

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
(Direktor: Professor Dr. Andreas Seekamp)
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Erste Erfahrungen mit einer deckenmontierten Angiographieanlage in
der unfallchirurgischen und orthopädischen Operationsroutine.**

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde der Medizin

der Medizinischen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Frederic Benjamin Braun

aus Berlin

Kiel (2020)

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Sebastian Lippross, Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Robert Bergholz, Klinik für Allgemeine, Viszeral-, Thorax-,
Transplantations- und Kinderchirurgie

Tag der mündlichen Prüfung: 17.02.2021

Zum Druck genehmigt: Kiel, den 27.10.2020

Gliederung

- Inhaltsverzeichnis
- Einleitung
- Fragestellung und Zielsetzung
- Material und Methoden
- Ergebnisse
- Diskussion
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis
- Danksagung
- Anhang

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Die Geschichte der Radiodiagnostik	1
Intraoperative Bildgebung	2
Der Hybridoperationssaal	4
Zielsetzung der Arbeit	6
Die Operationen	7
Kyphoplastie	9
Perkutane dorsale Stabilisierung	13
Material und Methoden	15
Der Hybridoperationssaal am UKSH Kiel	15
Einschlusskriterien	19
Ausschlusskriterien	19
Ergebnisse	20
Epidemiologie	20
Gruppe Kyphoplastie	20
Gruppe Fixateur Interne	23
Operations-assoziierte Zeiten	25
Kyphoplastien	25
Fixateur Interne	27
Komplikation	29
Kyphoplastien	29
Fixateur interne	31
Diskussion	33
Systeme für dreidimensionale Bildgebung	33
Nutzung des Hybridoperationssaales am UKSH Kiel	34
Einsatz der dreidimensionalen Bildgebung	37
Zusammenfassung	41
Literaturverzeichnis	42
Abbildungsverzeichnis	49
Anhang	51
Danksagung	51
Erklärung und Veröffentlichung	52

Einleitung

Die Geschichte der Radiodiagnostik

Eine der bedeutendsten Entdeckungen der Medizin war die 1895 von Wilhelm Konrad Röntgen gefundenen und später nach ihm benannten Strahlen [1]. Mit Röntgenstrahlung konnte nun der menschliche Körper durchleuchtet und Organe und vor allem Knochen sichtbar gemacht werden. Eines der ersten Röntgenbilder und eines der wichtigsten Dokumente dieser Epoche zeigt die Aufnahme der Hand von Röntgens Ehefrau Anna Berta aus dem Jahre 1895 (**Abbildung 1**). Dies legte den Grundstein für die Radiologie und Radiodiagnostik. Eine Vielzahl von medizinischen Fachgebieten konnte durch die Entdeckung und Nutzbarmachung der Röntgenstrahlen entstehen oder überhaupt erst hervorgehen. Durch den Einsatz intraoperativ anwendbarer radiologischer Bildgebung wurde die Entwicklung der Unfallchirurgie und operativen Orthopädie dann entscheidend vorangetrieben.



Abbildung 1 - Röntgenbild (Positiv) von Anna Berta Röntgen aus dem Jahre 1895 [2]

In den Anfängen forderte der Gebrauch von Röntgendiagnostik gerade bei den Pionieren der Radiodiagnostik seinen Tribut. Die Unkenntnis über die Auswirkungen der ionisierenden Strahlen auf den Organismus und insbesondere die Fähigkeit, die empfindliche Struktur der Desoxyribonukleinsäure (DNS) zu schädigen, führten bei den Anwendern unter anderem zu chronischen oder akuten schmerzhaften Hautentzündungen, der sog. Radiodermatitis (**Abbildung 2**), Leukämien oder Karzinomen.



Abbildung 2 - Radiodermatitis aus dem Jahre 1905 [2]

Nach der von manchen „heroische Epoche der Radiologie“ genannten Zeit bis etwa 1900 wurden die Röntgengeräte stets weiter verbessert und die Belichtungszeit für Röntgenaufnahmen reduzierte sich drastisch. Mit der anfänglich noch primitiven Ausstattung

betrug die Belichtungszeit von dickeren Portionen des menschlichen Körpers nicht selten über 30 Minuten. Ein in Bewegung befindliches Organ konnte nahezu unmöglich dargestellt werden. Erste brauchbare Röntgenbilder der Extremitäten und knöchernen Strukturen wurden jedoch bereits angefertigt. Rasch konnte durch die Verbesserung der Röntgenquelle, welche nun stärker strahlte, die Belichtungszeit auf wenige Sekunden verringert werden.

Die sogenannte „goldene Epoche der Radiologie“ wird mit der Erfindung der Glühkathodenröhre eingeleitet, welche 1913 von William Coolidge konstruiert wurde. Durch diese Glühkathodenröhre konnte erstmals die Strahlendosis den Untersuchungsanforderungen und –bedingungen angepasst werden.

Ein weiterer von zahlreichen Meilensteinen war die Patentierung der Bildverstärkerröhre in den 1930er Jahren und später auch der Bau dieser. Die Bildverstärkerröhre und eine dazugehörige Steuerkanzel erlaubten den Ärzten erstmals die Arbeit außerhalb der schädlichen Röntgenstrahlung. Aus der Distanz wurde die Strahlenbelastung für die Patienten um das Vier- bis Fünffache und für den Arzt auf null reduziert.

Mit der Erfindung und Entwicklung der Computertomographie (CT) durch Godfrey Hounsfield wurde 1971 die Radiologie noch einmal tiefgreifend verändert. Durch die CT wurde die gesamte medizinische Praxis erneut grundlegend revolutioniert. Nun konnten erstmals Schichtaufnahmen des menschlichen Organismus oder zumeist einzelner Partien angefertigt, diese Strukturen in einzelnen Schichten räumlich dargestellt und am Computerbildschirm betrachtet, sowie in Sagittal- und Frontalebene analysiert werden. [2]

Die intraoperative Bildgebung

Erst durch die Möglichkeit, während einer Operation knöchernen Strukturen durch Röntgenstrahlen sichtbar zu machen, konnten viele unfallchirurgische und orthopädische Eingriffe erst durchgeführt werden. Bereits in den 1940er Jahren wurde zur Versorgung von Oberschenkelbrüchen, mittels minimalinvasiv eingebrachtem Marknagel, intraoperativ Röntgenbilder angefertigt [3]. Ohne intraoperatives Röntgen wäre diese Entwicklung nicht möglich gewesen.

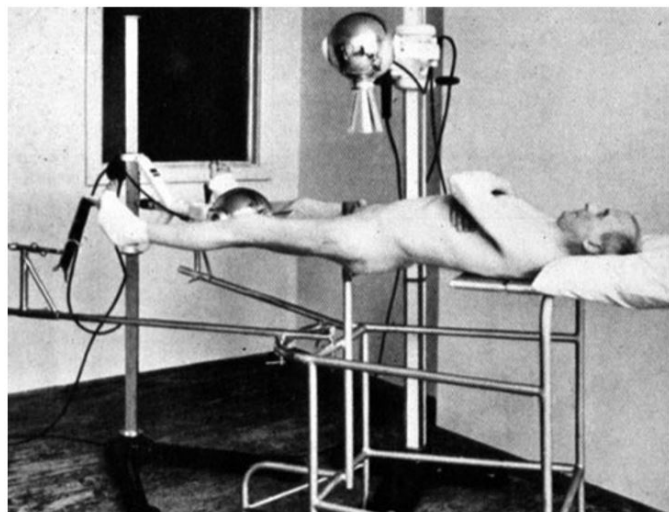


Abbildung 3 - Bildgebung mit der Röntgenkugel an einer hüftgelenknahen Fraktur [2]

Damals wurde ein Einkessel-Röntgendiagnostik-Generator, die sogenannte „Röntgenkugel“ (**Abbildung 3**) verwendet, welche als Frühform der Radiodiagnostik seit den 1930er Jahren in der Unfallchirurgie als intraoperative Bildgebung zum Einsatz kam [4]. Seither wurde die intraoperative Bildgebung fortwährend weiterentwickelt.

Ein wichtiger Schritt in diesem Prozess ist die Entwicklung und vor allem der Bau der Bildverstärkerröhre durch Coltman im Jahr 1948 [5]. Diese wurde seit den 1950er Jahren besonders für die Anwendung im OP angefertigt. Strahlungserzeuger (Röntgenquelle) und Bildempfänger (Röntgendetektor) wurden über einen C-förmigen Arm zusammengeschaltet und gekoppelt. Zusätzlich wurde dieses System an einen Bildverstärker angeschlossen, so dass eine Betrachtung am Monitor in einiger Entfernung möglich wurde. Durch die C-förmige und starre Verbindung zwischen Quelle und Detektor kann das Gerät in horizontaler und vertikaler Achse bewegt und zusätzlich noch geschwenkt werden. So können aus fast allen erdenklichen Positionen und Winkeln Röntgenaufnahmen erstellt werden. Diese Geräte lieferten zunehmend hochauflösende Bilder und Informationen in Echtzeit, sodass sich die aktuelle Situation aber auch besonders der Behandlungserfolg – etwa die Reposition der Knochen oder die Lage des eingebrachten Materials – ableiten ließen. War der Akteur, zumeist der Operierende, mit seiner Arbeit nicht zufrieden, konnten Korrekturen unmittelbar vorgenommen werden, was die Behandlungsergebnisse und vor allem die Zeit der medizinischen Behandlung der Patienten erheblich verbesserte. Im weiteren Verlauf wurde durch technische Weiterentwicklung und strengere Röntgenverordnungen die anfallende Strahlendosis für Patienten und Anwender drastisch reduziert.

Um die Jahrtausendwende wurden die ersten digitalen Durchleuchtungssysteme in Betrieb genommen. Diese sogenannten Festkörperdetektoren, auch Flat-Panel-Detektoren oder Flachbilddetektoren genannt, sind in der Lage trotz geringerer Strahlendosis hochauflösende Röntgenbilder zu generieren. Im Unterschied zu analogen Bildverstärkern, bei denen die Röntgenstrahlen nach Durchtritt durch den menschlichen Körper unterschiedlich abgeschwächt auf eine fluoreszierende Fläche treffen, welche dann dort ein mehr oder weniger starkes Leuchten auslösen, was wiederum von einer analogen Kamera aufgenommen und schlussendlich auf einem Monitor angezeigt wird, wird bei der modernen Festkörperdetektion die einfallende Intensität der Röntgenstrahlen direkt in elektrische Ladung und somit digitale Werte umgerechnet. Durch das Umgehen der unterschiedlichen Schritte über die Elektronenoptik und Möglichkeiten der Signalverzerrung entstehen digital klarere Bilder und somit ergibt sich eine bessere Bildqualität. Systembedingte Nachteile der konventionellen Bildwandler, wie Verzerrung der Bilder vor allem in den Randbereichen, der mit zunehmender Bildgröße eingeschränkte Zugang zum Patienten und die Streueffekte wurden bei Flat-Panel-Detektoren eliminiert oder reduziert [6]. Von Vorteil ist zusätzlich die gestiegene Effizienz, da das entstandene Bildmaterial digital ist und unmittelbar in

Archivierungssysteme eingespielt werden kann. Nicht lange Zeit später wurden die ersten Systeme konstruiert, die aus dem gewonnenen Bilddatensatz dreidimensionale - anfangs noch kleine, dann zunehmend größere - „Datenwürfel“ generierten und somit erstmals während einer Operation oder eines Eingriffes CT-ähnliche Bilder ermöglichten [7].

Aus diesen dreidimensionalen Bildern in Echtzeit wurden unter anderem dem Operateur wichtige Bildinformationen für die Operation oder Intervention geliefert, die es in der Qualität bisher noch nicht gegeben hatte. Aufgrund der hohen Kosten eines solchen Systems, findet deren Einsatz bisher nur in großen oder spezialisierten Zentren statt [8].

Der Hybridoperationssaal

Zentrum der modernsten intraoperativen Bildgebung bilden sogenannte Hybridoperationssäle, welche sich inzwischen in vielen größeren Kliniken etabliert haben. Ein Hybridoperationssaal (Hybrid-OP) beschreibt einen Arbeitsplatz, an dem unterschiedliche interventionelle und operative Eingriffe durchgeführt werden können [8].

Ursprünglich wurde die Integration einer Angiographieeinrichtung in einen echten Operationssaal (OP) für die Herz- und Gefäßchirurgie entwickelt. Im Besonderen bewirkte die erstmalige perkutane Implantation einer künstlichen Herzklappe durch Cribier et al. Anfang der 2000er Jahre eine Verschmelzung und Überlappung der Fachbereiche der Kardiologie, Gefäßchirurgie und Herzchirurgie [9]. Neben der Möglichkeit, digitale Subtraktionsangiographien unter sterilen Bedingungen im OP durchführen zu können, können moderne Angiographieanlagen zur dreidimensionalen Bildakquise benutzt werden. Des Weiteren können Bildfusionen mit unterschiedlichen Modalitäten durchgeführt werden.

Etwa seit Ende der 1990er Jahre wurde bereits parallel, zunächst noch außerklinisch, der Einsatz auch in anderen Gebieten, wie beispielsweise der Unfallchirurgie und Orthopädie erprobt. Die intraoperative dreidimensionale Bildgebung ist in Orthopädie und Unfallchirurgie spätestens seit der Einführung von Flachbild-C-Bögen [10] ein fester Bestandteil in der Versorgung komplexer Verletzungen wie Becken- und Wirbelsäulenfrakturen geworden [11]. Flachbild-Detektoren liefern eine deutlich höhere Bildqualität, bei gleichzeitig niedrigerer Strahlendosis, als ein herkömmlicher C-Bogen [12 - 13]. Neuere Flachbild-Detektoren sind sogar in der Lage intraoperativ sogenannte Volumentomographien oder auch „cone beam computertomographie“ (CBCT) aufzunehmen [14]. Die Erzeugung von Computertomographie-ähnlichen dreidimensionalen Bilddatensätzen ermöglicht eine zeitsparende und genaue Darstellung des Repositionsergebnisses und kann daher eine postoperative dreidimensionale Bildgebung durch CT ersetzen.

Durch die vielen Vorteile und technischen Möglichkeiten werden Hybridoperationssäle (Hybrid-OPs) mittlerweile verbreitet interdisziplinär genutzt. Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig. In der Herz- und Gefäßchirurgie werden, nicht zuletzt seit der Erstimplantation einer

minimalinvasiven Herzklappenprothese, Eingriffe im Hybrid-OP durchgeführt. Eine besondere Rolle wird dem Hybrid-OP bei verschiedenen Interventionen im gleichen Eingriff zuteil. Begleitende Koronarinterventionen, Schrittmacher- bzw., Implantierbarer-Kardioverter-Defibrillator (ICD)-Implantationen oder andere Therapien können fluoroskopisch kontrolliert vorgenommen werden, sodass für die Patienten eine komplexe kardiale Therapie einzeitig angewendet werden kann. Zudem können eventuell auftretende akute Komplikationen, wie Blutungen, akute Myokardischämien oder klappenspezifische Probleme im Hybrid-OP unter optimalen räumlichen Bedingungen chirurgisch behandelt werden [8]. Reicher et al. konnten 2008 nachweisen, dass minimalinvasive Bypass-Operationen in Kombination mit Koronarinterventionen neben einer Reduktion der perioperativen Komplikationen ein der offenen Technik vergleichbares Langzeitergebnis liefern können [15]. Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Hybrid-OPs sind für Aortenbogenchirurgie [16] und Rhythmustherapie [17] beschrieben und zeigen einmal mehr den Vorteil der modernen Bildgebung gerade unter besonderen Voraussetzungen und Anforderungen.

Außerhalb der Herz- und Gefäßchirurgie nutzen, angeregt durch die verbesserte intraoperative Bildgebung und bereits erwiesenen Erfolge, auch andere Disziplinen Hybrid-OPs. In der Neurochirurgie können Patienten mit umfassenden Gefäßerkrankungen von der intraoperativen Angiographie, insbesondere bei kombiniert mikrochirurgischen und endovaskulären Eingriffen, profitieren [18].

In der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie lassen sich unmittelbar postoperativ, noch im Operationssaal, durch Volumetomographien die Reposition und Osteosynthese bei Mittelgesichtsfrakturen darstellen. So kann bei unzufriedenstellendem OP-Ergebnis unmittelbar eine Revision erfolgen, ohne den Patienten einem weiteren Eingriff zu unterziehen. Zusätzlich kann minimalinvasiver gearbeitet werden, da häufig unnötige Explorationen der Orbita durch dreidimensionale Bildgebung vermieden werden können [8].

In der Unfallchirurgie und Orthopädie werden zunehmend Operationen und Prozeduren in minimalinvasiver Technik durchgeführt. Da bei Frakturversorgungen oder anderen Eingriffen am Knochen die makroskopische Einsicht auf die zu adressierende Struktur bei minimalinvasiver Technik fehlt, ist eine darstellende mehrdirektionale Bildgebung unerlässlich und Grundvoraussetzung für das Gelingen. Durch die dreidimensionale Darstellbarkeit eines menschlichen Beckens im Hybrid-OP können minimalinvasive Verfahren zum Beispiel bei Verletzungen des hinteren Beckenrings angewendet werden. Zusätzlich kann durch eine integrierte computergestützte Navigationstechnik [19] der anatomisch sehr komplexe Bereich des Beckens mit größerer Sicherheit und komplikationsärmer operiert werden [10].

Besonders bei einfachen Frakturen der Wirbelsäule, welche im Rahmen von Unfällen auch bei jungen, jedoch zumeist bei älteren Patienten bei vorbestehender Osteoporose auftreten, hat

sich in den letzten Jahrzehnten das chirurgische Vorgehen von offenen zu minimalinvasiven Verfahren weiterentwickelt.

Durch den Einsatz moderner bildgebender Verfahren, wie durch eine operative Versorgung im Hybrid-OP, kann bei minimalinvasiven Eingriffen an der Wirbelsäule die Qualität weiter gesteigert werden. Durch post- und vor allem inter-interventionelle Darstellung kann eine Lagekontrolle des eingebrachten Materials, vornehmlich der Pedikelschrauben, angefertigt werden und Korrekturen können unmittelbar erfolgen. Zudem ist durch die verbesserte Bildgebung und Darstellbarkeit längerer Wirbelsäulenabschnitte intraoperativ eine unkomplizierte Versorgung mehrerer Wirbelsäulensegmente möglich. Zuvor mussten bei älteren Systemen bei einer Mehretagenversorgung unterschiedliche Scans durchgeführt werden. Durch aktuelle dreidimensionale Bildgebung können bei diesen Eingriffen Zeit und Strahlendosis für alle Beteiligten eingespart werden [8].

Zielsetzung der Arbeit

In dieser Arbeit sollen minimalinvasive Operationen an der Wirbelsäule bei akuten Wirbelkörperfrakturen, welche im Hybrid-OP durchgeführt wurden, mit denen verglichen werden, welche in konventionellen Operationssälen durchgeführt wurden. Die besondere Fragestellung richtet sich an die operative Qualität durch Einsatz von intraoperativer dreidimensionaler Bildgebung verglichen mit den Operationen im konventionellen OP, in denen zweidimensionale Bildgebung zur Anwendung kommt. Zusätzlich werden die perioperativen Zeiten erfasst. Ziel ist es darzustellen, ob eine Aussage bezüglich Effizienz oder Zeitvorteilen bei einem der Verfahren möglich ist. Als minimalinvasive Operationen werden die Kyphoplastie und die perkutane dorsale Stabilisierung betrachtet. Diese Eingriffe wurden an der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein (UKSH), Campus Kiel am häufigsten im Hybrid-OP durchgeführt.

Die Operationen

In Deutschland erkranken jedes Jahr knapp 900.000 Menschen neu an Osteoporose, aktuell leben schätzungsweise 5,2 Millionen Frauen und 1,1 Millionen Männer ab 50 Jahren mit einer Osteoporose. Das bedeutet, dass jede vierte Frau und ein Mann aus 17 von dieser Krankheit betroffen sind [20]. Somit zählt die Osteoporose heutzutage zu den wichtigsten Volkskrankheiten [21]. Osteoporose ist eine Knochenerkrankung, die den Knochen in seiner Struktur dünner und poröser macht, wodurch sich das Frakturrisiko erhöht. Frakturen an der Wirbelsäule sind die häufigsten Entitäten. Es folgen Brüche der handgelenksnahen Speiche und Schenkelhalsfrakturen [22]. Die osteoporotische Wirbelsäule erfährt mit zunehmender Erkrankungsdauer Deck- oder Grundplattenimpressionsfrakturen, die unbehandelt in der Regel in unterschiedlicher Ausprägung früher oder später in einer meist progredienten Kyphosierung der Wirbelsäule enden. Gold et al. haben 2001 bereits herausgestellt, dass dieser Umstand zu zum Teil gravierenden Veränderungen außerhalb des muskuloskelettalen Systems führt (**Abbildung 4**) [23].

Eine Kyphosierung der Wirbelsäule verschiebt den Körperschwerpunkt nach vorne, wodurch es zu einer vermehrten Druckbelastung der ventralen Bereiche der Wirbelkörper kommt, was wiederum das Risiko für Anschlussfrakturen deutlich erhöht [24]. Betrachtet man die möglichen Komplikationen der osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen und deren mögliche Auswirkungen auf Lebensqualität und vor allem Lebensdauer, wird klar, wie wichtig eine adäquate Therapie ist.

Über die letzten Jahrzehnte wurden diverse therapeutische Möglichkeiten erprobt. Den gegenwärtigen Goldstandard stellen die minimalinvasiven Verfahren zur Aufrichtung eines oder mehrerer Wirbelkörper dar, führend die Kyphoplastien oder Vertebroplastien. Ziel ist die Schmerzreduktion und Stabilisierung der Wirbelsäule, um eine weitere Sinterung oder Kyphosierung zu verhindern. Zusätzlich besteht bei der Kyphoplastie im Gegensatz zur Vertebroplastie die Möglichkeit den Wirbelkörper in der Höhe wieder aufzurichten und somit das Risiko für Anschlussfrakturen zu reduzieren [21].

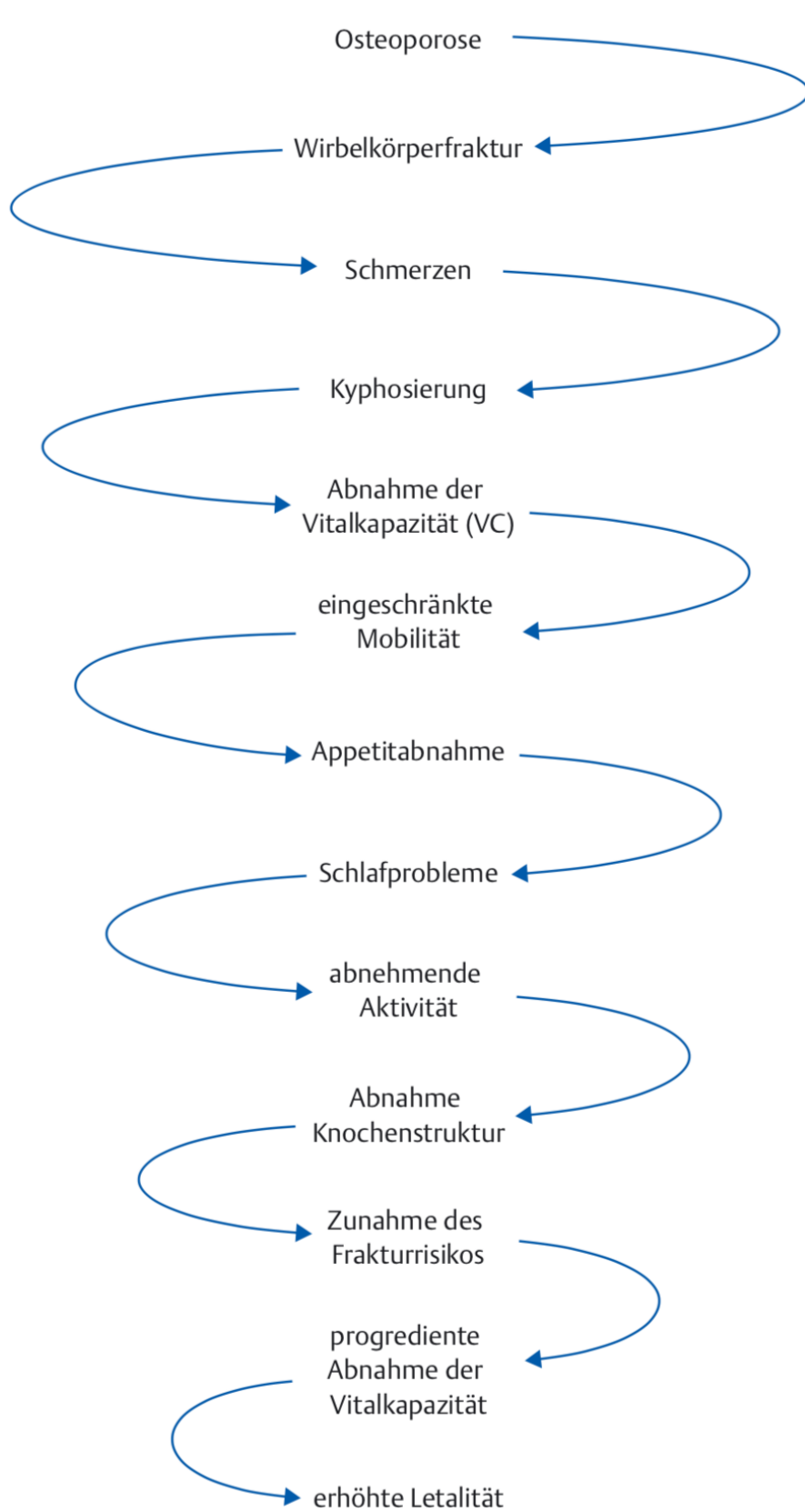


Abbildung 4 - Abwärtsspirale der Auswirkungen osteoporotischer Wirbelkörperfrakturen aus [23]

Kyphoplastie

Die Kyphoplastie ist ein minimalinvasives Verfahren, mit dem ein frakturierter Wirbelkörper in seiner Höhe aufgerichtet und mittels Zementapplikation stabilisiert werden kann. Minimalinvasiv bedeutet in diesem Falle, dass der operative Zugangsweg zum Wirbelkörper über einen kleinstmöglichen Hautschnitt erfolgt.

Zunächst wurden Wirbelkörper minimalinvasiv stabilisiert, indem man unter Bildwandler-Kontrolle trans- oder auch extrapedikulär Knochenzement in den frakturierten Wirbelkörper applizierte. Dieses Verfahren, Vertebroplastie genannt, wurde 1984 in Frankreich erstmalig zur Behandlung eines Hämangioms angewendet und im Verlauf etablierte es sich rasch auch für die operative Therapie bei osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen [25 -26]. Gegen Ende des Jahrtausends entwickelte sich ein weiteres Verfahren, um minimalinvasiv Wirbelkörper zu stabilisieren. Die sogenannte Kyphoplastie wurde in den USA entwickelt [27] und besitzt den Vorteil, dass im Gegensatz zur Vertebroplastie, Wirbelkörper in ihrer Höhe wieder aufgerichtet werden können, wodurch einer Kyphose entgegengewirkt werden kann. Hierdurch können auch die typischen allgemeinen Komplikationen suffizienter verhütet oder zumindest verzögert werden (**Abbildung 4**). Zusätzlich konnte durch die Kyphoplastie die Rate von Zementaustritten deutlich gesenkt werden. Die Bildung eines Hohlraumes durch die Balloninsufflation bewirkt, dass zum einen die Spongiosa randständig komprimiert wird und zum anderen geringere Zementapplikationsdrücke notwendig werden [21]. Dieses elegante Verfahren wurde in zahlreichen Studien der Vertebroplastie gegenübergestellt und gilt nach heutigem Forschungsstand, die Behandlung von schmerzhaften osteoporotischen Kompressionsfrakturen betreffend, als überlegenes Verfahren [28 -29].

Operationsverfahren

Die Patienten werden üblicherweise in Bauchlage auf dem Operationstisch gelagert. Die Reposition der Frakturen beziehungsweise die Wirbelkörperwiederaufrichtung gelingt teilweise schon durch entsprechende Polsterung auf dem OP Tisch. Im Anschluss wird unter Bildverstärker (BV)-Kontrolle der zu instrumentierende Wirbelkörper aufgesucht. Über eine Stichinzision kann dann mit einer Hohlzahn in den Wirbelkörper eingegangen werden und nach Lagekontrolle der Arbeitskanülen dann dünnflüssiger Zement unter ständiger Röntgenkontrolle eingebracht werden. Prinzipiell stehen mehrere Möglichkeiten der Instrumentierung zur Verfügung. Der Zugang zum Wirbelkörper kann transpedikulär oder auch extrapedikulär erfolgen. Beim transpedikulären Zugang werden unter strenger BV-Kontrolle anhand von Landmarken die Arbeitskanülen durch die jeweiligen Pedikel in die Wirbelkörper vorgeschoben. Dabei gilt es besonders darauf zu achten, nicht in den Spinalkanal einzubrechen. Möchte man extrapedikulär Zement applizieren, geht man typischerweise von lateral und mittig in den Wirbelkörper ein. Letzteren Zugang verwendet man meist bei

Operationen der Brustwirbelsäule, da hier nach kranial die Pedikel zunehmend schmaler werden. Bei der Kyphoplastie werden vor Einbringen des Zementes typischerweise bipedikulär zwei Ballone etwa mittig in den Wirbelkörper platziert und unter Fluoroskopie vorsichtig aufgedehnt (**Abbildung 5**). Wenn es sich um einen frischen Bruch handelt, kann eine Aufrichtung der Deckplatte gelingen.

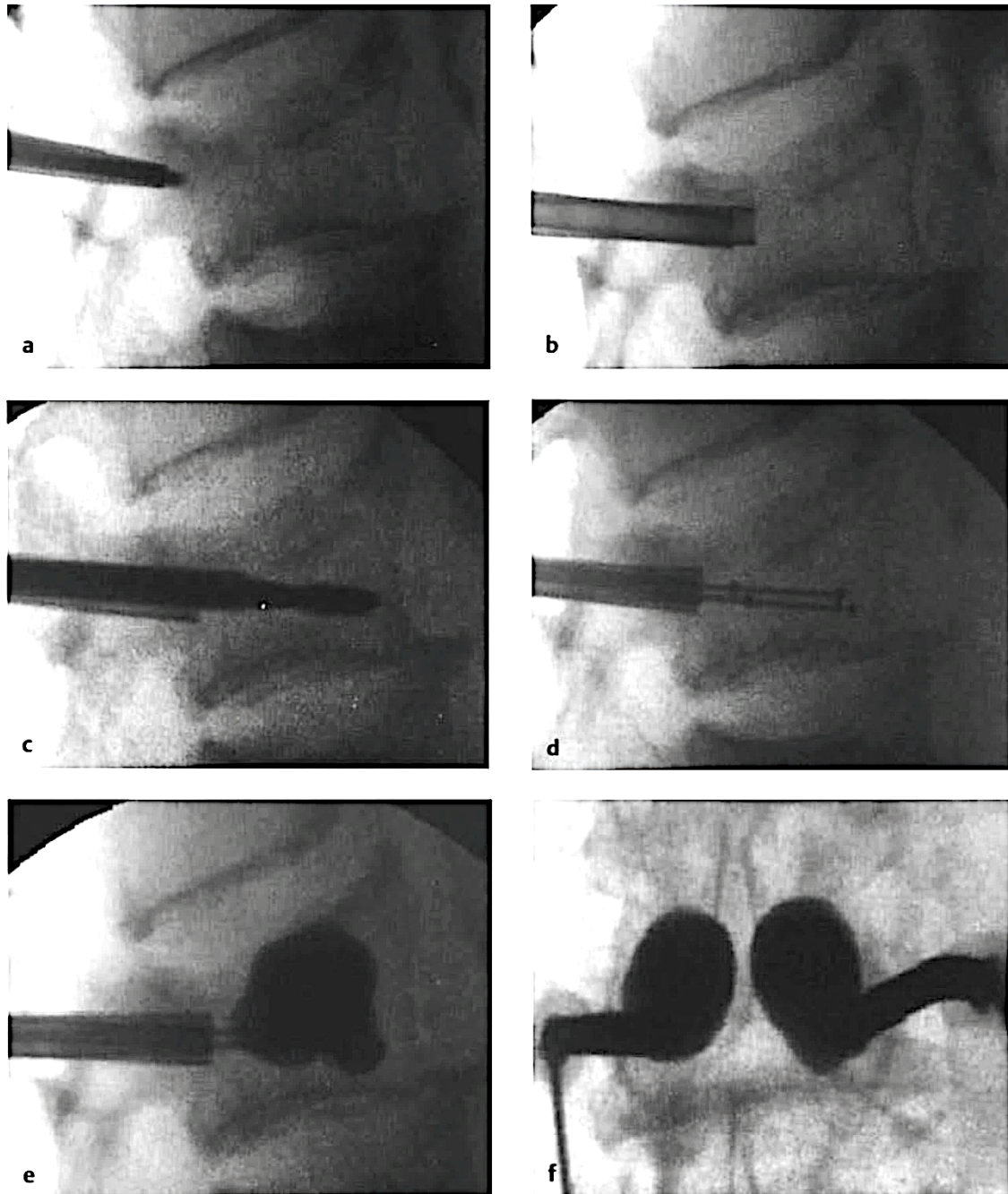


Abbildung 5 – **a-b** Einbringen der Arbeitskanülen **c** Präparation des Lagers für den Ballon mit dem Handbohrer **d** Einbringen der Ballone **e** Aufblasen der Ballone, Reposition der Deckplatte **f** Lagekontrolle der korrekten Position der Ballone im anteroposterioren Strahlengang [21]

Komplikationen

Bei der Kyphoplastie als Eingriff an der Wirbelsäule in der unmittelbaren Nähe wichtiger Strukturen, wie Nerven und Gefäßen, sind zahlreiche Komplikationen möglich. Neben zumeist asymptomatischen Komplikationen können diese Operationen aber auch fatale Folgen haben. Meist für den Patienten asymptomatisch, gilt der einfache Zementaustritt in geringen Mengen extrakorporal als häufigste Komplikation und wird in Studien zwischen 7% und 9% angegeben [30 - 31], in einigen Arbeiten sogar mit bis zu 72% angegeben [21, 32] (**Abbildung 6**). Tritt jedoch eine größere Menge Zement aus dem Wirbelkörper aus und infiltriert bzw. affiziert den Spinalkanal oder paravertebrale Gefäße, können lebensbedrohliche oder gravierende Komplikationen auftreten. In der Literatur sind unter anderem bereits permanente Querschnittslähmungen nach einer Vertebroplastie [33] oder tödlich verlaufende Lungenembolien beschrieben [34]. Schmidt-Rohlfing et al. konnten in einer Übersichtsarbeit über Vertebroplastien und Kyphoplastien die symptomatischen Zementaustritte mit rund 1% beziffern [35].

Indikationen und Kontraindikationen

Die exakte Indikationsstellung der Kypho- und auch der Vertebroplastie bleibt nach Ansicht der Leitliniengruppe des Dachverbandes Osteologie e. V. (DVO) im Einzelfall unklar [36]. Eine Kyphoplastie ist im Allgemeinen dann angezeigt, wenn eine akute oder zumindest subakute Kompressions- oder Impressionsfraktur eines Wirbelkörpers vorliegt, die parallel mit Schmerzen einhergeht. Zusätzlich ist eine operative Versorgung dann indiziert, wenn sich eine frakturbedingte Kyphose von mindestens 20° zeigt oder ein Wirbelkörper auf weniger als etwa 70% seiner ursprünglichen Höhe zusammengesintert ist [21]. Manche Autoren empfehlen eine operative Versorgung bei Frakturen mehrerer Etagen, da hier unbehandelt mit einer entsprechend stärkeren Kyphosierung im Verlauf zu rechnen ist [21]. Besondere Vorsicht ist bei instabilen Frakturen oder solchen mit Beteiligung der Hinterkante geboten, da eine erhöhte Gefahr des Zementabflusses besteht. Allgemein gültig, bestehen Kontraindikationen für alte oder bereits knöchern verheilte Frakturen, bei aktiver bakterieller Infektion des zu adressierenden Wirbelsäulensegmentes oder systemischen Infektionen. [21]

Wägt man die Indikationen und Kontraindikationen mit den generellen und interindividuellen Risiken und dem Beschwerdebild der Patienten ab, kann eine Versorgung mittels Kyphoplastie nicht nur ein elegantes Verfahren zur Wiederaufrichtung eines Wirbelkörpers und zur Schmerzreduktion sein, sondern auch ein Werkzeug, um die Lebensqualität und vor allem

Lebensdauer durch Verhütung von Spätfolgen der unbehandelten osteoporotischen Kompressionsfrakturen darzustellen.

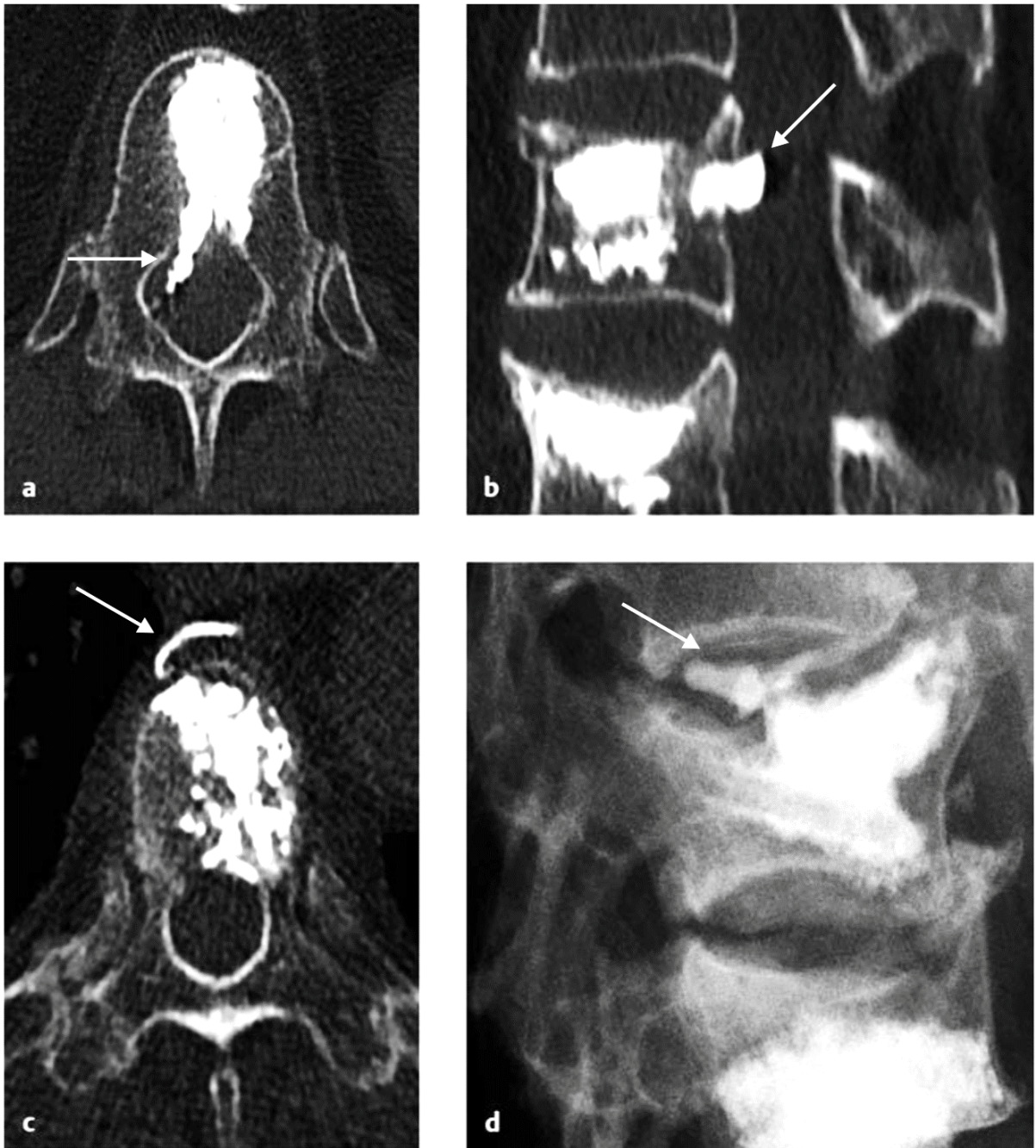


Abbildung6 – Zementaustritt a – b nach intraspinal, c in den paravertebralen Venenplexus und d in das Bandscheibenfach, aus [21]

Perkutane dorsale Stabilisierung

Unter perkutaner dorsaler Stabilisierung versteht man das Einbringen eines Schrauben-Stab-Systems zur Stabilisierung der Wirbelsäule, welche durch ein minimalinvasives oder konventionell offenes Verfahren geschehen kann. Als Indikationen für eine dorsale Stabilisierung mittels dieses sog. Fixateurs interne gelten vor allem traumatische Wirbelkörperfrakturen, bei denen aufgrund der Morphologie eine Operationsindikation besteht sowie osteoporotische Wirbelkörperfrakturen [37]. Im Bereich der elektiven Chirurgie wird die dorsale Stabilisierung bei degenerativen oder posttraumatischen Deformitäten oder Spondylolisthesis angewendet.

Das minimalinvasive Verfahren unterliegt einigen Limitationen. Luxations- und Rotationsverletzungen treten oft langstreckig auf, sodass eine geschlossene Reposition unter Umständen nicht ausreichend möglich ist und eine offene Schraubeninsertion angezeigt ist. Bei höhergradigen, traumatischen Kyphosen mit Achsabweichungen in koronarer Ebene wird ein offenes Vorgehen insbesondere bei Vorliegen einer Neurologie favorisiert, da häufig die Notwendigkeit zur zusätzlichen spinalen Dekompression gegeben ist [38]. Zudem wird aufgrund der Indikation zur Rebalancierung in der Regel bei ausgeprägten Deformierungen und Skoliosen ein offenes Vorgehen bevorzugt. Je nach Erfahrung des Operateurs und bei ausreichender Reposition durch Lagerung oder indirekter Repositionstechniken kann das Indikationsspektrum für das minimalinvasive Verfahren deutlich erweitert werden [37].

Operationsverfahren

Der Patient wird in Bauchlage gelagert, hierdurch kann die Fraktur durch entsprechende Unterpolsterung des Beckens und des Thorax (ventraler Aushang) indirekt reponiert werden (**Abbildung7**).

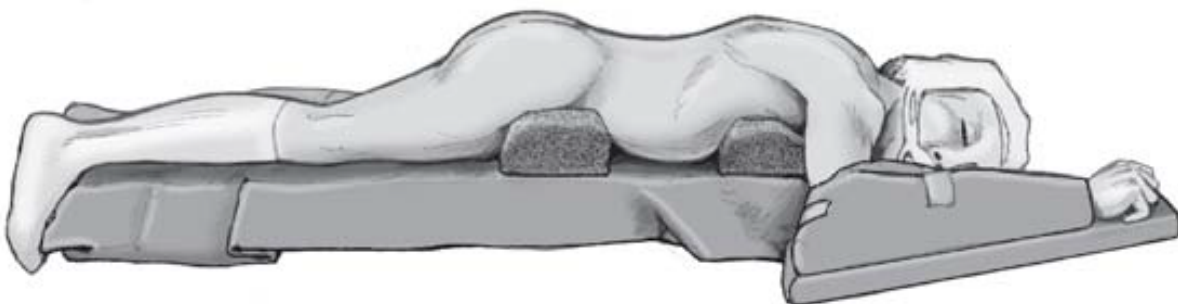


Abbildung 7 - Bauchlagerung des Patienten auf dem OP-Tisch [39]

Unter Röntgenkontrolle im anterior-posterioren Strahlengang werden die zu instrumentierenden Pedikel aufgesucht und etwas lateral zu der Position auf gleicher Höhe kleine, längs verlaufende Hautschnitte angelegt. Über diese Hautschnitte werden

Arbeitstrokare (Yamshidi-Nadeln) unter strenger radiologischer Kontrolle in zwingend zwei Ebenen bis in den Wirbelkörper transpedikulär vorgeschoben. Im Anschluss werden durch die Hohladeln Kirschner-Drähte bis zu der Position eingebracht, an die die spätere Pedikelschraube reichen soll. Nach Entfernung der Trokare unter Belassen der Kirschner-Drähte an Ort und Stelle werden BV-kontrolliert die Schrauben in die gewünschte und zuvor bestimmte Position eingeschraubt. Sodann werden die Drähte retrahiert und die Länge der längsverbindenden Stäbe bestimmt. Diese parallel zueinander liegenden Längsstäbe werden ebenfalls perkutan durch einen neuen Zugang subfaszial eingebracht, wobei darauf zu achten ist, sämtliche Schraubenköpfe aufzufädeln (**Abbildung 8**). Bei korrekter Lage wird das Schrauben-Stab-System arretiert und die Operation mit Wundverschluss beendet. [39]

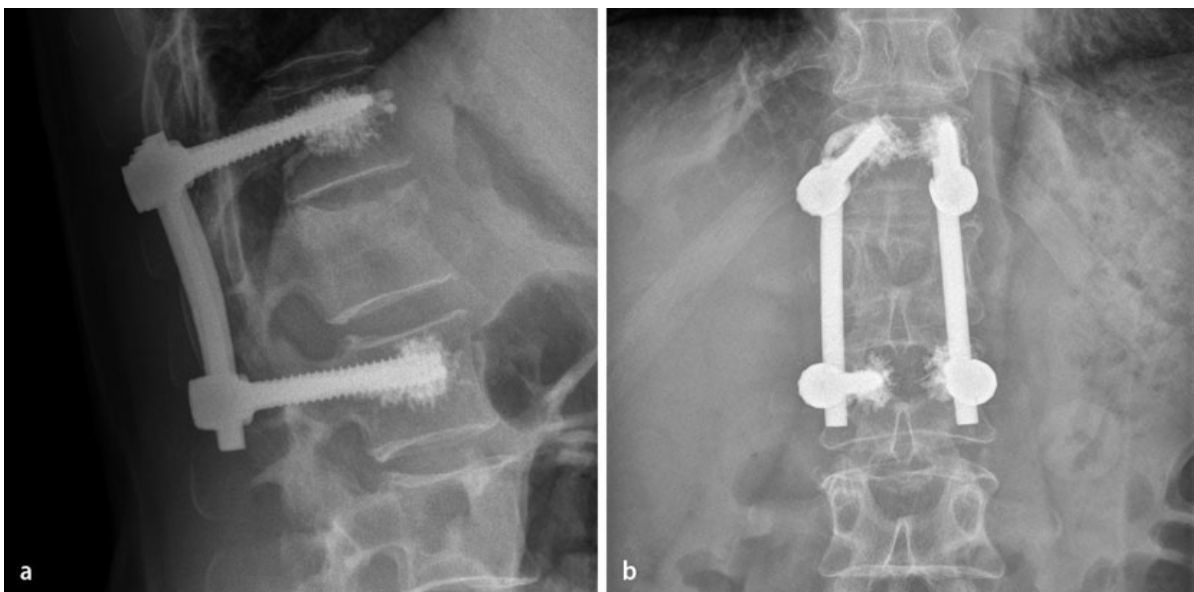


Abbildung 8 – **a** seitliche und **b** anterior-posteriore Ansicht eines korrekt implantierten dorsalen Schrauben-Stab-Systems (Fixateur interne). Zum besseren Halt wurden die Schrauben mit Zement augmentiert, aus [40]

Komplikationen

Eine der häufigsten Komplikationen dieses Eingriffes stellt die Schraubenfehlage dar. Diese wird in der Literatur mit einer Häufigkeit zwischen 2,2 % [41] und 6 % [42] für die perkutane Stabilisierung angegeben. Eine gefürchtete Komplikation ist die Kirschner-Draht-Perforation durch die ventrale Wirbelkörperkante mit möglicher Verletzung der großen Gefäße. Im Weiteren können übliche Komplikationen nach chirurgischem Eingriff oder bei Frakturosteosynthesen auftreten. Hier sind vor allem die Wundheilungsstörung, Implantatlockerung oder Pseudarthrosenbildung zu nennen [38].

Material und Methoden

Alle beschriebenen Untersuchungen am Menschen wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (AZ: D 530/18) gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen und überarbeiteten Fassung) durchgeführt.

Der Hybridoperationssaal am UKSH Kiel

Am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein (UKSH) Campus Kiel wurde im Jahr 2014 ein sogenannter Hybridoperationssaal eingerichtet (**Abbildung 9**). Die Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie erhielt im Operationssplan des Zentrums ab 2015 Kapazität, an einem Tag pro Woche unfallchirurgische und orthopädische Eingriffe im Hybrid-OP vorzunehmen. In diesem Rahmen wurden zahlreiche und verschiedenste Operationen durchgeführt. Der Hybrid-OP misst 65 Quadratmeter und ist mit zwei deckengebundene Monitorsystemen an beiden Seiten des OP-Tisches, sowie verschiedenen ebenfalls deckengebundene Versorgungseinheiten für Anästhesie und Chirurgie und verschiedenen OP-Leuchten ausgestattet. Im Operationssaal ist zudem eine deckenmontierte Philips AlluraXper FD20 Anlage mit FlexMove Deckenschienensystem

A



B



C



Abbildung 9 – A-C Aufnahmen aus Hybrid-OP des UKSH Kiel

(AlluraXper FD20 mit FlexMove; Fa. Philips, Best, Niederlande) und Maquet Magnus OP-Tisch

(Magnus; Fa. Maquet, Rastatt, Deutschland) mit voll durchstrahlbarer Carbon-Lagerfläche installiert, der bei Bedarf auch mit einer Universal-Lagerfläche betrieben werden kann.

Der C-Bogen (Fa. Philips, Best, Niederlande) besitzt einen Flat-Panel-Detektor mit einer Abmessung von 30x 40 cm, der in seiner Orientierung um 90° geschwenkt und so steril vom Operateur um den OP-Tisch herumbewegt werden kann.

Die im OP angebrachten beiden deckenmontierten Monitorhalterungen dienen sowohl der Darstellung der intraoperativ angefertigten Röntgenaufnahmen, als auch der Anzeige anderer Daten aus dem Klinikinformationssystem oder Picture Archiving and Communication System (PACS). Die Monitorsysteme werden aus einer mit unterschiedlichen Bildsignalen verschaltbaren Viererampel und einem 56-Zoll-Großbildschirm (FlexVision) gebildet. Dies ermöglicht die Zuschaltung und flexible Bildanordnung aus bis zu 16 verschiedenen Bildsignalen. Standardmäßig werden auf dem Großmonitor sowohl das Live-Bild, als auch das Referenzbild des Allura-Systems abgebildet. Zusätzlich werden bei unfallchirurgischen und orthopädischen Eingriffen die 3D-Arbeitsstation (XtraVision) sowie je nach Bedarf die Anzeige aus dem PACS und weiterer Informations- oder Überwachungssysteme aufgeschaltet.

In einem separaten durch eine Glasscheibe abgetrennten Kontroll- oder Schaltraum befinden sich die notwendigen Eingabesysteme für das Patientenmanagement, die Befundung, die Arbeitsstation für die 3D-Rekonstruktion und außerdem die Bildfusion-Tools der Anlage. Die intraoperative Bedienung dieser Systeme erfolgt durch ein zustellbares Steuerungselement, das steril abgedeckt und so während der Eingriffe vom Operateur oder der Assistenz genutzt werden kann. Der Schaltraum misst ca. 8m² und verfügt über das Bild- und Patientenmanagementsystem sowie die 3D Arbeitsstation der AlluraXper FD20 Anlage.

Für die unfallchirurgischen Eingriffe am Becken und die in dieser Untersuchung genauer betrachteten Operationen an der Wirbelsäule wurde ein 3D Protokoll genutzt, bei dem ein sogenannter Roll-Scan verwendet wurde. Dabei wird der C-Bogen seitlich um den OP-Tisch herumgeführt und die zu betrachtende Anatomie in das Isozentrum des C-Bogens positioniert. Die verwendete Rotationsgeschwindigkeit liegt bei ca. 30° pro Sekunde. Inklusive Anfahrt und Abbremsen beträgt die Rotationszeit ca. 8 Sekunden. Während dieser Zeit werden in äquidistanten Winkelabständen 230 Einzelaufnahmen über einen Winkelbereich von ca. 190° aufgenommen, die dann vom 3D-Rechner zu einem Volumendatensatz rekonstruiert werden.

Diese Volumentomographie wird mit dem sogenannten „Cone-Beam CT“ (CBCT, Philips Eigenname z. B. XperCT für Niedrigkontrast- und 3DRA für Hochkontrastdarstellung) angefertigt. Die räumliche Auflösung eines CBCT beträgt bei der AlluraXper FD20 Anlage je nach Aufnahmeprotokoll zwischen 0,07 mm (Philips-VascoCT) und 0,6mm (Philips-XperCT).

Die Kontrastauflösung liegt zwischen 5 Hounsfield-Einheiten (XperCT) und 70 Hounsfield-Einheiten (3DRA). Zwischen unterschiedlichen Akquisitionsmodi mit verschiedener Kontrastauflösung, räumlicher Auflösung und Dosis kann je nach Anwendungsgebiet gewählt werden. Die applizierte Dosis hängt aber auch von der Rotationszeit des C-Bogens und der Pulsrate während des Scans ab. Diese können zwischen 4 und 20 Sekunden bzw. zwischen 15 und 60 Bildern in der Sekunde liegen.

In Ergänzung zum Mehrschicht-Scan kann zusätzlich am Touchscreen der Anlage direkt im Operationssaal das Hochkontrastprogramm (3DRA) aktiviert werden. Hiermit lässt sich Gewebe mit hohem Kontrast, wie beispielsweise an Knochen-Weichteil-Grenzen, strahlendosis-sparend darstellen. Bei diesem 3DRA sind die Einstellungen des Bildwandlers so abgestimmt, dass eine hohe räumliche aber niedrige Kontrastauflösung entsteht. So kann insbesondere bei der Darstellung knöcherner Strukturen die Strahlendosis reduziert werden. Die Bildverstärkerröhre liefert in Abhängigkeit von Objektdichte und Absorption in diesem Protokoll mit einer Pulslänge von 5 ms zwischen 50 und 125 kV, sowie zwischen 50 und 110 mA. Das Besondere an dem Protokoll ist die vollautomatische Justierung der Strahlendosis, um eine optimale Belichtung und entsprechende Abbildung am Monitor zu erzielen. Somit leistet das Programm eine Bildqualität, welche im direkten Vergleich zu CBCT Aufnahmen mittels konventioneller C-Bögen deutlich besser ist [43]. Für die optimale Darstellung eines Objektes muss dieses ins Isozentrum der Anlage sowohl in anterior-posteriorer, als auch in seitlicher Position gebracht werden. Sodann können Anfangs- und Endpunkt des Scans festgelegt werden. Hierfür werden diese beiden Positionen zwischengespeichert. Zunächst wird dann ein Probelauf durchgeführt, bei dem der Kollisionsschutz aktiviert ist. Der Kollisionsschutz verhindert, dass Patient oder Tisch zu Schaden kommen, sollte eine Bewegung der Anlage zwischen Start- und Endpunkt mit einem der beiden kollidieren. Eventuelle Hindernisse oder Hemmnisse können beseitigt werden, sodass eine Rotation des C-Bogens ungestört ablaufen kann. Stellt man fest, dass der C-Bogen sich frei um den Tisch und vor allem das zuvor bestimmte Isozentrum herumbewegt, kann der eigentliche Scan gestartet werden. Die Scanzeit an sich ist im Vergleich zu den herkömmlichen mobilen und bodengebundenen C-Bögen deutlich schneller, da die Rotationsbewegungen des deckenmontierten C-Armes bei deaktiviertem Kollisionsschutz stabiler sind und höhere Kräfte, sowie entsprechend schnellere Bewegungen zulässt. In wenigen Sekunden erhält man aus dem gewonnenen Bildmaterial die errechnete 3D-Rekonstruktion im Multiple Provider Router-Format (MPR-Format) (**Abbildung 10**).

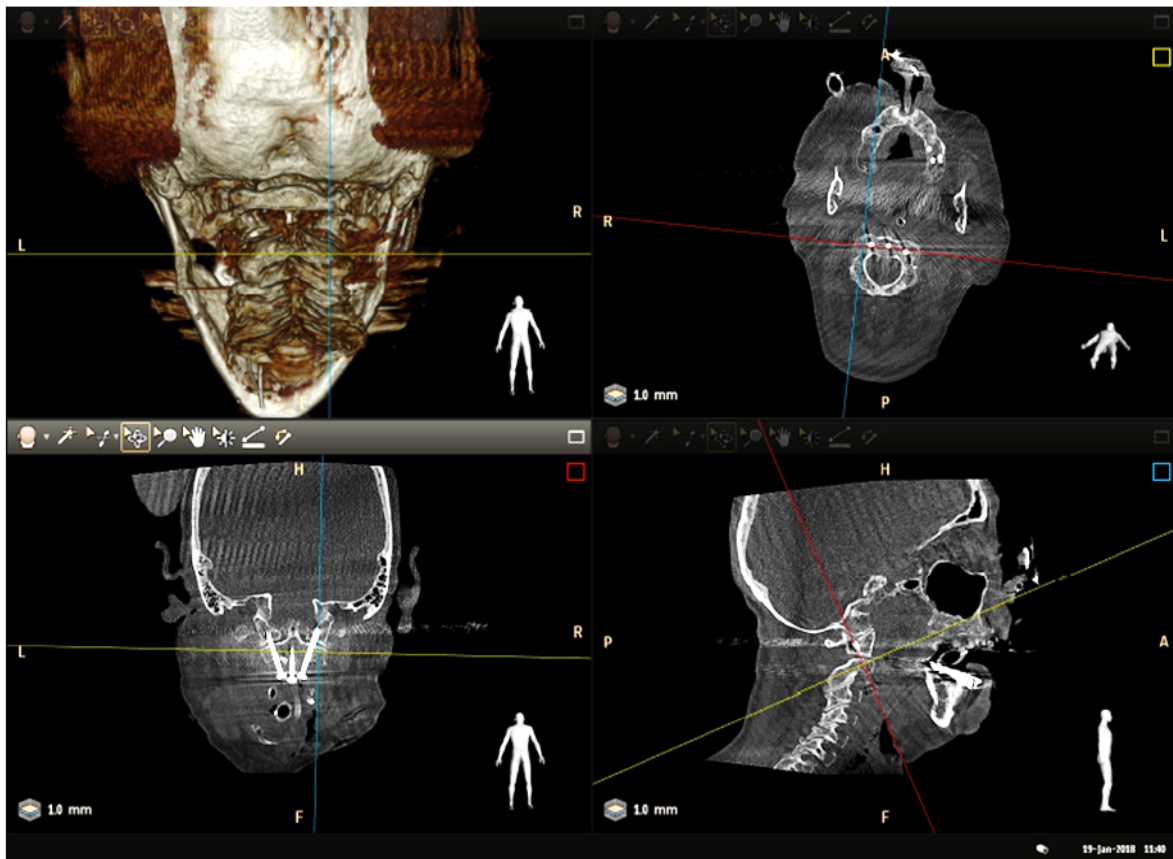


Abbildung 10 – Intraoperative computertomographische Darstellung einer atlantoaxialen Schraubenosteosynthese

Einschlusskriterien

In der vorliegenden Arbeit wurden minimalinvasive Eingriffe an der Wirbelsäule in den Jahren 2015 bis 2018 aufgearbeitet. Verglichen werden Operationen aus dem Hybrid-OP mit Eingriffen aus dem regulären Operationsprogramm außerhalb des Hybrid-OPs. Hierfür wurden zwei Gruppen gebildet und jede Gruppe besteht aus zwei Kohorten, welche die Patienten nach dem Ort des Eingriffs trennt.

Die eine Gruppe setzt sich aus Patienten zusammen, die durch ein minimalinvasives Verfahren von dorsal durch einen Fixateur interne stabilisiert wurden. Die Fixierung wurde durch ein Schrauben-Stab-System perkutan durchgeführt. Die Gruppe der dorsalen Stabilisierungen besteht aus zwei Patientenkohorten. Eine Kohorte wurde im Hybridoperationssaal mit der Möglichkeit der intraoperativen dreidimensionalen Bildgebung operiert. Patienten aus der anderen Kohorte wurden in regulären Operationssälen ohne dreidimensionale, sondern mit klassischer zweidimensionaler Bildgebung operiert.

Die andere Gruppe setzt sich aus allen Patienten zusammen, die sich einer Kyphoplastie-Prozedur unterzogen haben. Aufgeteilt wird diese Gruppe ebenfalls in eine Kohorte aus dem Hybrid-OP und eine Kohorte aus dem konventionellen OP.

In beide Gruppen eingeschlossen wurden alle volljährigen Patienten, an denen lediglich eine oben beschriebene Operation durchgeführt wurde. Hierbei wird die minimalinvasive dorsale Stabilisierung eines oder auch mehrerer, jedoch zusammenhängender Wirbelkörpersegmente definiert. Ebenso durften eine oder auch mehrere zusammenhängende Wirbelkörper mittels Kyphoplastie versorgt werden.

Ausschlusskriterien

Die Ausschlusskriterien werden durch die Einschlusskriterien bedingt. Ausgeschlossen wurden alle Patienten, die sich nicht einer minimalinvasiven dorsalen Stabilisierung oder einer Kyphoplastie durch das Team der Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein unterzogen haben. Zusätzlich wurden jene Patienten ausgeschlossen, bei denen zwar eine der oben genannten Eingriffe durchgeführt wurde, jedoch auch in selber Sitzung eine andere Prozedur oder Eingriff durchgeführt wurde. Jeder Patient, der durch eine nicht mehr minimalinvasive, sondern offene Operation dorsal stabilisiert wurde, durfte ebenfalls nicht mehr eingeschlossen werden. Kam es intraoperativ zum Verfahrenswechsel von minimalinvasiv zu offen, wurden jene Patienten auch ausgeschlossen.

Ergebnisse

Epidemiologie

Im untersuchten Zeitraum in den Jahren 2015 bis 2018 wurden in der Abteilung Unfallchirurgie und Orthopädie am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein Campus Kiel insgesamt 266 minimalinvasive Eingriffe an der Wirbelsäule durchgeführt. Diese 266 Operationen teilen sich in 72 Kyphoplastien und 194 dorsale Stabilisierungen auf. 66 Kyphoplastien wurden im konventionellen OP und 6 im Hybrid-OP vorgenommen. Diese Patienten bilden die erste Gruppe. Von den 194 perkutanen dorsalen Stabilisierungen wurden 175 im konventionellen und 19 im Hybrid-OP ausgeführt. Diese Patienten bilden die zweite Gruppe. Innerhalb der Gruppen werden zwei Kohorten nach dem Ort der Operation - Hybrid-OP und konventioneller OP - gebildet. Im Folgenden werden nun die beiden Patientengruppen genauer betrachtet und in Bezug auf epidemiologische Eigenschaften – das Patientenalter zum Zeitpunkt der Operation und das Patientengeschlecht – verglichen.

Gruppe Kyphoplastie

Die erste Kohorte der ersten Gruppe besteht aus den Patienten, welche eine Kyphoplastie im konventionellen OP erhalten haben. Diese 66 Patienten verteilen sich auf 14 Männer und 52 Frauen (**Abbildung 11**). Dies entspricht einem Verhältnis Männer zu Frauen von 1 zu 3,71. Es wurden demnach nahezu viermal mehr Frauen operiert als Männer.

Geschlechterverteilung Kyphoplastien

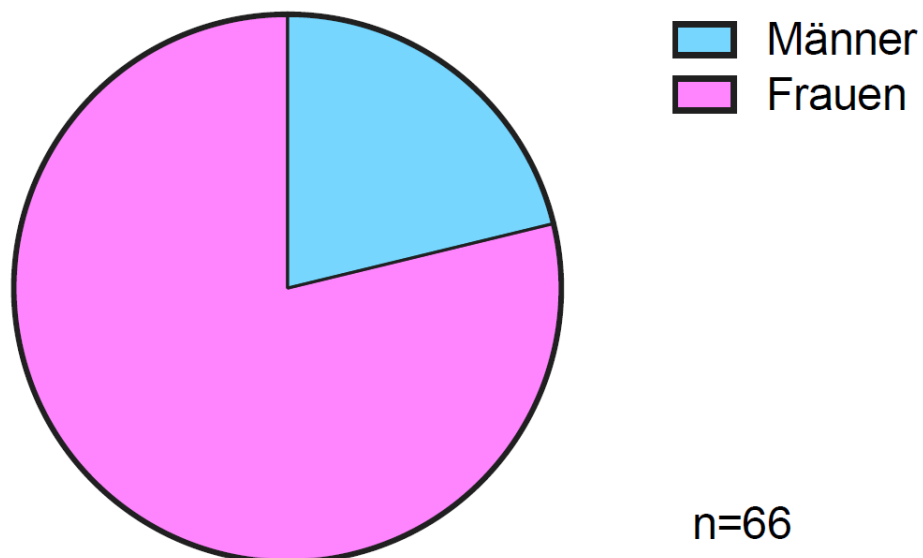


Abbildung 11 – Geschlechterverteilung Kyphoplastien aus dem konventionellen OP

Das Durchschnittsalter eines Patienten, bei dem im herkömmlichen OP eine Kyhoplastie vorgenommen wurde, beträgt 75,6 Jahre. Betrachtet man nun das Alter der Männer und Frauen getrennt, so ergibt sich ein Durchschnittsalter für Männer von 72,5 Jahren und von 76,4 Jahren bei den Frauen (**Abbildung 12**). Männer dieser Kohorte sind also durchschnittlich 3,9 Jahre jünger, wenn sie eine Kyhoplastie an der Wirbelsäule erleben.

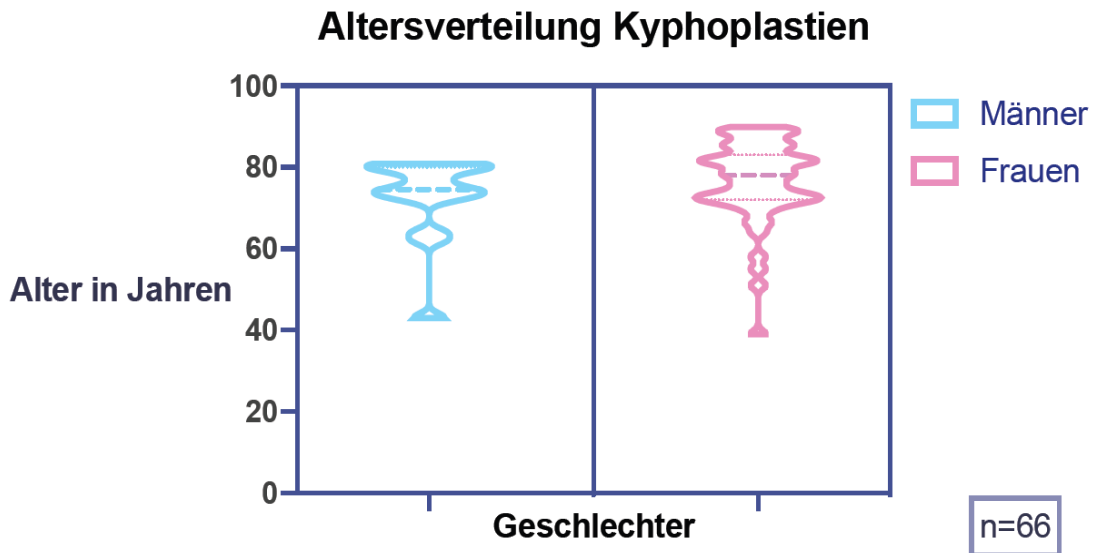


Abbildung 12 - Altersverteilung der Kyhoplastien aus dem konventionellen OP

Vergleichend zeigt sich das Durchschnittsalter aller Patienten mit einer Kyhoplastie aus dem Hybrid-OP mit 75 Jahren nur unwesentlich niedriger. Diese zweite Kohorte besteht aus sechs Patienten (fünf Frauen und einem Mann) (**Abbildung 13**).

Geschlechterverteilung Kyhoplastien Hybrid-OP

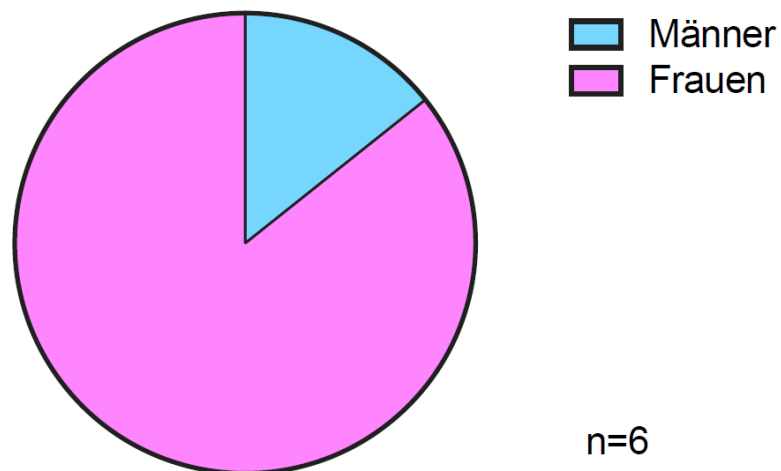


Abbildung 13 Geschlechterverteilung der Kyhoplastien aus dem Hybrid-OP

Die Frauen waren im Durchschnitt 76 Jahre alt, der einzige Mann 70 (**Abbildung 14**). Hier zeigt sich die gleiche Tendenz wie im konventionellen OP. Die Frauen waren zum Zeitpunkt der Operation im Mittel sechs Jahre jünger als der männliche Patient.

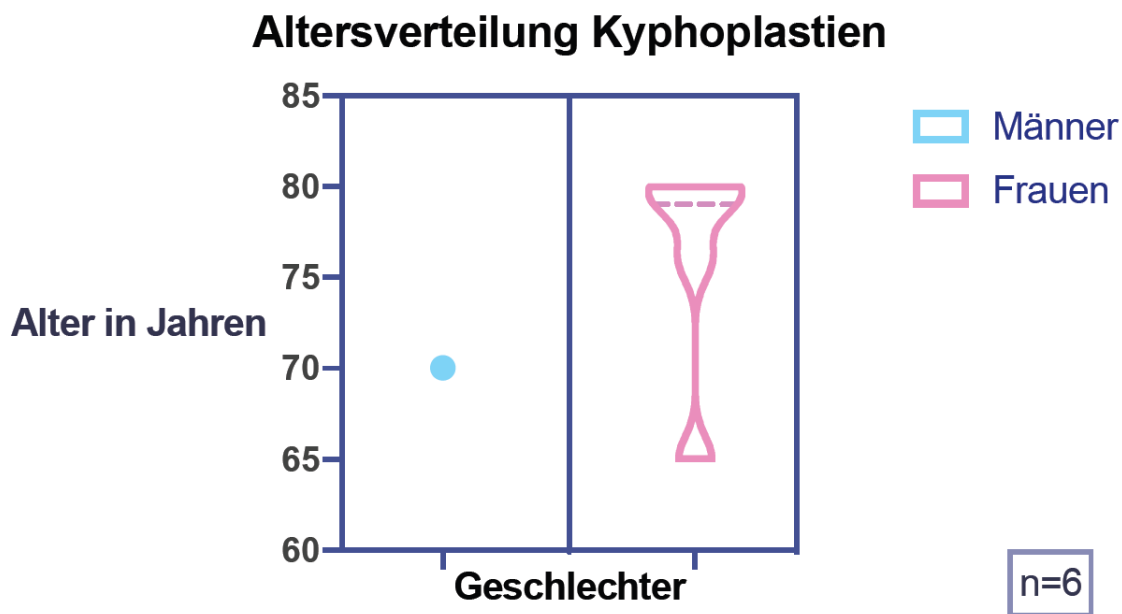


Abbildung 14 – Altersverteilung der Kyphoplastien aus dem konventionellen OP

Gruppe Fixateur interne

Das Patientenkollektiv aus dem konventionellen OP, das eine minimalinvasive dorsale Stabilisierung, einen sogenannten Fixateur interne implantiert bekommen hat, besteht aus 89 männlichen Patienten und 86 weiblichen Patienten. Somit ist das Geschlechterverhältnis männlich zu weiblich mit 1,03 zu 1 ausgeglichen (**Abbildung 15**).

Geschlechterverteilung Fixateur Interne

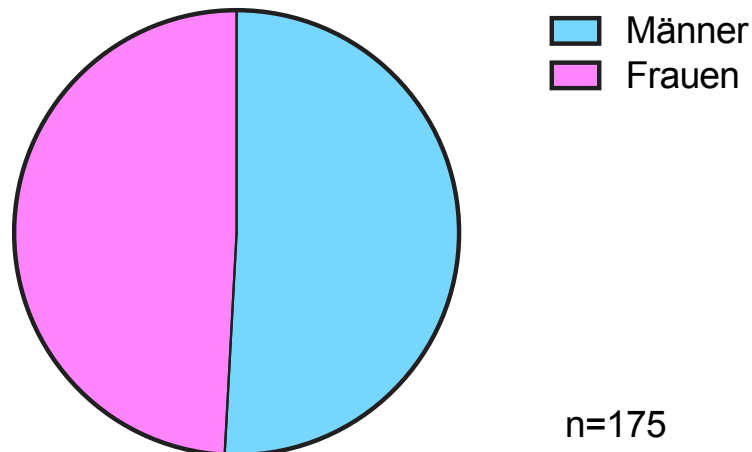


Abbildung 15 – Geschlechterverteilung Fixateur Interne aus dem konventionellen OP

Bei dieser Patientenkohorte lag das Durchschnittsalter bei knapp unter 60 Jahren (59,5). Männer waren im Mittel 56,8 Jahre alt. Frauen waren mit 62,3 Jahren zum Zeitpunkt der Operation entsprechend etwas älter als die Männer und das Durchschnittsalter (**Abbildung 16**).

Altersverteilung Fixateur Interne

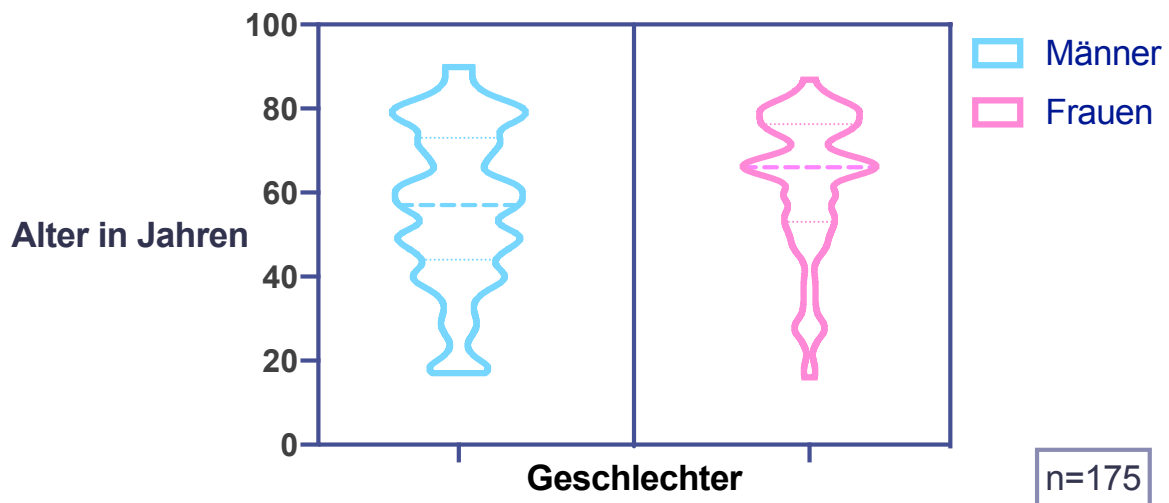


Abbildung 16 – Altersverteilung der Kohorte Fixateur Interne aus dem konventionellen OP

Die Patientenkohorte, die vergleichend hierzu im Hybrid-OP eine minimalinvasive dorsale Stabilisierung erhalten hat, besteht aus 19 Patientinnen und Patienten. Acht Männer und elf Frauen unterzogen sich dieser Prozedur im Hybrid-OP (**Abbildung 17**).

Geschlechterverteilung Fixateur Interne Hybrid-OP

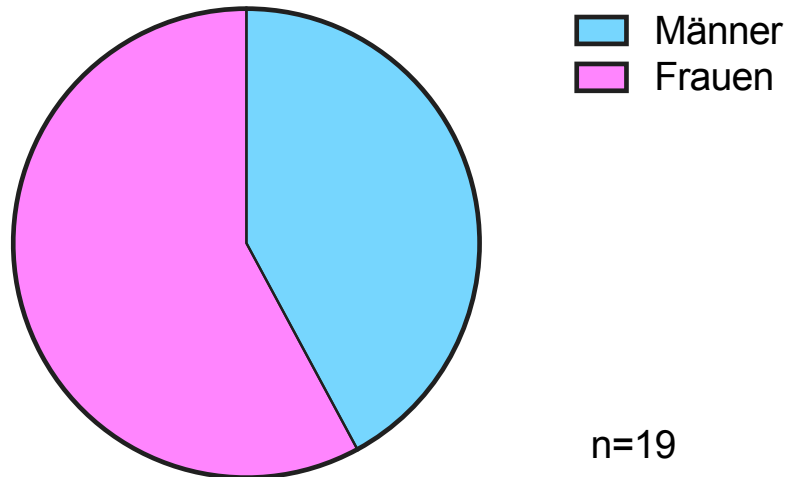


Abbildung 17 – Geschlechterverteilung der Patienten mit dorsaler Stabilisierung aus dem Hybrid-OP

Wie **Abbildung 18** zeigt, liegt das Durchschnittsalter der Männer, die mit einem Fixateur Interne versorgt wurden bei 69,5 Jahren. Frauen wurden etwas jünger operiert, das Durchschnittsalter beträgt 64 Jahre. Somit waren Frauen zum Zeitpunkt der Operation fünfeinhalb Jahre jünger als die männlichen Patienten. Das Gesamtdurchschnittsalter lag bei 66,4 Jahren.

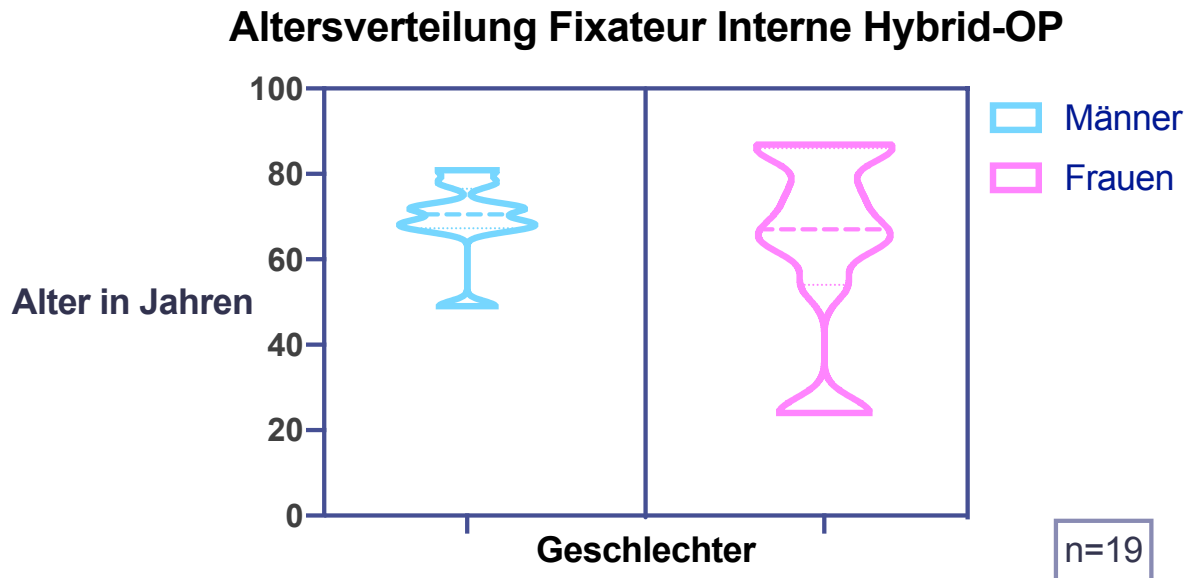


Abbildung 18 – Altersverteilung der Kohorte der dorsalen Stabilisierung aus dem Hybrid-OP

Operations-assoziierte Zeiten

Bei den durchgeführten Operationen, sowohl bei den Kyphoplastien, als auch bei den minimalinvasiven dorsalen Stabilisierungen, wurden Operations-assoziierte Zeiten untersucht und ausgewertet.

Kyphoplastien

Im Folgenden werden zunächst die Zeiten verschiedener Prozesse der Operationen für die Kyphoplastien angegeben. Bei Patienten, die im konventionellen OP operiert wurden, beträgt die Patientenbindungszeit 136 ± 33 min. Die Patientenbindungszeit beschreibt das zeitliche Intervall von Beginn der Übernahme des Patienten durch das OP Personal bis zur Übergabe postoperativ in den Aufwachraum. Im unmittelbaren Vergleich dauerte die Patientenbindung im Hybrid-OP bei Kyphoplastien mit 133 ± 23 min etwas kürzer als im konventionellen OP. Für chirurgische Maßnahmen, wie Lagerung und Vorbereitung der Patienten auf dem OP-Tisch, wurden im konventionellen OP im Mittel 87 ± 29 min benötigt – im Hybrid-OP nur 81 ± 14 min, also ebenfalls einige Minuten weniger.

Durchschnittlich dauerte die reine Operation einer Kyphoplastie, also die Zeit von Hautschnitt bis zur Wundnaht, im konventionellen OP mit 44 ± 18 Minuten erneut etwas länger als im Hybrid-OP mit 41 ± 5 min.

Sogar die Anästhesiezeit, jene Zeit, die die Anästhesie für Einleitung und Narkose benötigte, dauerte mit 123 ± 63 Minuten im konventionellen OP etwas länger als die durchschnittlich 119 ± 19 Minuten aus dem Hybrid-OP (**Abbildung 19 und 20**).

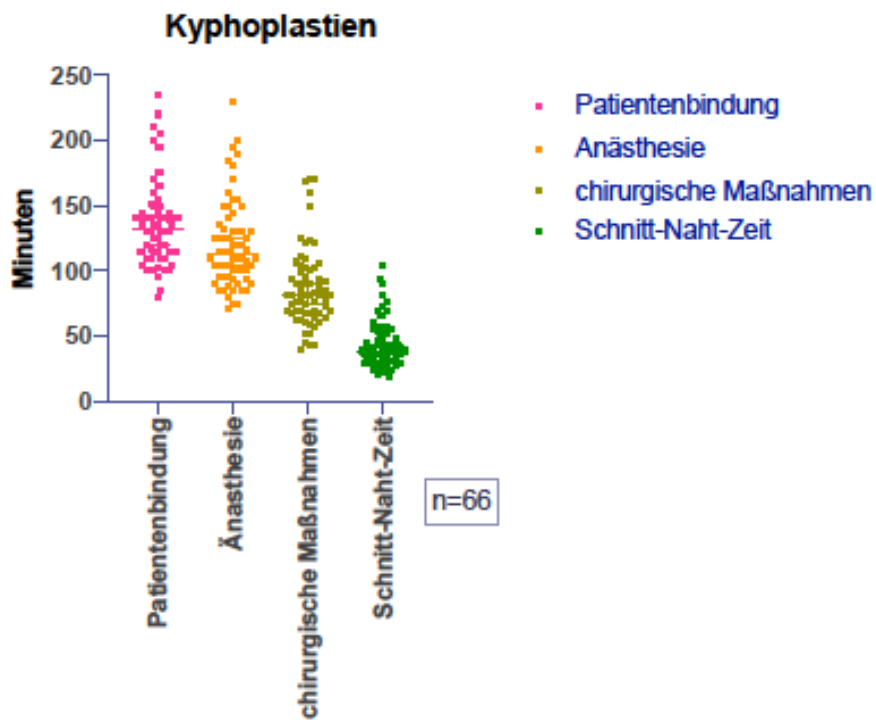


Abbildung 19 - Operationszeiten für Kyphoplastien aus dem konventionellen OP

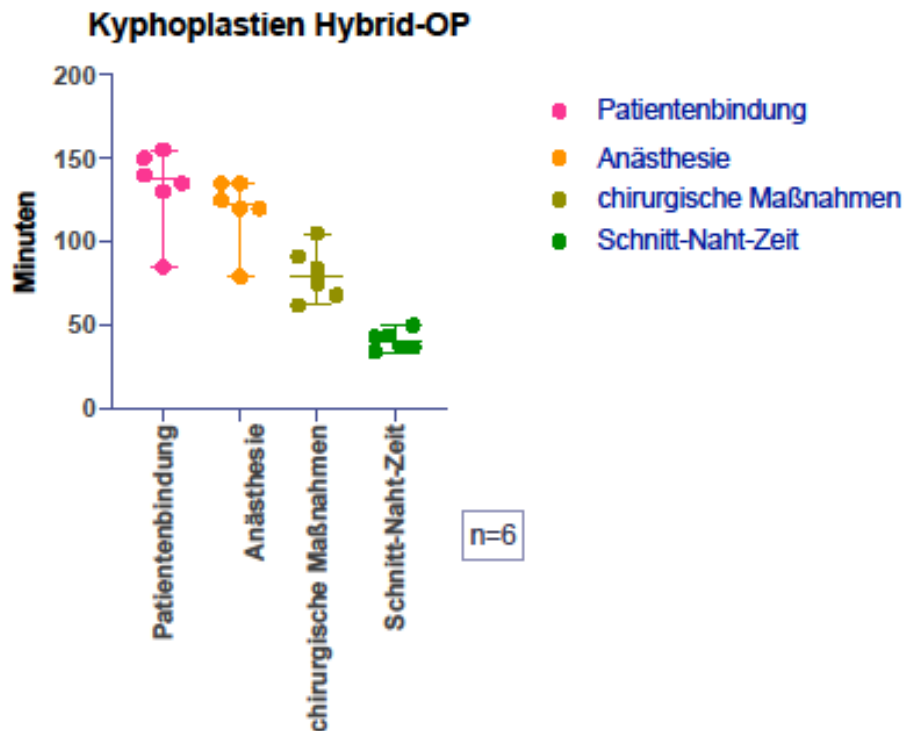


Abbildung 20 - Operationszeiten für Kyphoplastien aus dem Hybrid-OP

Fixateur Interne

Für die Implantation eines Fixateurs interne in minimalinvasiver Technik beträgt die Zeit der Patientenbindung 182 ± 47 Minuten, im Gegensatz hierzu wurden die Patienten im Hybrid-OP mit durchschnittlich 201 ± 31 Minuten deutlich länger durch das OP-Personal gebunden. Chirurgische Maßnahmen dauerten im konventionellen OP ohne dreidimensionale Bildgebung 132 ± 45 Minuten. Im Hybrid-OP wurden im Durchschnitt 152 ± 35 Minuten benötigt. Die Zeiten von Hautschnitt bis Wundnaht (reine OP-Zeit) betragen im konventionellen OP 88 ± 42 Minuten, im Hybrid-OP 93 ± 27 Minuten. Zuletzt zeigt sich der gleiche Trend bei den Zeiten der Anästhesie. Im Schnitt wurden die Patienten im konventionellen OP 164 ± 48 Minuten durch die Kollegen der Anästhesiologie versorgt. Im Hybrid-OP dauerte die Betreuung durch die Narkoseabteilung 179 ± 35 Minuten (**Abbildungen 21 und 22**).

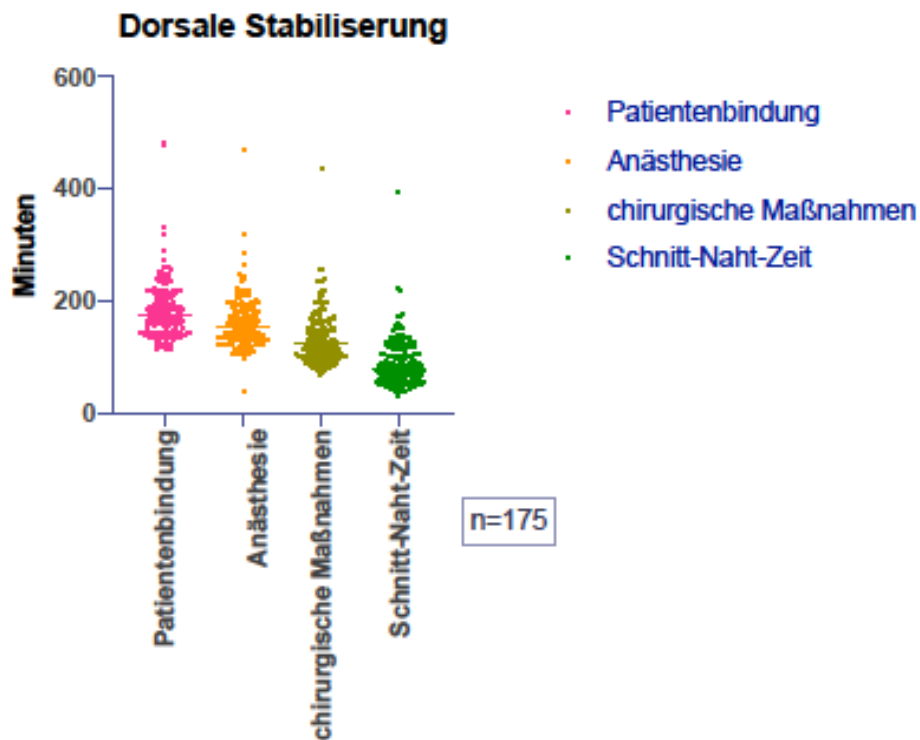


Abbildung 21 - Operationszeiten für dorsale Stabilisierungen aus dem konventionellen OP

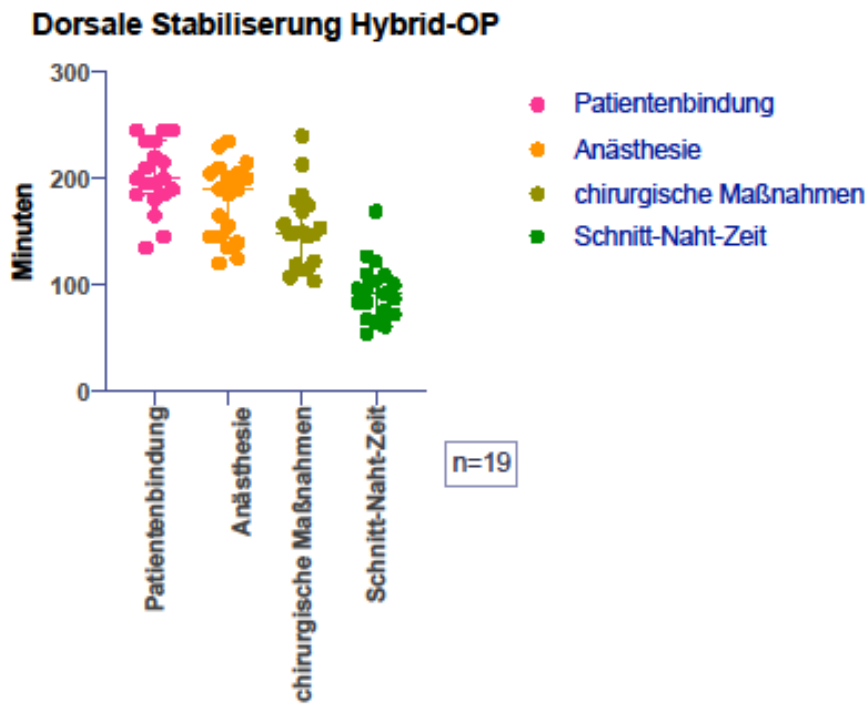


Abbildung 22 - Operationszeiten für dorsale Stabilisierungen aus dem Hybrid-OP

Komplikationen

Kyphoplastien

Anknüpfend an die vorausgegangenen Untersuchungsergebnisse werden ebenfalls die Komplikationsraten der einzelnen Operationen in den Kohorten gegenübergestellt. Bei den insgesamt 66 Kyphoplastien, welche in den konventionellen Operationssälen ohne intraoperative dreidimensionale Bildgebung durchgeführt wurden, traten 13 Komplikationen auf, was einer Komplikationsrate von 19,7 Prozent entspricht. Eine Patientin aus jener Kohorte wies starke postoperative Beschwerden auf, sodass eine operative Revision erfolgte. Bei der ersten Operation kam es intraoperativ zu einem Zementaustritt in den Spinalkanal. Drei Wochen später wurde der ektop Zement nach Auftreten von neurologischen Symptomen in einer weiteren Operation entfernt. Die Revisionsrate liegt somit bei knapp 1,5 Prozent (**Abbildung 23**).

Stellt man nun die Anzahl an Kyphoplastien aus dem Hybrid-OP dem gegenüber, zeigt sich eine vergleichbare Komplikationsrate von etwa 16,7 Prozent (**Abbildung 24**). Im Hybrid-OP unter der dreidimensionalen Bildgebung kam es ebenfalls zu einer ektopen Zementextrusion in den Spinalkanal mit anschließender hochgradiger Spinalkanalstenose. Während des Eingriffes konnte der Zementaustritt bereits erkannt werden, jedoch entschloss der Operateur sich zunächst die Operation zu beenden und den wachen und adäquaten Patienten in Hinblick auf eventuelle Folgen der iatrogenen Spinalkanalstenose nach Zementaustritt zu untersuchen. Primär unmittelbar postoperativ konnte keine neurologische Ausfallerscheinung nachgewiesen werden, im weiteren Verlauf bildete sich jedoch ein konsekutives spinales Ödem mit Querschnittssymptomatik aus. Eine Revision mit Dekompression des Spinalkanals und Entfernung des Knochenzementes wurde eine Woche nach initialer OP durchgeführt. Die Revisionsrate liegt somit bei den Kyphoplastien aus dem Hybrid-OP entsprechend der Komplikationsrate bei 16,7 Prozent.

Kyphoplastie

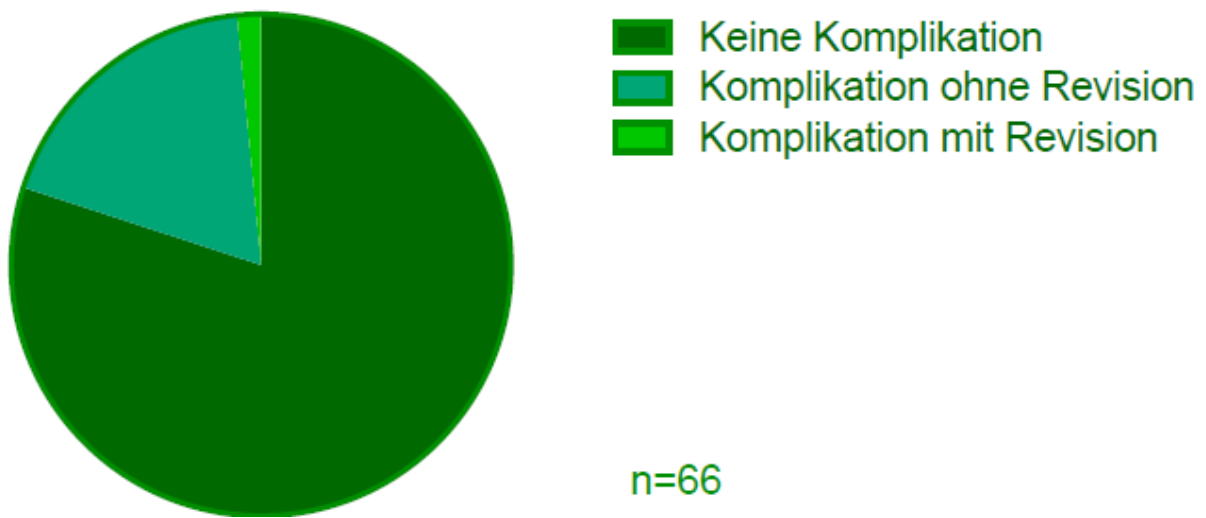


Abbildung 23 - Komplikationen der Kyphoplastien aus dem konventionellen OP

Kyphoplastien Hybrid-OP

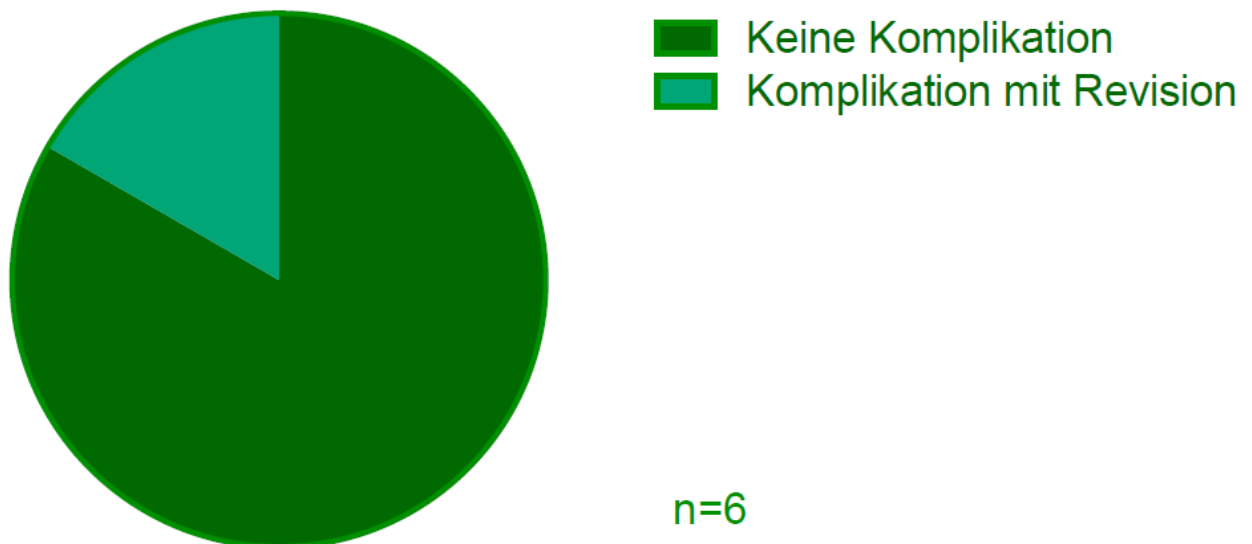


Abbildung 24 - Komplikationen der Kyphoplastien aus dem Hybrid-OP

Fixateur Interne

Bei den in der Summe 175 dorsalen minimalinvasiven Stabilisierungen, die in den konventionellen Operationssälen umgesetzt wurden, kam es insgesamt bei zehn Operationen zu Komplikationen. Bei drei dieser Patienten mussten die deplatzierten Pedikelschrauben in einer weiteren Operation neu positioniert werden (**Abbildung 25**). Die Komplikationsrate liegt hiermit bei 5,7 Prozent, die Revisionsrate bei nur 1,7 Prozent.

Fixateur Interne

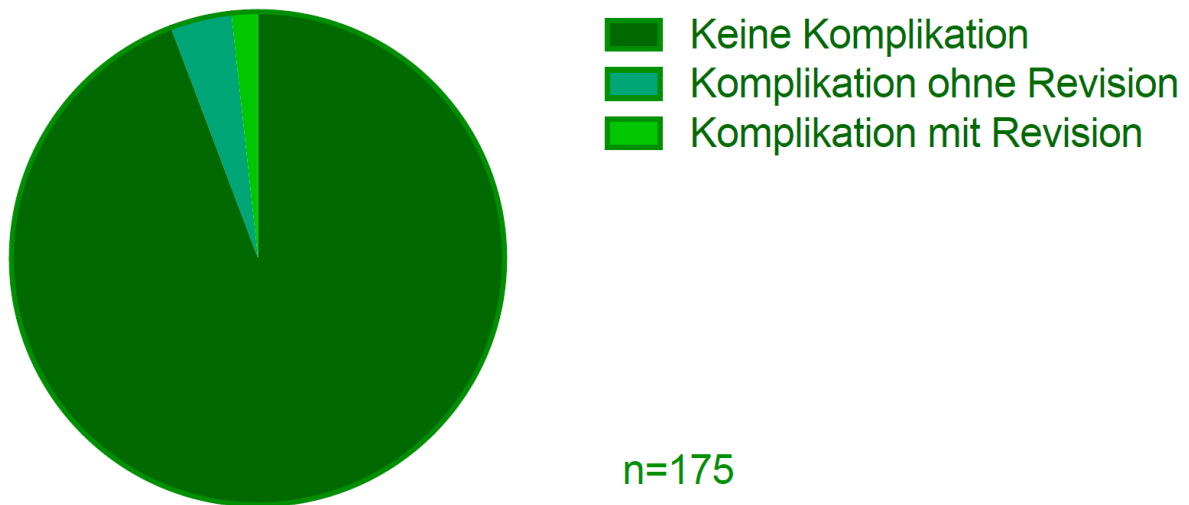


Abbildung 25 - Komplikationen der Fixateure Interne aus dem konventionellen OP

Im Hybridoperationssaal wurden deutlich weniger dorsale Stabilisierungen durchgeführt. Jedoch konnten alle 19 Operationen ohne Auftreten von Komplikationen vorgenommen werden (**Abbildung 26**).

Fixateur Interne Hybrid-OP

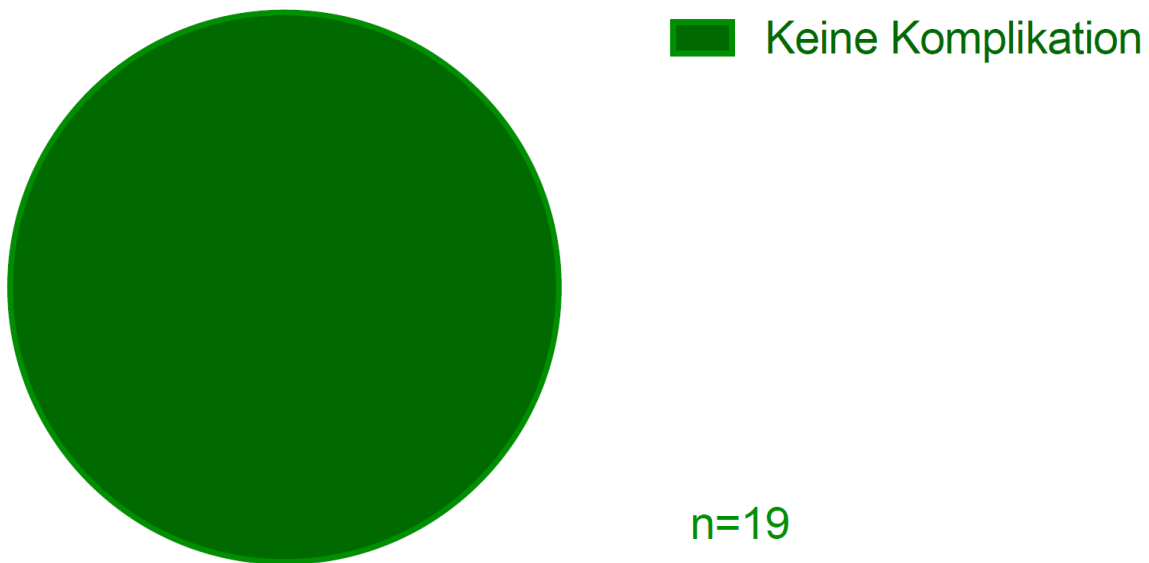


Abbildung 26 - Komplikationen der Fixateure Interne aus dem Hybrid-OP

Die verbesserte intraoperative Bildgebung konnte Schraubenfehlagen noch intraoperativ darstellen und somit Revisionen vermeidbar machen. Vervollständigend liegen die Komplikations- und Revisionsrate bei 0% für minimalinvasive dorsale Stabilisierungen im Hybrid-OP.

Diskussion

Systeme für dreidimensionale Bildgebung

Die dreidimensionale Bildgebung kann auf unterschiedliche Arten erzeugt werden. Verschiedene Hersteller bieten unterschiedliche Systeme oder Anlagen an, mit denen sich dreidimensionale Bildgebung im operativen Setting realisieren lässt. Zum einen können, wie beschrieben, moderne C-Bögen mit Flat-Panel-Detektoren 3D-Bilder generieren. Bodengebundene Systeme, wie der Ziehm Vision RFD 3D (Fa. Ziehm Imaging GmbH, Nürnberg, Deutschland) oder der ArcadisOrbic 3D (Fa. Siemens Healthcare GmbH, Erlangen, Deutschland), können flexibel im OP eingesetzt werden. Mit den breiten Detektoren lassen sich große Bildausschnitte darstellen. Die Bedienung und Handhabung bei bodengebundenen oder auch deckenmontierten 3D-C-Bögen ist vergleichsweise einfach und intuitiv, sowie ohne größeren Kraftaufwand möglich.

Auch der sogenannte O-Arm (O-Arm, Fa. Metronic GmbH, Meerbusch, Deutschland) kommt für die intraoperative dreidimensionale Bildgebung zum Einsatz. Diese ringförmige Röntgeneinheit wurde für die 2D-Fluoroskopie und 3D-Bildgebung entwickelt und kann ebenfalls aus dem intraoperativ gewonnenen Datensatz in Echtzeit dreidimensionale Darstellung erstellen. Mit seinen Abmessungen von 280cm x 81cm x 202cm (Länge x Breite x Höhe) nimmt der O-Arm im Vergleich deutlich mehr Raum in Anspruch und ist nicht so flexibel einsetzbar, wie die deutlich kleineren mobilen 3D-C-Bögen.

Ein weiteres System der dreidimensionalen Bildgebung bietet ein mobiler intraoperativer CT-Scanner - das von der Firma Brainlab AG (Feldkirchen, Deutschland) entwickelte AIRO System. Dieses System wurde als mobiles CT konstruiert, welches in einen bestehenden Operationssaal hineingefahren und dort eingesetzt werden kann. Das System kann für Eingriffe am Kopf, der Wirbelsäule und für unfallchirurgische Eingriffe angewendet werden. Limitierend ist der Durchmesser der Gantry-Öffnung von 107cm, welche größer als die Gantry-Öffnung des O-Arms von Medtronic mit 70cm ist. Zudem sind die Abmessungen mit einer Standfläche von 1,5 m² im Vergleich zum O-Arm deutlich kleiner und bieten für das AIRO-System eine etwas größere Flexibilität. Das AIRO-System wurde bereits an Operationen an der Wirbelsäule erprobt und konnte in verschiedenen Untersuchungen die Vorteile der dreidimensionalen Bildgebung in Bezug auf Schraubenpositionen, Revisionsraten und Operationserfolg darstellen ohne die chirurgischen oder operativen Abläufe zu behindern [44 - 46].

Samsung Electronics (Suwon, Südkorea) hat ebenfalls eine mobile Computertomographie (BodyTom) entwickelt. Im Gegensatz zum AIRO können mit dem BodyTom Ganzkörper-Computertomographien angefertigt werden und er bietet somit vielfältige

Anwendungsmöglichkeiten. Wie bei dem AIRO System liegen die Nachteile in der Größe der Anlage und entsprechenden aufwendigen Bedienung.

Das am UKSH Kiel eingesetzte System mit deckengebundenem Flat-Panel-Detektor bietet unter anderem den entscheidenden Vorteil, dass eine weitestgehend uneingeschränkte Handlungsfreiheit am Operationstisch verbleibt. Beim Einsatz der Bildgebung müssen bei den bodengebundenen Systemen entweder der Patient auf dem Operationstisch oder wichtige Gegenstände, wie Geräte der Anästhesie oder Instrumententische den zum Teil sehr großen Abmessungen der Röntengeräte weichen. So ist es in der Regel nötig, die Operationen für das Rangieren der Geräte (O-Arm, BodyTom, AIRO) für längere Zeit zu unterbrechen. Die Abläufe der Operationen können so entscheidend gestört und die Operationszeiten verlängert werden.

Nutzung des Hybridoperationssaales am UKSH Kiel

Hybridoperationssäle existieren heute in vielen größeren Kliniken. Die im Hybrid-OP des UKSH Kiel verbaute Anlage – die Philips AlluraXper FD20 – besitzt unter anderem eine Menüfunktion „Trauma und skelettales Imaging“. Durch diese Einstellung der Anlage werden die Röntgen-, und Strahlenparameter dahingehend angepasst, dass die Darstellung knöcherner Strukturen verbessert wird. Durch verschiedene Computerapplikationen gelingt eine interdisziplinäre Nutzung der Anlage, da je nach Anforderung der verschiedenen Disziplinen an die Bildgebung, die Einstellungen und Darstellungsoptionen optimiert werden können.

Die Nutzung eines sogenannten Hybrid-OPs für Eingriffe in Orthopädie und Unfallchirurgie ist bereits für bodengebundene Systeme (Artis, ZEEGO; Fa. Siemens, Erlangen, Deutschland) beschrieben worden [4]. Der Unterschied zum am UKSH verwendeten System besteht im Wesentlichen in der Aufhängung des C-Bogens an einem Deckenschienensystem (FlexMove), das zulässt, den C-Bogenflexibel von allen Seiten um den an einer festen Säule montierten OP-Tisch herum im Raum, von der Steuereinheit aus motorisiert, zu positionieren. Zusätzlich lässt die Deckenanordnung Platz für ein TAV-Feld (TAV: turbulenzarme Verdrängungsströmung), sodass der Saal auch bei geparktem C-Bogen Hygiene-Raumklasse 1A für offen-chirurgische Eingriffe erfüllt.

Durch das separate Steuermodul, welches steril abgedeckt werden kann, besteht die Möglichkeit, den Flachdetektor-C-Bogen (FD-C-Bogen) je nach Bedarf auch durch den Operateur selbst in Position zu bringen und auszurichten. Da gerade bei Eingriffen der Wirbelsäule Röntgenkontrollen in zwei orthogonal zueinander liegenden Ebenen vonnöten sind, bietet die Möglichkeit per Knopfdruck am Steuerpult zwei Positionen des FD-C-Bogens zu speichern deutliche Vorteile. Durch die vollautomatischen Positionswechsel, die nur einen

Knopfdruck erfordern, entfallen die zum Teil zeitaufwendigen Schritte der Re-Positionierung des Bildwandlers in der anderen Ebene. Durch die Bedienung des Operateurs selbst entfällt prinzipiell ein speziell geschulter Assistent, um den mobilen C-Bogen in den benötigten zwei Ebenen einzustellen.

Richter et al. konnten ebenso nach Erprobung eines Hybrid-OP an der Uniklinik Ulm die Steuerung der vollautomatischen deckenmontierten Anlage durch den Operateur als enormen Zeitvorteil herausstellen. Bedingt wird der zeitliche Vorteil jedoch durch entsprechende Sicherheit und Routine bei der Anwendung [47].

Der in der Anlage des UKSH verbaute Flat-Panel-Detektor besitzt mit einem darstellbaren Bildausschnitt von ca. 30 x 40 Zentimetern nicht nur ein besonders großes, sondern auch qualitativ hochwertiges Bild. Im Vergleich zu herkömmlichen mobilen Bildwandlern der älteren Generationen leistet das Philips-System nicht nur die Darstellung des gesamten Beckens, sondern auch der gesamten lumbalen und thorako-lumbalen Wirbelsäule (**Abbildung 27**). Die Abbildung zeigt eine in der Operationsroutine am UKSH angefertigte Aufnahme der Lendenwirbelsäule. Hier wird insbesondere verdeutlicht, dass bei modernen Flachbild-Detektoren, wie sie in Hybridoperationssälen zum Einsatz kommen, mit eben diesen größeren Bildausschnitten mehrere Wirbelkörpersegmente in einem Eingriff, ohne ständige Neupositionierung des Bildwandlers, adressiert werden können.

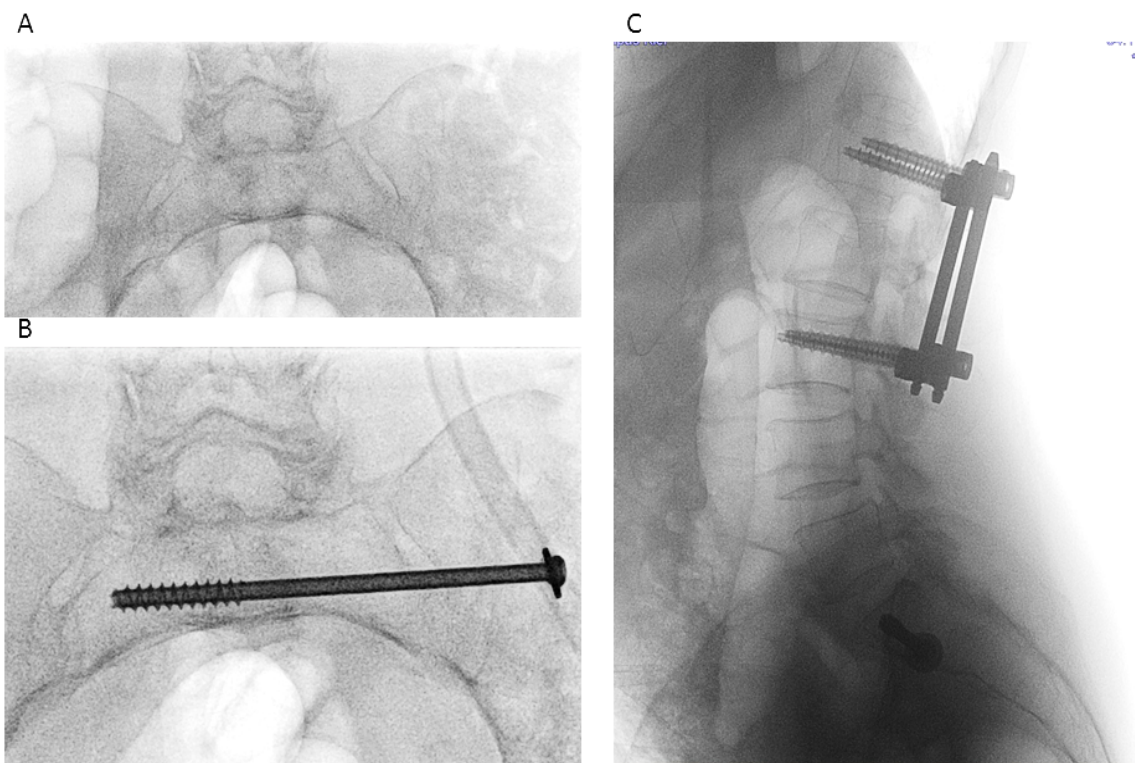


Abbildung 27– **A** intraoperative Darstellung einer Beckenfraktur vor Osteosynthese, **B** intraoperative Darstellung der eingebrachten Sakroiliakalschraube, **C** postoperative Aufnahme nach Implantation eines Fixateurs internes von Lendenwirbelkörper (LWK) 1 auf 3

Ergänzend zu Röntgenaufnahmen können mit der am UKSH in Kiel eingesetzten Philips Allura Anlage Volumentomographien mit dem sogenannten „Cone-Beam CT“ angefertigt werden. Hiermit lassen sich die Strukturen oder die Anatomie vielschichtig darstellen (**Abbildung 28**). Dieser gewonnene dreidimensionale Datensatz kann anschließend genauer analysiert werden. Dabei stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann der 3D-Rechner (XtraVision) im Operationssaal über eine steril abgedeckte Maus am Steuerpult am Großbildschirm bedient werden. Für eine genaue Analyse erfolgte die Auswertung der Daten im Schaltraum.

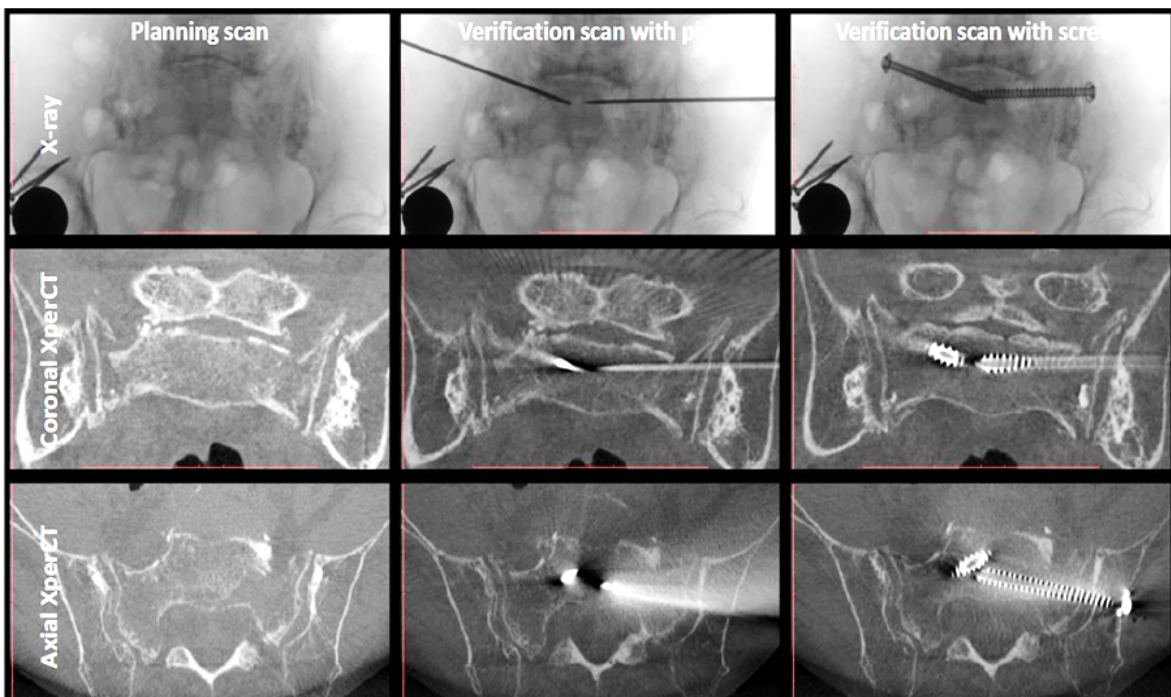


Abbildung 28 – Aufnahme aus der operativen Versorgung einer beidseitigen Sakroiliakalschraubenosteosynthese mit den verschiedenen Operationsschritten

Diese intraoperativ angefertigten Bildsequenzen von hoher Auflösung und Qualität ermöglichen und beeinflussen das unmittelbare chirurgische Vorgehen, vor allem in Bezug auf notwendige Revisionen oder Repositionen des eingebrachten Materials. Entscheidende Informationen können auch aus der sogenannten Cine-Schleife gezogen werden, die vor Errechnung einer MPR Rekonstruktion direkt am Großbildschirm angezeigt werden kann. Sämtliche zuvor, während der Rotation des C-Arms um das Isozentrum herum aufgenommenen Röntgenbilder, werden in dieser Cine-Schleife abgespielt und erzeugen somit ein nahezu flüssiges rotierendes Bild. Dieser kleine Film kann beliebig oft abgespielt werden und bereits in dieser Darstellung können Projektionen z.B. von Schrauben im Verhältnis zu knöchernen Strukturen anschaulich kontrolliert und deren korrekte Lage bestätigt werden.

Einsatz der dreidimensionalen Bildgebung

Üblicherweise werden nach operativer Versorgung komplexer Becken- oder vor allem Wirbelsäulenoperationen und nach Einbringen von Pedikelschrauben postoperativ Computertomographien durchgeführt, um das Ergebnis mit Frakturposition und Materiallage abzubilden. In anderen Arbeiten konnte nachgewiesen werden, dass in Bezug auf Implantatlage und Frakturposition die intraoperativ gewonnenen 3D-Aufnahmen die gleichen Informationen liefern, wie eine postoperativ durchgeführte Computertomographie. Schlussfolgernd vermeidet der intraoperative 3D-Scan potentielle Sekundäreingriffe, da sonst erst in der postoperativen CT Materialfehlagen oder unzureichende Frakturpositionen bzw. Gelenkflächenrekonstruktionen auffallen. So können auch durch die Sekundäreingriffe bedingte Morbiditäten wie Wundinfektionen, Weichteilschäden oder Narkoserisiken vermieden werden [48]. Dies kann sich maßgeblich auf den stationären Aufenthalt auswirken, da sich die Behandlungsdauer durch Folgeeingriffe verlängert. Jeder zeitliche Mehraufwand, der bei Versorgung im Hybrid-OP unter Umständen anfällt, gerade auch in der Anfangsphase, steht dann im Missverhältnis zur verlängerten Behandlungsdauer der Patienten [49 - 53].

Der Vorteil der verbesserten Darstellung durch die Volumentomographien bietet jedoch auch einen Nachteil – es entstehen für den Patienten und das OP-Personal höhere Strahlenbelastungen als in der konventionellen Bildgebung. Vor der erhöhten Strahlenexposition kann sich zumindest das OP-Personal im Hybrid-OP unter anderem schützen, indem es für die Zeit des Scans oder des Röntgens den Operationssaal verlässt [54 - 56]. Durch das automatisierte Scannen kann theoretisch das gesamte Personal den Saal verlassen, was bei herkömmlichen mobilen 3D-C-Bögen zumindest für den Anwender der Technik häufig nicht der Fall ist.

Insgesamt bestehen keine größeren Belastungen als bei Angiographien üblich. Durch die verschiedenen Modi der einzelnen Aufnahmemöglichkeiten kann die Belastung bedarfsgerecht angepasst und weiter verringert werden [57].

Die Effizienz der Bildgebung im Hybrid-OP in Bezug auf Strahlendosis ist, verglichen mit konventionellen mobilen C-Bögen, erhöht. Durch die Deckenmontage des C-Armes und die Ausrichtung auf den fest montierten Tisch können, wie bereits erwähnt, Anfangs- und Endpunkt und somit auch die Strecke zwischen beiden Punkten gespeichert werden. So werden überflüssige Aufnahmen vermieden, welche meistens zum Erreichen der exakten Einstellung des OP-Gebietes notwendig sind. Besonders im hier untersuchten Bereich der minimalinvasiven Wirbelsäulenchirurgie, aber auch der navigierten minimalinvasiven Beckenchirurgie, kann dies relevant sein [58 - 59]. Beim Einbringen der perkutanen Schrauben

muss fortwährend die Lage in zwei Ebenen kontrolliert werden. So ist es erforderlich zwischen anterior-posteriorer und seitlicher Einstellung hin und her zu wechseln. Durch die automatische Ausrichtung und das Anfahren der individuellen Punkte werden zum einen unnötige Aufnahmen und zum anderen OP-Zeit eingespart [60-61].

In Übereinstimmung mit Richter et al., die in der einjährigen Erprobung des Hybridoperationssaals am Uniklinikum Ulm ähnliches feststellen konnten [47], sind die Operations-assoziierten Zeiten bei der Etablierung eines neuen Verfahrens für unfallchirurgische und orthopädische Eingriffe teilweise länger als in der bisherigen und etablierten Operationsroutine. Die Operationszeiten unterliegen typischerweise jedoch einer Lernkurve. Dies gilt speziell bei dem hier vorgestellten System, da die Bedienung nicht intuitiv ist. Bei vermehrter Anwendung kommen im Verlauf dann die Zeitvorteile zum Tragen. Besonders die Bedienung durch den Operateur selbst kann die Operationszeiten verringern, da der übliche stete Wechsel durch das Personal nicht erfolgen muss. Zusätzlich lassen sich potenziell durch das Fehlen der üblichen „Befehlskette“ von Operateur zur OP-Pflege Fehler vermeiden [8].

Der Zeitfaktor besitzt einen großen Stellenwert, denn derzeit gibt es im deutschen Diagnosis Related Groups (DRG)-Klassifikationssystem keine Extravergütung für die Benutzung der aufwendigen und in der Anschaffung sehr teuren Hybrid-OP-Einrichtung. Zur zeitlichen Ersparnis hat sich die separate Einleitung außerhalb des Operationsaales in einem entsprechenden Vorbereitungsraum bewährt. Zusätzlich muss die Organisation des Aufbaus und der Vorbereitung der Operation durch die unterschiedlichen Funktionsbereiche der Anästhesie, der operierenden und instrumentierenden Personen an das deckenmontierte und in den Raum reichende Systemteil angepasst werden. Eine vorübergehende Verlängerung der Vorbereitungsphase zu Beginn der interdisziplinären Nutzung muss in Kauf genommen werden. Mit zunehmender Routine verkürzen sich diese Intervalle naturgemäß merklich.

In der hier vorgestellten Untersuchung mit vergleichsweise kleiner Fallzahl aus dem Hybrid-OP konnten dennoch durch die direkt intraoperativ durchgeführte Lagekontrolle mit dem 3D-Scan mehrfach Implantatfehlagen oder Repositionsfehler aufgedeckt werden, die zu einer unmittelbaren Abänderung und Verbesserung des OP-Ergebnisses geführt haben. Lediglich ein Revisionseingriff erfolgte. Diese niedrige Revisionsrate resultiert aus verbesserter intraoperativer Darstellung der Strukturen und der Anatomie. Gerade bei minimalinvasiven Operationen, bei denen sich der Operateur fast ausschließlich auf die Röntgendarstellung verlassen muss, bietet dieses Verfahren enorme Vorteile. So gelingt zum Beispiel das Einbringen von Pedikelschrauben leichter unter ständiger Kontrolle durch das automatisierte Anfahren und des größeren Bildausschnittes. Implantatfehlagen werden so

unwahrscheinlicher und als letzte Kontrollinstanz bleibt die dreidimensionale Bildgebung. Damit entfällt ein mitunter erheblicher Kostenfaktor für postoperative CT- oder Röntgenkontrollen [62 - 64].

Mittlerweile haben zahlreiche Arbeiten und Studien den Stellenwert der intraoperativen dreidimensionalen Bildgebung für die Unfallchirurgie und Orthopädie herausgestellt. Insbesondere bei komplexen Frakturmorphologien - beispielsweise bei Frakturen der Wirbelsäule, des Beckens oder der großen Gelenke - kommt der Vorteil zum Tragen. Hier ist nicht nur eine umfassende Kenntnis der Anatomie erforderlich, sondern auch eine hochqualitative Bildgebung. Herkömmliche zweidimensionale Bildgebung muss durch den Operateur auf den komplizierten intraoperativen Situs übertragen werden. Einige Arbeiten weisen den Vorteil der intraoperativen dreidimensionalen Bildgebung besonders bei durch sakroiliakale Verschraubungen versorgte Beckenfrakturen in Bezug auf Materiallage und Revisionsraten aus [65 - 68]. Wie bereits beschrieben, stellen besonders Verletzungen und Frakturen mit komplexer Anatomie oder großen Gelenkflächen eine besondere Herausforderung für den Operateur dar [43]. Die Fraktur- oder Gelenkreposition sollte so genau wie möglich erfolgen, um sekundäre Verschleißumformungen, postoperative Beschwerden oder sogar Revisionen zu vermeiden. Ähnliches gilt für komplexe mehrfragmentäre Tibiakopf- bzw. Tibiaplateaufrakturen. Kendoff et al. [69], Weil et al. [70], sowie Wick et al. [71] konnten den Nutzen einer 3D-Bildgebung für derartige Frakturen belegen. Eine Untersuchung von Gwak et al. aus Korea konkludiert, dass intraoperative 3D-Bildgebung auch bei Calcaneusfrakturen zur Bestimmung der Gelenkkongruenz und Implantatlage nützlich und sinnvoll ist [72]. Für Versorgungen an der Wirbelsäule wurde durch Gonschorek et al. 2016 ebenso die sichere Kontrolle des Operationsergebnisses noch während des Eingriffes durch 3D-Bildgebung nachgewiesen [73]. Diese Ergebnisse können nach der hier dargelegten Untersuchung bestätigt und für die minimalinvasive Wirbelsäulen Chirurgie noch weitere Möglichkeiten des Einsatzes modernster dreidimensionaler Bildgebung herausgearbeitet werden.

Die Anwendung dieser Bildgebung bei komplexen Frakturmorphologien ist sinnvoll und hilfreich, da deren Ausmaß häufig nicht durch die konventionelle zweidimensionale Bildgebung aufgedeckt werden kann. Zudem stößt die konventionelle Bildgebung bei stark übergewichtigen Personen oder jenen mit entsprechend großem Weichteilmantel an seine Grenzen. Die moderne dreidimensionale Bildgebung mit Darstellung im Hochkontrastprogramm kann hier helfen eine bessere Übersicht für den Operateur zu schaffen.

Neben dieser beschriebenen Gruppe gibt es eine weitaus größere und für den klinischen Alltag bedeutendere Gruppe, die von einer besseren Bildgebung profitieren kann. Bei Patienten mit herabgesetztem Knochenstoffwechsel, bei denen sich bereits am Skelett ein osteoporer oder osteoporotischer Aspekt eingestellt hat, kann daraus Nutzen gezogen werden. Hier ist die Qualität der Darstellung aus eigener Erfahrung deutlich besser als mit konventionellen C-Bögen.

Für beide Patientengruppen ist eine primäre optimale Versorgung wichtig, da Revisionsoperationen sowohl bei adipösen Patienten als auch bei Patienten mit stark reduzierter Knochenqualität mit beachtlichem Risiko vergesellschaftet sind. Die Vermeidung von Revisionen und das optimale OP-Ergebnis stehen jedoch bei allen anderen Patienten auch im Vordergrund, sodass eine grundsätzliche Versorgung mit 3D-Bildgebung für zumindest minimalinvasive Verfahren an der Wirbelsäule, sinnvoll erscheint.

In Zukunft werden sich digitale Techniken im klinischen Alltag immer mehr etablieren - dazu gehört auch die intraoperative Bildgebung in Orthopädie und Unfallchirurgie. Mit zunehmender Anwendung werden sich immer mehr Möglichkeiten bieten, die Auswirkungen auf die Qualität der Versorgung in größeren Studien zu überprüfen.

Zusammenfassung

Sogenannte Hybridoperationssäle, Zentren modernster intraoperativer Bildgebung, bestehen seit einigen Jahren an immer mehr Kliniken in Deutschland. In diesen Operationssälen kann während eines Eingriffes dreidimensionale Röntgenbildgebung angefertigt werden. Ursprünglich für die Herz- und Gefäßchirurgie entwickelt, werden diese Säle zunehmend auch von anderen chirurgischen Disziplinen genutzt. Bisherige Erfahrungen aus der interdisziplinären Nutzung und vor allem in der Anwendung für unfallchirurgische und orthopädische Eingriffe konnten darlegen, dass dreidimensionale Bildgebung sich positiv auf den Operationserfolg auswirken kann.

Ziel dieser Arbeit ist es herauszustellen, inwiefern am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein Campus Kiel durchgeführte minimalinvasive Operationen an der Wirbelsäule von einer intraoperativen dreidimensionalen Bildgebung profitieren. Betrachtet werden Kyphoplastien und perkutane dorsale Stabilisierungen, aus dem Hybrid-OP des UKSH am Campus Kiel in Bezug auf Operationszeiten und Operationsergebnis.

Verglichen werden diese Operationen aus den Jahren 2015 bis 2018 mit jenen aus dem konventionellen OP im selben Zeitraum.

Die bildgebende Technik im Hybrid-OP bietet entscheidende Vorteile gegenüber der Bilddarstellung im konventionellen OP. Bei den untersuchten Operationen traten im Gegensatz zum konventionellen OP keine Komplikationen oder Revisionseingriffe nach perkutaner dorsaler Stabilisierung im Hybrid-OP auf. Für Kyphoplastien zeigt sich eine vergleichbare Komplikationsrate bei beiden Verfahren. Für Kyphoplastien besteht kein zeitlicher Nachteil bei der Versorgung im Hybrid-OP. Die Zeiten können mit steigender Routine und Erfahrung im Verlauf weiter reduziert werden.

Durch die Genauigkeit der dreidimensionalen Bildgebung lassen sich frühzeitig Fehler noch während der Operation erkennen und beheben, so kann die Anzahl an Revisionseingriffen verringert werden. Erhöhte Strahlenbelastung und mitunter längere OP- und Narkosezeiten stehen dem gegenüber.

Literaturverzeichnis

- [1] W. C. Röntgen: Ueber eine neue Art von Strahlen. Vorläufige Mittheilung, Würzburg, Physikalisches Institut der Universität. Dec. 1895
- [2] Illustrierte Geschichte der Medizin Band 4, S. 2137-2163
- [3] Küntscher, Maatz: Die Technik der Marknagelung. Thieme 1945
- 4] Krettek C, Gebhard F (2012) Entwicklung der intraoperativen C-Bogenanwendung in der Unfallchirurgie. Unfallchirurg 115:100-106
- [5] Coltman JW (1948) Fluoroscopic image brightening by electronic means. Radiology 51:359-367
- [6] Mattes T (2012) Flat-panel-Technologie im orthopädisch-unfallchirurgischen Operationssaal. Unfallchirurg 115:202-208
- [7] Stuby F, Seethaler AC, Shiozawa T et al. (2011) Vergleich der Bildqualität zweier unterschiedlicher mobiler 3-dimensionaler Röntgen-C-Bögen mit einem konventionellen CT bei der Darstellung relevanter Strukturen am knöchernen Becken. Z Orthop Unfall 149:659-667
- [8] Gebhard F, Riepl C, Richter P et al. (2012) Der Hybridoperationssaal. Unfallchirurg, 115:107-120
- [9] Cribier A et al (2002) Percutaneous trans catheter implantation of an aortic valve prosthesis for calcific aortic stenosis. Circulation 106:3006–3008
- [10] Rock C, Linsenmeier U, Brandl R et al. (2001) Vorstellung eines neuen mobilen C-Bogens/CT- Kombinationsgerät (ISO-C-3D). Unfallchirurg 104:827–833
- [11] Recum J, Wendl K, Vock B, Grützner PA, Franke J (2012) Die intraoperative 3D-C-Bogen-Anwendung. Unfallchirurg 115:196–201

- [12] Cowen AR, Kengyelics SM, Davies AG (2008) Solid-state, flat-panel, digital radiography detectors and their physical imaging characteristics. Clin Radiol 63:487-98
- [13] Weis M, Hagelstein C, Diehm T et al. (2016) Comparison of image quality and radiation dose between an image-intensifier system and a newer-generation flat-panel detector system – technical phantom measurements and evaluation of clinical imaging in children. Pediatr Radiol 46:286-292
- [14] Richter P, Gebhard F, Eickhoff A, Schütze K (2018) New advances in intra-operative imaging in trauma. EFORT Open Rev 3(5):168-172
- [15] Reicher B, Poston RS, Mehra MR et al. (2008) Simultaneous „hybrid“ percutaneous coronary intervention and minimally invasive surgical bypass grafting: feasibility, safety, and clinical outcomes. Am Heart J 155:661-667
- [16] Walsh SR, Tang TY, Sadat U et al. (2008) Endovascular stenting versus open surgery for thoracic aortic disease: systematic review and meta-analysis of perioperative results. J Vasc Surg 47:1094-1098
- [17] Quigley RL (2011) A hybrid approach to cardiac resynchronization therapy. Ann Thorac Cardiovasc Surg 17:273-276
- [18] Ng PY, Huddle D, Gunel M, Awad IA (2000) Intraoperative endovascular treatment as an adjunct to microsurgical clipping of paraclinoid aneurysms. J Neurosurg 34:554-560
- [19] Atesok K, Schemitsch EH (2010) Computer-assisted trauma surgery. J Am Acad Orthop Surg 18:247-258
- [20] Hadji P, Klein S, Gothe H et al. (2013) Epidemiologie der Osteoporose – Bone Evaluation Study. Dtsch Arzteblatt 110(4):52-7
- [21] Werner CML, Maxy P, Scheyer MJ, Stein (2019) Expertise Wirbelsäule. Georg Thieme Verlag 12.5:529-44
- [22] Riggs BL, Melton LJ 3rd (1995) The worldwide problem of osteoporosis: insights afforded by epidemiology. Bone 17 (5 Suppl.):505S–511S

- [23] Gold DT, Lyles KW, Shipp KM et al. (2001) Osteoporosis and its non skeletal consequences: Their impact on treatment decisions. In: Marcus R, Feldman D, Kelsey J, eds. Osteoporosis. 2nd ed. Vol. 2. San Diego: Academic Press
- [24] Melton LJ, Amin S (2013) Is there a specific fracture 'cascade'? Bonekey Rep 2: 367
- [25] Galibert P, Deramond H, Rosat P et al. (1987) Preliminary note on the treatment of vertebral angioma by percutaneous acrylic vertebroplasty. Neurochirurgie 33:166–168
- [26] Bohndorf K, Fessler R (2006) Vertebroplasty and kyphoplasty in patients with osteoporotic fractures: secured knowledge and open questions. Radiologe 46:881–892
- [27] Gaitanis IN, Hadjipavlou AG, Katonis PG et al. (2005) Balloon kyphoplasty for the treatment of pathological vertebral compressive fractures. Eur Spine J 14:250–260
- [28] Tohmeh AG, Mathis JM, Fenton DC et al. (1999) Biomechanical efficacy of unipedicular versus bipedicular vertebroplasty for the management of osteoporotic compression fractures. Spine J 24:1772–1776
- [29] Edidin AA, Ong KL, Lau E et al. (2015) Morbidity and Mortality After Vertebral Fractures: Comparison of Vertebral Augmentation and Nonoperative Management in the Medicare Population. Spine J 40:1228–1241
- [30] Eck AJ, Jensen MW, Kip KE et al. (2003) Comparison of vertebroplasty and balloon kyphoplasty for treatment of vertebral compression fractures: a meta-analysis of the literature. Spine J 8:488-497
- [31] Hulme PA, Krebs J, Ferguson SJ, Berlemann U (2006) Vertebroplasty and kyphoplasty: a systematic review of 69 clinical studies. Spine J 31:1983-2001
- [32] Venmans A, Klazen CA, Lohle PN, van Rooij WJ, Verhaar HJ, de Vries J, Mali WP (2010) Percutaneous vertebroplasty and pulmonary cement embolism: results from VERTOS II. Am J Neuroradiol 31(8):1451-3
- [33] Lee BJ, Lee SR, Yoo TY (2002) Paraplegia as a complication of percutaneous vertebroplasty with polymethylmethacrylate: a case report. Spine J 27:E419–422

[34] Prymka M, Pühler T, Hirt S et al. (2003) Extravertebral cement drainage with occlusion of the extradural venous plexus into the vena cava after vertebroplasty. Case report and review of the literature. Unfallchirurg 106:860–864

[35] Schmidt-Rohlfing B, Reilmann H, Pfeifer R et al. (2011) Kyphoplasty and vertebroplasty. Indications, techniques, complications and results. Unfallchirurg 114:431–440

[36] Prophylaxe, Diagnostik und Therapie der Osteoporose bei Männern ab dem 60. Lebensjahr und bei postmenopausalen Frauen (2017) S3-Leitlinie des Dachverbandes der Deutschsprachigen Wissenschaftlichen Osteologischen Gesellschaften e.V.:201-205

[37] Matschke S (2011) Perkutane minimalinvasive Instrumentierung der Wirbelsäule. Traum Berufskrankh 13:253-259

[38] Heider FC, Mayer HM. Stein (2019) Expertise Wirbelsäule, Georg Thieme Verlag 12.7:550-86

[39] Hillmeier J, Meeder PJ, Nöldge G, KasperkCh (2003) Minimal invasive Reposition und innere Stabilisierung osteoporotischer Wirbelkörperfrakturen (Ballonkyphoplastie). Operat Orthop Traumatol 4:343-362

[40] Krappinger D, Kastenberger TJ, Schmid R (2012) Die Behandlung osteoporotischer Wirbelkörperfrakturen mit augmentierter Instrumentation. Oper Orthop Traumatol 24:4-12

[41] Grass R, Biewener A, Dickopf A et al. (2006) Percutaneous dorsal versus open instrumentation for fractures of the thoraco lumbar border. A comparative, prospective study. Unfallchirurg 109(4):297-305

[42] Tinelli M, Suda AJ, Adams M, Matschke S (2011) Korrekte Positionierung von Pedikelschrauben mit percutanem minimalinvasivem System bei Wirbelfrakturen. DWG Hamburg, 08-10. Dez. 2011

[43] Franke J, Vetter SY, Beisemann N, Swartmann B et al. (2016) 3-D-Sicherheit bei gelenknahen Osteosynthesen. Unfallchirurg, 119:803-810

[44] Hecht N, Kamphuis M, Czabanka M et al. (2016) Accuracy and work flow of navigated spinal instrumentation with the mobile AIRO CT scanner. Eur Spine J 25:716-723

- [45] Farah K, Coudert P, Graillon et al. (2018) Prospective Comparative Study in Spine Surgery Between O-Arm and Airo Systems: Efficacy and Radiation Exposure. *World Neurosurg* e1-e10
- [46] Scarone P, Vincenzo G, Distefano D et al. (2018) Use of the Airo mobile intraoperative CT system versus the O-Arm for transpedicular screw fixation in the thoracic and lumbar spine: a retrospective cohort study of 263 patients. *J Neurosurg Spine* 29:397-406
- [47] Richter P, Yarboro S, Kraus M, Gebhard F (2015) One year orthopaedic trauma experience using an advanced interdisciplinary hybrid operating room. *Injury*, S129-S134
- [48] Stengel D, Wich M, Ekkernkamp A, Spranger N (2016) Intraoperative 3-D-Bildgebung. *Unfallchirurg*, 119:835-842
- [49] Richter P, Gebhard F (2013) Der interdisziplinäre Hybridoperationssaal. *Chirurg* 84:1036-1040
- [50] Yarboro SR, Richter PH, Kahler DM (2016) Entwicklung der 3-D-Bildgebung in der Versorgung orthopädischer Verletzungen. *Unfallchirurg* 119:811-816
- [51] Borggrefe J, Bolte H, Worms W et al. (2015) Comparison of intraoperative flat panel imaging and postoperative plain radiology for the detection of intraarticular screw displacement in volar distal radius plate osteosynthesis. *Othopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 101:913-917.
- [52] Beck M, Moritz K, Gierer P et al. (2009) Intraoperative control of pedicle screw position using three-dimensional fluoroscopy. A prospective study in thoracolumbar fractures. *Z Orthop Unfall* 147:37-42
- [53] Wich M, Spranger N, Ekkernkamp A (2004) Intraoperative imaging with the ISO C(3D). *Chirurg* 75:982-987
- [54] Mendelsohn D, Strelzow SM, Dea N et al. (2016) Patient and surgeon radiation exposure during spinal instrumentation using intraoperative computed tomography-based navigation. *Spine J* 16:343-354

- [55] Nelson EM, Monazzam SM, Kim KD et al. (2014) Intraoperative fluoroscopy, portable X-ray, and CT: Patient and operating room personnel radiation exposure in spinal surgery. *Spine J* 14:2985-2991
- [56] Abdullah KG, Bishop FS, Lubelski D et al. (2012) Radiation exposure to the spine surgeon in lumbar and thoraco lumbar fusions with the use of an intraoperative computed tomographic 3-dimensional imaging system. *Spine* 37:1074-1078
- [57] Gebhard F, Kraus M, Schneider E et al. (2003) Radiation dosage in orthopedics – a comparison of computer assisted procedures. *Unfallchirurg* 106:492-497
- [58] Kraus MD, Kritschak G, Keppler P et al. (2010) Can computer-assisted surgery reduce the effective dose for spinal fusion and sacro iliac screw insertion? *Clin Orthop Relat Res* 486:2419-2419
- [59] Wieners G, Pech M, Beck A et al. (2005) Vergleich von Strahlenexposition und Bildqualität eines Siremobil-IsoC3D mit einem 16-Zeilen-Spiral-CT bei Diagnostik und Intervention am humanen Becken. *Rofo* 177:258-264
- [60] Seibert JA (2006) Flat-panel detectors: how much better are they? *Pediatr Radiol* 36 (Suppl 2):173-181
- [61] Gonschorek O, Hauck S, Bühren V (2016) Intraoperative 3-D-Bildgebung in der Wirbelsäulenchirurgie. *Unfallchirurg* 119:817-824
- [62] Hüfner T, Stübing T, Gössling T et al. (2007) Kosten- und Nutzenanalyse der intraoperativen 3D-Bildgebung. *Unfallchirurg* 110:14-21
- [63] Bischoff M, Hebecker A, Hartwig E, Gebhard F (2004) Cost effectiveness of intraoperative three-dimensional imaging with a mobile C-arm. *Unfallchirurg* 107:712-715
- [64] Qureshi S, Lu Y, McAnany S et al. (2014) Three-dimensional Intraoperative Imaging Modalities in Orthopaedic Surgery: A Narrative Review. *J Am Acad Orthop Surg* 22:800-809
- [65] Richter PH, Gebhard F, Dehner C, Scola A (2016) Accuracy of computer-assisted iliosacral screw placement using a hybrid operating room. *Injury* 47:402-407

- [66] Baofeng Li, Bei Chen, Ying Zhang et al. (2016) Comparative use of the computer-aided angiography and rapid prototyping technology versus conventional imaging in the management of the Tile C pelvic fractures. *International Orthopaedics* 40:161-166
- [67] Zwingmann J, Konrad G, Kotter E et al. (2009) Computer-navigated Iliosacral Screw Insertion Reduces Malposition Rate and Radiation Exposure. *Clin Orthop Relat Res* 467:1833-1838
- [68] Arand M, Kinzl L, Gebhard F (2004) Computer-Guidance in Percutaneous Screw Stabilization of the Iliosacral Joint. *Clin Orthop Relat Res* 422:201-207
- [69] Kendoff D, Pearle A, Huffner T et al. (2007) First clinical results and consequences of intraoperative three-dimensional imaging at tibial plateau fractures. *J Trauma* 63:239-244
- [70] Weil YA, Liebergall M, Mosheiff R et al. (2011) Assessment of two 3-D fluoroscopic systems for articular fracture reduction: a cadaver study. *Int J CARS* 6:685-692
- [71] Wicky S, Blaser PF, Blanc CH et al. (2000) Comparison between standard radiography and spiral CT with 3D reconstruction in the evaluation, classification and management of tibial plateau fractures. *Eur Radiol* 10(8):1227-1232
- [72] Gwak HC, Kim JG, Kim JH, Roh SM (2015) Intraoperative Three-Dimensional Imaging in Calcaneal Fracture Treatment. *Clinics in Orthopedic Surgery* 7:483-489
- [73] Gonschorek O, Hauck S, Bühren V (2016) Intraoperative 3-D-Bildgebung in der Wirbelsäulenchirurgie. *Unfallchirurg* 119:817-824

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Röntgenbild (Positiv) von Anna Berta Röntgen aus 1985	2
Abbildung 2	Radiodermatitis an den Händen aus dem Jahre 1905	2
Abbildung 3	Bildgebung mit einer Röntgenkugel einer hüftgelenksnahen Femurfraktur	3
Abbildung 4	Abwärtsspirale der Auswirkungen osteoporotischer Wirbelkörperfrakturen	9
Abbildung 5	Operationsschritte einer bipedikulären Ballonkyphoplastie	11
Abbildung 6	Radiologisch dokumentierte Zementaustritte nach Kyphoplastie	13
Abbildung 7	Bauchlagerung eines Patienten auf dem Operationstisch	14
Abbildung 8	Postoperative Röntgenaufnahmen einer zementaugmentierten dorsalen internen Fixierung	15
Abbildung 9	Aufnahmen aus dem Hybrid-Operationssaal am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein Campus Kiel	16
Abbildung 10	Intraoperative computertomographische Darstellung einer atlantoaxialen Schraubenosteosynthese	19
Abbildung 11	Geschlechterverteilung der Kyphoplastien aus dem konventionellen Operationssaal (OP)	21
Abbildung 12	Altersverteilung der Kyphoplastien aus dem konventionellen OP	22
Abbildung 13	Geschlechterverteilung der Kyphoplastien aus dem Hybrid-OP	22
Abbildung 14	Altersverteilung der Kyphoplastien aus dem konventionellen OP	23
Abbildung 15	Geschlechterverteilung Fixateur Interne aus dem konventionellen OP	24
Abbildung 16	Altersverteilung der Kohorte Fixateur Interne aus dem konventionellen OP	24
Abbildung 17	Geschlechterverteilung der Patienten mit dorsaler Stabilisierung aus dem Hybrid-OP	25
Abbildung 18	Altersverteilung der Kohorte der dorsalen Stabilisierungen aus dem Hybrid-OP	26
Abbildung 19	Operationszeiten für Kyphoplastien aus dem konventionellen OP	27
Abbildung 20	Operationszeiten für Kyphoplastien aus dem Hybrid-OP	28

Abbildung 21	Operationszeiten für dorsale Stabilisierungen aus dem konventionellen OP	29
Abbildung 22	Operationszeiten für dorsale Stabilisierungen aus dem Hybrid-OP	29
Abbildung 23	Komplikationen der Kyphoplastien aus dem konventionellen OP	31
Abbildung 24	Komplikationen der Kyphoplastien aus dem Hybrid-OP	31
Abbildung 25	Komplikationen der Fixateure Interne aus dem konventionellen OP	32
Abbildung 26	Komplikationen der Fixateure Interne aus dem Hybrid-OP	33
Abbildung 27	Intraoperative Aufnahmen mit dem Flat-Panel-Detektor	36
Abbildung 28	Volumentomographie aus der operativen Versorgung einer beidseitigen Sakroiliakalverschraubung	37

Anhang

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde in der Abteilung für Unfallchirurgie und Orthopädie am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein Campus Kiel unter der Leitung von Professor Dr. Andreas Seekamp angefertigt. An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich auf vielfältige Weise bei der Anfertigung und Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Professor. Dr. Sebastian Lippross nicht nur für die Beratung bei der Findung eines geeigneten Themas, sondern insbesondere auch für die Unterstützung bei der Durchführung und Umsetzung der gesamten Arbeit. Insbesondere gilt mein Dank für die herausragende Betreuung und die vielen förderlichen Ratschläge sowie für die stets zu jeder Tages- und Nachtzeit geöffneten Tür. Danke zusätzlich für die Hilfe bei der statistischen Aufarbeitung und graphischen Aufbereitung der Ergebnisse.

Herrn Professor Dr. Andreas Seekamp gilt Dank für die Unterstützung mit förderlichen Ratschlägen und für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes mit optimalen Arbeitsbedingungen

Allen meinen Arbeitskollegen möchte ich für die Motivation, das angenehme Arbeitsklima und deren Vorbild danken, sie waren mitwirkend Motor und Antrieb meiner Arbeit.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, ohne deren Unterstützung während des Studiums und weit darüber hinaus ich nicht an diesem Punkt angelangt wäre. Ebenso möchte ich meinem Zwillingbruder Sebastian danken. Die brüderliche Rivalität und das Streben nach Individualität war große Motivation für die Erstellung einer Dissertation.

An letzter, doch eigentlich an erster Stelle möchte ich meiner Frau Antonia danken, die mir stets den Rücken freigehalten hat. Vornehmlich bin ich für ihr unermüdliches geduldiges Zuhören, ihre Hilfe in Wort und Tat, für ihre Rücksichtnahme und uneingeschränkten Aufmunterungen dankbar.

Erklärung und Veröffentlichung

Hiermit versichere ich, Frederic Braun, an Eides statt, dass ich meine Dissertation, abgesehen von Ratschlägen meines akademischen Betreuers, nach Form und Inhalt meine eigene Arbeit ist und dass ich außer den in der Arbeit aufgeführten keine weiteren Hilfsmittel benutzt habe. Meine Arbeit wurde bisher, weder ganz noch in kleinen Teilen, keiner anderen akademischen Stelle als Dissertation vorgelegt. Die vorliegende Arbeit entstand unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Teile dieser Arbeit wurden in dem folgenden Artikel veröffentlicht:

Braun, F, Peh, S, Weuster, M, Klueter, T, Seekamp, A, Lippross, S(2020) Der Hybridoperationssaal. Unfallchirurg 123:134-142
doi: 10.1007/s00113-019-0657-1