



Fakultät für Medizin der Technischen Universität München

**Vergleich perkutaner transpedikulärer Stabilisierung der Wirbelsäule
3D-navigationsgestützt und Roboter-assistiert.**

Sarah Luise Sperker

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Jürgen Schlegel

Prüfende der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. Christianto B. Lumenta
2. Prof. Dr. Bernhard Meyer

Die Dissertation wurde am 07.01.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 16.06.2020 angenommen.

Gewidmet meinen Eltern in Liebe.

Inhalt

1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	3
2.1. Anatomie der Wirbelsäule	3
2.2. Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen	5
2.3. Pathomechanismen und Epidemiologie von Wirbelkörperfrakturen	10
2.3.1. Traumatisch	10
2.3.2. Osteoporotisch	11
2.3.3. Infektiös	15
2.3.4. Tumorös	20
2.4. Diagnostik von Wirbelkörperfrakturen	26
2.5. Geschichte der Robotik	28
2.6. Geschichte der Wirbelsäulenversteifung	30
2.7. Schraubeneintrittspunkt und Pedikellage	31
2.8. Behandlungsstrategien thorakolumbaler Wirbelkörperfrakturen	32
2.9. Fusionstechniken	33
3. Zielsetzung der Arbeit	35
4. Material und Methoden	36
4.1. Patientenkollektiv	36
4.2. Lokalisation der Operation	36
4.3. Anzahl der Segmente	38
4.4. Operationsindikationen	38
4.5. Operationstechniken	40
4.5.1. Perkutane transpedikuläre Stabilisierung allgemein	40
4.5.2. 3D-Navigationsgestützte perkutane transpedikuläre Stabilisierung	40
4.5.3. Roboter-gestützte perkutane transpedikuläre Stabilisierung	43
4.6. Ausgewertete Parameter	46
4.6.1. Operationsdauer	46
4.6.2. Strahlenbelastung	47
4.6.3. Postoperative Schraubenlage	48
4.7. Statistische Auswertung	52
5. Ergebnisse	53
5.1. Operationsdauer/ Zeit pro gesetzter Schraube	53
5.2. Strahlenbelastung	54

5.3. Auswertung der postoperativen Schraubenlage	55
5.4. Peri- und postoperative Komplikationen	56
5.4.1. Operative Revisionen	56
5.4.2. Sekundäre neurologische Defizite	57
5.4.3. Postoperative Komplikationen	57
6. Diskussion.....	58
6.1. Zusammenfassung der Hauptergebnisse	58
6.2. Methodik und Ergebnisse	58
6.2.1. Patientenkollektiv	58
6.2.2. Operationsverfahren	59
6.2.3. Auswertung der Schraubenlage	60
6.2.4. Operationsdauer	61
6.2.5. Strahlenbelastung	61
6.3. Ausblick.....	62
7. Abkürzungsverzeichnis	63
8. Literaturverzeichnis.....	65
9. Abbildungsverzeichnis	75
10. Danksagung.....	76

1. Zusammenfassung

Die transpedikuläre Stabilisierung nimmt innerhalb der Wirbelsäulen Chirurgie einen wichtigen Stellenwert ein, da sie bei verschiedensten Diagnosen und in fast allen Bereichen der Wirbelsäule eingesetzt werden kann. Aufgrund der Relevanz dieser Operationsmethode existieren viele Hilfssysteme, die mit bildgestützter Navigation oder Roboter-assistierter Technik die Operation erleichtern sollen. Wichtigster Punkt ist hierbei die Präzision der intrapedikulären Lage der eingebrachten Schrauben, da Schraubenfehlagen zu Verletzungen vaskulärer und neuraler Strukturen mit konsekutiven neurologischen Defiziten führen können.

Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich eines 3D-Navigations-gestützten und eines Roboter-assistierten transpedikulären Stabilisierungsverfahrens hinsichtlich der postoperativen Ergebnisse. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Gesamtstrahlenbelastung, der Operationsdauer sowie der Beurteilung der intrapedikulären Schraubenlage.

Hierfür wurden 60 Patienten, die von April 2014 bis Februar 2018 in der Neurochirurgischen Klinik der München Klinik Bogenhausen operiert worden waren, anhand des verwendeten Operationsverfahrens in zwei Gruppen unterteilt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied in der applizierten Strahlendosis/Patient (Mittelwertunterschied 0,86, $p = 0,59$). Jedoch konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen der gewählten Operationsmethode und der damit erzielten Präzision der intrapedikulären Schraubenlage aufgezeigt werden. Das Roboter-assistierte Verfahren zeigte sich hierbei deutlich überlegen ($p < 0,01$). Hinsichtlich der Operationsdauer war bei Verwendung des Roboter-gestützten Verfahrens eine Lernkurve erkennbar, das bildgestützte-Navigationssystem zeichnete sich allerdings durch kürzere Operationszeiten aus.

Hinsichtlich der Rechtfertigung des klinischen Einsatzes von Robotik in der Wirbelsäulenchirurgie müssen noch weitere klinische Vergleichsarbeiten erfolgen.

2. Einleitung

2.1. Anatomie der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule des Menschen ist unterteilt in Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule sowie das Kreuzbein (Schünke et al., 2005). Die präsakrale Wirbelsäule, bestehend aus Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule setzt sich dabei aus 34 Wirbelkörpern zusammen. Das Kreuzbein besteht ursprünglich aus 5 Kreuzbeinwirbeln, die nach der Geburt zu einem Knochen fusionieren. Physiologisch zeigen die unterschiedlichen Wirbelsäulenabschnitte eine typische Krümmung, die als Anpassung an den aufrechten Gang des Menschen und die daraus resultierende axiale Belastung entstanden ist. So besteht im Bereich von Hals- und Lendenwirbelsäule eine Lordose, während die Brustwirbelsäule eine kyphotische Krümmung aufweist.

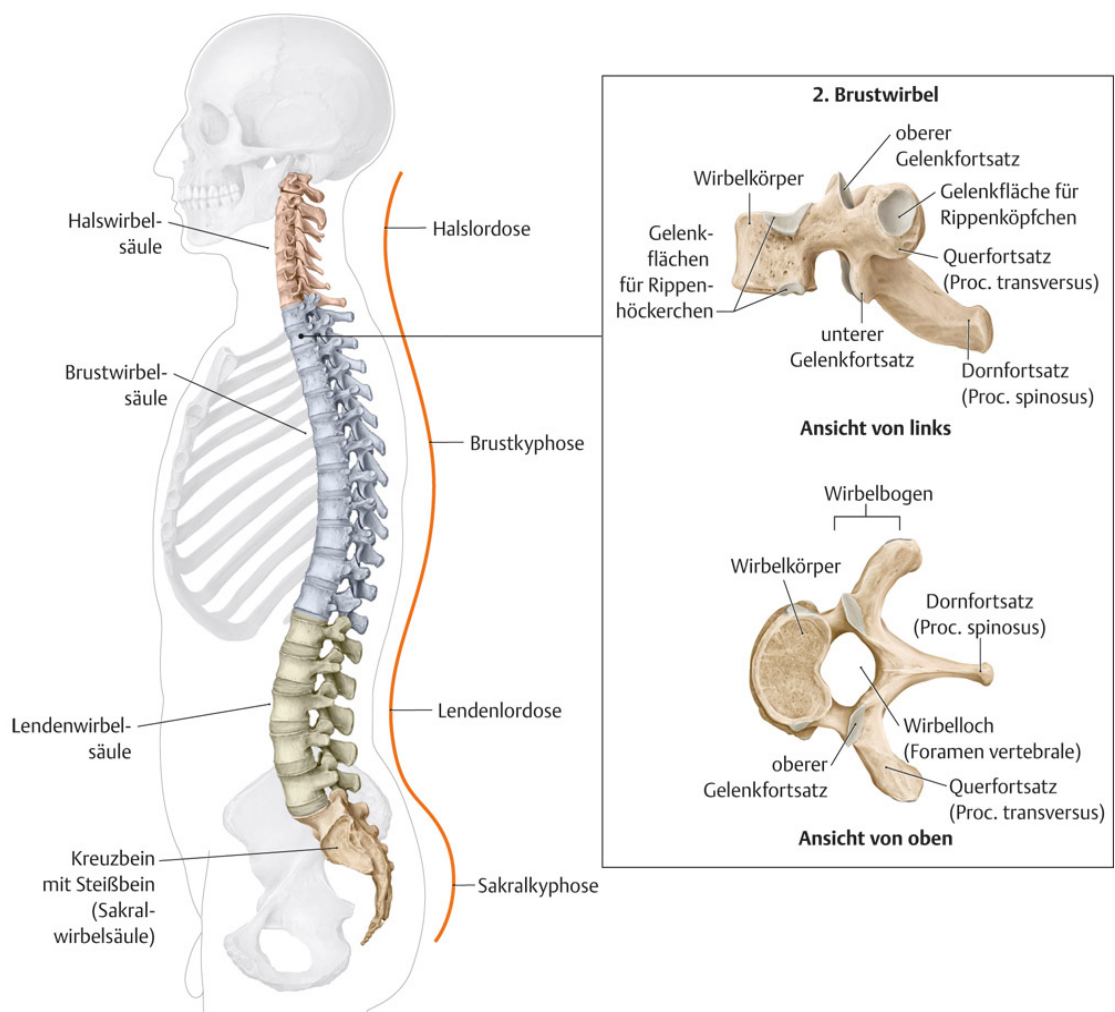


Abbildung 1: Anatomie der Wirbelsäule und der Wirbelkörper (Schünke, Schulte, & Schumacher, 2005)

Die einzelnen Wirbel setzen sich zusammen aus Wirbelkörper, Wirbelbogen und Dornfortsatz. Hinzu kommen zwei Querfortsätze, die zum Beispiel im Bereich der Brustwirbelsäule die gelenkige Verbindung zu den Rippen bilden, sowie vier Gelenkfortsätze, über welche die Wirbelkörper untereinander verbunden sind.

Zusätzliche Stabilität erlangt die Wirbelsäule durch einen komplizierten Muskel- und Bandapparat. Wirbelbogen und Wirbelkörper umschließen das Wirbelloch. Die Gesamtheit aller Wirbellöcher bildet dabei den Spinalkanal, in dem das Rückenmark verläuft (Schünke et al., 2005).

Eine Wirbelkörperfraktur bzw. die daraus resultierende Instabilität führt, bedingt durch die Veränderung der Statik, zu Schmerzen sowie Funktionsstörungen bis hin zu neurologischen Ausfällen. In dieser Arbeit möchte ich im speziellen eingehen auf Wirbelkörperfrakturen traumatischer, osteoporotischer, infektiöser und tumoröser Genese.

2.2. Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen

Seit den sechziger Jahren versuchten verschiedene Klassifikationen thorakolumbale Wirbelsäulenverletzungen einzuteilen und zu beschreiben bzw. die daraus resultierende spinale Instabilität zu klassifizieren. Auf einige dieser Klassifikation möchte ich im Folgenden näher eingehen:

Den Anfang machte Holdsworth 1964, indem er Wirbelsäulenverletzungen entsprechend dem Verletzungsmuster in 6 Untergruppen unterteilte (Holdsworth, 1964):

- I. vorderer Keilbruch
- II. Dislokation
- III. Dislokation durch Rotation
- IV. Extensionsfraktur
- V. Berstungsfraktur
- VI. Scherfraktur

Er ging dabei von einem 2-Säulen-Modell der Wirbelsäule aus. Die vordere Säule bestehend aus Wirbelkörper und Bandscheibe, die hintere aus Wirbelbogen, Gelenkfortsätzen und posteriorem Bandapparat.

Denis modifizierte dieses System 1983 indem er eine mittlere Säule einführte und so das 3-Säulen-Modell definierte (Denis, 1983):

- | | |
|------------------------|---|
| <u>ventrale Säule:</u> | vorderes Längsband, vordere 2/3 des Wirbelkörpers inkl. Wirbelkörpervorderkante und Bandscheibe |
| <u>mittlere Säule:</u> | hinteres Längsband, hinteres 1/3 des Wirbelkörpers inkl. Hinterkante des Wirbelkörpers und Bandscheibe |
| <u>dorsale Säule:</u> | Wirbelbögen- und Fortsätze, Facettengelenke, post. Bandapparat (L. supraspinosum, L. interspinosum, L. flavum, Facettengelenkscapsel) |

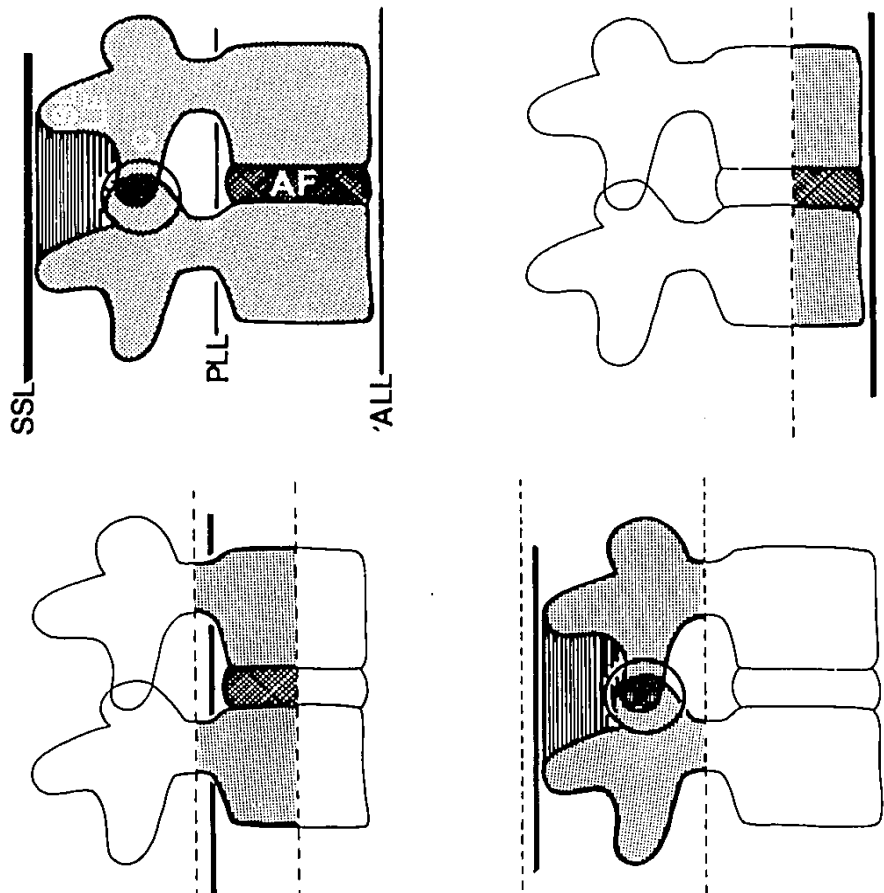


Abbildung 2: 3-Säulen-Modell nach Denis (Denis, 1983)

Er definierte aus diesem Modell folgende Stabilitätskriterien:

stabile Fraktur: Verletzung der ventralen Säule

erhöhtes Instabilitätsrisiko: Verletzung der mittleren oder dorsalen Säule

instabile Fraktur: Verletzung von ≥ 2 Säulen

Magerl et al. unterteilten Wirbelsäulenverletzungen aufgrund ihrer pathomorphologischen Charakteristika in drei Typen (Magerl et al., 1994):

Typ A: Kompressionsverletzungen

Typ B: Distraktionsverletzungen

Typ C: Translationsverletzung

Jede der drei Gruppen wurde wiederum in 3 Untergruppen unterteilt, die ebenfalls aus mehreren Kategorien bestand. Innerhalb der Klassifikation wurden die Verletzungen hierarchisch nach progredientem Schweregrad der Verletzung dargestellt. Das heißt der Schweregrad war progredient von Typ A

bis Typ C und ebenso innerhalb der verschiedenen Untergruppen. Der Schweregrad wurde dabei von der resultierenden Instabilität abhängig gemacht, prognostische Faktoren wurden, soweit möglich, ebenfalls berücksichtigt (Magerl et al., 1994).

Im Jahr 2005 wurde von Vaccaro et al. ein neues Scoring-System publiziert, der "Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score" (TLICS). Die Autoren definierten drei wichtige Kriterien für die Klassifikation von thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen: die Morphologie der Verletzung, die Integrität des posterioren Bandkomplexes (PLC) und der neurologische Status des Patienten (Vaccaro et al., 2005). Wie bei Magerl et al. wurden auch hier nach der zugrundeliegende Morphologie der Verletzung drei Hauptgruppen gebildet: Kompression (A), Rotation/ Translation (B) und Distraction (C)

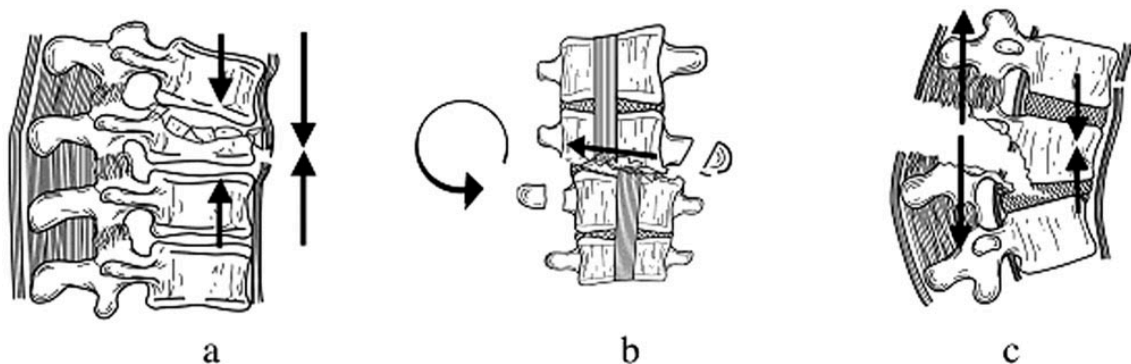


Abbildung 3: Die drei zugrundeliegenden Verletzungsmuster (a Kompression, b Rotation/Translation, c Distraction) (Vaccaro et al., 2005)

Der posteriore Bandkomplex (PLC) besteht, wie bereits bei Denis beschrieben, aus L. supraspinosum, L. interspinosum, L. flavum und der Facettengelenkscapsel (Vaccaro et al., 2005). Für jedes der drei oben genannten Kriterien werden Punkte vergeben, nach der Gesamtpunktzahl wird dann die Empfehlung zu konservativer oder operativer Therapie gegeben. Auch für den operativen Zugangsweg (ventral, dorsal, Kombination) wird je nach neurologischem Status des Patienten und Integrität des PLC eine Empfehlung ausgesprochen (Vaccaro et al., 2005).

Die Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO Foundation) hat 2013 schließlich eine im klinischen Alltag respektierte Klassifikation thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen herausgegeben, welche die Klassifikationen von Magerl und den TLICS kombiniert. Diese Klassifikation basiert auf der Evaluation von drei Merkmalen: Morphologie der Verletzung, neurologischer Status und Modifizierungsfaktoren (Verletzung des Bandapparates, Komorbiditäten des Patienten) (Vaccaro et al., 2013).

Typ A: Kompressionsverletzungen

A0-A2: nicht-tragende Frakturen des Wirbelkörpers

A0: kleinere, nicht-tragende Fraktur

A1: Keilfraktur

A2: Spaltungsbruch

A3-A4: Berstungsbrüche des Wirbelkörpers

A3: inkomplett

A4: komplett

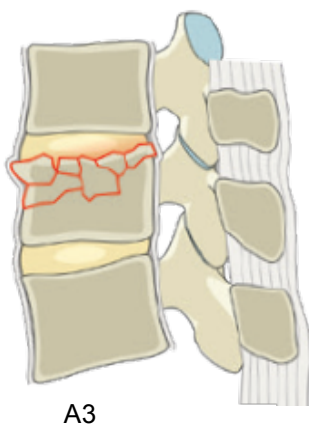
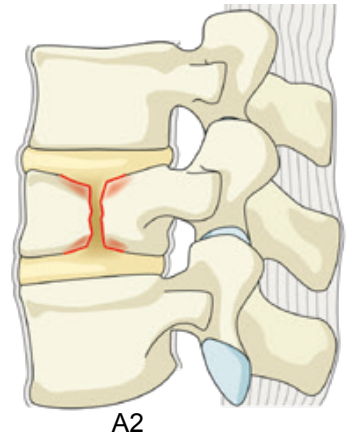
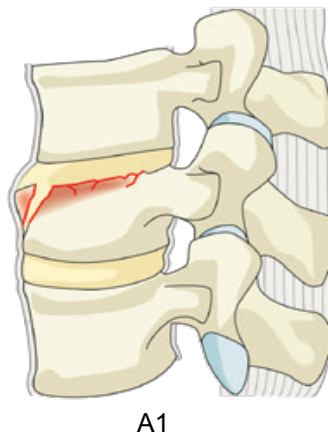
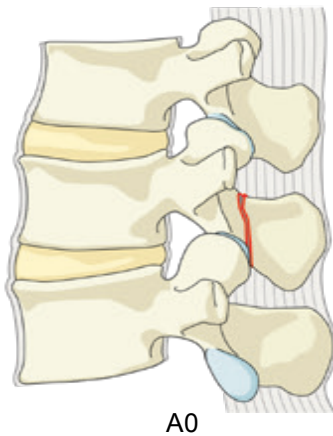


Abbildung 4:
Kompressions-
verletzungen A0-A4
(Vaccaro et al., 2013)

Typ B: Distraktionsverletzungen

B1-B3: Zerreißungsverletzungen der ossären und ligamentären Wirbelkörperstrukturen

B1: transossäre Spaltungsfraktur

B2: Zerreißung des hinteren Längsbandes und inkompletter Berstungsbruch

B3: Destruktion der Bandscheibe und Zerreißung des vorderen und hinteren Längsbandes (Hyperextensionsverletzung)

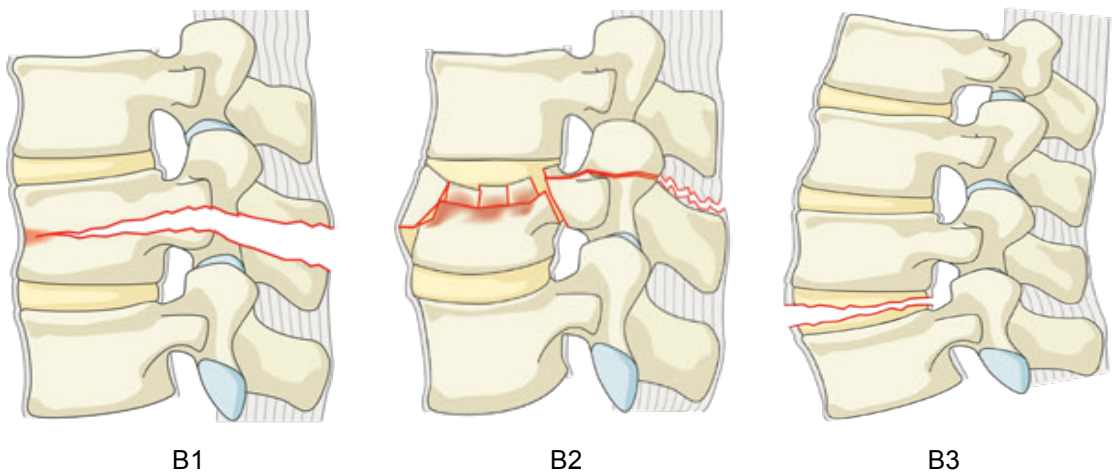


Abbildung 5: Distraktionsverletzungen B1-B3 aus (Vaccaro et al., 2013)

Typ C: Translationsverletzungen

C: Verletzungen aller 3 Säulen durch Translation

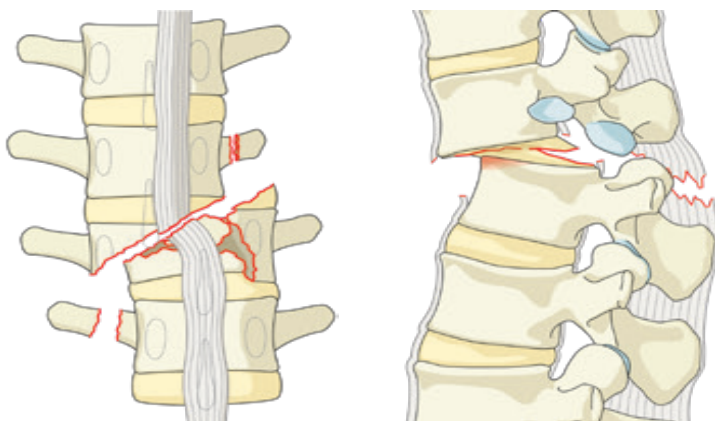


Abbildung 6: Translationsverletzungen aus (Vaccaro et al., 2013)

2.3. Pathomechanismen und Epidemiologie von Wirbelkörperfrakturen

2.3.1. Traumatisch

Die größte Beweglichkeit der Wirbelsäule besteht im Bereich der kranialen Halswirbelsäule und der kaudalen Lendenwirbelsäule (Bork, 2016). Die thorakale Wirbelsäule ist durch die zusätzliche Fixierung durch den Brustkorb in der Beweglichkeit stark eingeschränkt. Diese Übergänge zwischen mobilen und immobilen Abschnitten der Wirbelsäule bilden hierbei Prädilektionsstellen für traumatische Wirbelsäulenverletzungen. Der thorakolumbale Übergang (BWK10-LWK2) ist dabei wesentlich häufiger betroffen als der cervikothorakale Übergang (HWK6-BWK1) (Gonschorek & Bühren, 2014).

Traumatisch bedingte Wirbelkörperfrakturen können durch direkte oder indirekte Gewalteinwirkung auf die Wirbelsäule entstehen. Sie können beispielsweise durch ein Stauchungs-, Extensions-, Flexions- oder Rotationstrauma oder durch deren Kombination entstehen (Bork, 2016).

Mit einer Geschlechterverteilung von 3:1 (m:w) zeigt sich, dass Männer deutlich häufiger traumatische Wirbelsäulenverletzungen erleiden. Dies gilt vor allem für junge Männer zwischen 16 und 30 Jahren, ein zweiter Peak besteht bei über 50-jährigen Männern. Ursächlich ist in 40-45% der Fälle ein Verkehrsunfall, dicht gefolgt von freiwilligen oder unfreiwilligen Stürzen aus großer Höhe, die 15-30% der Fälle ausmachen. Sport und Freizeitunfälle machen 15-25% der Ursachen aus, in geringerer Anzahl finden sich auch Arbeitsunfälle sowie aggressionsbedingte Körperverletzungen (Charles & Steib, 2015).

Die Angabe exakter epidemiologischer Daten zur Verletzungshäufigkeit der Wirbelsäule ist schwierig, da minder schwere und konservativ behandelte Fälle nicht ausreichend erfasst werden. In Deutschland ereignen sich jährlich ca. 10 000 Fälle schwerwiegender Wirbelsäulenverletzungen. Davon betreffen ca. 2000 Fälle die Halswirbelsäule, 8000 Fälle verteilen sich auf Brust- und Lendenwirbelsäule. Somit betreffen 70-80% der relevanten Wirbelsäulenverletzungen BWS und LWS, davon mehr als die Hälfte den

thorakolumbalen Übergang. Der 1. Lendenwirbelkörper und das Segment BWK12/LWK1 sind am häufigsten betroffen (Bühren, 2003).

2.3.2. Osteoporotisch

Die Osteoporose ist eine systemische Erkrankung, bei der die Knochenmasse vermindert wird und sich die Mikroarchitektur des Knochenaufbaus verändert. Hierbei steigt die Fragilität sowie die Frakturanfälligkeit des Knochens (Dachverband Osteologie e.V., 2017). Pathophysiologisch liegt eine Änderung der Auf- und Abbauprozesse des Knochens vor, wobei aufgrund der zugrundeliegenden Ursachen zwischen primärer und sekundärer Osteoporose unterschieden wird (Herold, 2010). Die primäre Osteoporose ist mit ca. 95% die häufigere Form, hierunter fällt auch die im klinischen Alltag an Relevanz zunehmende postmenopausale Osteoporose. Durch den in und nach der Menopause vorliegenden Östrogenmangel kommt es zu einer Verschiebung des Gleichgewichts zwischen Knochenauf- und -abbau, was einen spongiosabetonten Knochenmasseverlust zur Folge hat. Die sekundäre Osteoporose, auch senile Osteoporose genannt, entsteht beispielweise durch Fehl- und Mangelernährung sowie iatrogen durch die Langzeittherapie mit Kortikosteroiden (Herold, 2010).

30% aller Frauen entwickeln nach der Menopause eine klinisch relevante Osteoporose, was einem Gesamtanteil von ca. 80% aller Osteoporosefälle entspricht. Im Alter von über 70 Jahren nimmt die senile Osteoporose bei beiden Geschlechtern stetig zu und unterliegt einer Gesamtverteilung von ca. 2:1 (w:m) (Herold, 2010).

Die Diagnostik der Osteoporose erfolgt neben laborchemischen Untersuchungen von Calcium, Phosphat, alkal. Phosphatase, Gamma-GT und TSH durch die Messung der Knochendichte. Diese wird mittels dualer X-ray Absorptiometrie (DXA) bestimmt (Tella & Gallagher, 2014). Hierbei wird die Knochendichte im Bereich des proximalen Femurs sowie der Lendenwirbelsäule gemessen. Die Knochendichte wird im T-Score angegeben, der die in Standardabweichungen angegebene Abweichung der Knochendichte

von der einer 20- bis 29-jährigen Frau beschreibt. Abhängig vom T-Score erfolgt dann die Einteilung in klinische Stadien, wobei zwischen Osteopenie, Osteoporose und manifester Osteoporose unterschieden wird.

Stadieneinteilung der Osteoporose nach Minne (Minne, 1995)

<u>Osteopenie</u>	T-Score -1 bis -2,5 / keine Frakturen
<u>Osteoporose</u>	T-Score < -2,5 / keine Frakturen
<u>manifeste Osteoporose</u>	T-Score < -2,5 / 1-3 Wirbelkörperfrakturen
<u>fortgeschrittene Osteoporose</u>	T-Score < -2,5 / multiple Wirbelkörperfrakturen, häufig auch extraspinale Frakturen

Nach Definition der WHO aus dem Jahre 1994 liegt eine Osteoporose dann vor, wenn der Knochenmineralgehalt um $\leq -2,5$ Standardabweichungen vom Mittelwert einer 20-29-jährigen Frau abweicht (Dachverband Osteologie e.V., 2017).

Die fortgeschrittene Osteoporose ist dabei gekennzeichnet durch das Vorliegen von osteoporotisch bedingten Frakturen, die vor allem Schenkelhals- und Wirbelkörperfrakturen entsprechen (Tella & Gallagher, 2014).

Einen wichtigen Stellenwert in der Therapie hat die Prophylaxe eines Fortschreitens der Osteoporose. Ziel ist eine Verbesserung der Knochenstabilität sowie die Reduktion von Frakturen. Bestandteile sind regelmäßige körperliche Aktivität zur Verbesserung von Muskelkraft und Koordination, die Vermeidung von Untergewicht sowie die Zufuhr von Calcium und Vitamin D (Dachverband Osteologie e.V., 2017).

Ziel der medikamentösen Therapie der Osteoporose ist eine Verminderung des Knochenabbaus bzw. eine Verbesserung der Knochenstruktur. Beispiele hierfür sind die Gruppe der Bisphosphonate, die durch eine Hemmung der osteoklastischen Aktivität den Abbau der ossären Substanz verlangsamen.

Weitere Beispiele sind monoklonale Antikörper, die in die Signalkaskade des Knochenabbaus eingreifen und bestimmte Komponenten blockieren.

Osteoporotisch bedingte Wirbelkörperfrakturen stellen sich in der bildgebenden Diagnostik als Deck- oder Grundplattenimpressionsfrakturen dar, im fortgeschrittenen Stadium zeigt sich meist das charakteristische Bild einer Fisch- oder Keilwirbelbildung (Niethard, 2009).

Die Arbeitsgemeinschaft osteoporotischer Frakturen der Sektion Wirbelsäule der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie hat 2018 eine Klassifikation der osteoporotischen Frakturen (OF) erarbeitet (Schnake et al., 2018):

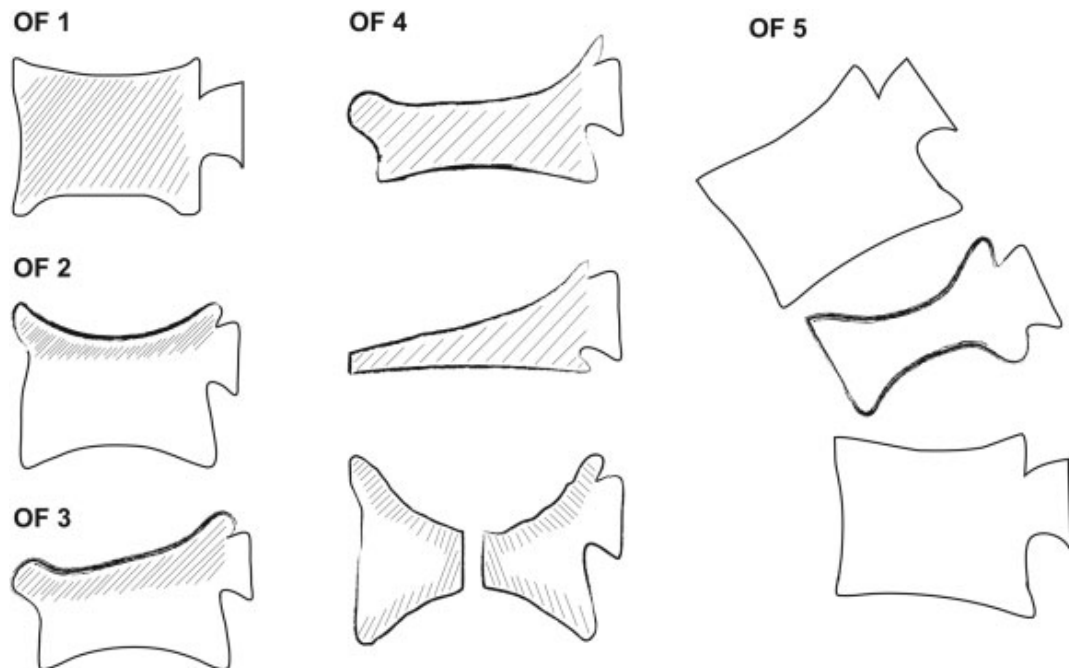


Abbildung 7: OF-Klassifikation (Schnake et al., 2018)

- OF1** keine Deformation
- OF2** Deformation mit keiner/geringer Beteiligung der Hinterkante
- OF3** Deformation mit ausgeprägter Hinterkantenbeteiligung
- OF4** Verlust der Rahmenstruktur, Wirbelkörperkollaps, Kneifzangenfraktur
- OF5** Distraktions- oder Rotationsverletzungen

OF1-OF2: stabile Fraktur

OF3: potentiell instabile Fraktur

OF4-OF5: instabile Fraktur

Zur Therapieentscheidung zwischen konservativer und operativer Therapie sollten außerdem die vorliegende Schmerzsymptomatik, die Komorbiditäten, der Allgemeinzustand des Patienten und der neurologische Status berücksichtigt werden (Schnake et al., 2018).

Bei stabilen osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen kann eine konservative Therapie eingeleitet werden. Diese sollte eine schnellstmögliche Mobilisierung zur Vermeidung von Folgekomplikationen der Immobilität wie Pneumonie, Thromboembolien und funktionellen Verlusten beinhalten. Zudem sollte eine adäquate Schmerzmedikation nach dem WHO-Stufenschema begonnen werden. Um eine schmerzarme Mobilisation zu ermöglichen sollte außerdem die Anpassung einer stabilisierenden Orthese erwogen werden (Dachverband Osteologie e.V., 2017).

Sollte eine konservative Therapie keine ausreichende Schmerzlinderung erbringen stehen mehrere minimal-invasive Operationsverfahren zur Verfügung: bei der Ballonkyphoplastie wird transpedikulär über einen Trokar ein Ballonsystem in den Wirbelkörper eingebracht. Dieses wird unter fluoroskopischer Kontrolle dilatiert und richtet so den eingebrochenen Wirbelkörper wieder auf. In den so entstandenen Hohlraum wird dann niedrigvisköser Knochenzement (PMMA) injiziert. Auch bei der Vertebroplastie wird über ein transpedikuläres Trokarsystem Knochenzement im frakturierten Wirbelkörper platziert, allerdings erfolgt zuvor keine Aufdehnung durch ein Ballonsystem. Ein neuere Methode ist das "Vertebral Body Stenting", das ähnlich wie die Kyphoplastie ein Ballonsystem zur Dilatation nutzt. Allerdings verbleibt nach Entfernung des Ballons ein Metall-Stent, in den dann der Knochenzement injiziert wird (Rotter et al., 2010). Ziel der beschriebenen Verfahren ist die Schmerzlinderung, die durch eine Wiederherstellung der Statik

der Wirbelsäule sowie die Verminderung frakturbedingter Mikrobewegungen erreicht wird (Da Fonseca et al., 2006).

Im Falle einer instabilen Fraktur besteht die Möglichkeit der operativen Therapie mittels Spondylodese. Diese kann über einen dorsalen Zugang erfolgen und in Hybridtechnik mit einer Kyphoplastie kombiniert werden. Im Falle einer deutlichen Deformität sollte ein kombiniertes ventrodorsales oder dorsoventrales Therapiekonzept in Betracht gezogen werden (Gonschorek & Bühren, 2014).

2.3.3. Infektiös

Infektionen der Wirbelsäule sind mit 0,2-2 Neuerkrankungen pro 100 000 Einwohnern in den westlichen Ländern relativ selten (Cheung & Luk, 2012). Sie machen ca. 2-4% aller Knocheninfektionen aus. Allerdings ist die Inzidenz steigend, was an der zunehmenden Lebenserwartung sowie der steigenden Anzahl immunsupprimierter Patienten z.B. im Rahmen eines Diabetes mellitus, einer Rheuma- oder Tumorerkrankung liegt. Auch die Zunahme von i.v.-Drogenabusus und Infektionskrankheiten wie HIV oder Hepatitis spielen diesbezüglich eine wichtige Rolle (Cheung & Luk, 2012).

Man unterscheidet zwischen einer Spondylitis, die nur die Wirbelkörper betrifft und einer Spondylodiszitis, die auf angrenzende Strukturen wie Bandscheiben und Bandstrukturen übergreift. Eine isolierte Diszitis, die nur die Bandscheibe betrifft, kommt fast ausschließlich im Kindesalter vor (Moskopp & Wassmann, 2015). Der am häufigsten von der Entzündung betroffene Teil der Wirbelsäule ist der Lendenwirbelbereich (45-50%), dicht gefolgt von Brust- (35%) und Halswirbelsäule (3-20%), wohingegen die Sakralregion, bis auf den lumbosakralen Übergang, eher selten betroffen ist (Jaramillo-de la Torre et al., 2006).

Die Spondylodiszitis ist eine Erkrankung des mittleren und höheren Lebensalters, Männer sind aus bisher nicht bekannten Gründen ca. zwei- bis dreimal so häufig betroffen wie Frauen (Cheung & Luk, 2012).

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Infektionen zu unterteilen, etwa nach Art der Erreger oder dem Infektionsweg. Eine einheitliche Klassifikation gibt es jedoch nicht. Eine Möglichkeit der Einteilung unterscheidet nach der Erregerart zwischen spezifischer und unspezifischer Spondylodiszitis. Die weitaus häufigere Form, die unspezifische Spondylodiszitis, wird vor allem durch Staphylokokken, Streptokokken, Enterokokken, Pseudomonas und Brucellen ausgelöst. Bei immunsupprimierten Patienten ist auch eine mykotische Infektion möglich (Cramer & Haase, 2003).

Die spezifische Spondylodiszitis wird ausgelöst durch eine Infektion mit Tuberkelbakterien, seltener auch durch *Salmonella typhosa*, *Treponema pallidum* oder *Mycobacterium leprae*. Es handelt sich hierbei im Gegensatz zur unspezifischen Infektion um langsam fortschreitende, chronische Verläufe mit teilweise mehrsegmentalem Befall. Nichttuberkulöse spezifische Verlaufsformen sind bei geschwächter Immunität zu finden, insgesamt jedoch eher selten. Die tuberkulöse Form der Spondylodiszitis spielt zur Zeit in Deutschland eine untergeordnete Rolle. Mit der weltweit beobachteten Wiederkehr der Tuberkulose, insbesondere verbunden mit den auftretenden Antibiotikaresistenzen und der zunehmenden Flüchtlingspopulation, ist eine Häufung des Wirbelsäulenbefalls jedoch auch hierzulande möglich (Cramer & Haase, 2003). In etwa einem Drittel der Fälle ist eine Detektion des für die Infektion verantwortlichen Bakteriums nicht möglich (Govender, 2005). Vor allem im chronischen Stadium ist eine Keimgewinnung oft schwierig. Hauptgrund hierfür ist eine vorangegangene systemische Antibiotikatherapie (Sobottke et al., 2008).

Aufgrund des vorliegenden Infektionsweges wird zwischen exogener und endogener Infektion unterschieden. Exogene Infektionen werden z. B. nach Operationen, Punktionen oder Infiltrationstherapien beobachtet. Selten auch nach stattgehabtem Trauma. Bei der endogenen Infektion liegt der Infektionsherd fernab der Wirbelsäule z. B. im Bereich der Zähne, der Bauchorgane oder intrathorakal. Durch hämatogene oder lymphogene Aussaat

oder per continuitatem kommt es dann zu einer Keimstreuung und einer spinalen Infektion (Cramer & Haase, 2003).

Klinisch zeigt sich häufig ein variables Bild mit lokalem Druck- und Klopfschmerz über dem betroffenen Segment sowie progredientem Rückenschmerz. Im fortgeschrittenen Stadium sind, bedingt durch epidurales Empyem oder fortschreitende knöchernen Destruktion mit neuroforaminaler oder spinaler Enge, auch eine radikuläre Schmerzausstrahlung sowie sensible und motorische Ausfälle bis hin zum Querschnittssyndrom möglich. Häufig treten im Frühstadium subfebrile Temperaturen und ggf. eine Gewichtsabnahme auf. Im Spätstadium sind Fieber und Schüttelfrost bis hin zum septischen Schock möglich. Laborchemisch zeigt sich meist ein erhöhtes C-reaktives Protein (CRP), eine Beschleunigung der Blutsenkungsgeschwindigkeit (BSG) sowie eine Leukozytose. Bei Vorliegen einer Sepsis sind in 1/4 der Fälle positive Blutkulturen zu finden. Bei chronischen Verläufen können die genannten Parameter nur schwach erhöht oder sogar normwertig sein, was die Diagnosestellung erschwert bzw. deutlich verzögert (Moskopp & Wassmann, 2015).

Als diagnostisches Mittel der Wahl gilt die Kontrastmittel-gestützte Kernspintomographie, da hier das Ausmaß der Weichteilinfektion mit evtl. vorliegender intraspinaler Komponente und neurogener Kompression am Zuverlässigsten beurteilt werden kann (Ledermann et al., 2003). Sensitivität und Spezifität liegen hier bei > 90%. Die früher häufig durchgeführte Skelettszintigraphie ist zwar hochsensibel (90%), jedoch relativ unspezifisch (78%) (Cheung & Luk, 2012). Die Computertomographie ist der MRT-Untersuchung bezüglich Sensitivität und Spezifität unterlegen, jedoch kann das Ausmaß der knöchernen Destruktion wesentlich detaillierter wiedergegeben werden. Zudem bekommt die CT-Diagnostik einen wichtigen Stellenwert, wenn z.B. bei Vorliegen eines Herzschrittmachers keine MR-Diagnostik möglich ist (Cramer & Haase, 2003). Native Röntgenaufnahmen zeigen meist erst im fortgeschrittenen Stadium bei manifesten knöchernen Defekten einen Befund. Zur Fokussuche sollten Echokardiographie, Urinuntersuchung,

Abdomensonographie und Thoraxröntgen ergänzt werden sowie eine Beurteilung des Zahnstatus. Bei schwieriger diagnostischer Abgrenzung kann auch ein ^{18}F FDG-PET-CT eine wertvolle Ergänzung sein (Moskopp & Wassmann, 2015).

Zur Keimgewinnung, die vor Beginn einer antibiotischen Therapie durchgeführt werden sollte, dient die Abnahme von Blutkulturen sowie eine CT-gestützte Punktion von vorliegenden Abszessformationen. Im Rahmen einer operativen Therapie ist auch die offene Biopsie und Keimgewinnung möglich (Cramer & Haase, 2003).

Es gibt konservative und operative Therapiemöglichkeiten der Spondylodiszitis, wobei es bisher trotz vieler Guidelines kein standardisiertes Verfahren gibt und die Therapieentscheidung häufig von Erfahrungen oder Vorlieben des behandelnden Arztes abhängt (Rutges et al., 2016). Grundsätzlich sollte die Therapieentscheidung von mehreren Faktoren abhängig gemacht werden.

Im Falle einer unkomplizierten Spondylodiszitis ohne relevante knöcherne Destruktion und fehlende neurologische Ausfallssymptomatik kommt eine konservative Therapie in Frage. Auch im Falle älterer und multimorbider Patienten sollte diese Möglichkeit in Betracht gezogen werden (Sobottke et al., 2008). Die konservative Therapie besteht dabei aus einer Kombination von antibiotischer Therapie und Immobilisation. Diese wird meist durch ein Stützkorsett erreicht, das für mindestens 4-6 Wochen getragen werden sollte. Mit der Orthese ist eine normale Mobilisierung des Patienten möglich. Von der in älteren Studien beschriebenen Bettruhe zur Immobilisation ist man heutzutage weitestgehend abgekommen (Cheung & Luk, 2012).

Nach Rücksprache mit den Kollegen der Mikrobiologie wird entsprechend des Keimspektrums eine knochengängige intravenöse Antibiose begonnen, die bis zu einem signifikanten Abfall des C-reaktiven Proteins gegeben wird. Danach kann die Antibiose oral weitergeführt werden. Über die optimale Dauer der antibiotischen Therapie gibt es verschiedene Auffassungen und je nach Studie variiert die Therapiedauer von 4 Wochen bis zu 6 Monaten. Unklar ist auch

weiterhin, ob ein direkter Zusammenhang zwischen Therapiedauer und einem Wiederaufflammen der Spondylodiszitis oder einem Therapieversagen besteht (Rutges et al., 2016).

Ein wichtiger Faktor für den Erfolg der konservativen Therapie ist die Patientencompliance, da sowohl die antibiotische Therapie als auch die notwendige Immobilisation langwierig und schwierig mit dem normalen Alltag zu kombinieren sind. Die inkonsequente Immobilisation gefährdet die Infektausheilung und kann so im schlimmsten Fall im chronischen Schmerzsyndrom enden (Cramer & Haase, 2003).

Ziele der operativen Therapie einer Spondylodiszitis sind die Infektsanierung, die Wiederherstellung oder Aufrechterhaltung der spinalen Stabilität und die Schmerzlinderung (Linhardt et al., 2007). Die Indikationen für eine operative Therapie sind vielfältig: neurogene Kompression mit neurologischen Defiziten, Instabilität der betroffenen Wirbelsäulensegmente aufgrund knöcherner Destruktion, bereits vorliegende infektbedingte Deformitäten der Wirbelsäule, abgekapselte Abszessformationen und das Versagen konservativer Therapieversuche (Cramer & Haase, 2003; Rutges et al., 2016). Relative Operationsindikationen sind mangelnde Compliance des Patienten und eine durch konservative Therapie unbeherrschbare Schmerzsymptomatik (Cramer & Haase, 2003).

Auch über das erfolgversprechendste Verfahren der operativen Versorgung herrscht Uneinigkeit. Während früher zumeist die anteriore Dekompression mit nachfolgender ventraler und dorsaler Stabilisierung der Goldstandard war (Gouliouris et al., 2010) gibt es nun Verfechter der alleinigen ventralen oder dorsalen Versorgung oder der Kombination mit perkutaner dorsaler Fusion (Rutges et al., 2016; Si et al., 2013). Die Wahl des operativen Vorgehens wird dabei auch dem klinischen Zustand des Patienten und der davon abhängigen möglichen Invasivität des Verfahrens, das dem Patienten zugemutet werden kann, angepasst.

Im Falle einer unkomplizierten Spondylodiszitis kann die frühe operative Versorgung im Vergleich zur konservativen Therapie zu einer schnelleren Erholung des Patienten, einer Verbesserung der Schmerzsymptomatik und einer erhöhten Lebensqualität führen (Nasto et al., 2014)

2.3.4. Tumorös

Aufgrund ihres Ursprungs kann man Knochentumore in zwei Gruppen unterteilen. Primäre Knochentumore gehen direkt vom Knochengewebe aus, sekundäre Läsionen sind Metastasen eines Primärtumors, der an anderer Stelle sitzt. Da für diese Arbeit ausschließlich sekundäre Knochentumore relevant sind möchte ich im Weiteren nur darauf näher eingehen.

Knochenmetastasen kommen vor allem bei Carcinomen von Mamma, Prostata, Lunge, Niere, Harnblase, Schilddrüse und bei Malignen Melanomen vor (Aebi, 2003). Insgesamt leiden ca. 10% aller Krebspatienten an Knochenmetastasen (Greenlee et al., 2000). Das Skelettsystem ist dabei nach Leber und Lunge der dritthäufigste Metastasierungsort und von allen Knochenmetastasen sind ca. 2/3 im Bereich der Wirbelsäule lokalisiert (Delank et al., 2011). Bezogen auf den Primärtumor findet man in absteigender Häufigkeit ein Mamma-, Prostata- oder Bronchialcarcinom. Damit sind diese Entitäten für ca. 60% der spinalen Metastasen verantwortlich, alle anderen oben genannten Primärtumore metastasieren weniger häufig in die Wirbelsäule (Aebi, 2003).

Etwa 70% der Wirbelsäulenmetastasen betreffen die Brustwirbelsäule, 20% die Lenden- und 10% die Halswirbelsäule. Ein initiales multilokuläres Auftreten wird in 10-38% beschrieben (Schaser et al., 2007).

Der am häufigsten, in ca. 80% der Fälle, betroffene Teil des Wirbels ist der Wirbelkörper, gefolgt von Pedikel und Dornfortsatz. Dies erklärt, warum die meisten spinalen Metastasen ventral des Myelons lokalisiert sind und bei progredientem Wachstum eine Myelonkompression von vorn auslösen. Mehr als 90% der spinalen Metastasen liegen extradural, nur 5% liegen intradural und weniger als 1% befinden sich intramedullär (Schick et al., 2001).

Eine weitere Möglichkeit die Knochenmetastasen zu unterteilen ist ihr Verhalten bezüglich der Knochenstruktur. Osteolytische Metastasen aktivieren einen Signalweg an dessen Ende der Abbau des Knochengewebes steht. Dies führt in letzter Konsequenz zu pathologischen Wirbelkörperfrakturen, die spinale Instabilität oder Deformitäten mit Myelinkompression und konsekutiven neurologischen Defiziten zur Folge haben. Beispiele für osteolytische Metastasen sind Mamma- und Melanommetastasen. Im Gegensatz dazu regen osteoblastische Metastasen das Knochenwachstum an. Auch dies kann zu einer Myelinkompression führen, jedoch eher bedingt durch die raumfordernde Wirkung als durch eine frakturbedingte Deformität. Osteoblastische Metastasen werden beispielsweise von Prostatacarcinomen gebildet (Mundy, 2002).

Aufgrund der steigenden Anzahl maligner Tumorerkrankungen bzw. aufgrund der gestiegenen Überlebenswahrscheinlichkeit gewinnt die Behandlung symptomatischer und asymptomatischer Wirbelsäulenmetastasen zunehmend an klinischer Relevanz. In die Therapieentscheidung miteinbezogen werden sollten die knöchernen Stabilität der Wirbelsäule, eine evtl. vorliegende neurogene Kompression, die Strahlensensibilität des Primärtumors, die vorherrschende Schmerzsymptomatik und die Gesamtprognose des Tumorleidens (Delank et al., 2011). Um diesbezüglich eine Entscheidung treffen zu können sind mehrere Prognose-Scores entwickelt worden. Aus der großen Anzahl möchte ich hieraus nur zwei Scores näher beschreiben.

Der Tokuhashi-Score, erstmals beschrieben 1990 und erneuert 2005, ist vermutlich das bekannteste Score-System spinaler Metastasierung (Tokuhashi et al., 2005; Tokuhashi et al., 1990). Berücksichtigt werden hier 6 Parameter: der Allgemeinzustand des Patienten (beschrieben im Karnofsky-Index), die Anzahl extraspinaler Knochenmetastasen, die Anzahl und Ausdehnung der Wirbelsäulenmetastasen (s. Abbildung 8), die Resektabilität von Organmetastasen, der Primärtumor und evtl. vorhandene Lähmungserscheinungen (wiedergegeben im Frankel-Score, der das Ausmaß der Myelonschädigung und die damit einhergehenden neurol. Defizite beschreibt). Für jeden Aspekt werden Punkte vergeben und je nach Anzahl der

Gesamtpunktzahl wird die Empfehlung zu radikaler Metastasenresektion bzw. palliativem Vorgehen gegeben.

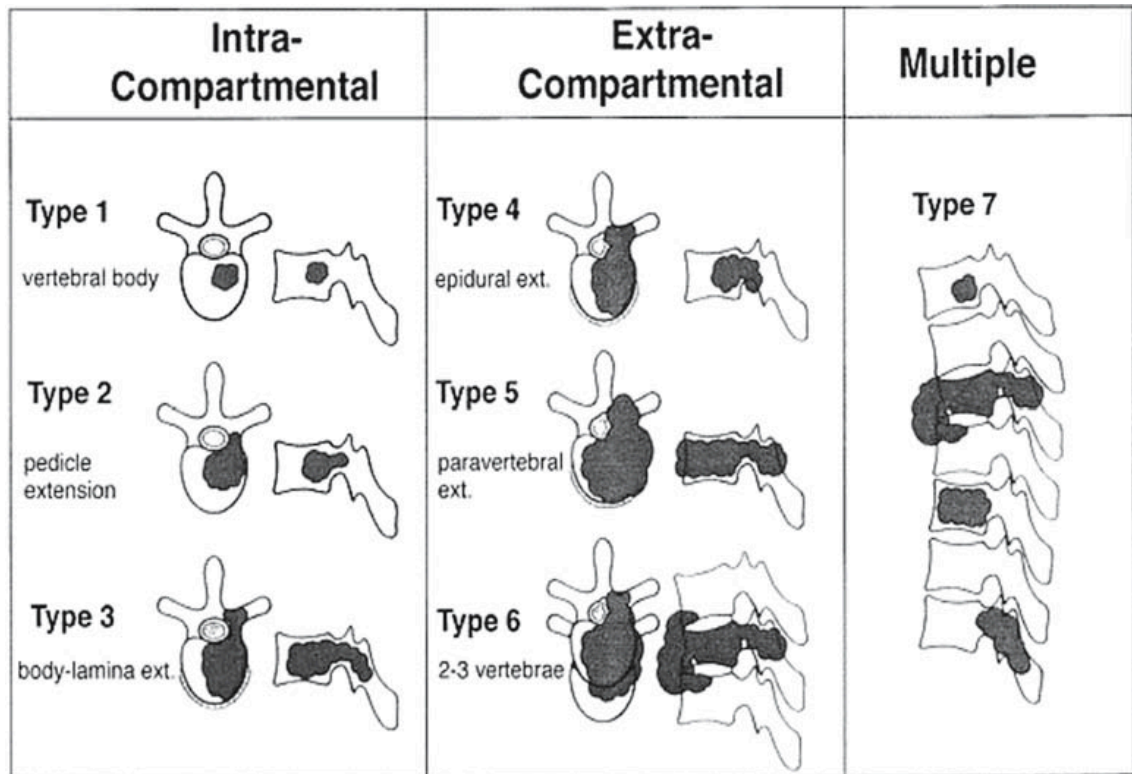


Abbildung 8: Schema zur Evaluierung der Tumorausdehnung im Wirbelkörper (intra- und extrakorporal) bzw. an der gesamten Wirbelsäule (Tokuhashi et al., 1990)

Zuletzt hat auch der SINS-Instabilitätsscore (Spinal Instability Neoplastic Score) zunehmend an Bedeutung gewonnen (Cassidy et al., 2018). Dieser wurde 2010 von der Spine Oncology Study Group (SOSG) entwickelt (Fisher et al., 2010). Ziel ist hierbei die Abschätzung der spinalen Instabilität im Falle einer spinalen Metastase und zwar vor allem für die Beurteilung durch Nicht-Wirbelsäulenexperten. Die im SINS-Score berücksichtigten Parameter sind: der betroffene Wirbelsäulenabschnitt, die Schmerzsymptomatik bei Bewegung, die Art der Knochenläsion (osteolytisch/osteoblastisch), das spinale Alignment, das Ausmaß des Wirbelkörpereintruchs sowie die Beteiligung der posterolateralen Strukturen der Wirbelsäule. Je nach Ergebnis erfolgt dann die Unterteilung in stabil, potentiell instabil und instabil (Fisher et al., 2010).

Die verschiedenen prognostischen Scores dienen dabei als Entscheidungshilfe und Leitfaden für die klinische Arbeit. Wichtig ist dabei immerwährende

Anpassung der Scores an neue Therapiemöglichkeiten und die klinische Praxis (Cassidy et al., 2018).

Was die Beurteilung einer Wirbelsäuleninstabilität zusätzlich erschwert ist, dass deren Definition uneinheitlich ist und kontrovers diskutiert wird. Klinisch unterscheidet sich die tumorös induzierte Instabilität von der posttraumatischen spinalen Instabilität, da pathologische Frakturen nicht den typischen anatomischen Frakturformen folgen und Läsionen ligamentärer Strukturen seltener vorkommen als bei traumatischen Verletzungen (Ecker et al., 2005). Zusätzlich scheint die Lokalisation der Metastase an den junktionalen Abschnitten der Wirbelsäule (zervikothorakaler/ thorakolumbaler/ lumbosakraler Übergang) das Risiko tumorbedingter Instabilität zu erhöhen (Schaser et al., 2007).

In der Diagnostik der Wirbelsäulenmetastasen hat das konventionelle Röntgen an Bedeutung verloren, da signifikante Veränderungen erst ab einem Tumorbefall von 30-50% des Wirbelkörpers sichtbar werden (Delank et al., 2011). Zur Diagnose und Einschätzung der Ausdehnung von Wirbelsäulenmetastasen, insbesondere in Hinsicht auf intraspinale Tumorausdehnung mit spinaler oder neuroforaminaler Kompression, ist die Kontrastmittel-gestützte Kernspinuntersuchung die Standarduntersuchung (Ecker et al., 2005). Dabei sollte die gesamte spinale Achse untersucht werden, um das Ausmaß der Wirbelsäulenmetastasierung beurteilen zu können (Lecouvet et al., 2007). Das Computertomogramm dient zur Einschätzung der knöchernen Struktur und der Stabilität. Zudem hat es einen wichtigen Stellenwert bei prä- und intraoperativer Planung, insbesondere bei Verwendung navigationsgestützter Operationstechniken (Schaser et al., 2007).

Um die Ausdehnung einer Skelettmetastasierung insgesamt zu beurteilen dienen ^{99m}Tc-MDP-Knochenszintigraphie und ¹⁸F-DG-PET-CT, wobei neuere Studien belegen, dass sich die Spezifität der beiden Untersuchungen zwar gleicht (98%), sie sich aber, vor allem bei der Untersuchung von Wirbelsäule und Becken, in der Sensitivität deutlich unterscheiden. Diese liegt bei der

Szintigraphie bei 83%, bei der PET-CT-Untersuchung dagegen bei 97% (Chang et al., 2016).

Die Behandlung von Wirbelsäulenmetastasen richtet sich, wie bereits oben beschrieben, nach dem zugrundeliegenden Primarius, der klinischen Situation und Prognose des Patienten sowie der Stabilität der Wirbelsäule. Dabei ist die Wiederherstellung der spinalen Stabilität ein wesentliches Therapieziel, um Schmerzfreiheit zu erreichen, das Auftreten immobilisationsbedingter Komplikationen zu reduzieren und eine Remobilisierung zu ermöglichen (Schaser et al., 2007).

Grundsätzlich gibt es zahlreiche Möglichkeiten der konservativen und operativen Therapie. Die konservative Behandlung beinhaltet unter anderem medikamentöse Therapie (Schmerzmedikation nach dem WHO-Stufenschema, evtl. ergänzt durch Antikonvulsiva und Antidepressiva/ Glukokortikoide/ Bisphosphonate/ rekombinante Antikörper wie z.B. Denosumab/ Chemotherapie bzw. Hormontherapie bei hormonsensitiven Tumoren), Immobilisation z.B. durch eine externe Orthese sowie Strahlentherapie (Delank et al., 2011). Indikationen für die Bestrahlung der gesamten spinalen Achse oder lokal sind Schmerzen sowie drohende Frakturgefahr oder Gefahr der spinalen Kompression. Zudem kann sie auch postoperativ zur Verhinderung eines lokalen Tumorrezidivs oder bei postoperativem Tumorrest eingesetzt werden. Denn aufgrund der anatomischen Gegebenheiten und der in 80% der Fälle ventral des Myelons gelegenen Tumormasse ist eine onkologisch radikale Resektion meist nicht möglich (Delank et al., 2011).

Die operative Therapie setzt sich aus minimal-invasiven Verfahren, wie Kypho- und Vertebroplastie, sowie offener Operation mit verschiedenen Kombinationen von ventrodorsaler Dekompression und Stabilisierung zusammen. Die Zementaugmentation ermöglicht bei fehlender neuraler Kompression und vorherrschender schmerzhafter Destruktion des Wirbelkörpers die segmentale Stabilisierung. Die Effekte von Kypho- und Vertebroplastie auf Schmerzsymptomatik, eingeschränkte Mobilität und Lebensqualität sind nach

gegenwärtiger Studienlage als gleichwertig anzusehen (Sadeghi-Naini et al., 2018). Aufgrund der nachgewiesenen positiven Wirkung, vor allem auf die Lebensqualität der Patienten, können die minimal-invasiven Verfahren auch in der Palliativsituation bei reduziertem Allgemeinzustand des Patienten eingesetzt werden (Lemke & Hacein-Bey, 2003).

Die offene chirurgische Behandlung dient der Tumorresektion, der Wiederherstellung bzw. Sicherung der Wirbelsäulenstabilität oder einer Kombination der beiden. Dabei stehen je nach Tumorausdehnung, Ausmaß der Instabilität und Lokalisation an der Wirbelsäule ventrale, dorsale, ventrodorsale bzw. dorsoventrale Stabilisierungen mit oder ohne mikrochirurgische Dekompression und Wirbelkörperersatz zur Verfügung (Aebi, 2003; Delank et al., 2011).

2.4. Diagnostik von Wirbelkörperfrakturen

Einen großen Stellenwert in der Diagnostik von Wirbelsäulenverletzungen nimmt die Anamnese ein. Im Falle eines Traumas ist der Unfallhergang von besonderer Relevanz, bei osteoporotischen Frakturen kann auch ein Bagatelltrauma ausreichend sein. Zudem muss eine ausführliche körperliche und neurologische Untersuchung mit Prüfung der Sensibilität und Motorik sowie des Reflexstatus erfolgen. Wichtig ist dabei die genaue Kenntnis der Kennmuskeln der Motorik und der Kennzonen der Sensorik (Gonschorek & Bühren, 2014). Druck- und Bewegungsschmerzen sollten detektiert werden, eine genaue palpatorische Untersuchung der Wirbelsäule kann Hämatome, Prellmarken und evtl. vorliegende Fehlstellungen zeigen (Bühren, 2003).

Weitere bildgebende Diagnostik erfolgt mittels Röntgen, Computertomographie und Kernspintomographie. Die Bildgebung dient unter anderem zur Beurteilung des Alignements der Wirbelsäule. Hierzu wird die Integrität der vorderen und hinteren Wirbelkörper-Linie beurteilt, außerdem können kyphotische und lordotische Knickbildungen gesehen werden. Verschiebungen von Gelenkspalten und Dornfortsätzen können zusätzliche Hinweise auf Deformitäten liefern (Bühren, 2003).

Röntgenaufnahmen sollten immer in 2 Ebenen beurteilt werden. Je nach Unfallmechanismus ist eine Darstellung des gesamten Achsenskeletts sinnvoll. Eine Gesamtaufnahme der Wirbelsäule im Stehen gibt im seitlichen Bild außerdem Auskunft über die vorliegende sagittale Balance bzw. bestehende Imbalancen (Gonschorek & Bühren, 2014).

Das Standardverfahren zur weiterführenden Diagnostik bei Wirbelsäulenverletzungen ist die Computertomographie. Insbesondere knöcherne Strukturen wie Wirbelkörperhinterkante, Gelenk- und Dornfortsätze können beurteilt werden (Gonschorek & Bühren, 2014). Zudem die vorliegende Knochenstruktur, z.B. bei Osteoporose oder einem metastatischen Befall der Wirbelsäule (Aebi, 2003). Einen wichtigen Stellenwert hat die Computertomographie zudem bei der Operationsplanung. Bei Nutzung eines

Navigationssysteme kann beispielsweise die genaue Material- und Schraubenlage sowie die Größe von Implantaten bereits vor der Operation oder direkt intraoperativ anhand eines Dünnschicht-CT geplant werden. Auch die postoperative Kontrolle der Materiallage erfolgt meist mittels Computertomographie. Sie erlaubt eine exakte Beurteilung der intravertebralen Schraubenlage in Bezug auf knöcherne und neurale Strukturen (Orief et al., 2018).

Die CT-Angiographie kann von Nutzen sein, um traumatische Gefäßverletzungen wie z.B. Dissektionen, die mit Wirbelsäulenverletzungen vergesellschaftet sein können, auszuschließen. Dies gilt vor allem für Halswirbelsäulenverletzungen aufgrund der engen anatomischen Lagebeziehung von HWS und hirnversorgenden Gefäßen. Auch bei der Operationsplanung ist in einigen Fällen die genaue Kenntnis der Gefäßlage und des Gefäßdurchmessers nötig (Gonschorek & Bühren, 2014).

Die Kernspintomographie dient der genaueren Beurteilung von Weichteilstrukturen wie Bandscheiben, Bandstrukturen, Myelon und Nervenwurzeln. So kann beispielsweise bei Wirbelkörperfrakturen mit Hinterkantenbeteiligung das Ausmaß der spinalen und neuroforaminalen Enge beurteilt sowie eine ligamentäre Instabilität ausgeschlossen werden. Durch unterschiedliche Wichtungen entstehen MRT-Sequenzen, die versch. Fragestellungen beantworten. So kann z.B. mittels STIR- oder TIRM-Sequenz das Alter einer Wirbelkörperfraktur anhand des Knochenmarködems beurteilt werden. Kontrastmittel-gestützte Sequenzen dienen zur genauen Beurteilung bei tumorösem oder entzündlichem Befall (Gonschorek & Bühren, 2014). Auch intraspinaler oder intraduraler Läsionen oder Raumforderungen können beurteilt werden (Ledermann et al., 2003). Bei Kindern und jüngeren Patienten spielt außerdem die Strahlenfreiheit einer MRT-Untersuchung eine wichtige Rolle (Bühren, 2003).

2.5. Geschichte der Robotik

Durch das RIA (Robot Institute of America) wurde ein Roboter folgendermaßen definiert: Ein programmierbares Mehrzweck-Handhabungsgerät für das Bewegen von Material, Werkstücken, Werkzeugen oder Spezialgeräten. Der frei programmierbare Bewegungsablauf macht ihn für verschiedenste Aufgaben einsetzbar (Jablonski, 1981).

Operationsroboter können in drei Kategorien unterteilt werden (Overley et al., 2017):

1. Supervidierte Systeme, in welche vorher festgelegte Arbeitsschritte einprogrammiert sind, die der Roboter autonom unter Aufsicht des Chirurgen ausführt.
2. Telechirurgische Systeme, deren Arbeitsschritte von einem Chirurgen von einer Konsole aus gesteuert werden.
3. Modelle mit geteilter Kontrolle, in denen Roboter und Chirurg simultan autonome Arbeitsschritte ausführen.

Die ursprüngliche Idee eines Roboters geht zurück auf Leonardo da Vinci, der bereits 1494 die Idee eines mechanischen Ritterautomaten umsetzte. Die Mechanik war simpel, jedoch trug sie zu weiteren Innovationen bei. Erstmals Einzug in die Industrie hielt die Robotik durch den mechanischen Webstuhl von Joseph Jacquard im Jahr 1805. Trotz aller Weiterentwicklungen wurde die Robotik erst 1985 zum ersten Mal in der Chirurgie eingesetzt. Ein Ärzteteam am Memorial Medical Center in Long Beach, California nutzte einen modifizierten PUMA Industrieroboter, um eine stereotaktische Hirnbiopsie durchzuführen. Es handelte sich dabei um einen robotischen Arm, der über sechs Freiheitsgrade verfügte, die auf Rotationsgelenken basierten (Kwoh et al., 1988).

Das amerikanische Militär entwickelte einen Operationsroboter mit dem Ziel verwundete Soldaten an weit entfernten Orten durch Spezialisten operieren zu können. Die erste Roboteroperation, eine Cholezystektomie, erfolgte mit einem Prototyp der Fa. Intuitive Surgical im März 1997 in Belgien.

Zum aktuellen Zeitpunkt ist das da Vinci Roboter-Operationssystem der Fa. Intuitive Surgical das am häufigsten eingesetzte. Es wird vor allem in Urologie und Gynäkologie, zuletzt auch vermehrt in der Viszeralchirurgie genutzt.

In der Neurochirurgie spielen Robotersysteme im Vergleich zu anderen operativen Disziplinen eine untergeordnete Rolle. Lediglich in der Wirbelsäulenchirurgie werden seit Anfang 2000 Miniatur-Robotersysteme eingesetzt, die direkt auf den knöchernen Strukturen der Wirbelsäule befestigt werden und bei Stabilisierungsoperationen zum Einsatz kommen (Lieberman et al., 2006).

2.6. Geschichte der Wirbelsäulenversteifung

Die erste Beschreibung einer Versteifungsoperation der Wirbelsäule erfolgte im Jahr 1891 durch Hadra. Er beschrieb die Behandlung einer instabilen HWK6- und 7-Fraktur durch Drahtcerclage der Dornfortsätze mit Silberdraht (Hadra, 1975). Seitdem wurde das Verfahren der operativen Spondylodese intensiv erforscht und verschiedenste Operationstechniken sowie Stabilisierungsmaterialien beschrieben. Theoretische Grundlagen zur Wirbelsäulenversteifung veröffentlichten Albee und Hibbs 1911 (Albee, 2007; Hibbs, 1911). Einen wichtigen Anteil an der weiteren Entwicklung hatte zudem Bosworth, der 1942 eine dorsale Stabilisierung durchführte, indem er einen H-förmigen autologen Beckenspan unter Distraction zwischen zwei benachbarten Dornfortsätze einspannte und das entsprechende Wirbelsäulensegment so stabilisierte. King beschrieb 1948 erstmals eine transpedikuläre Schraubenimplantation. Ein intensiver klinischer Einsatz derselben bestand jedoch noch nicht (King, 1948). Von entscheidender Bedeutung für die Etablierung der Pedikelschraube waren in der Folgezeit die Arbeiten von Saillant et al., die mit ihren anatomisch-experimentellen Forschungen zur Lage und Ausrichtung der Pedikel diese erst als mögliche Verankerungspunkte für die Stabilisierung erkannten (Saillant, 1976). Roy-Camille beschrieb 1986 die transpedikuläre Stabilisierung als sichere und zuverlässige Methode zur Wiederherstellung der Stabilität der Wirbelsäule nach Frakturen, Tumorresektion oder bei vorliegenden Deformitäten (Roy-Camille et al., 1986). Die wichtige Rolle des Pedikels als Kraftträger wurde 1993 auch von Simpson unterstrichen und hatte damit großen Einfluss auf die rasante Verbreitung und Weiterentwicklung transpedikulärer Stabilisierungssysteme (Simpson et al., 1993). Dadurch erweiterte sich auch das Indikationsspektrum der Spondylodese. Galt früher die Spondylodiszitis als Hauptindikation konnten nun auch Wirbelkörperfrakturen und symptomatische Spondylolisthesen operativ therapiert werden. Auf der Basis der transpedikulären Fusion existieren zurzeit an die 200 Fixationssysteme zur dorsalen Stabilisierung der Wirbelsäule. Es kommen unterschiedliche Metalldraht-, Gewindestangen- oder Plattensysteme zur Anwendung.

2.7. Schraubeneintrittspunkt und Pedikellage

Der Pedikel stellt den zentralen Punkt der transpedikulären Fusion dar, da er als Fixationspunkt des Fixateur intern dient. Dies ist möglich aufgrund der knöchernen Struktur des Pedikels, die einem Zylinder aus kortikalem Knochen mit einem schmalen spongiösen Kern entspricht. Er ist der härteste Teil des Wirbels. Durchmesser und Lage des Pedikels im Wirbelkörper sind in Brust- und Lendenwirbelsäule verschieden. So nimmt der vertikale Durchmesser des Pedikels von BWK1 bis LWK5 von 0,7 auf 1,5cm zu, der horizontale Durchmesser von 0,7 auf 1,6cm mit einem Minimum von 0,5cm auf Höhe BWK5 (Roy-Camille et al., 1986).

Medial des Pedikels liegt das Myelon bzw. unterhalb von BWK12/LWK1 die Caudafasern. Kaudal des Pedikels verläuft das Neuroforamen, in dem die jeweilige Nervenwurzel in die Peripherie zieht. Daher sollte sowohl eine Perforation der medialen Pedikelwand als auch des Pedikelbodens vermieden werden, um eine Verletzung von Myelon und Nervenwurzeln zu verhindern.

Auch der Schraubeneintrittspunkt ist von wichtiger Bedeutung, um eine intrapedikuläre Schraubenlage zu gewährleisten. Roy-Camille beschrieb einen medialen Eintrittspunkt knapp unterhalb des Facettengelenks an der Kreuzung einer vertikalen Linie durch die Facettengelenke und einer horizontalen Linie durch die Proc. transversi (Roy-Camille et al., 1986). Die Konvergenz sollte an Brust- und Lendenwirbelsäule 10 bis 20° entsprechen, nur in LWK5 ist mit ca. 25° eine größere Konvergenz nötig.

2.8. Behandlungsstrategien thorakolumbaler Wirbelkörperfrakturen

Die unterschiedlichen Behandlungsstrategien thorakolumbaler Wirbelkörperfrakturen werden kontrovers diskutiert und variieren von konservativer Therapie über alleinige dorsale oder ventrale Versorgung bis hin zu kombinierter ventrodorsaler Stabilisierung (Siebenga et al., 2006). Für die dorsale Stabilisierung stehen offen chirurgische und perkutane Verfahren zur Verfügung. Die jeweilige Behandlung hängt ab von der individuellen Charakteristik der Fraktur. Insbesondere im Falle einer pathologischen Fraktur muss die Grunderkrankung bzw. deren Ausmaß in die Therapieentscheidung mit einbezogen werden (Tian et al., 2018).

Ziele der Therapie von Wirbelsäulenverletzungen sind dabei:

- Dauerhafter Rekonstruktion der anatomiegerechten Stellung zur Wiederherstellung der physiologischen und biomechanischen Bewegungsachsen (Gonschorek & Bühren, 2014).
- Dekompression des Spinalkanals zur Reduktion bzw. Verhinderung neurologischer Ausfälle (Gonschorek & Bühren, 2014).
- Frühzeitige Mobilisation (Siebenga et al., 2006).
- Verhinderung eines Malalignements mit evtl. verzögert auftretenden neurol. Defiziten (Siebenga et al., 2006).

2.9. Fusionstechniken

Zur Instrumentierung der lumbalen Wirbelsäule stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Zusätzlich zur bereits beschriebenen transpedikulären Schraubenimplantation kommen verschiedene Möglichkeiten des Bandscheibenersatzes zum Einsatz. Ziel ist die interkorporelle Fusion, die durch Platzierung eines Implantats im Zwischenwirbelraum nach Diskektomie und Präparation der benachbarten Grund- und Deckplatte erreicht wird. Die etablierten Cagematerialien sind PEEK, Titan und Carbon (Rickert et al., 2015). In der Neurochirurgie werden hauptsächlich drei Verfahren genutzt: die posteriore lumbale interkorporelle Fusion (PLIF), die transforaminale lumbale interkorporelle Fusion (TLIF) und die anteriore lumbale interkorporelle Fusion (ALIF). Seltener genutzt werden die oblique lumbale interkorporelle Fusion (OLIF) und die laterale lumbale interkorporelle Fusion (LLIF) bzw. extrem laterale lumbale interkorporelle Fusion (XLIF).

Der am weitesten verbreitete Zugangsweg ist der PLIF, bei dem über eine beidseitige Laminoforaminotomie Zugang zum Bandscheibenfach geschaffen wird. Nachfolgend werden zwei Cages eingesetzt. Auch die TLIF erfolgt über einen dorsalen Zugang. Allerdings wird in diesem Fall nur über eine Seite ein Implantat in den Zwischenwirbelraum eingebracht, das heißt es erfolgt eine beidseitige Unterstützung der ventralen Säule über einen unilateralen Zugang. Allerdings besteht aufgrund der notwendigen starken Retraktion der neuralen Strukturen die Gefahr von Dura- und Nervenwurzelverletzungen mit potentiellen neurologischen Defiziten.

Ventralen Zugang zur Bandscheibe erlangt man mittels ALIF. Die am besten zugänglichen Segmente hierfür sind LWK4/5 und LWK5/SWK1, die darüberliegenden Segmente sind aufgrund der engen räumliche Nähe zur Niere und dem Verlauf der intraabdominellen Gefäße weniger geeignet. Stattgehabte abdominelle Eingriffe stellen aufgrund der konsekutiven Verwachsungen eine Kontraindikation dar. Bei LLIF bzw. XLIF gelangt man über einen retroperitonealen Zugang zum Bandscheibenfach, dies kann insbesondere in den Segmenten BWK12-LWK5 genutzt werden (Mobbs et al., 2015).

In der vorliegenden Arbeit möchte ich auf die Versorgung thorakolumbaler Wirbelkörperfrakturen mittels perkutaner transpedikulärer Stabilisierung ohne interkorporelle Fusion mittels Bandscheibenersatz näher eingehen.

3. Zielsetzung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit war der Vergleich zweier navigierter Stabilisierungsverfahren an der thorakolumbalen Wirbelsäule. Dies geschah vor dem Hintergrund eine schnelle und effiziente Versorgung instabiler Wirbelkörperfrakturen gewährleisten zu können und die in der Medizin auf dem Vormarsch befindliche Robotik mit dem etablierten Verfahren der bildgestützten Navigation zu vergleichen.

Die bereits zu diesem Thema durchgeführten Arbeiten zeigen ein heterogenes Bild, das Vor- und Nachteile beider Operationsverfahren aufzeigt ohne einen klaren Favoriten herauszustellen.

Um daher beide Verfahren im klinischen Einsatz zu testen wurden bzgl. der navigationsgestützten Technik retrospektiv und bzgl. der Robotertechnik prospektiv zwei Gruppen mit jeweils 30 Patienten gebildet. Folgende Fragestellungen sollen durch diese Arbeit beantwortet werden:

- Welche Präzision der intrapedikulären Schraubenlage kann erreicht werden und gibt es diesbezüglich einen signifikanten Unterschied zwischen beiden beschriebenen Operationsverfahren?
- Mit welchem Verfahren kann die Dauer der Operation verkürzt werden?
- Gibt es eine Lernkurve bei Anwendung des Robotersystems?
- Ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der applizierten Gesamtstrahlendosis?
- Welche peri- und postoperativen Komplikationen sind zu verzeichnen?

Die Ergebnisse der Arbeit werden dann mit der bestehenden Literatur verglichen.

4. Material und Methoden

4.1. Patientenkollektiv

Diese Arbeit umfasst 60 Patienten, die von April 2014 bis Februar 2018 in der Klinik für Neurochirurgie des Städtischen Klinikums München operiert wurden. Davon waren 31 weiblich und 29 männlich. Das durchschnittliche Patientenalter lag bei 63,9 Jahren, der jüngste Patient war 20 Jahre alt, die älteste Patientin 92 Jahre alt.

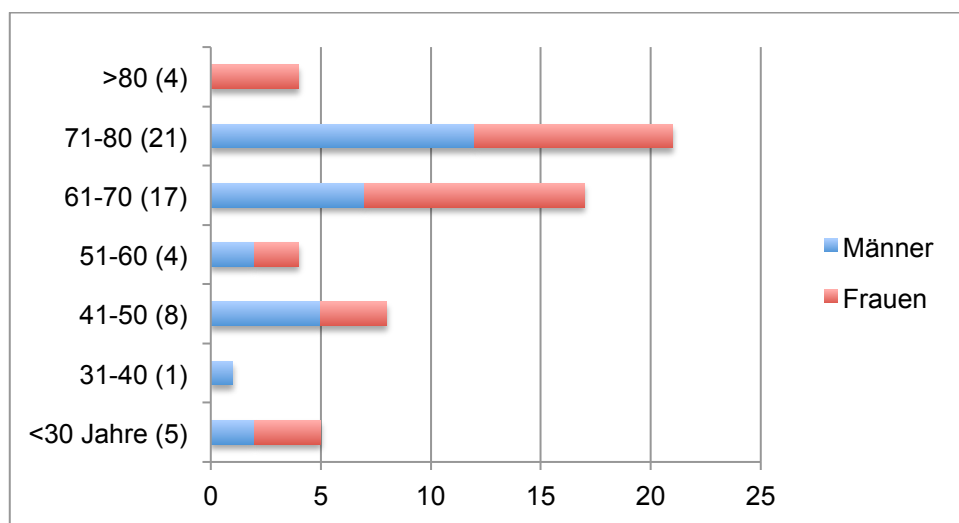


Abbildung 9: Altersverteilung

Die Hälfte der Patienten (30) wurde mittels perkutaner 3D-Navigations-gestützter Technik stabilisiert, bei der anderen Hälfte (30) kam ein Roboter-gestütztes Verfahren zur perkutanen Stabilisierung zum Einsatz.

4.2. Lokalisation der Operation

Die Patienten wurden thorakal, thorakolumbal, lumbal oder lumbosakral stabilisiert. Der Großteil der Stabilisierungen (83%) erfolgte an der Brustwirbelsäule und am Übergang zwischen Brust- und Lendenwirbelsäule. Die Anzahl der isolierten LWS-Stabilisierungen bzw. der Eingriffe am lumbosakralen Übergang war entsprechend geringer.

Die Gesamtanzahl der Eingriffe pro Wirbelsäulenabschnitt ist Abbildung 10 zu entnehmen.

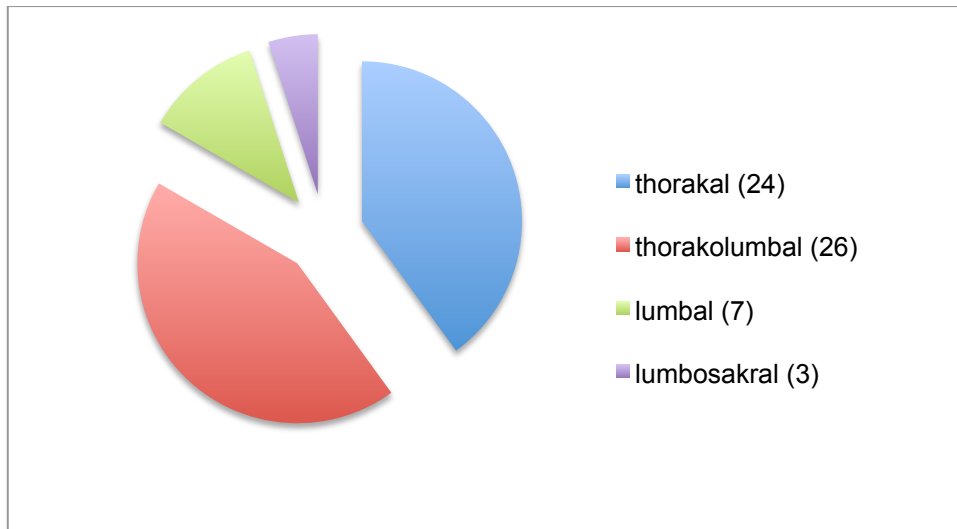


Abbildung 10: Verteilung der Lokalisation an der Wirbelsäule

Eine genaue Aufschlüsselung der stabilisierten Bereiche je nach Stabilisierungsverfahren zeigt Abbildung 11.

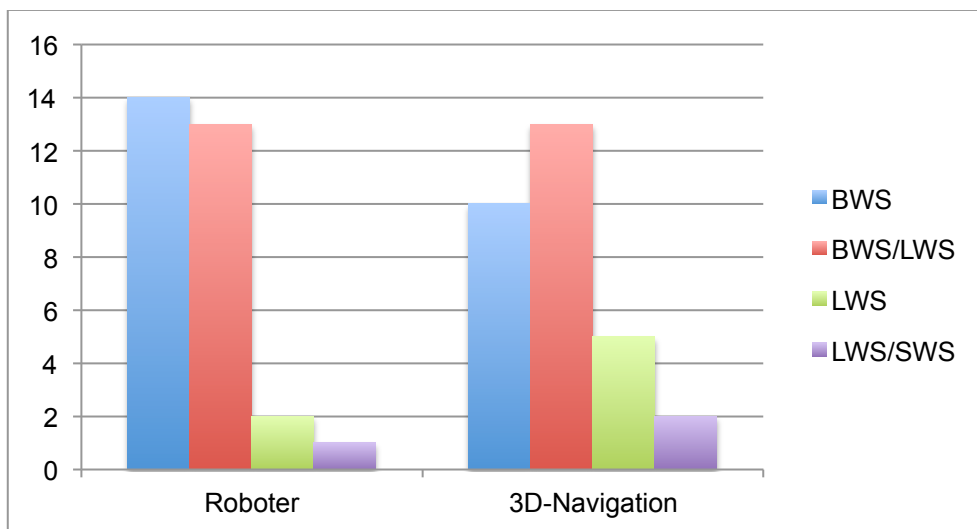


Abbildung 11: Aufteilung nach Bereichen der Wirbelsäule

4.3. Anzahl der Segmente

Im Gesamten wurden durchschnittlich 3,1 Segmente stabilisiert (min. 1, max. 8). In der Roboter-Gruppe waren es 3,2 Segmente/Operation (min. 1, max. 8), in der Navigations-Gruppe 2,9 Segmente/Operation (min. 1, max. 7). Die genaue Aufteilung der Gesamtanzahl operierter Segmente ist Abbildung 12 zu entnehmen.

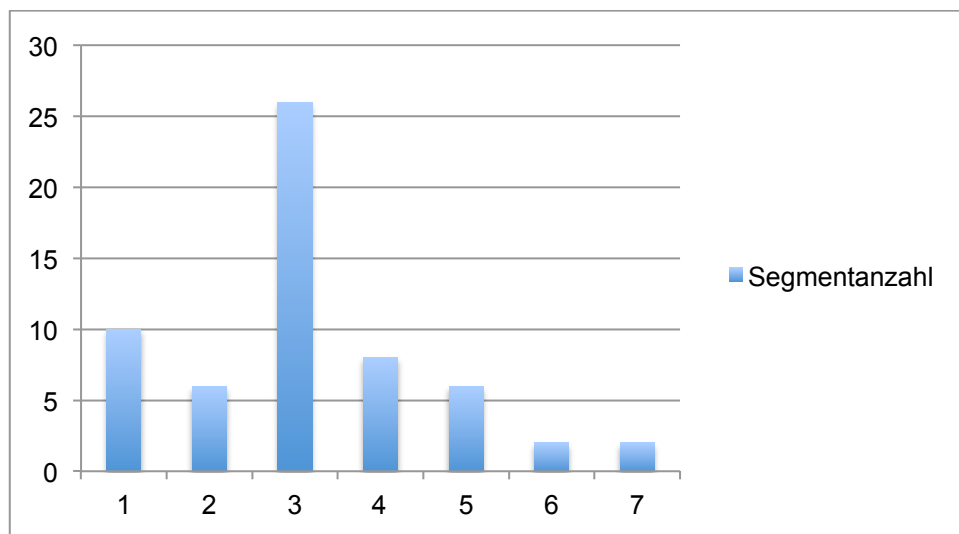


Abbildung 12: Aufschlüsselung der operierten Segmente

Insgesamt wurden 491 Schrauben gesetzt, davon 252 Roboter-gestützt und 239 mittels 3D-Navigation. Das entspricht 8,4 Schrauben/Patient in der Roboter-Gruppe und 7,9 Schrauben/Patient in der Navigations-Gruppe.

4.4. Operationsindikationen

Indikationen zur perkutanen transpedikulären Stabilisierung waren Wirbelkörperfrakturen der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule ohne vorliegende Kompression neuraler Strukturen. Ursachen der Wirbelkörperfrakturen waren Trauma, metastatische Besiedlung der Wirbelsäule, Spondylodiszitiden und Minderung der Knochenstruktur im Rahmen einer Osteoporose.

Die genaue Verteilung der Operationsindikationen stellt Abbildung 13 dar.

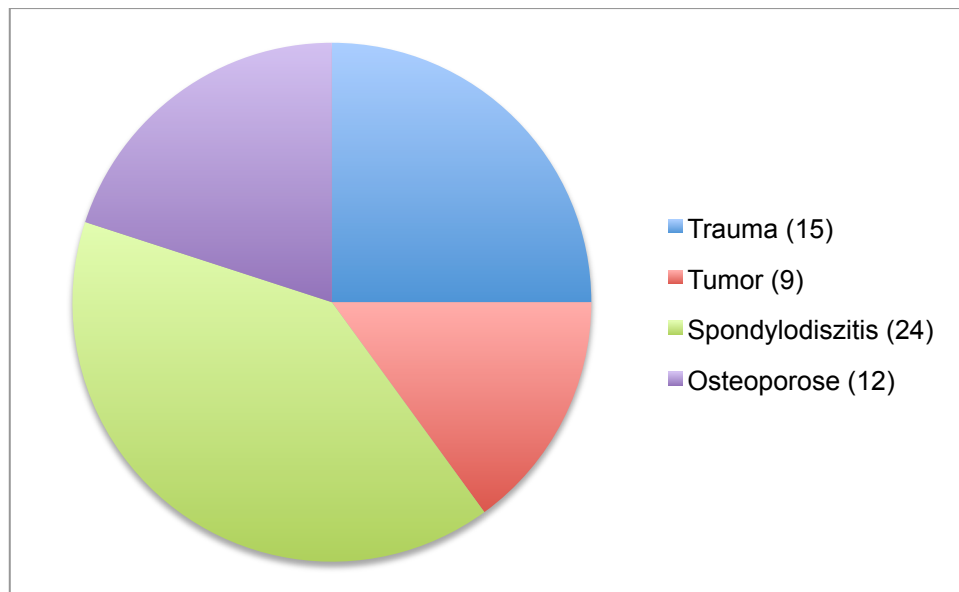


Abbildung 13: Operationsindikationen

4.5. Operationstechniken

4.5.1. Perkutane transpedikuläre Stabilisierung allgemein

Die perkutane transpedikuläre Stabilisierung ist ein minimal-invasives Verfahren. Auf die Anlage eines Mittellinienhautschnitts wird verzichtet, was eine deutliche Reduktion des Muskeltraumas zur Folge hat. Die Anlage 1-2cm messender Hautschnitte erfolgt paraspinal direkt über der geplanten Schraubentrajektorie, für jede Schraube wird ein separater Hautschnitt angelegt. Nach Durchtrennung der darunterliegenden Muskelfaszie in Längsrichtung kann eine stumpfe Präparation der Muskulatur bis in die Tiefe auf die knöchernen Strukturen erfolgen. Je nach gewähltem Stabilisierungssystem erfolgt nun die navigierte oder Roboter-gestützte transpedikuläre Einbringung eines Kirschnerdrahtes nach vorheriger Anlage eines Bohrkanals, der gewählten Trajektorie entsprechend. Die Schraube wird an einer Hülse befestigt und so über den Führungsdraht eingebracht. Die Hülse erleichtert die spätere Stabeinbringung, da aufgrund der minimal-invasiven Hautschnitte ein offenes Einsetzen des Stabes unter Sicht nicht möglich ist. Zudem dient sie als Gewebeschutz. Nach Einsetzen aller geplanten Schrauben kann über die Hülsen die Stablänge gemessen werden. Mit Stabschneider und Rollenbiegezange ist außerdem eine individuelle Anpassung des Stabes an die anatomischen Gegebenheiten möglich. Nach korrekter Lage des Stabes in allen Schraubenköpfen wird in jeden Schraubenkopf eine Verschlusschraube eingebracht, die den Stab in der Schraube fixiert. Abschließend werden die Verschlusschrauben mit dem Newtonmeter fixiert. Die Hülsen können nun entfernt werden, es erfolgt ein schichtweiser Wundverschluss der einzelnen Hautschnitte.

4.5.2. 3D-Navigationsgestützte perkutane transpedikuläre Stabilisierung

Die Lagerung des Patienten erfolgte in Bauchlage auf einem radiotransluzenten Karbon-Tisch (Maquet GMBH & Co. KG, Rastatt/Deutschland). Sodann wurde zur Markierung der für die Operation vorgesehenen Wirbeläulensegmente der 3D-C-Bogen Arcadis Orbis 3D (Siemens Healthcare, Erlangen/Deutschland) in

lateralem Strahlengang eingeschoben. Im Bereich der oberen Brustwirbelsäule erfolgte die Höhenlokalisierung aufgrund der besseren Übersichtlichkeit oft zusätzlich durch a.p.- Durchleuchtung. Zeitgleich wurde das Navigationssystem (Brainlab, Deutschland) gestartet und mit dem Röntgen-C-Bogen verbunden.

Danach erfolgte am oberen oder unteren Pol des zu stabilisierenden Bereichs die Anlage eines kurzen medialen Hautschnitts zur Darstellung des Dornfortsatzes. Auf diesem wurde dann der für die Durchführung eines 3D-Navigationsscans notwendige Referenzierungstern mittels Klemme aufgebracht.

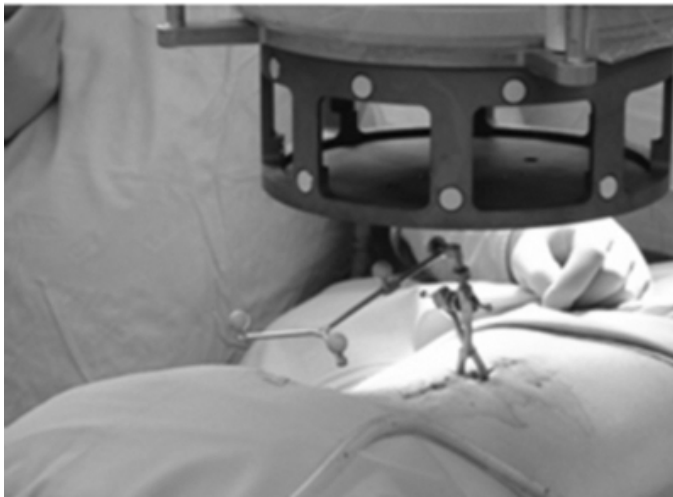


Abbildung 14: Referenzstern der 3D-Navigation (Brainlab, München/Deutschland)

Nach nochmaligem Röntgen in lateralem und a.p. Strahlengang zur Festlegung des Zielbereichs wurde ein automatisierter 3D-Scan durch den C-Bogen durchgeführt. Der Arcadis Orbis 3D generierte im Rahmen einer 190° Orbitalauslenkung in 60 Sekunden 100 2D-Bilder mit einer Auflösung von 1024 x 1024 Bildpunkten. Die Berechnung des 3D-Datensatzes erfolgte simultan und wurde als Rekonstruktion in coronarer, axialer und sagittaler Projektion dargestellt. Nach Beendigung des Scans wurde der so erzeugte 3D-Datensatz auf die Brainlab Navigation übertragen. Am Monitor der Navigation war nun der zu operierende Wirbelsäulenabschnitt in axialer, coronarer und sagittaler Ebene zu sehen. Nach Referenzierung des Systems und der navigierten Bohrhülse konnte, wie in Abbildung 15 zu sehen, die geplante Schraubentrajektorie in

allen drei genannten Ebenen dargestellt und überprüft werden. Es erfolgte zunächst die Anlage ca. 2cm messender paravertebraler Hautschnitte im Verlauf der geplanten Trajektorie sowie die Eröffnung der darunter liegenden Muskelfaszie. Im Anschluss erfolgte mit Hilfe eines Bohrers in allen dafür vorgesehenen Wirbelkörpern beidseits die transpedikuläre Anlage jeweils eines Bohrlochs, in dem ein Kirschner-Draht platziert wurde.



Abbildung 15: Planung der Schraubentrajektorie in sagittaler, coronarer und axialer Ebene (Brainlab, Deutschland)

Im Falle einer langstreckigen Stabilisierung musste der zu stabilisierende Bereich aufgeteilt werden und in getrennten Navigationsscans erfasst werden. Zur Kontrolle der Drahtlage wurde erneut ein 3D-Scan durchgeführt. Die so erzeugten Daten wurden als Rekonstruktion in coronarer, sagittaler und axialer Projektion auf dem Röntgenmonitor dargestellt und konnten vom Operateur ausgewertet werden. Länge und Durchmesser des erforderlichen Implantats konnten direkt per Hand am Monitor ausgemessen werden.

Im Anschluss erfolgte, nach Erweiterung des Schraubenkanals mittels Vorbohrer über die vorliegenden Kirschner-Drähte, das Einbringen kanülierter

Schrauben des Systems Viper 2 MIS (DePuy Synthes, Massachusetts/Amerika). Abschließend wurde über die Schraubenhülsen die erforderliche Stablänge ausgemessen und der Stab mit Stabschneider und Rollenbiegezange an die jeweiligen Verhältnisse angepasst. Nach Einbringen des Stabs und korrekter Lage in den Schraubenköpfen wurde dieser mit Verschlusschrauben fixiert, die mit dem Newtonmeter abschließend festgezogen wurden.

4.5.3. Roboter-gestützte perkutane transpedikuläre Stabilisierung

Zur Roboter-gestützten Stabilisierung wurde der SpineAssist (Mazor Robotics, Caesarea Maritima/Israel) verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Miniaturroboter, der sich über eine, an knöchernen Fixpunkten befestigte, Brücke über die Wirbelsäule bewegt (s. Abbildung 17). Vor der geplanten Operation war die Durchführung eines Dünnschicht-CT des gesamten zu stabilisierenden Bereichs notwendig. Dieses wurde dann in die Planungssoftware des Gerätes eingelesen. In der Planungssoftware konnten dann für jeden Wirbelkörper einzeln die Schraubentrajektorien inklusive Schraubenlänge und -durchmesser geplant werden. Axiale, coronare und sagittale Rekonstruktionen zeigten den Verlauf der geplanten Trajektorie in Pedikel und Wirbelkörper. Die fertige Planung wurde auf einen USB-Stick und so auf den SpineAssist übertragen.

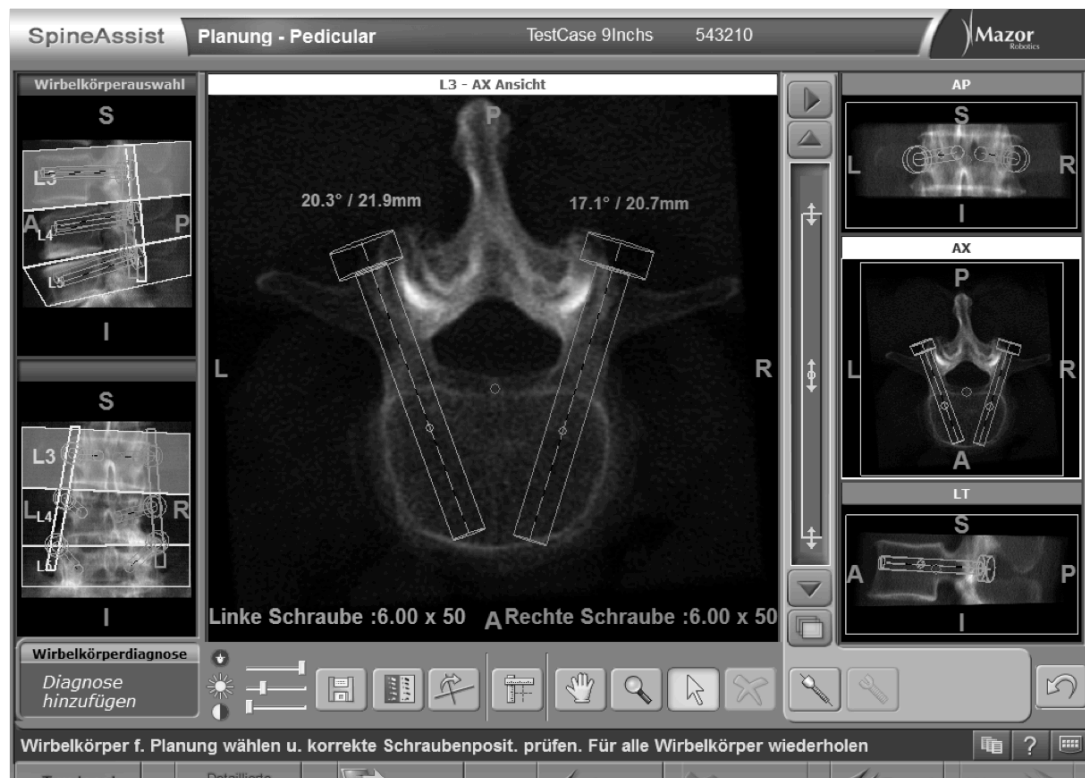


Abbildung 16: Planungssoftware des SpineAssist (Mazor Robotics, Israel)

Es erfolgte, wie bereits oben beschrieben, die Lagerung des Patienten in Bauchlage. Nun folgte die Anbringung der für die Roboter-Navigation notwendigen Aufsätze auf den Röntgen-C-Bogen (Ziehm Imaging, Nürnberg/Deutschland) und die Verbindung beider Geräte. Zur Erfassung des Zielbereichs wurden Röntgenaufnahmen in a.p. und lateralem Strahlengang ergänzt. Das für die Benutzung des Roboters (SpineAssist Device) nötige Einmalmaterial wurde geöffnet. Um eine Bewegung des Roboters entlang der Wirbelsäule zu ermöglichen, erfolgte die Anbringung einer Brücke (Hover-T Bridge), die mittels Stichinzision und Pin auf der Spina iliaca posterior superior beidseits sowie einem Dortfortsatz über dem zu stabilisierenden Bereich fixiert wurde.

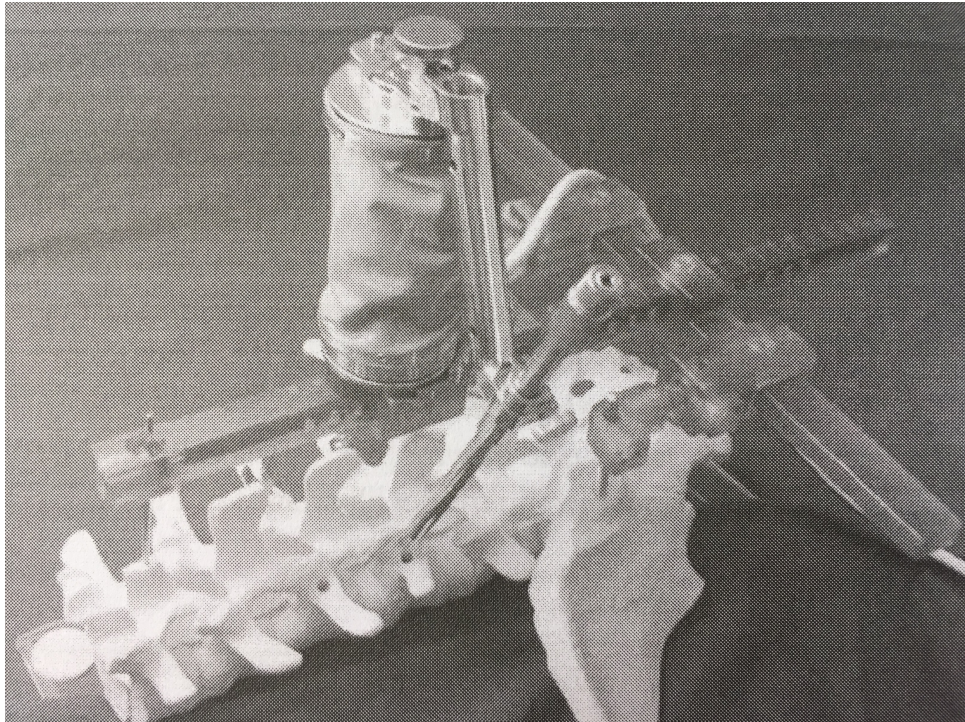


Abbildung 17: schematische Darstellung des Spine Assist Devices und der Hover-T-Bridge (Mazor Robotics, Israel)

Seitlich an der Brücke stellten Zahlenfolgen die möglichen Positionen des Roboters dar. Der Roboterdevice wurde auf einer verschieblichen Plattform auf der Brücke fixiert, die mittels zwei seitlicher Schrauben an der gewünschten Position befestigt werden konnten. Nun wurde auf dem SpineAssist Monitor die gewünschte Schraube (z.B. BWK10 links) ausgewählt und der Roboter wurde vom System an die für die Anlage der ausgewählten Schraube nötige Position auf der Brücke geschickt. Je nach geplanter Trajektorie wurde der Device automatisch in einem bestimmten Winkel gekippt. Anschließend erfolgte am Roboter das Anbringen eines Arms in Verlängerung der Trajektorie, durch den eine Bohrhülse vorgeschoben wurde.

Im Weiteren folgte die Anlage ca. 2 cm messender Hautschnitte über der geplanten Schraubenposition und die Eröffnung der Muskelfaszie mit der Schere. Die Bohrhülse wurde vorgeschoben bis Knochenkontakt bestand. Mit Hilfe einer speziellen Kanüle erfolgte dann die Abflachung des Knochens über dem geplanten Eintrittspunkt am Pedikel. Nach Entfernung der Kanüle wurde eine Bohrhülse vorgeschoben, über die mit dem Bohrer die transpedikuläre Anlage eines Bohrkanals erfolgte. Folgend wurden Kirschner-Drähte im

Bohrkanal platziert. Diese Prozedur wurde bei allen zu stabilisierenden Wirbelkörpern wiederholt. Zur Kontrolle der exakten, intrapedikulären Schraubenlage erfolgte nun, wie oben bereits beschrieben, ein 3D-Scan. Nach Kontrolle der Drahtlage wurden, nach Verwendung des Vorbohrers zur Erweiterung des Bohrkanals, kanülierte Schrauben über die platzierten Kirschner-Drähte eingebracht. Es wurde, wie im Fall der 3D-navigationsgestützten Stabilisierung, das Viper 2 MIS System (DePuy Synthes, Massachusetts/Amerika) verwendet.

Nach erfolgter Schraubenanlage konnte das Robotersystem entfernt werden. Abschließend folgte die Stabeinbringung, nachdem dieser, wie oben beschrieben, abgemessen und entsprechend individualisiert wurde sowie das Aufsetzen der Verschlusschrauben und abschließende Fixierung mittels Newtonmeter.

4.6. Ausgewertete Parameter

Die in dieser Arbeit ausgewerteten Parameter umfassen:

- Operationsdauer
- Strahlenbelastung (prä-, intra- und postoperativ)
- postoperative Beurteilung der Schraubenlage
- Komplikationen (intra- und postoperativ)

4.6.1. Operationsdauer

Die Operationsdauer bezeichnet die Schnitt-Naht-Dauer der Operation. Da die verglichenen Operationen reine Stabilisierungsoperationen ohne Dekompression waren, ist ein direkter Vergleich der Operationsdauer möglich. Nicht mit eingerechnet wird die Dauer der präoperativen Vorbereitung, wie z.B. die Planung der Schraubenposition mit der Software des SpineAssist. Ausgedrückt wird die Operationsdauer in der Zeit pro gesetzter Schraube (in min), die aus der Gesamtdauer errechnet wird.

4.6.2. Strahlenbelastung

Strahlendosisgrößen sind definiert worden, um Wirkung und Menge der ionisierenden Strahlung im Gewebe quantifizieren zu können. Die physikalische Grundgröße in der Strahlendosimetrie ist die Energiedosis. Sie beschreibt die Energieübertragung von ionisierender Strahlung auf ein anderes Material als Luft und charakterisiert die in 1kg Materie absorbierte Strahlenenergie. Ihre Einheit ist das Gray (Gy).

Wichtige Größen zur Beurteilung der Strahlenbelastung sind Dosisflächenprodukt (DFP) und Dosislängenprodukt (DLP). Das Dosisflächenprodukt ist Grundlage der Berechnung der Strahlenbelastung während einer Röntgenaufnahme, wie z.B. während eines 3D-Scans mit dem Röntgen-C-Bogen. Die zugehörige Maßeinheit ist $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$. Um die Strahlenbelastung einer CT-Untersuchung zu beschreiben dient das Dosislängenprodukt in der Maßeinheit $\text{Gy}\cdot\text{cm}$.

Um Dosisflächen- und Dosislängenprodukt miteinander vergleichen zu können und so die prä-, intra- und postoperative Strahlenbelastung bzw. die Gesamtstrahlenbelastung beider Verfahren in Relation zu setzen, ist die Umrechnung von DFP und DLP in die effektive Dosis E nötig. Das Maß der effektiven Dosis ist Sievert (Sv). In die Berechnung fließen die Strahlensensibilität der Organe und Gewebe ausgedrückt in Organdosis ($\text{mSv}/\text{mGy}\cdot\text{cm}$), Gewebewichtungsfaktor und Konversionsfaktor ($\text{mSv}/\text{mGy}\cdot\text{cm}^2$) mit ein (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2004).

Die effektive Dosis ist ein Maß für die Strahlenexposition und lässt Vergleiche unterschiedlicher Untersuchungsmodalitäten zu, in dieser Arbeit z.B. Computertomographie und 3D-Scan mit dem Röntgen-C-Bogen. Jedoch bleibt sie ein Näherungswert, da z.B. das unterschiedliche Lebensalter, das Geschlecht und der Körperbau der Patienten nicht berücksichtigt werden.

Die Umrechnung in die effektive Dosis E erfolgte nach folgenden Formeln (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2004).

$$E \text{ (mSv)} = \text{DLP (mGy*cm)} \times (\text{Organdosis (mSv/mGy*cm)} + \text{Gewebewichtungsfaktor})$$

$$E \text{ (mSv)} = \text{DFP (mGy*cm}^2\text{)} \times \text{Konversionsfaktor (mSv/mGy*cm}^2\text{)}$$

In der Roboter-Gruppe wurde zur präoperativen Planung ein Dünnschicht-CT des zu operierenden Bereichs angefertigt, intraoperativ wurde zur Kontrolle der Lage der transpedikulär eingebrachten Kirschnerdrähte ein 3D-Scan durchgeführt und postoperativ wurde zur Kontrolle der Schraubenlage ein CT des operierten Bereichs ergänzt. Dies unterscheidet sich von der 3D-Navigations-Gruppe nur insofern, dass präoperativ zwar meist ein CT des betroffenen Wirbelsäulenabschnitts durchgeführt wurde, jedoch war dies nicht zwingend der Fall, in manchen Fällen reichte auch eine präoperative MRT-Bildgebung aus. Zudem erfolgte, falls ein CT ergänzt wurde, kein Dünnschicht-CT, was wiederum die Strahlendosis nicht unerheblich senkt.

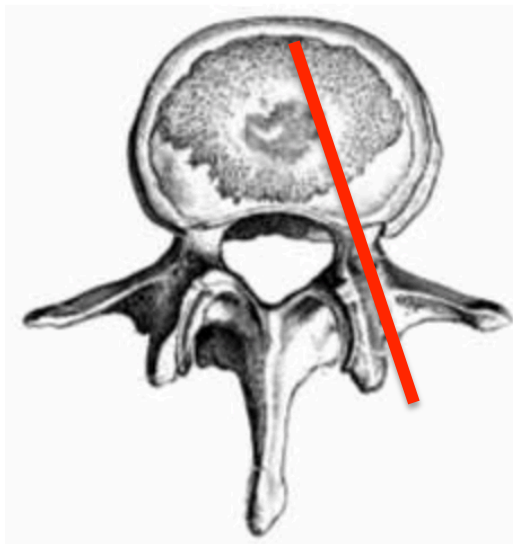
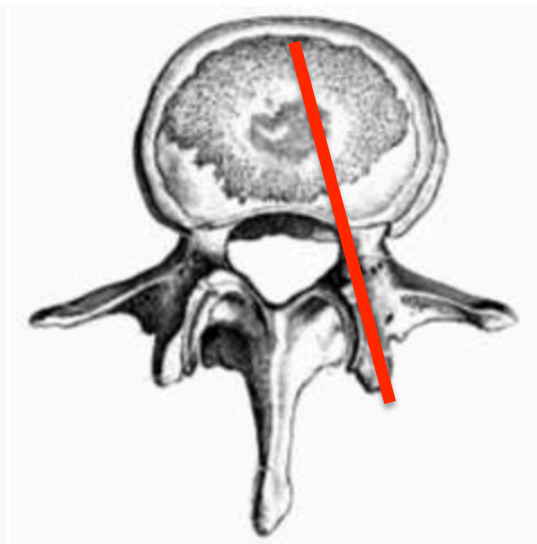
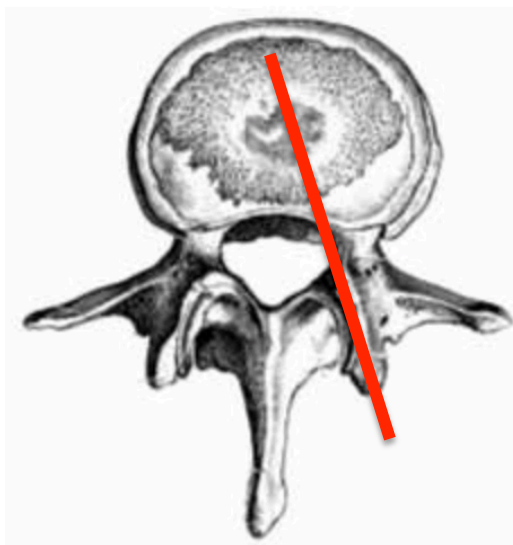
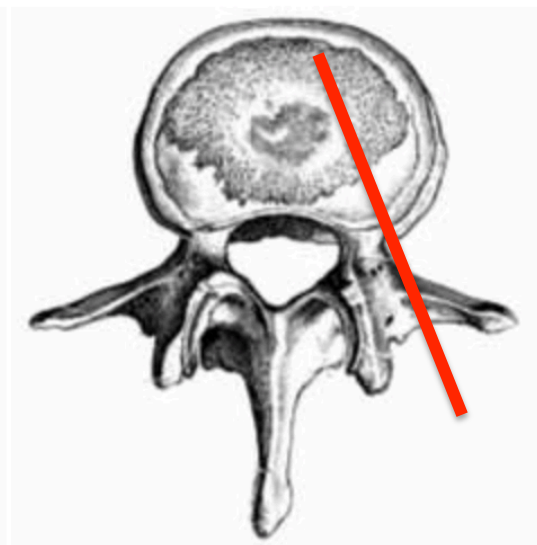
Somit setzt sich die ermittelte Gesamtstrahlenbelastung aus prä-, intra- und postoperativer Strahlenbelastung zusammen.

4.6.3. Postoperative Schraubenlage

Die Auswertung der postoperativen Schraubenlage erfolgte anhand einer CT-Bildgebung. Beurteilt wurde der axiale Schraubenverlauf in Bezug auf Pedikel, Wirbelkörper und neurale Strukturen. Zur Beurteilung wurde hierzu die von Upendra et al (Upendra et al. , 2008) modifizierte Klassifikation nach Rongming Xu et al. (Xu et al., 1998) verwendet. Diese unterteilt mögliche Schraubenlagen in drei Klassen, wobei Klasse I eine intrapedikuläre und die Klassen II und III eine extrapedikuläre Schraubenlage mit möglicher Verletzung neuraler oder vaskulärer Strukturen beschreibt. Allerdings wurde diese Einteilung durch eine von uns definierte Position ergänzt (Klasse IIIC), da eine zu laterale bzw. extrapedikuläre Schraubenlage in dieser Klassifikation nicht berücksichtigt ist.

Klasse I

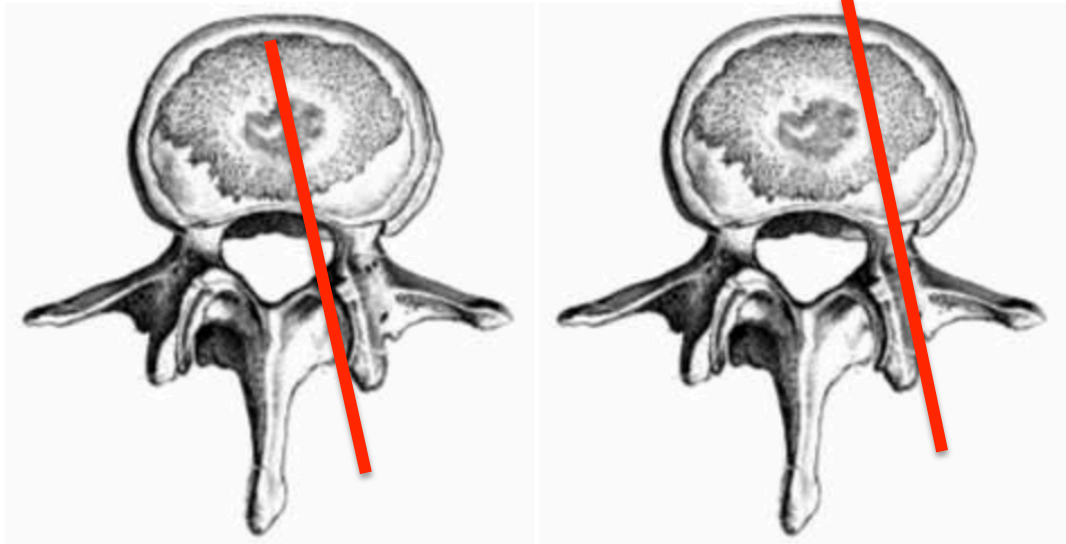
- A:** Schraube vollständig im Knochenmark des Pedikels
- B:** Schraube touchiert die mediale Pedikelwand von innen
- C:** Perforation der medialen Pedikelwand < 2mm
- D:** Schraube geht lateral durch den Wirbelkörperfortsatz
(In-out-in-Schraube)

Abbildung 18: Modifizierte Klassifikation nach Rongming Xu et al.Klasse IAKlasse IBKlasse ICKlasse ID

Klasse II

A: Perforation der medialen Pedikelwand > 2mm

B: Perforation der Wirbelkörpervorderkante



Klasse IIA

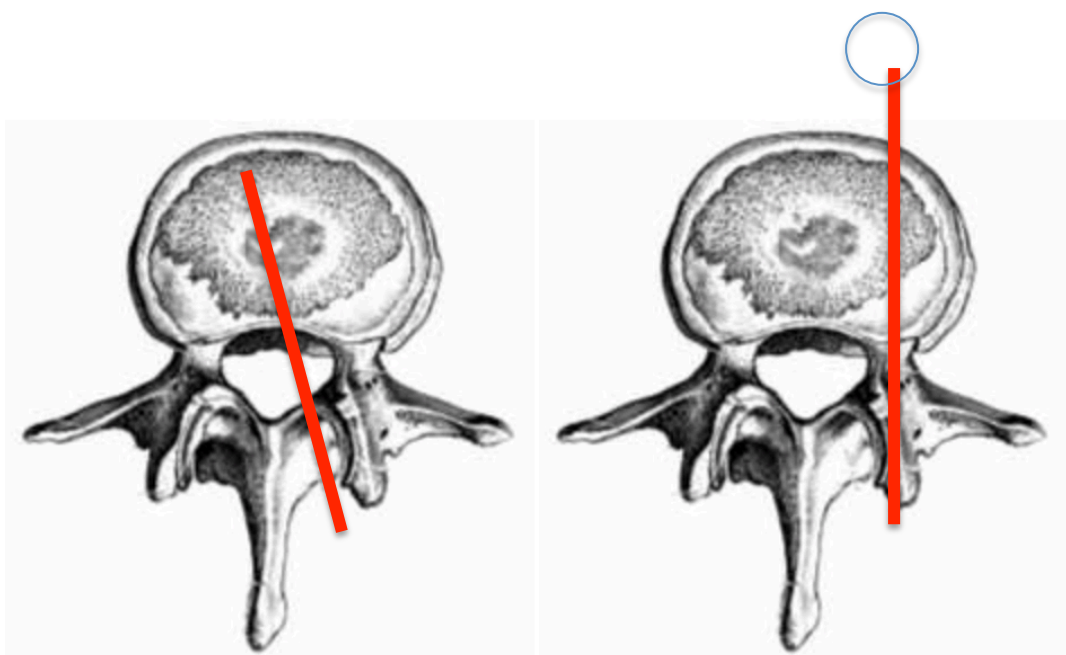
Klasse IIB

Klasse III

A: Schraube traumatisiert das Rückenmark

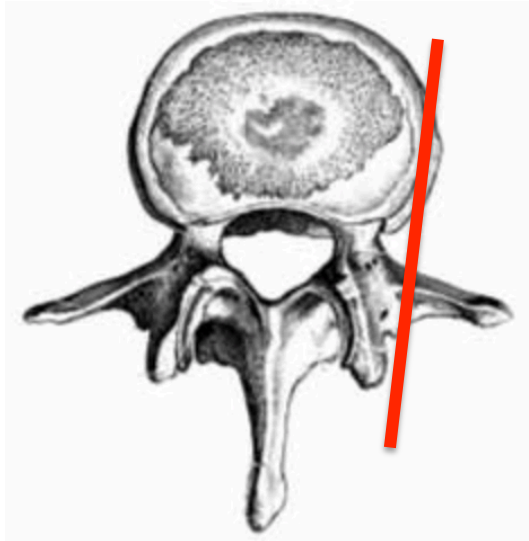
B: Schraubenspitze perforiert die Aorta

C: Schraube lateral des Pedikels, außerhalb des Wirbelkörpers



Klasse IIIA

Klasse IIIB



Klasse IIIC

Die oben beschriebenen Kategorien wurden von uns wiederum anhand der Qualität der Schraubenlage in vier Gruppen von sehr gut bis unbefriedigend eingeteilt:

<u>Qualität</u>	<u>Klasse</u>	<u>Definition</u>
Sehr gut	IA, IIB	Schraube komplett intrapedikulär
Gut	IB	Kontakt zur Pedikellinnenwand
Befriedigend	IC, ID	Geringe Perforation Pedikellinnenwand, In-out-in-Lage
Unbefriedigend	IIA, IIIA, IIIB, IIIC	Komplette Perforation Pedikellinnenwand, Verletzung neuraler od. vaskulärer Strukturen, extrapedikuläre Lage

Tabelle 1: Qualität der Schraubenlage

4.7. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der gesammelten Daten erfolgte mit Excel 2011 sowie dem Programm SPSS Statistics.

Ein ungepaarter t-Test wurde genutzt für den Vergleich der stetigen Variablen beider Verfahren. Der Vergleich der kategorialen Variablen erfolgte mittels Chi-Quadrat-Test. Dabei wurde jeweils ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ angenommen, p-Werte $< 0,05$ wurden als statistisch signifikant angesehen.

Die Anzahl der Schrauben pro Kategorie wurde prozentual in Bezug auf die Gesamtanzahl der gesetzten Schrauben pro Operationsverfahren ausgedrückt.

5. Ergebnisse

5.1. Operationsdauer/ Zeit pro gesetzter Schraube

Die Operationsdauer entspricht der Zeit zwischen Schnitt und Naht. Diese gesamte Operationsdauer (inklusive der Referenzierung des Navigationssystems und der 3D-Scans sowie inklusive Aufbau und Inbetriebnahme des SpineAssist-Systems) wurde dann durch die Anzahl der gesetzten Schrauben geteilt, um die Dauer/Schraube (in Minuten) zu errechnen.

Diese entsprach in der Roboter-Gruppe einem Mittelwert von 16,83 min gegenüber einem Mittelwert von 13,47 min in der Navigations-Gruppe.

Um den zeitlichen Verlauf und die vorhandene Lernkurve bei der Anwendung der Verfahren zu verdeutlichen, wurde in Abbildung 19 die Dauer/Schraube im Verlauf der Operationen aufgezeichnet.

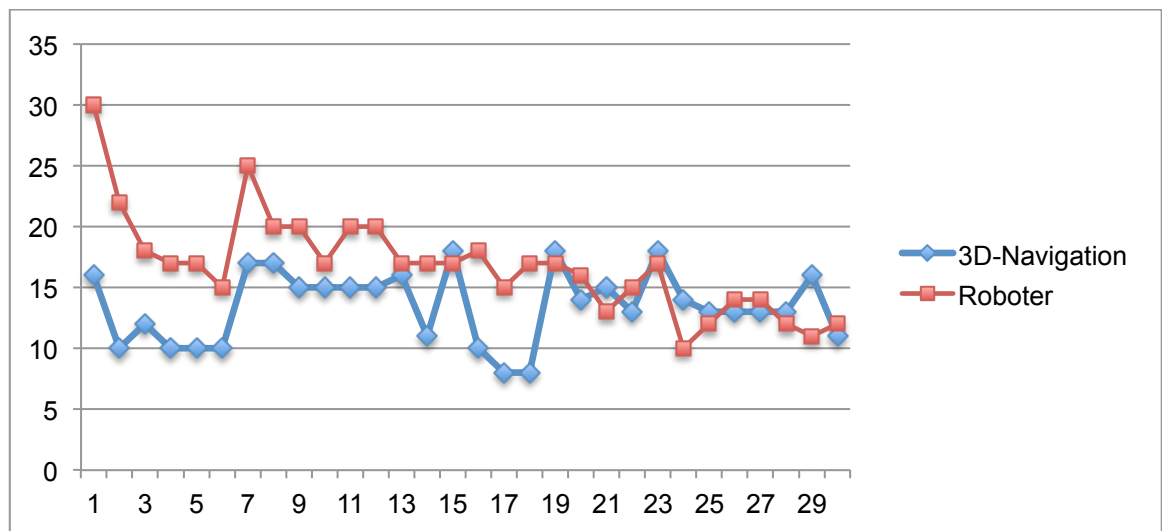


Abbildung 19: zeitlicher Verlauf der Dauer/Schraube (in min) von erster bis letzter Operation (y-Achse: Dauer/Schraube in min, x-Achse: Operation 1-30)

5.2. Strahlenbelastung

Wie bereits beschrieben erfolgte zum Vergleich der verschiedenen Bildgebungsmodalitäten - 3D-Scan und Computertomographie - die Umrechnung der jeweiligen Strahlendosen in die effektive Dosis in der Maßeinheit Millisievert (mSv). Angegeben wurde jeweils der Mittelwert aus prä-, intra- und postoperativer Strahlenbelastung sowie die mittlere Gesamtstrahlenbelastung pro Operation und Gruppe.

<u>Strahlenbelastung</u>	<u>Roboter</u>	<u>3D-Navigation</u>
präoperativ	8,25 mSv	6,70 mSv
intraoperativ	3,36 mSv	5,12 mSv
postoperativ	8,06 mSv	8,58 mSv
Gesamt	19,67 mSv	20,53 mSv

Tabelle 2: Mittlere Strahlenbelastung in mSv prä-, intra- und postoperativ sowie insgesamt

Die hier aufgezeigten Daten zeigten in der Auswertung mittels ungepaartem t-Test keinen statistisch signifikanten Unterschied in der applizierten Gesamtstrahlendosis beider Verfahren (Mittelwertunterschied 0,86/ $p = 0,59$).

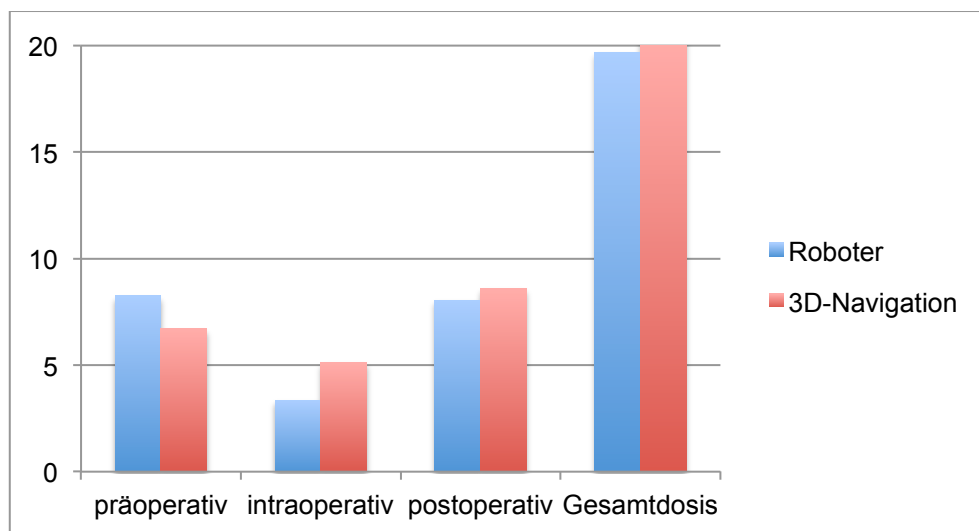


Abbildung 20: Vergleich der mittleren applizierten Strahlendosen in mSv (y-Achse: effektive Dosis in mSv, x-Achse: prä-/intra-/postoperative Strahlendosis sowie Gesamtdosis)

5.3. Auswertung der postoperativen Schraubenlage

Wie bereits beschrieben erfolgte die Auswertung der postoperativen Schraubenlage mit der modifizierten Rongming Xu Klassifikation (s. Abbildung 13). Die Auswertung wurde anhand einer postoperativ durchgeführten CT-Untersuchung des stabilisierten Bereichs durchgeführt. Die genaue Anzahl der Schrauben pro Klasse und die jeweiligen Prozentangaben bezüglich der Gesamtanzahl an gesetzten Schrauben pro Stabilisierungsverfahren zeigt Tabelle 3.

	Roboter	3D-Navigation	
I A	195 (77,38%)	144 (60,25%)	
B	17 (6,74%)	10 (4,18%)	
C	13 (5,15%)	19 (7,95%)	
D	7 (2,78%)	37 (15,48%)	
II A	11 (4,37%)	12 (5,02%)	
B	5 (1,98%)	9 (3,77%)	
III A	1 (0,40%)	-	
B	-	-	
C	3 (1,2%)	8 (3,35%)	
	<u>252</u>	<u>239</u>	

Tabelle 3: Verteilung der postoperativen Schraubenlagen nach der Rongming Xu Klassifikation

Unterteilt man die Schrauben nun wie in Tabelle 1 beschrieben nach der Qualität in die Kategorien sehr gut, gut, befriedigend und unbefriedigend ergibt sich folgendes Bild:

Qualität	Klasse	Roboter	3D-Navigation
sehr gut	IA, IIB	200 (79,40%)	153 (64,01%)
gut	IB	17 (6,74%)	10 (4,18%)
befriedigend	IC, ID	20 (7,92%)	56 (23,45%)
unbefriedigend	IIA, IIIA, IIIB, IIIC	15 (5,94%)	20 (8,36%)

Tabelle 4: Anzahl der Schrauben aufgeteilt nach Qualität der Schraubenlage

Die statistische Auswertung mittels Chi-Quadrat-Test zeigte, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem gewählten Operationsverfahren und der damit erzielten postoperativen Schraubenlage besteht ($p < 0,01$). Es zeigte sich eine deutliche Überlegenheit des Roboter-gestützten Verfahrens.

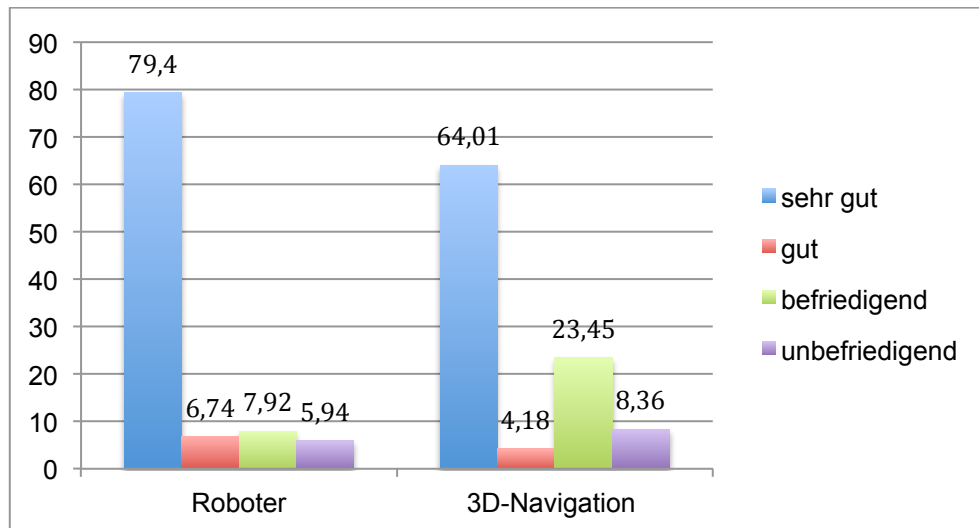


Abbildung 21: Prozentuale Angabe der Schraubenanzahl in Bezug auf die Gesamtzahl der gesetzten Schrauben aufgeteilt nach der Qualität der Schraubenlage

5.4. Peri- und postoperative Komplikationen

5.4.1. Operative Revisionen

Bei 5 Patienten (8,33%) musste eine Revisionsoperation durchgeführt werden. 3 der Patienten befanden sich in der Robotergruppe, 2 Patienten in der 3D-Navigationsgruppe. Grund für die Revisionsoperationen waren Schraubenfehlagen (jeweils eine pro Gruppe), in einem Fall mit begleitendem sekundären neurol. Defizit, sowie Wundheilungsstörungen. Eine weitere Revisionsoperation musste erfolgen, da die postoperative Bildgebung ein bei der initialen Operation nicht vollständig entferntes Teil des Schraubenführungssystems zeigte.

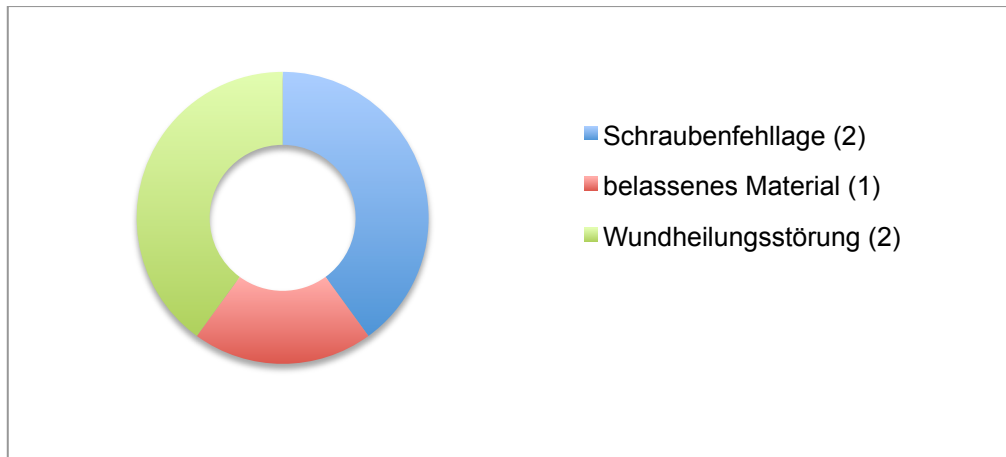


Abbildung 22: Revisionsindikationen

5.4.2. Sekundäre neurologische Defizite

Eine der beschriebenen Schraubenfehllagen in der Robotergruppe führte zu einer neu aufgetretenen Lumboischialgie mit begleitender Fußheberparese. In der postoperativen Bildgebung konnte ursächlich hierfür eine mediale Perforation der Pedikelwand durch die eingebrachte Schraube detektiert werden. Nach Revision der betreffenden Schraube war das neurol. Defizit komplett rückläufig.

5.4.3. Postoperative Komplikationen

Im Rahmen des postoperativen stationären Aufenthalts traten in 4 Fällen (6,67%) Komplikationen auf. Jeweils 2 Fälle waren in der 3D-Navigations- bzw. in der Robotergruppe. Dabei handelte es sich durchweg um oberflächliche Wundheilungsstörungen. In 2 der 4 Fälle (50%) war eine operative Wundrevision notwendig.

6. Diskussion

6.1. Zusammenfassung der Hauptergebnisse

Die vorliegende Arbeit vergleicht die Ergebnisse 3D-Navigations- und Roboter-gestützter transpedikulärer Stabilisierung an Brust- und Lendenwirbelsäule. Ziel der Operationen war die Behandlung instabiler Wirbelkörperfrakturen traumatischer, infektiöser, osteoporotischer oder metastatischer Genese. Beide Gruppen enthielten jeweils 30 Patienten mit einem durchschnittlichen Alter von 63,9 Jahren (20 bis 92 Jahre), insgesamt wurden 491 transpedikuläre Schrauben platziert. Verglichen wurde die Gesamtstrahlenbelastung sowie die Operationsdauer. Von besonderem Interesse war auch der Vergleich der Präzision der intrapedikulären Schraubenlage, die mit dem jeweiligen Operationsverfahren erreicht werden konnte. Diese wurde anhand der modifizierten Rongming Xu Klassifikation an postoperativen CT-Aufnahmen bestimmt. Die Auswertung der postoperativen Ergebnisse zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied in der applizierten Gesamtstrahlendosis. Bei der Operationsdauer bzw. der benötigten Zeit pro gesetzter Schraube zeigte sich ein Vorteil des Navigations-gestützten Verfahrens. Die statistische Auswertung der Präzision der intrapedikulären Schraubenlage zeigte einen signifikanten Zusammenhang zwischen gewählter Operationsmethode und postoperativ erzielter Schraubenlage mit deutlichem Vorteil der Roboter-gestützten Technik.

6.2. Methodik und Ergebnisse

6.2.1. Patientenkollektiv

Das gewählte Patientenkollektiv war sehr heterogen, sowohl bezüglich des Alters als auch der Diagnose, die der Operationsindikation zugrunde lag. Die Anzahl der operierten Segmente variierte dabei stark und auch die Operationslokalisation umfasste die gesamte thorakolumbale Wirbelsäule. Dies spiegelt zwar die multiplen Einsatzmöglichkeiten der beiden Operationsverfahren wieder, allerdings wird der direkte Vergleich der Patienten untereinander dadurch erschwert. Khan et al. beschränkten sich beispielsweise

auf mono- oder bisegmentale transpedikuläre Stabilisierungen rein im lumbosakralen Bereich, zudem litten alle Patienten an degenerativen Bandscheibenschäden, die zur Operation führten (Khan et al., 2019). Diese Einschränkungen und daraus resultierenden Angleichungen des Patientenkollektivs ermöglichen einen besseren und valideren Vergleich beider Operationsverfahren und sollten daher bei zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

6.2.2. Operationsverfahren

Beschrieben wurden zwei Stabilisierungsverfahren, 3D-Navigations- und Roboter-gestützt, die bei gleicher Indikation eingesetzt werden können. Besonderes Augenmerk liegt daher auf dem postoperativen Ergebnis sowie den Begleitumständen wie Operationsdauer und Strahlenbelastung. Ein nicht zu unterschätzender Faktor ist dabei die Erfahrung des operierenden Chirurgen. Schatlo et al. konnten dies in einem Vergleich der postoperativen Schraubenlagen 13 verschiedener Operateure herausarbeiten. Die Ergebnisse zeigten ein Maximum an Schraubenfehlagen zwischen der 5. und der 25. selbstständig durchgeführten Stabilisierungsoperation der jeweiligen Chirurgen. Danach nahm die Anzahl fehlplatzierter Schrauben kontinuierlich ab (Schatlo et al., 2015). Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Operationen wurden durch verschiedene Operateure mit unterschiedlicher Erfahrung bezüglich Stabilisierungen an der Wirbelsäule durchgeführt. Dies hatte sicherlich Einfluss auf die erzielten Ergebnisse, konnte aber nicht direkt in der Auswertung berücksichtigt werden. In der von Kahn et al. durchgeführten Arbeit wurden beide Operationsverfahren nur von jeweils einem Operateur ausgeführt, was den interoperativen Vergleich weiterhin erleichtert (Khan et al., 2019).

An anderer Aspekt ist, dass das Roboter-gestützte Verfahren zu Beginn dieser Arbeit erst kurze Zeit in unserer Abteilung eingesetzt wurde, während die 3D-Navigations-gestützte Technik sich bereits längere Zeit in Verwendung befand und somit sowohl den Operateuren als auch dem beteiligten OP-Personal vertraut war. Dies spiegelte sich beispielweise in der längeren Operationsdauer wieder, die auch die Einrichtung und den Aufbau des Robotersystems

einschloss. Allerdings konnte trotz dieser ungleichen Voraussetzungen mit dem Roboterverfahren eine signifikant bessere Schraubenlage erzielt werden. Dies wird auch in mehreren Review-Artikeln deutlich, die ebenfalls eine Überlegenheit des Robotersystems in Bezug auf die Präzision der Schraubenlage aufzeigen (Joseph et al., 2017; Kochanski et al., 2019). Allerdings gibt es auch gegenteilige Arbeiten, deren Ergebnisse eine Überlegenheit der Navigations-gestützten Technik deutlich machen (Ringel et al., 2012).

6.2.3. Auswertung der Schraubenlage

Die Auswertung der postoperativen intrapedikulären Schraubenlage erfolgte mit der modifizierten Klassifikation nach Rongming Xu (Xu et al., 1998). Durch die Einteilung der Schraubenlage in 3 Klassen mit jeweiligen Unterklassen war eine sehr genaue Bewertung bzw. Einstufung möglich. Anhand der Qualität der Schraubenlage erfolgte dann abschließend eine Einteilung in die Kategorien sehr gut bis unbefriedigend. Ein direkter Vergleich mit anderen Arbeiten gestaltete sich schwierig, da viele unterschiedliche Klassifikationssysteme zur Auswertung der Schraubenlage herangezogen wurden. Als Beispiel können die Klassifikationen nach Gertzbein und Robbins (Gertzbein & Robbins, 1990) und nach Ravi et al. (Ravi et al., 2011) genannt werden. Allen genannten Klassifikationen ist jedoch gemeinsam, dass die Beurteilung postoperativ anhand einer Dünnschicht-CT-Untersuchung erfolgte und die intrapedikuläre Lage der Schraube mit möglichen medialen oder lateralen Fehllagen ausschlaggebend war.

Für zukünftige Arbeiten wäre die Etablierung eines allgemein bekannten und akzeptierten Klassifikationssystems sinnvoll, um einen direkten Vergleich verschiedener Arbeiten und Studien zu ermöglichen.

6.2.4. Operationsdauer

Die Operationsdauer wurde in dieser Arbeit mittels Zeit pro gesetzter Schraube angegeben. Diese kontinuierlich im Verlauf der Operationen abnehmende Zeit pro Schraube verdeutlicht die in der Verwendung des Robotersystems vorhandene Lernkurve. Dieser Effekt wurde auch in der Literatur beschrieben (Joseph et al., 2017). Allerdings wurde der genannte Wert für die Zeit pro Schraube in dieser Arbeit aus der Gesamtoperationsdauer berechnet, indem diese durch die Anzahl der gesetzten Schrauben geteilt wurde. Das heißt in die Zeit pro gesetzter Schraube floss auch die Einrichtung des jeweiligen Operationsverfahrens, der Hautschnitt, die Stabeinbringung und der Hautverschluss mit ein. Dies verlängerte die tatsächliche Zeit pro gesetzter Schraube deutlich und ist daher für den direkten Vergleich mit anderen Arbeiten nicht geeignet. Bei zukünftigen Arbeiten zu diesem Thema sollte daher eine präzisere Angabe der Zeitdauer pro gesetzter Schraube erfolgen, die lediglich die reine Dauer von Einbringen des Kirschnerdrahtes bis zum Abschluss der Schraubeneinbringung berücksichtigt.

6.2.5. Strahlenbelastung

Die Gesamtstrahlenbelastung setzte sich zusammen aus prä-, intra- und postoperativer Strahlenbelastung. Für das Robotersystem war ein präoperatives Dünnschicht-CT der zu operierenden Region für die Planung der Schraubentrajektorie notwendig. Allerdings wurde auch bei der 3D-Navigationsgestützten Technik zur präoperativen Darstellung der knöchernen Verhältnisse in fast jedem Fall eine CT-Untersuchung ergänzt. Ein signifikanter Unterschied bezüglich der Gesamtstrahlenbelastung zwischen beiden Verfahren konnte in dieser Arbeit nicht dargestellt werden. In der Literatur, die ebenfalls beide Operationsverfahren verglichen hat, finden sich heterogene Ergebnisse mit ähnlicher, gesteigerter oder verminderter Strahlenbelastung bei Nutzung des Robotersystems (Kantelhardt et al., 2011; Khan et al., 2019; Roser et al., 2013). Langfristiges Ziel sollte eine Reduktion der Strahlenbelastung sowohl für Operateur und OP-Personal als auch für den Patienten sein. Dies könnte beispielweise durch Verzicht auf die postoperative CT-Kontrolle erfolgen, da die

Draht- bzw. Schraubenlage intraoperativ bereits mittels 3D-Scan kontrolliert wurde. Kahn et al. beschrieben in ihrer Arbeit die Kombination des Robotersystems mit intraoperativem CT (Khan et al., 2019). Diese Kombination macht die Durchführung einer präoperativen Planungsbildgebung sowie die intraoperative Fluoroskopie zur Registrierung des Systems überflüssig und kann so die Strahlenbelastung, besonders für den Patienten, reduzieren.

6.3. Ausblick

Roboter- und 3D-Navigations-gestützte Systeme, die intraoperativ genutzt werden, haben mehrere Vorteile. Im Vergleich zur früher praktizierten Freihand-Technik unter a.p. und lateraler Röntgenkontrolle kann eine deutlich präzisere Schraubenanlage erfolgen. Außerdem werden minimal-invasive Zugänge ermöglicht, die den intraoperativen Gewebeschaden und Blutverlust sowie die postoperative Infektionsgefahr reduzieren (Kochanski et al., 2019). Ein zusätzlicher Vorteil der Robotersysteme im Vergleich zum Menschen ist die Ausschaltung des physiologischen Tremors sowie die fehlende Ermüdung, die zahlreiche Wiederholungen der selben Arbeitsschritte mit reproduzierbarem Ergebnis ermöglicht (Overley et al., 2017).

Allerdings sind die bisher verfügbaren spinalen Robotiksysteme semi-aktiv, die Anlage des Bohrlochs im Pedikel sowie die Schraubeneinbringung muss durch den Chirurgen erfolgen. Um trotzdem die Anschaffung und den Nutzen eines Robotersystems zu rechtfertigen, müssen die so erzielten Ergebnisse im Vergleich denen der konventionellen bildgestützten Navigationssysteme überlegen sein. Dies ist zwar in der vorgelegten Arbeit der Fall, jedoch herrscht diesbezüglich in der vorliegenden Literatur bisher Uneinigkeit (Khan et al., 2019; Ringel et al., 2012). Weitere klinische Erprobung sowie die Weiterentwicklung der in der Neurochirurgie eingesetzten Robotik mit Erweiterung der Möglichkeiten beispielweise zu knöcherner Dekompression, intra- und extraduraler Tumorresektion oder Einbeziehung der Biomechanik des implantierten Stabilisierungsmaterials wäre ein weiterer wichtiger Schritt (Khan et al., 2019; Overley et al., 2017).

7. Abkürzungsverzeichnis

AF	Anulus fibrosus
ALL	Anterior longitudinal ligament (Lig. longitudinale anteriorus)
ALIF	Anteriore lumbale interkorporelle Fusion
a.p.	anterior-posterior
BSG	Blutsenkungsgeschwindigkeit
BWS	Brustwirbelsäule
CRP	C-reaktives Protein
CT	Computertomographie
DFP	Dosis-Flächen-Produkt
DLP	Dosis-Längen-Produkt
DVO	Dachverband Osteologie
DXA	Duale X-ray Absorptiometrie
Gy	Gray
HIV	Humanes Immundefizienz Virus
HWS	Halswirbelsäule
Lig.	Ligamentum
LLIF	Laterale lumbale interkorporelle Fusion
LWS	Lendenwirbelsäule
mSv	Millisievert
MRT	Magnetresonanztomographie
OF	Osteoporotische Fraktur
OLIF	Oblique lumbale interkorporelle Fusion
p	Signifikanzgrenze
PEEK	Poly-Ether-Ether-Keton
PLIF	Posteriore lumbale interkorporelle Fusion
PLC	Posterior ligament complex (hinterer Bandapparat)
PLL	Posterior longitudinal ligament (Lig. longitudinale posteriorus)
PMMA	Polymethylmethacrylat
RIA	Robot Institute of America
SINS-Score	Spinal Instability Neoplastic Score
SSL	Supraspinal ligament (Lig. supraspinale)

SOSG	Spine Oncology Study Group
STIR	Short tau inversion recovery
Sv	Sievert
TIRM	Turbo inversion recovery magnitude
TLICS	Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score
TLIF	Transforaminale lumbale interkorporelle Fusion
WHO	World Health Organisation
XLIF	Extrem laterale lumbale interkorporelle Fusion
3D	dreidimensional

8. Literaturverzeichnis

Aebi, M. (2003). Spinal metastasis in the elderly. *Eur Spine J*, 12 Suppl 2, S202-213. doi:10.1007/s00586-003-0609-9

Albee, F. H. (2007). Transplantation of a portion of the tibia into the spine for Pott's disease: a preliminary report 1911. *Clin Orthop Relat Res*, 460, 14-16. doi:10.1097/BLO.0b013e3180686a0f

Bork, H. (2016) Leitlinie der Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie e.V. (DGOOC): Rehabilitation nach traumatischen Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule ohne neurologische Ausfälle, 11.03.2016 (Webpage). Retrieved from <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/033-043>.

Bühren, V. (2003). Injuries to the thoracic and lumbar spine. *Unfallchirurg*, 106(1), 55-68; quiz 68-59. doi:10.1007/s00113-002-0557-6

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2004). Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 51: Medizinische Strahlenexposition in der Diagnostik und ihre Bewertung. Bonn: Elsevier Verlag

Cassidy, J. T., Baker, J. F., Lenehan, B. (2018). The Role of Prognostic Scoring Systems in Assessing Surgical Candidacy for Patients With Vertebral Metastasis: A Narrative Review. *Global Spine J*, 8(6), 638-651. doi:10.1177/2192568217750125

Chang, C. Y., Gill, C. M., Joseph Simeone, F., Taneja, A. K., Huang, A. J., Torriani, M., Bredella, M. A. (2016). Comparison of the diagnostic accuracy of 99 m-Tc-MDP bone scintigraphy and 18 F-FDG PET/CT for the detection of skeletal metastases. *Acta Radiol*, 57(1), 58-65. doi:10.1177/0284185114564438

Charles, Y. P., Steib, J. P. (2015). Management of thoracolumbar spine fractures with neurologic disorder. *Orthop Traumatol Surg Res*, 101(1 Suppl), S31-40. doi:10.1016/j.otsr.2014.06.024

Cheung, W. Y., Luk, K. D. (2012). Pyogenic spondylitis. *Int Orthop*, 36(2), 397-404. doi:10.1007/s00264-011-1384-6

Cramer, J., Haase, N., Behre, I., Ostermann, P. (2003) Spondylitis und Spondylodiszitis. *Trauma Berufskrankh* 5, 336–341. doi:
<https://doi.org/10.1007/s10039-003-0771-7>

Dachverband Osteologie e.V (2017), Leitlinie des Dachverbands Osteologie e.V.: Osteoporose - Prophylaxe, Diagnostik und Therapie, 31.12.2017 (Webpage). Retrieved from <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/183-001.html>

Da Fonseca, K., Baier, M., Grafe, I., Libicher, M., Noeldge, G., Kasperk, C., Meeder, P. J. (2006). [Surgical technique of balloon kyphoplasty]. *Unfallchirurg*, 109(5), 401-405. doi:10.1007/s00113-006-1094-5

Delank, K. S., Wendtner, C., Eich, H. T., Eysel, P. (2011). The treatment of spinal metastases. *Dtsch Arztebl Int*, 108(5), 71-79; quiz 80. doi:10.3238/arztebl.2011.0071

Denis, F. (1983). The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine (Phila Pa 1976)*, 8(8), 817-831.

Ecker, R. D., Endo, T., Wetjen, N. M., Krauss, W. E. (2005). Diagnosis and treatment of vertebral column metastases. *Mayo Clin Proc*, 80(9), 1177-1186. doi:10.4065/80.9.1177

Fisher, C. G., DiPaola, C. P., Ryken, T. C., Bilsky, M. H., Shaffrey, C. I., Berven, S. H., Fourney, D. R. (2010). A novel classification system for spinal instability in neoplastic disease: an evidence-based approach and expert consensus from

the Spine Oncology Study Group. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(22), E1221-1229.
doi:10.1097/BRS.0b013e3181e16ae2

Gertzbein, S. D., Robbins, S. E. (1990). Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine (Phila Pa 1976)*, 15(1), 11-14.

Gonschorek, O., Bühren, V. (2014). Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule *Orthopädie und Unfallchirurgie, Georg Thieme Verlag*, 9(06):483-513.

Gouliouris, T., Aliyu, S. H., Brown, N. M. (2010). Spondylodiscitis: update on diagnosis and management. *J Antimicrob Chemother*, 65 Suppl 3, iii11-24.
doi:10.1093/jac/dkq303

Govender, S. (2005). Spinal infections. *J Bone Joint Surg Br*, 87(11), 1454-1458. doi:10.1302/0301-620X.87B11.16294

Greenlee, R. T., Murray, T., Bolden, S., & Wingo, P. A. (2000). Cancer statistics, 2000. *CA Cancer J Clin*, 50(1), 7-33.

Hadra, B. E. (1975). The classic: Wiring of the vertebrae as a means of immobilization in fracture and Potts' disease. Berthold E. Hadra. *Med Times and Register*, Vol22, May 23, 1891. *Clin Orthop Relat Res*(112), 4-8.

Herold, G. (2010). *Innere Medizin*. Köln: Herold

Hibbs, R. A. (1911). XII. An Operation for Stiffening the Knee-Joint: With Report of Cases from the Service of the New York Orthopaedic Hospital. *Ann Surg*, 53(3), 404-407.

Holdsworth, F. W. (1964). Fractures and Dislocations of the Lower Thoracic and Lumbar Spines, with and without Neurological Involvement. *Curr Pract Orthop Surg*, 23, 61-83.

Jablonski, J. (1981). *NBS/RIA Robotics Research Workshop: proceedings of the NBS/RIA Workshop on Robotic Research held at Gaithersburg, MD. November 13-15, 1979*: National Bureau of Standards.

Jaramillo-de la Torre, J. J., Bohinski, R. J., Kuntz, C. t. (2006). Vertebral osteomyelitis. *Neurosurg Clin N Am*, 17(3), 339-351, vii.
doi:10.1016/j.nec.2006.05.003

Joseph, J. R., Smith, B. W., Liu, X., Park, P. (2017). Current applications of robotics in spine surgery: a systematic review of the literature. *Neurosurg Focus*, 42(5), E2. doi:10.3171/2017.2.FOCUS16544

Kantelhardt, S. R., Martinez, R., Baerwinkel, S., Burger, R., Giese, A., Rohde, V. (2011). Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement. *Eur Spine J*, 20(6), 860-868. doi:10.1007/s00586-011-1729-2

Khan, A., Meyers, J. E., Yavorek, S., O'Connor, T. E., Siasios, I., Mullin, J. P., Pollina, J. (2019). Comparing Next-Generation Robotic Technology with 3-Dimensional Computed Tomography Navigation Technology for the Insertion of Posterior Pedicle Screws. *World Neurosurg*, 123, e474-e481.
doi:10.1016/j.wneu.2018.11.190

King, D. (1948). Internal fixation for lumbosacral fusion. *J Bone Joint Surg Am*, 30A(3), 560-565.

Kochanski, R. B., Lombardi, J. M., Laratta, J. L., Lehman, R. A., O'Toole, J. E. (2019). Image-Guided Navigation and Robotics in Spine Surgery. *Neurosurgery*. doi:10.1093/neuros/nyy630

Kwoh, Y. S., Hou, J., Jonckheere, E. A., Hayati, S. (1988). A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng*, 35(2), 153-160. doi:10.1109/10.1354

Lecouvet, F. E., Geukens, D., Stainier, A., Jamar, F., Jamart, J., d'Othee, B. J., Tombal, B. (2007). Magnetic resonance imaging of the axial skeleton for detecting bone metastases in patients with high-risk prostate cancer: diagnostic and cost-effectiveness and comparison with current detection strategies. *J Clin Oncol*, 25(22), 3281-3287. doi:10.1200/JCO.2006.09.2940

Ledermann, H. P., Schweitzer, M. E., Morrison, W. B., Carrino, J. A. (2003). MR imaging findings in spinal infections: rules or myths? *Radiology*, 228(2), 506-514. doi:10.1148/radiol.2282020752

Lemke, D. M., Hacein-Bey, L. (2003). Metastatic compression fractures - vertebroplasty for pain control. *J Neurosci Nurs*, 35(1), 50-55.

Lieberman, I. H., Togawa, D., Kayanja, M. M., Reinhardt, M. K., Friedlander, A., Knoller, N., Benzel, E. C. (2006). Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: Part I--Technical development and a test case result. *Neurosurgery*, 59(3), 641-650; discussion 641-650. doi:10.1227/01.NEU.0000229055.00829.5B

Linhardt, O., Matussek, J., Refior, H. J., Krodel, A. (2007). Long-term results of ventro-dorsal versus ventral instrumentation fusion in the treatment of spondylitis. *Int Orthop*, 31(1), 113-119. doi:10.1007/s00264-006-0140-9

Magerl, F., Aebi, M., Gertzbein, S. D., Harms, J., Nazarian, S. (1994). A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J*, 3(4), 184-201.

Minne, W. (1995). [Basic therapy of osteoporosis in the elderly. Interview by Dr. rer. nat. Till Uwe Keil]. *Fortschr Med*, 113(25), 48.

Mobbs, R. J., Phan, K., Malham, G., Seex, K., Rao, P. J. (2015). Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. *J Spine Surg*, 1(1), 2-18. doi:10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05

Moskopp, D., Wassmann, H. (2015). *Neurochirurgie* (2nd ed.). Stuttgart: Schattauer Verlag.

Mundy, G. R. (2002). Metastasis to bone: causes, consequences and therapeutic opportunities. *Nat Rev Cancer*, 2(8), 584-593. doi:10.1038/nrc867

Nasto, L. A., Colangelo, D., Mazzotta, V., Di Meco, E., Neri, V., Nasto, R. A., Pola, E. (2014). Is posterior percutaneous screw-rod instrumentation a safe and effective alternative approach to TLSO rigid bracing for single-level pyogenic spondylodiscitis? Results of a retrospective cohort analysis. *Spine J*, 14(7), 1139-1146. doi:10.1016/j.spinee.2013.07.479

Niethard, F. U. (2009). *Duale Reihe Orthopädie und Unfallchirurgie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag

Orief, T., Alfawareh, M., Halawani, M., Attia, W., Almusrea, K. (2018). Accuracy of percutaneous pedicle screw insertion in spinal fixation of traumatic thoracic and lumbar spine fractures. *Surg Neurol Int*, 9, 78. doi:10.4103/sni.sni_5_18

Overley, S. C., Cho, S. K., Mehta, A. I., Arnold, P. M. (2017). Navigation and Robotics in Spinal Surgery: Where Are We Now? *Neurosurgery*, 80(3S), S86-S99. doi:10.1093/neuros/nyw077

Ravi, B., Zahrai, A., Rampersaud, R. (2011). Clinical accuracy of computer-assisted two-dimensional fluoroscopy for the percutaneous placement of lumbosacral pedicle screws. *Spine (Phila Pa 1976)*, 36(1), 84-91. doi:10.1097/BRS.0b013e3181cbfd09

Rickert, M., Rauschmann, M., Fleege, C., Behrbalk, E., Harms, J. (2015). [Interbody fusion procedures. Development from a historical perspective]. *Orthopade*, 44(2), 104-113. doi:10.1007/s00132-015-3076-1

Ringel, F., Stuer, C., Reinke, A., Preuss, A., Behr, M., Auer, F., Meyer, B. (2012). Accuracy of robot-assisted placement of lumbar and sacral pedicle

screws: a prospective randomized comparison to conventional freehand screw implantation. *Spine (Phila Pa 1976)*, 37(8), E496-501.

doi:10.1097/BRS.0b013e31824b7767

Roser, F., Tatagiba, M., Maier, G. (2013). Spinal robotics: current applications and future perspectives. *Neurosurgery*, 72 Suppl 1, 12-18.

doi:10.1227/NEU.0b013e318270d02c

Rotter, R., Martin, H., Fuerderer, S., Gabl, M., Roeder, C., Heini, P., Mittlmeier, T. (2010). Vertebral body stenting: a new method for vertebral augmentation versus kyphoplasty. *Eur Spine J*, 19(6), 916-923. doi:10.1007/s00586-010-1341-x

Roy-Camille, R., Saillant, G., Mazel, C. (1986). Plating of thoracic, thoracolumbar, and lumbar injuries with pedicle screw plates. *Orthop Clin North Am*, 17(1), 147-159.

Rutges, J. P., Kempen, D. H., van Dijk, M., Oner, F. C. (2016). Outcome of conservative and surgical treatment of pyogenic spondylodiscitis: a systematic literature review. *Eur Spine J*, 25(4), 983-999. doi:10.1007/s00586-015-4318-y

Sadeghi-Naini, M., Aarabi, S., Shokraneh, F., Janani, L., Vaccaro, A. R., Rahimi-Movaghar, V. (2018). Vertebroplasty and Kyphoplasty for Metastatic Spinal Lesions: A Systematic Review. *Clin Spine Surg*, 31(5), 203-210.

doi:10.1097/bsd.0000000000000601

Saillant, G. (1976). [Anatomical study of the vertebral pedicles. Surgical application]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, 62(2), 151-160.

Schaser, K. D., Melcher, I., Mittlmeier, T., Schulz, A., Seemann, J. H., Haas, N. P., Disch, A. C. (2007). [Surgical management of vertebral column metastatic disease]. *Unfallchirurg*, 110(2), 137-159; quiz 160-131. doi:10.1007/s00113-007-1232-8

Schatlo, B., Martinez, R., Alaid, A., von Eckardstein, K., Akhavan-Sigari, R., Hahn, A., Rohde, V. (2015). Unskilled unawareness and the learning curve in robotic spine surgery. *Acta Neurochir (Wien)*, 157(10), 1819-1823; discussion 1823. doi:10.1007/s00701-015-2535-0

Schick, U., Marquardt, G., Lorenz, R. (2001). Intradural and extradural spinal metastases. *Neurosurg Rev*, 24(1), 1-5; discussion 6-7.

Schnake, K. J., Blattert, T. R., Hahn, P., Franck, A., Hartmann, F., Ullrich, B., (2018). Classification of Osteoporotic Thoracolumbar Spine Fractures: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J*, 8(2 Suppl), 46S-49S. doi:10.1177/2192568217717972

Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U. (2005). *Prometheus: LernAtlas der Anatomie* (1st ed.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag

Si, M., Yang, Z. P., Li, Z. F., Yang, Q., Li, J. M. (2013). Anterior versus posterior fixation for the treatment of lumbar pyogenic vertebral osteomyelitis. *Orthopedics*, 36(6), 831-836. doi:10.3928/01477447-20130523-33

Siebenga, J., Leferink, V. J., Segers, M. J., Elzinga, M. J., Bakker, F. C., Haarman, H. J., Patka, P. (2006). Treatment of traumatic thoracolumbar spine fractures: a multicenter prospective randomized study of operative versus nonsurgical treatment. *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(25), 2881-2890. doi:10.1097/01.brs.0000247804.91869.1e

Simpson, J. M., Ebraheim, N. A., Jackson, W. T., Chung, S. (1993). Internal fixation of the thoracic and lumbar spine using Roy-Camille plates. *Orthopedics*, 16(6), 663-672.

Sobottke, R., Seifert, H., Fatkenheuer, G., Schmidt, M., Gossmann, A., Eysel, P. (2008). Current diagnosis and treatment of spondylodiscitis. *Dtsch Arztebl Int*, 105(10), 181-187. doi:10.3238/arztebl.2008.0181

Tella, S. H., Gallagher, J. C. (2014). Prevention and treatment of postmenopausal osteoporosis. *J Steroid Biochem Mol Biol*, 142, 155-170. doi:10.1016/j.jsbmb.2013.09.008

Tian, F., Tu, L. Y., Gu, W. F., Zhang, E. F., Wang, Z. B., Chu, G., Zhao, J. (2018). Percutaneous versus open pedicle screw instrumentation in treatment of thoracic and lumbar spine fractures: A systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*, 97(41), e12535. doi:10.1097/md.00000000000012535

Tokuhashi, Y., Matsuzaki, H., Oda, H., Oshima, M., Ryu, J. (2005). A revised scoring system for preoperative evaluation of metastatic spine tumor prognosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(19), 2186-2191

Tokuhashi, Y., Matsuzaki, H., Toriyama, S., Kawano, H., Ohsaka, S. (1990). Scoring system for the preoperative evaluation of metastatic spine tumor prognosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 15(11), 1110-1113

Upendra, B. N., Meena, D., Chowdhury, B., Ahmad, A., Jayaswal, A. (2008). Outcome-based classification for assessment of thoracic pedicular screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)*, 33(4), 384-390. doi:10.1097/BRS.0b013e3181646ba1

Vaccaro, A. R., Lehman, R. A., Jr., Hurlbert, R. J., Anderson, P. A., Harris, M., Hedlund, R., Oner, F. C. (2005). A new classification of thoracolumbar injuries: the importance of injury morphology, the integrity of the posterior ligamentous complex, and neurologic status. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(20), 2325-2333

Vaccaro, A. R., Oner, C., Kepler, C. K., Dvorak, M., Schnake, K., Bellabarba, C., Trauma Knowledge, F. (2013). AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976)*, 38(23), 2028-2037. doi:10.1097/BRS.0b013e3182a8a381

Xu, R., Ebraheim, N. A., Ou, Y., Yeasting, R. A. (1998). Anatomic considerations of pedicle screw placement in the thoracic spine. Roy-Camille technique versus open-lamina technique. *Spine (Phila Pa 1976)*, 23(9), 1065-1068

9. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Anatomie der Wirbelsäule	S. 2
Abb. 2	3-Säulen Modell nach Denis	S. 5
Abb. 3	Verletzungsmuster der Wirbelsäule	S. 6
Abb. 4	Schema Kompressionsverletzungen	S. 7
Abb. 5	Schema Distraktionsverletzungen	S. 8
Abb. 6	Schema Translationsverletzungen	S. 8
Abb. 7	OF-Klassifikation	S. 12
Abb. 8	Evaluierung der Tumorausdehnung im Wirbelkörper	S. 21
Abb. 9	Altersverteilung des Kollektivs	S. 35
Abb. 10	Lokalisationen der Operationen an der Wirbelsäule	S. 36
Abb. 11	Aufteilung nach Bereichen der Wirbelsäule	S. 36
Abb. 12	Aufschlüsselung der operierten Segmente	S. 37
Abb. 13	Operationsindikationen	S. 38
Abb. 14	Referenzstern der 3D-Navigation	S. 40
Abb. 15	Präoperative Planung der Schraubentrajektorie	S. 41
Abb. 16	Planungssoftware des SpineAssist	S. 43
Abb. 17	Darstellung des SpineAssist Devices	S. 44
Abb. 18	Modifizierte Klassifikation nach Rongming Xu	S. 48
Abb. 19	Zeitlicher Verlauf der Operationsdauer	S. 52
Abb. 20	Vergleich der mittleren applizierten Strahlendosis	S. 53
Abb. 21	Qualität der Schraubenlage	S. 55
Abb. 22	Revisionsindikationen	S. 56

10. Danksagung

Mein Dank für die Hilfe zur Beendigung dieser Arbeit geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. Ch. Lumenta sowie an meinen Oberarzt Dr. D. Schul. Außerdem natürlich an Freunde und Familie für die andauernde Unterstützung.