Abteilung Neurochirurgie
Kantonsspital Winterthur

Leiter: PD Dr. med. Joachim Oberle

Platzierung von Pedikelschrauben mit einer mechanischen Zielhilfe im Vergleich zur konventionellen Methode – erste klinische Ergebnisse

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Universität Ulm

Christian Brix
Traunstein

2008

Amtierender Dekan:	Prof. Dr. Klaus-Michael Debatin
1. Berichterstatter:	PD Dr. Joachim Oberle
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Florian Gebhard
Tag der Promotion:	24. Oktober 2008

Meinen Großeltern in Dankbarkeit.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Patienten und Methoden 5

2.1 Zielhilfe 5

2.2 Patientenkollektiv 10

2.3 Implantate 11

2.4 Präoperative Planungen 12

2.5 Operationsmethoden 13

2.6 Postoperative Datenerhebung 15

2.7 Statistische Berechnungen 17

3. Ergebnisse 19

3.1 Verteilung der Pedikelschrauben 19

3.2 Klinische Ergebnisse 20

3.3 Lage der Pedikelschrauben 22

3.3.1 Lage im Pedikel der thorakalen Wirbelsäule 22

3.3.2 Lage im Pedikel der lumbalen Wirbelsäule 25

3.3.3 Lage im Wirbelkörper 27

3.4 Pedikelweiten 29

3.4.1 Pedikelweiten der thorakalen Wirbelsäule 29

3.4.2 Pedikelweiten der lumbalen Wirbelsäule 30

3.5 Pedikelweiten, Schraubengrößen und Fehllagen 31

3.5.1 Verhältnis Pedikelweite und Schraubengröße 31

3.5.2 Abhängigkeit Schraubengröße und Pedikelweite 33

3.5.3 Abhängigkeit Fehllage und Pedikelweite 34

3.6 Statistischer Vergleich der Gruppen 36

3.6.1 Verteilung der Pedikelschrauben 36

3.6.2 Lage der Pedikelschrauben 36

3.6.3 Pedikelweiten 36

3.6.4 Verhältnis Pedikelweite und Schraubengröße 37

4. Diskussion 38
4.1 Thematik 38
4.2 Methodik 39
4.3 Ergebnisse 45
4.3.1 Schraubenverteilung 45
4.3.2 Klinisches Ergebnis 45
4.3.3 Schraubenlagen 49
4.3.4 Pedikelweiten 56
4.3.5 Pedikelweiten, Schraubengrößen und Fehllagen 60
4.4 Schlussfolgerung 64

5. Zusammenfassung 66

6. Literaturverzeichnis 68

Danksagung 79

Abkürzungsverzeichnis

a.-p.	anterior-posterior	Strahlengang von vorn nach hinten
CT	Computer-tomographie	Computerunterstützte bildgebende Röntgenuntersuchungstechnik zur direkten Darstellung von Weich-teilstrukturen
Dynesys®	Dynamic Neutralization System	Dynamisches System zur Stabilisierung der Wirbelsäule, das Pedikelschrauben verwendet
L	Lumbaler Wirbelkörper	Abkürzende Bezeichnung für die fünf Lendenwirbel (L1, L2, usw.)
MRT	Magnetresonanz-tomographie	Die Darstellung von Weichteil-strukturen auf dem Bildschirm ermöglichendes diagnostisches Verfahren, das das Verhalten des Spins (Eigendrall) von Atomkernen in hochfrequenten Magnetfeldern nutzt und die dabei ausgesandte elektromagnetische Hochfrequenz-strahlung computermäßig auswertet
PACS	Picture Archiving And Communication System	Softwaresystem zum Management von Bild- und Patienten-informationen, im Sinne der Archivierung und Kommunikation

S	Sakraler Wirbelkörper	Abkürzung für die fünf verschmolzenen Wirbel des Kreuzbeins (S1, S2, usw.)
Th	Thorakaler Wirbelkörper	Abkürzende Bezeichnung für die zwölf Brustwirbel (Th1, Th2, usw.)
USS	Universal Spine System	System zur Versteifung der Wirbelsäule, das Pedikelschrauben verwendet

1. Einleitung

1944 hat King als Erster Schrauben transartikulär durch die Facettengelenke in die Wirbelkörper der lumbosakralen Wirbelsäule eingebracht. Dadurch war es möglich die Wirbelsäule in allen drei Ebenen zu fixieren [39, 78, 80].
1959 war es Boucher, der das erste Mal die dorsale Fixierung der lumbalen Wirbelsäule mit Hilfe von Pedikelschrauben beschrieben hat [9].
Seit 1961 verwendete Roy-Camille Pedikelschraubensysteme routinemäßig zur Versorgung von thorakalen, thorakolumbalen und lumbalen Verletzungen der Wirbelsäule und hat damit gute Ergebnisse beschrieben. Diese Art der Fixierung von Wirbelsäulenverletzungen erwies sich als relativ sicher und zeigte wenige Komplikationen [68].
Seitdem wurden Systeme mit Pedikelschrauben zur Behandlung traumatischer Wirbelsäulenverletzungen, angeborener, degenerativer, entzündlicher oder tumoröser Wirbelsäulenveränderungen immer häufiger verwendet und stellen heute einen Grundpfeiler in der Wirbelsäulenchirurgie dar.

Für die Stabilität der Pedikelschraubensysteme ist eine präzise Positionierung der Schrauben in Pedikel und Wirbelkörper wesentlich [40].
Aus biomechanischer Sicht sollten die Pedikelschrauben im Idealfall entlang der Pedikelachse platziert werden. So ist es möglich den größten transversalen und sagittalen Pedikeldurchmesser zu nutzen [81] und dickere Pedikelschrauben einzubringen. Der Halt der Schraube im Knochen wird wesentlich durch die Dicke der Schraube und deren Länge im Wirbel bestimmt. Mit einem größeren Schraubendurchmesser und einer weiteren Einbringtiefe steigt die Stabilität [15, 40, 43, 45].

Neben dem biomechanischen Aspekt der Stabilität gewährleistet diese Ideallage aber auch den optimalen Schutz umliegender Gewebestrukturen.

Mögliche Verletzungen zu verhindern, stellt eine bleibende Herausforderung bei der transpedikulären Verschraubung dar. Dabei handelt es sich vor allem um Verletzungen, die durch das Einbringen der Schrauben selbst entstehen können.

Verläuft die Schraube nicht exakt im Pedikel und wird allseits von ihm umschlossen, besteht die Gefahr, dass die Schraube mit ihrem Gewinde medial, kaudal, kranial oder lateral die Pedikelkortikalis durchdringt und aus dem Pedikel austritt. Dadurch kann sie die in diesem Bereich umliegenden Strukturen wie das Rückenmark und die Spinalnervenwurzeln schädigen [16 – 18, 29, 50, 76, 83].

Diese Gefahr ist im Bereich der thorakalen Wirbelsäule am stärksten ausgeprägt, da dort die Pedikel und Abstände im Vergleich zu denen der lumbalen Wirbelsäule um einiges kleiner sind [13, 17, 18, 23, 29, 77, 85]. Nur Dura und Liquor cerebrospinalis trennen das Rückenmark von der medialen Pedikelwand [79].
Roy-Camille gibt hierfür einen Abstand von 2 – 3 mm an [68, 69]. Attar et al., Ebraheim et al. sowie Söyüncü et al. haben für die lumbale Wirbelsäule in vitro geringere Abstände bestimmt. Auf Höhe L1 betrugen die Abstände zwischen der medialen Pedikelwand und der Dura durchschnittlich 1,2 – 1,3 mm, bei L2 1,3 – 1,5 mm und bei L3 lagen diese Abstände zwischen 1,4 – 1,6 mm. Auf Höhe L4 ergaben sich Abstände von 1,4 – 1,7 mm und bei L5 lagen sie noch zwischen 1,4 – 1,6 mm [3, 19, 76]. Die aus dem Rückenmark austretenden Nervenwurzeln liegen nahe der kaudalen Pedikelwand. Der Abstand des Pedikels zu den Nervenwurzeln nach kaudal liegt im Bereich von L1 bis L5 zwischen 1,1 und 1,7 mm, nach kranial beträgt der Abstand zwischen 4,0 und 5,7 mm [3, 19, 76].
Im Foramen intervertebrale befinden sich die Spinalnerven ventral und kranial. Nachdem sie dieses verlassen haben verlaufen die Spinalnerven nahe des lateralen Kortex des unmittelbar kaudalen Pedikels.

Es sind damit vor allem den Pedikel medial oder kaudal perforierende Schrauben, die eine Gefahr für den Spinalnerven in seinem Verlauf um den Pedikel darstellen [68, 69, 76, 81, 82].

Die Schrauben können jedoch nicht nur den Pedikel perforieren, sondern auch den Wirbelkörper. Wurde die Schraube zentral im Pedikel platziert, kann diese den Wirbelkörper im Bereich der ventralen Kortikalis perforieren. Bei einer lateral fehlliegenden Pedikelschraube, wird diese den Wirbelkörper im Bereich der lateralen Kortikalis verlassen. Je nach Wirbelsäulenabschnitt und Pedikelseite können die Schrauben eine Gefahr für verschiedene intrathorakale bzw. intraabdominelle

Strukturen darstellen: Aorta, Ductus thoracicus, segmentale Gefäße, sympathischer Grenzstrang, Lunge, Ösophagus, Trachea, Vena azygos, Vena cava inferior [30, 59, 79, 81, 84].

Bei der konventionellen Technik der transpedikulären Fixierung werden die Pedikelschrauben mit Hilfe von intraoperativ identifizierten anatomischen Landmarken am Wirbel und unter Bildwandlerkontrolle in mindestens lateralem Strahlengang platziert. Bei richtiger Projektion sollte es möglich sein, eine schwerwiegende anteriore Fehllage zu vermeiden und so ausgedehnte Verletzungen der prävertebralen Strukturen zu verhindern.

Eine möglichst exakte Lage der Schrauben innerhalb der Grenzen des Pedikels sollte daher auch aus den oben dargestellten Lagebeziehungen zum zentralen und peripheren Nervensystem stets angestrebt werden.

Dennoch kommt es häufig zu unbeabsichtigten Abweichungen von der beschriebenen Ideallage. Dies unterstreicht die hohen Anforderungen beim Platzieren von Pedikelschrauben. Auch wenn nicht jede Abweichung von der Ideallage biomechanische Nachteile hat [66] oder zu einer Beeinträchtigung neuraler Strukturen führt [11, 25], lässt sich nicht bestreiten, dass sich der Operateur um eine möglichst ideale Schraubenlage bemühen sollte.

Für die konventionelle Methode werden in einer Metaanalyse von Kosmopoulos und Schizas zur Genauigkeit der Platzierung von Pedikelschrauben für die thorakale Wirbelsäule Fehllageraten zwischen 3,5 und 72,4 %, für die lumbale Wirbelsäule zwischen 2,5 und 40,0 % angegeben [41].

In den letzten 20 Jahren haben durch die technische Weiterentwicklung auch zunehmend computergestützte Navigationsmethoden zur Einbringung von Pedikelschrauben ihren Einzug in die Operationssäle gefunden und eine Erhöhung der Genauigkeit der Schraubenlagen bewirken können.

In der Metaanalyse von Kosmopoulos und Schizas werden für die Navigationssysteme Fehllageraten im Bereich der thorakalen Wirbelsäule zwischen 8,5 und 18,0 % angegeben. Lumbal liegen diese Fehllageraten zwischen 0,0 und 28,0 % [41].
Navigationssysteme sind jedoch teuer in der Anschaffung, zusätzlichen Ausstattung und Wartung. Sie benötigen je nach Planungssoftware ausgedehnte präoperative CT-Untersuchungen. Dadurch wird der Patient einer erhöhten Strahlung ausgesetzt. Aufwendigere präoperative Planungen sowie verlängerte Operationszeiten machen die Arbeit mit Navigationssystemen zeitaufwendig. Zudem sind sie noch nicht überall verfügbar [2, 38, 49, 53, 56, 63, 73].

In der vorliegenden Arbeit wird über die ersten klinischen Erfahrungen mit einer mechanischen Zielhilfe beim Platzieren von Pedikelschrauben in der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule berichtet. Sie wurde entwickelt um auf einfache, kostengünstige Art und Weise eine hohe Präzision bei der Pedikelinstrumentierung zu gewährleisten. Im Vergleich zur konventionellen Methode sollte geprüft werden, ob die Zielhilfe ein besseres Ergebnis bei der Platzierung von Pedikelschrauben erreichen kann.

2. Patienten und Methoden

2.1 Zielhilfe

Für die ideale, zentrale Lage der Pedikelschraube im Pedikel ohne Perforation der medialen, lateralen, kranialen oder kaudalen Pedikelwand ist eine optimale Anpassung des Schraubendurchmessers an den Pedikeldurchmesser, ein korrekter Eintrittspunkt der Schraube in den Wirbel und eine korrekte räumliche Orientierung der Schraube durch den Pedikel erforderlich.

Der optimale Schraubendurchmesser kann aufgrund der präoperativ vorhandenen CT- oder MRT-Aufnahmen individuell abgeschätzt werden.

Der korrekte Eintrittspunkt für die Schraube muss intraoperativ mittels anatomischer Landmarken präzise identifiziert werden. Zwei verschiedene Zugangswege zum Pedikel stehen hier zu Verfügung: der Zugang nach Roy-Camille oder der nach Weinstein.
Der Zugang nach Roy-Camille liegt thorakal als auch lumbal am Schnittpunkt zweier Geraden. Für die thorakalen Wirbel liegt der Schraubeneintrittspunkt an der Kreuzung einer vertikalen Linie, die durch die Mitte der unteren Gelenkfacette verläuft und einer horizontalen Linie, die durch die Mitte des Ansatzes des Processus transversus verläuft. Der Punkt liegt 1 mm unterhalb der Mitte des Facettengelenks. Für die lumbalen Wirbel sind die Landmarken ähnlich: die horizontale Gerade verläuft durch die Mitte des Ansatzes des Processus transversus, etwas tiefer als in der Brustwirbelsäule. Die vertikale Gerade ist durch den Gelenkspalt selbst vorgegeben, der auf dieser Höhe sagittal und vertikal verläuft. Der Eintrittspunkt liegt so 1 mm unterhalb des Facettengelenks auf einem typischerweise vertikalen Knochenkamm [68].
Weinstein schlägt vor, dass Schrauben in der lumbalen Wirbelsäule entfernt des Facettengelenks eingebracht werden sollen, sodass sie die Bewegungen der nicht-instrumentierten und nicht-fusionierten Segmente nicht beeinflussen [80].

Abbildung 1 zeigt die beiden Zugangswege.

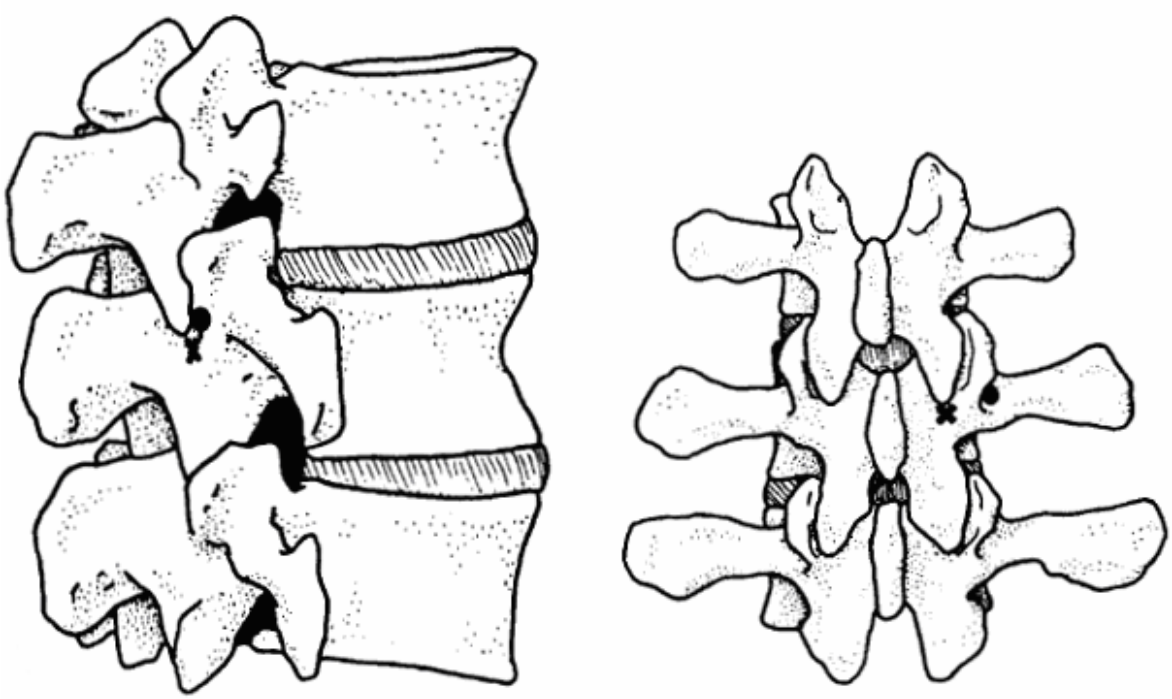

Abb. 1: Schraubeneintrittspunkte an der lumbalen Wirbelsäule
(**x**) Zugang nach Roy-Camille, (●) Zugang nach Weinstein [80]

Nach dem Eintritt in den Pedikel sollte die Schraube im Idealfall entlang der Pedikelachse verlaufen, ohne die Pedikelkortikalis zu perforieren. Diesen Operationsschritt kontrolliert der Operateur meist durch intraoperative Röntgendurchleuchtung, wodurch kraniale oder kaudale Schraubenfehllagen durch die seitliche Durchleuchtung weitgehend vermieden werden können.

Die meisten verzeichneten Fehllagen sind Perforationen der medialen oder der lateralen Pedikelwand, weil die Schrauben in der Transversalebene von der Ideallinie abweichen.

Aus diesem Grund sollte eine mechanische Zielhilfe vor allem die ideale Konvergenz der Schrauben in der Transversalebene sicherstellen.
Die Idee war nun eine mechanische Zielhilfe zu entwickeln, bei der sich der Konvergenzwinkel und der Eintrittsabstand der Schrauben entsprechend präoperativ erhobener CT- oder MRT-Daten einstellen lassen.

Aufgrund einer eigenen Messreihe anhand MRT-Aufnahmen von erwachsenen Patienten mit degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen und aufgrund von Literaturdaten wurden zunächst die zu erwartenden Konvergenzwinkel und Eintrittsabstände für die thorakolumbale Wirbelsäule für die Technik nach Roy-Camille und nach Weinstein ermittelt.

Abbildung 2 zeigt anhand eines Beispiels den eingezeichneten Konvergenzwinkel sowie die Abstandsmaße der Schraubeneintrittspunkte.

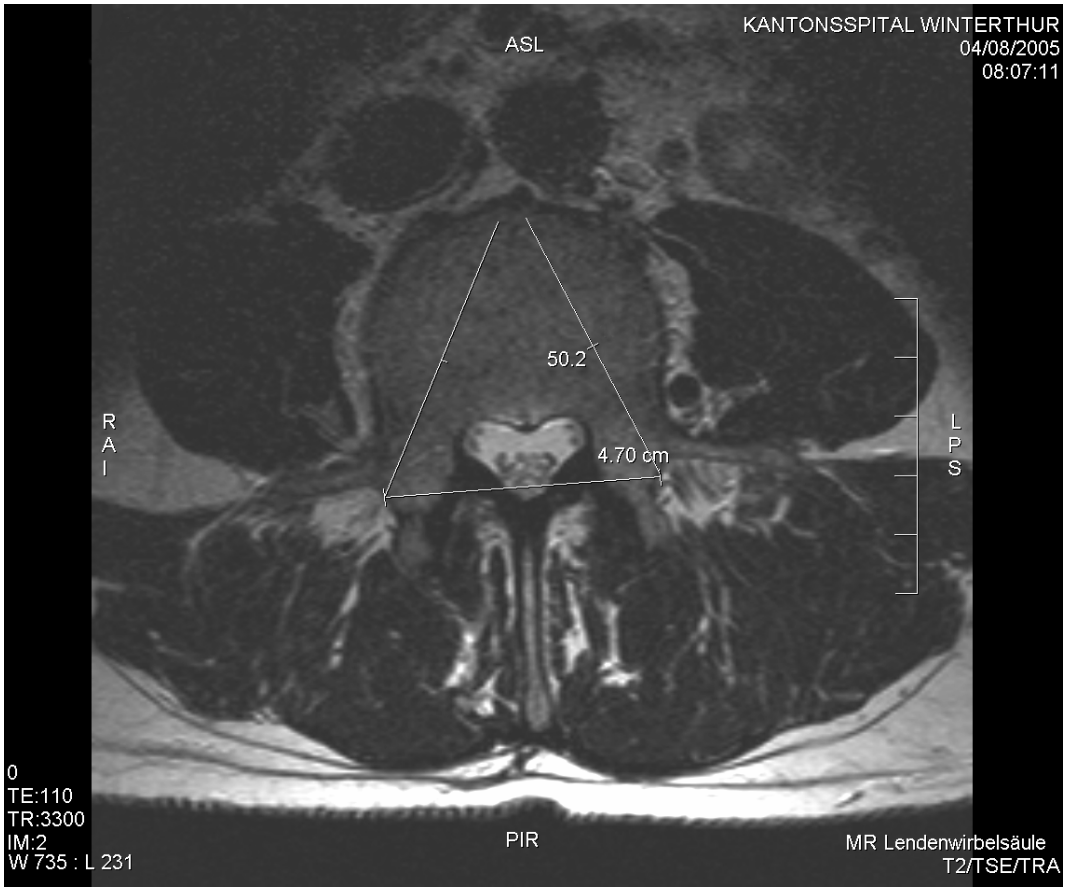

Abb. 2: Magnetresonanztomographieaufnahme auf Höhe des 4. Lendenwirbels mit eingezeichnetem Konvergenzwinkel von 50,2° sowie einem Abstand der Schraubeneintrittspunkte von 4,70 cm

Anhand der erhobenen Daten wurde anschließend von einem der Operateure (J.O.) in Zusammenarbeit mit der Firma Ulrich, St. Gallen, Schweiz, die mechanische Zielhilfe entworfen. Abbildung 3 zeigt die Zielhilfe mit zugehörigem Instrumentarium.

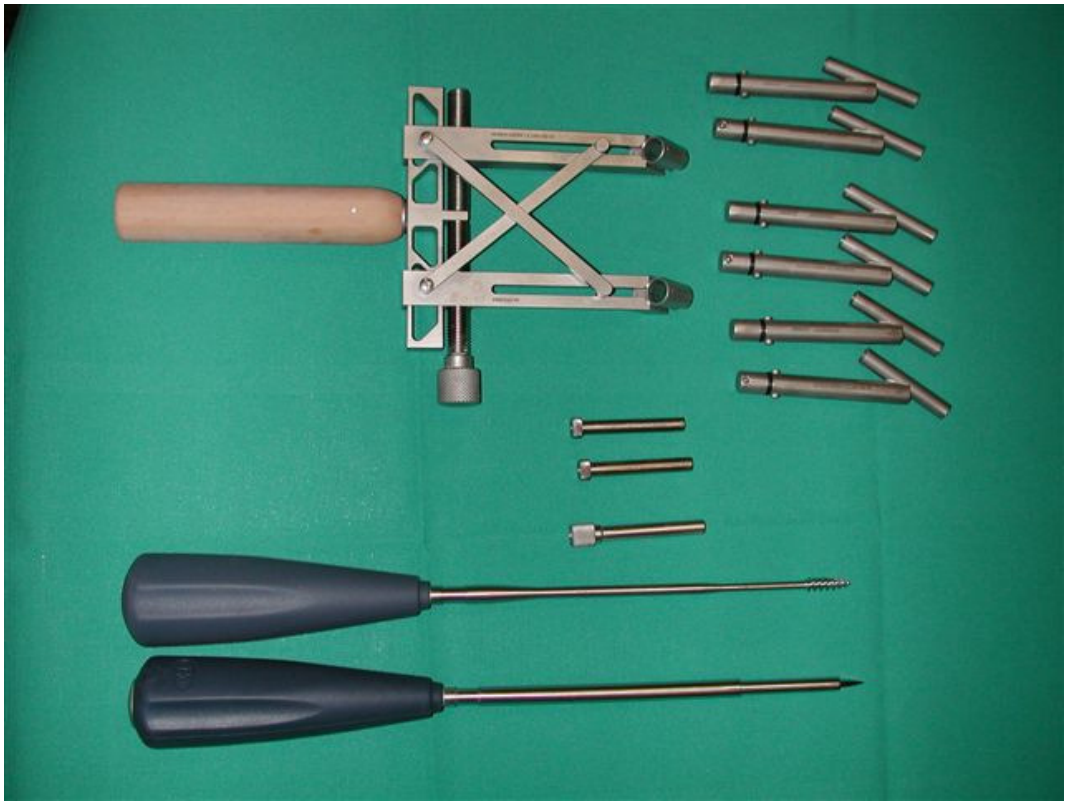

Abb. 3: Zielhilfe (links oben), Aufsätze mit abgewinkelten Führungshülsen (rechts oben), Gewindeschneider und Pfriem (unten) mit zugehörigen Adaptern

Diese besteht aus einem hölzernen Handgriff, an den sich ein Gewinde mit Stellschraube anschließt, mit der sich der Abstand der Schraubeneintrittspunkte stufenlos frei regulieren lässt. Weiterhin befinden sich im vorderen Bereich der Zielhilfe zwei Einschubvorrichtungen zum Verankern von Aufsätzen mit abgewinkelten Führungshülsen. Diese Aufsätze sind mit Führungshülsen in Winkeln von 5°, 10°, 15°, 20°, 25° und 30° erhältlich. So lassen sich je nach vorliegender Situation durch Kombination der Aufsätze Konvergenzwinkel von 10°, 20°, 30°, 40°, 50° und 60° erzeugen. Abbildung 4 zeigt den Prototyp der Zielhilfe mit eingesetzten Aufsätzen von 25°, folglich einem Konvergenzwinkel von 50°.

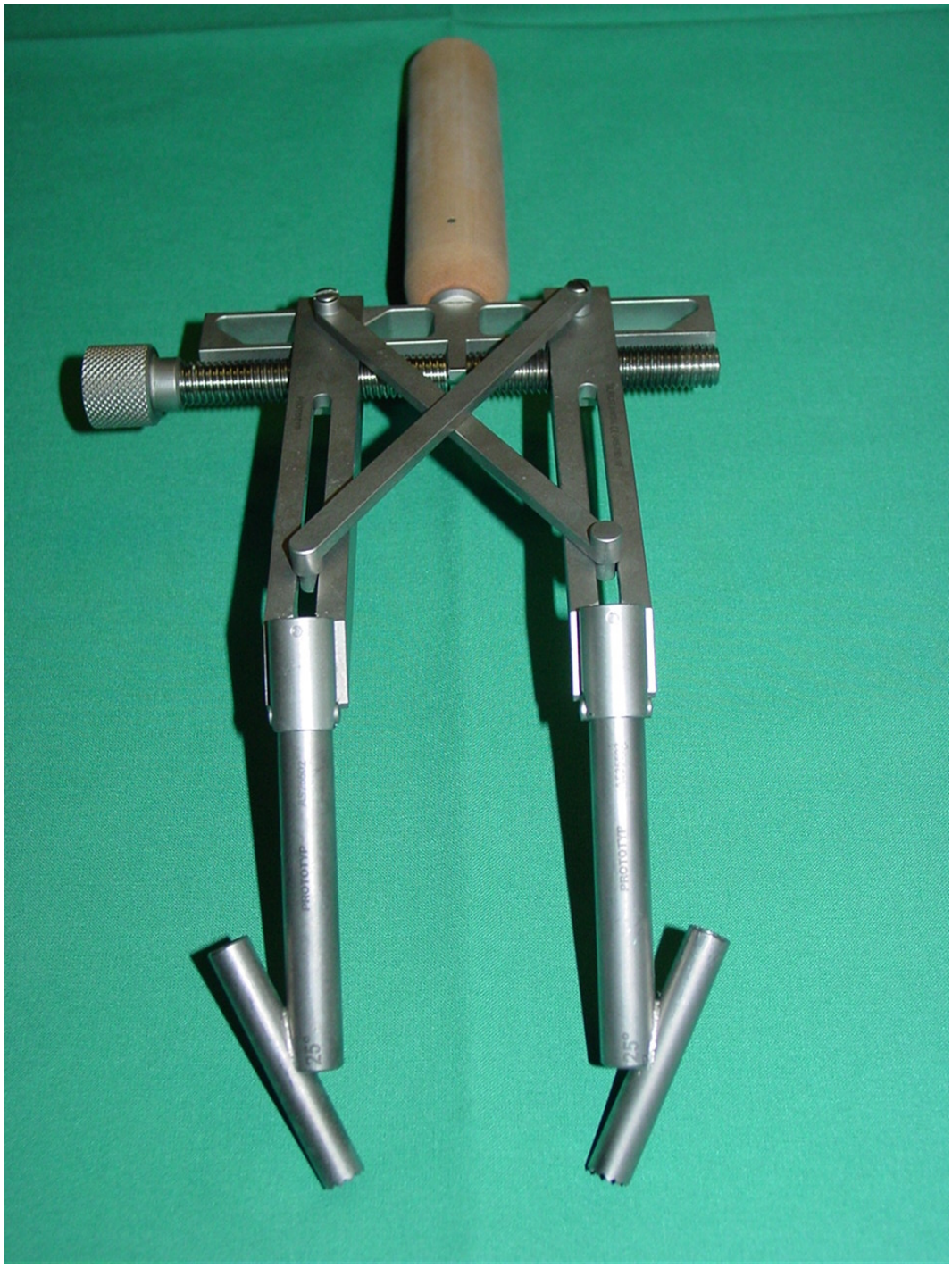

Abb. 4: Prototyp der Zielhilfe mit Aufsätzen für einen Konvergenzwinkel von 50°

Nach Einsetzen der Winkelaufsätze wird der Eintrittsabstand mit der Stellschraube an den Führungshülsen unter Zuhilfenahme einer Schieblehre eingestellt.

Im Rahmen eines Pilotprojektes wurden mit einem Prototyp dieser Zielhilfe im Leichenversuch thorakolumbale Wirbel instrumentiert. Die Versuchsreihe diente der Überprüfung der Anwendbarkeit und Präzision der Methode.

Nach kleinen technischen Veränderungen erwies sich die Zielhilfe durch die stabile anatomische Auflage besonders für den Zugang nach Weinstein als nützlich. Hierbei wurde eine sehr hohe Genauigkeit erzielt. Insbesondere hat sich die Lösung mit austauschbaren Winkeladaptern in 10°-Abständen als praktikabel und ausreichend genau erwiesen [4].

2.2 Patientenkollektiv

Im Untersuchungszeitraum von 01. November 2004 bis 31. Mai 2007 wurden in der Neurochirurgischen Abteilung der Chirurgischen Klinik des Kantonsspitals Winterthur, Schweiz, die Daten von Patienten gesammelt, die mit einer dorsalen Spondylodese im Bereich der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule operativ versorgt worden sind. Während dieses Zeitraumes wurden mit der Zielhilfe insgesamt 15 Patienten operiert. Bei 88 Patienten wurden die Pedikelschrauben nach der konventionellen Methode eingebracht. In die Auswertung wurden nun all diejenigen Patienten eingeschlossen, die postoperativ zur Lagekontrolle der eingebrachten Pedikelschrauben eine Computertomographie erhalten haben. Anschließend wurden deren medizinische und radiologische Daten ausgewertet. In der Zielhilfe-Gruppe war das bei 14 Patienten der Fall, in der konventionellen Gruppe waren es 83 Patienten.

In der ausgewerteten Gruppe der Patienten, die mit der Zielhilfe operiert wurden, fanden sich 7 Frauen und 7 Männer. Ihr Alter zum Zeitpunkt der Operation betrug im Durchschnitt 54 Jahre (Median 52 Jahre; Spannweite 24 – 78 Jahre). Indikationen zur Operation waren in 9 Fällen degenerative Veränderungen der Wirbelsäule, in 5 Fällen ein Trauma.

In der konventionellen Gruppe wurden die Ergebnisse bei 37 Frauen und 46 Männern analysiert. Zum Operationszeitpunkt waren sie im Durchschnitt 57 Jahre alt (Median 57 Jahre; Spannweite 23 – 89 Jahre). Die Operationsindikationen umfassten degenerative Wirbelsäulenveränderungen in 61 Fällen, traumatische Ursachen in 18 Fällen sowie entzündliche und tumoröse Ursachen in jeweils 2 Fällen.

Die beiden Gruppen waren hinsichtlich Alter, Geschlechterverteilung und Operationsindikationen vergleichbar.

2.3 Implantate

In der Zielhilfe-Gruppe wurden 3 verschiedene Pedikelschraubensysteme verwendet: Dynesys® (Zimmer, Winterthur, Schweiz) in 4 Fällen (26,7 %), USS (Synthes, Solothurn, Schweiz) in 6 Fällen (40,0 %) und XIA® (Stryker, La Chaux de Fonds, Schweiz) in 5 Fällen (33,3 %).

In der konventionellen Gruppe wurden 6 verschiedene Systeme verwendet: Dynesys® in 8 Fällen (9,6 %), CD Horizon® Agile™ (Medtronic Sofamor Danek, Tolochenaz, Schweiz) in einem Fall (1,3 %), neon (Ulrich, Ulm, Deutschland) in einem Fall (1,3 %), USS in 22 Fällen (26,5 %), XIA Precision (Stryker, La Chaux de Fonds, Schweiz) in 4 Fällen (4,8 %) und XIA® in 47 Fällen (56,6 %).

In der Zielhilfe-Gruppe kamen Pedikelschrauben der Größen 5,0 mm, 5,5 mm, 6,0 mm, 6,2 mm, 6,4 mm, 6,5 mm, 7,2 mm und 7,5 mm zum Einsatz.

In der konventionellen Gruppe wurden Pedikelschrauben der Größen 4,5 mm, 5,0 mm, 5,5 mm, 6,0 mm, 6,2 mm, 6,4 mm, 6,5 mm und 7,5 mm verwendet.

2.4 Präoperative Planungen

In der Zielhilfe-Gruppe wurden präoperativ auf den vorhandenen CT- oder MRT-Aufnahmen in der axialen Ebene die Schraubeneintrittspunkte sowie deren Abstand und der optimale Konvergenzwinkel für die Pedikelschrauben bestimmt, Abbildung 5.



Abb. 5: Planungsmagnetresonanztomographieaufnahme auf Höhe des 3. Lendenwirbels mit eingezeichnetem Konvergenzwinkel 38,9° und einem Abstand der Schraubeneintrittspunkte 4,34 cm.

Dies konnte in zwei unterschiedlichen Varianten erfolgen.

Variante 1: Als Erstes wurde die optimale Verlaufsrichtung der Schrauben durch die Pedikel festgelegt und anschließend der Abstand der Eintrittspunkte gemessen.
Variante 2: Es wurden als Erstes die Eintrittspunkte der Schrauben und deren Abstand bestimmt und anschließend die optimale Verlaufsrichtung der Schrauben durch die Pedikel festgelegt.

Variante 1 wurde für die Wirbel der thorakalen und Variante 2 für die der lumbalen Wirbelsäule verwendet.

Eine Unterscheidung wurde hier deshalb durchgeführt, da im Bereich der Lendenwirbelsäule bei einer dynamischen Fixierung, wie z.B. mit dem Dynesys®-System, der Zugang nach Weinstein unter größtmöglicher Schonung der intakt zu belassenden Wirbelgelenke bevorzugt wird. Handelt es sich um eine rigide Fixierung, wird empfohlen, für den kranialsten Wirbel ebenfalls den Zugang nach Weinstein zu wählen, für die kaudalen Wirbelgelenke kann der Zugang nach Roy-Camille gewählt werden, da wegen der angestrebten Fusion die Wirbelgelenke teilweise reseziert werden und somit auf die Gelenkfunktion keine Rücksicht genommen werden muss.

2.5 Operationsmethoden

Alle Patienten wurden von drei im Platzieren von Pedikelschrauben erfahrenen Neurochirurgen (M.B., E.K., J.O.) behandelt.

In beiden Gruppen erfolgte der operative Zugang von dorsal mit einer Hautinzision in der Mittellinie über den Dornfortsätzen der entsprechenden Wirbelhöhen. Nach Durchtrennung der Subkutis, wurde die Fascia thoracolumbalis beidseits der Dornfortsatzreihe längs inzidiert und, durch Ablösen der Muskulatur nach lateral, die dorsalen Elemente der Wirbelsäule (Dornfortsätze, Wirbelbögen, Wirbelgelenke und Querfortsätze) dargestellt. Anschließend erfolgte die Darstellung der Schraubeneintrittspunkte.

In der konventionellen Gruppe wurden dann unter Berücksichtigung der von Roy-Camille bzw. Weinstein beschriebenen relevanten Landmarken die Bohrlöcher manuell vorbereitet und nachfolgend die Pedikelschrauben in den zuvor präparierten Schraubenkanal mit einem T-Handgriff eingebracht.

In der Zielhilfe-Gruppe erfolgte die Darstellung der Schraubeneintrittspunkte je nach Art und Weise, wie präoperativ der Abstand der Schraubeneintrittspunkte und der Konvergenzwinkel bestimmt wurden (Variante 1 bzw. Variante 2).

An diesen so bestimmten Eintrittspunkten wurde die Zielhilfe mit den eingestellten Abstands- und Winkelmaßen fest an den Wirbel angepresst. Mittels verschiedener Adapter konnte der Operateur durch die feststehenden Führungshülsen den Pedikel durch Pfriem eröffnen und nachfolgend mit dem Bohrer oder der Ahle sowie Gewindeschneider den Kanal für die Schraube im Pedikel vorbereiten. Dabei sicherte die Zielhilfe durch die stabilen Führungshülsen, dass der Schraubenkanal im geplanten Winkel gebohrt werden konnte und gewährleistete so den optimalen Schraubenverlauf durch den Pedikel.

Abbildung 6 veranschaulicht die Verwendung von Pfriem und Gewindeschneider mit der Zielhilfe. Abbildung 7 zeigt die Zielhilfe im operativen Situs.

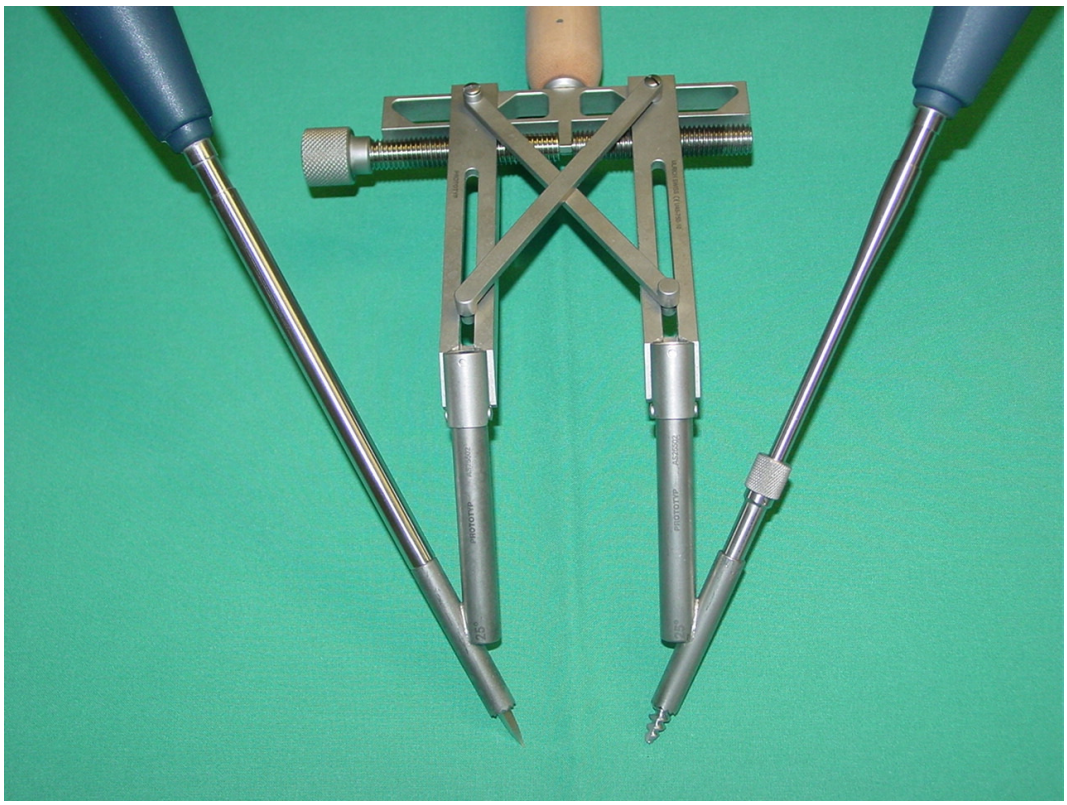

Abb. 6: Zielhilfe mit Pfriem (links) und Gewindeschneider (rechts)

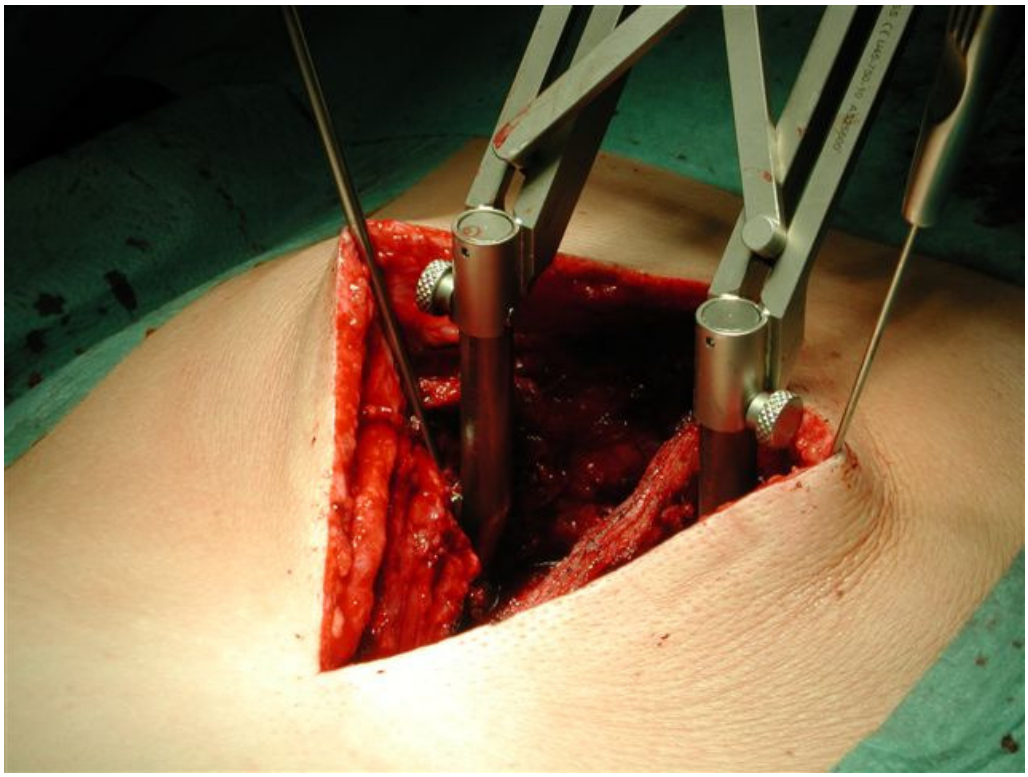

Abb. 7: Zielhilfe im operativen Situs

Nach der Präparation des Kanals für die Pedikelschraube, wurde die Schraube manuell, ohne Verwendung der Zielhilfe, in den Pedikel eingedreht.

In beiden Gruppen wurden alle Schritte unter intraoperativer Röntgenbildverstärkerkontrolle im lateralen Strahlengang durchgeführt.

2.6 Postoperative Datenerhebung

Primäre Endpunkte der Studie waren das klinisch-neurologische Ergebnis und die erzielte Lage der Pedikelschrauben.

Entscheidend für das klinische Ergebnis war, wie viele Patienten eine Verschlechterung ihres neurologischen Status oder sogar neue neurologische Ausfallserscheinungen zeigten und diese auf die Schraubenlage zurückgeführt werden konnten. Zur Bestimmung etwaiger Nerven- oder Rückenmarksläsionen wurde anhand der Patientenakten der neurologische Status prä- und postoperativ miteinander verglichen.

Der Anteil an Revisionseingriffen, entweder aufgrund medialer Fehllage mit eventueller oder bestehender Nerven- oder Rückenmarksschädigung oder lateraler Fehllage mit mechanisch nicht ausreichender Stabilität, bildete ebenfalls eine Zielgröße.

Zur exakten Ermittlung der Lage der Pedikelschrauben erhielten die Patienten postoperativ, noch während des stationären Aufenthaltes, eine Kontrollcomputer-tomographie des operierten Bereichs.

Unter Verwendung eines Standardalgorhythmus wurden mit einem Philips Brilliance 16 (Philips, Eindhoven, Niederlande) überlappende Schichten (0,5 mm increment, 1 mm thickness) angefertigt (140 kV; 350 mAs). Es wurden axiale, koronare und sagittale Rekonstruktionen erzeugt, um alle Ebenen auswerten zu können.
Jede Schraube wurde mittels IMPAX ES und Web 1000 5.0 von AGFA PACS (Agfa HealthCare, Mortsel, Belgien) auf eine potentielle mediale, laterale, kraniale oder kaudale Fehllage hin analysiert. Die Einordnung der Perforationen erfolgte letztendlich anhand der koronaren Rekonstruktionen. Für die medialen Fehllagen wurde der Abstand zwischen der medialen Pedikelwand und des medialen Schraubenrandes bestimmt, für die lateralen Fehllagen der Abstand der lateralen Pedikelwand und des lateralen Schraubenrandes. Bei kranialen Fehllagen wurde der Abstand zwischen der superioren Pedikelwand und des oberen Schrauben-randes und für kaudale Fehllagen der Abstand zwischen der inferioren Pedikel-wand und des unteren Schraubenrandes gemessen. Die Abstandsbestimmung erfolgte immer in Millimetern. Die unterschiedlichen Fehllagen wurden dann je nach Ausmaß verschiedenen Gruppen zugeordnet: 0,1 – 2,0 mm; 2,1 – 4,0 mm; 4,1 – 6,0 mm; 6,1 – 8,0 mm und > 8,0 mm. War die Kortikalis des Pedikels nicht klar abzugrenzen, wurde eine minimale Abweichung gemessen, die Schraube als fehlplatziert gewertet und der ersten Gruppe (0,1 – 2,0 mm) zugeordnet.

Ein ventrales oder laterales Austreten der Pedikelschrauben aus dem Wirbelkörper wurde ebenfalls mit aufgezeichnet.

Außerdem wurde anhand der postoperativen CT-Aufnahmen die Beziehung zwischen den Pedikeldimensionen und den Schraubendicken untersucht.

Anhand der koronaren Rekonstruktionen wurde die Weite für die thorakalen Pedikel, anhand der axialen Rekonstruktionen die Weite der lumbalen Pedikel als die Dicke am Pedikelisthmus bestimmt. Mit diesen Daten und den aus den Operationsberichten bekannten Schraubengrößen konnte die Relation zwischen Schraubendurchmesser und Pedikelweite gebildet und weiter analysiert werden.

2.7 Statistische Berechnungen

Die statistischen Auswertungen erfolgten in Zusammenarbeit mit Dr. Hanns Ackermann vom Institut für Biomathematik am Universitätsklinikum Frankfurt am Main.

Die Darstellung der Variabilität der Ergebnisse zu den Schraubenlagen und Pedikelweiten der beiden Gruppen erfolgte durch Box-and-Whiskers-Plots, Abbildung 8.

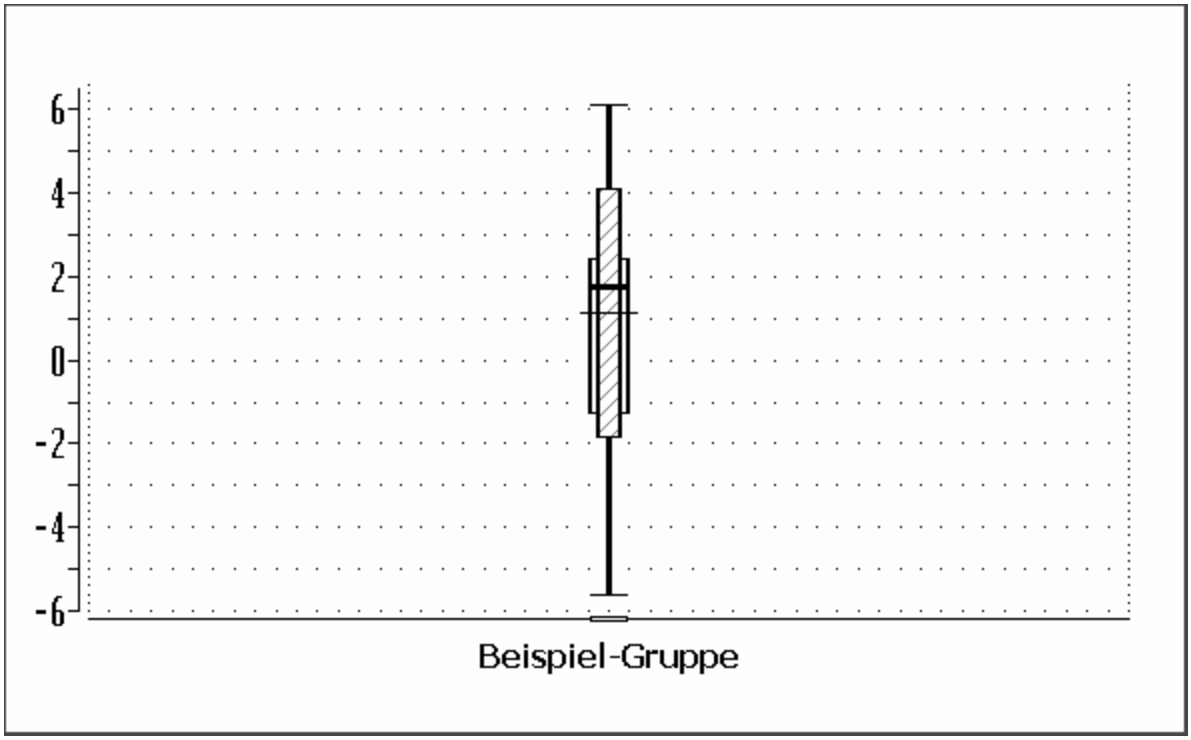

Abb. 8: Box-and-Whiskers-Plot für eine Beispielgruppe

Die Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung in Abbildung 8 enthält zwei Boxen. Die breite Box umfasst den Bereich zwischen dem 25 %-Quantil und dem 75 %-Quantil, den Interquartilsabstand. In dieser Box befinden sich 50 % der erhobenen Werte. Der Median der Stichprobenwerte wird durch die dicke, horizontale Linie in dem breiten Kasten dargestellt, der Mittelwert durch die dünne, horizontale Linie. Gleichmäßig zu beiden Seiten des Mittelwertes ist die einfache Standardabweichung aufgetragen, veranschaulicht durch die schlanke, schraffierte Box. Die „Schnurrhaare“ (engl., „whiskers“) zu beiden Seiten der Boxen repräsentieren an ihren Enden die beiden Extremwerte (Minimum, Maximum). Sie legen die Spannweite der Stichprobe fest.

Zum Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Fehllagen, Pedikelweiten und der verwendeten Schraubengrößen wurde der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test („U-Test“) verwendet.

Der χ^2-Test wurde zur Berechnung von Unterschieden bezüglich der Verteilung der Pedikelschrauben auf die verschiedenen Wirbelkörper, Wirbelkörperfehllagen und der Verteilung der medialen und lateralen Fehllagen angewendet.

Mit der Regressionsanalyse nach Pearson wurden die erhobenen Daten (Fehllagen, Pedikelweiten und Schraubengrößen) auf Abhängigkeiten untersucht. Zur Absicherung der Ergebnisse bei schiefer Verteilung wurden diese noch mittels Spearman-Rang-Korrelation überprüft und bestätigt.

Alle Berechnungen wurden mit dem Softwareprogramm „BiAS. für Windows“ (BiAS. = **Bi**ometrische **A**nalyse von **S**tichproben) Version 8 (epsilon-Verlag, Hochheim, Deutschland) ausgeführt. Ein p-Wert $< 0,05$ wurde als statistisch signifikant definiert.

3. Ergebnisse

3.1 Verteilung der Pedikelschrauben

Insgesamt wurden in beiden Gruppen 382 Pedikelschrauben platziert.

In der Zielhilfe-Gruppe waren es 56 Schrauben, 24 thorakal und 32 lumbal. Zwischen Th1 und Th4 wurden in der Zielhilfe-Gruppe keine Schrauben eingebracht, ansonsten zeigte sich folgende Verteilung: Th5 4 (7,1 %), Th6 2 (3,6 %), Th7 2 (3,6 %), Th8 6 (10,7 %), Th9 6 (10,7 %), Th10 2 (3,6 %), Th11 2 (3,6 %), Th12 keine, L1 2 (3,6 %), L2 2 (3,6 %), L3 4 (7,1 %), L4 16 (28,6 %) und L5 8 (14,3 %) Pedikelschrauben.

In der konventionellen Gruppe wurden 326 Pedikelschrauben gesetzt, 78 thorakal und 248 lumbal. Dabei wurden zwischen Th1 und Th4 8 Schrauben eingebracht, die aus Gründen der besseren statistischen Vergleichbarkeit mit der Zielhilfe-Gruppe nicht in die Auswertung aufgenommen wurden. Somit wurden 318 Pedikelschrauben, 70 thorakale und 248 lumbale, hinsichtlich ihrer Lage analysiert, die sich wie folgt verteilten: Th5 10 (3,1 %), Th6 4 (1,3 %), Th7 10 (3,1 %), Th8 4 (1,3 %), Th9 8 (2,5 %), Th10 6 (1,9 %), Th11 14 (4,4 %), Th12 14 (4,4 %), L1 16 (5,0 %), L2 32 (10,1 %), L3 20 (6,3 %), L4 70 (22,0 %) und L5 110 (34,6 %) Schrauben.

Tabelle 1 fasst die absoluten Zahlen der eingebrachten Schrauben der beiden Gruppen zusammen, Abbildung 9 veranschaulicht die relative Verteilung der Schrauben auf die verschiedenen Wirbelkörper.

Tabelle 1: Absolute Verteilung der Pedikelschrauben auf die Wirbelkörper der thorakalen (Th5 – Th12) und lumbalen Wirbelsäule (L1 – L5)

Methode	**Th5**	**Th6**	**Th7**	**Th8**	**Th9**	**Th10**	**Th11**	**Th12**	**L1**	**L2**	**L3**	**L4**	**L5**
Zielhilfe	4	2	2	6	6	2	2	0	2	2	4	16	8
Konventionell	10	4	10	4	8	6	14	14	16	32	20	70	110

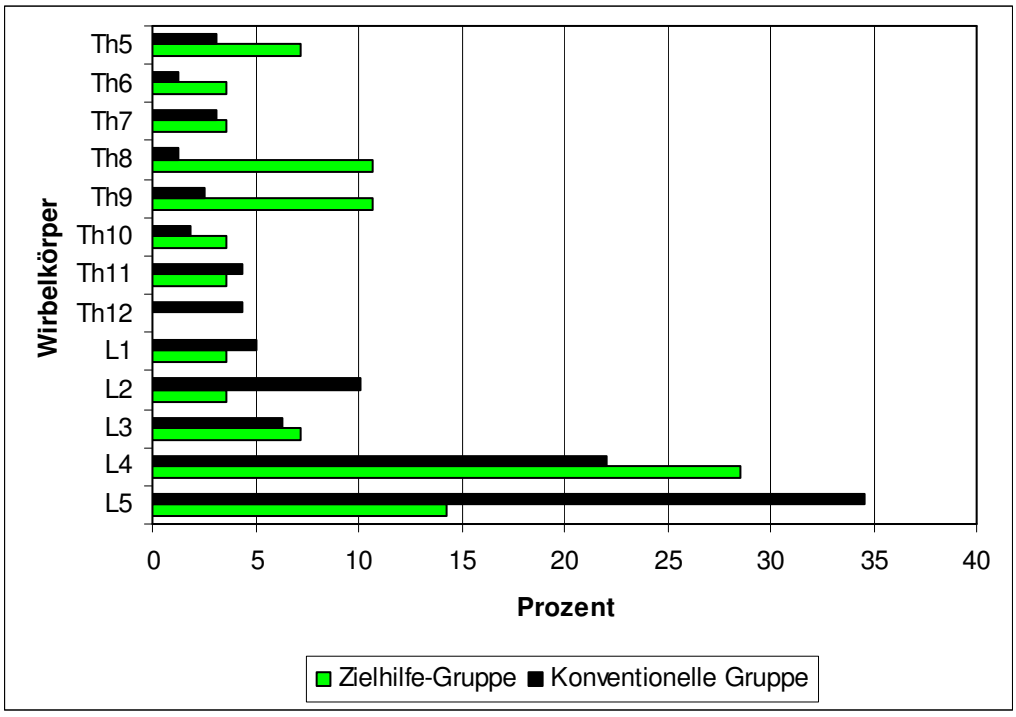

Abb. 9: Relative Verteilung der Pedikelschrauben auf die Wirbelkörper der thorakalen (Th5 – Th12) und lumbalen Wirbelsäule (L1 – L5)

3.2 Klinische Ergebnisse

In der Zielhilfe-Gruppe zeigte kein Patient eine Verschlechterung des neurologischen Status oder neu aufgetretene sensorische oder motorische Defizite, die auf eine der eingebrachten Pedikelschrauben hätten zurückgeführt werden können. Bei einem Patienten kam es nach der operativen Stabilisierung von Frakturen der Brustwirbelkörper 5, 6, 7 und 9 zu neu aufgetretenen Parästhesien der Finger III – IV rechts und einer Hypästhesie des ventralen Oberschenkels rechts. Diese neurologischen Störungen waren durch die Lagerung während der Operation bedingt. Sonst kam es zu keiner Verschlechterung oder neuen neurologischen Ausfallserscheinungen.

Bei einem Patienten wurden zwei Schrauben in ihrer Lage korrigiert. Bei lateralen Fehllagen von 5,6 und 6,1 mm schienen sie nicht ausreichend Halt zu geben, sodass man sie sicherheitshalber revidiert hat.

In der konventionellen Gruppe zeigten sich ebenfalls keine neu aufgetretenen neurologischen Ausfallserscheinungen, die auf eine Schraubenfehllage hätten zurückgeführt werden können. Eine Patientin entwickelte postoperativ ein neues sensomotorisches Defizit im rechten Bein, welches aber durch ein Repositionsmanöver während des Eingriffes verursacht wurde.
In dieser Patientengruppe wurden insgesamt drei Revisionsoperationen durchgeführt, bei denen die Lage von fünf Schrauben korrigiert wurde. Darunter befanden sich eine mediale Fehllage von 6,8 mm, die jedoch keine neurologischen Komplikationen verursachte, und vier laterale Fehllagen von 3,8 mm, 6,2 mm, 8,2 mm und 8,4 mm. Die medial fehlliegende Schraube hat man prophylaktisch, die lateral fehlliegenden Schrauben wegen anzunehmender mangelhafter knöcherner Verankerung im Wirbelkörper und damit nicht zufrieden stellender Stabilität revidiert.

Tabellen 2 und 3 fassen diese Ergebnisse kurz zusammen.

Tabelle 2:
Komplikationen in der Zielhilfe-Gruppe
° Ergebnisse bezogen auf die Patienten
* Ergebnisse bezogen auf die eingebrachten Pedikelschrauben

Nervenverletzungen		
- insgesamt	1 (7,1 %)°	
- schraubenbedingt	0 (0,0 %)°	0 (0,0 %)*
Revisionsoperation	1 (7,1 %)°	2 (3,6 %)*

Tabelle 3:
Komplikationen in der konventionellen Gruppe
° Ergebnisse bezogen auf die Patienten
* Ergebnisse bezogen auf die eingebrachten Pedikelschrauben

Nervenverletzungen		
- insgesamt	1 (1,2 %)°	
- schraubenbedingt	0 (0,0 %)°	0 (0,0 %)*
Revisionsoperation	3 (3,6 %)°	5 (1,6 %)*

3.3 Lage der Pedikelschrauben

3.3.1 Lage im Pedikel der thorakalen Wirbelsäule

Von den 24 unter Zuhilfenahme der Zielhilfe in der thorakalen Wirbelsäule eingebrachten Schrauben konnten 3 (12,5 %) streng intrapedikulär platziert werden. Die 21 nicht zentralen Lagen teilten sich auf in 7 (33,3 %) mediale und 14 (66,7 %) laterale Fehllagen. Von den medialen Fehllagen zeigten 3 (42,9 %) eine Abweichung von mehr als 2,0 mm. Es drang jedoch keine Schraube mehr als 6,0 mm in den Spinalkanal ein. Durchschnittlich lagen die Schrauben, die die mediale Pedikelwand perforierten, um 2,5 mm im Spinalkanal. Lateral perforierten 11 der 14 (78,6 %) Schrauben die Pedikelwand um mehr als 2,0 mm, jedoch lag nur eine Schraube jenseits von 6,0 mm. Im Durchschnitt lagen die Pedikelschrauben lateral um 3,2 mm fehl.
Alle mit der Zielhilfe in der thorakalen Wirbelsäule eingebrachten Pedikelschrauben lagen im Durchschnitt um 1,1 mm lateral des Pedikels, mit einer Standardabweichung von 3,0 mm. Die Hälfte wies eine Lage zwischen einer medialen Fehllage von 1,3 mm und einer lateralen Fehllage von 2,5 mm auf. Der Interquartilsabstand für die thorakalen Zielhilfe-Schrauben beträgt somit 3,8 mm. Es kam zu einer maximalen medialen Fehllage von 5,6 mm und einer maximalen lateralen Fehllage von 6,1 mm. Das ergibt eine Spannweite von 11,7 mm.

Konventionell konnten insgesamt 16 der 70 (22,9 %) thorakal gesetzten Pedikelschrauben zentral platziert werden. In den 54 Fällen nicht streng intrapedikulärer Lage waren 10 (18,5 %) mediale Fehllagen, 43 (79,6 %) laterale Fehllagen und 1 (1,9 %) kaudale Fehllage. Die Hälfte (50,0 %) der medialen Fehllagen perforierte die mediale Pedikelwand um mehr als 2,0 mm. In der konventionellen Gruppe drang keine Schraube weiter als 8,0 mm in den Spinalkanal ein. Durchschnittlich drangen sie um 2,5 mm ein. Lateral lagen 30 der 43 (69,8 %) Schrauben weiter als 2,0 mm von der Pedikelwand entfernt, 2 davon sogar zwischen 8,1 und 10,0 mm. Im Durchschnitt lagen sie um 4,0 mm von der lateralen Pedikelwand entfernt.
Die im Bereich der thorakalen Wirbelsäule nach der konventionellen Technik gesetzten Schrauben lagen im Durchschnitt lateral um 1,9 mm fehl, mit einer

Standardabweichung von 3,2 mm. Die Hälfte aller dieser Schrauben wies eine zentrale Lage bis zu einer maximalen lateralen Fehllage von 4,6 mm auf. Interquartilsabstand 4,6 mm. Es trat eine maximale mediale Fehllage von 6,9 mm, und eine maximale laterale Schraubenlage von 8,4 mm auf. Die Spannweite beträgt 15,3 mm.

Abbildung 10 veranschaulicht die beschriebenen Variabilitätsmaße der thorakalen Zielhilfe-Schrauben im Vergleich mit den thorakalen konventionellen Schrauben mittels Box-and-Whiskers-Plot.

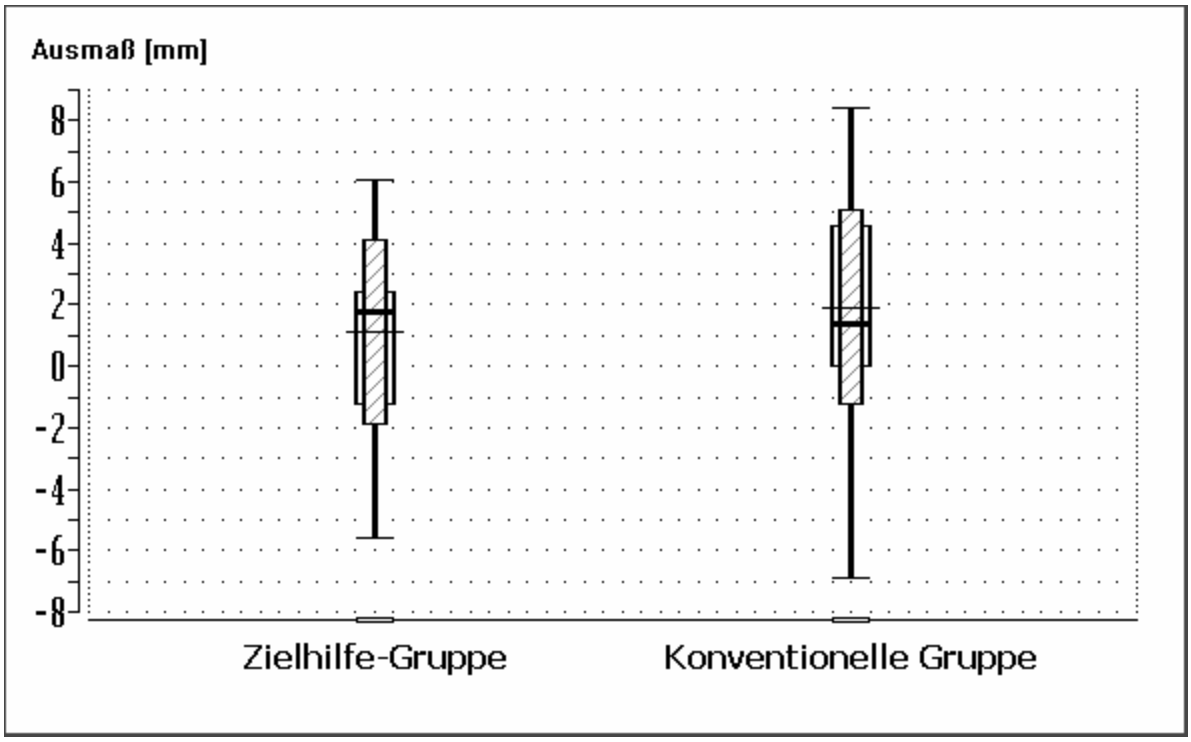

Abb. 10: Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung der Variabilität der thorakalen Schraubenlagen in der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe. Mediale Fehllagen als negative Abweichung, zentrale Lage entsprechend „0“ und laterale Fehllagen als positive Abweichung. Angabe von Median (dicke Linie), Mittelwert (dünne Linie), einfacher Standardabweichung (schlanke, schraffierte Box), Interquartilsabstand (breite Box) sowie Minimum und Maximum.

Tabelle 4 zeigt die zentralen Lagen, mediale und laterale Fehllagen zusammengefasst in Gruppen von 2 mm, für die in der thorakalen Wirbelsäule mit der Zielhilfe platzierten Pedikelschrauben.

Tabelle 5 enthält die gleiche Darstellung der Schraubenlage, in diesem Fall für die thorakal konventionell eingebrachten Schrauben.

Tabelle 4: Lage der Pedikelschrauben der Zielhilfe-Gruppe in den Wirbelkörpern der thorakalen Wirbelsäule (Th5 – Th12)

			Pedikelperforation [mm]									
			Medial					**Lateral**				
Wirbelkörper	Schrauben	0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	8,1 - 10,0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	> 8,0
Th5	4	-	2	-	-	-	-	-	2	-	-	-
Th6	2	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-
Th7	2	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-
Th8	6	-	1	1	-	-	-	2	-	1	1	-
Th9	6	2	-	-	1	-	-	-	-	3	-	-
Th10	2	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
Th11	2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Th12	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Insgesamt (%)	24 (100,0)	3 (12,5)	4 (16,7)	2 (8,3)	1 (4,2)	0 (0,0)	0 (0,0)	3 (12,5)	6 (25,0)	4 (16,7)	1 (4,2)	0 (0,0)

Tabelle 5: Lage der Pedikelschrauben der konventionellen Gruppe in den Wirbelkörpern der thorakalen Wirbelsäule (Th5 – Th12).

Nicht aufgeführt: eine kaudale Fehllage auf Höhe des 5. Brustwirbels

			Pedikelperforation [mm]									
			Medial					**Lateral**				
Wirbelkörper	Schrauben	0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	8,1 - 10,0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	> 8,0
Th5	10	-	3	1	-	-	-	2	1	-	-	2
Th6	4	1	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-
Th7	10	-	-	-	-	-	-	4	1	3	2	-
Th8	4	-	-	-	-	-	-	-	1	2	1	-
Th9	8	-	-	2	-	-	-	1	-	4	1	-
Th10	6	1	-	-	-	-	-	2	1	2	-	-
Th11	14	5	1	-	-	-	-	3	3	2	-	-
Th12	14	9	1	1	-	-	-	1	-	1	1	-
Insgesamt (%)	70 (100,0)	16 (22,9)	5 (7,1)	4 (5,7)	0 (0,0)	1 (1,3)	0 (0,0)	13 (18,6)	8 (11,4)	15 (21,4)	5 (7,1)	2 (2,9)

Abbildung 11 a und b veranschaulichen eine auf Höhe von Th9 aufgetretene mediale Fehllage von 5,6 mm sowie eine laterale Fehllage von 4,9 mm.

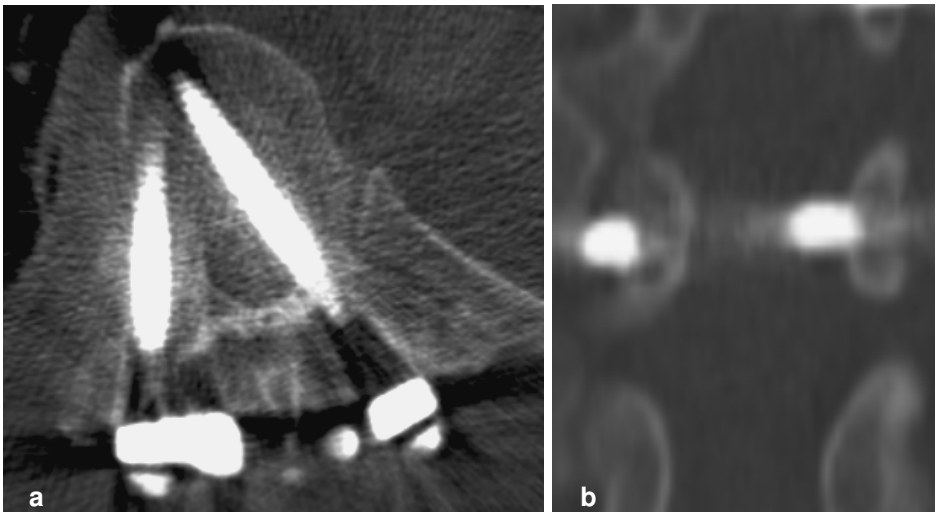

Abb. 11: Axiale Computertomographieaufnahme (**a**) und koronare Rekonstruktion (**b**) auf Höhe des 9. Brustwirbels mit lateraler Fehllage von 4,9 mm rechts und medialer Fehllage von 5,6 mm links

3.3.2 Lage im Pedikel der lumbalen Wirbelsäule

Mit der Zielhilfe konnten insgesamt 25 der 32 Pedikelschrauben (78,1 %) zentral im Pedikel platziert werden. Von den 7 fehlplatzierten Schrauben perforierte 1 (14,3 %) die mediale und 6 (85,7 %) die laterale Pedikelwand. Diese eine mediale Fehllage gehörte in die erste Gruppe der Abweichungen bis 2,0 mm. Es gab keine medialen Abweichungen größer 2,0 mm. Im Durchschnitt lagen diese Schrauben 1,6 mm von der medialen Pedikelwand entfernt im Spinalkanal. 4 der 6 lateralen Fehllagen (66,7 %) zeigten eine Abweichung von mehr als 2,0 mm, jedoch nicht über 6,0 mm. Im Durchschnitt lag die Abweichung bei 2,8 mm.
Die in der lumbalen Wirbelsäule mit der Zielhilfe eingebrachten Schrauben hatten eine durchschnittliche laterale Fehllage von 0,5 mm mit einer Standardabweichung von 1,3 mm. Es wurde eine maximale mediale Abweichung von 1,6 mm und eine maximale Abweichung nach lateral von 4,4 mm festgestellt. Das ergibt eine Spannweite von 6,0 mm.

200 der 248 lumbal nach der konventionellen Technik eingebrachten Pedikelschrauben (80,6 %) wurden streng intrapedikulär platziert. 14 der 48 nicht im Pedikel liegenden Schrauben (29,2 %) perforierten die Pedikelwand nach

medial, 31 (64,6 %) nach lateral, 2 (4,2 %) Schrauben nach kranial und 1 (2,1 %) nach kaudal. 3 der 14 medialen Fehllagen (21,4 %) drangen mehr als 2,0 mm in den Spinalkanal vor. Im Durchschnitt lagen alle medial perforierten Schrauben um 1,7 mm im Spinalkanal. Von den 31 lateralen Fehllagen perforierten 18 (58,1 %) um mehr als 2,0 mm. Nur eine Schraube lag zwischen 6,1 und 8,0 mm. Durchschnittlich 2,7 mm waren die lateralen Fehllagen von der äußeren Pedikelwand entfernt.

Die konventionell in der lumbalen Wirbelsäule gesetzten Pedikelschrauben waren durchschnittlich 0,3 mm lateral der Pedikelwand gelegen, bei einer Standardabweichung von 1,2 mm. Die maximale mediale Abweichung lag bei 2,6 mm, die maximale laterale bei 7,3 mm. Die Spannweite beträgt damit 9,9 mm.

Auch hier veranschaulicht ein Box-and-Whiskers-Plot die beschriebenen Variabilitätsmaße der mit der Zielhilfe oder der konventionellen Technik in der lumbalen Wirbelsäule eingebrachten Pedikelschrauben, Abbildung 12.

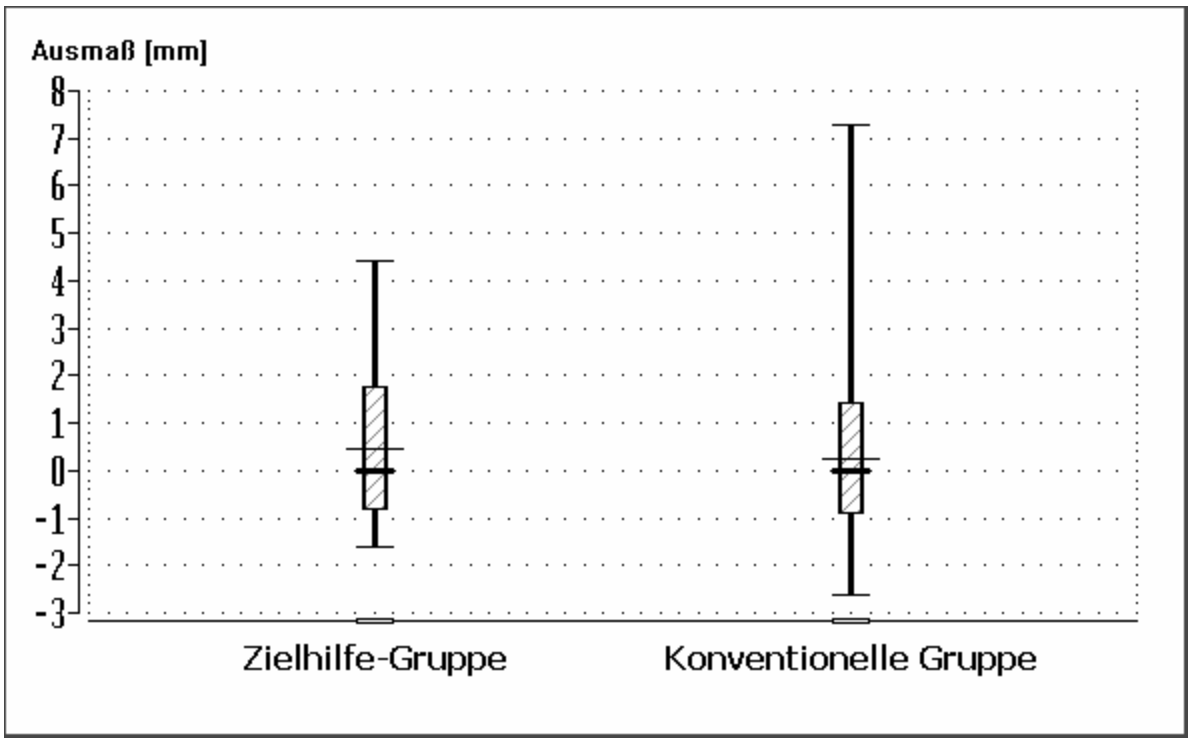

Abb. 12: Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung der Variabilität der lumbalen Schraubenlagen in der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe. Mediale Fehllagen als negative Abweichung, zentrale Lage entsprechend „0“ und laterale Fehllagen als positive Abweichung. Angabe von Median (dicke Linie), Mittelwert (dünne Linie), einfacher Standardabweichung (schlanke, schraffierte Box) sowie Minimum und Maximum. Nicht vorhanden: breite Box (Interquartilsabstand), da 50 % der Werte einer zentralen Lage und damit „0“ entsprechen.

Tabellen 6 und 7 zeigen die zentralen Lagen, mediale und laterale Fehllagen für die lumbalen Pedikelschrauben der beiden Vergleichsgruppen.

Abbildung 13 a und b zeigen eine zentrale Schraubenlage und eine laterale Fehllage von 1,3 mm auf Höhe von L2.

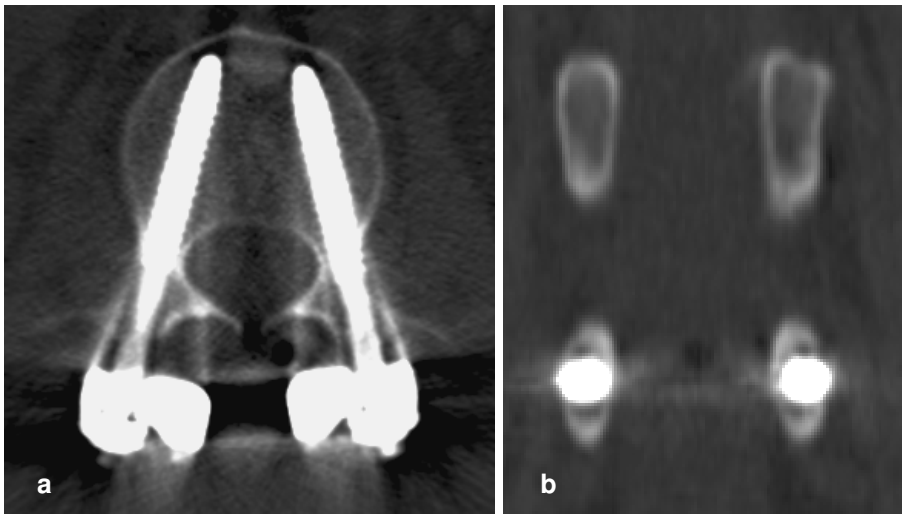

Abb. 13: Axiale Computertomographieaufnahme (**a**) und koronare Rekonstruktion (**b**) auf Höhe des 2. Lendenwirbels mit zentraler Lage rechts und lateraler Fehllage von 1,3 mm links

3.3.3 Lage im Wirbelkörper

Zur vollständigen Erfassung aller Fehllagen wurden die CT-Aufnahmen auch auf Fehllagen der Schrauben in Bezug auf den Wirbelkörper ausgewertet. Es wurde ein Schraubenaustritt im Bereich des lateralen Wirbelkörperkortex von einem Austritt der Schraube im Bereich des ventralen Wirbelkörperkortex unterschieden.

In der Zielhilfe-Gruppe wurden thorakal und lumbal insgesamt 17 (30,4 %) anteriore und 3 (5,4 %) laterale Wirbelkörperperforationen verzeichnet.

In der konventionellen Gruppe wurden anteriore Wirbelkörperfehllagen in 86 Fällen (27,0 %) und laterale Wirbelkörperfehllagen in 22 Fällen (6,9 %) beschrieben.

Tabelle 6: Lage der Pedikelschrauben der Zielhilfe-Gruppe in den Wirbelkörpern der lumbalen Wirbelsäule (L1 – L5)

			Pedikelperforation [mm]									
			Medial					**Lateral**				
Wirbelkörper	Schrauben	0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	8,1 - 10,0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	> 8,0
L1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
L2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L3	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L4	16	11	1	-	-	-	-	2	2	-	-	-
L5	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Insgesamt (%)	32 (100,0)	25 (78,1)	1 (3,1)	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)	2 (6,2)	2 (6,2)	2 (6,2)	0 (0,0)	0 (0,0)

Tabelle 7: Lage der Pedikelschrauben der konventionellen Gruppe in den Wirbelkörpern der lumbalen Wirbelsäule (L1 – L5).

Nicht aufgeführt: eine kraniale Fehllage auf Höhe des 4. Lendenwirbels, eine kraniale und eine kaudale Fehllage auf Höhe des 5. Lendenwirbels

			Pedikelperforation [mm]									
			Medial					**Lateral**				
Wirbelkörper	Schrauben	0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	8,1 - 10,0	0,1 - 2,0	2,1 - 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,0	> 8,0
L1	16	9	5	1	-	-	-	-	1	-	-	-
L2	32	19	2	-	-	-	-	7	2	2	-	-
L3	20	16	-	1	-	-	-	1	1	1	-	-
L4	70	53	2	-	-	-	-	5	7	1	1	-
L5	110	103	2	1	-	-	-	-	1	1	-	-
Insgesamt (%)	248 (100,0)	200 (80,6)	11 (4,4)	3 (1,2)	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)	13 (5,2)	12 (4,8)	5 (2,0)	1 (0,4)	0 (0,0)

3.4 Pedikelweiten

Zur weiteren Analyse der aufgetretenen Fehllagen wurden in beiden Gruppen anhand der postoperativen Computertomographieaufnahmen die exakten Pedikelweiten bestimmt und die Beziehung zwischen der Pedikelweite und der Schraubengröße untersucht.

3.4.1 Pedikelweiten der thorakalen Wirbelsäule

In der Zielhilfe-Gruppe wurden folgende durchschnittliche Pedikelweiten der thorakalen Wirbel ermittelt: Th5 5,4 mm, Th6 4,9 mm, Th7 5,5 mm, Th8 5,1 mm, Th9 6,5 mm, Th10 5,5 mm, Th11 5,2 mm.
Im Mittel war der thorakale Pedikel 5,5 mm weit, mit einer Standardabweichung von 1,1 mm. Der Median lag bei 5,5 mm. Die Hälfte aller Pedikel wiesen Weiten zwischen 4,8 und 6,5 mm auf. Der Interquartilsabstand liegt demzufolge bei 1,7 mm. Der kleinste thorakale Pedikel in der Zielhilfe-Gruppe hatte eine Weite von 3,4 mm, der größte Pedikel eine von 7,8 mm. Es errechnet sich eine Spannweite von 4,4 mm.

Für die konventionelle Gruppe wurden im Bereich der thorakalen Wirbel folgende durchschnittlichen Pedikelweiten ermittelt: Th5 5,6 mm, Th6 5,4 mm, Th7 5,8 mm, Th8 5,1 mm, Th9 6,1 mm, Th10 6,3 mm, Th11 7,6 mm, Th12 8,6 mm.
Die Pedikelweiten der thorakalen Wirbel zusammengefasst, ergibt sich eine durchschnittliche Pedikelweite von 6,7 mm mit einer Standardabweichung von 1,9 mm. Der Median lag bei 6,3 mm. 50 % der thorakalen Pedikelweiten der konventionellen Gruppe bewegten sich zwischen 5,4 und 8,1 mm. Der Interquartilsabstand beträgt also 2,7 mm. Die minimalste Pedikelweite thorakal lag bei 3,0 mm, die maximalste Weite bei 10,7 mm. Die Spannweite somit bei 7,7 mm.

Abbildung 14 verdeutlicht die Variabilität der thorakalen Pedikelweiten der Zielhilfe- und konventionellen Gruppe durch Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung.

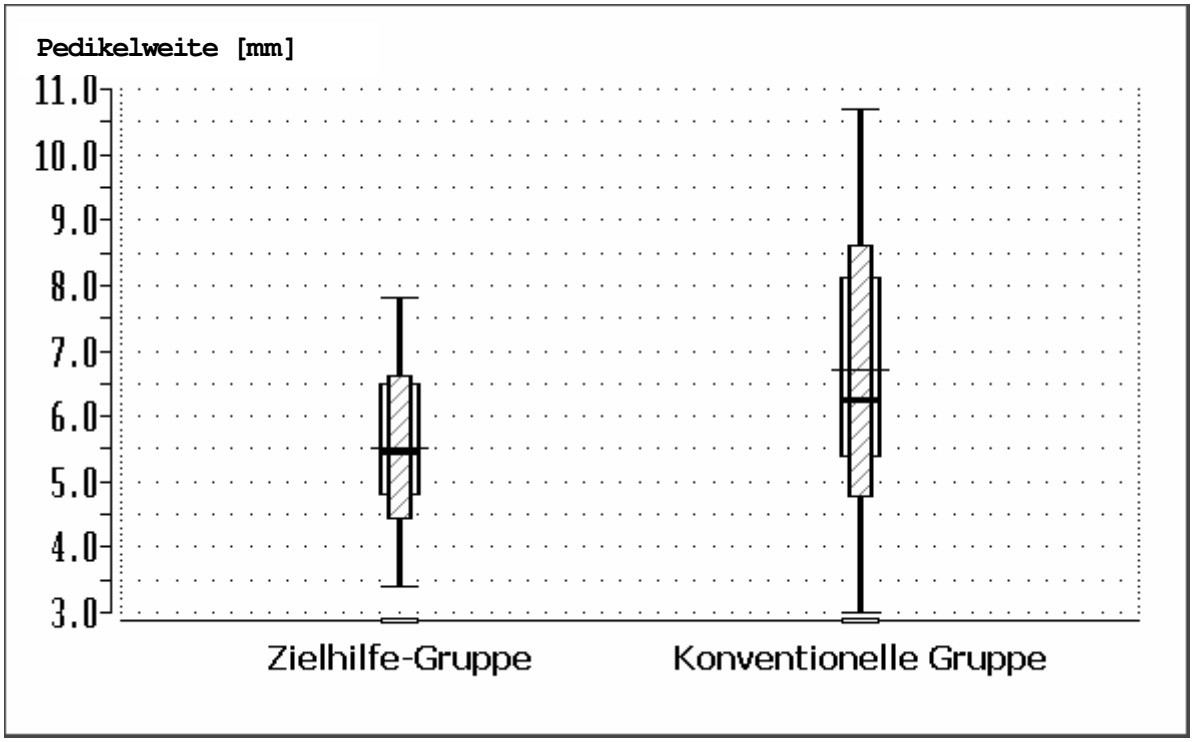

Abb. 14: Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung der Variabilität der thorakalen Pedikelweiten in der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe mit Angabe von Median (dicke Linie), Mittelwert (dünne Linie), einfacher Standardabweichung (schlanke, schraffierte Box), Interquartilsabstand (breite Box) sowie Minimum und Maximum.

3.4.2 Pedikelweiten der lumbalen Wirbelsäule

Für die lumbalen Pedikel der Zielhilfe-Gruppe wurden die folgenden Werte erhoben: L1 3,9 mm, L2 7,6 mm, L3 10,0 mm, L4 12,4 mm und L5 17,3 mm.
Im Durchschnitt war der lumbale Pedikel 12,5 mm weit, bei einer Standardabweichung von 4,2 mm, Median 13,0 mm. Die Hälfte der lumbalen Pedikelweiten bewegte sich größenmäßig zwischen 9,2 und 14,6 mm. Der Interquartilsabstand liegt folglich bei 5,4 mm. Der kleinste lumbale Pedikel maß 3,9 mm, der größte 20,5 mm. Für die Spannweite ergeben sich 16,6 mm.

In der Lendenwirbelsäule der konventionellen Gruppe wurden folgende Werte erhoben: L1 6,4 mm, L2 7,3 mm, L3 9,1 mm, L4 11,3 mm und L5 15,8 mm.
Im Durchschnitt 12,3 mm mit Standardabweichung 4,3 mm, Median 12,2 mm. 50 % der Pedikel hatten Weiten zwischen 8,8 und 15,6 mm. Interquartilsabstand 6,8 mm. Die minimale lumbale Pedikelweite lag bei 3,8 mm, maximal bei 23,0 mm und damit die Spannweite bei 19,2 mm.

Abbildung 15 fasst die Variabilität der lumbalen Pedikelweiten der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe in Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung zusammen.

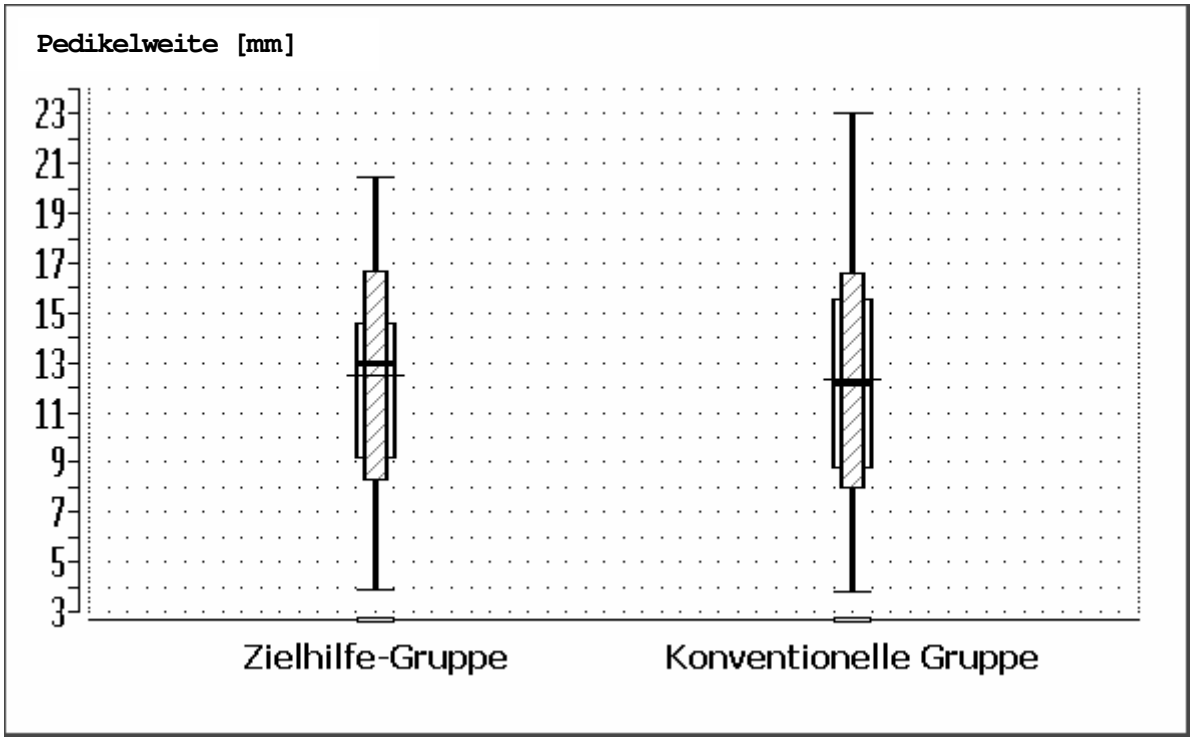

Abb. 15: Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung der Variabilität der lumbalen Pedikelweiten in der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe mit Angabe von Median (dicke Linie), Mittelwert (dünne Linie), einfacher Standardabweichung (schlanke, schraffierte Box), Interquartilsabstand (breite Box) sowie Minimum und Maximum.

3.5 Pedikelweiten, Schraubengrößen und Fehllagen

3.5.1 Verhältnis Pedikelweite und Schraubengröße

Die ermittelten durchschnittlichen Pedikelweiten der thorakalen und lumbalen Wirbel konnten nun mit den auf dieser Höhe eingebrachten Schraubengrößen in Relation zueinander gesetzt werden. Die Ergebnisse sind für die Zielhilfe-Gruppe in Tabelle 8 und für die konventionelle Gruppe in Tabelle 9 dargestellt.

Für Th5, Th6, Th7 und L1 der Zielhilfe-Gruppe betrug die Schraubengröße mehr als 100,0 % der Weite des Pedikels. In der konventionellen Gruppe lag das Verhältnis für alle thorakalen Wirbel unter 100,0 %. Im Durchschnitt füllte die Schraube in der Zielhilfe-Gruppe den thorakalen Pedikel zu 90,9 % aus, in der

konventionellen Gruppe zu 74,6 %. In der Lendenwirbelsäule ergab sich eine Relation von 51,2 % in der Zielhilfe-Gruppe und 52,8 % in der konventionellen Gruppe.

Tabelle 8: Relation der Schraubengröße zur Pedikelweite in der Zielhilfe-Gruppe für die Wirbelkörper der thorakalen (Th5 – Th12) und der lumbalen Wirbelsäule (L1 – L5)

Lage	**Pedikelweite** [mm]		**Schraubengröße** [mm]	**Verhältnis** [%]
	(Mittelwert)	(Standardabw.)	(Median)	
Th5	5,4	0,9	5,6	103,7
Th6	4,9	0,1	5,0	102,0
Th7	5,5	1,5	6,2	112,7
Th8	5,1	1,1	5,0	98,0
Th9	6,5	0,9	6,0	92,3
Th10	5,5	0,5	5,0	90,9
Th11	5,2	2,1	5,0	96,2
Th12	-	-	-	-
L1	3,9	0,0	5,0	128,2
L2	7,6	0,2	6,0	78,9
L3	10,0	1,3	6,2	62,0
L4	12,4	2,3	6,5	52,4
L5	17,3	2,7	6,5	37,6
Th1 - Th12	5,5	1,1	5,0	90,9
L1 - L5	12,5	4,2	6,4	51,2

Tabelle 9: Relation der Schraubengröße zur Pedikelweite in der konventionellen Gruppe für die Wirbelkörper der thorakalen (Th5 – Th12) und der lumbalen Wirbelsäule (L1 – L5)

Lage	**Pedikelweite** [mm]		**Schraubengröße** [mm]	**Verhältnis** [%]
	(Mittelwert)	(Standardabw.)	(Median)	
Th5	5,6	1,8	5,0	89,3
Th6	5,4	0,0	5,0	92,6
Th7	5,8	1,4	5,0	86,2
Th8	5,1	1,2	5,0	98,0
Th9	6,1	1,6	5,0	82,0
Th10	6,3	0,9	6,0	95,2
Th11	7,6	1,9	6,0	78,9
Th12	8,6	1,5	6,0	69,8
L1	6,4	1,9	5,8	90,6
L2	7,3	1,8	6,0	82,2
L3	9,1	2,3	6,4	70,3
L4	11,3	2,3	6,5	57,5
L5	15,8	2,9	6,5	41,1
Th1 - Th12	6,7	1,9	5,0	74,6
L1 - L5	12,3	4,3	6,5	52,8

3.5.2 Abhängigkeit Schraubengröße und Pedikelweite

Mittels Pearson-Regressionsanalyse wurden die erzielten Ergebnisse auf Abhängigkeiten untersucht. Aufgrund einer eventuell schiefen Verteilung wurden die Ergebnisse der Berechnungen mit der Spearman-Rang-Korrelation überprüft und in allen Fällen bestätigt.

Sowohl in der Zielhilfe-Gruppe, als auch in der konventionellen Gruppe fand sich in beiden Fällen eine starke Abhängigkeit der Schraubengröße von der Pedikelweite ($p < 10^{-6}$), Abbildungen 16 und 17. Es zeigte sich, dass bei geringen Pedikelweiten kleine Schrauben verwendet wurden und, dass je größer die Pedikel wurden, auch größere Schrauben zum Einsatz kamen.

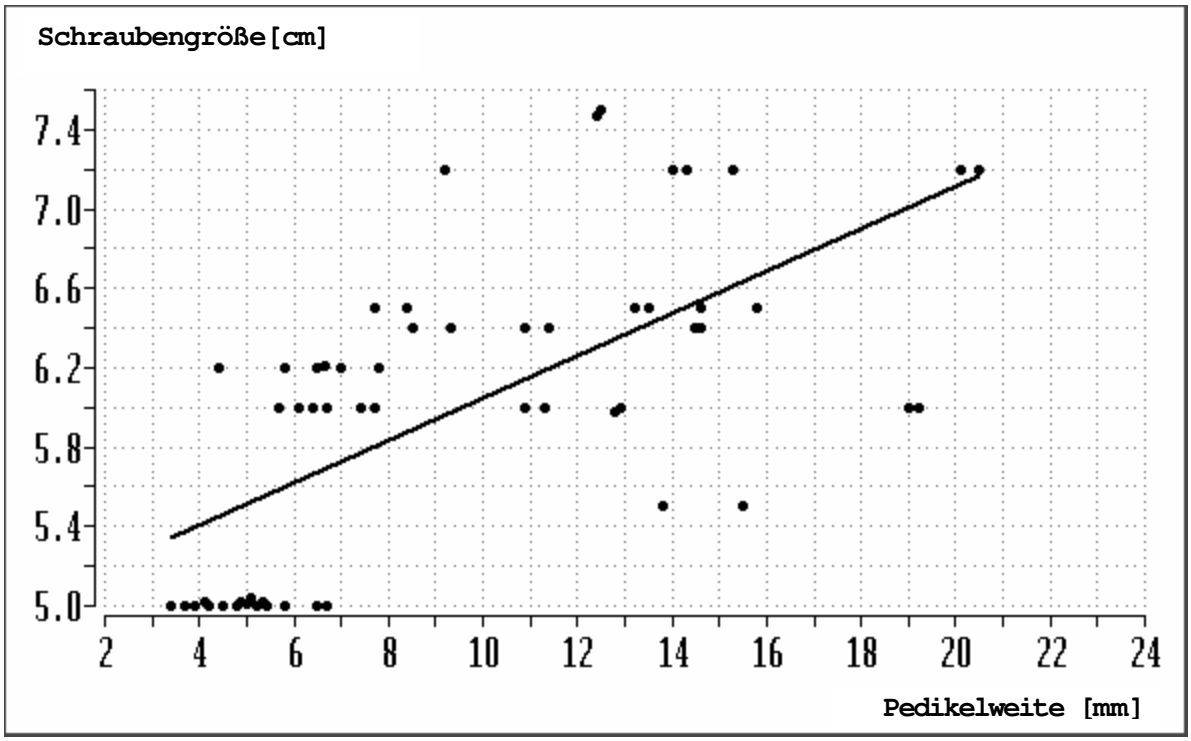

Abb. 16: Darstellung der durch Pearson-Regressionsanalye ermittelten Abhängigkeit der Schraubengröße von der Pedikelweite in der Zielhilfe-Gruppe in Form einer Geraden

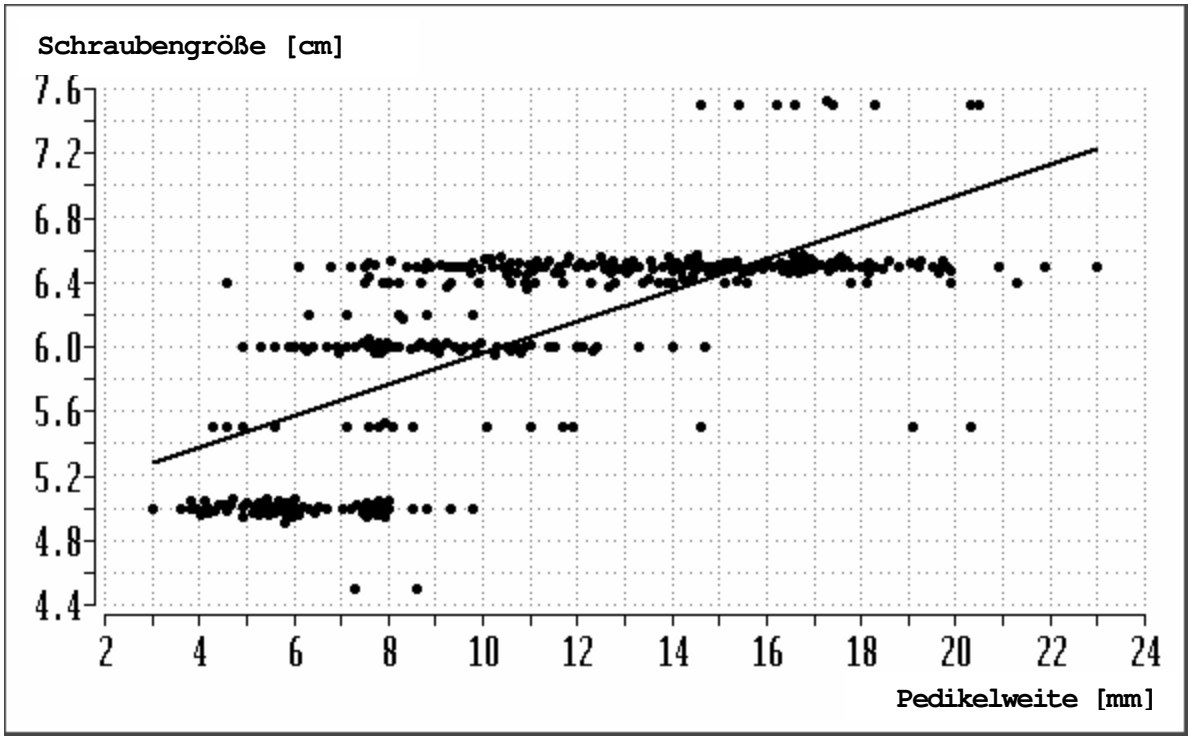

Abb. 17: Darstellung der durch Pearson-Regressionsanalyse ermittelten Abhängigkeit der Schraubengröße von der Pedikelweite in der konventionellen Gruppe in Form einer Geraden

3.5.3 Abhängigkeit Fehllage und Pedikelweite

Abbildungen 18 und 19 zeigen die Abhängigkeiten der Schraubenlage von der Pedikelweite.

Daraus ist ersichtlich, dass vor allem bei Pedikelweiten bis ca. 12 mm verstärkt Fehllagen vorkamen, und diese eher lateral lagen. Für die konventionelle Gruppe ist diese Abhängigkeit hoch signifikant gesichert ($p < 10^{-6}$), für die Zielhilfe-Gruppe knapp nicht mehr ($p = 0,07$).

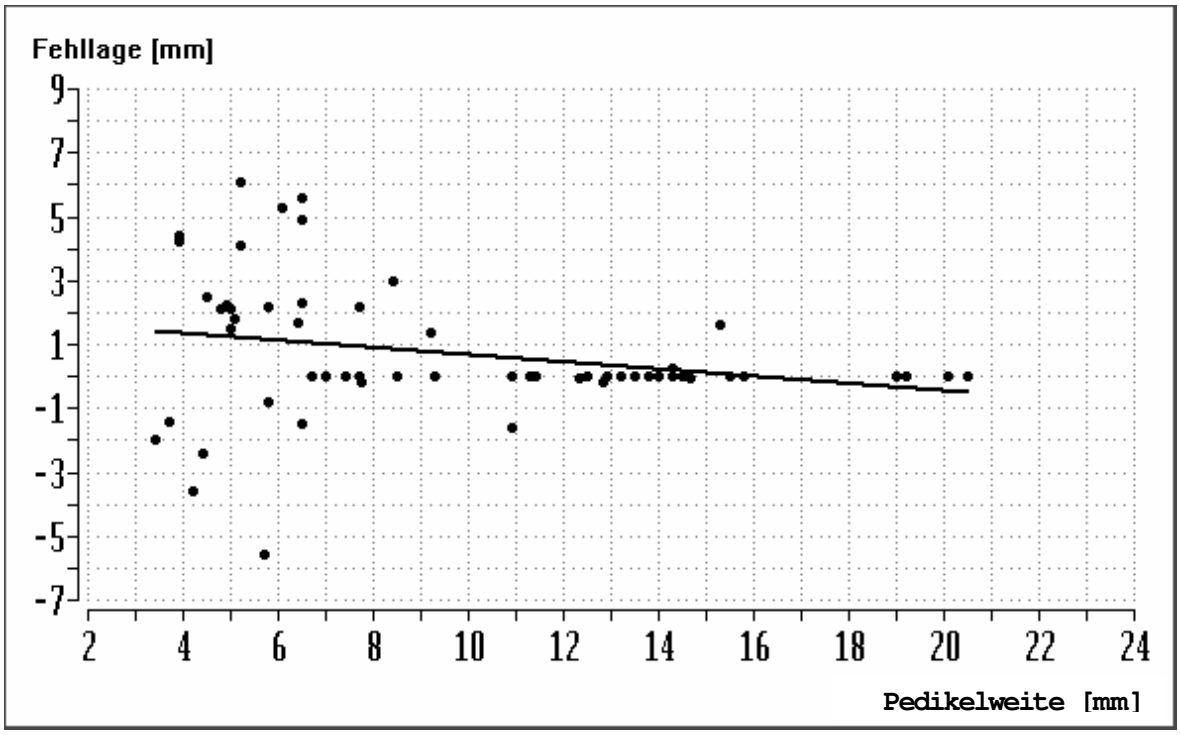

Abb. 18: Darstellung der durch Pearson-Regressionsanalyse ermittelten Abhängigkeit der Schraubenlage von der Pedikelweite in der Zielhilfe-Gruppe in Form einer Geraden. Mediale Fehllagen als negative Abweichung, zentrale Lagen entsprechend „0“ und laterale Fehllagen als positive Abweichung.

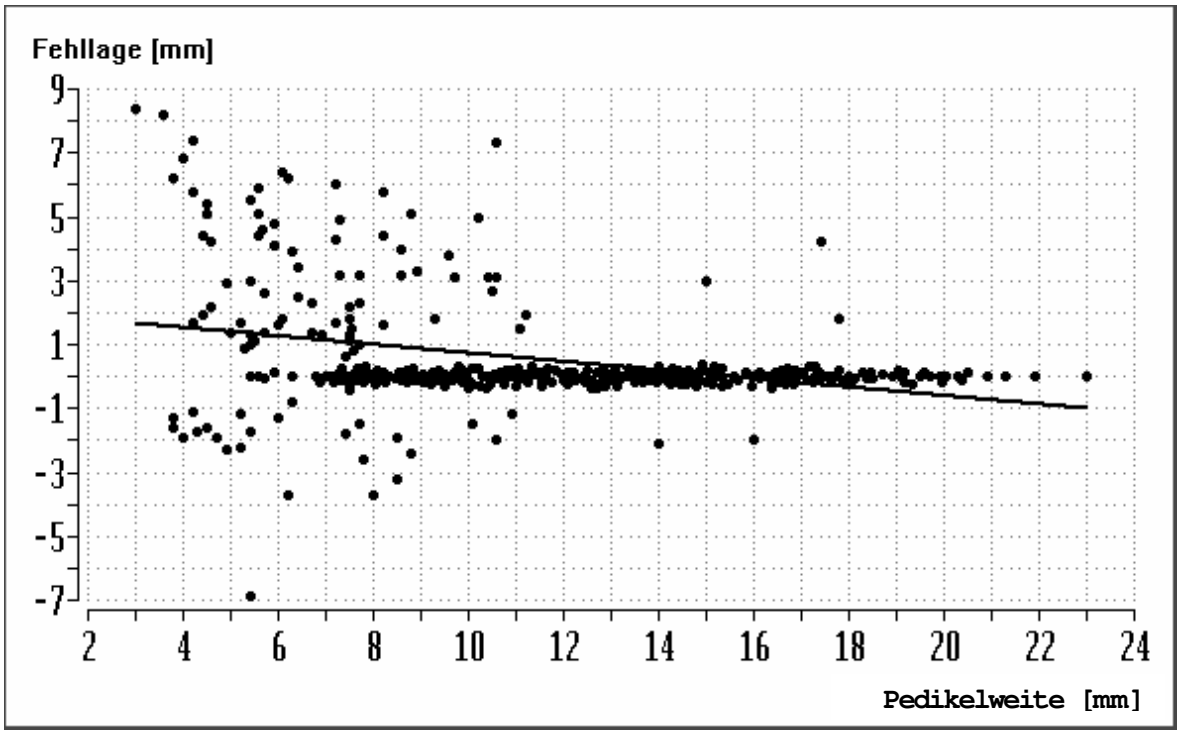

Abb. 19: Darstellung der durch Pearson-Regressionsanalyse ermittelten Abhängigkeit der Schraubenlage von der Pedikelweite in der konventionellen Gruppe in Form einer Geraden. Mediale Fehllagen als negative Abweichung, zentrale Lagen entsprechend „0“ und laterale Fehllagen als positive Abweichung.

3.6 Statistischer Vergleich der Gruppen

Um signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Gruppen nachzuweisen, wurden verschiedene statistische Signifikanztests durchgeführt.

3.6.1 Verteilung der Pedikelschrauben

Im χ^2-Test zum Vergleich der Verteilung der Pedikelschrauben auf die thorakalen und lumbalen Wirbelkörper ergibt sich ein p-Wert von p = 0,001639. Damit existiert für die Verteilung der eingebrachten Schrauben ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen. In der Zielhilfe-Gruppe wurden verhältnismäßig mehr Pedikelschrauben thorakal gesetzt als lumbal.

3.6.2 Lage der Pedikelschrauben

Zum Nachweis eines statistisch signifikanten Unterschiedes der thorakalen und lumbalen Schraubenlagen wurden die Gruppen mittels Wilcoxon-Mann-Whitney-Test verglichen.
Für die thorakalen Perforationsraten ergab sich ein p-Wert von 0,405211 und damit kein signifikanter Unterschied der Gruppen. Die lumbalen Perforationsraten zeigten mit einem p-Wert von 0,298293 ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen der Zielhilfe- und der konventionellen Gruppe.
Der Vergleich der Gruppen bezüglich der Wirbelkörperfehllagen (anterior und lateral gemeinsam) ergab keinen signifikanten Unterschied (p = 0,918689).

3.6.3 Pedikelweiten

Der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test zum Vergleich der thorakalen Pedikelweiten der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe zeigte mit p = 0,011696 einen deutlich signifikanten Unterschied. Die thorakalen Pedikel in der Zielhilfe-Gruppe waren signifikant kleiner als die thorakalen Pedikel in der konventionellen Gruppe. Im Vergleich der lumbalen Pedikelweiten fand sich kein signifikanter Unterschied der Gruppen (p = 0,755906).

3.6.4 Verhältnis Pedikelweite und Schraubengröße

Die Relation der Schraubengröße zur Pedikelweite war thorakal zwischen den Gruppen hoch signifikant verschieden ($p = 0{,}000307$). In der Zielhilfe-Gruppe fiel das Verhältnis im Vergleich zur konventionellen Gruppe ungünstiger aus. Beim Vergleich der Relation von Schraubengröße und Pedikelweite im Lumbalbereich fand sich hingegen kein signifikanter Unterschied mehr ($p = 0{,}996298$).

4. Diskussion

4.1 Thematik

Seit der Erstbeschreibung durch King 1944 [39] hat sich die Stabilisierung mittels Pedikelschrauben zu einem Standardverfahren in der Wirbelsäulenchirurgie entwickelt.
Klinische und anatomische Arbeiten belegen das Gefährdungspotenzial durch suboptimal platzierte Pedikelschrauben im Hinblick auf neurale Strukturen im Spinalkanal und den Neuroforamina [3, 11, 14, 17 – 20, 28, 34, 52, 68, 69, 76, 79, 81, 82]. Aus diesem Grund ist stets eine möglichst optimale Schraubenlage anzustreben. Mit der konventionellen Schraubenimplantationsmethode (Kombination aus präziser Identifikation intraoperativer Landmarken und intraoperativer Fluoroskopie) werden Erfolgsraten zwischen 27,6 bis 100,0 % berichtet. Mit neuen computer-assistierten Navigationstechniken lassen sich die Fehllageraten bei der Platzierung von Pedikelschrauben reduzieren. Diesbezüglich werden in der Literatur Erfolgsraten zwischen 72,0 und 100,0 % angegeben [41].

Navigationssysteme sind jedoch teuer in der Anschaffung, zusätzlichen Ausstattung und Wartung. Je nach Planungssoftware benötigen sie ausgedehnte präoperative CT-Untersuchungen, durch die der Patient einer erhöhten Strahlung ausgesetzt ist. Sie sind zeitaufwändig durch aufwändigere präoperative Planungen sowie verlängerte Operationszeiten, und noch nicht überall verfügbar [2, 12, 38, 49, 53, 56, 63, 73, 75].
In der Realität liefern die Navigationssysteme aus mehreren Gründen nicht die theoretisch mögliche Fehllagerate von 0,0 %. Diese Art der Einbringung erfordert zu Beginn der Operation einen Registrierungsprozess, bei dem die präoperativen Aufnahmen mit der intraoperativen Anatomie des Patienten abgeglichen werden müssen. Hier kann auch schon eine kleine Abweichung z.B. durch die andere Lagerung des Patienten (Bauchlage bei der Operation statt Rückenlage bei der CT-Anfertigung) oder durch intraoperative Repositionsmanöver zu Fehlern führen. Es können Probleme mit der Hard- und Software auftreten. Hinzu kommt noch eine Lernkurve, die bei dieser neuen komplexen Technik nicht außer Acht gelassen werden darf [12, 37, 63].

Der Gedanke, der hinter der vorliegenden Studie stand, war der, zu prüfen, ob es möglich ist, durch ein einfaches, kostengünstiges Hilfsmittel, die Genauigkeit der Pedikelschraubenplatzierung zu erhöhen und damit die Gefahr für neurologische Komplikationen zu verringern.
Zwei andere Arbeitsgruppen haben sich ebenfalls Gedanken zur präziseren Platzierung von Pedikelschrauben gemacht und jeweils eine Zielhilfe entwickelt [33, 53, 54]. Jang et al. [33] und Mac-Thiong et al. [53, 54] konnten in ihren Leichenstudien eine Verringerung der Fehllageraten in der thorakalen Wirbelsäule zeigen. Sie haben allerdings keine Angaben über die Anschaffungskosten ihrer Geräte gemacht.
Im vorliegenden Fall wäre für die mechanische Zielhilfe mit ca. 2.800 CHF (etwa 1.700 €) zu rechnen. 6 Paar Winkelaufsätze à ca. 450 CHF (etwa 275 €) ergeben 2.700 CHF (ungefähr 1.650 €). Dazu noch jeweils ca. 400 CHF (etwa 250 €) pro Adapter für Bohrer und Gewindeschneider. Das ergibt einen Gesamtbetrag von 6.300 CHF (ca. 3.850 €).
Im Vergleich zu Kosten in Höhe von ca. 250.000 € für ein Navigationssystem erscheint das sehr günstig [71].

4.2 Methodik

Der Vergleich der neuen Zielhilfe-Technik mit der konventionellen Technik, die im Moment noch das Standardverfahren darstellt, ist die logische Schlussfolgerung zur Bewertung der Zielhilfe.

Die Verteilung der Patienten auf die beiden Gruppen erfolgte nicht randomisiert. Der nachträgliche Vergleich der ausgewerteten Gruppen zeigte allerdings, dass sich die Gruppen hinsichtlich Alter, Geschlecht und Operationsindikationen statistisch nicht unterschieden haben.
Einzig und allein der Umfang der Zielhilfe-Gruppe war mit insgesamt 56 ausgewerteten Pedikelschrauben (24 thorakal, 32 lumbal) in der Zielhilfe-Gruppe zu 318 Schrauben (70 thorakal, 248 lumbal) in der konventionellen Gruppe nicht ausgeglichen.

Zum Literaturvergleich wurden für die vorliegende Arbeit nur Studien herangezogen, welche die Schraubenlage ebenfalls computertomographisch ausgewertet haben [2, 5, 6, 11, 22, 24 – 30, 33, 34, 37, 47 – 49, 51, 53, 56, 60, 72, 79].
Unter diesen Studien fanden sich fünf, deren Ergebnisse an Leichen (in vitro) erhoben wurden [2, 29, 37, 53, 79]. Bei allen anderen Studien wurden die Daten an Patienten (in vivo) erhoben [5, 6, 22, 24 – 28, 30, 33, 34, 47 – 49, 51, 56, 60, 72]. Die Pedikelschrauben wurden konventionell [5, 11, 22, 24 – 28, 34, 47, 51, 56, 60, 79], navigiert [37] oder zum Vergleich der beiden Methoden konventionell und navigiert eingebracht [2, 6, 29, 30, 49, 51, 72]. Jang et al. [33] und Mac-Thiong et al. [53] haben zum Platzieren jeweils ihre Zielhilfe verwendet.

Thorakal wurden zwischen 11 und 279 Pedikelschrauben eingebracht [2, 5, 24 – 27, 29, 30, 37, 47, 49, 51, 53, 56, 60, 72, 79]. Im Durchschnitt wurden in der vorliegenden Literatur, ohne Berücksichtigung der Arbeiten, die nur in den Teilbereichen Th8 – Th12 und Th10 – 12 bzw. Th11 – Th12 Schrauben eingebracht haben [25, 26, 56, 60], 123 Pedikelschrauben in der gesamten thorakalen Wirbelsäule verankert.
Die Gesamtzahl der instrumentierten Pedikel der beiden Gruppen dieser Studie liegt mit 24 Schrauben in der Zielhilfe-Gruppe und 70 in der konventionellen Gruppe innerhalb der Literaturwerte, jedoch in beiden Fällen unterhalb des Durchschnitts. Um die Aussagekraft unserer Studie zu erhöhen wäre es wünschenswert gewesen vor allem mit der Zielhilfe noch weitere Pedikelschrauben in der thorakalen Wirbelsäule zu setzen.

In der lumbalen Wirbelsäule bewegen sich die Zahlen in der Literatur zwischen 14 und 272 implantierten Schrauben [2, 6, 11, 22, 25, 26, 28, 33, 34, 48, 49, 56, 60]. Durchschnittlich wurden 112 Pedikelschrauben lumbal gesetzt.
Mit 32 Pedikelschrauben in der Zielhilfe-Gruppe und 248 in der konventionellen Gruppe bewegen sich die aktuellen Zahlen ebenfalls wieder im Bereich der Literaturdaten. In der konventionellen Gruppe wurde mit 248 Pedikelschrauben eine ausreichende Anzahl ausgewertet. Allerdings wäre es auch hier wünschenswert noch weitere Schrauben lumbal mit der Zielhilfe zu platzieren, um die Aussagekraft zu erhöhen.

Die Anwendung der Zielhilfe während der Operation erwies sich als praktikabel und verglichen mit der konventionellen Methode sowie mit den in der Literatur erhältlichen Erfahrungsberichten zur Computernavigation nicht weiter arbeitsintensiv.

Zur allgemeinen präoperativen Vorbereitung analysierte der Operateur, wie auch bei der konventionellen Methode, die CT- oder MRT-Aufnahmen und verschaffte sich ein Bild über die Situation des Operationsgebietes (Pedikeldimensionen, Konvergenzwinkel, Schraubeneintrittspunkte). Bei der Anwendung der Zielhilfe mussten zusätzlich die Eintrittspunkte mit den Abständen festgelegt und ausgemessen, wie auch die Konvergenzwinkel bestimmt werden. Mit dem Bildbearbeitungs- und Archivierungssystem IMPAX ES und Web 1000 5.0 von AGFA PACS (Agfa HealthCare, Mortsel, Belgien) ließen sich auf den meist digital vorliegenden CT- oder MRT-Aufnahmen der ideale Konvergenzwinkel und Eintrittsabstand der Schrauben gut und sicher bestimmen.

Der operative Ablauf war bis zur Darstellung der Schraubeneintrittspunkte für die Zielhilfe- und konventionelle Technik der Gleiche. Erst nachdem die Schraubeneintrittspunkte dargestellt waren, kam die Zielhilfe zum Einsatz. An der Zielhilfe wurden die zuvor bestimmten Werte eingestellt. Der präoperativ gemessene Konvergenzwinkel wurde gerundet in Schritten von 10° eingestellt. Durch die Einstellung des Eintrittsabstandes mit einer stufenlos regulierbaren Stellschraube kann der präoperativ gemessene Abstand theoretisch exakt eingestellt werden. Die dafür benötigten zusätzlichen Abstandsmesser (z.B. Schieblehre oder Lineal) bieten Raum für gewisse Ungenauigkeit. Zusammen mit der gerundeten Winkeleinstellung kann es zu Abweichungen von den präoperativ erhobenen Daten kommen.

Die Präparation des Schraubenkanals erfolgte mit Pfriem, Ahle oder Bohrer, welche durch die Zielhilfe geführt wurden. Dafür war es nur notwendig die Zielhilfe mit den abgewinkelten Führungshülsen fest an die zuvor bestimmten Eintrittspunkte anzupressen. Dann konnte in gleicher Weise wie bei der konventionellen Technik mit dem Vorteil der festen Führung durch die Führungshülsen, der Kanal für die Pedikelschraube vorbereitet werden. Nachdem dies erfolgt war, wurde die

Pedikelschraube wie bei der konventionellen Technik manuell mit einem Handgriff eingeschraubt. Insofern ist es nicht notwendig, eine neue, komplizierte Technik zu erlernen. Die Zielhilfe lässt sich leicht in den Operationsalltag integrieren.

Allerdings besteht durch das ungeführte Einbringen der Pedikelschraube ohne Zielhilfe in den mit Zielhilfe vorbereiteten Schraubenkanal die Möglichkeit, dass die Pedikelschraube trotz des im Winkel präparierten Kanals einen anderen Weg einschlägt und eventuell den Pedikel perforiert.
Dies ist allerdings teilweise auch bei der Computernavigation der Fall [48]. Auch bei der Navigation wird (je nach Verfahren) nur die Bohrung bzw. Präparation des Kanals für die Pedikelschrauben navigiert durchgeführt. Das Einbringen der Schrauben erfolgt konventionell mit einem T-Handgriff. Es bleibt ein Risiko, dass trotz akkurater Schraubenkanalpräparation eine Fehlplatzierung der Schraube erfolgt [72].
Diese Fehlerquelle ließe sich im Falle unserer mechanischen Zielhilfe in Zukunft möglicherweise durch kanülierte Pedikelschrauben ausschalten. Bei diesen wird ein K-(Kirschner-)Draht zur Vorbereitung des Schraubenkanals und damit des richtigen Verlaufs der Schraube durch den Pedikel verwendet und anschließend die Schraube über diesen Draht geführt in den Pedikel eingebracht. Die Einbringung des K-Drahtes wäre durch weitere Adapter für die Winkelaufsätze dann ebenfalls mit der Zielhilfe möglich. Nach erfolgter K-Draht-Bohrung könnten die Winkelaufsätze an der Zielhilfe gelöst und aufgrund des fehlenden Schraubenkopfes vom Draht entfernt werden. Anschließend würde über den im vorgegeben Konvergenzwinkel liegenden K-Draht die kanülierte Schraube geführt eingebracht werden.
Das Risiko einer Änderung der Verlaufsrichtung beim Eindrehen der Pedikelschrauben könnte somit verringert werden.

Beim Vergleich der beiden Gruppen dieser Arbeit wurde zunächst das postoperative klinische Ergebnis anhand der Aufzeichnungen in der Krankenakte hinsichtlich einer schraubenbedingten Nervenschädigung beurteilt. Darüber hinaus wurde aber vor allem auch die exakte Schraubenlage analysiert um Pedikelperforationen zu erkennen und um mechanisch suboptimale Schraubenlagen zu identifizieren.

In der Neurochirurgischen Abteilung des Kantonsspitals Winterthur wird routinemäßig zur Dokumentation des Operationsergebnisses postoperativ ein CT des operierten Wirbelsäulenabschnittes angefertigt und die Lage des Implantats bewertet. Die Auswertung erfolgt anhand von Rekonstruktionen in drei Ebenen (axial, koronar und sagittal).

Reine Röntgenaufnahmen sind zur Analyse der Schraubenlage unzureichend. Auf ihnen wird die Anzahl der Perforationen unterschätzt [6, 8, 80]. Farber et al. fanden in einer Vergleichsstudie eine 10mal höhere Perforationsrate auf den CT-Bildern als auf den Röntgenbildern [22]. Choma et al. konnten in ihrer Studie nachweisen, dass durch exakte Auswertung der Röntgenaufnahmen doch eine hohe Aussagegenauigkeit erzielt werden kann. Diese bliebe dennoch hinter der Aussagekraft von CT-Aufnahmen zurück [12]. Sapkas et al. haben in einer Vergleichsstudie die Lage von Pedikelschrauben mittels postoperativen Röntgenaufnahmen im lateralen Strahlengang und Computertomographie ausgewertet. Sie hingegen konnten für die Evaluation der Pedikelschraubenlage keinen signifikanten Unterschied der beiden Methoden erheben. Nach ihren Ausführungen bietet das CT keinen Vorteil zur Bewertung der Schraubenlage [70]. Auch Brooks et al. konnten keinen Unterschied in der Lagebestimmung der Pedikelschrauben im Vergleich von Röntgen- und CT-Aufnahmen finden [10]. Anders Learch et al., die in einer Kadaverstudie die Lage von lumbal platzierten Pedikelschrauben mittels Röntgen, CT und makroskopischer Kontrolle ausgewertet haben. Hier konnten im Vergleich zum Röntgen durch das CT mehr Schrauben in ihrer Lage richtig bewertet werden (63 zu 87 %) [50]. Rao et al. fanden in einer Vergleichsstudie von CT und direkter, makroskopischer Kontrolle zur Bewertung der Lage von thorakalen Pedikelschrauben einen negativen prädiktiven Wert von 62 %, in dem Sinne, dass das CT die Fehllage von Pedikelschrauben überschätzt. Dennoch denken auch sie, dass das CT die beste Methode bleibt, um in der klinischen Situation die Lage von Pedikelschrauben zu beurteilen [64, 65]. Castro et al. haben eine vollständige Übereinstimmung der Schraubenlagen zwischen CT-Bildern und makroskopischen Untersuchungen ihrer in vitro-Studie zeigen können [11].

Zusammenfassend kann man festhalten, dass zur Bestimmung der Lage von Pedikelschrauben in vivo die Computertomographie als das Verfahren mit der höchsten Aussagekraft angesehen wird, es ist der Goldstandard geworden [23, 26, 30, 52].

Gertzbein und Robbins haben 1990 als Erste die Perforationen in Gruppen eingeteilt und dabei jeweils in Schritten von 2 mm zusammengefasst [25]. Diese Einteilung wurde dann von mehreren anderen Arbeitsgruppen übernommen [1, 5, 11, 24, 34, 47 – 49, 65, 72, 73] und auch von uns verwendet. Sie bietet somit eine gute Grundlage, um die Präzision verschiedener Methoden untereinander vergleichen zu können.
Zusätzlich zu den lateralen und medialen Fehllagen haben wir anhand der koronaren und sagittalen Rekonstruktionen erfasst, wenn eine Schraube kranial oder kaudal des Pedikels lag. Standard-CT-Aufnahmen sind zur Bewertung einer kranialen oder kaudalen Fehllage nicht geeignet [26].

Auf den postoperativen CTs wurden weiter die Pedikelweiten bestimmt um die Fehllagen genauer zu analysieren. Dafür wurden die Schraubendurchmesser in Relation zu den jeweiligen Pedikelweiten gesetzt.
CT-Aufnahmen am Lebenden sind in der Lage gute Aussagen über die Größenverhältnisse im Bereich der Wirbelsäule zu machen [7]. Die Pedikelweiten, die anhand der koronaren Rekonstruktionen bestimmt wurden, korrelieren eng mit den Werten, die auf den axialen CT-Aufnahmen gemessen wurden. Koronare Rekonstruktionen geben auch am genausten den Pedikel im Querschnitt wider. Durch CT-Aufnahmen mit axialen und koronaren Rekonstruktionen kann die Weite am Pedikelisthmus am präzisesten bestimmt werden [57]. Zindrick et al. haben Pedikelmessungen mittels Röntgen und Computertomographie durchgeführt und keinen signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen feststellen können [87]. Laut Olsewski et al. können sich die Pedikelweiten, wie sie anhand von Röntgenbildern oder CT-Aufnahmen bestimmt wurden, dennoch signifikant von den tatsächlichen Maßen an Leichen unterscheiden [61]. Andere Arbeitsgruppen teilen diese Auffassung nicht. Sie sind der Ansicht, dass die Maße der Wirbel, die mit CT-Aufnahmen erhalten wurden ziemlich genau sind und eng mit Kaliper-(Kneifzangen-)Messungen korrelieren [44, 57, 78, 81].

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Schraubenverteilung

Die Verteilung der eingebrachten Pedikelschrauben auf die verschiedenen Wirbelsäulenabschnitte (thorakal – lumbal) war im χ^2-Test mit einem p-Wert von $p < 0,05$ signifikant verschieden. In der Zielhilfe-Gruppe wurden signifikant mehr Pedikelschrauben thorakal gesetzt als lumbal.
Ein Vergleich der Gesamtfehllageraten für die thorakale und lumbale Wirbelsäule gemeinsam wurde aus diesem Grund nicht durchgeführt. Es wurden für jeden Wirbelsäulenabschnitt die Ergebnisse getrennt betrachtet und verglichen. In der Darstellung der Ergebnisse kam es aus diesem Grund zu keinem Bias, sodass dem Umstand, dass in der Zielhilfe-Gruppe mehr Schrauben thorakal gesetzt wurden, keine weitere Beachtung geschenkt werden muss.

4.3.2 Klinische Ergebnisse

Das oberste Ziel jedes operativen Eingriffs sollte sein, gesundes Gewebe soweit wie möglich zu schonen und Verletzungen nur soweit als nötig zu setzen.

Schon zu Beginn, bei den grundlegenden Gedanken über den Sinn der Planung der Zielhilfe, wurde gezeigt, welches Risiko der Eingriff der transpedikulären Fixierung an der Wirbelsäule birgt: das Risiko durch eine falsch platzierte Pedikelschraube das Rückenmark oder die Spinalnerven zu schädigen.
Das klinische Ergebnis kann neben einer Verschlechterung der Neurologie noch durch weitere Komplikationen beeinträchtigt werden. In der Literatur sind für Eingriffe mit Pedikelschrauben Komplikationen aufgeführt, wie sie beinahe bei jedem operativen Eingriff vorkommen können und Verlaufskomplikationen, die auf das implantierte Osteosynthesematerial zurückzuführen und unabhängig von der Art der Einbringung sind.
Allgemeinen Komplikationen entsprechen Fieber, gastrointestinale Probleme wie z.B. Ileus, Gefäßverletzungen, Harnwegsinfektion, Hepatitis, Nervenverletzungen, thromboembolische Ereignisse, perioperativer Tod aufgrund Pneumonie mit Sepsis und kardialer Arrhythmie, Polytrauma oder Lungenembolie, Schmerzen im

Bereich des Operationsgebietes, oberflächliche oder tiefe, frühe oder späte Wundinfektionen mit evtl. Revisionsoperation, viszerale Verletzungen, Verwirrtheit.
Spezifische Komplikationen sind, vor allem bei schlanken Patienten, das Hervorstehen des Osteosynthesematerials mit zum Teil anhaltenden, chronischen Schmerzen. Bei den einzelnen Komponenten können sich die Gewindemuttern und Schrauben lockern, die Schrauben verbiegen und brechen. Alle diese Gründe können zu einem Implantatversagen führen und eine Revisionsoperation nötig machen [14, 20, 21, 35, 36, 49, 52, 68, 69, 81, 82].

Die angeführten Komplikationen können im ersten Fall im Rahmen jeder Operation auftreten. Im zweiten Fall handelt es sich um Langzeitkomplikationen, die unabhängig von der Operationsmethode auftreten können. Aus diesen Gründen wurde in dieser Untersuchung nur das primäre klinisch-neurologische Ergebnis analysiert.

In den beiden Vergleichsgruppen kam es aufgrund einer Schraubenfehllage bei keinem Patienten zu neuen neurologischen Ausfallserscheinungen. Es liegt kein Unterschied zwischen den Gruppen vor. Eine Verschlechterung des neurologischen Status wurde jeweils nur bei einem Patient in der Zielhilfe- und einer Patientin in der konventionellen Gruppe beobachtet und war in beiden Fällen nicht auf die Schraubenlage zurückzuführen. Für die Zielhilfe-Gruppe ergab sich daraus eine Rate für neurologische Komplikationen in Höhe von 7,1 % und für die konventionelle Gruppe in Höhe von 1,2 %.

Die in der Literatur angegebenen Raten neurologischer Komplikationen bewegen sich zwischen 0,0 % und 16,7 % der Patienten. Nicht in allen Fällen sind diese auf eine Fehllage von Pedikelschrauben zurückzuführen.

In einer Studie zur Präzision der Pedikelschraubenplatzierung, die sowohl Castro als auch Jerosch veröffentlichten, berichten sie von neuen neurologischen Ausfallserscheinungen bei 5 der 30 Patienten (16,7 %), die im Bereich der lumbalen Wirbelsäule zwischen L2 und S1 operiert wurden. Diese Defizite konnten eindeutig 6 Pedikelschrauben zugeordnet werden, die zwischen 6 und 8 mm in den Spinalkanal vorgedrungen waren [11, 34].

Davne und Myers berichten in ihrer Studie zu Komplikationen lumbaler Fusionen durch transpedikuläre Instrumentierung über neurologische Komplikationen bei 6 Patienten (1,1 %). Bei 2 Patienten (0,4 %) konnten diese auf die Schraubenlage zurückgeführt werden, bei den anderen Patienten auf die Präparation des Schraubenkanals bzw. Repositionsmanöver [14].

Esses et al. haben sich ebenfalls mit Komplikationen durch die Technik der Fixierung mit Pedikelschrauben beschäftigt und dazu die Mitglieder des „American Back Society's Committee on Surgery" befragt. Es konnten 617 Fälle transpedikulärer Schraubenfixierung ermittelt werden, von denen es in 29 Fällen (4,7 %) zu vorübergehenden oder dauerhaften Nervenschädigungen gekommen ist. Über die Ursachen der Nervenschädigungen wurden keine Angaben gemacht [20].

Fisher et al. haben bei 23 Patienten zwischen Th1 und Th12 201 Pedikelschrauben gesetzt. Weder intra- noch postoperativ wurden neue neurologische Ausfallserscheinungen beobachtet [24].

Güven et al. haben bei 75 Patienten zwischen Th8 und S2 Pedikelschrauben platziert und deren Lage postoperativ mittels Computertomographie ausgewertet. Nur ein Patient (1,3 %) hat durch die Schraubenlage postoperativ ein Wurzelkompressionssyndrom entwickelt [26].

Guzey et al. versorgten insgesamt 24 Patienten zwischen Th2 und Th8 mit transpedikulärer Schraubenfixierung. Neurologische Defizite aufgrund fehlplatzierter Schrauben wurden nicht beschrieben [27].

Jutte und Castelein haben retrospektiv die Aufzeichnungen von 105 Patienten nach lumbaler und lumbosakraler Fusion auf Komplikationen ausgewertet. Es kam bei einem Patienten (1,0 %) zu einem neurologischen Defizit, welches allerdings in keinem Zusammenhang mit den eingebrachten Pedikelschrauben stand [35].

Katonis et al. bewerteten in einer retrospektiven Arbeit Komplikationen und Probleme, die während und nach der Stabilisierung der Wirbelsäule mittels Pedikelschraubensystemen aufgetreten sind. Bei insgesamt 112 Patienten zeigte ein Patient (0,9 %) ein neurologisches Defizit, welches sich nach sechs Wochen vollständig zurückbildete und nicht auf eine Schraubenfehllage zurückzuführen war. Die CT-Kontrollen zeigten bei allen Patienten eine regelrechte Schraubenlage [36].

Kuntz et al. implantierten bei 29 Patienten Pedikelschrauben im Bereich der thorakalen Wirbelsäule (Th1 – Th12). In ihrer Untersuchungsreihe traten keine neuen Nervenverletzungen auf [47].

Lonstein et al. haben sich in ihrer Veröffentlichung mit den Komplikationen durch Pedikelschrauben beschäftigt, die zwischen Th9 und S2 platziert wurden. 9 der insgesamt 875 Patienten (1,0 %) zeigten postoperativ eine Nervenwurzelirritation. Die Schraubenlage haben Lonstein et al. primär anhand von Röntgenaufnahmen ausgewertet. Bei Anzeichen eines neurologischen Defizits in der frühen post-operativen Phase oder bei spät einsetzenden Schmerzen wurde eine Kontroll-computertomographie veranlasst [52]. Die Anzahl der Schraubenfehllagen kann dadurch bei Lonstein et al. zwar unterschätzt werden und ist aus diesem Grund nicht mit anderen Arbeiten vergleichbar, die die Lage der Pedikelschrauben stets anhand von CT-Aufnahmen ausgewertet haben. Die neurologische Komplikations-rate durch eine Fehllage der Schraube bleibt aber mit der anderer Arbeiten vergleichbar.

Merloz et al. haben in ihrer Vergleichsstudie mit konventioneller und computer-assistierter Technik Pedikelschrauben zwischen Th10 und L5 gesetzt. In keiner Gruppe haben sie neurologische Komplikationen beobachtet [56].

Odgers et al. haben bei 65 Patienten Pedikelschrauben im Bereich von Th11 und L5 konventionell unter seitlicher Bildwandlerkontrolle eingebracht. Bei 2 Patienten (3,1 %) verursachte jeweils eine im Spinalkanal liegende Pedikelschraube neuro-logische Defizite [60].

Roy-Camille et al. haben bei 143 Patienten lumbosakrale Fusionen durchgeführt. In 10 Fällen (7,0 %) kam es zu Nervenverletzungen. Diese waren laut ihren Angaben durch die Exploration des Spinalkanals bedingt, nicht durch das Bohren des Kanals für die Schraube bzw. die Schraube selbst [69].

Schnake et al. haben die Navigationstechnik mit der konventionellen Methode in der thorakalen Wirbelsäule verglichen. In der konventionellen Gruppe wurden Schrauben zwischen Th2 und Th12 gesetzt. Es wurde von keinen neuen neurologischen Ausfällen berichtet [72].

West et al. berichten in ihrer Studie von 7 neurologischen Komplikationen bei insgesamt 124 Patienten, von denen 2 (1,6 %) auf eine Schraubenfehllage zurück-geführt werden konnten [82].

Die hier erzielten Ergebnisse mit einer Rate an neurologischen Komplikationen aufgrund einer Fehllage von Pedikelschrauben von 0,0 % in beiden Gruppen, sowie der allgemeinen Rate an neurologischen Komplikationen von 7,1 % in der Zielhilfe- und 1,2 % in der konventionellen Gruppe stellen somit ein sehr gutes klinisches Ergebnis dar.

Keiner der Patienten musste aufgrund eines durch eine Pedikelschraube bedingten neurologischen Defizits erneut operiert werden. Dennoch wurde bei einem Patienten in der Zielhilfe-Gruppe (7,1 %) und bei drei Patienten in der konventionellen Gruppe (3,6 %) eine Revisionsoperation zur prophylaktischen Lagekorrektur von Pedikelschrauben durchgeführt. Diese Ergebnisse sind mit den Literaturangaben für Revisionsoperationen bei konventioneller Technik vergleichbar.
Amiot et al. berichten von einer Rate an Revisionsoperationen in Höhe von 7,0 %, bei ähnlichen Eingriffsbereichen zwischen Th5 und S2 [1].
Castro et al. erwähnen mit 6,7 % (2 von 30 Patienten) eine ähnlich hohe Rate. Sie haben allerdings nur lumbal zwischen L2 und S1 Pedikelschrauben eingebracht. Außerdem zeigten noch 3 weitere Patienten ebenfalls neurologische Ausfälle. Sie verweigerten jedoch einen weiteren Eingriff. Wären alle 5 Patienten erneut operiert worden, hätte sich eine Revisionsrate von 16,7 % ergeben [11].
Bei Esses et al. wurden 12 von 617 Patienten (1,9 %) aufgrund von Nervenwurzelirritationen erneut operiert. Sie haben keine Angaben über die instrumentierten Wirbelsäulenabschnitte gemacht [20].
Lonstein et al. geben eine Rate an erneuten Eingriffen von 0,8 % (7 von 875 Patienten) an. Es wurden die Wirbelkörper von Th9 bis S2 instrumentiert [52].
Bei Schnake et al. musste keiner der 29 Patienten, die nach der konventionellen Technik zwischen Th2 und Th12 versorgt wurden, erneut operiert werden [72].

4.3.3 Schraubenlagen

Im Bereich der **thorakalen** Wirbelsäule wurden in dieser Studie Fehllageraten (Pedikelperforationen oder extrapedikuläre Schraubenlagen) von 87,5 % in der Zielhilfe- und 77,1 % in der konventionellen Gruppe ermittelt.

Belmont et al. haben bei 40 aufeinander folgenden Patienten die Lage von 279 thorakalen Pedikelschrauben durch postoperative CT-Untersuchungen ausgewertet. 159 Schrauben (57,0 %) lagen vollständig im Pedikel. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den eigenen Ergebnissen konnte aus ihren Daten eine Fehllagerate für den Bereich Th5 bis Th12 in Höhe von 38,7 % berechnet werden [5].

Fisher et al. haben bei 23 Patienten zur Therapie instabiler Frakturen der thorakalen Wirbelsäule insgesamt 201 Pedikelschrauben unter Fluoroskopie- bzw. seitlicher Röntgenkontrolle eingebracht. Die postoperative Lagekontrolle mittels CT zeigte eine intrapedikuläre Lage von 133 Schrauben und damit eine thorakale Gesamtfehllagerate von 33,8 %. Die Fehllagerate nur für den Bereich zwischen Th5 und Th12 lag bei 28,2 % [24].

Gertzbein und Robbins haben ebenfalls an 40 Patienten die Präzision bei der Platzierung von Pedikelschrauben im thorakolumbalen Bereich (Th8 – S1) anhand postoperativer CT-Aufnahmen nachuntersucht. Für den Teilbereich zwischen Th8 und Th12 konnte aus ihren Unterlagen eine Fehllagerate von 29,6 % abgeleitet werden [25].

Guzey et al. brachten bei 24 Patienten zwischen Th2 und Th8 insgesamt 113 Pedikelschrauben konventionell ein. Auf den postoperativen CT-Aufnahmen befanden sich 23 Schrauben (20,3 %) nicht korrekt intrapedikulär [27].

Hart et al. haben die Genauigkeit konventioneller und navigierter Technik an acht Leichen untersucht. Dabei konnten sie keinen signifikanten Unterschied bei den Fehllageraten erheben. Für die konventionelle Technik verzeichneten sie eine thorakale Fehllagerate von 38 % [29].

Heary et al. haben in der thorakalen Wirbelsäule insgesamt 185 Pedikelschrauben gesetzt. Davon wurden 128 Schrauben computernavigiert eingebracht, 57 konventionell unter Durchleuchtungskontrolle. Die Lage der Pedikelschrauben wurde ebenfalls computertomographisch ausgewertet. Dafür haben Heary et al. jedoch ein anderes Einteilungssystem verwendet. Grad I beschreibt eine gut liegende Schraube, die sich vollständig im Pedikel und Wirbelkörper befindet. Bei Grad II verletzt die Schraube die laterale Pedikelkortikalis, befindet sich aber noch innerhalb des Pedikel-Rippen-Gelenk-Komplexes und die Schraubenspitze ist noch innerhalb des Wirbelkörpers. Bei Grad III durchdringt die Schraubenspitze den ventralen oder lateralen Wirbelkörperkortex. Grad IV beschreibt eine mediale

oder kaudale Fehllage. Grad V Schrauben gefährden durch die Perforation des Wirbelkörpers oder der Pedikelkortices Rückenmark, Nervenwurzeln oder große Gefäße und bedürfen deshalb einer sofortigen Entfernung und/oder Überarbeitung des Implantats. Zentral im Pedikel liegen somit Schrauben, die Grad I oder Grad III erfüllen. Aus ihren Aufzeichnungen ist das für 55 der 57 Pedikelschrauben der Fall. Somit ergibt sich bei Heary et al. für Th1 bis Th12 eine Fehllagerate von 3,5 % [30].

Kuntz et al. platzierten insgesamt 209 thorakale Pedikelschrauben. Ein post-operatives Kontroll-CT war nur bei 28 der 29 behandelten Patienten vorhanden, sodass letztendlich nur 199 Schrauben in ihrer Lage bewertet werden konnten. Kuntz et al. ermittelten 141 fehlplatzierte Pedikelschrauben. Dies entspricht bei 199 Schrauben einer Fehllagerate von 70,9 % [47].

Laine et al. haben in dieser Studie 100 thorakolumbale und lumbosakrale Fusions-operationen ausgewertet, die konventionell oder computernavigiert durchgeführt wurden. Konventionell wurden insgesamt 277 Pedikelschrauben zwischen Th8 und S1 gesetzt. Für den thorakalen Teilbereich konnte aus den Ausführungen eine Fehllagerate von 28,1 % errechnet werden [49].

Schnake et al. haben einen Vergleich zwischen CT-navigierten Pedikel-schrauben und konventionell gesetzten Pedikelschrauben durchgeführt. In der konventionellen Gruppe wurden 113 Schrauben zwischen Th2 und Th12 eingebracht. Anhand der CT-Kontrollen wurde eine Fehllagerate von 31,9 % ermittelt [72].

Vaccaro et al. haben in die Wirbelsäulen von fünf frisch gefrorenen Leichen 90 Pedikelschrauben zwischen Th4 und Th12 eingebracht. Die Computertomo-graphieaufnahmen zeigten, dass 37 Schrauben (41,1 %) nicht zentral intra-pedikulär lagen [79].

Die mittleren Fehllageraten in der thorakalen Wirbelsäule bewegen sich somit in der zitierten Literatur zwischen 3,5 und 70,9 %. In einer Metaanalyse zum Thema der Genauigkeit der Platzierung von Pedikelschrauben, die Kosmopoulos und Schizas durchgeführt haben, konnten sie für die thorakale Wirbelsäule durchschnittliche Fehllageraten zwischen 3,5 und 72,4 % aus der Literatur ermitteln [41]. Die von uns festgestellten Fehllageraten von 87,5 % mit Zielhilfe

und 77,1 % mit konventioneller Technik sind im Vergleich mit den von Kosmopoulos und Schizas ermittelten Fehllageraten bis 72,4 % noch höher.

Die Auswertung der Schraubenlagen in der vorliegenden Literatur erfolgte anhand von CT-Aufnahmen. In der Metaanalyse von Kosmopoulos und Schizas wurde nur in 58,5 % der Fälle die Schraubenlage postoperativ mittels CT analysiert. In den anderen Fällen erfolgte die Evaluation der Pedikelschraubenlage durch Röntgenaufnahmen (42,3 %) und direkte, makroskopische Inspektion (31,5 %) [41]. Dadurch sind die Ergebnisse von Kosmopoulos und Schizas durch die drei verschiedenen Lagebewertungsarten nicht mehr zu 100 Prozent mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie vergleichbar. Zusätzlich beruhen die von Kosmopoulos und Schizas angegeben Fehllageraten in der thorakalen Wirbelsäule nur auf den Angaben von drei Arbeitsgruppen.
In der selbst ausgewerteten Literatur wurde die Schraubenlage ausschließlich computertomographisch ausgewertet. Die in dieser Studie ermittelten thorakalen Fehllageraten von 87,5 und 77,1 % sind aufgrund der Auswertungsmethode nur mit den mittleren Fehllageraten der vorliegenden Literatur vergleichbar [5, 24, 25, 29, 30, 47, 49, 72, 79]. Hier wurde eine maximale Fehllagerate von Pedikelschrauben in der thorakalen Wirbelsäule in Höhe von 70,9 % ermittelt. Im Vergleich dazu schneiden die in dieser Studie erzielten Fehllageraten noch schlechter ab. Wie sich allerdings später noch zeigen wird, haben der Durchmesser der eingebrachten Pedikelschrauben und die Pedikelweiten einen entscheidenden Einfluss auf die Rate an Fehllagen. Zu Pedikelweiten und verwendeten Schraubendurchmessern wurden in den gesamten verglichenen Studien keine Angaben gemacht. In unseren Gruppen wurden Schrauben der Standardgrößen verwendet. Im Bereich der thorakalen Wirbelsäule betrug der Durchmesser der Schrauben 5,0 mm. In der Zielhilfe-Gruppe waren in 9 von 24 Fällen (37,5 %) und in der konventionellen Gruppe in 12 von 70 Fällen (17,1 %) die Pedikel kleiner als 5,0 mm. In diesen Fällen ließ sich eine Perforation der Pedikelkortikalis nicht verhindern und ein extrapedikulärer Verlauf wurde primär in Kauf genommen. Diese Umstände haben einen großen Teil zu den hohen Fehllageraten beigetragen. Es kann keine Aussage über die Pedikelweiten und Schraubendicken in der verglichenen Literatur gemacht werden. Vielleicht haben Heary et al. [30] Schraubendicken von 4,0 mm verwendet und sind zusätzlich auf

eher weite Pedikel getroffen, sodass es ihnen möglich war, eine thorakale Fehllagerate von 3,5 % zu erreichen. Der direkte Vergleich der thorakalen Fehllageraten bleibt aufgrund der thorakal doch stärker ausgeprägten anatomischen Variabilität der Größenverhältnisse schwierig.

Der Vergleich der beiden Gruppen der vorliegenden Studie zeigt, dass die im thorakalen Bereich mit der Zielhilfe erreichte Rate an zentralen Lagen (12,5 %) zwar um gut zehn Prozent geringer ausfiel als im vergleichbaren Bereich mit der konventionellen Methode (22,9 %), jedoch statistisch nicht signifikant verschieden war. Auch die Unterschiede hinsichtlich medialer Fehllagen (Zielhilfe 29,2 %, konventionelle Methode 14,3 %) oder lateraler Fehllagen (Zielhilfe 58,3 %, konventionelle Methode 61,4 %) zeigten keine signifikanten Unterschiede.

Betrachtet man neben diesen Ergebnissen noch die Charakteristika der Schraubenlagen, die mittels Box-and-Whiskers-Plots beschrieben wurden, so lagen die Pedikelschrauben in der thorakalen Wirbelsäule der Zielhilfe-Gruppe im Durchschnitt um 1,1 mm lateral, in der konventionellen Gruppe um 0,8 mm weiter lateral bei 1,9 mm. Die Standardabweichung in der Zielhilfe-Gruppe war mit 3,0 mm nur ein wenig geringer als in der konventionellen Gruppe mit 3,2 mm. Ebenfalls geringer fielen die maximalen Werte und damit verbunden die Spannweite sowie der Interquartilsabstand in der Zielhilfe-Gruppe geringer aus (Minimum Zielhilfe: medial 5,6 mm; Minimum konventionell: medial 6,9 mm; Maximum Zielhilfe: lateral 6,1 mm; Maximum konventionell: lateral 8,4 mm; Spannweite Zielhilfe: 11,7 mm; Spannweite konventionell: 15,3 mm; Interquartilsabstand Zielhilfe: 3,7 mm; Interquartilsabstand konventionell: 4,6 mm).

Nachdem sich die Fehllageraten statistisch nicht signifikant voneinander unterschieden haben, zeigen die Ergebnisse der deskriptiven Statistik mittels Box-and-Whiskers-Plots durch die geringere Schwankungsbreite der medialen und lateralen Fehllagen eine marginal höhere Präzision der Zielhilfe bei der Platzierung von Pedikelschrauben in der thorakalen Wirbelsäule.

Im Bereich der **lumbalen** Wirbelsäule (L1 – L5) konnten für die Zielhilfe-Gruppe eine Fehllagerate von 21,9 % und für die konventionelle Gruppe von 19,4 % erzielt werden.

Gertzbein und Robbins haben in ihrer Arbeit die Genauigkeit der Platzierung von Pedikelschrauben zwischen Th8 und S1 ermittelt. Für den lumbalen Abschnitt zwischen L1 und L5 konnte aus der Veröffentlichung eine Fehllagerate von 28,7 % berechnet werden [25].
Haaker et al. untersuchten die Lage von Pedikelschrauben bei lumbalen Wirbelsäulenfusionen nach Implantatentfernung mittels CT- oder MRT-Aufnahmen. Es wurde die Lage von 141 Schrauben zwischen L3 und S1 ausgewertet. Für den Bereich L3 bis L5 ergibt sich aus den Unterlagen eine Fehllagerate von 11,8 % [28].
Jerosch et al. brachten zwischen L2 und S1 131 Pedikelschrauben ein. Davon wurden 8 Schrauben in S1 lateral verankert. Die Auswertung erfolgte durch postoperative CT-Aufnahmen deshalb nur für die 123 „richtigen“ Pedikelschrauben. Von diesen 123 Schrauben lagen 49 nicht intrapedikulär. Der Anteil für L1 bis L5 konnte aus den Angaben von Jerosch et al. nicht ermittelt werden. Für L2 bis S1 ergibt sich eine Fehllagerate in Höhe von 39,9 % [34].
Laine et al. brachten in einer Studie zur Platzierung von Pedikelschrauben mittels Computernavigation im Bereich der lumbalen Wirbelsäule auch Schrauben nach der konventionellen Technik ein. Für den Bereich von L1 bis S1 erhielt er bei 35 Pedikelschrauben eine Fehllagerate von 14,3 % [48].
Im Jahr 2000 führten Laine et al. eine randomisierte Vergleichsstudie von Computernavigation gegenüber konventioneller Technik auch unter Einschluss der thorakalen Wirbelsäule durch. Zwischen L1 und L5 wurden 192 Schrauben gesetzt, 166 intrapedikulär. Für den lumbalen Teilbereich ergab sich somit eine Fehllagerate von 13,5 % [49].
Merloz et al. führten ebenfalls einen Methodenvergleich zwischen CT-Navigation und konventioneller Technik durch. Konventionell wurden bei 26 Patienten 52 Pedikelschrauben im Bereich zwischen Th10 und L5 eingebracht und mittels CT auf ihre Lage ausgewertet. Für den Teilbereich L1 bis L5 konnte aus den Angaben eine Fehllagerate von 40,6 % berechnet werden [56].

Odgers et al. untersuchten bei 65 Patienten die Lage von 238 konventionell eingebrachten Pedikelschrauben im Bereich von Th11 bis L5. Zum besseren Vergleich errechnete sich für L1 bis L5 eine lumbale Fehllagerate von 9,0 % [60].
Reichle et al. führten an Wirbelsäulenpräparaten einen Vergleich von CT-Navigation, Fluoronavigation und konventioneller Technik zur Platzierung von Pedikelschrauben durch. Im untersuchten Bereich von Th12 bis L4 erhielten sie für die konventionelle Technik eine Fehllagerate von 28,0 %. Es konnten keine getrennten Fehllagen für L1 bis L4 berechnet werden [67].

Kosmopoulos und Schizas konnten in ihrer Metaanalyse in vivo-Fehllageraten im Bereich der lumbalen Wirbelsäule von 2,5 bis 40,0 % ermitteln [41].
In der uns vorliegenden Literatur schwankt die Fehllagerate lumbal zwischen 9,9 und 40,6 %. Die Fehllageraten beider Vergleichsgruppen rangieren innerhalb dieses Bereiches und erschienen damit durchaus plausibel.
Mit der Zielhilfe konnten 78,1 % der Pedikelschrauben zentral platziert werden, konventionell waren es 80,6 %. Das entspricht einer Fehllagerate von 21,9 % für die Zielhilfe-Gruppe und 19,4 % für die konventionelle Gruppe. Die Fehllagen der Zielhilfe-Gruppe verteilten sich zu 14,3 % auf mediale und zu 85,7 % auf laterale Fehllagen. In der konventionellen Gruppe waren es mediale Fehllagen zu 29,2 %, laterale Fehllagen zu 64,6 %, kraniale Fehllagen zu 4,2 % und zu 2,1 % kaudale Fehllagen. Alle diese Unterschiede zeigten sich jedoch nicht signifikant.

Die deskriptive Statistik des Box-and-Whiskers-Plots zeigte folgende Ergebnisse: Lumbal lag die Schraube der Zielhilfe-Gruppe durchschnittlich um 0,5 mm lateral, in der konventionellen Gruppe hingegen um 0,2 mm weniger bei nur 0,3 mm lateral. Auch die Standardabweichung fiel, wenn auch nur gering, mit 1,3 mm in der Zielhilfe-Gruppe und 1,2 mm in der konventionellen Gruppe, dort etwas kleiner aus. Der Interquartilsabstand war bei beiden Gruppen 0,0 mm. Einzig und allein die Spannweite fiel in der Zielhilfe-Gruppe mit 6,0 mm, wie thorakal, geringer aus als in der konventionellen Gruppe mit 9,9 mm.

Sowohl die Ergebnisse der prozentualen Verteilung als auch die Daten der Box-and-Whiskers-Plots enthalten keinen Hinweis auf die eventuelle Überlegenheit einer der beiden Methoden. Das bedeutet, dass die Zielhilfe in der lumbalen

Wirbelsäule keine höhere Präzision bei der Platzierung von Pedikelschrauben erzielen kann. Die Studie zeigt für beide Methoden lumbal gleichwertige Ergebnisse.

4.3.4 Pedikelweiten

Im Zuge der Auswertung der Schraubenlagen in der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule für die Zielhilfe-Gruppe und die konventionelle Gruppe wurden auch eingehender die dazugehörigen Pedikelweiten der entsprechenden Wirbelhöhen mitbestimmt, um die Lage der Pedikelschrauben durch das Verhältnis der Schraubendicke zur jeweiligen Pedikelweite weiter analysieren zu können.

In den vergangenen Jahren haben viele Arbeitsgruppen im Rahmen morphologischer Vermessungen menschlicher Wirbelsäulen auch die Pedikelweite bestimmt [3, 7, 13, 16, 18, 32, 42, 44, 55, 57, 61, 62, 74, 77, 78, 86, 87].
Attar et al. bestimmten anhand von 20 Leichen die anatomischen Verhältnisse im Bereich der lumbalen Wirbelsäule. Dabei erhielten sie für die Pedikelweite folgende Durchschnittswerte: L1 8,1 mm, L2 8,7 mm, L3 10,5 mm, L4 12,7 mm, L5 17,2 mm [3].
Berry et al. haben an 30 Wirbelsäulen aus der Skelettsammlung des „Cleveland Museum of Natural History“ drei thorakale Wirbel (Th2, Th7 und Th12) sowie alle fünf lumbale Wirbel direkt vermessen. Die Pedikelweiten hat er jeweils für den rechten und linken Pedikel getrennt mit Standardabweichung angegeben. Zur besseren Vergleichbarkeit werden hier die zusammengerechneten Ergebnisse wiedergegeben: Th2 6,2 mm, Th7 5,0 mm, Th12 7,7 mm, L1 7,0 mm, L2 7,5 mm, L3 9,2 mm, L4 10,4 mm, L5 10,7 mm [7].
Ebraheim et al. haben an 50 Leichen u.a. auch die Pedikelweiten der lumbalen Wirbel direkt vermessen und für Männer und Frauen getrennt aufgetragen. Im Folgenden sollen wieder zur besseren Vergleichbarkeit die gemittelten Werte dargestellt werden: L1 7,5 mm, L2 8,2 mm, L3 9,8 mm, L4 12,7 mm, L5 18,0 mm [16].
Weiterhin haben Ebraheim et al. anhand von 43 Leichen die Pedikelweiten der thorakalen Wirbel, jeweils getrennt für Männer und Frauen, bestimmt. Wie für die lumbalen Pedikel sollen auch hier die gemittelten Werte wiedergegeben werden:

Th1 9,6 mm, Th2 6,4 mm, Th3 4,7 mm, Th4 3,9 mm, Th5 4,3 mm, Th6 3,8 mm, Th7 4,6 mm, Th8 4,8 mm, Th9 5,4 mm, Th10 5,8 mm, Th11 8,6 mm und Th12 8,7 mm [18].

Husted et al. bestimmten die anatomischen Verhältnisse im Bereich der thorakalen Wirbelsäule durch CT-basierte Vermessungen von sechs Leichen. Ihre Ergebnisse veröffentlichten sie jeweils seitengetrennt. Auch hier soll zur besseren Vergleichbarkeit die für jeden Wirbelkörper gemittelten Pedikelweiten wiedergegeben werden: Th2 7,5 mm, Th3 5,9 mm, Th4 5,6 mm, Th5 5,5 mm, Th6 5,6 mm, Th7 5,9 mm, Th8 5,9 mm, Th9 6,2 mm, Th10 6,6 mm, Th11 7,3 mm, Th12 8,3 mm [32].

Kothe et al. haben mittels Dünnschnitten von 18 thorakalen Wirbeln ebenfalls u.a. die Pedikelweite für Th2, Th6, Th7, Th10 und Th11 bestimmt und dabei folgende Werte erhalten: Th2 6,9 mm, Th6 3,8 mm, Th7 3,9 mm, Th10 5,6 mm und Th11 8,1 mm [42].

McLain et al. haben die Wirbel Th1 bis Th6 von 18 Leichen vermessen und die nachfolgenden Pedikelweiten erhoben: Th1 7,56 mm, Th2 7,37 mm, Th3 6,17 mm, Th4 5,32 mm, Th5 5,1 mm, Th6 5,38 mm [55].

Olsewski et al. haben an den lumbalen Wirbeln von Leichen verschiedene direkte und radiologische Messungen durchgeführt. Dabei wurden die Pedikelweiten nur direkt oder auf Röntgenbildern bestimmt, jedoch nie auf CT-Aufnahmen. Hier sollen die direkt gemessenen Werte angegeben werden. Diese haben Olsewski et al. für Männer und Frauen getrennt bestimmt. Im Folgenden handelt es sich aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit um die gemittelten Werte: L1 8,6 mm, L2 8,8 mm, L3 10,7 mm, L4 13,6 mm und L5 19,8 mm [61].

Panjabi et al. haben ebenfalls an den Wirbelsäulen von 12 Leichen die Wirbel direkt vermessen und dabei die Pedikelweiten für jeweils rechts und links getrennt angegeben. Die folgenden thorakalen Pedikelweiten entsprechen den Mittelwerten: Th1 8,5 mm, Th2 8,2 mm, Th3 6,8 mm, Th4 6,3 mm, Th5 6,0 mm, Th6 6,0 mm, Th7 5,9 mm, Th8 6,7 mm, Th9 7,7 mm, Th10 9,0 mm, Th11 9,8 mm und Th12 8,7 mm [62].

Schwarzenbach et al. haben die Genauigkeit der computer-assistierten Implantation von Pedikelschrauben bei 29 Patienten untersucht und dabei die Pedikelweiten bestimmt: Th11 10,0 mm, Th12 8,2 mm, L1 6,3 mm, L2 7,1 mm, L3 9,0 mm, L4 9,5 mm, L5 12,4 mm, S1 16,4 mm, S2 20,5 mm [73].

Scoles et al. haben, wie auch Berry et al., Messungen an Wirbeln von 50 Skeletten aus der Hamann-Todd Osteologischen Sammlung des „Cleveland Museum of Natural History“ durchgeführt und dabei ebenfalls eine Trennung nach Geschlechtern beibehalten. Hier werden die zusammengerechneten Werte der acht Wirbelkörperhöhen angeführt: Th1 6,9 mm, Th3 3,7 mm, Th6 3,3 mm, Th9 4,0 mm, Th12 7,3 mm, L1 7,4 mm, L3 8,5 mm, L5 10,0 mm [74].
Ugur et al. haben Kalipermessungen der thorakalen Pedikel von 20 Leichen durchgeführt. Dabei konnten sie die folgende Pedikelweiten ermitteln: Th1 6,5 mm, Th2 5,9 mm, Th3 5,1 mm, Th4 4,5 mm, Th5 4,6 mm, Th6 4,9 mm, Th7 5,4 mm, Th8 5,6 mm, Th9 6,1 mm, Th10 6,2 mm, Th11 7,4 mm, Th12 7,6 mm [77].
Vaccaro et al. haben an 17 Leichen morphologischen Messungen durchgeführt und dabei u.a. direkt die Pedikelweiten für Th4 bis Th12 bestimmt: Th4 4,5 mm, Th5 4,4 mm, Th6 4,6 mm, Th7 4,9 mm, Th8 5,1 mm, Th9 5,8 mm, Th10 6,7 mm, Th11 8,0 mm, Th12 7,8 mm [78].
Zindrick et al. haben 2.905 Pedikel mittels Röntgen- und CT-Aufnahmen vermessen und dabei die folgenden Werte erhalten: Th1 7,9 mm, Th2 7,0 mm, Th3 5,6 mm, Th4 4,7 mm, Th5 4,5 mm, Th6 5,2 mm, Th7 5,3 mm, Th8 5,9 mm, Th9 6,1 mm, Th10 6,3 mm, Th11 7,8 mm, Th12 7,1 mm, L1 8,7 mm, L2 8,9 mm, L3 10,3 mm, L4 12,9 mm, L5 18,0 mm [87].

Fasst man die eben dargestellten Daten zum Vergleich mit unseren Ergebnissen zusammen, so lagen die in der Literatur angegebenen mittleren Pedikelweiten auf Höhe von Th5 zwischen 4,3 bis 6,0 mm. Unsere Ergebnisse mit Durchschnittswerten von 5,4 mm in der Zielhilfe-Gruppe (n = 4) und 5,6 mm in der konventionellen Gruppe (n = 10) liegen innerhalb dieser Spannweite. Bei Th6 bewegten sich die mittleren Pedikelweiten zwischen 3,3 und 6,0 mm. Auch hier haben wir ähnliche Ergebnisse mit 4,9 mm in der Zielhilfe- (n = 2) und 5,4 mm in der konventionellen Gruppe (n = 4). Auf Höhe Th7 befinden sich unsere gemessenen Pedikelweiten mit durchschnittlich 5,5 mm (Zielhilfe, n = 2) und 5,8 mm (konventionell, n = 10) innerhalb der Literaturangaben mit im Mittel 3,9 bis 5,9 mm. Die Mittelwerte für Th8 mit 4,8 bis 6,7 mm enthalten die Werte der Zielhilfe- und der konventionellen Gruppe, mit für beide Gruppen 5,1 mm (Zielhilfe, n = 6; konventionell, n = 4). Die Weiten der Pedikel für Th9 werden in der Literatur mit Mittelwerten von 4,0 bis 7,7 mm angegeben. Auch hier liegen unsere Werte mit

6,5 mm in der Zielhilfe-Gruppe (n = 6) und 6,1 mm in der konventionellen Gruppe (n = 8) innerhalb dieser Grenzen. Auf Höhe von Th10 werden Durchschnittswerte von 5,6 bis 9,0 mm beschrieben. Hier liegt der Wert für die Pedikelweite der Zielhilfe-Gruppe mit im Mittel 5,5 mm (n = 2) nur ganz knapp unter, der Wert der konventionellen Gruppe mit 6,3 mm (n = 6) innerhalb dieses Bereichs. Bei Th11 mit angegebenen mittleren Werten zwischen 7,3 mm und 10,0 mm, fallen vor allem die Pedikelweiten in der Zielhilfe-Gruppe mit im Durchschnitt 5,2 mm (n = 2) deutlich geringer aus, die Pedikelweiten in der konventionellen Gruppe liegen mit durchschnittlich 7,6 mm (n = 14) oberhalb des unteren Grenzwerts. Auf Höhe von Th12 wurden nur in der konventionellen Gruppe Pedikelschrauben gesetzt, sodass auch nur in dieser Gruppe die Pedikelweiten erhoben wurden. Mit einem Mittelwert von 8,6 mm (n = 14) entspricht dieser den Angaben in der Literatur, in welcher mittlere Werte zwischen 7,3 und 8,7 mm angeben werden.
Die Pedikel auf Höhe von L1, in der Literatur mit Weiten zwischen 6,3 und 8,7 mm beschrieben, waren in der Zielhilfe-Gruppe nur 3,9 mm weit (n = 2), in der konventionellen Gruppe 6,4 mm (n = 16) weit. Bei L2 liegen die gemessenen Werte für die Pedikelweiten mit einem Mittelwert in Höhe von 7,6 mm in der Zielhilfe-Gruppe (n = 2) und 7,3 mm in der konventionellen Gruppe (n = 32) wieder beide innerhalb der Grenzen der Vergleichsliteratur mit 7,1 und 8,9 mm. Für L3 werden Weiten zwischen 8,2 und 10,7 mm angegeben. Dem entsprechen unsere Werte mit 10,0 mm (Zielhilfe, n = 4) und 9,1 mm (konventionell, n = 20). Auch die mittleren Pedikelweiten von L4 mit 12,4 mm in der Zielhilfe-Gruppe (n = 16) und 11,3 mm in der konventionellen Gruppe (n = 70) sind mit den Werten in der Literatur mit 9,5 und 13,6 mm vergleichbar. Und auf Höhe von L5 mit Durchschnittswerten von 10,0 bis 19,8 mm liegen unsere Werte mit 17,3 (Zielhilfe, n = 8) und 15,8 mm (konventionell, n = 110) ebenfalls im angegeben Intervall.

Der Vergleich mit der Literatur zeigt weitgehende Übereinstimmung der aktuell erhobenen Ergebnisse mit den dort angegebenen Mittelwerten für Pedikelweiten. Nur im Bereich der unteren thorakalen Wirbelsäule (Th10 und Th11) als auch noch zu Beginn der lumbalen Wirbelsäule (L1) liegen die gemittelten Werte in der Zielhilfe-Gruppe deutlich unterhalb der Pedikelweiten der Literatur.
Im Vergleich der Pedikelweiten zwischen der Zielhilfe- und der konventionellen Gruppe zeigte sich für die thorakalen Pedikelweiten ein statistisch signifikanter

Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Die thorakalen Pedikel der Zielhilfe-Gruppe waren signifikant kleiner als die thorakalen Pedikel der konventionellen Gruppe. Diesen signifikanten Unterschied der Ergebnisse veranschaulichte vor allem die Box-and-Whiskers-Plot-Darstellung der thorakalen Pedikelweiten der beiden Gruppen in der Gegenüberstellung mit dem im Bereich der kleineren Pedikelweiten liegenden Median als auch Mittelwert und vor allem dem kleinen Interquartilsabstand sowie der geringen Spannweite in der Zielhilfe-Gruppe.

In der Zielhilfe-Gruppe wurden thorakal allerdings auch nur 24 Pedikelschrauben gesetzt und demzufolge auch nur die Weiten dieser 24 Pedikel vermessen. Im Gegensatz dazu konnten in der konventionellen Gruppe die Weiten für insgesamt 70 Pedikel bestimmt werden. Für Th6, Th7, Th10 und Th11 der Zielhilfe-Gruppe wurde der Mittelwert jeweils nur aus den Daten von zwei Pedikeln errechnet, da auf jeder dieser Wirbelhöhen nur ein Wirbelkörper instrumentiert wurde. Dadurch stehen die Ergebnisse nicht auf einer breiten Basis.

Für die lumbalen Pedikelweiten zeigte sich zwischen der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe kein signifikanter Unterschied. Die Darstellung der Ergebnisse in Form des Box-and-Whiskers-Plots zeigte bereits im Vorfeld die ähnliche Lage der Ergebnisse. Wie schon thorakal war auch lumbal die Anzahl der gemessenen Pedikelweiten in der Zielhilfe-Gruppe mit einer Anzahl von 32 gering. Für L1 und L2 konnten jeweils nur zwei Pedikelweiten gemittelt werden.

Durch weitere, mit der Zielhilfe im Bereich der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule eingebrachten Pedikelschrauben könnte sowohl die Aussagekraft der Ergebnisse der Schraubenlagen als auch der Pedikelweiten verbessert werden.

4.3.5 Pedikelweiten, Schraubengrößen und Fehllagen

In beiden Gruppen konnten wir eine Abhängigkeit der Schraubendicke von der Pedikelweite feststellen. In der Zielhilfe-Gruppe wie auch in der konventionellen Gruppe war diese Abhängigkeit mit $p < 10^{-6}$ hochsignifikant gesichert.
Die statistischen Berechnungen belegen den weit verbreiteten Usus, den Durchmesser der Pedikelschrauben den vorgegebenen Bedingungen anzupassen, um

nicht durch eine unangepasste Schraubengröße eine Pedikelperforation zu provozieren.
Schon Zindrick et al. vertraten 1987 die Ansicht, dass bei der Wahl der Schraubendicke die Pedikelweite nicht außer Acht gelassen werden sollte [87].

Weiter wurden die ermittelten Fehllageraten auf Abhängigkeit von der Pedikelweite untersucht. In der Zielhilfe-Gruppe war diese Abhängigkeit zwischen Fehllage und Pedikelweite mit $p > 0,06$ gerade nicht mehr gegeben. In der konventionellen Gruppe mit $p < 10^{-6}$ gegeben.

Küper hat in seiner Arbeit zwei Navigationssysteme zur Platzierung von Pedikelschrauben verglichen und im Rahmen dieses Vergleiches die Ergebnisse u.a. auch auf eine Abhängigkeit der Fehllagen von der Pedikelweite untersucht. Er konnte keine solche Abhängigkeit nachweisen [46].
Reichle et al. haben in einer in vitro-Untersuchung zur Einbringung von Pedikelschrauben konventionelle Operationstechnik mit CT-Navigation und fluoroskopischer Navigation verglichen und dabei ebenfalls die Perforationsrate in Beziehung zum Schraubendurchmesser und der Pedikelweite gesetzt. Dabei konnten sie eine signifikante Korrelation der Fehllagen zur Pedikelweite nachweisen [67]. Hart et al. konnten in einer neueren Studie zum Vergleich konventioneller Technik und Navigation ebenfalls einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Pedikelweite und Fehllage der Pedikelschrauben feststellen [29].
Reichle et al. sind der Auffassung, dass die Pedikelweite den wichtigsten Einfluss auf die Perforation von Schrauben durch die Pedikelkortikalis und somit auf die Rate von Fehllagen hat [67].

Diese Abhängigkeit der Fehllagerate von der Pedikelweite konnte in dieser Arbeit nur in der konventionellen Gruppe nachgewiesen werden. In der Zielhilfe-Gruppe bestand diese Abhängigkeit knapp nicht mehr. Das könnte bedeuten, dass die Zielhilfe aufgrund ihrer Genauigkeit die Pedikelschrauben unabhängig von der Pedikelweite exakt intrapedikulär platzieren kann. In diesem Fall, wenn bei einer genauen Platzierung die Fehllagerate unabhängig von der Pedikelweite wird, müsste bei den Navigationssystemen, die eine noch höhere Präzision als die

Zielhilfe bieten, ebenfalls keine Abhängigkeit bestehen. Wie Reichle et al. in ihrer soeben zitierten Studie [67] zeigen konnten, besteht auch bei den Navigationsmethoden diese Abhängigkeit zwischen Fehllagerate und Pedikelweite.
Aus diesem Grund nehmen wir an, dass auch in der Zielhilfe-Gruppe diese Abhängigkeit besteht und sehen die fehlende statistische Signifikanz in der geringen Fallzahl in der Zielhilfe-Gruppe begründet.

Laut Odgers et al. ist dieses Verhältnis auch einer von 4 Punkten, die dazu führen, dass eine Pedikelschraube nicht erfolgreich eingebracht werden kann. Neben einem falschen Schraubeneintrittspunkt, einem falschen Einbringwinkel, einem Durchdringen des ventralen Wirbelkörpers liegt eben ein weiterer Grund in einer fehlenden Anpassung der Schraubendicke an die Pedikelweite [60].
Reichle et al. haben ebenso Faktoren definiert, durch die eine regelhafte intrapedikuläre Lage der Schraube schwer zu erreichen ist. „Zum einen betragen die gängigen Schraubendurchmesser 5 – 7 mm, die Pedikel der unteren BWS und LWS haben einen minimalen Durchmesser von 6 – 18 mm, wodurch oft nur sehr wenig Spielraum für eine exakte Platzierung bleibt. Zum anderen sieht der Operateur nur die Eintrittsstelle der Schraube exakt. Der Schraubenverlauf muss im Bildwandler alternierend a.-p. und seitlich beurteilt werden. Dabei ist insbesondere der Schrauben- und Pedikelverlauf in der transversalen Ebene intraoperativ kaum beurteilbar“ [67, S. 368].
Auch Weinstein et al. weisen darauf hin, dass angemessene Schraubendicken für den Pedikel zumindest teilweise für die nicht signifikanten Unterschiede der Erfolgsraten der verschiedenen Wirbelhöhen verantwortlich sind. Schmale Pedikel mögen von Haus aus eine erfolgreiche Schraubenfixierung verhindern, auch wenn Schrauben mit einem geringen Durchmesser von nur 4,5 mm verwendet werden, besonders zwischen T11 und L2, wo von Pedikelweiten kleiner als 4,5 mm berichtet wurde [80].

In der Zielhilfe-Gruppe lag das Verhältnis von Schraubendicke zu Pedikelweite für Th5 bis Th7 über 100 %. Damit bestand noch nicht einmal die theoretische Chance auf eine strenge intrapedikuläre Lage. Die Schrauben mussten auf diesen Wirbelhöhen die Pedikelkortikalis perforieren.

Auch Scoles et al. kamen zu dem Schluss, dass bei der Fixierung durch Pedikelschrauben in der thorakalen Wirbelsäule mit einem hohen Auftreten von Verletzungen der Pedikelkortikalis gerechnet werden muss, auch wenn Schrauben mit einem kleineren Durchmesser verwendet werden [74].

Zwischen Th8 und Th11 fiel das Verhältnis unter die 100 %, blieb mit über 90 % dennoch sehr hoch. Im Durchschnitt betrug das Verhältnis von Schraubendurchmesser zu Pedikelweite in der thorakalen Wirbelsäule 90,9 %. In der konventionellen Gruppe lag das Verhältnis von Schraubendurchmesser zu Pedikelweite in der thorakalen Wirbelsäule mit 74,6 % um gut 15 % niedriger als in der Zielhilfe-Gruppe.

Schnake et al. geben in ihrer Vergleichsstudie von konventioneller und CT-navigierter Platzierung von thorakalen Pedikelschrauben ein ähnliches Ergebnis an. Bei ihnen betrug der durchschnittliche Schraubendurchmesser 75,1 % des Pedikeldurchmessers. Sie haben keinen Vergleich des Verhältnisses zwischen ihren beiden Gruppen durchgeführt. Bei diesen Werten konnten sie allerdings eine statistisch signifikante Reduzierung der Fehllageraten mit der CT-Navigation nachweisen [72].

Im Bereich der lumbalen Wirbelsäule konnten wir im Mittel keinen statistisch signifikanten Unterschied der Verhältnisse der beiden Gruppen (Zielhilfe-Gruppe 51,2 %, konventionelle Gruppe 52,8 %) feststellen.

Reichle et al. sind der Überzeugung, dass der Schraubendurchmesser und der minimale Pedikeldurchmesser zukünftig in allen Arbeiten zur Perforationsrate von Pedikelschrauben und zur Effizienz von Navigationssystemen angegeben werden sollten. Aufgrund ihrer Ergebnisse stellen Schraubendicke und Pedikelweite entscheidende Faktoren im Hinblick auf die Perforationsrate von Pedikelschrauben dar [67].

4.4 Schlussfolgerung

Mit unserer Studie zum Vergleich der Platzierung von Pedikelschrauben in der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule mit einer neuen mechanischen Zielhilfe gegenüber der konventionellen Methode lässt sich auf den ersten Blick ein Vorteil der Zielhilfe nicht belegen. Mit beiden Methoden wurde ein gutes klinisches Ergebnis erzielt. Die Zielhilfe konnte keine Reduzierung der Fehllageraten in der thorakalen oder lumbalen Wirbelsäule bewirken. Die thorakale Fehllagerate als auch die Fehllagerate innerhalb der lumbalen Untergruppen haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden.

Die thorakalen Untergruppen zeigten sich allerdings insofern nicht einheitlich, als sich die Pedikelweiten der Zielhilfe-Gruppe und der konventionellen Gruppe statistisch signifikant unterschieden haben. Die thorakalen Pedikel der Zielhilfe-Gruppe waren kleiner als in der konventionellen Gruppe. Für die lumbalen Untergruppen ließ sich kein signifikanter Unterschied mehr nachweisen, hier erwiesen sich die Pedikelweiten in beiden Gruppen von gleicher Größe.
Bei in beiden Gruppen verwendeten, vergleichbaren Schraubendurchmessern fiel deshalb das Verhältnis von Schraubendicke zu Pedikelweite für die Zielhilfe-Gruppe thorakal signifikant ungünstiger aus.

Dennoch wurde in der Zielhilfe-Gruppe im Bereich der thorakalen Wirbelsäule eine Fehllagerate erreicht, die nicht signifikant schlechter ausfiel als die in der konventionellen Gruppe. Und das obwohl die Schrauben in der konventionellen Gruppe quasi mehr Platz im Pedikel hatten, um streng intrapedikulär platziert zu werden. Die Zielhilfe hat somit bei signifikant kleineren thorakalen Pedikelweiten die Schrauben mit keiner signifikant anderen Fehllagerate eingebracht.
Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Pedikelschrauben im Bereich der thorakalen Wirbelsäule mit der Zielhilfe besser platziert werden konnten als mit der konventionellen Technik.

Im Bereich der lumbalen Wirbelsäule war für beide Gruppen das Verhältnis von Schraubengröße und Pedikelweite statistisch gleich. Die Fehllageraten in beiden Gruppen fielen mit den oben erwähnten ca. 20 % statistisch ebenso gleich aus.

Damit bietet die Zielhilfe für die Platzierung von Pedikelschrauben in der lumbalen Wirbelsäule keinen Vorteil.

Die eingehende Analyse der Fehllagen im Hinblick auf die Pedikelweite und das Verhältnis aus Schraubendicke und Pedikelweite anhand der postoperativen CT-Aufnahmen belegt eindrücklich, welch signifikanten Einfluss Pedikelweite und Schraubendicke auf die Raten an Fehllagen haben. Die Berücksichtigung des Durchmessers der Pedikelschraube in Abhängigkeit von der Weite des Pedikels ist zur Vermeidung von Pedikelperforationen unabdingbar. Dabei werden sich jedoch abhängig vom Wirbelsäulenabschnitt Perforationen nicht immer vermeiden lassen. Unsere Messungen, wie auch die anderer Autoren, zeigen die vor allem in der thorakalen Wirbelsäule doch teilweise recht engen Verhältnisse mit Pedikelweiten von mitunter weniger als 4 mm. Bei Schraubengrößen ab 4,0 mm, die kommerziell auf den Operationssieben vorhanden sind, ist es unmöglich Perforationen zu vermeiden. Schrauben mit kleineren Durchmessern anzubieten stellt keine direkte Alternative dar. Der Durchmesser der Schraube ist für ihre Stabilität verantwortlich und bei Schraubendicken von weniger als 5,0 mm steigt das Risiko von Schraubenbrüchen und damit Stabilitätsverlusten [44]. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, ob im Bereich der thorakalen Wirbelsäule mit ihren engen anatomischen Verhältnissen nicht primär ein extrapedikulärer Verlauf geplant werden sollte. Hier sind in der Literatur Ansätze einer primär extrapedikulären Fixierung unter Beteiligung der Wirbel-Rippen-Gelenke mit guten Ergebnissen beschrieben [15, 31, 58, 83].

Aufgrund der an einer noch recht kleinen Patientenanzahl in der Zielhilfe-Gruppe erhaltenen Ergebnisse, wäre es wünschenswert diese bei weiteren Patienten zu überprüfen. Dabei sollte in Zukunft mit Systemen gearbeitet werden, die kanülierte Schrauben verwenden. Dann besteht, wie bereits oben erwähnt, die Chance auch die Pedikelschraube geführt einzubringen. So ist es eventuell möglich ein besseres Ergebnis mit der Zielhilfe im Vergleich zu der konventionellen Technik zu erzielen.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde über die ersten klinischen Erfahrungen mit einer mechanischen Zielhilfe beim Platzieren von Pedikelschrauben in der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule berichtet.
Sie wurde entwickelt, um auf eine einfache Art und Weise die Präzision der Schraubenimplantation an der Wirbelsäule zu erhöhen. Dabei sollte sie mit möglichst wenig Strahlenbelastung für den Patienten und das Personal auskommen und vor allem kostengünstig sein. Im Vergleich mit der konventionellen Technik wurde untersucht, ob die Zielhilfe thorakal und lumbal ein besseres Ergebnis erzielen kann.

In der Neurochirurgischen Abteilung der Chirurgischen Klinik des Kantonsspitals Winterthur, Schweiz, wurden zwischen dem 01. November 2004 und 31. Mai 2007 15 Patienten mit der Zielhilfe und 88 Patienten nach der konventionellen Methode operiert. Postoperative Computertomographieaufnahmen zur Lagekontrolle der eingebrachten Pedikelschrauben waren für die Zielhilfe von 14 Patienten, für die konventionelle Technik von 83 Patienten vorhanden. Zur Bestimmung des klinischen Ergebnisses wurde von diesen Patienten anhand der Krankenakten der neurologische Status prä- und postoperativ miteinander verglichen. Die erzielten Schraubenlagen wurden anhand axialer, koronarer und sagittaler Rekonstruktionen der Computertomographieaufnahmen ausgewertet. Jede nicht allseits von Pedikelkortikalis umgebene Schraube wurde als fehlplatziert gewertet. Das Ausmaß medialer, lateraler, kranialer und kaudaler Fehllagen wurde jeweils in Millimetern bestimmt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien erfolgte die Einteilung der medialen und lateralen Fehllagen in Gruppen von je zwei Millimetern. Zur weiteren Analyse der Schraubenlagen wurden die Pedikelweiten bestimmt, um damit das Verhältnis von Schraubendurchmesser und Pedikelweite berechnen zu können. Die Bestimmung der Pedikelweiten erfolgte für die thorakalen Pedikel anhand der koronaren und für die lumbalen Pedikel anhand der axialen Rekonstruktionen. Neben dieser weitergehenden Analyse der Schraubenlagen wurden Schraubengrößen und Fehllagen auf Abhängigkeit von der Pedikelweite untersucht.

Die eingebrachten Pedikelschrauben haben bei keinem Patienten der beiden Gruppen zu neuen neurologischen Komplikationen geführt. Die mit der Zielhilfe und der konventionellen Methode erzielten Fehllageraten haben sich in der vorliegenden Arbeit in der thorakalen und der lumbalen Wirbelsäule nicht signifikant voneinander unterschieden. Allerdings waren die thorakalen Pedikel in der Zielhilfe-Gruppe signifikant kleiner und auch das Verhältnis von Schraubendicke zu Pedikelweite fiel in der Zielhilfe-Gruppe signifikant ungünstiger aus als in der konventionellen Gruppe.
Dies lässt den vorsichtigen Schluss zu, dass die Zielhilfe unter gleichen Ausgangsbedingungen zumindest im Bereich der thorakalen Wirbelsäule mit ihren anspruchsvollen anatomischen Verhältnissen tatsächlich ein einfaches Instrument zur Optimierung der Schraubenlage sein könnte.

In beiden Gruppen konnte eine Abhängigkeit der Schraubengröße von der Pedikelweite nachgewiesen werden. Eine Abhängigkeit der Fehllagen von der Pedikelweite war in der konventionellen Gruppe hoch signifikant vorhanden, in der Zielhilfe-Gruppe war diese Abhängigkeit gerade nicht mehr signifikant.

Die Analyse der Schraubenlagen unter Einbeziehung der Pedikelweiten und Schraubendicken zeigte den signifikanten Einfluss von Pedikelweite und Schraubendicke auf die Fehllagerate. Zur Vermeidung von Fehllagen ist es unbedingt notwendig den Durchmesser der Schrauben in Abhängigkeit von der Weite des Pedikels zu wählen. Mit den kommerziell angebotenen Schraubendicken ist es aber vor allem in der thorakalen Wirbelsäule mit teilweise sehr schmalen Pedikeln nicht immer möglich, Fehllagen zu vermeiden.

Die Ergebnisse für die Zielhilfe wurden an einer recht kleinen Anzahl an Patienten erhoben. Sie sollten an weiteren Patienten abgesichert werden. Insbesondere sollte untersucht werden, ob mit der Zielhilfe unter Verwendung von kanülierten Schrauben eine höhere Präzision bei der Platzierung von Pedikelschrauben erreicht werden kann.

6. Literaturverzeichnis

1. Amiot LP, Lang K, Putzier M, Zippel H, Labelle H: Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine. Spine 25: 606-614 (2000)

2. Assaker R, Reyns N, Vinchon M, Demondion X, Louis E: Transpedicular screw placement: image-guided versus lateral-view fluoroscopy: in vitro simulation. Spine 26: 2160-2164 (2001)

3. Attar A, Ugur HC, Uz A, Tekdemir I, Egemen N, Genç Y: Lumbar pedicle: surgical anatomic evaluation and relationships. Eur Spine J 10: 10-15 (2001)

4. Becker HJ: unveröffentlichte Befunde

5. Belmont PJ Jr, Klemme WR, Dhawan A, Polly DW Jr.: In vivo accuracy of thoracic pedicle screws. Spine 26: 2340-2346 (2001)

6. Berlemann U, Heini P, Müller U, Stoupis C, Schwarzenbach O: Reliability of pedicle screw assessment utilizing plain radiographs versus CT reconstruction. Eur Spine J 6: 406-411 (1997)

7. Berry JL, Moran JM, Berg WS, Steffee AD: A morphometric study of human lumbar and selected thoracic vertebrae. Spine 12: 362-367 (1987)

8. Bohnsack M, Rühmann O, Gossé F: Radiologische und computer-tomographische Beurteilung der Pedikelschraubenlage bei lumbalen Spondylodesen. Z Orthop Ihre Grenzgeb 139: 26-30 (2001)

9. Boucher HH: A method of spinal fusion. J Bone Joint Surg Br 41: 248-259 (1959)

10. Brooks D, Eskander M, Balsis S, Ordway N, Connolly P : Imaging assessment of lumbar pedicle screw placement. Sensitivity and specificity of plain radiographs and computer axial tomography. Spine 32: 1450-1453 (2007)

11. Castro WH, Halm H, Jerosch J, Malms J, Steinbeck J, Blasius S : Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae. Spine 21: 1320-1324 (1996)

12. Choma TJ, Denis F, Lonstein JE, Perra JH, Schwender JD, Garvey TA, Mullin WJ: Stepwise methodology for plain radiographic assessment of pedicle screw placement: a comparison with computed tomography. J Spinal Disord Tech 19: 547-553 (2006)

13. Cinotti G, Gumina S, Ripani M, Postacchini F: Pedicle instrumentation in the thoracic spine. A morphometric and cadaveric study for placement of screws. Spine 24: 114-119 (1999)

14. Davne SH, Myers DL: Complications of lumbar spinal fusion with transpedicular instrumentation. Spine 17: S184-189 (1992)

15. Dvorak M, MacDonald S, Gurr KR, Bailey SI, Haddad RG: An anatomic, radiographic, and biomechanical assessment of extrapedicular screw fixation in the thoracic spine. Spine 18: 1689-1694 (1993)

16. Ebraheim NA, Rollins JR Jr, Xu R, Yeasting RA: Projections of the lumbar pedicle and its morphometric analysis. Spine 21: 1296-1300 (1996)

17. Ebraheim NA, Jabaly G, Xu R, Yeasting RA: Anatomic relations of the thoracic pedicle to the adjacent neural structures. Spine 22: 1553-1556 (1997)

18. Ebraheim NA, Xu R, Ahmad M, Yeasting RA: Projection of the thoracic pedicle and its morphometric analysis. Spine 22: 233-238 (1997 a)

19. Ebraheim NA, Xu R, Darwich M, Yeasting RA: Anatomic relations between the lumbar pedicle and the adjacent neural structures. Spine 22: 2338-2341 (1997 b)

20. Esses SI, Sachs BL, Dreyzin V: Complications associated with the technique of pedicle screw fixation. A selected survey of ABS members. Spine 18: 2231-2239 (1993)

21. Faray AA, Webb JK: Early complications of spinal pedicle screw. Eur Spine J 6: 324-326 (1997)

22. Farber GL, Place HM, Mazur RA, Casey Jones DE, Damiano TR: Accuracy of pedicle screw placement in lumbar fusions by plain radiographs and computed tomography. Spine 20: 1494-1499 (1995)

23. Fayyazi AH, Hugate RR, Pennypacker J, Gelb DE, Ludwig SC: Accuracy of computed tomography in assessing thoracic pedicle screw malposition. J Spinal Disord Tech 17: 367-371 (2004)

24. Fisher CG, Sahajpal V, Keynan O, Boyd M, Graeb D, Bailey C, Panagiotopoulos K, Dvorak MF: Accuracy and safety of pedicle screw fixation in the thoracic spine trauma. J Neurosurg Spine 5: 520-526 (2006)

25. Gertzbein SD, Robbins SE: Accuracy of pedicular screw placement in vivo. Spine 15: 11-14 (1990)

26. Güven O, Yalçin S, Karahan M, Sevinç TT: Postoperative evaluation of transpedicular screws with computed tomography. Orthop Rev 23: 511-516 (1994)

27. Guzey FK, Emel E, Hakan Seyithanoglu M, Serdar Bas N, Ozkan N, Sel B, Aycan A, Alatas I: Accuracy of pedicle screw placement for upper and middle thoracic pathologies without coronal plane spinal deformity using conventional methods. J Spinal Disord Tech 19: 436-441 (2006)

28. Haaker RG, Eickhoff U, Schopphoff E, Steffen R, Jergas M, Krämer J: Verification of the position of pedicle screws in lumbar spinal fusion. Eur Spine J 6: 125-128 (1997)

29. Hart RA, Hansen BL, Shea M, Hsu F, Anderson GJ: Pedicle screw placement in the thoracic spine: a comparison of image-guided and manual techniques in cadavers. Spine 30: E326-331 (2005)

30. Heary RF, Bono CM, Black M: Thoracic pedicle screws: postoperative computerized tomography scanning assessment. J Neurosurg (Spine 4) 100: 325-331 (2004)

31. Husted DS, Yue JJ, Fairchild TA, Haims AH: An extrapedicular approach to the placement of screws in the thoracic spine: an anatomic and radiographic assessment. Spine 28: 2324-2330 (2003)

32. Husted DS, Haims AH, Fairchild TA, Kershaw TS, Yue JJ: Morphometric comparison of the pedicle rib unit to pedicles in the thoracic spine. Spine 29: 139-146 (2004)

33. Jang JS, Lee WB, Yuan HA: Use of a guide device to place pedicle screws in the thoracic spine: a cadaveric study. Technical note. J Neurosurg (Spine 2) 94: 328-333 (2001)

34. Jerosch J, Malms J, Castro WH, Wagner R, Wiesner L: Lagekontrolle von Pedikelschrauben nach instrumentierter dorsaler Fusion der Lendenwirbelsäule. Z Orthop Ihre Grenzgeb 130: 479-483 (1992)

35. Jutte PC, Castelein RM: Complications of pedicle screws in lumbar and lumbosacral fusions in 105 consecutive primary operations. Eur Spine J 11: 594-598 (2002)

36. Katonis P, Christoforakis J, Aligizakis AC, Papdopoulos C, Sapkas G, Hadjipavlou A: Complications and problems related to pedicle screw fixation of the spine. Clin Orthop Relat Res 411: 86-94 (2003)

37. Kim KD, Johnson JP, Bloch O, Masciopinto JE: Computer-assisted thoracic pedicle screw placement: an in vitro feasibility study. Spine 26: 360-364 (2001)

38. Kim YJ, Lenke LG, Bridwell KH, Cho YS, Riew KD: Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? Spine 29: 333-342 (2004)

39. King D: Internal fixation for lumbosacral fusion. Am J Surg 66: 357-361 (1944)

40. Kocak T: Dynamische dorsale Stabilisierung der Lendenwirbelsäule mittels computertomographisch gestützer und fluoroskopisch basierter Navigation (Navitrack™) sowie konventioneller Operationstechnik – eine prospektive, randomisierte Vergleichsstudie. Med Dissertation, Universität Ulm (2006)

41. Kosmopoulos V, Schizas C: Pedicle screw placement accuracy: a meta-analysis. Spine 32: E111-120 (2007)

42. Kothe R, O'Holleran JD, Liu W, Panjabi MM: Internal architecture of the thoracic pedicle: an anatomic study. Spine 21: 264-270 (1996)

43. Krag MH, Beynnon BD, Pope MH, Frymoyer JW, Haugh LD, Weaver DL: An internal fixator for posterior application to short segments of the thoracic, lumbar, or lumbosacral spine. Design and testing. Clin Orthop Relat Res 203: 75-98 (1986)

44. Krag MH, Weaver DL, Beynnon BD, Haugh LD: Morphometry of the thoracic and lumbar spine related to transpedicular screw placement for surgical spinal fixation. Spine 13: 27-32 (1988)

45. Krag MH: Biomechanics of thoracolumbar spinal fixation. A Review. Spine 16: S84-99 (1991)

46. Küper A: Beurteilung der Genauigkeit eines CT-basierten spinalen Navigationssystems beim Setzen von Pedikelschrauben. Med Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München (2002)

47. Kuntz C 4th, Maher PC, Levine NB, Kurokawa R: Prospective evaluation of the thoracic pedicle screw placement using fluoroscopic imaging. J Spinal Disord Tech 17: 206-214 (2003)

48. Laine T, Schlenzka D, Mäkitalo K, Tallroth K, Nolte LP, Visarius H: Improved accuracy of pedicle screw insertion with computer-assisted surgery. A prospective clinical trial of 30 patients. Spine 22: 1254-1258 (1997)

49. Laine T, Lund T, Ylikoski M, Lohikoski J, Schlenzka D: Accuracy of pedicle screw insertion with and without computer assistance: a randomised controlled clinical study in 100 consecutive patients. Eur Spine J 9: 235-240 (2000)

50. Learch TJ, Massie JB, Pathria MN, Ahlgren BA, Garfin SR: Assessment of pedicle screw placement utilizing conventional radiography and computed tompgraphy: a proposed systematic approach to improve accuracy of interpretation. Spine 29: 767-773 (2004)

51. Liljenqvist UR, Halm HFH, Link TM: Pedicle screw instrumentation of the thoracic spine in idiopathic scoliosis. Spine 22: 2239-2245 (1997)

52. Lonstein JE, Denis F, Perra JH, Pinto MR, Smith MD, Winter RB: Complications associated with pedicle screws. J Bone Joint Surg Am 81: 1519-1528 (1999)

53. Mac-Thiong JM, Labelle H, Rooze M, Feipel V, Aubin CE: Evaluation of a transpedicular drill guide for pedicle screw placement in the thoracic spine. Eur Spine J 12: 542-547 (2003)

54. Mac-Thiong JM, Labelle H, Aubin CE: Thoracic pedicle screw insertion using a transpedicular drill guide: a preliminary study. J Spinal Disord Tech 17: 29-32 (2004)

55. McLain RF, Ferrara L, Kabins M: Pedicle morphometry in the upper thoracic spine. Limits to safe screw placement in older patients. Spine 27: 2467-2471 (2002)

56. Merloz P, Tonetti J, Pittet L, Coulomb M, Lavalleé S, Sautot P: Pedicle screw placement using image guided techniques. Clin Orthop Relat Res 354: 39-48 (1998)

57. Misenheimer GR, Peek RD, Wiltse LL, Rothman SLG, Widell EH: Anatomic analysis of pedicle cortical and cancellous diameter als related to screw size. Spine 14: 367-372 (1989)

58. Morgenstern W, Ferguson SJ, Berex S, Orr TE, Nolte LP: Posterior thoracic extrapedicular fixation: a biomechanical study. Spine 28: 1829-1835 (2003)

59. O'Brien JR, Krushinski E, Zarro CM, Sciadini M, Gelb D, Ludwig S: Esophageal injury from thoracic pedicle screw placement in a polytrauma patient. A case report and literature review. J Orthop Trauma 20: 431-434 (2006)

60. Odgers CJ, Vaccaro AR, Pollack ME, Cotler JM: Accuracy of pedicle screw placement with the assistance of lateral plain radiography. J Spinal Disord 9: 334-338 (1996)

61. Olsewski JM, Simmons EH, Kallen FC, Mendel FC, Severin CM, Berens DL: Morphometry of the lumbar spine: anatomical perspectives related to transpedicular fixation. J Bone Joint Surg Am 72: 541-549 (1990)

62. Panjabi MM, Takata K, Goel V, Federico D, Oxland T, Duranceau J, Krag M: Thoracic Human Vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy. Spine 16: 888-901 (1991)

63. Pfleghar UA: CT-basierte Computernavigation von Pedikelschrauben an der Brust- und Lendenwirbelsäule. Eine Alternative zur konventionellen Technik? Med Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München (2005)

64. Rao G, Brodke DS, Rondina M, Dailey AT: Comparison of computerized tomography and direct visualization in thoracic pedicle screw placement. J Neurosurg (2 Suppl) 97: 223-226 (2002)

65. Rao G, Brodke DS, Rondina M, Bacchus K, Dailey AT: Inter- and intraobserver reliability of computed tomography in assessment of thoracic pedicle screw placement. Spine 28: 2527-2530 (2003)

66. Reichle E, Morlock M, Sellenschloh K, Eggers C: Zur Definition der Pedikelfehllage. Orthopade 31: 402-405 (2002)

67. Reichle E, Sellenschloh K, Morlock M, Eggers C: Einbringung von Pedikelschrauben unter Einsatz unterschiedlicher Unterstützungsverfahren. Orthopade 31: 368-371 (2002)

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

69. Roy-Camille R, Saillant G, Mazel C: Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating. Clin Orthop Relat Res 203: 7-17 (1986 b)

70. Sapkas GS, Papadakis SA, Stathakopoulos DP, Papagelopoulos PJ, Badekas AC, Kaiser JH: Evaluation of pedicle screw position in thoracic and lumbar spine fixation using plain radiographs and computed tomography. A prospective study of 35 patients. Spine 24: 1926-1929 (1999)

71. Schnake KJ: CT-basierte Computernavigation von Pedikelschrauben an der Brustwirbelsäule – Praktikabilität, klinische Ergebnisse und Vergleich zur konventionellen Technik. Med Dissertation Humboldt-Universität Berlin (2002)

72. Schnake KJ, König B, Berth U, Schroeder RJ, Kandziora F, Stöckle U, Raschke M, Haas NP: Genauigkeit der CT-basierten Navigation von Pedikelschrauben an der Brustwirbelsäule im Vergleich zu konventionellen Technik. Unfallchirurg 107: 104-112 (2004)

73. Schwarzenbach O, Berlemann U, Bernhard J, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Nolte LP, Ozdoba C: Accuracy of computer-assisted pedicle screw placement. An in vivo computed tomography analysis. Spine 22: 452-458 (1997)

74. Scoles PV, Linton AE, Latimer B, Levy ME, Digiovanni BF: Vertebral body and posterior element morphology: the normal spine in middle life. Spine 13: 1082-1086 (1988)

75. Slomczykowski M, Roberto M, Schneeberger P, Ozdaba C, Vock P: Radiation dose for pedicle screw insertion. Fluoroscopic method versus computer-assisted surgery. Spine 24: 975-983 (1999)

76. Söyüncü Y, Yildirim FB, Sekban H, Özdemir H, Akyildiz F, Sindel M: Anatomic evaluation and relationship between the lumbar pedicle and adjacent neural structures. An anatomic study. J Spinal Disord Tech 18: 243-246 (2005)

77. Ugur HC, Attar A, Uz A, Tekdemir I, Genç Y: Thoracic pedicle: surgical anatomic evaluation and relations. J Spinal Disord 14: 39-45 (2001)

78. Vaccaro AR, Rizzolo SJ, Allardyce TJ, Ramsey M, Salvo J, Balderston RA, Cotler JM: Placement of pedicle screws in the thoracic spine. Part I: morphometric analysis of the thoracic vertebrae. J Bone Joint Surg Am 77: 1193-1199 (1995 a)

79. Vaccaro AR, Rizzolo SJ, Balderston RA, Allardyce TJ, Garfin SR, Dolinskas C, An HS: Placement of pedicle screws in the thoracic spine. Part II: an anatomical and radiographic assessment. J Bone Joint Surg Am 77: 1200-1206 (1995 b)

80. Weinstein JN, Spratt KF, Spengler D, Brick C, Reid S: Spinal pedicle fixation: Reliability and validity of roentgenogram-based assessment and surgical factors on successful screw placement. Spine 13: 1012-1018 (1988)

81. Weinstein JN, Rydevik BL, Rauschning W: Anatomic and technical considerations of pedicle screw fixation. Clin Orthop Relat Res 284: 34-46 (1992)

82. West JL III, Ogilvie JW, Bradford DS: Complications of the variable screw plate pedicle screw fixation. Spine 16: 576-579 (1991)

83. White KK, Oka R, Mahar AT, Lowry A, Garfin SR: Pullout strength of thoracic pedicle screw instrumentation. Comparison of the transpedicular and extrapedicular techniques. Spine 31: E355-358 (2006)

84. Whitecloud TS, Skalley TC, Cook SD, Morgan EL: Roentgenographic measurement of pedicle screw penetration. Clin Orthop Relat Res 245: 57-68 (1989)

85. Xu R, Ebraheim NA, Shepherd ME, Yeasting RA: Thoracic pedicle screw placement guided by computed tomographic measurements. J Spinal Disord 12: 222-226 (1999)

86. Zindrick MR, Wiltse LL, Widell EH, Thomas JC, Holland WR, Field BT, Spencer CW: A biomechanical study of intrapeduncular screw fixation in the lumbosacral spine. Clin Orthop Relat Res 203: 99-112 (1986)

87. Zindrick MR, Wiltse LL, Doornik A, Widell EH, Knight GW, Patwardhan AG, Thomas JC, Rothman SL, Fields BT: Analysis of the morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles. Spine 12: 160-166 (1987)

Danksagung

Als aller erstes bedanke ich mich bei Herrn PD Dr. med. Joachim Oberle, dass er mir durch sein Angebot dieses Thema zu bearbeiten die Möglichkeit gegeben hat die vorliegende Dissertation zu verfassen.
Während des gesamten Zeitraumes war er jederzeit bereit aufkommende Fragen zu besprechen und gab mir viele wertvolle Tipps. Für dieses vor allem zeitliche Engagement meinen herzlichen Dank.

Ein weiteres Dankeschön möchte ich an Dr. med. Martin Ohmer und Isi Hoxha vom Radiologischen Institut des Kantonsspitals Winterthur richten. Sie standen mir bei der Auswertung der CT-Aufnahmen und technischen Fragen unterstützend zur Seite.

Dr. Hanns Ackermann danke ich für die Hilfe bei den Berechnungen im Rahmen der statistischen Aus- und Bewertung der Ergebnisse.

Meinen Eltern gebührt an dieser Stelle mein größter Dank dafür, dass sie mir durch ihre Unterstützung die Möglichkeit gegeben haben Medizin zu studieren und ich mein Studium auf diese Art und Weise so gut absolvieren konnte, wie ich es getan habe.