Szenarien

Grundlage für eine detaillierte Betrachtung der Abweichungen der Ergebnisse des Best- und Worst-Case Szenarios vom Trend-Szenario ist die nachfolgende tabellarische Übersicht. Die Ergebnisse des Trend-Szenarios werden als 100 % indiziert und die Abweichungen der beiden anderen Szenarien jeweils als absolute und prozentuale Werte angegeben.

ABWEICHUNGEN VOM TREND-SZENARIO						
	Variablen	best-case		Trend	worst-case	
		absolut	[%]		[%]	absolut
1	Bodenart	397,07	297,07	100	0,00	100,00
2	Hangneigung	100,00	0,00	100	0,00	100,00
3	GW-Flurabstand	22,58	-77,42	100	-77,42	22,58
4	GW-Neubildung	121,42	21,42	100	25,24	125,24
5	Mineraldüngung	14,69	-85,31	100	37,28	137,28
6	Bodenbedeckung	177,34	77,34	100	-75,91	24,09
7	Potentielle Nitratauswaschung	82,64	-17,36	100	67,37	167,37
8	Landwirtschaftsform	120,29	20,29	100	-43,48	56,52
9	Rückgabe Düngemenge	88,24	-11,76	100	123,53	223,53
10	Anteil der organischen Substanz	68,00	-32,00	100	156,00	256,00
11	GW-Förderung	160,00	60,00	100	60,00	160,00
12	Ertrag	168,21	68,21	100	-69,00	31,00
13	GW-Qualität	126,32	26,32	100	-24,56	75,44
14	Wirtschaftlichkeit	112,73	12,73	100	-29,09	70,91
15	Flächenumwidmung	95,92	-4,08	100	18,37	118,37

Tab. 59: Abweichungen vom Trend-Szenario

Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich, wird in allen drei Szenarien von einer gleichbleibenden geringen Hangneigung ausgegangen. Diese Variable und der auf einer ordinalen Skala ausgedrückte Anteil der Bodenart werden zu Gunsten der Übersichtlichkeit in der nachfolgenden Abbildung nicht aufgeführt.

Es sind die prozentualen Abweichungen der Best-Case- und Worst-Case Szenarien vom Trend-Szenario differenziert aufgeführt; die Nummerierungen der Variablen entsprechen denen in der obigen Tabelle.

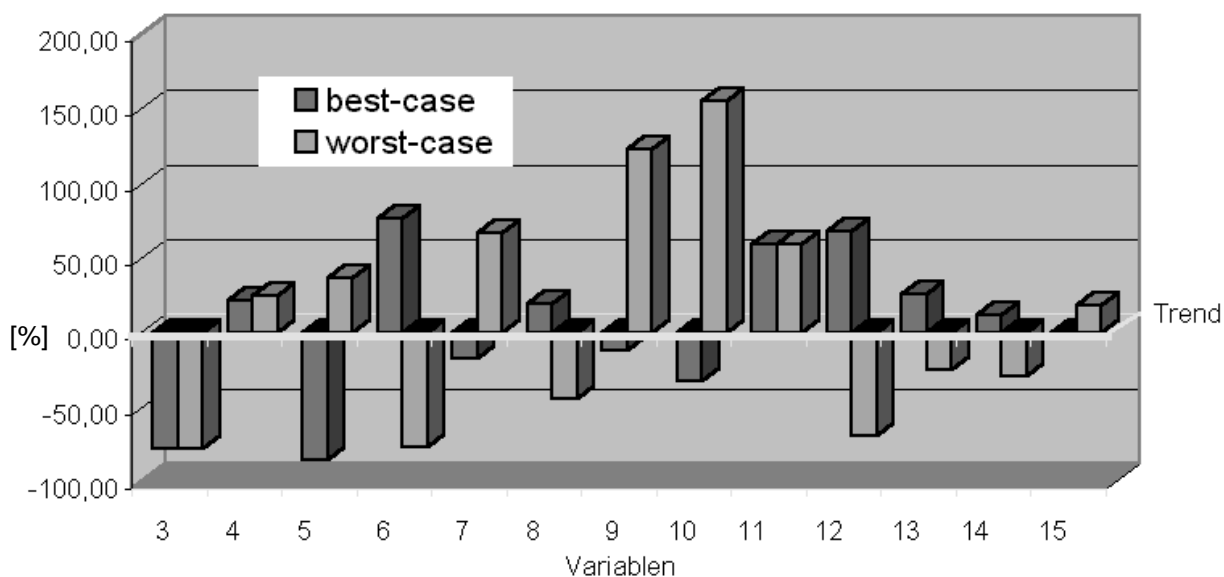


Abb. 28: Prozentuale Abweichungen vom Trend-Szenario

Ein verringerter Einsatz der Mineraldüngermenge (5) und ein erhöhter Bodenbedeckungsgrad (6) führen im Best-Case Szenario, im Verhältnis zum Trend-Szenario, zu einer um 17,36 % verringerten potentiellen Nitratauswaschung (7). Beim Worst-Case Szenario steigt das Potenzial der Nitratauswaschung auf 67,37 %. Als Option für Entscheidungen können die stark erhöhten Werte der Variablen Reduzierung des Düngemiteleinsatzes (9) und Erhöhung des Anteils an organischer Substanz (10) angesehen werden. Beim Best-Case Szenario spielt für diese beiden Variablen eine Abweichung von weniger als 11,76 und 32 % im Vergleich zum Trend-Szenario eine untergeordnete Rolle. Im Rahmen einer ausgewogenen multifunktionalen Raumnutzung steigt beim Best-Case Szenario die Qualität des Grundwassers (13) um 26,32 % und die Wirtschaftlichkeit (14) des Ackerbaus erhöht sich um 12,73 %. Die obige Abbildung demonstriert gleichzeitig die Sensitivität einzelner Variablen gegenüber unterschiedlichen Input-Größen. Die Amplitude ist am größten bei den Ergebnisgrößen des Teilmodells 2: Reduzierung des Düngemiteleinsatzes (9), der Erhöhung des Anteil an organischer Substanz (10), gefolgt von den Zwischengrößen des Teilmodells 3, der Grundwasserqualität (13) und der Wirtschaftlichkeit (14).

## 6.4 Vergleichende Software-Experimente und Interpretationen verschiedener Modellierungstechniken

Das realisierte Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS ist, wie im vorherigen Kapitel anhand der drei Szenarien gezeigt, für ein breites Spektrum von Fragestellungen über konfligierende Raumansprüche der Landwirtschaft, der Siedlungs- und Verkehrssysteme sowie der Wasserwirtschaft als Prototyp einsetzbar. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Interpretation der Simulationsergebnisse unter methodischen Gesichtspunkten. Zusammenhänge und Gegensätze der quantitativen und qualitativen Modellierung sowie Vorteile und Grenzen des Fuzzy Logic-Einsatzes werden anhand vergleichender Untersuchungen mit dem implementierten Modellsystem erörtert.

### 6.4.1 Variabilität der Simulationsergebnisse bei Input in linguistischer und numerischer Form

Ein besonderer Vorteil von FLUCS ist mit der Software-Umgebung, d.h. dem Fuzzy Logic Modellierungsunterstützungssystem xFLEco 3.1, verbunden. Dieses erlaubt eine flexible Eingabe von Startbedingungen für eine Simulation auf drei unterschiedlichen Wegen:

1. durch numerische, scharfe Werte, so genannte Singletons
2. durch linguistische Terme, d.h. vordeklarierte Fuzzy-Mengen
3. durch beliebige Fuzzy-Sets

Wie u.a. von numerischen Modellen bekannt, lassen sich auch bei FLUCS die Input-Variablen zum einem mit konventionellen Werten („crisp“) belegen (BOSEL 1994, BRECKLING & ASSHOFF 1996), zum anderen ist die Eingabe von Werten mittels umgangssprachlicher Terme (z.B. „hoch“, „mittel“, „gering“) möglich. Im Modellsystem sind insgesamt 53 Terme für 15 Variablen deklariert. Die als unscharfe Mengen definierten Terme repräsentieren das deklarative Wissen einer Klasse mit dreiecks- oder trapezförmigen Fuzzy-Sets. Die Möglichkeit, Merkmalsausprägungen als Fuzzy-Set zu modellieren, führt gegenüber konventionellen Modellierungstechniken bewusst zu quasi unscharfen Klassenübergängen zwischen zwei Klassen. Gesetzt den Fall, die Datenlage ist unvollständig oder die Datenqualität ist ungenügend, gelingt es, diese Unsicherheit bei Fuzzy-Sets mit der Breite des Kerns oder dem Träger zu erfassen. Die dritte Variante der Belegung der Input-Variablen ist die Definition eigener Fuzzy-Sets mit beliebigen Zugehörigkeitsfunktionen. Beim Input in linguistischer Form wird im Modell mit einem deklarierten Fuzzy-Set im Gegensatz zu einem Singleton, d.h. bei numerischer Eingabe, gerechnet. Beim Worst-Case-Szenario beträgt der Unterschied z.B. bei der Landwirtschaftsform ca. 50 %. Der Überblick verdeutlicht hohe Abweichungen bei unterschiedlichen Formen der Eingabebelegung. Nachfolgend werden Simulationen getrennt nach den drei Szenarien mit Input-Werten in numerischer Form dargestellt und die Abweichungen näher veranschaulicht.

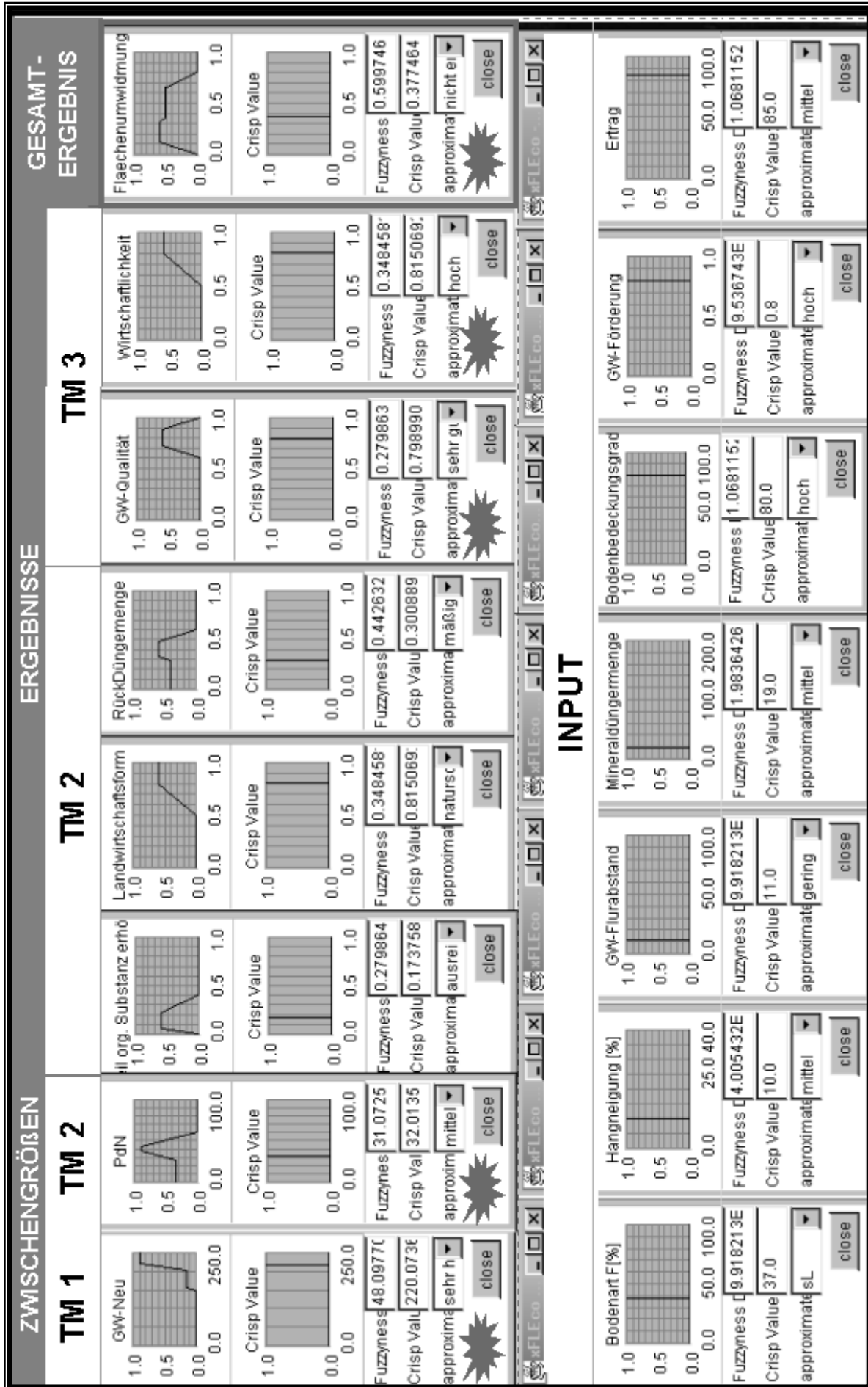


Abb. 29: Darstellung der Simulation des Best-Case Szenarios (Input in numerischer Form)



Die Abb. 29 zeigt die Belegung der Input-Variablen mit numerischen Werten und stellt für die Zwischengrößen die Ergebnisse der Teilmodelle und das Gesamtergebnis als neu generiertes Fuzzy-Set grafisch dar.

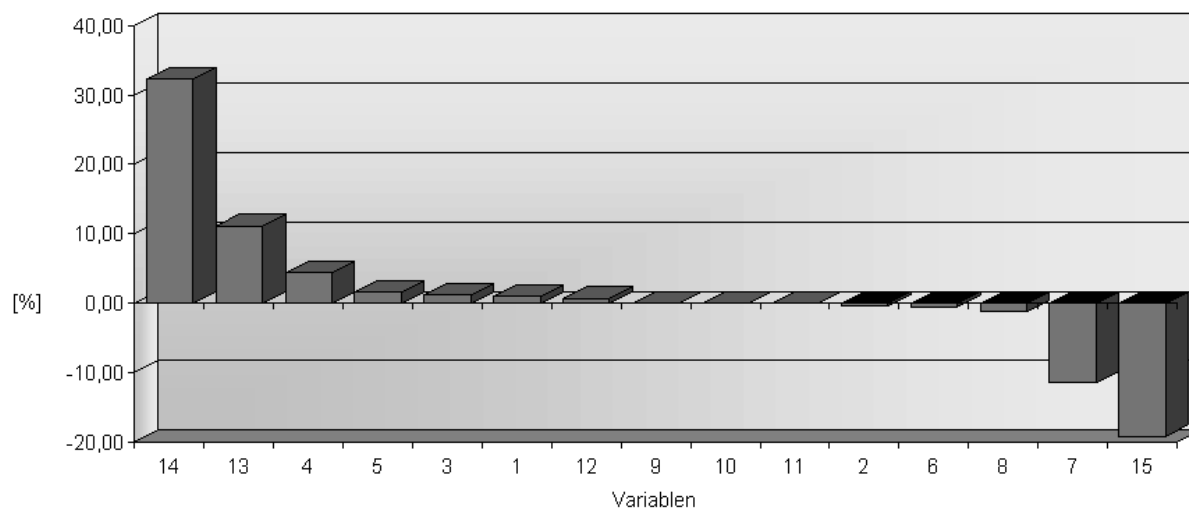


Abb. 30: Schwankungsbreite der Variablen des Best-Case Szenarios (Input: numerische vs. ling. Form)

Beim Vergleich des Inputs in numerischer und linguistischer Form schwanken die Variablenwerte des Best-Case Szenarios maximal zwischen plus 32,3 und minus 19,2 % (Abb. 30). Beim Input in numerischer Form liegen die Simulationsergebnisse für die Wirtschaftlichkeit (14) der agrarischen Aktivitäten und die Grundwasser-Qualität (13) um 32,2 bzw. 11,1 % höher als beim Input in linguistischer Form. Umgekehrt verhält es sich mit den Werten der potentiellen Nitratauswaschung (7) (- 11,5 %) und denen der Flächenumwidmung (15) (- 19,2 %). Geringe Sensitivitäten, auf die Form der Eingabewerte bezogen, betreffen die Variablen des Teilmodells 2, nämlich die Variablen für die Reduzierung der Düngemenge (9) und des Anteils der organischen Substanz (10).

Die Abb. 31 demonstriert die Belegung der Input-Variablen mit numerischen Werten und stellt für die Zwischengrößen, die Ergebnisse der Teilmodelle und das Gesamtergebnis als neu generiertes Fuzzy-Sets grafisch dar. Singletons stellen den Input in numerischer Form dar. Auch hier weichen die Ergebnisse der Simulation bei einzelnen Variablen beim Input in numerischer Form von denen in linguistischer Form ab.

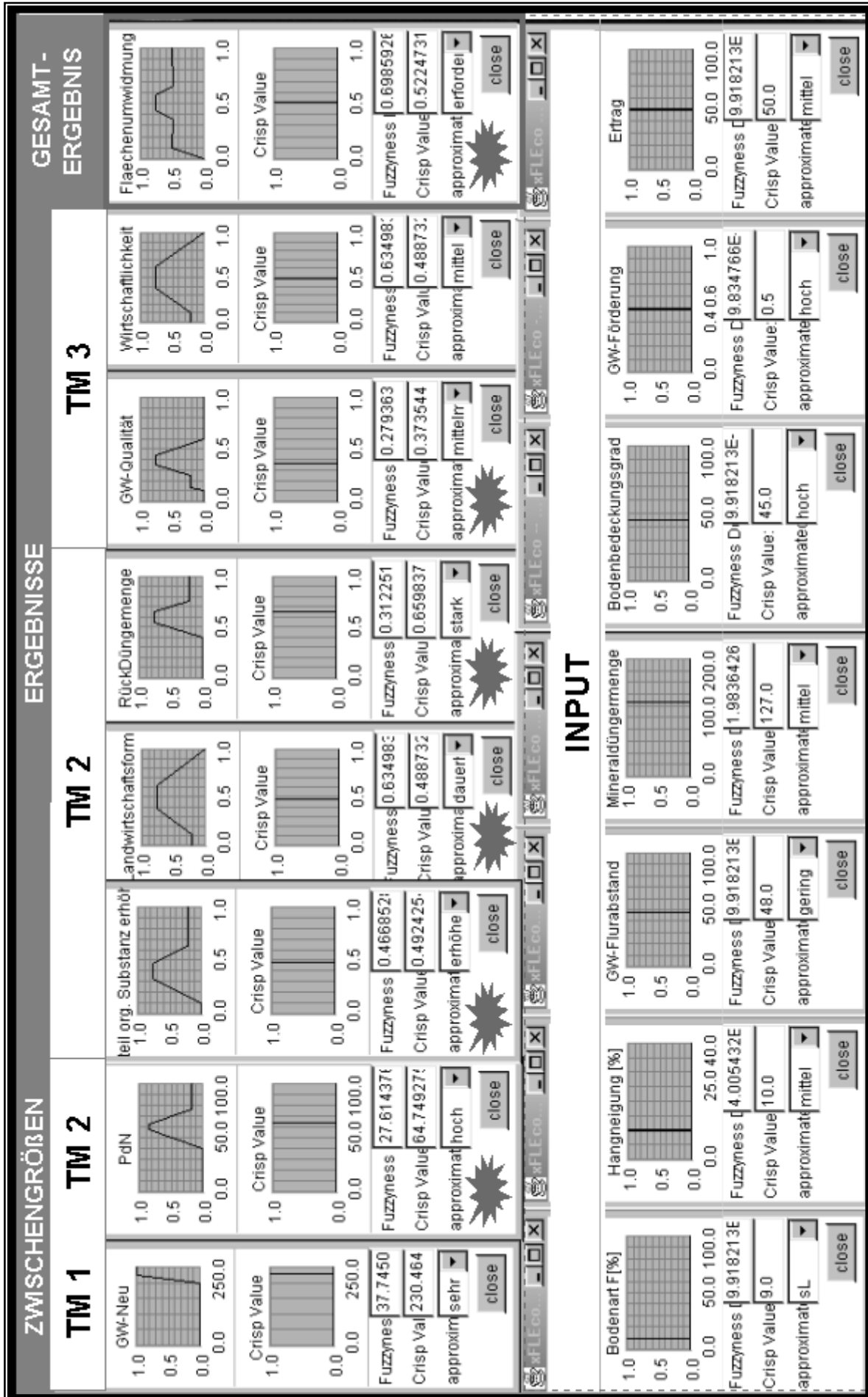


Abb. 31: Darstellung der Simulation des Trend-Szenarios (Input in numerischer Form)

Die Schwankungsbreite der Variablenwerte des Trend-Szenarios im Vergleich beim Input mit numerischem und linguistischem Input liegt zwischen plus 164,0 und minus 35,1 % (Abb. 32). Der Anteil der dem Boden hinzuzufügenden Menge an organischer Substanz (10) ist bei numerischem Input um 164 % höher, zugleich steigt die potentielle Nitratauswaschung (7) um 48,1 %, und der Wert für die Variable Reduzierung der Düngemenge (9) steigt auf 44,2 %. Negative Abweichungen weisen die Variablen Landwirtschaftsform (-28,9 %) und die Grundwasser-Qualität (-35,1 %) auf. Interpretieren lassen sich diese Unterschiede, die gerade im Teilmodell 2 auftreten, mit einer Steigerung der Werte des Zwischenergebnisses aus Teilmodell 1 und der Grundwasser-Neubildung (+32,8 %). Diese Werte fließen direkt in das Teilmodell 2 ein, erhöhen die potentielle Nitratauswaschung und mit ihnen die direkt verknüpften Variablen.

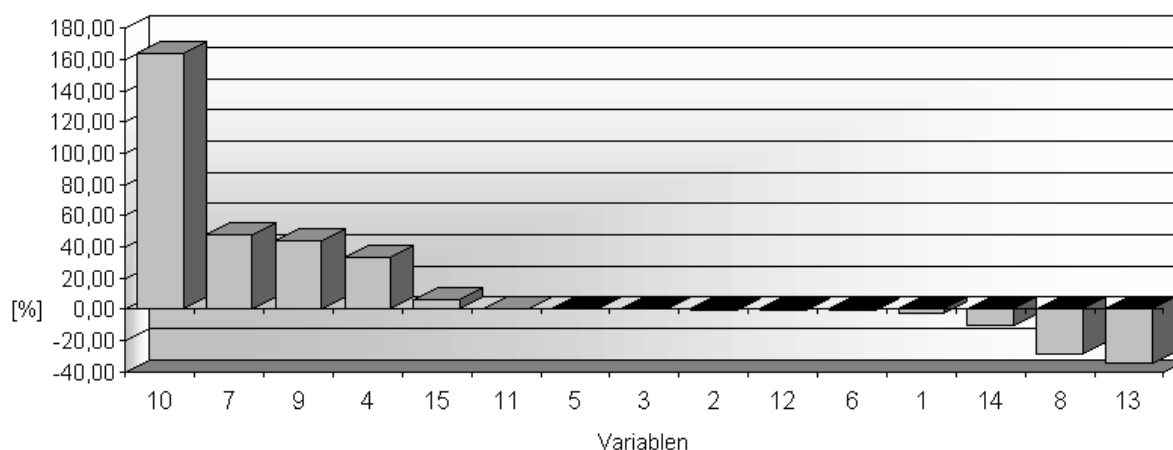


Abb. 32: Schwankungsbreite der Variablen des Trend-Szenarios (Input: numerische vs. linguistische Form)

Die Abb. 33 demonstriert die Belegung der Input-Variablen mit numerischen Werten und stellt für die Zwischengrößen die Ergebnisse der Teilmodelle und das Gesamtergebnis neu generierter Fuzzy-Sets grafisch dar. Das Worst-Case Szenario fußt auf den Annahmen einer Mineraldüngermenge von 175 kg/ha und einem Grundwasser-Flurabstand von 11 Metern. Die grafische Darstellung der scharfen Wertebelegungen erfolgt mittels Singletons. Auch hier weichen die Ergebnisse der Simulation bei einzelnen Variablen beim Input in numerischer von denen in linguistischer Form ab.

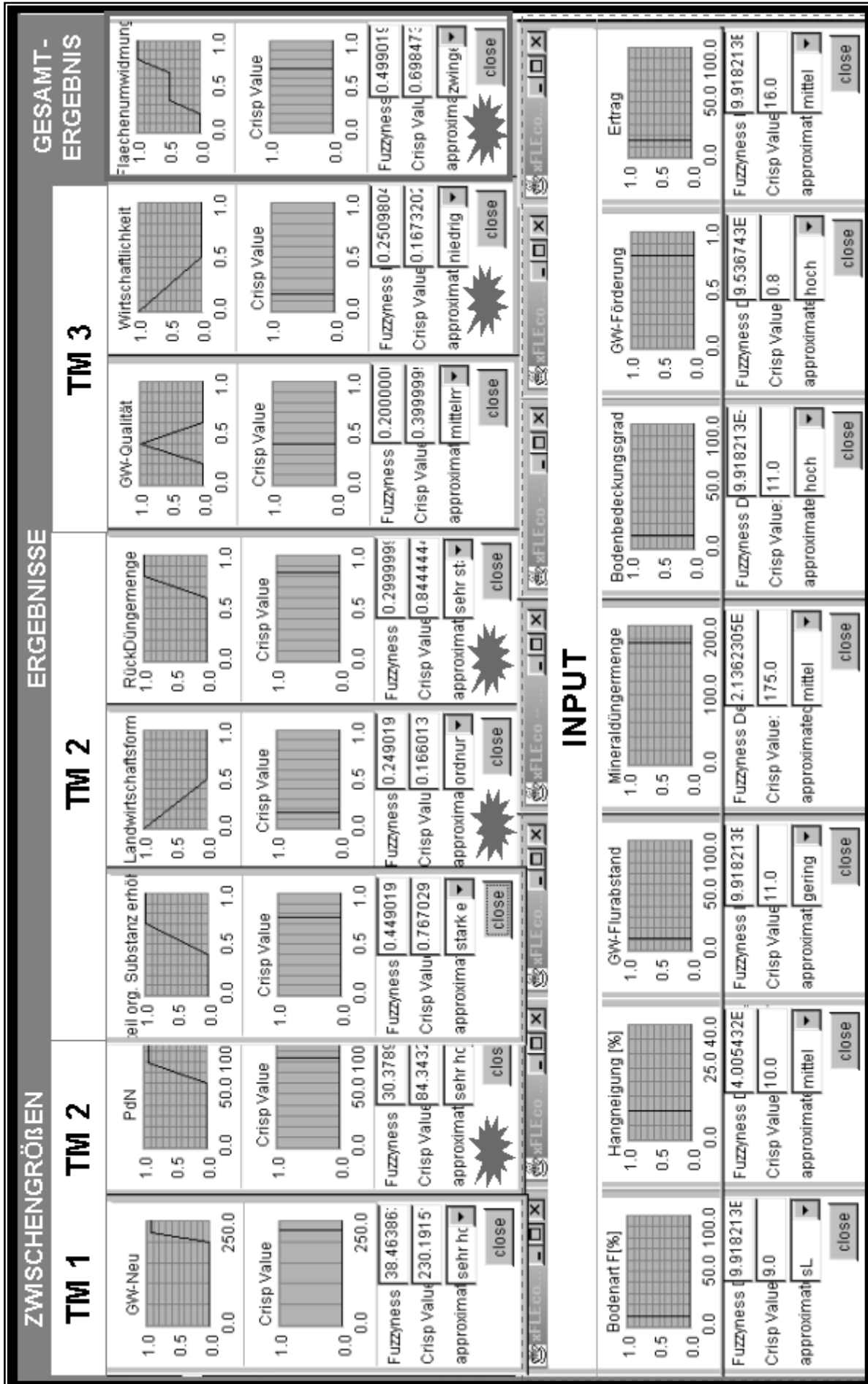


Abb. 33: Darstellung der Simulation des Worst-Case Szenarios (Input in numerischer Form)

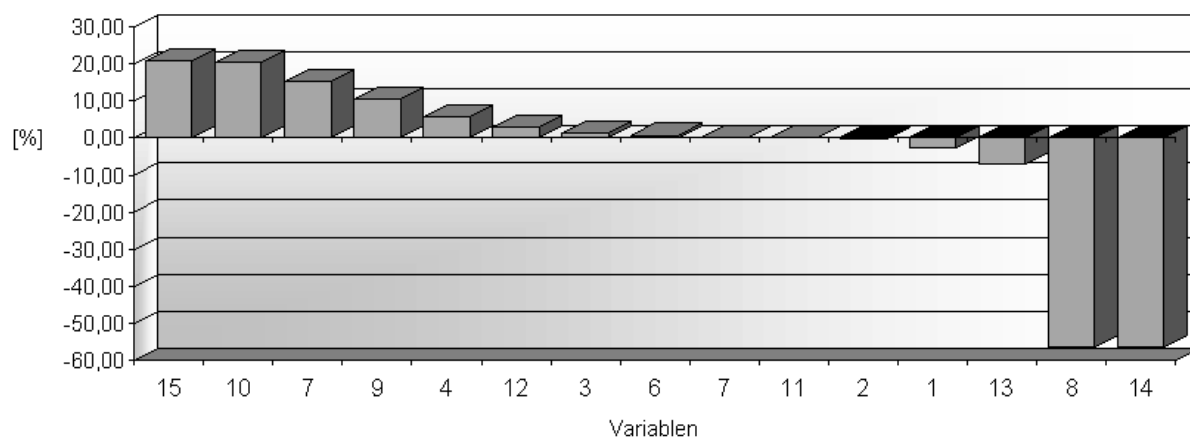


Abb. 34: Schwankungsbreite der Variablen des Worst-Case Szenarios (Input: numerische vs. ling. Form)

Die Schwankungsbreite der Variablenwerte des Worst-Case Szenarios liegt beim Vergleich des Inputs in numerischer und linguistischer Form zwischen plus 20,7 und minus 56,4 % (Abb. 34). Als Gesamtergebnis wird eine um 20,7 % erhöhte Erforderlichkeit der Flächenumwidmung (15) angegeben. Ebenso erhöhen sind die Variablen Anteil der organischen Substanz (+20,3 %), potentielle Nitratauswaschung (+15,3 %) und Reduzierung der Mineraldüngermenge (9). Negative Abweichungen weisen die Variablen Landwirtschaftsform (-56,4 %) und Wirtschaftlichkeit (-56,4 %) auf. Interpretieren lassen sich diese Unterschiede, die gerade im Teilmodell 3 auftreten, mit einer Steigerung der Werte der Zwischenergebnisse aus Teilmodell 1 und der Grundwasser-Neubildung (+5,9 %). Diese Werte fließen direkt in das Teilmodell 2 ein, wo sie die potentielle Nitratauswaschung und damit eine Inputgröße des Teilmodells 3 erhöhen. Die negative Abweichung der Wirtschaftlichkeit korreliert mit der Berechnung für das Worst-Case Szenario eines erhöhten Austrags von Nitrat bei hohen Aufwendungen für den Mineraldüngereinsatz.

**Schlussfolgernd** können die dargestellten Ergebnisse der einzelnen Variablen für die drei Szenarien beim Input in numerischer gegenüber linguistischer Form wie folgt zusammengefasst werden:

Beim **Best-Case Szenario** wird durch numerische Wertbelegung eine um 19,2 % verringerte Erforderlichkeit der Flächenumwidmung berechnet. Die Ursachen hierfür liegen in einer verringerten potentiellen Nitratauswaschung (-11,5 %) und einer höher berechneten Wirtschaftlichkeit (+32,3 %) bei gleichzeitig gestiegener Grundwasser-Qualität (+11,1 %). Der Methodenvergleich zwischen einem Input in numerischer und linguistischer Form zeigt, das FLUCS insgesamt beim Best-Case Szenario und numerischem Input die Vorgaben nach Berechnungen mit einem Input in linguistischer Form, hinsichtlich einer uneingeschränkt-multifunktionalen Raumnutzung zwischen der Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft, verstärkt.

Beim **Trend-Szenario** weicht das Gesamtergebnis durch die Flächenumwidmung um lediglich +6,1 % von dem bei Input in linguistischer Form ab. Die Korrelation einer gestiegenen potentiellen Nitratauswaschung (+48,1 %) und eine um 35,1 % reduzierte Grundwasser-Qualität führen folglich zu Maßnahmen, die das Modellsystem mit einer deutlichen Erhöhung des Anteils an organischer Substanz im Boden (+164,0 %) und einer Reduzierung der Düngemenge (+44,12) belegt. Im Methodenvergleich wird eine eingeschränkt-multifunktionale Raumnutzung durch die Dominanz der Landwirtschaft mit erhöhter Grundwasser-Neubildung und steigender Nitratauswaschung ermittelt. Dadurch werden beim Input in numerischer Form ausgleichende Maßnahmen der Landwirtschaft deutlich höher eingeschätzt, als dies bei der Simulation mit Input in linguistischer Form der Fall ist.

Beim **Worst-Case Szenario** wird die Erforderlichkeit einer Flächenumwidmung um 20,7 % höher gegenüber dem Wert beim Input in linguistischer Form berechnet. Ursache ist eine um 56,4 % verringerte Wirtschaftlichkeit der Landnutzung und gleichzeitig eine Abnahme der ordnungsgemäßen Wirtschaftsform um (56,4 %). In Analogie zu den beiden anderen Szenarien verstärkt die Simulation beim Input in numerischer Form den bei der Fuzzy-Modellierung vorgegebenen Effekt.

#### 6.4.2 Einfluss konventioneller und unscharfer Klassengrenzen auf das Simulationsergebnis

Einfluss auf das Gesamtergebnis der Simulation haben nicht nur die Form der Wertebelegung der Input-Variablen, sondern auch die Klassengrenzen zwischen den Termen der 15 Variablen. Diese Grenzen können wie bei konventionellen Verfahren scharf oder aber, wie bei der Fuzzy-Modellierung, bewusst unscharf modelliert werden. Dies sei nachfolgend verdeutlicht mit der Input-Variable des Teilmodells 2 der Mineraldüngermenge (kg/ha).

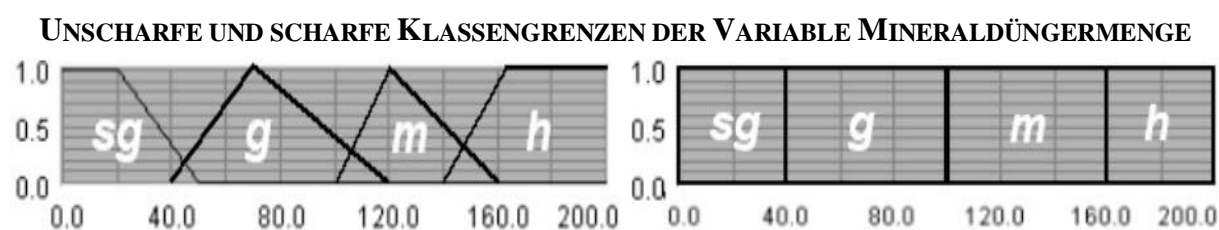


Abb. 35: Gegenüberstellung unscharfer und konventioneller Klassengrenzen der Mineraldüngermenge

Die Merkmalsausprägungen der linguistischen Variable Mineraldüngermenge werden in den vier Klassen *sehr gering* (sg), *gering* (g), *mittel* (m) und *hoch* (h) im Wertebereich [0,200] dargestellt und die Zugehörigkeiten  $\mu_F(x)$  im Intervall [0,1] repräsentiert. Bei sich überlagernden Fuzzy-Sets ergeben sich Übergangsbereiche, in denen Elemente graduelle Zugehörigkeiten zweier Fuzzy-Mengen annehmen. Bei der konventionellen Modellierung sind die Klassengrenzen scharf und folgen damit der zweiwertigen Logik: entweder ist ein Wert Element einer Menge ( $x \in A$ ) oder der Wert ist kein Element der Menge ( $x \notin A$ ). Wie die obige Abbildung zeigt, zählt der Wert 98 kg/ha Mineraldüngermenge bei der konventionellen Klassenbil-

dung zur Menge *gering*; der Wert 102 kg/ha Mineraldüngermenge zur Klasse *mittel*. Dabei sind sich, absolut betrachtet, diese beiden Werte unterschiedlicher Klassen ähnlicher als Werte innerhalb ihrer eigenen Klassengrenzen. Dieser Sachverhalt ist vergleichbar der Clusterbildung in der Statistik (SACHS 1997).

Anhand eines Software-Experimentes wird diese Situation näher untersucht (Abb. 36) (FLOP Fuzzy Logic Operating Program KAHLERT & FRANK 1994). Ziel ist es herauszufinden, welche Konsequenzen eine Modellierung mit unscharfen und konventionellen Klassengrenzen für das Simulationsergebnis hat und in welchen Dimensionen die Unterschiede liegen. Im Zentrum der Darstellung und Interpretation steht die Grenze der Klassen *gering* und *mittel* der Variable Mineraldüngermenge. Bei konventionellen Klassengrenzen, wie es die beiden oberen Screenshots der Abb. 36 zeigen, entspricht dies dem Wertebereich 100 kg/ha Mineraldünger. In den unteren beiden Screenshots repräsentieren dreieckförmige Fuzzy-Sets die vier Klassen der Mineraldüngermenge. Die Bodenart *Sand* bis *sandiger Lehm* (20,25 % prozentiger Anteil der Böden an der Fraktion < 0,01 mm) wird während der gesamten Simulation konstant gehalten. Die beiden linken Grafiken demonstrieren die Ausgangssituation, die beiden rechten das Endergebnis. Angenommen wird eine Erhöhung des Mineraldüngermitteleinsatzes von 98 auf 102 kg/ha. Dies entspricht einer relativen Steigerung um 4,08 %. Die beiden Modellierungstechniken führen bereits bei der Ausgangssituation zu abweichenden Erträgen von 15 % (konventionelle Klassengrenzen = 15,38; unscharfe Klassengrenzen = 17,72). Mit konventionellen Klassengrenzen steigt der Ertrag von 15,38 auf 50,00 %; d.h. um die relative Differenz von 325,09 %. Bei der Fuzzy-Modellierung wächst unter gleichen Bedingungen der Ertrag von 17,72 auf 24,57, d.h. um 138,2 %. Während sich der Ertrag mit konventionellen Klassengrenzen mehr als verdreifacht, ist der Anstieg bei der Fuzzy-Modellierung moderat. Die Differenz zwischen den beiden Modellierungstechniken wird noch deutlicher, wenn die Ergebnisse als approximierete Werte (‘mittel‘ und ‘gering‘) die Ertragsklassen widerspiegeln. Während bei der Fuzzy-Modellierung ein *geringer* Ertrag berechnet wird, gibt das Modell bei konventionellen Klassengrenzen einen *mittleren* Ertrag an. Der simulierte Anstieg des Ertrags kann im Fall unscharfer Klassengrenzen als realistischer aufgefasst werden. Dies belegt auch eine schrittweise Erhöhung der Mineraldüngermenge im gesamten Wertebereich (Abb. 37).

Eingabe: Erhöhung des Mineraldüngereinsatzes von 98 auf 102 kg/ha, d.h. um 4,08 %  
 Konstante Bodenart: 20,25 % prozentiger Anteil der Böden an der Fraktion < 0,01 mm, das entspricht etwa Sand bis sandigem Lehm

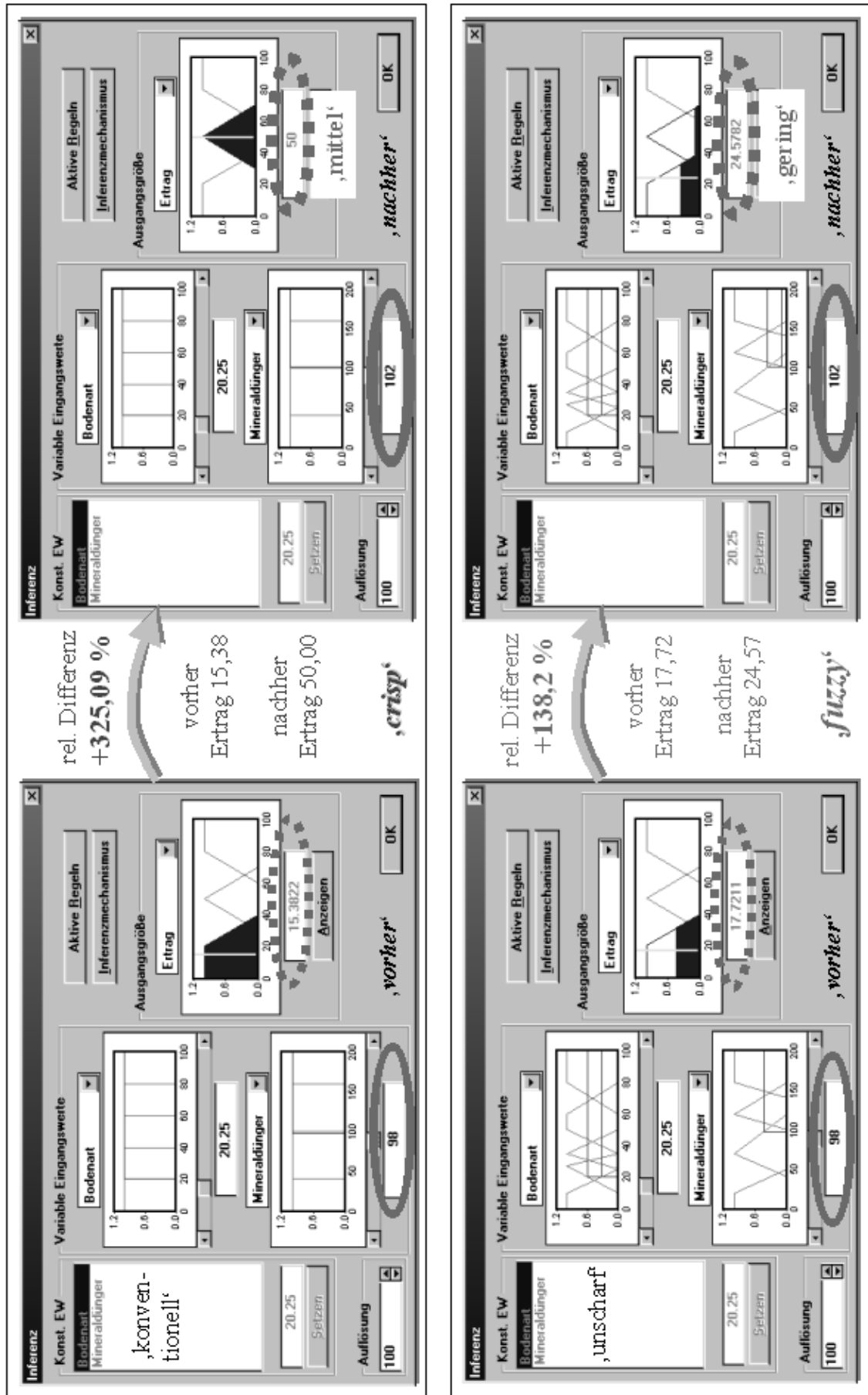


Abb. 36: Einfluss von konventionellen u. unscharfen Klassengrenzen auf das Simulationsergebnis (2x Input)



Ergänzend zur statischen Betrachtung zeigt die Abb. 37 die Unterschiede zwischen unscharfen und konventionellen Klassengrenzen beim Simulationsergebnis ‚Ertrag‘ über den gesamten Wertebereich der Mineraldüngermenge durch 23 Simulationsschritte.

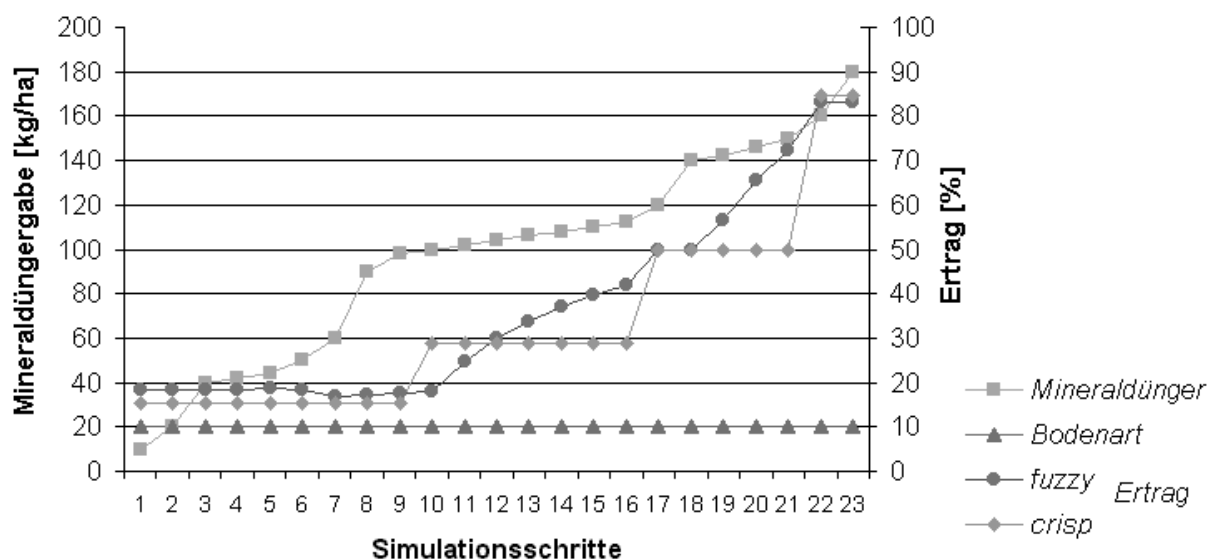


Abb. 37: Unterschiede zwischen konventionellen („crisp“) u. unscharfen („fuzzy“) Klassengrenzen (Verlauf)

Interpretieren lassen sich die Erkenntnisse der Abb. 36 und Abb. 37 mit dem Vorteil der Fuzzy Logic, graduelle Zugehörigkeiten von Elementen zu Mengen modellieren zu können. Die sich überlappenden Kennlinien der Zugehörigkeitsfunktionen bilden zwischen zwei Klassen Schnittpunktflächen, in denen ein Element in je verschiedenem Ausmaß sowohl der einen als auch der anderen Klasse angehört. Mit der Fuzzy-Modellierung können, wie die Differenzen zwischen konventionellen und unscharfen Klassengrenzen in Abb. 37 zeigen, insbesondere grenznahe Werte präziser mit fließendem Übergang simuliert werden. Was auch das Verhalten nichtlinearer Systeme realitätsnäher zu beschreiben gestattet (vgl. den gestuften Verlauf der Kurven in Abb. 37).

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchung hat gezeigt, dass Systemanalysen und Modellierungen sowie Bewertungen und Entscheidungen in Planungsprozessen mit dem Einsatz von Fuzzy Logic und der Expertensystemtechnik wesentlich erleichtert und reproduzierbar gestaltet werden können. Die aufeinander abgestimmten Methoden tragen zur Lösung von konkurrierenden Ansprüchen an räumlichen Nutzungen bei und wirken sich positiv auf die Sicherung von Funktions- und Leistungsfähigkeit ökologischer Systeme aus. Die Schlussfolgerungen, die sich aus den Erfahrungen bei der kombinierten Entwicklung und Anwendung des Methodenpaketes IeMAX mit dem Simulationsmodell FLUCS ergeben, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

### Systemanalyse

- Ökosystemare Betrachtungsweisen unterstützen die Parametrisierung und Identifizierung der relevanten Steuerungsgrößen bei Mensch-Umwelt-Interaktionen.
- Der DPSIR-Wirkungskreis bildet die Grundlage für die Entwicklung rationaler Lösungsansätze bei der Diskussion konfligierender Raumansprüche.
- Die Bestimmung des Grades ‚ökosystemarer Multifunktionalität‘ bildet die methodische Brücke zwischen den Sach- und Wertebenen bei Entscheidungsprozessen.

### Modellierung

- Mit Hilfe der Fuzzy Logic lässt sich adäquat die mit unterschiedlicher Schärfe bestimmbar Schwankungsbreite der untersuchungsrelevanten Ökosystemparameter kennzeichnen.
- Ein Anhaltspunkt für die Anzahl der Terme (=Klassen) pro Variable ist ihr Skalenniveau. Bei einer Ratioskala mit absolutem Nullpunkt sind vier und mehr Klassen durchaus angemessen; bei Variablen mit Merkmalsausprägungen auf kategorialen Skalen hat sich eine Klassenanzahl zwischen drei und fünf als geeignet erwiesen.
- Das Spektrum quantitativer Kenngrößen (z.B. Grundwasser-Flurabstand) wird durch die Modellierung linguistischer Variablen mit relativen Merkmalsskalierungen (z.B. Wirtschaftlichkeit, Grundwasser-Qualität) unter Einbeziehung natur- und gesellschaftswissenschaftlicher Kenntnisse stark erweitert.
- Die umgangssprachliche Modellierung ist von besonderer Bedeutung für die qualitative Bestimmung von Output-Größen. So resultiert die Nutzungsform jeweils aus dem optimal abgestimmten Verhältnis von Produktionstechnik zu umweltrechtlichen Bestimmungen und ihre Terme lauten: ordnungsgemäß, dauerhaft-umweltgerecht, naturschutzgerecht.
- Primärer Datenmangel oder ungenügende Datenqualität werden durch die stärkere Einbindung vernetzter Kenntnisse über ökologische Systeme und umgangssprachliches Problemlösungswissen („Expertenwissen“) in erheblichem Umfang kompensiert. Die Wissensrepräsentation erfolgt durch leicht handhabbare ‚Wenn-Dann-Regeln‘. Ferner lässt

sich der Grad der Sicherheit von Expertenerfahrung als Gewichtung einzelner Regeln festlegen.

- Fuzzy-Inferenzmethoden ermöglichen Regeln auch dann zu ‚feuern‘ wenn eine Prämisse nicht vollständig erfüllt ist. Dies erlaubt approximative Schlussfolgerungen.
- Eine getrennte Speicherung von deklarativem und prozeduralem Wissen spricht, unter Beibehaltung des Formalisierungsgrades, für einen flexiblen Einsatz bei verschiedenartigen Entscheidungssituationen.
- Das Wissensmanagement wird durch die formalisierte Speicherung von qualitativem (Problemlösungs-) Wissen erheblich erleichtert und dient zugleich dem Ziel, selbiges in wertschöpfende Handlungen zu transformieren.
- Die Szenariotechnik trägt, als vorausschauende Planungsmethode, mit der Bildung von Handlungsalternativen zur Entscheidungsunterstützung bei.

### Bewertung

- Die vergleichende Bewertung gründet auf der nach dem Grade der relativen Bedeutung der einschlägigen Kenngrößen gestuften Verbindung ökosystemaren, umweltökonomischen und –rechtlichen Wissens. Entscheidungsprobleme werden damit für die Raumplanung und Umweltpolitik unter Benennung von Lösungsalternativen reproduzierbar.
- Grundlagen für Entscheidungen und Handlungen werden umgangssprachlich und damit praxisnah modelliert und führen auch im Sinne der deskriptiven Entscheidungstheorie zu nachvollziehbaren Empfehlungen. Eine Ausgabeform sind approximierte Terme, z.B. die Empfehlung einer *sehr starken* Reduzierung des Düngemittleinsatzes.
- Die Berücksichtigung nutzergruppenspezifischer Präferenzen fördert eine soziale und räumliche Gerechtigkeit und bietet, durch die Verknüpfung von Nutzung und Schutz natürlicher Lebensgrundlagen, Aussicht auf eine nachhaltige Raumentwicklung.

Das Methodenpaket IeMAX mit dem Simulationsmodell FLUCS hat durch seinen modularen Aufbau einen breiten **Anwendungsbereich**. Das Entscheidungsunterstützungssystem dient zugleich für nachsorgende Konfliktlösungen und vorsorgende Konfliktvermeidungen. Neben dem exemplarisch analysierten Konfliktripel Landwirtschaft, Siedlungsentwicklung und Wasserwirtschaft bieten sich z.B. die nachfolgenden Bewertungs- und Entscheidungssituationen auf allen Ebenen der Raum- und Umweltplanung an: Identifizierung langfristiger Belastungstrends durch landwirtschaftlichen Ackerbau in Konkurrenz zum gesteigerten Bedarf der Grundwasserförderung, Simulation ertragloser Flächen der Landwirtschaft in Siedlungsnähe, Analyse von Stadt-Umland-Beziehungen zur Festlegung neuer Verkehrskorridore oder bei der Standortsuche zur Ausweisung von Wohnbaugebieten. Bei dem konkreten Einsatz des Prototyps empfiehlt sich – unter möglichst weitgehender Anwendung des Partizipationsprinzips – eine intensive und durchgehende Zusammenarbeit zwischen den in die Entscheidungssituation Involvierten, dem Systemanalytiker und dem Modellierer.

Die **Grenzen** für eine Anwendung des Entscheidungsunterstützungssystems liegen da, wo ein zu untersuchendes Problem außerhalb des Modellzwecks liegt und damit eine Validität nicht mehr gewährleistet werden kann. Aus der Sicht des Praktikers mögen folgende Punkte kritisch bzw. für die Akzeptanz problematisch erscheinen:

- die Skepsis gegenüber Simulationsmodellen, die ökosystemare Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Rechner abbilden
- Vorurteile gegenüber dem Formalisierungsgrad
- fehlende begriffliche Unterscheidung zwischen der angestrebten Unterstützung und einer im Planungsrahmen (natürlich unerwünschten) Automatisierung von Entscheidungen
- Unvollständiges Wissen darüber, in wieweit Rechner innerhalb gewisser Grenzen sehr wohl menschliches Verhalten, Routinetätigkeiten, Heuristiken oder Problemlösungen mittels Künstlicher Intelligenz repräsentieren können

**Ausblick:** Weiterer Forschungsbedarf ist in der Untersuchung der nichtlinearen Komponenten der zur Bewertung anstehenden Ökosysteme zu sehen. Darüber hinaus kann eine stärkere Einbeziehung der steuernden Wirkungen der wirtschaftenden Akteure einbezogen werden. Eine Weiterentwicklung des vorgelegten Entscheidungsunterstützungssystems könnte im Bereich der Fuzzy-Modellierung durch den erweiterten Einsatz von so genannten Modifikatoren wie Konzentrations-, Dilationsoperatoren und Kontrastintensivierung für eine nichtlineare Kennzeichnung der Parametervariabilität beitragen. Für großräumigere Planungen empfiehlt sich die Verknüpfung des Fuzzy-Simulationsmodells FLUCS mit einem Geographischen Informationssystem zu einem so genannten IGIS (Intelligent GIS). Ein solches kann dann die Grundlage für Raum-Management-Systeme darstellen.

## 8 Zusammenfassung

Ausgehend von der Tatsache, dass bei unterschiedlichen Nutzungsansprüchen an einen Raum Konfliktsituationen auftreten können, entwickelt die vorliegende Untersuchung zur Unterstützung von Entscheidungsfindungen das Methodenpaket IeMAX (Integrated environmental Modelling and Assessment with a Fuzzy Logic Expert System) mit dem Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS (Fuzzy Logic based agricultural land use change Simulation System) als Entscheidungsunterstützungssystem mit den Komponenten Systemanalyse, Modellierung und Bewertung. Grundlage für die Erprobung des Systems anhand der für Schleswig-Holstein typischerweise konfligierenden Raumansprüche der Land- und Wasserwirtschaft sowie der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung sind die als Systemkomponente ‚Wissensmanagement‘ zusammengefassten einschlägigen Erkenntnisse der Ökosystemforschung und Umweltökonomie sowie des Umweltrechts. Die Modellentwicklung folgt den Prinzipien der Szenariobildung und stützt sich vor allem auf die Methoden der Fuzzy Logic und der Expertensystemtechnik. Das regelbasierte Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS besteht aus drei Teilmodellen mit 15 linguistischen Variablen, 53 diese beschreibenden Termen und 136 ‚Wenn-Dann-Regeln‘. Das Modell berechnet als entscheidungsrelevantes Gesamtergebnis Art und Ausmaß der zur Konfliktlösung notwendigen Flächenumwidmungen und Nutzungsänderungen.

## 9 Summary

Not infrequently conflicting demands on land use patterns pose particular problems in spatial planning. In order to facilitate the comparative evaluation of such situations, a novel methodology, IeMAX (Integrated environmental Modelling and Assessment with a Fuzzy Logic Expert System), has been developed and implemented. It consists of the components systems analysis, modelling and assessment and has been liable to comparative testing in a highly diversified agricultural landscape of eastern Schleswig-Holstein. Here the potentially divergent demands of traditional or ecology-oriented agriculture, water resources use and management, and village planning or renewal may lead to triple conflict situations. They are analysed on the basis of pertinent ecological, economic and juridical experience and modelled by means of fuzzy logic and expert system techniques, which yields a set of scenarios for evaluative comparison purposes. The underlying simulation approaches comprise three submodels with 15 linguistic variables, 53 terms, 136 ‘if-then-rules’ and define both type and optimum extent of land use modifications indicated in the framework of rational conflict-solving strategies.

## 10 Literatur

- ABTS, D. & W. MÜLDER (2000) Aufbaukurs Wirtschaftsinformatik. Der kompakte und praxisorientierte Weg zum Diplom. Braunschweig
- ALIEV, R., BONFIG, K.-W. & F. ALIEW (2000) Soft Computing: eine grundlegende Einführung. Berlin
- ASSHOFF, M. (1999) Die Erschließung und Modellierung ökologischen Wissens für das Management von Feuchtwiesenvegetation – ein Beispiel für die Aufbereitung ökologischen Wissens und den Transfer mit einem Expertensystem. EcoSys, Suppl. Bd. 27, Diss. Math.-Nat.-Fak. Universität Kiel
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & R. WEIBER (1996) Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin
- BAMBERG, G. (2000) Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. München
- BARKMANN, J. (2001) Modellierung und Indikation nachhaltiger Landschaftsentwicklung – Beiträge zu den Grundlagen angewandter Ökosystemforschung. Diss. Math.-Nat.-Fak. Universität Kiel
- BARTELS, F. (1997) FUZZEKS – Ein Fuzzy-Auswertungs- und Krigingsystem für raumbezogene Daten. Dipl.-A. Inst. für Informatik und Praktische Mathematik. Universität Kiel
- BASTIAN, O. & K. F. SCHREIBER (Hrsg.) (1999) Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. Berlin
- BBR BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (2000) Raumordnungsbericht 2000. Bonn
- BEA, F. X. & J. HASS (1995) Strategisches Management. Stuttgart
- BECHMANN, A. (1981) Grundlagen der Planungstheorie und Planungsmethodik. Eine Darstellung mit Beispielen aus dem Arbeitsfeld der Landschaftsplanung. Berlin
- BECK-TEXTE UMWELTRECHT (1999) Wichtige Gesetze und Verordnungen zum Schutz der Umwelt. München
- BERTALANFFY, L. VON (1968) General System Theory. New York
- BICK, H. (1993) Ökologie. Grundlagen terrestrischer und aquatischer Ökosysteme. Stuttgart
- BINDER, K. G. (1999) Grundzüge der Umweltökonomie. München
- BIRKMANN, J., KOITKA, H., KREIBICH, V. & R. LIENENKAMP (Hrsg.)(1999) Indikatoren für eine nachhaltige Raumentwicklung. Methoden und Konzepte der Indikatorenforschung. Dortmunder Beiträge zur Raumplanung 96 Dortmund
- BIRNBACHER, D. (1998) Utilitaristische Umweltbewertung. In: THEOBALD, W. (Hrsg.)(1998) Integrative Umweltbewertung. Theorie und Beispiele aus der Praxis, 21-33 Berlin
- BLACH, A. & E. IRMEN (1999) Indikatoren für eine nachhaltige Raumentwicklung. In: BBR BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (1999) Nachhaltige Raum- und

- Siedlungsentwicklung – die regionale Perspektive. Informationen zur Raumentwicklung, Heft 7: 451-476 Bonn
- BLEISCHWITZ, R. (1998) Ressourcenproduktivität. Innovationen für Umwelt und Beschäftigung. Berlin
- BLUME, H.-P. (Hrsg.)(1992) Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und –belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. Landsberg/Lech
- BMBF BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (1998) Forschung für die Umwelt. Ein Programm der Bundesregierung. Bonn
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2000c) Agrarbericht der Bundesregierung 2000. Bonn
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2000b) Nachhaltigkeitsstrategie für die Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft in Deutschland. Bonn URL: <http://www.verbraucherministerium.de////////aktuelles/nachhaltigkeit.htm>
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2000a) Land- und Forstwirtschaft in Deutschland. Daten und Fakten. Bonn
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1999c) Gute fachliche Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung. Bonn
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1999b) Entwicklung ländlicher Räume. Zukunft gemeinsam gestalten. Symposium vom 4. bis 6. Mai 1999 in Erfurt. Bonn
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1999a) Konzept zur Förderung des Ökologischen Landbaus. Bonn
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1998) Gute fachliche Praxis im Pflanzenschutz. Bonn
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1997) Forschungsrahmenplan 1997-2000 für den Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bonn
- BMR BUNDESMINISTERIUM FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU (1996) Raumordnung in Deutschland. Bonn
- BMU BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2001) Gewässerschutzpolitik. Bonn
- BMU BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1998) Umweltpolitik – Umweltbericht 1998. Bonn
- BMU BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1997) Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung in Deutschland. Bericht der Bundesregierung anlässlich der UN-Sondergeneralversammlung über Umwelt und Entwicklung 1997 in New York. Bonn
- BMVEL BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2001) Agrarbericht der Bundesregierung 2001. Bonn

- BOCK, W. & A. SALSKI (1998) A fuzzy knowledge-based model of population dynamics of the yellow-necked mouse (*Apodemus flavicollis*) in a beech forest. *Ecological Modelling* **108**: 155-161
- BORTZ, J. & N. DÖRING (2001) *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin
- BOSSEL, H. (1994) *Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Braunschweig
- BOSSEL, H. (1999) Ökosystemar basierte Leitbilder für eine Nachhaltige Entwicklung. In: FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & SCHRÖDER, W. (Hrsg.)(Grundwerk 1997) *Handbuch der Umweltwissenschaften – Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung*. VI-3.9.6 1-18 Landsberg
- BOTHE, H.-H. (1993) *Fuzzy Logic – Einführung in Theorie und Anwendungen*. Berlin
- BRANDES, W. (1997) *Produktions- und Umweltökonomik. Traditionelle und moderne Konzepte*. Stuttgart
- BRANDT, J., TRESS, B., & G. TRESS (2000) Multifunctional Landscapes. *Interdisciplinary Approaches to Landscape Research and Management*. Intern. Conference. 18.-21. Oct. 2000 Roskilde
- BRAUCHLIN, E. & R. HEENE (1995) *Problemlösungs- und Entscheidungsmethodik*. Bern
- BRECKLING, B. & M. ASSHOFF (Hrsg.)(1996) *Modellbildung und Simulation im Projektzentrum Ökosystemforschung. Ökosysteme und ökologische Prozesse im Bereich der Bornhöveder Seenkette*. *EcoSys Beiträge zur Ökosystemforschung*, **4** Kiel
- BRECKLING, B. & F. MÜLLER (Hrsg.)(2000) *Der Ökologische Risikobegriff. Beiträge zu einer Tagung des Arbeitskreises Theorie in der Gesellschaft für Ökologie vom 4. –6. 3. 1998 im Landeskulturzentrum Salzau (Schleswig-Holstein) Bd. 1*. Peter Lang, Frankfurt a. M.
- BREDEMEIER, M. & F. O. BEESE (2000) *Ökosystemforschung für eine nachhaltige, multifunktionale Waldnutzung*. In: PGM Petermann *Geographische Mitteilungen*, **144** (2): 42-51
- BREDE, S. (2000) *Die Anwendung der Hierarchitätstheorie in der Ökosystemforschung*. *EcoSys Suppl.*, **30** Kiel
- BRUNDTLAND-BERICHT (1987) *Weltkommission für Umwelt und Entwicklung: Unsere Gemeinsame Zukunft*. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Deutsche Ausgabe, herausgegeben von V. HAUFF. Greven
- BUCHWALD, K. & W. ENGELHARDT (Hrsg.)(1996) *Bewertung und Planung im Umweltschutz. Umweltschutz: Grundlagen und Praxis*, **2** Bonn
- BUCK, B. (1987) *Eine deontische Logik auf der Grundlage dynamischer Aussagenlogik*. Diss. Mat.-Nat.-Fak. Universität Kiel
- BUDELL, R. J. (1998) *Modellierung der Lärmbelastigung mit Hilfe der ‚fuzzy logic‘ – ein Beitrag zur Umweltbewertung*. Diss. Math.- Nat. Fak. Universität Kiel
- BUI, M. T. (1993) *Weiterentwicklung eines Unterstützungssystems zur wissensbasierten Modellierung unter Einsatz der Fuzzy-Set-Theorie*. Dipl.-A. Inst. für Informatik und Praktische Mathematik Universität Kiel



- BÜRCEL, H.-D. (Hrsg.)(1998) Wissensmanagement – Schritte zum intelligenten Unternehmen. Berlin
- COPI, I. M. (1998) Einführung in die Logik. München
- CSD (United Nations Commission on Sustainable Development ) (2001) Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies. Ninth Session, 16.-27. April 2001 Background Paper No. 3. New York
- DASCHKEIT, A. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(1998) Umweltforschung quergedacht. Perspektiven integrativer Umweltforschung und -lehre. Festschrift für Prof. Dr. O. Fränze zum 65. Geburtstag. Berlin
- DAUNICHT, W., SALSKI, A., NÖHR, P. & C. NEUBERT (1996) Ein fuzzy-wissensbasiertes Modell zur Reproduktion von Feldlerchen (*Alauda arvensis*) im Ackerland. EcoSys – Beiträge zur Ökosystemforschung 4: 99-106 Kiel
- DE GROOT, W. T. (1992) Functions of Nature: Evaluation of Nature in environmental Planning, Management and Decision making. Wolters-Noorhoff. Amsterdam
- DELLA SCHIAVA, M. & W. H. REES (1999) Was Wissensmanagement bringt. Wien
- DEMANT, B. (1993) Fuzzy-Theorie oder die Faszination des Vagen – Grundlagen einer präzisen Theorie des Unpräzisen für Mathematiker, Informatiker und Ingenieure. Braunschweig
- DIEFENBACHER, H. & DÜMING, D., TEICHERT, V. & S. WILHELMY (2000) Indikatoren im Rahmen einer Lokalen Agenda 21. Ein gemeinsames Forschungsvorhaben des UVM Baden-Württemberg, des Bayerischen STMLU, des Hessischen MULF und des Thüringischen MLNU. Wiesbaden
- DOSCH, F. & G. BECKMANN (1999) Siedlungsflächenentwicklung in Deutschland – auf Zuwachs programmiert. In: BBR – Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (1999) Informationen zur Raumentwicklung. Steuerung der Flächennutzung, 8: 493-509 Bonn
- DRÖSSER, C. (1996) Fuzzy Logic. Methodische Einführung in krauses Denken. Hamburg
- DUBOIS, D. & H. PRADE (1980) Fuzzy Sets and Systems. London
- EEA EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2000) Environmental Signals 2000. European Environment Agency regular Indicator Report. Copenhagen
- EEA EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (1999b) Environmental Indicators: Typology and Overview. Technical Report No 25 Copenhagen
- EEA EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (1999a) Environment in the European Union at the turn of the Century. Environmental Assessment Report No.2 Copenhagen
- EEA EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (1998) Computer-based Models in Integrated Environmental Assessment. EEA Copenhagen
- EISENFÜHR, F. & M. WEBER (1994) Rationales Entscheiden. Berlin
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2001) Umwelt 2010: Unsere Zukunft liegt in unserer Hand. Das 6. Aktionsprogramm der EG für die Umwelt. Luxemburg

- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2000) Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL). Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Brüssel
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (1999) Europäisches Raumentwicklungskonzept EUREK - Auf dem Wege zu einer räumlich ausgewogenen und nachhaltigen Entwicklung der Europäischen Union. Luxemburg
- FIGGE, F. (2000) Öko-Rating. Ökologieorientierte Bewertung von Unternehmen. Berlin
- FINKE, L. (1994) Landschaftsökologie. Braunschweig
- FLECHTNER, H. J. (1984) Grundbegriffe der Kybernetik. München
- FÖRSTER, H. (1998) Entwicklung des plattformunabhängigen Fuzzy-Modellierungssystems xFLEco mit graphischer Benutzeroberfläche. Dipl.-A. Inst. für Informatik und Praktische Mathematik. Universität Kiel
- FRÄNZLE, O. (2000) Ecosystem Research. In: JØRGENSEN, S.E. & F. MÜLLER (Hrsg.)(2000) Handbook of Ecosystem Theories and Management, 89-102 Washington
- FRÄNZLE, O. (1998) Ökosystemforschung im Bereich der Bornhöveder Seenkette. In: FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(Grundwerk 1997) Handbuch der Umweltwissenschaften – Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. V-4.3, 1-35 Landsberg
- FRÄNZLE, O. (1997) Grundlagen und Entwicklung der Ökosystemforschung. In: FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(1997) Handbuch der Umweltwissenschaften. II-2.1, 1-24 Landsberg
- FRÄNZLE, O. (1990) Ökosystemforschung und Umweltbeobachtung als Grundlage der Raumplanung. IN: MAB-MITTEILUNGEN (1990) Tagung der MAB-Nationalkomitees der Bundesrepublik Deutschland und der Deutschen Demokratische Republik, 28.+29. Mai 1990, 26-39 Bonn
- FRÄNZLE, O. (Hrsg.)(1986) Geoökologische Umweltbewertung. Wissenschaftstheoretische und methodische Beiträge zur Analyse und Planung. Kieler Geogr. Schriften **64** Kiel
- FRÄNZLE, O. (1971) Physische Geographie als quantitative Landschaftsforschung. In: Kieler Geogr. Schriften **37** Kiel
- FRÄNZLE, O., D. ELHAUS & J. FRÖHLING (1987) Naturwissenschaftliche Anforderungen an die Sanierung kontaminierter Standorte: Standortsspezifische Klassifikation im Hinblick auf die Migration von Stoffen im Untergrund. Kiel
- FRÄNZLE, O. & U. FRÄNZLE (1993) Umweltbeobachtung und –bewertung als Grundlage des Umweltschutzes. In: CORDES, G. (Hrsg.)(1993) Geographie-Umwelt-Erziehung. Festschrift H. Kersberg, 165-188 Bochum
- FRÄNZLE, O., JENSEN-HUSS, K., DASCHKEIT, A., HERTLING, T., LÜSCHOW, R. & W. SCHRÖDER (1993) Grundlagen zur Bewertung der Belastung und Belastbarkeit von Böden als Teilen von Ökosystemen. UBA-Texte **59** Berlin

- FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(Grundwerk 1997) Handbuch der Umweltwissenschaften – Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. Landsberg
- FRÄNZLE, O., ZÖLITZ-MÖLLER, R. BOEDECKER, D., BRUHM, I., HEINRICH, U., JENSEN-HUSS, K., KLEIN, A., KOTHE, P., MICH, N., REICHE, E.-W., REIMERS, T. & SAAGER, W. (1992) Erarbeitung und Erprobung einer Konzeption für die ökologisch orientierte Planung auf der Grundlage der regionalisierenden Umweltbeobachtung am Beispiel Schleswig-Holsteins. UBA-Texte **20** Berlin
- FREDE, H.-G. & S. DABBERT (Hrsg.)(1999) Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. Landsberg
- FRIEDRICH, M. (1999) Entwicklung ökotoxikologischer Prüfverfahren mit Hilfe der Fuzzy-Clusteranalyse. Diss. Math.-Nat.-Fak. Universität Kiel
- FÜRST, D. & H. KIEMSTEDT (1997) Umweltbewertung. In: FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(Grundwerk 1997) Handbuch der Umweltwissenschaften – Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung VI-3.4, 1-13 Landsberg
- FÜRST, D. & H. KIEMSTEDT (1992) Umweltqualitätsziele für die ökologische Planung. UBA-Texte **34** Berlin
- GAUSEMEIER, J. & A. FINK (1999) Führung im Wandel – Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung. München
- GEGG, G. (1993) Prognose räumlich und zeitlich differenzierter Gefährdungstufen mit einem Expertensystem unter Integration eines Geo-Informationssystems – am Beispiel von Waldschäden durch Insektenfraß. Münchner Geographische Abhandlungen. **18** Diss. Universität München
- GÖRZ, G., ROLLINGER, C.-R. & J. SCHNEEBERGER (Hrsg.)(2000) Handbuch der Künstlichen Intelligenz. München
- GÖRZ G. (Hrsg) (1995) Einführung in die Künstliche Intelligenz. Bonn
- GRABAUM, R. & U. STEINHARDT (Hrsg.) (1998) Landschaftsbewertung unter Verwendung analytischer Verfahren und Fuzzy-Logic. UFZ-Bericht Nr. 6/1998. Leipzig-Halle
- GRÜTZNER, R. (Hrsg.)(1997) Modellierung und Simulation im Umweltbereich. Fortschritte in der Simulationstechnik. Braunschweig
- GÜNTHER, O., SCHULZ, K.-P. & J. SEGELKE (Hrsg.) (1992): Umweltsysteme geographischer Informationssysteme. Karlsruhe
- HABER, W. (1998) Nachhaltigkeit als Leitbild einer natur- und sozialwissenschaftlichen Umweltforschung. In: DASCHKEIT, A. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(1998) Umweltforschung quergedacht. Perspektiven integrativer Umweltforschung und -lehre. Festschrift f. Prof. Dr. O. Fränzle zum 65. Geburtstag, 127-146 Berlin
- HABER, W. (1993) Ökologische Grundlagen des Umweltschutzes. **1** Bonn. – BUCHWALD, K. & W. ENGELHARDT (Hrsg.): Umweltschutz: Grundlagen und Praxis. Bonn
- HABER, W. (1979) Raumordnungskonzepte aus der Sicht der Ökosystemforschung. In: Veröffentlichungen der Akademie für Raumordnung und Landesplanung – ARL (1979) Die

- ökologische Orientierung der Raumplanung. Forschungs- und Sitzungsberichte 131, 12-24 Hannover
- HAGGETT, P. (1991) Geographie: eine moderne Synthese. Stuttgart
- HAMPICKE, U. (1998) Ökonomische Bewertungsgrundlagen und die Grenzen einer ‚Monetarisierung‘ der Natur. In: THEOBALD, W. (HRSG.)(1998) 95-117
- HANSEN, H. R. (1996) Wirtschaftsinformatik I. Grundlagen betriebswirtschaftlicher Informationsverarbeitung. Stuttgart
- HARMON, P., MAUS, R. & W. MORRISSEY (1989) Expertensysteme: Werkzeuge und Anwendungen. München
- HEINEN, E. (1971) Grundlagen betriebswirtschaftlicher Entscheidungen. Das Zielsystem der Unternehmung. Wiesbaden
- HEINSOHN, J. & R. SOCHER-AMBROSIUS (1999) Wissensverarbeitung: eine Einführung. Heidelberg
- HERZOG, C. (2002, i.p.) Grundlagen und Unterstützungssysteme zur Modellierung interdisziplinärer Entscheidungsfindungen In: FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(Grundwerk 1997) Handbuch der Umweltwissenschaften – Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. V-2.7 Landsberg
- HERZOG, C. (2001d) IeMAX – Das fuzzy logic-gestützte Umweltbewertungssystem: Aufbau, Experimente, Perspektiven. In: HILTY, L. M. & P. W. GILGEN (2001) Proceedings ‚Sustainability in the Information Society‘ – 15. International Symposium. Informatics for Environmental Protection, 10. – 12. October 2001, 933-938 Zürich
- HERZOG, C. (2001c) Modellierung von Bewertungsmaßstäben und –regeln in Umweltbewertungssystemen – Problemlösen mittels Fuzzy Logic? In: WITTMANN, J. (Hrsg.)(2001) Umweltinformatik: Simulation in den Umwelt- und Geowissenschaften/Simulation und Künstliche Intelligenz. 26.+27.03.2001 in Münster, 137-154 Aachen
- HERZOG, C. (2001b, i. p.) Bedeutung der Fuzzy Logic bei der Modellierung von Unschärfekategorien in Umweltbewertungssystemen. In: GNAUCK, A. (Hrsg.)(2001) Umweltinformatik: Theorie und Modellierung von Ökosystemen. 01.-03.11.2000 in Kölpinsee/Usedom, 1-24 Aachen
- HERZOG, C. (2001a) Ökosystemare und modelltheoretische Grundlagen eines fuzzy logic-gestützten Umweltbewertungssystems. In: JOPP, F. (Hrsg.)(2001) Rolle und Bedeutung von Modellen für den ökologischen Erkenntnisprozess. Beiträge zu einer Tagung des Arbeitskreises Theorie in der Gesellschaft für Ökologie am 1.3.-3.3.2000 in Reichenow. **3**, 101-113 Frankfurt a. M.
- HERZOG, C. (2000) IeMAX: Ein Methodenpaket zur Modellierung und integrativen Bewertung von Raumnutzungsänderungen und dem Einsatz von Fuzzy-Expertensystemen. In: ERBGUTH, W., HABER, W., KLEMMER, P., SCHULZ, R. & H. W. THOENES (Hrsg.)(2000) ZAU Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung. **13** Heft 3/4 370-381 Berlin

- HERZOG, C. (1998) GIS-gestützte ökosystemare Bodenbewertung als Grundlage der Landschaftsplanung der Gemeinden Ruhwinkel und Wankendorf (Schleswig-Holstein). Dipl.-A. Geogr. Institut, Universität Kiel
- HERZOG, C. (1997b) Bewertung von Bodeneigenschaften und dem Potential der Nitrat-Auswaschung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen der Gemeinde Ruhwinkel. Oktober 1997. Fachbeitrag zum Landschaftsplan, 1-26 Kiel
- HERZOG, C. (1997a) Bewertung von Bodeneigenschaften und dem Potential der Nitrat-Auswaschung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen der Gemeinde Wankendorf. August 1997. Fachbeitrag zum Landschaftsplan, 1-25 Kiel
- HERZOG, C., HOSENFELD, F. & J. BARKMANN (2001) The web-based DSS ‚eXpert21‘: Support for the Selection of Sustainable Development Indicators. In: HILTY, L. M. & P. W. GILGEN (2001) Proceedings ‚Sustainability in the Information Society‘ – 15. International Symposium. Informatics for Environmental Protection, 10. – 12. October 2001, 577-582 Zürich
- HERZOG, C. & R. ZÖLITZ-MÖLLER (1999) Nachhaltigkeitsaspekte in der gemeindlichen Landschaftsplanung: Beispiel aus der Planungspraxis der angewandten Ökosystemforschung Kiel. In: STANDORT – Zeitschrift für angewandte Geographie, **23** (1) 28-37 Bonn
- HILTY, L. M. & P. W. GILGEN (2001) Proceedings ‚Sustainability in the Information Society‘ – 15. International Symposium. Informatics for Environmental Protection, 10. – 12. October 2001 Zürich
- HOFMANN, F. (1996) Bodenschutz durch Strafrecht? - Die Probleme bei der Anwendung und Auslegung des Tatbestandes der Bodenverunreinigung (§ 324a StGB) und ihre Auswirkungen auf die Effizienz strafrechtlichen Umweltschutzes. Diss. - Rechtswissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrechts-Universität Kiel. Kieler Rechtswissenschaftliche Abhandlungen (NF). **8**. Kiel
- JACOBY, C. (2000) Die Strategische Umweltprüfung (SUP) in der Raumplanung. Instrumente, Methoden und Rechtsgrundlagen für die Bewertung von Standortalternativen in der Stadt- und Regionalplanung. Berlin
- JAX, K. (Hrsg.)(2000b) Funktionsbegriff und Unsicherheit in den Umweltwissenschaften. Beiträge zu einer Tagung des Arbeitskreises ‚Theorie‘ in der Gesellschaft für Ökologie vom 10.-12. 3. 1999 im Heinrich-Fabri-Institut der Universität Tübingen in Blaubeuren. **2** Frankfurt a. M.
- JAX, K. (2000a) Verschiedene Verständnisse des Funktionsbegriffs in den Umweltwissenschaften In: JAX, K. (Hrsg.)(2000b) Funktionsbegriff und Unsicherheit in den Umweltwissenschaften. Beiträge zu einer Tagung des Arbeitskreises ‚Theorie‘ in der Gesellschaft für Ökologie vom 10.-12. 3. 1999 im Heinrich-Fabri-Institut der Universität Tübingen in Blaubeuren. **2** 7-19 Frankfurt a. M.
- JESSEL, B. (1998) Landschaften als Gegenstand von Planung: theoretische Grundlagen ökologisch orientierten Planes. Berlin

- JOPP, F. (Hrsg.)(2001) Rolle und Bedeutung von Modellen für den ökologischen Erkenntnisprozess. Beiträge zu einer Tagung des Arbeitskreises Theorie in der Gesellschaft für Ökologie am 1.3.-3.3.2000 in Reichenow, 4 Frankfurt a. M.
- KAHL, W. & A. VOBKUHLE (HRSG.)(1998) Grundkurs Umweltrecht: Einführung für Naturwissenschaftler und Ökonomen. Heidelberg
- KAHLENBORN, W. & A. KRAEMER (1999) Nachhaltige Wasserwirtschaft in Deutschland. Beiträge zur Internationalen und Europäischen Umweltpolitik. Berlin
- KAHLERT, J. & H. FRANK (1994) Fuzzy – Logik und Fuzzy – Control, Wiesbaden
- KANDZIA, P. & H.- J. KLEIN (1993) Theoretische Grundlagen relationaler Datenbanksysteme. Mannheim
- KANNEN, A. (2000) Analyse ausgewählter Ansätze und Instrumente zu Integriertem Küstenzonenmanagement und deren Bewertung. Nr. 23 Berichte des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste der Universität Kiel
- KARBACH, W. & M. LINSTER (1990) Wissensakquisition für Expertensysteme: Techniken, Modell und Softwarewerkzeuge. München
- KOOPMANN, J. (2001) Von der Agrar– zur Dienstleistungsgesellschaft. (URL: <http://www.koopworld.de/studium/downloads2/bwl2.htm>)
- KRIEGER, D. J. (1996) Einführung in die allgemeine Systemtheorie. München
- KRUSE, R., GEBHARDT, J. & F. KLAWONN (1995) Fuzzy-Systeme. Stuttgart
- KUHNT, G. & R. ZÖLITZ-MÖLLER (Hrsg.)(1992) Beiträge zur Geoökologie aus Forschung, Praxis und Lehre. Prof. Dr. O. Fränze zum 60. Geburtstag gewidmet von seinen Schülerinnen und Schülern. Kieler Geogr. Schr. 85 Kiel
- KURBEL, K. (1989) Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen: eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme. Berlin
- LAUX, H. (1998) Entscheidungstheorie. Berlin
- LEMSTER, J.C. (2001) Implementierung von Verkettungs– und Simulations-Strategien für das Fuzzy-Modellierungssystem xFLEco. Dipl.-A. Inst. für Informatik und Praktische Mathematik. Universität Kiel
- LENDI, M. (1995) Grundriss einer Theorie der Raumplanung. Einleitung in die raumplanerische Problematik. Zürich
- LESER, H. (1997) Landschaftsökologie: Ansatz, Modelle, Methodik, Anwendung. 4. neubearb. Aufl. Stuttgart
- LINNEWEBER, V. & E. KALS (HRSG.)(1999) Umweltgerechtes Handeln: Barrieren und Brücken. Berlin
- LUTZE, G. & R. WIELAND (1997) Fuzzy Logic in der Landschaftsforschung und –modellierung. In: GRÜTZNER, R. (Hrsg.)(1997) Modellierung und Simulation im Umweltbereich. Fortschritte in der Simulationstechnik, 233-248 Braunschweig
- MAG, W. (1977) Entscheidung und Information. München

- MARKS, R., MÜLLER, M. J., LESER, H. & H.-J. KLINK (1992) Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes (BA LVL). Forschungen zur Deutschen Landeskunde. **229** Trier
- MATHES, K., EKSCHMITT, K. & B. BRECKLING (Hrsg.)(1996) Systemtheorie in der Ökologie. Beiträge zu einer Tagung des Arbeitskreises ‚Theorie‘ in der Gesellschaft für Ökologie: Zur Entwicklung und aktuellen Bedeutung der Systemtheorie in der Ökologie. Schloss Rauischholzhausen März 1996. Landsberg
- MERTENS, M. (2000) Die Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie auf die Modellierung von Stickstoffbilanzen im Weißenstädter Becken. Diss. Universität Bayreuth
- MÜLLER, F. (1999) Ökosystemare Modellvorstellungen und Ökosystemmodelle in der Angewandten Landschaftsökologie. In: SCHNEIDER-SLIWA, R., SCHAUB, D. & G. GEROLD (1999) Angewandte Landschaftsökologie. Grundlagen und Methoden, 25-46 Heidelberg
- MÜLLER, F., BRECKLING, B., BREDEMEIER, M., GRIMM, V., MALCHOW, H., NIELSEN, S. N. & E.-W. REICHE (1997) Ökosystemare Selbstorganisation. In: FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(Grundwerk 1997) Handbuch der Umweltwissenschaften – Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung, III-2.4 1-19 Landsberg
- MUNF MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATUR UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (1999) Landschaftsprogramm Schleswig-Holstein. Kiel
- MUNF MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATUR UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (1998) Gesamtplan Grundwasserschutz in Schleswig-Holstein, Kiel
- MUNF MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATUR UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (1996) Bodenschutzprogramm in Schleswig-Holstein, Kiel
- MUTIUS, A. v. & S. STÜBER (1998) Umweltbewertung: Rechtliche Bewertungsgrundlagen und Steuerungsmöglichkeiten des Rechts. In: THEOBALD (HRSG.)(1998) 120-142
- MUTIUS, A. v. (1992) Gesetzliche Möglichkeiten des Bodenschutzes. In: BLUME, H.-P. (Hrsg.)(1992) Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und –belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahme, 519-542 Landsberg/Lech
- NEUBERT, C. (1995) Weiterentwicklung der Simulationskomponente des Unterstützungssystems FLECO zur fuzzy-wissensbasierten Modellierung. Dipl.-A. am Inst. für Informatik und Praktische Mathematik. Universität Kiel
- NÖHR, P. (1995) Erweiterung des Modellierungssystems FLECO in Richtung Fuzzy-Expertensystem. Dipl.-Arb. Inst. f. Informatik und Praktische Mathematik. Universität Kiel
- ODUM, E. P. (1992) Grundlagen der Ökologie, **2** Stuttgart
- OECD ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (1993) OECD Core set of indicators for environmental performance reviews. A synthesis report by the group on the state of the environment. Paris
- PAASCH, J. (1994) Weiterentwicklung und Portierung des Fuzzy-Clustering-Systems ECO-FUCS. Dipl. Inst. für Informatik und Praktische Mathematik. Universität Kiel

- PAGE, B. L. M. HILTY. (Hrsg.)(1995) Umweltinformatik: Informatikmethoden für Umweltschutz und Umweltforschung. Handbuch der Informatik. München
- PARTZSCH, D. (1970) Daseinsgrundfunktionen In: ARL Akademie für Landeskunde und Raumforschung. Handwörterbuch der Raumforschung und Raumordnung, Hannover
- PEDRYCZ, W. (Hrsg.) (1996) Fuzzy Modelling. Paradigms and Practice. Boston
- PETERS, W. (1998) Zur Theorie der Modellierung von Natur und Umwelt. Ein Ansatz zur Rekonstruktion und Systematisierung der Grundperspektiven ökologischer Modellbildung für planungsbezogene Anwendungen. Diss. TU-Berlin
- PEVETZ, W. (1998) Die Multifunktionalität der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Bundesministerium f. Land- und Forstwirtschaft. Schriftenreihe Nr. 82. Wien
- PIOTROWSKI, J. A. (1991) Geologische Karte von Schleswig-Holstein 1:25 000, Einzugsgebiet der Bornhöveder Seenkette, Blatt 1827 Stolpe/1927 Bornhöved, Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein. Kiel
- POHL, C. E. (1999) Auch zu präzis ist ungenau! – Unsicherheitsanalyse in Ökobilanzen und Alternativen zu ‚use many methods‘. Diss. Nr. 13019 ETH Zürich
- POSCHMANN, C., RIEBENSTAHL, C. & E. SCHMIDT-KALLERT (1998) Umweltplanung und –bewertung. Gotha
- PUPPE, F. (Hrsg.) (1999) XPS-99: Knowledge-Based Systems Survey and Future Directions. 5<sup>th</sup> biannual German Conference on Knowledge-Based Systems Würzburg, Germany, March 1999. Berlin
- PUPPE, F. (1991) Einführung in Expertensysteme. Berlin
- REICHE, E. W., MEYER, M. & I. DIBBERN (1999) Modelle als Bestandteile von Umweltinformationssystemen, dargestellt am Beispiel des Methodenpaketes DILAMO. In: BLASCHKE, T. (HRSG.)(1999) Umweltmonitoring und Umweltmodellierung. GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer Nachhaltigen Entwicklung, 131-141 Heidelberg
- REICHE, E.W. (1991) Entwicklung, Validierung und Anwendung eines Modellsystems zur Beschreibung und flächenhaften Bilanzierung der Wasser- und Stickstoffdynamik in Böden. Kieler Geogr. Schr. **79** Kiel
- ROHMANN, U. & H. SONTHEIMER (1985) Nitrat im Grundwasser. Ursachen, Bedeutung, Lösungswege. Karlsruhe
- ROS, M. (1998) Unsicherheit und Fuzziness in ökologischen Bewertungen – Orientierung zu einer robusten Praxis der Ökobilanzierung. Diss. Nr. 12726 ETH Zürich
- SACHS, L. (1997) Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. Berlin
- SALSKI, A. (1999) Ecological Modelling and Data Analysis. In: ZIMMERMANN, H.-J. (1999): Practical Applications of Fuzzy Technologies, **7** 247-266 Boston
- SALSKI, A. & P. KANDZIA (1996) Fuzzy sets and Fuzzy Logic in ecological Modelling. In: BRECKLING, B. & M. ASSHOFF (Hrsg.)(1996) Modellbildung und Simulation im Projektzentrum Ökosystemforschung. Ökosysteme und ökologische Prozesse im Bereich der Bornhöveder Seenkette. EcoSys - Beiträge zur Ökosystemforschung, **4** 85-97 Kiel



- SALSKI, A. & C. NOELL (2001) Fuzzy Linear Programming for the Optimization of Land Use Scenarios. In: MASTORAKIS, N., MLADENOV, V., SUTER, B. & L. J. WANG (eds.)(2001) *Advances in Scientific Computing, Computational Intelligence and Applications. Mathematics and Computers in Science and Engineering. A Series of Reference Books and Textbooks*, 355-360 MA Danvers
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (Hrsg.)(1992) *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart
- SCHEPERS, M. (1991) Ein Unterstützungssystem zur wissensbasierten Modellierung und Simulation von ökologischen Prozesse. Dipl.-A. Inst. für Informatik und Praktische Mathematik. Universität Kiel
- SCHNECK, O. (1993) *Lexikon der Betriebswirtschaft*. Beck-Wirtschaftsberater im dtv. München
- SCHOLLES, F. (2001) Szenariotechnik als Planungsmethode. URL: [http://www.laum.uni-hannover.de/ilr/lehre/Ptm/Ptm\\_Szenario.htm](http://www.laum.uni-hannover.de/ilr/lehre/Ptm/Ptm_Szenario.htm)
- SCHOLZ, R. W. (1998) Umweltforschung zwischen Formalwissenschaft und Verständnis. Muss man den Formalismus beherrschen, um die Formalisten zu schlagen? In: DASCHKEIT, A. & SCHRÖDER, W. (Hrsg.)(1998) *Umweltforschung quergedacht. Perspektiven integrativer Umweltforschung und -lehre. Festschrift für Prof. Dr. O. Fränzle zum 65. Geburtstag*, 309-328 Berlin
- SCHÖNING, U. (2000) *Logik für Informatiker*. Heidelberg
- SCHRÖDER, W. (1996) Einsatz von Biosphärenreservaten für Integrative Umweltbeobachtung und -bewertung sowie Naturschutz. In: Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg (1996) *Bewertung im Naturschutz. Ein Beitrag zur Begriffsbestimmung und Neuorientierung in der Umweltplanung*, **23** 143-167 Stuttgart
- SCHRÖDER, W. (1994) Schlussfolgerungen für eine vorsorgende Umweltforschung und -politik. In: SCHRÖDER, W., VETTER L. & O. FRÄNZLE (Hrsg.)(1994) *Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie* 333-346 Braunschweig
- SCHRÖDER, W., GARBE-SCHÖNBERG, C.-D. & O. FRÄNZLE (1991) Die Validität von Umweltdaten. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie*, **3** (4): 237-241 Zürich
- SCHRÖDER, W., HABER, W., FRÄNZLE, O. & A. DASCHKEIT (1998) Umweltbeobachtung und Umweltbewertung auf ökologischer und sozialwissenschaftlicher Grundlage: Ein Plädoyer aus der Sicht von Ökologen. In: KRUSE-GRAUMANN, L. (Hrsg.)(1998) *Ziele, Möglichkeiten und Probleme eines gesellschaftlichen Monitorings: Tagungsband zum MAB-Workshop, 13.-15. Juni 1996, MAB – Mitteilungen*, **42** Bonn
- SCHRÖDER, W., VETTER L. & O. FRÄNZLE (Hrsg.)(1994) *Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie*. Braunschweig
- SCHROEDER, D. (1992) *Bodenkunde in Stichworten*. 5. revidierte u. erw. Aufl. durch W. Blum. Berlin
- SEIFFERT, H. (1992) *Einführung in die Wissenschaftstheorie 3. Handlungstheorie, Modallogik, Ethik, Systemtheorie*. München

- SIMON, K.-H. & J. PIETSCH (1998): Wissensbasierte Systeme als Werkzeuge zur Unterstützung von Analyse und Planung in ökosystemaren Zusammenhängen. In: FRÄNZLE, O., MÜLLER, F. & SCHRÖDER, W. (Hrsg.)(Grundwerk 1997) Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen u. Anwendungen der Ökosystemforschung. V-2.4 1-16 Landsberg
- SIMON, K.-H., MANCHE, A. & A. UHRMACHER (1992) Expertensysteme auf dem Umweltsektor. UBA-Texte 47/92 Berlin
- SOMBE, L. (1992) Schließen bei unsicherem Wissen in der künstlichen Intelligenz: Vergleich von Formalismen anhand eines Beispiels. Braunschweig
- SPERLBAUM, C. (1991) Einsatz der Fuzzy Set Theorie in der Modellierung ökosystemspezifischer Prozesse zur Darstellung und Verarbeitung unpräziser Information. Dipl.-A. Inst. für Informatik und Praktische Mathematik, Universität Kiel
- SPIES, M. (1993) Unsicheres Wissen. Heidelberg
- SRU SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (2000) Umweltgutachten. Schritte ins nächste Jahrtausend. Bonn
- SRU SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (1998) Umweltgutachten. Umweltschutz: Erreichtes sichern neue Wege gehen. Bonn
- STABU STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND URL: <http://www.destatis.de/>
- STACHOWIAK, H. (1973) Allgemeine Modelltheorie, Wien
- STAHLKNECHT, P. & U. HASENKAMP (1999) Einführung in die Wirtschaftsinformatik. Berlin
- STALA STATISTISCHES LANDESAMT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (2001) Anbau, Ertrag und Ernte landwirtschaftlicher Feldfrüchte 1998/1997 <http://www.statistik-sh.de>
- STEWART, T. A. (1998) Der vierte Produktionsfaktor. Wachstums- und Wettbewerbsvorteile durch Wissensmanagement. München
- STIENS, G. (1996) Prognostik in der Geographie. Braunschweig
- STREIT, U. (1996) Entwicklung des wissensbasierten Beratungssystems PRO\_PLANT für den umweltschonenden Einsatz von Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft. Forschung und Beratung. Wissenschaftliche Berichte über Land- und Ernährungswirtschaft in NRW. Reihe C 50. Münster-Hiltrup
- SUKOPP, H. (Hrsg.)(1990) Stadtökologie: das Beispiel Berlin. Berlin
- THEOBALD, W. (Hrsg.)(1998) Integrative Umweltbewertung. Theorie und Beispiele aus der Praxis. Berlin
- THOMSEN, S. (1991) Trinkwasserqualität und Versorgungssituation im Kreis Plön - Auswertung hydrochemischer und sozioökonomischer Faktoren aus den Jahren 1988-1990, Dipl.-A. Math.-Nat.-Fak. Universität Kiel
- TILLI, T. (1991) Fuzzy-Logik: Grundlagen, Anwendungen, Hard- und Software. München
- TIVY, J. (1993) Landwirtschaft und Umwelt: Agrarökosysteme in der Biosphäre. Heidelberg
- TOBIAS, K. (1997) Defizite der Landschaftsplanung. In: NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPLANUNG. Zeitschrift für angewandte Ökologie, **29** (6): 185-188 Stuttgart
- TRAEGER, D.H. (1994) Einführung in die Fuzzy-Logik. Stuttgart
- UBA Umweltbundesamt Deutschland (2001) Jahresbericht 2000. Berlin

- UBA Umweltbundesamt Deutschland (2000) Jahresbericht 1999. Berlin
- UBA UMWELTBUNDESAMT (2001) Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland. Berlin
- VETTER, L., SCHRÖDER, W. & O. FRÄNZLE (1986) Wissenschaftliche Aspekte der Hypothesengewinnung und –operationalisierung in der Geographie. In: FRÄNZLE, O. (Hrsg.)(1986) Geoökologische Umweltbewertung. Wissenschaftstheoretische und methodische Beiträge zur Analyse und Planung. Kieler Geogr. Schr. **64** 1-17 Kiel
- WBGU WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (1998) Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Bonn
- WBGU WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (1997) Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser. Bonn
- WBGU WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (1994) Welt im Wandel: die Gefährdung der Böden. Bonn.
- WCED WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (1987) Our Common Future. World. Commission on Environment and Development. Oxford
- WEISSENFLUH, A. v. (1990) Einsatz von Expertensystemen zur betrieblichen Entscheidungsunterstützung. Bern
- WERNER, A. & W. SEYFARTH (2000) Zur Integration ökologischer Ziele in die agrarische Landschaftsnutzung. In: PGM Petermanns Geographische Mitteilungen, **144** (2): 6-13
- WERNER, L. (1992) Entscheidungsunterstützungssysteme: ein problem- und benutzerorientiertes Management-Instrument. Heidelberg
- WIRTH, E. (1979) Theoretische Geographie. Stuttgart
- WISSEL, C. (1989) Theoretische Ökologie. Stuttgart
- ZADEH, L. A. (1965) Fuzzy Sets. Information and Control **8** 338-353
- ZADEH, L. A. (1978) Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems 1 3-28
- ZHENG, D. (2001) A Neuro-Fuzzy Approach to Linguistic Knowledge Acquisition and Assessment in Spatial Decision Making. ITC-Diss. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC) Diss. No. **81** Den Haag
- ZÖLITZ-MÖLLER, R. (2001) Landschaftsbewertung. In: RIEDEL, W. & H. LANGE (Hrsg.)(2001) Landschaftsplanung, 100-111 Heidelberg
- ZÖLITZ-MÖLLER, R. (1994) Probleme der Umsetzung geoökologischer Erkenntnisse in die Anwendung. In: STANDORT Zeitschrift für Angewandte Geographie. **18** (2):12-16 Köln
- ZÖLITZ-MÖLLER, R. & M. NACHBAR (1996) Katalog über ökologische Daten, DV-Strukturen und Modelle. Koblenz
- ZÖLITZ-MÖLLER, R. & E.W. REICHE (1992) Gründe, Voraussetzungen und Möglichkeiten für die Modellanbindung an ein GIS. In: GÜNTHER, O., SCHULZ, K.-P. & J. SEGELKE

(Hrsg.) (1992) *Umweltanwendungen geographischer Informationssysteme*, 232-247  
Karlsruhe

ZÖLITZ-MÖLLER, R., REICHE, E.-W. & F. MÜLLER (1998) *Angewandte Ökosystemforschung – contradictio in adjecto?* In: DASCHKEIT, A. & W. SCHRÖDER (Hrsg.)(1998) *Umweltforschung quergedacht. Perspektiven integrativer Umweltforschung und -lehre. Festschrift für Prof. Dr. O. Fränze zum 65. Geburtstag*, 395-414 Berlin

## **Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich meine Dissertation ‘*Das Methodenpaket IeMAX mit dem Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS - Entwicklung und Anwendung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die integrative Raumplanung*’ selbständig, ohne fremde Hilfe, angefertigt habe, und dass ich alle, von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen, wie auch die sich an die Gedanken anderer Autoren eng anlehenden Ausführungen meiner Arbeit, besonders gekennzeichnet, und die Quellen nach den mir angegebenen Richtlinien zitiert habe.