

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Universität zu Köln

Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel

**Eine computertomographisch basierte
morphologische Analyse der Pedikel C3-C7 der
zervikalen Wirbelsäule**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Carolin Spemes
aus Krefeld

promoviert am 29. April 2022

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Universität zu Köln

Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel

**Eine computertomographisch basierte
morphologische Analyse der Pedikel C3-C7 der
zervikalen Wirbelsäule**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Carolin Spemes
aus Krefeld

promoviert am 29. April 2022

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink

1. Gutachter: Professor Dr. med. J. Siewe
2. Gutachter: Professor Dr. med. G. Stein

Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Priv.-Doz. Dr. med. Jan Siewe
Dr. med. Leonard Westermann

Die Fragestellung und das Konzept der Arbeit wurden von mir in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. med. Leonard Westermann entwickelt.

Der dieser Arbeit zugrunde liegende Datensatz wurde nach entsprechender Anleitung durch Herrn Dr. med. Leonard Westermann von mir selbst erhoben und ausgewertet.

Die Kontrollmessungen zur Erhebung der Interrater-Reliabilität wurden von Frau Caroline Knabben durchgeführt. Die anatomischen Zeichnungen wurden mithilfe von Frau Birgit Anna Spemes erstellt.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorliegenden Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu

Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 08.07.2021, Carolin Spemes

Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Jan Siewe für das Anvertrauen des Themas und den Zugang zu diesem interessanten Fachgebiet.

Weiterhin zu großem Dank verpflichtet bin ich Herrn Dr. Leonard Westermann, der mich als mein direkter Ansprechpartner an das wissenschaftliche Arbeiten heranführte und mir bei der Entwicklung des Themas sowie bei Fragen zur Umsetzung stets zur Seite stand.

Ich danke Birgit Anna Spemes für die Hilfe bei der Erstellung der anatomischen Zeichnungen.

Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei meinen Eltern Birgit Anna Spemes und Hans-Peter Spemes sowie bei meiner Schwester Britta Maria Spemes für ihre bedingungslose Unterstützung und Zuneigung.

für Inge Schulte-Hürmann

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 10 |
| 2 | Einleitung | 12 |
| 2.1 | Anatomie der Wirbelsäule | 12 |
| 2.1.1 | Besonderheiten der Halswirbelsäule | 13 |
| 2.2 | Pathologien der Wirbelsäule | 15 |
| 2.2.1 | Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule | 16 |
| 2.2.2 | Traumatologie der Wirbelsäule | 16 |
| 2.2.3 | Malformationen und idiopathische Deformitäten | 17 |
| 2.2.4 | Neoplasien und entzündliche Veränderungen | 17 |
| 2.3 | Spondylodese | 18 |
| 2.3.1 | Indikationen | 18 |
| 2.3.2 | Datenlage | 18 |
| 2.3.3 | Ventraler Zugang | 19 |
| 2.3.4 | Dorsaler Zugang | 19 |
| 2.3.5 | Schrauben | 21 |
| 2.4 | Komplikationen | 21 |
| 2.4.1 | Komplikationsarten an der Halswirbelsäule | 21 |
| 2.4.2 | Minimierung des operativen Risikos | 22 |
| 2.5 | Morphologische Studienlage | 23 |
| 2.6 | Ziel der Studie | 24 |
| 3 | Material und Methoden | 25 |
| 3.1 | Patientenkollektiv | 25 |
| 3.1.1 | CT-Indikationen | 25 |
| 3.1.2 | Alter, Größe und Gewicht | 25 |
| 3.1.3 | Ausschlusskriterien | 25 |
| 3.2 | Technische Grundlagen | 27 |
| 3.3 | Darstellung der Schnittbildebene | 27 |
| 3.4 | Parameter | 30 |
| 3.5 | Statistische Analyse | 33 |
| 3.6 | Ethik | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Ergebnisse | 35 |
| 4.1 | Grundmorphologische Parameter | 35 |
| 4.1.1 | Pedikelbreite, Pedikelhöhe und Pedikelachsenlänge | 35 |
| 4.1.2 | Entwicklung entlang der Halswirbelsäule | 37 |
| 4.2 | Winkelparameter | 38 |
| 4.3 | Pedikeldurchmesser | 40 |
| 4.4 | Kortikalisdicke | 42 |
| 4.4.1 | Kortikalisdicke in vier Positionen | 42 |
| 4.4.2 | Gegenüberstellung mediale vs. laterale Kortikalisdicke | 44 |
| 4.5 | Korrelationen | 46 |
| 4.5.1 | Patientengröße – Pedikeldurchmesser | 46 |
| 4.5.2 | Patientenalter – Pedikelbreite | 47 |
| 4.5.3 | BMI – Pedikelbreite | 47 |
| 4.6 | Interrater-Reliabilität | 48 |
| 5 | Diskussion | 50 |
| 5.1 | Darstellung der wichtigsten Ergebnisse | 50 |
| 5.2 | Vergleich mit der Literatur | 50 |
| 5.2.1 | Pedikelbreite, innerer Pedikeldurchmesser und äußerer Pedikeldurchmesser | 50 |
| 5.2.2 | Pedikelachsenlänge | 51 |
| 5.2.3 | Pedikelhöhe | 51 |
| 5.2.4 | Transversalwinkel | 52 |
| 5.2.5 | Sagittalwinkel | 52 |
| 5.2.6 | Kortikalisdicke | 53 |
| 5.3 | Interpretation und Bezug zu den beschriebenen Komplikationen | 53 |
| 5.4 | Limitationen und Aussagekraft der Studie | 54 |
| 5.5 | Zusammenfassung | 55 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 57 |
| 7 | Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen | 60 |

Abkürzungsverzeichnis

| | | |
|--------|---|-----------------------------|
| HWS | - | Halswirbelsäule |
| BWS | - | Brustwirbelsäule |
| LWS | - | Lendenwirbelsäule |
| bzw. | - | beziehungsweise |
| z.B. | - | zum Beispiel |
| Proc. | - | Processus |
| Procc. | - | Processus |
| Lig. | - | Ligamentum |
| Ligg. | - | Ligamenta |
| AOK | - | Allgemeine Ortskrankenkasse |
| CT | - | Computertomographie |
| mm | - | Millimeter |
| kg | - | Kilogramm |
| OP | - | Operation |
| s. | - | siehe |
| ggf. | - | gegebenenfalls |
| evtl. | - | eventuell |
| HWK | - | Halswirbelkörper |
| C3 | - | dritter Halswirbel |
| C4 | - | vierter Halswirbel |
| C5 | - | fünfter Halswirbel |
| C6 | - | sechster Halswirbel |
| C7 | - | siebter Halswirbel |
| PW | - | Pedikelbreite |
| PH | - | Pedikelhöhe |
| PAL | - | Pedikelachsenlänge |
| IDP | - | innerer Pedikeldurchmesser |
| OPD | - | äußerer Pedikeldurchmesser |
| COT | - | Kortikalisdicke |
| PSA | - | Sagittalwinkel |
| PTA | - | Transversalwinkel |
| AP | - | axiale Ebene (axial plane) |

CP - koronare Ebene (coronal plane)
SP - sagittale Ebene (sagittal plane)
USA - United States of America
dn - down

1 Zusammenfassung

Die pedikelbasierte dorsale Instrumentierung gehört im Bereich der Halswirbelsäule zu den etablierten Operationsverfahren bei einer Vielzahl von Indikationen. Eine genaue Kenntnis der zervikalen Morphologie ist für die Operateure/-innen essentiell, um Pedikelschrauben präzise einbringen zu können und somit die Schädigung benachbarter neurovaskulärer Strukturen zu verhindern und das Risiko einer Fehllage zu minimieren.

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, eine für europäische Patienten/-innen repräsentative Analyse der Pedikelmorphologie durchzuführen und somit eine Grundlage für mögliche operative Einschränkungen der dorsalen Spondylodese zu schaffen.

In einer retrospektiven Analyse durch jeweils zwei unabhängige Prüfer/-innen von Dünnschicht-Computertomographieaufnahmen (n=100) der Halswirbelsäule, mit einer axialen und sagittalen Schichtdicke von maximal 1mm, wurden anatomische Parameter der Wirbelkörper C3-C7 wie Pedikelbreite (PW), Pedikelhöhe (PH), Pedikelachsenlänge (PAL), der innere und äußere Pedikeldurchmesser (IPD/OPD), der sagittale (PSA) und transversale Pedikelwinkel (PTA) und die Kortikalisdicke an verschiedenen Lokalisationen untersucht.

Es wurden 1000 Pedikel (C3-C7) von 52 männlichen und 48 weiblichen Patienten/-innen ausgemessen. Eingeschlossen wurden Patienten/-innen der Uniklinik Köln, die zwischen September 2015 und April 2016 eine Computertomographieaufnahme der Halswirbelsäule ohne Nachweis einer Pathologie der knöchernen Strukturen bekommen haben.

Die Kortikalis der medialen Pedikelbegrenzung ($1,51 \pm 0,5\text{mm}$) war signifikant breiter als die der lateralen Pedikelbegrenzung ($0,78 \pm 0,39\text{mm}$).

Der innere und der äußere Pedikeldurchmesser war bei den weiblichen Patientinnen geringer als bei den männlichen Patienten. Der transversale als auch der sagittale Pedikelwinkel zeigte als einziger Parameter keine geschlechtsspezifischen Unterschiede.

Es zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen der Größe des/der Patienten/-in und dem inneren (p-Wert $<0,01 - 0,04$) und äußeren Pedikeldurchmesser (p-Wert $<0,001 - 0,004$).

Die Interrater-Reliabilität wies für die Parameter Pedikelbreite, Pedikelhöhe und den inneren Pedikeldurchmesser sehr gute Korrelationen auf (0,84-0,86). Moderate Korrelationen fanden sich bei der Messung der Kortikalisdicke (0,44) und der maximalen Länge (0,54).

Die Annahme eines zu geringen transversalen Pedikelwinkels aus Angst vor Verletzungen des Rückenmarks, in Verbindung mit einer schmalen lateralen Kortikalisdicke der Pedikel, erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Schraubenfehllage durch eine laterale Perforation.

Geschlecht und Patientengröße haben ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf die Morphologie. Insbesondere bei Frauen mit geringer Körpergröße ist das Einbringen von Pedikelschrauben durch den geringen Pedikeldurchmesser erschwert.

Eine genaue Kenntnis dieser zervikalen Morphologie ist somit essentiell, um eine individualisierte und exakte Schraubenpositionierung ohne Schädigung benachbarter Strukturen zu gewährleisten.

2 Einleitung

2.1 Anatomie der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule bildet gemeinsam mit den Rippen und dem Brustbein das Rumpfskelett ¹. Sie lässt sich von kranial nach kaudal in sieben Halswirbel (C1-C7), zwölf Brustwirbel (Th1-Th12), fünf Lendenwirbel (L1-L5) und in Kreuzbein und Steißbein unterteilen. Das Kreuzbein besteht aus fünf und das Steißbein aus vier postpartal verschmolzenen Wirbeln ¹.

Die charakteristischen Krümmungen der einzelnen Abschnitte der Wirbelsäule in der Sagittalebene sind Folgen des aufrechten Gangbildes des Menschen und dienen dem Abfedern von Belastungen ¹. Während Hals- und Lendenwirbelsäule physiologisch eine Lordose bilden, neigen sich Brust- und Sakralwirbelsäule kyphotisch.

Ein Wirbel lässt sich in den Wirbelkörper (Corpus vertebrae), den Wirbelbogen (Arcus vertebrae), einen Dornfortsatz (Proc. spinosus), zwei Querfortsätze (Procc. transversi bzw. costales bei den Lendenwirbeln) und vier Gelenkfortsätze (Procc. articulares) unterteilen. Die Gelenkflächen der Procc. articulares (superior und inferior) bilden die Zwischenwirbelgelenke, die sogenannten Facettengelenke. Diese stellen sowohl eine Verbindung zwischen den einzelnen Wirbeln dar, lassen aber auch den nötigen Bewegungsspielraum zu.

Zwischen den 24 freien Wirbelkörpern der Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule befindet sich jeweils eine Bandscheibe (Discus intervertebralis), bestehend aus dem zentral gelegenen Gallertkern (Nucleus pulposus) und dem äußeren Faserring (Anulus fibrosus).

Die Bandscheiben dienen als Stoßdämpfer und fangen durch Wasserverschiebungen innerhalb des Gallertkerns Druckbelastungen und Erschütterungen ab ².

Für weitere Stabilität der Wirbelsäule sorgt ein komplexer Bandapparat. Zu diesem gehören die Wirbelkörperbänder, die teilweise mit der Bandscheibe verwachsen sind (Lig. longitudinale anterius und Lig. longitudinale posterius) und die Wirbelbogenbänder. Zu den Wirbelbogenbändern gehören die aus elastischen Fasern bestehenden Ligg. flava, die bei aufrechter Haltung die Rückenmuskulatur entlasten und eine übermäßige Ventralflexion verhindern. Weiterhin bildet neben den Ligg. intertransversaria und den Ligg. interspinalia das Lig. supraspinale bzw. Lig. nuchae an der Halswirbelsäule den Bandapparat des Wirbelbogens ¹.

2.1.1 Besonderheiten der Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule weist im Vergleich zur Brust- und Lendenwirbelsäule einige anatomische Besonderheiten auf. Von den sieben Wirbeln unterscheiden sich der erste (Atlas) und der zweite Halswirbel (Axis) anatomisch von den anderen fünf Wirbeln ¹. Atlas und Axis tragen die Hauptlast des Kopfes.

Zusammen mit den Condyli occipitales des Hinterkopfes bildet der Atlas das obere Kopfgelenk (Art. atlantooccipitale). Die beiden unteren Kopfgelenke (Art. atlantoaxialis lateralis und mediana) werden durch Atlas und Axis gebildet. Die Kopfgelenke ermöglichen Bewegungen des Kopfes in drei Freiheitsgraden ¹.

Somit ist die HWS der beweglichste Teil der Wirbelsäule. Grund dafür ist zum einen das Atlantoaxialgelenk, das im Gegensatz zu den restlichen Abschnitten der Wirbelsäule Rotationen in der Transversalebene zulässt. Weitere Besonderheiten wie verhältnismäßig kleine Wirbelkörper und Bandscheiben, sowie die Ausrichtung der Facettengelenke sind ebenfalls für die hohe Beweglichkeit verantwortlich ³.

Die Halswirbel C3-C7 (zervikal 3-7) weisen im Verhältnis zum kleinen und würfelförmigen Wirbelkörper ein großes, dreieckiges Foramen vertebrale auf.

In diesem verläuft das Rückenmark (Medulla spinalis) umgeben von Liquor cerebrospinalis ¹. Den Wirbelbogen (Arcus vertebrae) unterteilt man in die Lamina (Lamina arcus vertebrae) und den Pedikel (Pediculus arcus vertebrae). Der Pedikel entspricht der vom Wirbelkörper ausgehenden Bodenwurzel des Wirbelbogens.

Eine weitere Besonderheit der Halswirbelsäule stellt die unmittelbare Nähe des Verlaufs vom Pedikel zum Foramen transversarium dar. Im Foramen transversarium verläuft die Arteria vertebralis, eine meist der Arteria subclavia entspringende hirnersorgende Arterie ¹.

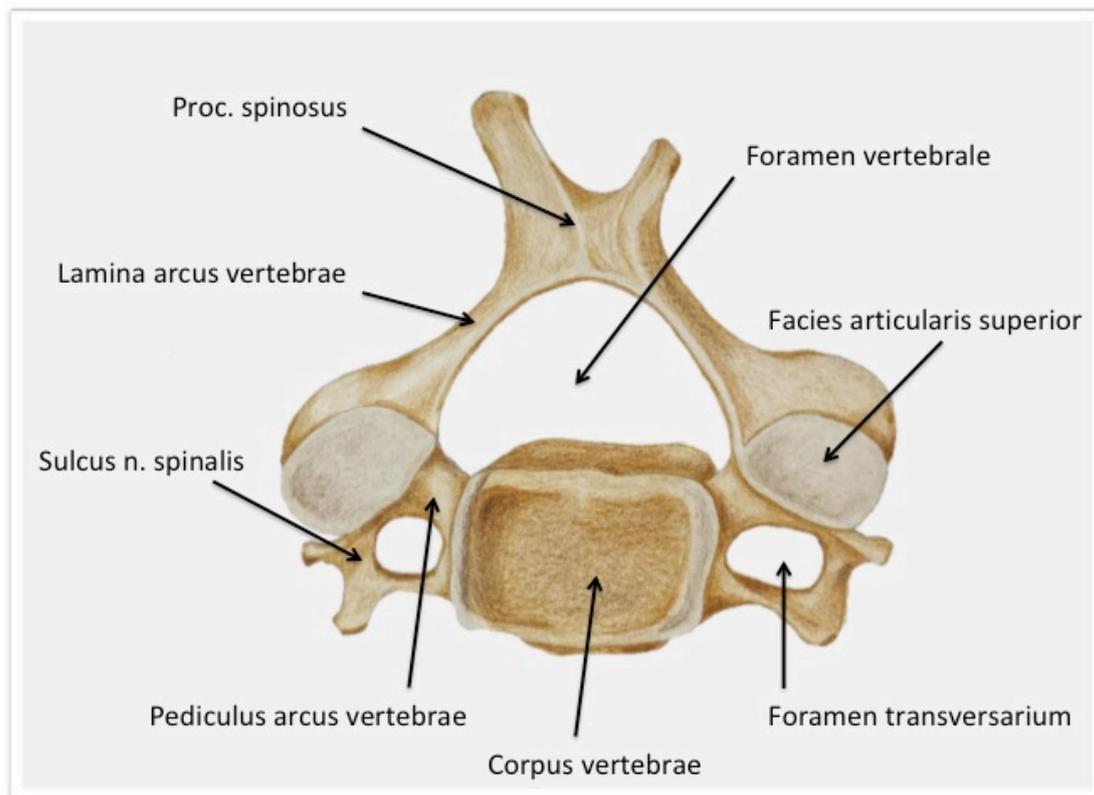


Abbildung 1: Übersicht 4. Halswirbelkörper, Zeichnung in Anlehnung an ¹

Betrachtet man die Halswirbel C3-C7, zeigen sich beim siebten Halswirbel ebenfalls zwei anatomische Besonderheiten.

So verläuft hier zum einen die Arteria vertebralis noch nicht innerhalb des Foramen transversarium und zum anderen weist der siebte Halswirbel einen besonders großen und gut tastbaren Processus spinosus vor, der als Vertebra prominens bezeichnet wird ³.

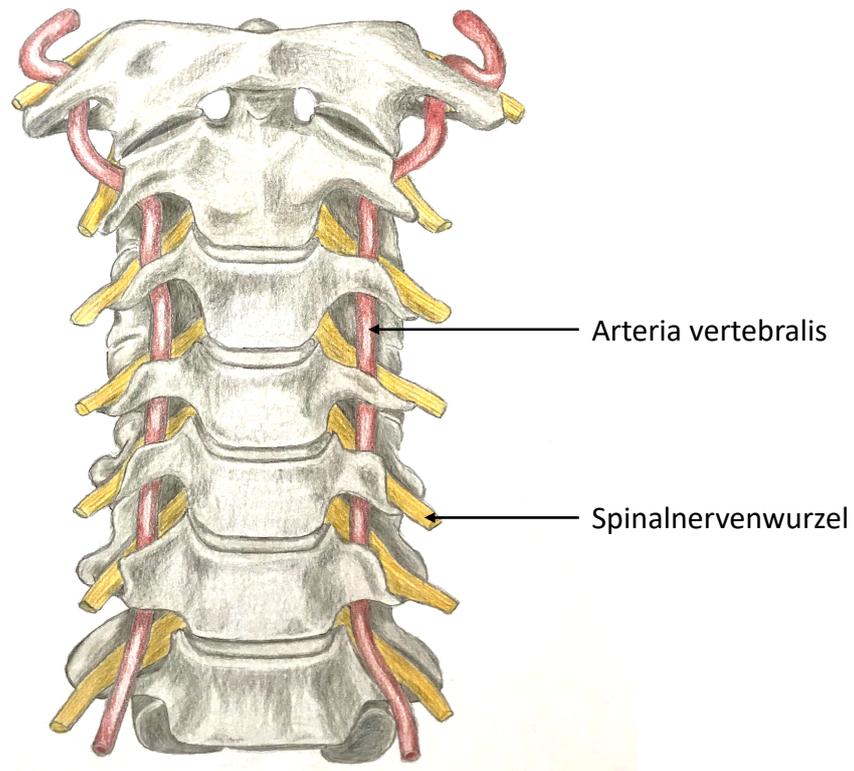


Abbildung 2: Halswirbelsäule und der anatomische Bezug zum neurovaskulären System, Zeichnung in Anlehnung an ¹

2.2 Pathologien der Wirbelsäule

Die Pathologien der Wirbelsäule weisen verschiedene ätiologische Gesichtspunkte auf. Man unterscheidet degenerative Erkrankungen, traumatische Veränderungen der Wirbelsäule und Malformationen bzw. idiopathische Deformitäten ⁴. Hinzu kommen neoplastische und inflammatorische Pathologien.

An der Halswirbelsäule spielen Malformationen bzw. idiopathische Deformitäten selten eine Rolle. Dort sind degenerative Erkrankungen und Traumatologien vorrangig.

2.2.1 Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule

Degenerative Erkrankungen spielen aufgrund der demographischen Entwicklung der Gesellschaft eine immer größere Rolle. Wirbelkörper, Bandscheiben, Bänder und Wirbelgelenke verändern sich morphologisch im Laufe des Lebens.

Vor allem die Bandscheibe ist von degenerativen Veränderungen betroffen. Einrisse im Anulus fibrosus ⁵ und ein verminderter Wasser- und Proteoglykangehalt des Nucleus pulposus ⁶ führen zu Instabilität und Höhenminderung der Bandscheibe.

Dies führt zu einer zusätzlichen Belastung der Facettengelenke, was eine Chondrose und Facettengelenksarthrose verursachen kann ⁴. Auch eine Spondylarthrose mit Instabilität der Wirbelsäule und Stenose des Spinalkanals kann eine Folge sein.

Resultat einer langbestehenden Druckbelastung eines Wirbels kann eine degenerative Spondylolisthesis, ein Wirbelkörpergleiten nach ventral, sein ⁷.

Die radiologische Einteilung der Spondylolisthesis erfolgt nach Meyerding und gibt den prozentualen Grad der Verschiebung vom oberen Wirbelkörperboden zum unteren Wirbelkörperboden in der Sagittalebene an. Grad 1 und 2 (bis 50% Verschiebung) werden als niedrige Spondylolisthesis eingestuft. Grad 3 und 4 (> 50%) gelten als hochgradiges Wirbelgleiten. Grad 5 beschreibt das vollständige Abkippen eines Wirbels nach ventral (Spondyloptose) ⁸.

Ursachen für pathologische Frakturen ohne Trauma können Osteoporose oder tumoröse Veränderungen der Knochenstruktur sein ⁹.

2.2.2 Traumatologie der Wirbelsäule

Durch Einwirkung äußerer Gewalt im Rahmen traumatologischer Ereignisse kann es neben Bandverletzungen und Bandscheibenschäden auch zu Frakturen des Wirbelkörpers, Wirbelbogens, der Facetten oder der Dornfortsätze kommen ⁴. Aufgrund der hohen Beweglichkeit der HWS ist diese besonders anfällig für Traumatologien.

Eine mögliche Frakturklassifikation der subaxialen HWS erfolgt nach Margel et al. und differenziert drei verschiedene Typen ¹⁰:

Typ A: Kompressionsfraktur der ventralen Wirbelsäule durch axiale Belastung, z.B. axialer Druck bei Sportverletzungen

Typ B: Distraktionsfraktur der ventralen oder dorsalen Wirbelsäule, z.B. Distraction bei Verkehrsunfällen

Typ C: Torsionsfraktur der ventralen und dorsalen Wirbelsäule durch Rotation

Die Einschätzung von Stabilität bzw. Instabilität und evtl. neurologischem Defizit erfolgt auf Grundlage der oben genannten Frakturklassifikation und entscheidet über eine konservative oder operative Therapie. Grundsätzlich gelten nur Frakturen vom Typ A als stabil und rechtfertigen ein konservatives Therapievorgehen ⁴. Bei Torsionsfrakturen vom Typ C treten durch Verletzungen des Spinalkanals am häufigsten neurologische Defizite auf.

2.2.3 Malformationen und idiopathische Deformitäten

Die Spondylolyse bzw. Spondylolisthesis tritt neben der degenerativen Form auch als idiopathische Form auf. Betroffen sind hierbei vor allem Leistungssportler/-innen mit Hyperlordierungsbelastung der LWS ⁴.

Eine weitere idiopathische Deformität, die zur operativen Intervention führen kann, ist die idiopathische Skoliose im Jugendalter. Therapieentscheidungen werden hier anhand des Skoliosewinkels nach Cobb getroffen. Eine Korsett-Behandlung wird bei einem Cobb-Winkel von 15-35° lumbal und 20-40° thorakal angestrebt. Größere Skoliosewinkel indizieren eine operative Aufrichtung ⁴.

2.2.4 Neoplasien und entzündliche Veränderungen

Häufiger als primäre Neoplasien der Wirbelsäule sind Wirbelsäulenmetastasen. Vor allem Primärtumore der Lunge, Brust oder der Prostata metastasieren hämatogen in die Wirbelsäule ¹¹. Bei Instabilität durch pathologische Spontanfrakturen, neurologischen Defiziten oder bei persistierenden Schmerzen ist eine operative Therapie indiziert ¹².

Zu den entzündlichen Pathologien der Wirbelsäule gehört die Spondylitis (Infektion eines Wirbelkörpers) und die Spondylodiszitis, bei der sich die Infektion auf die Bandscheibe und den Wirbelkörper ausbreitet. Die Erreger sind meistens unspezifisch (z.B. Staphylokokken), können aber auch spezifisch sein (z.B. Mycobacterium tuberculosis). Die Indikation zur operativen Sanierung ist ähnlich derer der Neoplasien. Ist die Knochenstruktur durch die Infektion so verändert, dass pathologische Frakturen oder neurologische Defizite auftreten, besteht operativer Handlungsbedarf. Weitere OP-Indikationen sind das Auftreten einer Sepsis oder persistierende Schmerzen ¹³.

2.3 Spondylodese

Die Spondylodese ist ein operatives Verfahren, bei dem eine Verblockung von Wirbelkörpern über mindestens zwei Segmente vorgenommen wird. Je nach Ausmaß und Lokalisation der Pathologie oder zugrunde liegender Deformität wird ein ventraler oder dorsaler Operationszugang gewählt ¹⁴.

2.3.1 Indikationen

Allgemein dient die Spondylodese der Wiederherstellung voller Belastbarkeit bei Instabilität eines Wirbelsäulensegmentes. Gerade im Bereich der Halswirbelsäule ist durch die große Beweglichkeit (s. Abschnitt 2.1.1) die Gefahr einer Instabilität hoch und damit die Indikation zur Spondylodese besonders häufig gegeben.

Gründe für eine Instabilität können je nach Ausmaß die verschiedenen Pathologien der Wirbelsäule sein (s. Abschnitt 2.2):

- Frakturen ¹⁴
- Neoplastische Destruktion der Wirbelsäule ¹⁴
- Spondylitis/Spondylodiszitis ¹⁴
- Spondylolisthesis ¹⁵

Die Spondylodese zur Aufrichtung bei starken Formen von Skoliose im Jugendalter betrifft lediglich den thorakolumbalen Teil der Wirbelsäule und nicht die HWS ¹⁴.

Neben dem Grad der Instabilität entscheiden weitere allgemeine Kriterien über das Anstreben eines konservativen oder operativen Vorgehens mittels Spondylodese.

Dazu gehören der individuelle Leidensdruck, das Alter und die perioperativen Risiken des/der Patienten/-in, eine Therapieresistenz gegenüber der konservativen Therapie oder neurologische Defizite ¹⁵.

2.3.2 Datenlage

Die Zahlen des Statistischen Bundesamtes zeigen einen deutlichen Anstieg der Spondylodesen in Deutschland ¹⁶.

Während in Deutschland 2007/2008 pro 100 000 Einwohner/-innen ab 15 Jahren noch 71 Spondylodesen vorgenommen wurden, ist 2014/2015 diese Zahl auf 102 Eingriffe gestiegen. Innerhalb von sieben Jahren lässt sich ein Anstieg von 44% vermerken ¹⁶.

Auch das Deutsche Ärzteblatt berichtet über einen deutlichen Anstieg der Operationszahlen bei Wirbelsäuleneingriffen. Hier sind die Zahlen auf Datenlage aller AOK-Versicherten (34.9 % aller GKV-Versicherten) von ca. 97 000 Eingriffe im Jahr 2005 auf ca. 229 000 Eingriffe in 2011 gestiegen. Dabei handelt es sich um einen Anstieg um 136% ¹⁷.

Auch in den USA steigen die Zahlen der Wirbelsäuleneingriffe. Vor allem die HWS und die LWS sind davon betroffen. Bereits zwischen 1979 und 1990 zeigte eine Studie einen Anstieg der zervikalen Spondylodesen um über 70% ¹⁸.

2.3.3 Ventraler Zugang

Der ventrale Operationszugang ist vor allem bei Spondylodesen der Halswirbelsäule eine beliebte Operationsmethode. Diese Operationstechnik erfordert eine genaue und vorsichtige Präparation der Halsweichteile. Das Einbringen von Schrauben in die verhältnismäßig kleinen Wirbelbögen der Halswirbelsäule ist allerdings nicht notwendig. Die Stabilisierung der Wirbelsäule erfolgt durch das Einbringen einer Platte, die auf der ventralen Seite der miteinander zu stabilisierenden Wirbelkörper zu liegen kommt ¹⁹. Bei verminderter Knochensubstanz kann ein Knochenspan eingebracht werden, um zusätzliche Stabilität zu bieten. Wenn dieses Transplantat dem Empfänger selbst entnommen wird (z.B. aus dem Becken), bezeichnet man es als Autograft. Alternativ kann allogenes Knochenmaterial verwendet werden.

Ein Standardverfahren der ventralen Stabilisierung ist heutzutage allerdings die ACDF (Anteriore Cervikale Dekompression und Fusion) mittels kompletter Wirbelkörper- und Bandscheibenprothesen. Diese sogenannten Platzhalter (Cages) bestehen entweder aus Polyethyletherketon (PEEK) oder aus Metall (z.B. aus Titan) ²⁰.

2.3.4 Dorsaler Zugang

Die dorsale Spondylodese (Fixateur interne) erfolgt über eine beidseitige Verschraubung über die Pedikel mit anschließender Montage von Stabsystemen (Längs- und ggf. Querverbindungen) ¹⁴.

Bei der dorsalen Spondylodese lassen sich zwei Prinzipien unterscheiden. Man differenziert dorsale Pedikelschrauben von Massa-lateralis-Schrauben.



Abbildung 3: Ausrichtung Pedikelschraube vs. Massa-lateralis-Schraube

Legende: rechts Ausrichtung Pedikelschraube; links Ausrichtung Massa-lateralis-Schraube

Vor allem im Bereich der Lendenwirbelsäule ist der dorsale Zugang aufgrund der biomechanischen Stabilität und der verhältnismäßig großen Pedikel ein beliebtes Stabilisierungsverfahren.

Verschiedene Studien zeigen insgesamt einen deutlichen biomechanischen Vorteil der Pedikelschrauben²¹⁻²⁴.

Bezüglich der primären postoperativen Stabilität werden gleichwertige Ergebnisse zwischen Pedikelschrauben und Massa-lateralis-Schrauben beschrieben²⁴.

Es finden sich in der Literatur allerdings auch Studien, in welchen bereits die primäre biomechanische Stabilität der Pedikelschrauben Vorteile bringt²¹. Einheitlich beschreiben alle Studien eine bessere sekundäre postoperative Stabilität mit einer geringeren Lockerungsrate²⁴, einer höheren Auszugsfestigkeit²³ und geringerer lateraler Bewegung bei zyklischer Belastung²¹.

Pedikelschrauben werden insbesondere bei schlechter Knochenqualität²¹ oder Versteifungen über mehrere Segmente empfohlen²².

Im Bereich der Halswirbelsäule, wo die Einbringung von Pedikelschrauben aufgrund der anatomischen Gegebenheiten mit einer höheren Komplikationsrate verbunden ist (s. Abschnitt 2.4), wurde der Vorteil gegenüber Massa-lateralis-Schrauben in Frage gestellt.

2.3.5 Schrauben

Bei einem Standardsystem zur dorsalen Spondylodese der zervikalen und oberen thorakalen Wirbelsäule (z.B. *Vertex Select* der Firma *Medtronic Spinal and Biologics Business*) stehen den Operateuren/-innen vier verschiedene Schraubenlängen und drei unterschiedliche Durchmesser zur Verfügung²⁵.

Die kleinste Schraube hat einen Gewindedurchmesser von 3.5 mm und wird in verschiedenen Längen zwischen 10 und 40 mm angeboten.

Schrauben mit einem Durchmesser von 4.0 mm gibt es mit Längen zwischen 10 mm und 24 mm und als lange Schraube zwischen 26 mm und 52 mm.

Zudem wird eine Schraube mit 4.5 mm Durchmesser in verschiedenen Längen zwischen 10 mm und 52 mm angeboten.

Das kleinste Gewinde hat bei dem Standardsystem der Uniklinik Köln somit einen Durchmesser von 3.5 mm.

2.4 Komplikationen

Die Halswirbelsäule ist aufgrund ihrer anatomischen Gegebenheiten besonders anfällig für intra- oder postoperative Komplikationen nach dorsaler Spondylodese. Besonders kleine Pedikeldurchmesser und sich stark neigende Pedikelachsen erschweren eine präzise Platzierung der Pedikelschraube und führen zu einem höheren Komplikationsrisiko als die Platzierung von Massa-lateralis-Schrauben. Zudem bietet die zervikale Lamina nur wenige anatomische Landmarken, an denen sich die Operateure/-innen orientieren können, um den optimalen Eintrittspunkt der Schraube zu bestimmen²⁶.

Trotzdem ist die transpedikuläre Verschraubung aufgrund ihrer biomechanischen Stabilität eine beliebte Operationsmethode²³.

2.4.1 Komplikationsarten an der Halswirbelsäule

Vor allem im Bereich der Halswirbelsäule ist die Fehlpositionierung der Pedikelschraube mit lateraler oder medialer Perforation der Pedikelwand eine gefürchtete Komplikation^{26,27}, da diese zu neurovaskulären Komplikationen wie Verletzungen des Myelon oder der Arteria vertebralis führen kann²⁸.

Zur Evaluation der Schraubenplatzierung unterscheidet man fünf verschiedene Grade der Fehlpositionierung^{29,30}. Grad 1 entspricht einer optimalen Schraubenposition mit einer Perforation der Pedikelwand von < 1 mm. Grad 2 zeigt eine Perforation von < 2 mm, Grad 3

< 3 mm und Grad 4 < 4 mm. Bei Grad 5 liegt eine Perforation von > 4 mm und/oder ein Verschluss des Foramen transversarium um mehr als die Hälfte des Schraubendurchmessers vor.

Die laterale Perforation ist häufiger als die mediale ²⁷, wodurch vaskuläre Komplikationen an der Arteria vertebralis besonders oft beschrieben werden.

Die Arteria vertebralis steht durch ihren Verlauf im Foramen transversarium in einem besonderen Bezug zum Pedikel. Der Abstand der Arterie zur lateralen Pedikelwand wird als Sicherheitszone bezeichnet und nimmt zwischen C2 (1.1 mm) und C6 (1.7 mm) zu ³¹. Auch irreguläre Verläufe der Arterie können zu Verletzungen der Gefäßwand und somit zu starken Blutungen führen.

Weiterhin werden in der Literatur postoperative neurologische Komplikationen wie Lähmungen oder Empfindungsstörungen erwähnt. Diese können als direkte Komplikation der Schraubenplatzierung mit Fehlpositionierung und Verletzung der Spinalnervenwurzel ^{26,27} auftreten. Es werden zudem neurologische Komplikationen ohne korrelierende Schraubenfehlage beschrieben ²⁶.

Genau wie die Arteria vertebralis steht auch die Spinalnervenwurzel im engen anatomischen Bezug zum Pedikel. Der Abstand der unteren Spinalnervenwurzel zum Pedikel ist minimal und wird in einer Studie zwischen 1.0 mm und 2.5 mm beschrieben ³².

Neben den möglichen vaskulären und neurologischen Folgen einer dorsalen Spondylodese zählt auch das Implantatversagen und damit ein Verlust der Stabilität zu den beschriebenen Komplikationen. Darunter fällt der Bruch von Schrauben ²⁶.

Als weitere Komplikationen wird die Ausbildung einer Pseudarthrose, Wundinfektionen, Degeneration der benachbarten Wirbelsäulensegmente und Dyspnoe und Dysphagie aufgeführt ²⁶.

2.4.2 Minimierung des operativen Risikos

Durch die anatomischen Gegebenheiten der Halswirbelsäule wird vor einer dorsalen Spondylodese oft eine sorgfältige präoperative Planung oder auch eine intraoperative Bildgebung diskutiert. Studien zeigen, dass durch erfahrene Operateure/-innen, präoperative Evaluation der Pedikelmorphologie und besonders durch intraoperative CT-Navigation die Perforationsraten gesenkt werden konnten ^{33,34}.

Während die nicht CT-navigierten Schraubenplatzierungen ein Perforationsrisiko von 15% aufweisen, minimiert sich das Perforationsrisiko für die CT-navigierten Eingriffe auf 6% ³³.

2.5 Morphologische Studienlage

Bestimmte morphologische Parameter wie Pedikelbreite, Pedikelhöhe und Winkelparameter in verschiedenen Ebenen werden in der Literatur bereits beschrieben³⁵⁻³⁹. Diese Studien beschreiben zudem die anatomischen Limitierungen für die Möglichkeit einer transpedikulären Spondylodese³⁶.

Außerdem wird ein bedeutender Prozentsatz an Pedikeln mit einer Breite < 4.5 mm beschrieben^{37,40}.

Die aktuelle Studienlage zeigt, dass sich nicht nur die Maße der morphologischen Parameter im Verlauf der Halswirbelsäule von C3 bis C7 ändern, sondern dass sich signifikante Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Patienten/-innen feststellen lassen. Die Pedikel männlicher Patienten zeigen für viele morphologische Parameter signifikant größere Maße als die der weiblichen Patientinnen^{37,38,40,41}.

Moderne Dünnschicht-CT-Aufnahmen mit einer maximalen Schichtdicke von 1 mm ermöglichen dem/der Untersucher/-in genauere Messungen der nur wenige Millimeter großen Pedikel der Halswirbelsäule.

Größere aktuelle Studien finden sich lediglich für lateinamerikanische⁴⁰, südostasiatische³⁷ und nordamerikanische³⁸ Populationen.

Die einzige große europäische Studie stellt den anatomischen Bezug des Pedikels zur Arteria vertebralis³¹ unter Berücksichtigung der Sicherheitszone dar. Diese Sicherheitszone beschreibt den Abstand der lateralen Pedikelwand zur Arteria vertebralis.

2004 konnten in einer Studie Unterschiede für einige morphologische Parameter zwischen einer europäischen und einer chinesischen Population nachgewiesen werden⁴².

Eine weitere Studie 2012 zeigte allerdings keine ethnischen Unterschiede bezüglich der Pedikelmorphologie⁴¹.

Auch Unterschiede zwischen medialer und lateraler Pedikelkortikalis als Ursache für die häufigere laterale Pedikelperforation^{26,27} wurden in der Literatur bereits beschrieben.

In einer amerikanischen Studie von 2000 wird die laterale Pedikelwand als signifikant dünner beschrieben als die mediale. Hier wurden Werte von 0.4 mm - 1.1 mm für die laterale Wand im Vergleich zu 1.2 mm - 2.0 mm für die mediale Wand erhoben. In dieser Studie wurden allerdings nur 25 Wirbelkörper in Bezug auf die mediale und laterale Kortikalisdicke ausgewertet³⁹.

2013 beschreibt eine indische Studie ebenfalls eine signifikant dünnere laterale Kortikalis (0.79 ± 0.2 mm lateral versus 1.43 ± 0.4 mm medial). Auch in diese Studie wurden nur 20 Patienten/-innen ausgewertet⁴³.

2.6 Ziel der Studie

Ziel dieser Studie war es, an einem großen Patientenkollektiv eine für europäische Patienten/-innen repräsentative Aussage über die Pedikelmorphologie und somit die mögliche anatomische Limitierung der zervikalen dorsalen Spondylodese zu treffen. Eine genaue Aussage über die Morphologie soll Komplikationen dieses operativen Verfahrens reduzieren. Ebenfalls sollten mögliche ethnische Unterschiede in Bezug auf die Pedikelmorphologie evaluiert werden.

Viele aktuelle Studien weisen ein kleines Patientenkollektiv auf oder sind für europäische Patienten/-innen aufgrund von möglichen ethnischen Unterschieden nicht aussagekräftig.

Ergänzend zur Fragestellung der möglichen ethnischen Unterschiede wurden Korrelationen zwischen der Pedikelmorphologie und patientenspezifischen Eigenschaften wie Größe und Gewicht bzw. BMI (*Body Mass Index*) untersucht.

Zudem sollte mit der modernen CT-Technologie und durch die Auswertung von insgesamt 1000 Pedikeln eine hochauflösende Messung der morphologischen Parameter, sowie der Kortikalisdicke lateral, medial kranial und kaudal erfolgen.

Durch die Erhebung einer Interrater-Reliabilität sollte die von dem/der Untersucher/-in unabhängige Aussagekraft des Messverfahrens geprüft werden.

3 Material und Methoden

Insgesamt 1000 Pedikel der Halswirbel C3 bis C7 von 100 Patienten/-innen wurden anhand von Dünnschicht-CT-Aufnahmen bezüglich bestimmter morphologischer Parameter retrospektiv ausgewertet.

3.1 Patientenkollektiv

Das Patientenkollektiv entspricht dem klinischen Kollektiv der Uniklinik Köln. Dies sind Patienten/-innen überwiegend europäischer Herkunft, die zwischen September 2015 und April 2016 ein Standard-CT der HWS erhalten haben.

3.1.1 CT-Indikationen

Indikationen für ein CT waren der Frakturausschluss eines möglichen Traumas der HWS nach Sturz, Schleudertrauma oder Kopfverletzung. Weiterhin erhielten die Patienten ein CT zum Ausschluss von Osteolysen, eines Tumors oder einer Metastasierung der Halswirbelsäule.

3.1.2 Alter, Größe und Gewicht

Unter den 100 Patienten/-innen waren 48 Frauen und 52 Männer. Das durchschnittliche Alter betrug 58 Jahre. Kinder unter 18 Jahren wurden von der Studie ausgeschlossen. Die Patienten/-innen waren zwischen 20 und 89 Jahren alt. Das männliche Durchschnittsalter betrug 58 ($\pm 17,47$) Jahre und die durchschnittliche Patientengröße 177,97 ($\pm 8,17$) cm.

Das weibliche Durchschnittsalter betrug 57 ($\pm 19,07$) Jahre und die durchschnittliche Patientengröße war hier 165,50 ($\pm 7,44$) cm.

Das Patientengewicht lag im Mittel bei 81,64 kg mit einer Spannweite von 34 bis 140 kg.

3.1.3 Ausschlusskriterien

Ausgeschlossen wurden Patienten/-innen mit veränderter Anatomie der Pedikel oder der Knochenstruktur. Dazu zählten:

- 1) Patienten/-innen nach bereits erhaltener operativer Maßnahme der Halswirbelsäule mit
 - a. Pedikelschrauben
 - b. Massa-lateralis-Schrauben

- 2) Patienten/-innen mit komprimierenden oder dislozierten Frakturen der Halswirbelkörper oder des Halswirbelbogens C3 bis C7
- 3) Patienten/-innen mit im CT sichtbaren oder der Krankengeschichte zu entnehmenden entzündlichen Erkrankungen der Halswirbelsäule, z.B. starken Verläufen von Spondylodiszitis
- 4) Patienten/-innen mit Tumorerkrankungen der Wirbelsäule
 - a. Metastasen oder Osteolysen im Bereich der Pedikel
 - b. Osteolytische Metastasen im Wirbelkörperbereich mit Einschluss der Kortikalis
 - c. Osteoblastische Metastasen über die Kortikalis hinaus
- 5) Patienten/-innen mit jeglicher Art der skeletalen Dysplasie
- 6) Anatomieverändernde degenerative Erkrankungen
 - a. Facettengelenksarthrose > Grad 2 (Pathria-Klassifikation) ⁴⁴
 - b. Manifeste Osteoporose (-2,5 Standardabweichung vom *peak bone mass* und Wirbelkörperfrakturen)

| Einteilung | Definition | Charakteristika |
|------------|------------------|---|
| Grad 0 | Normales Gelenk | |
| Grad 1 | Geringe Arthrose | Gelenkspaltverschmälerung |
| Grad 2 | Mäßige Arthrose | Gelenkspaltverschmälerung; Sklerose oder Gelenkvergrößerung |
| Grad 3 | Schwere Arthrose | Gelenkspaltverschmälerung; Sklerose und Osteophyten |

Tabelle 1: Einteilung der Facettengelenksarthrose im CT ⁴⁴ (Pathria-Klassifikation)

3.2 Technische Grundlagen

Alle CT-Bilder waren Dünnschicht-Aufnahmen mit einer maximalen Schichtdicke von 1 mm. Der verwendete CT-Scanner war ein iCT Philips (*Philips Medical Systems DMC GmbH, Hamburg, Deutschland*) 256 Schicht-Detektor (120kV). Alle Patienten erhielten Kontrastmittel gemäß des Standard-Protokolls. Die Auswertung der CT-Bilder erfolgte mit der *Impax™ Software* der Version 6.3 (*AGFA HealthCare, Mortsel Belgium*).

3.3 Darstellung der Schnittbildebene

Um einen Gesamteindruck über die Morphologie der Pedikel der Halswirbelsäule zu bekommen, wurde mit der *Impax-Software* eine Rekonstruktion in drei Ebenen erstellt, die es möglich macht, einen dreidimensionalen Eindruck zu bekommen.

Abbildung 4 zeigt die schematische Rekonstruktion und Einstellung der koronaren (CP) und sagittalen (SP) Ebene. Schnittpunkt der beiden Ebenen ist die engste Stelle des Pedikels, welche den Fokus in der Erhebung der Messparameter bildet.

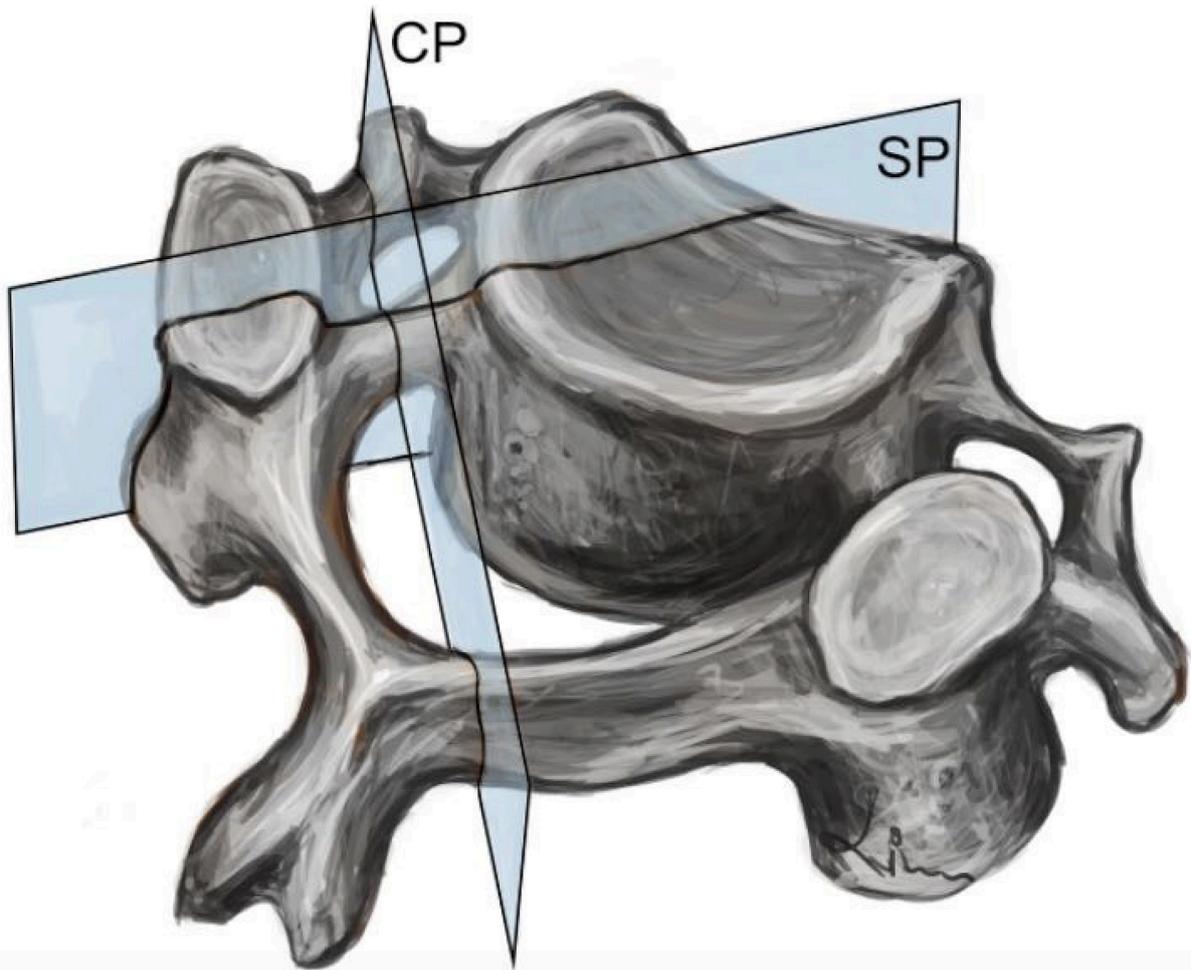


Abbildung 4: Zervikaler Wirbelkörper mit Rekonstruktion der verschiedenen Ebenen ⁴⁵
Legende: SP = Sagittale Schnittebene (Sagittal plane); CP = Koronare Schnittebene (Coronal plane)

Abbildung 5 zeigt die Schnittebenenrekonstruktion mit der *Impax-Software*. Verschiedene Bearbeitungstools ermöglichen dem/der Untersucher/-in nach Einstellung der Ebenen die Erhebung verschiedener Parameter wie Distanzen, Winkel und Durchmesser. Verschiebt man in einem Bild die Ebene, so passen sich die anderen Ebenen automatisch an. Dies ermöglicht eine optimale Orientierung.

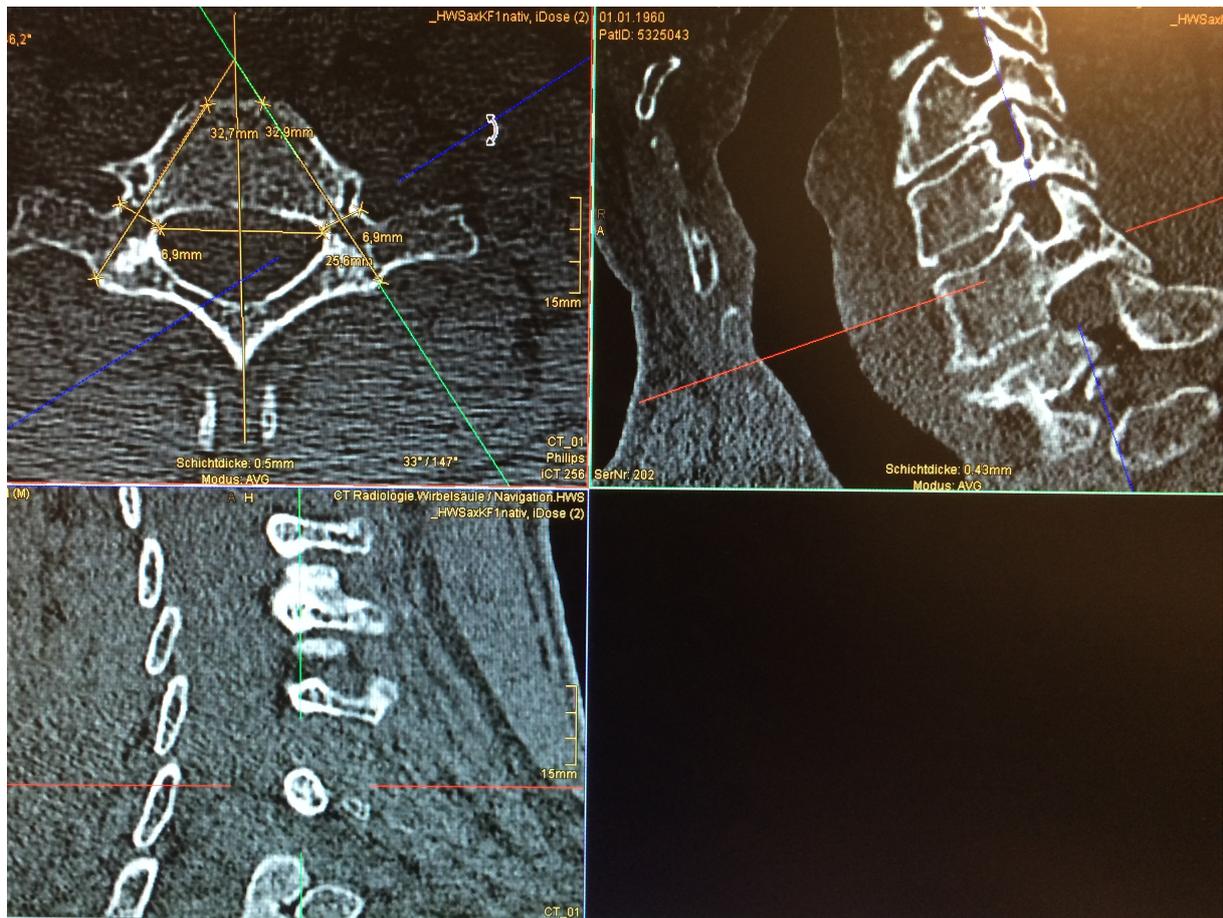


Abbildung 5: Darstellung der drei Ebenen mit der Impax™ Software

Legende: links oben: Axiale Ebene; rechts oben: sagittale Ebene; links unten: koronare Ebene

Links oben zeigt sich die axiale Ebene, parallel zum Verlauf des Pedikels (rote Linie) eingestellt. Hier wird die sagittale Ebene durch die grüne Linie gekennzeichnet, welche in Abbildung 5 rechts oben widergespiegelt wird. Die blaue Linie, die sowohl in der axialen Ebene links oben als auch in der sagittalen Ebene rechts oben eingezeichnet ist, repräsentiert die koronare Ebene, welche links unten dargestellt wird. Durch Heranzoomen kann der jeweilige Ausschnitt genauer eingestellt werden und millimetergenaue Messungen durchgeführt werden.

3.4 Parameter

Die nachfolgenden Parameter (s. Tabelle 2) wurden in allen subaxialen Wirbeln (C3-C7) der Halswirbelsäule erhoben. Eine Darstellung der verschiedenen Parameter in Bezug zur entsprechenden Ebene ist in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt.

Aus der axialen Ebene wurden die Parameter Pedikelachsenlänge, Pedikelbreite und der Transversalwinkel des Pedikels zur mittleren sagittalen Achse erhoben.

In der sagittalen Ebene wurden die Pedikelhöhe und der Sagittalwinkel des Pedikels in Bezug zu dem Wirbelkörperboden ausgewertet.

Die Einstellung der koronaren Ebene an der engsten Pedikelstelle diente der Messung des inneren und äußeren Pedikeldurchmessers. Zudem wurde hier unter starker Vergrößerung die Dicke der Kortikalis an vier verschiedenen Positionen gemessen. Diese befanden sich jeweils in 90° Rotation (0°, 90°, 180°, 270°).

Alle Parameter wurden von zwei unabhängigen geübten Personen ausgewertet, um über die Interrater-Reliabilität die Objektivität der Messungen zu beurteilen.

| Parameter | Abkürzung | Beschreibung |
|---|------------------|---|
| 1. Pedikelachsenlänge (Pedicule axial length) | PAL | Maximale Länge der bikortikalen Strecke vom angenommenen Eintrittspunkt bis zum ventralen Rand des Wirbelkörpers in der axialen Ebene |
| 2. Pedikelbreite (Pedicule width) | PW | Breite an der engsten Pedikelstelle/Isthmus inklusive Kortikalis |
| 3. Transversalwinkel (Pedicule transverse angle) | PTA | Transversalwinkel des Pedikels in Bezug auf die mittlere sagittale Achse |
| 4. Pedikelhöhe (Pedicule height) | PH | Höhe an der engsten Pedikelstelle/Isthmus inklusive Kortikalis |
| 5. Sagittalwinkel (Pedicule sagittal angle) | PSA | Sagittalwinkel des Pedikels in Bezug auf den Wirbelkörperboden |
| 6. Innerer Pedikeldurchmesser (Inner pedicle diameter) | IPD | Durchmesser an der engsten Pedikelstelle exklusive Kortikalis |
| 7. Äußerer Pedikeldurchmesser (Outer pedicle diameter) | OPD | Durchschnittlicher Durchmesser an der engsten Pedikelstelle zwischen vertikaler und horizontaler Kortikalis inklusive Kortikalis (ovale Pedikelmorphologie) |
| 8. Kortikalisdicke (Cortical thickness) | COT | Kortikalisdicke an der engsten Pedikelstelle in vier Positionen (90° rotierende Position) |

Tabelle 2: Parameter, Abkürzung und Beschreibung der Messung

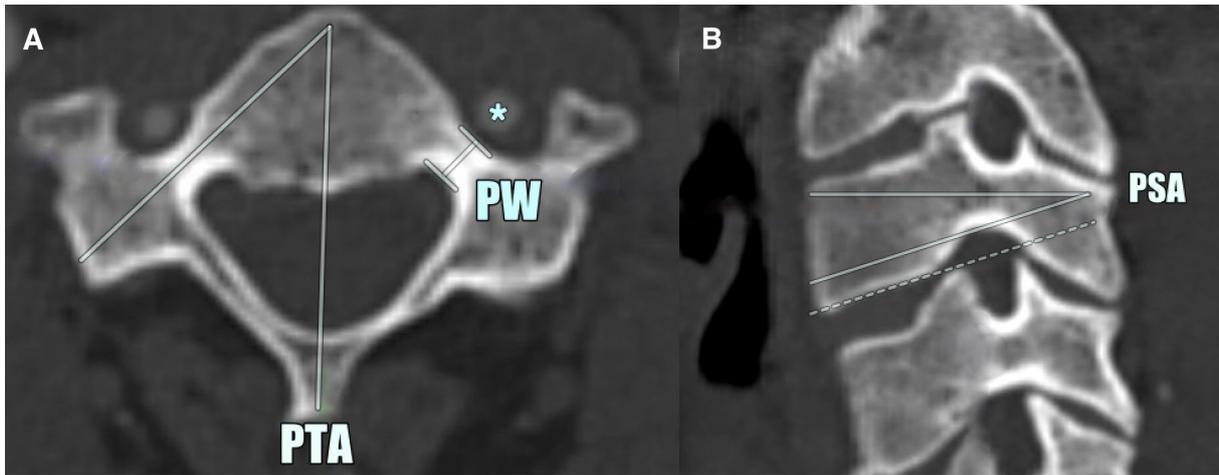


Abbildung 6: Zervikaler Wirbelkörper mit Rekonstruktion der axialen und sagittalen Schnittbildebene ⁴⁵

Legende: A) Axiale Schnittbilddrekonstruktion. B) Sagittale Schnittbilddrekonstruktion. Darstellung der in Tabelle 2 wiedergegebenen erhobenen Parameter. PTA = Pedicle transverse angle (Transversalwinkel), PSA = Pedicle sagittal angle (Sagittalwinkel), PW = Pedicle width (Pedikelbreite), * = Vertebralearterie.

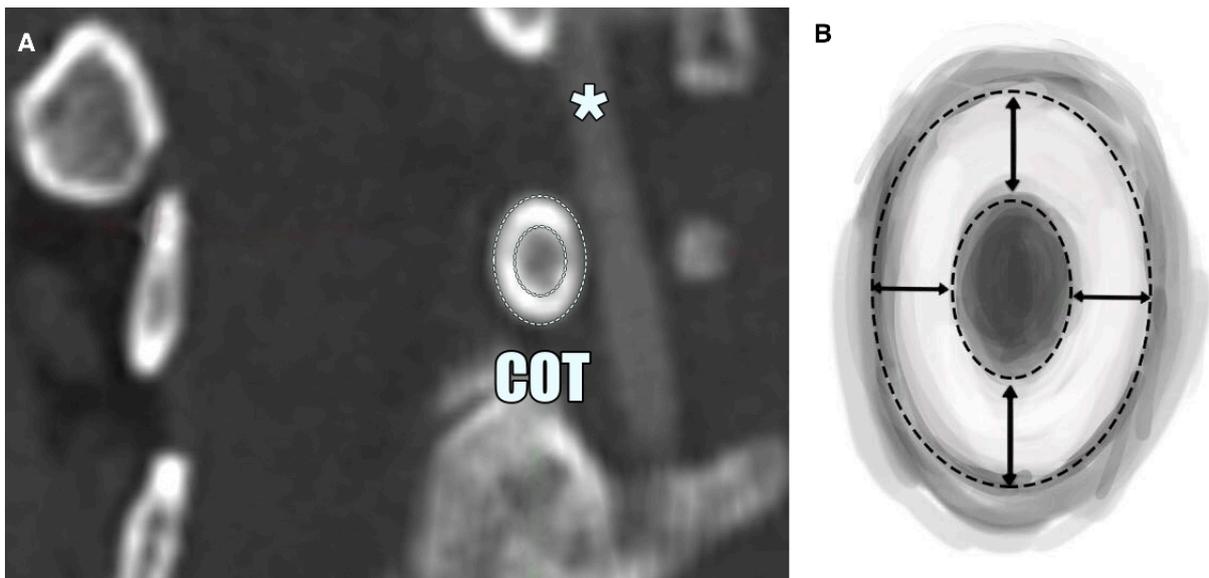


Abbildung 7: Zervikaler Wirbelkörper mit Rekonstruktion der koronaren Schnittbildebene ⁴⁵

Legende: A) Koronare Rekonstruktion und Darstellung der Erhebung der Kortikalisdicke (COT).

B) Darstellung der in Tabelle 2 wiedergegebenen erhobenen Parameter. * = Vertebralearterie.

3.5 Statistische Analyse

Die Gesamtzahl von 1000 Pedikeln der fünf subaxialen Halswirbel (C3-C7) wurden statistisch mit der *IBM SPSS Statistics Software*, Version 24.0 (Armonk, NY: IBM Corp) ausgewertet.

Mittelwerte und Standardabweichungen von allen erhobenen Parametern wurden zunächst unabhängig vom Geschlecht erhoben. Aufbauend darauf wurden im Anschluss die Parameter für Männer und Frauen getrennt voneinander ausgewertet, um signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede der Pedikelmorphologie zu evaluieren. Dies erfolgte mithilfe des ungepaarten t-Tests.

Signifikante Unterschiede zwischen rechtem und linkem Pedikel sowie zwischen medialer und lateraler Kortikalis wurden mithilfe des gepaarten t-Tests ermittelt.

Die Pearson-Korrelation wurde zur Ermittlung von signifikanten Zusammenhängen zwischen der Patientengröße in cm oder dem BMI (*Body Mass Index*) in kg/m^2 und dem inneren und äußeren Pedikeldurchmesser bzw. der Pedikelbreite herangezogen.

Die Interrater-Reliabilität wurde mithilfe des Interclass Correlation Coefficient (ICC) ausgewertet. Korrelationen wurden anhand des Modells mit gemischten Zwei-Weg-Effekten in fünf verschiedene Korrelationsklassen eingeteilt. Diese Einteilung erfolgte anhand der aktuellen STROBE Richtlinie für Observationsstudien ⁴⁶.

| | | |
|--------------|-----------|-------------|
| unzureichend | poor | 0 - 0.20 |
| angemessen | fair | 0.21 – 0.40 |
| moderat | moderate | 0.41 – 0.61 |
| gut | good | 0.61 – 0.80 |
| sehr gut | very good | 0.81 – 1 |

Tabelle 3: Korrelationsklassen nach ICC (intraclass correlation coefficient) ⁴⁶

3.6 Ethik

Die lokale Ethikkommission der medizinischen Fakultät hat das Forschungsvorhaben angenommen (17-063).

4 Ergebnisse

4.1 Grundmorphologische Parameter

Die Pedikelbreite, Pedikelhöhe und die Pedikelachsenlänge gehören zu den grundmorphologischen Parametern aus zwei verschiedenen Ebenen. Diese Parameter spielen bezüglich der anatomischen Limitation für die dorsale Spondylodese der HWS eine zentrale Rolle.

4.1.1 Pedikelbreite, Pedikelhöhe und Pedikelachsenlänge

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Messungen der grundmorphologischen Parameter.

| Wirbel | Pedikelbreite | | | Pedikelhöhe | | |
|-----------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| | <i>rechts</i> | <i>links</i> | <i>p-Wert</i> | <i>rechts</i> | <i>links</i> | <i>p-Wert</i> |
| C3 | | | | | | |
| Alle | 4.68±0.85 | 4.50±0.88 | 0.02 | 6.46±0.95 | 6.53±1.03 | 0.39 |
| Männlich | 4.99±0.86 | 4.88±0.87 | | 6.96±0.81 | 7.02±0.98 | |
| Weiblich | 4.34±0.71 | 4.08±0.68 | | 5.92±0.78 | 6.00±0.81 | |
| C4 | | | | | | |
| Alle | 4.84±0.89 | 4.77±0.86 | <0.01 | 6.81±1.20 | 6.80±0.99 | 0.35 |
| Männlich | 5.27±0.86 | 5.13±0.80 | | 7.38±1.16 | 7.23±0.93 | |
| Weiblich | 4.38±0.66 | 4.38±0.75 | | 6.19±0.91 | 6.32±0.83 | |
| C5 | | | | | | |
| Alle | 5.18±0.81 | 5.32±0.86 | 0.03 | 6.44±1.06 | 6.50±1.07 | 0.60 |
| Männlich | 5.50±0.79 | 5.59±0.84 | | 6.88±1.00 | 6.75±1.16# | |
| Weiblich | 4.84±0.68 | 5.03±0.80 | | 5.98±0.91 | 6.22±0.88 | |
| C6 | | | | | | |
| Alle | 5.66±0.99 | 5.61±0.90 | 0.45 | 6.33±0.97 | 6.40±1.22 | 0.41 |
| Männlich | 6.12±0.87 | 5.99±0.82 | | 6.53±0.97# | 6.63±1.11* | |
| Weiblich | 5.16±0.88 | 5.18±0.79 | | 6.11±0.94 | 6.16±1.29 | |
| C7 | | | | | | |
| Alle | 6.38±1.05 | 6.50±1.08 | 0.07 | 6.95±1.25 | 6.97±1.07 | 0.79 |
| Männlich | 6.73±0.93 | 6.87±0.92 | | 7.40±1.27 | 7.36±1.02 | |
| Weiblich | 6.00±1.05 | 6.10±1.10 | | 6.45±1.03 | 6.54±0.96 | |

| Wirbel | Pedikelachsenlänge | | p-Wert |
|-----------|--------------------|------------|--------|
| | rechts | links | |
| C3 | | | |
| Alle | 31.53±2.70 | 31.29±2.77 | 0.31 |
| Männlich | 32.47±2.34 | 32.41±2.66 | |
| Weiblich | 30.51±2.62 | 30.07±2.34 | |
| C4 | | | |
| Alle | 30.78±2.57 | 30.50±2.95 | 0.61 |
| Männlich | 31.76±2.18 | 31.69±2.53 | |
| Weiblich | 29.72±2.55 | 29.20±2.83 | |
| C5 | | | |
| Alle | 32.30±2.77 | 31.71±2.60 | 0.02 |
| Männlich | 33.45±2.84 | 32.72±2.73 | |
| Weiblich | 31.05±2.09 | 30.62±1.95 | |
| C6 | | | |
| Alle | 33.28±3.51 | 32.96±3.23 | 0.21 |
| Männlich | 35.26±2.57 | 34.48±2.44 | |
| Weiblich | 31.13±3.12 | 31.31±3.20 | |
| C7 | | | |
| Alle | 33.03±3.38 | 32.69±3.32 | 0.15 |
| Männlich | 34.74±3.33 | 34.49±3.00 | |
| Weiblich | 31.17±2.29 | 30.72±2.44 | |

Tabelle 4: Grundmorphologische Parameter der zervikalen Pedikel (in mm)

Die Daten zeigen Mittelwert und Standardabweichung (mm); der p-Wert gibt die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen rechtem und linkem Pedikel wieder (Daten erhoben mit gepaartem t-Test); Pedikel männlicher Patienten sind größer als weiblicher Patientinnen (p-Wert < 0.01) außer # (p-Wert < 0.05) und * (C6, left pedicle height; p-Wert = 0.06), Daten erhoben mit ungepaartem t-Test.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Pedikel der männlichen Patienten an der engsten Stelle breiter und höher sind als die der weiblichen Patientinnen (p-Wert < 0.01). Eine Ausnahme bildet hier lediglich die C6-Pedikelhöhe, die keine geschlechtsspezifische Signifikanz (p-Wert < 0.01) zeigt.

Auch die Pedikelachsenlänge vom geplanten Eintrittspunkt der Schraube bis zur Hinterkante des Wirbelkörpers ist bei Männern signifikant länger als bei Frauen.

Weiterhin zeigt sich, dass bezüglich der oben aufgeführten Parameter keine signifikanten Unterschiede zwischen rechtem und linkem Pedikel nachzuweisen sind (p -Wert > 0.01).

Betrachtet man einen Pedikel, ist dieser in allen fünf Ebenen der Halswirbelsäule höher als breit. Der Pedikel zeigt also eine ovale Form. Dieser Größenunterschied zwischen Höhe und Breite zeigt sich bei C3 und C4 deutlicher als bei C6 und C7. Der Pedikel bekommt im Verlauf der Halswirbelsäule eine abgerundete Form.

4.1.2 Entwicklung entlang der Halswirbelsäule

Betrachtet man die grundmorphologischen Parameter im Verlauf von C3 zu C7, fällt ein stetiger Anstieg der Pedikelbreite von C3 bis C7 auf.

Der Anteil aller Pedikel, die eine Breite < 4.5 mm aufzeigen, ist nachfolgend aufgeführt.

| Pedikel < 4.5 mm in % | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| Alle | 41.5 | 34 | 19 | 10.5 | 2 |
| Weiblich | 57.3 | 54.2 | 31.2 | 18.8 | 3.1 |
| Männlich | 26.9 | 15.4 | 7.7 | 2.9 | 0.96 |

Tabelle 5: Prozentualer Anteil der Pedikelbreite < 4.5 mm

Es zeigt sich, dass dieser Anteil von C3 bis C7 linear abfällt. Zudem ist der Anteil der Pedikel weiblicher Patientinnen mit einer Breite < 4.5 mm in allen fünf Wirbelebenen größer als der Anteil der Pedikel der Männer.

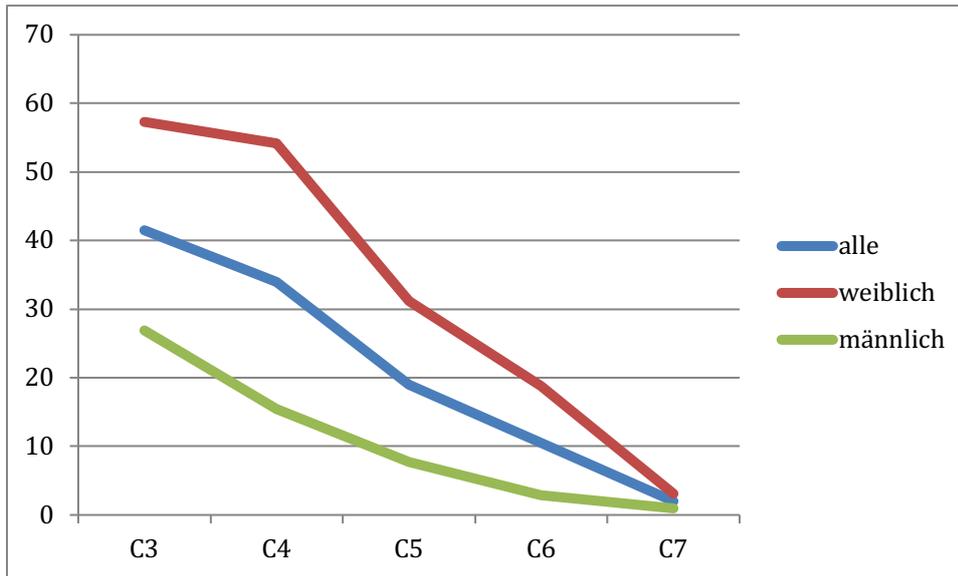


Abbildung 8: Verlauf des prozentualen Anteils der Pedikelbreite < 4.5 mm

Während von den Pedikeln der Frauen auf Höhe C3 noch 57.3% eine Pedikelbreite < 4.5 mm aufweisen, sinkt dieser Anteil bis C7 auf 3.1%. Bei den Pedikeln der Männer sind bereits die Pedikel des dritten HWK nur zu 26.9% < 4.5 mm breit. Dieser Anteil liegt auf Höhe des siebten HWK bei unter 1%.

4.2 Winkelparameter

Die sagittalen und transversalen Winkel der Pedikel zu einer bestimmten Achse spielen weniger bei der Auswahl der Schraubengröße, sondern eher bei der intraoperativen Platzierung der Schraube und der Erstellung eines präzisen Bohrkanals eine zentrale Rolle.

| Wirbel | Transversalwinkel | | | Sagittalwinkel | | |
|-----------|-------------------|------------|--------|----------------|----------------|--------|
| | rechts | links | p-Wert | rechts | links | p-Wert |
| C3 | | | | | | |
| Alle | 44.89±3.76 | 44.98±3.52 | 0.85 | up 29.29±8.32 | up 24.39±7,26 | <0.01 |
| Männlich | 44.544±3.74 | 44.72±3.62 | | up 28.77±7.06 | up 23.03±6.36 | |
| Weiblich | 45.27±3.78 | 45.26±3.42 | | up 29.85±9.55 | up 25.86±7.93 | |
| C4 | | | | | | |
| Alle | 48.02±3.85 | 47.60±4.12 | 0.20 | up 15.97±8.78 | up 13.43±8.46 | 0.10 |
| Männlich | 48.37±3.55 | 47.95±4.07 | | up 17.25±7.31 | up 14.15±6.14 | |
| Weiblich | 47.64±4.16 | 47.21±4.17 | | up 14.59±10.03 | up 12.64±10.42 | |

| C5 | | | | | | |
|----------|------------|------------|------|--------------|--------------|------|
| Alle | 47.36±4.39 | 46.69±3.89 | 0.11 | dn 1.52±8.46 | dn 1.84±7.87 | 0.50 |
| Männlich | 47.38±4.22 | 47.41±3.55 | | dn 0.61±9.39 | dn 1.93±8.47 | |
| Weiblich | 47.34±4.62 | 45.90±4.12 | | dn 2.51±7.29 | dn 1.74±7.24 | |
| C6 | | | | | | |
| Alle | 43.51±4.19 | 42.60±4.27 | 0.04 | dn 8.14±5.82 | dn 7.72±5.22 | 0.33 |
| Männlich | 43.55±3.93 | 43.36±3.89 | | dn 7.73±6.16 | dn 7.15±5.77 | |
| Weiblich | 43.46±4.50 | 41.77±4.54 | | dn 8.58±5.46 | dn 8.35±4.53 | |
| C7 | | | | | | |
| Alle | 35.57±4.41 | 34.60±4.75 | 0.02 | dn 7.81±6.26 | dn 6.83±6.29 | 0.02 |
| Männlich | 35.72±4.25 | 34.79±4.14 | | dn 7.81±6.90 | dn 6.74±6.32 | |
| Weiblich | 35.43±4.63 | 34.40±5.38 | | dn 7.80±5.56 | dn 6.94±6.31 | |

Tabelle 6: Winkelparameter der zervikalen Pedikel (in °)

Die Daten zeigen Mittelwert und Standardabweichung (°, Grad); der p-Wert gibt die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen rechtem und linkem Pedikel wieder (Daten erhoben mit gepaartem t-Test); geschlechtsspezifische Unterschiede sind in keinem der Parameter festzustellen (p-Wert > 0.05); Daten erhoben mit ungepaartem t-Test.

Im Gegensatz zu den grundmorphologischen Parametern sind bei keinem der erhobenen Winkelparameter geschlechtsspezifische Unterschiede zu erkennen (p-Werte > 0.01).

Ebenso sind keine signifikanten Unterschiede zwischen rechtem und linkem Pedikel nachzuweisen (p-Werte > 0.01). Eine Ausnahme zeigt sich hier lediglich in den Messungen des C3-Sagittalwinkels, wo signifikante Unterschiede zwischen dem rechten und linken Pedikel erhoben werden konnten (p-Wert < 0.01).

Der Transversalwinkel steigt von C3 zu C4 um durchschnittlich 2.88° an und fällt dann bis C7 wieder stetig ab. Der größte Sprung ist von C6 zu C7 zu erkennen, wo der Winkel um durchschnittlich 7.97° kleiner wird. Der kleinste Transversalwinkel findet sich durchschnittlich auf Höhe C7 mit 34.40°, während der größte Winkel auf Höhe C4 mit 48.37° liegt. Eine Divergenz über 15° zeigen die Durchschnittswerte nicht.

Die Messungen des Sagittalwinkels zeigen deutlich mehr Varianz. Der Sagittalwinkel gibt die Ausrichtung des Pedikels zum Wirbelkörperboden wieder. Die Bezeichnung *dn*(=down) steht hier für eine von dorsal nach ventral abfallende Pedikelausrichtung. Die Achsen treffen sich also ventral des Wirbelkörperbodens in der sagittalen Ebene. Die Bezeichnung *up* steht

wiederrum für eine von dorsal nach ventral aufsteigende Pedikelausrichtung. Die Achsen treffen sich hier dorsal des Wirbelkörperbodens in der sagittalen Ebene.

Die sagittale Pedikelachse wird von dorsal nach ventral beschrieben, da dies die Ausrichtung des Pedikels vom ausgewählten Eintrittspunkt der Pedikelschraube beschreibt.

C3 und C4 zeigen aus dorsaler Sicht aufsteigende Pedikelachsen, wobei sich auf Höhe C3 der steilste Sagittalwinkel nachweisen lässt (29.85° aufsteigend). Auf Höhe C5 nähert sich die Pedikelachse der Achse des Wirbelkörperbodens an und entwickelt sich dann zu einer abfallenden Achse, die allerdings im Verlauf nicht so steil wird wie die aufsteigenden Winkel auf Höhe C3.

Die Spannweite der Sagittalwinkel reicht von 29.85° aufsteigend bis 8.58° abfallend, umfasst also fast 40° . Damit zeigt der Sagittalwinkel eine deutlich höhere Varianz im Verlauf der Halswirbelsäule als der Transversalwinkel.

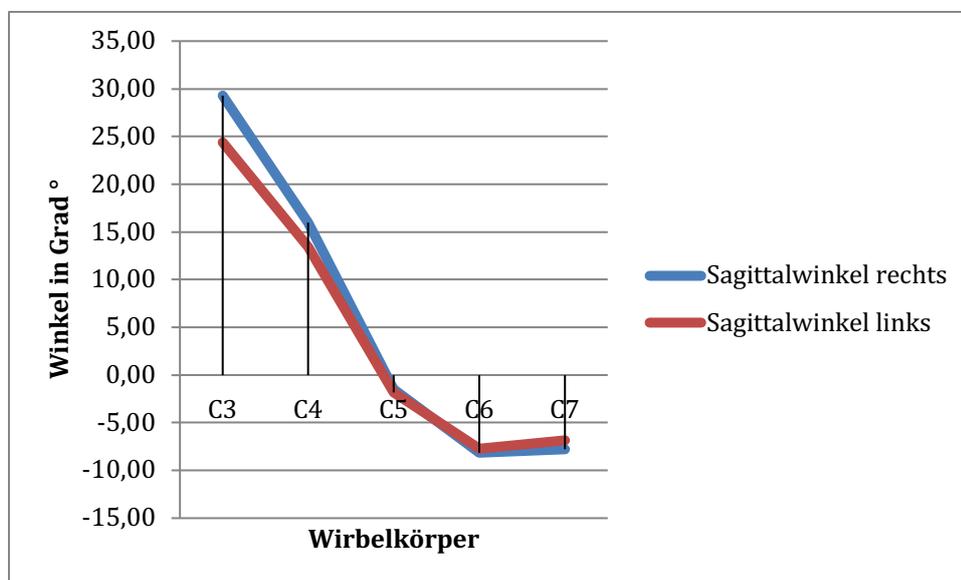


Abbildung 9: Verlauf des Sagittalwinkels in Grad ($^\circ$) von C3 bis C7

4.3 Pedikeldurchmesser

Der Pedikeldurchmesser wurde als ergänzender Parameter zu der Pedikelbreite und der Pedikelhöhe aus der axialen und sagittalen Ebene erhoben. Der Pedikeldurchmesser erschließt die koronare Ebene und erlaubt Rückschlüsse über passende Schraubengrößen bzw. Gewindedurchmesser.

Die Gegenüberstellung von innerem (ohne Kortikalis) und äußerem (mit Einschluss der Kortikalis) Pedikeldurchmesser ermöglicht eine Aussage über die Knochenstruktur und die mögliche Stabilität.

| Wirbel | Innerer Pedikeldurchmesser | | | Äußerer Pedikeldurchmesser | | |
|-----------|-------------------------------|-----------|--------|-------------------------------|-----------|--------|
| | rechts | links | p-Wert | rechts | links | p-Wert |
| C3 | | | | | | |
| Alle | 2.42±0.85 | 2.36±0.90 | 0.43 | 5.83±1.01 | 5.65±0.97 | 0.04 |
| Männlich | 2.81±0.77 | 2.68±0.86 | | 6.28±0.98 | 6.06±0.88 | |
| Weiblich | 2.00±0.72 | 2.02±0.83 | | 5.34±0.81 | 5.20±0.87 | |
| C4 | | | | | | |
| Alle | 2.50±0.96 | 2.44±0.91 | 0.22 | 5.99±1.06 | 5.73±0.95 | 0.02 |
| Männlich | 2.97±0.89 | 2.90±0.81 | | 6.57±1.05 | 6.16±0.92 | |
| Weiblich | 1.98±0.75 | 1.93±0.74 | | 5.37±0.65 | 5.28±0.75 | |
| C5 | | | | | | |
| Alle | 2.37±0.81 | 2.40±0.81 | 0.62 | 5.77±0.81 | 5.69±0.77 | 0.16 |
| Männlich | 2.83±0.71 | 2.79±0.74 | | 6.21±0.73 | 5.93±0.68 | |
| Weiblich | 1.88±0.61 | 1.98±0.64 | | 5.30±0.60 | 5.41±0.77 | |
| C6 | | | | | | |
| Alle | 2.57±0.84 | 2.63±0.88 | 0.36 | 5.93±0.84 | 5.76±0.84 | 0.01 |
| Männlich | 2.89±0.80 | 3.05±0.78 | | 6.33±0.79 | 6.14±0.77 | |
| Weiblich | 2.21±0.74 | 2.17±0.75 | | 5.49±0.66 | 5.35±0.72 | |
| C7 | | | | | | |
| Alle | 3.39±1.00 | 3.36±1.06 | 0.87 | 6.53±0.99 | 6.45±0.97 | 0.18 |
| Männlich | 3.80±0.99 | 3.88±0.96 | | 6.92±1.02 | 6.84±0.88 | |
| Weiblich | 2.90±0.78 | 2.79±0.86 | | 6.11±0.76 | 6.02±0.89 | |

Tabelle 7: Durchmesser der zervikalen Pedikel (in mm)

Die Daten zeigen Mittelwert und Standardabweichung (mm); der p-Wert gibt die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen dem rechten und linken Pedikel wieder (Daten erhoben mit gepaartem t-Test); der Pedikeldurchmesser der Männer ist größer als der der Frauen in allen Ebenen (p-Wert < 0.01); Daten erhoben mit ungepaartem t-Test.

Die Ergebnisse zeigen sowohl für den inneren als auch für den äußeren Pedikeldurchmesser signifikante, geschlechtsspezifische Unterschiede für alle fünf Halswirbelebenen (p-Werte < 0.01).

Signifikante Unterschiede zwischen rechtem und linkem Pedikel sind nicht nachzuweisen (p-Wert > 0.01; außer äußerer Pedikeldurchmesser C6: p-Wert = 0.01).

Der innere Pedikeldurchmesser steigt zwischen C3 und C6 nur minimal an, von C6 zu C7 deutlich um fast 1 mm. Auch der äußere Pedikeldurchmesser wird zwischen C3 und C7 stetig größer, zeigt aber ebenfalls von C6 auf C7 die stärkste Größenprogredienz (links: von 5.76 mm auf 6.45 mm). Der äußere Pedikeldurchmesser, welcher auch die Kortikalis einbezieht, ist ausgenommen von C7 in allen Höhen mehr als doppelt so groß wie der innere Pedikeldurchmesser.

4.4 Kortikalisdicke

Wie in Abschnitt 4.3 bei der Gegenüberstellung von innerem und äußerem Pedikeldurchmesser bereits festgestellt wurde, spielt die Kortikalis eine zentrale Rolle bei der Morphologie des Pedikels.

4.4.1 Kortikalisdicke in vier Positionen

| Wirbel | Kortikalisdicke 0° | | Kortikalisdicke 90° | |
|--------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | <i>rechts</i> | <i>links</i> | <i>rechts</i> | <i>links</i> |
| C3 | 1.90 (0.50-4.00) | 1.86 (0.60-3.70) | 1.90 (0.60-3.70) | 0.93 (0.20-2.20) |
| C4 | 1.95 (0.30-4.10) | 2.09 (0.70-4.40) | 1.83 (0.80-3.10) | 0.89 (0.20-1.80) |
| C5 | 2.07 (0.90-4.60) | 2.11 (0.70-3.90) | 1.71 (0.80-3.10) | 1.02 (0.40-2.80) |
| C6 | 1.84 (0.60-3.40) | 1.96 (0.40-3.40) | 1.71 (0.90-3.50) | 0.90 (0.40-2.70) |
| C7 | 1.84 (0.70-3.20) | 1.95 (0.70-3.70) | 1.61 (0.80-2.70) | 0.82 (0.30-2.20) |

| Wirbel | Kortikalisdicke 180° | | Kortikalisdicke 270° | |
|--------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| | <i>rechts</i> | <i>links</i> | <i>rechts</i> | <i>links</i> |
| C3 | 2.01 (0.60-3.30) | 2.15 (0.90-4.40) | 0.91 (0.20-2.30) | 1.96 (0.90-3.10) |
| C4 | 2.10 (0.70-3.80) | 2.19 (0.70-4.00) | 0.86 (0.30-2.60) | 1.87 (0.80-3.70) |
| C5 | 1.87 (0.70-3.40) | 1.88 (0.80-2.90) | 1.01 (0.50-2.20) | 1.79 (0.90-3.00) |
| C6 | 1.73 (0.80-3.10) | 1.80 (0.70-2.80) | 0.88 (0.50-2.40) | 1.66 (0.80-2.70) |
| C7 | 1.64 (0.60-3.20) | 1.74 (0.70-3.10) | 0.77 (0.40-1.60) | 1.69 (1.00-2.80) |

Tabelle 8: Kortikalisdicke (COT) in vier Positionen der zervikalen Pedikel (in mm)

Die Daten zeigen Mittelwert und Spannweite der Kortikalisdicke in vier Positionen; eine breite Spannweite wird in allen vier Positionen deutlich.

Die Verteilung der Kortikalisdicke in der koronaren Ebene zeigt deutliche Unterschiede in den vier Positionen. Bei 0° und 180°, also kranial und kaudal des Pedikelzentrums, zeigen sich beim rechten und linken Pedikel ähnliche Werte, auch wenn alle vier Positionen eine große Spannweite zeigen.

In der kranialen Position (0°) liegt das Maximum der Kortikalisdicke mit 2.11 mm auf Höhe C5. C3, C4, C6 und C7 zeigen dort eine dünnere Kortikalis mit einem Minimum von 1.84 mm auf Höhe C6 und C7.

In der kaudalen Position (180°) befindet sich die dickste Kortikalis mit 2.19 mm auf Höhe C4. Im Verlauf wird hier die Kortikalis bis C7 dünner und erreicht das Minimum auf Höhe C7 mit 1.64 mm.

Bereits in Abschnitt 4.3 zeigt sich, dass der Anteil des inneren Pedikeldurchmessers im Verhältnis zum äußeren Pedikeldurchmesser zunimmt. Die Annahme, dass die Kortikalis also in den kaudalen Abschnitten der HWS dünner wird, kann mit dieser genauen Messung der Kortikalisdicke bestätigt werden.

In den Positionen 90° und 270° zeigen rechter und linker Pedikel signifikant unterschiedliche Werte (p-Wert < 0.01; s. 4.4.2).

Beim rechten Pedikel bildet die 90°-Position den medialen Rand des Pedikelzentrums und die 270°-Position den lateralen Rand. In 90° zeigt der rechte Pedikel eine maximale Kortikalisdicke von 1.90 mm in C3 und eine minimale Dicke von 1.61 mm in C7. Bei 270°, also lateral, zeigt sich rechts ein Maximum von 1.01 mm auf Höhe C5 und ein Minimum von 0.77 mm auf Höhe C7.

Die Messungen des linken Pedikels zeigen ähnliche Ergebnisse in Bezug auf die laterale und mediale Wanddicke. Hier bildet die 90°-Position den lateralen Rand und die 270°-Position den medialen Rand. Links zeigt sich bei 90° ein Maximum von 1.02 mm auf Höhe C5 und ein Minimum von 0.82 mm auf Höhe C7. Bei 270° hingegen zeigt sich links eine deutlich dickere Kortikalis mit maximal 1.96 mm auf Ebene C3 und minimal 1.66 mm bei C6.

Kaudal, kranial und medial ist die Kortikalis signifikant dicker als lateral.

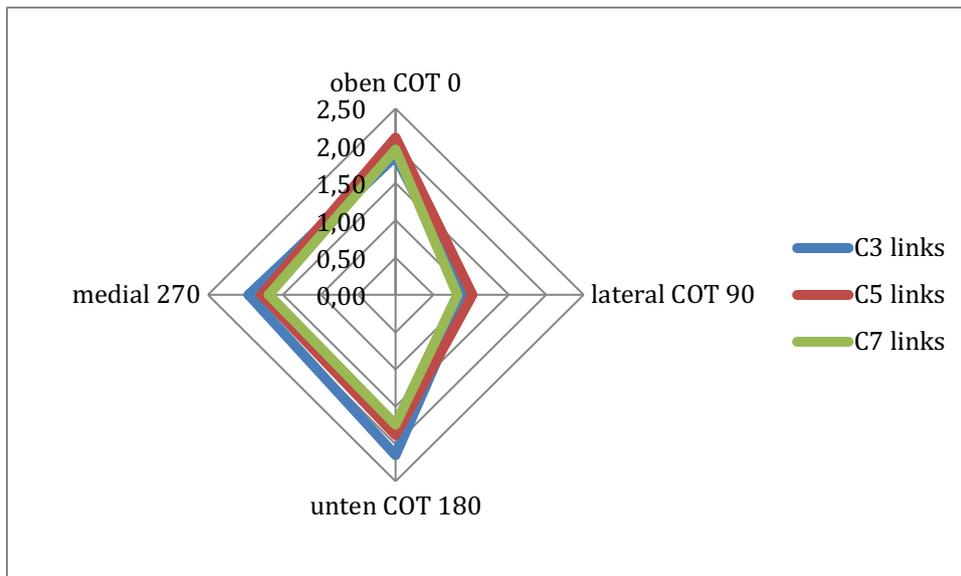


Abbildung 10: Verteilung der Kortikalisdicke in vier Positionen am linken Pedikel
Kortikalisdicke (COT) in 0°, 90°, 180° und 270°

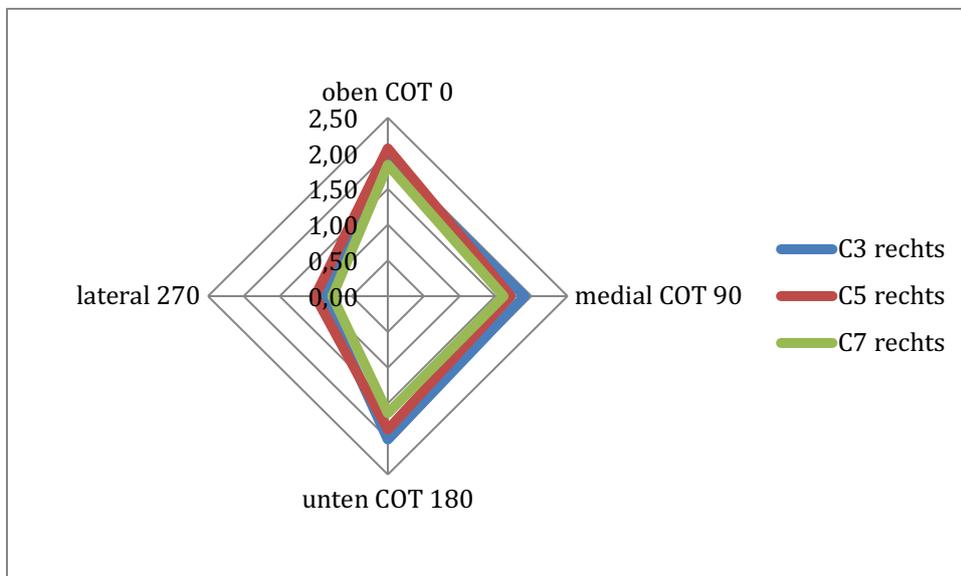


Abbildung 11: Verteilung der Kortikalisdicke in vier Positionen am rechten Pedikel
Kortikalisdicke (COT) in 0°, 90°, 180° und 270°

4.4.2 Gegenüberstellung mediale vs. laterale Kortikalisdicke

Als Ergänzung zu den Ergebnissen in 4.4.1 wurden hier alle ausgewerteten rechten Pedikel in Bezug auf die mediale und laterale Kortikalisdicke gegenübergestellt.

| Parameter | N | Mittelwert und Standardabweichung | p-Wert |
|---------------------------------------|------|-----------------------------------|--------|
| Kortikalisdicke 270° rechts (lateral) | 1000 | 0.77±0.39 | < 0.01 |
| Kortikalisdicke 90° rechts (medial) | 1000 | 1.51±0.50 | |

Tabelle 9: Unterschiede zwischen medialer und lateraler Kortikalisdicke der zervikalen Pedikel

Die Daten zeigen Mittelwert und Standardabweichung (in mm); der p-Wert zeigt die statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen medialer und lateraler Pedikelseite; Unterschiede zwischen medialer (rechts 90°) und lateraler (rechts 270°) Pedikelseite von 1000 Messungen wurde mit dem gepaarten t-Test erhoben.

Die Daten zeigen signifikante Unterschiede zwischen der medialen (rechts 90°) und lateralen (rechts 270°) Kortikalisdicke (p-Wert < 0.01). Die mediale Kortikalisdicke ist mit einem Mittelwert von 1.51 mm fast doppelt so dick wie die laterale Kortikalis (Mittelwert: 0.77 mm). Abbildung 12 veranschaulicht die Verteilung.

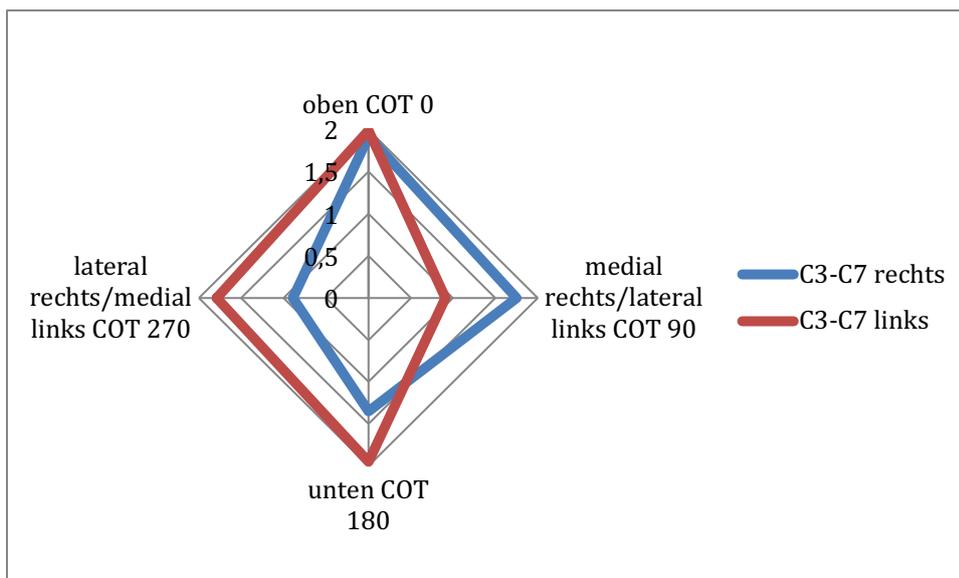


Abbildung 12: Gegenüberstellung der Verteilung der Kortikalisdicke rechter und linker Pedikel

4.5 Korrelationen

Durch den ungepaarten t-Test konnten für einige Parameter bereits signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern gezeigt werden.

Nachfolgend wird dargestellt, ob eine Korrelation zwischen Patientengröße, Patientenalter oder BMI (Body Mass Index) und ausgewählten morphologischen Parametern besteht.

4.5.1 Patientengröße – Pedikeldurchmesser

| Wirbel | | Innerer Durchmesser | | Äußerer Durchmesser | |
|--------|------|---------------------|--------|---------------------|---------|
| | | Pearson-Korrelation | p-Wert | Pearson-Korrelation | p-Wert |
| C3 | Höhe | 0.372** | 0.004 | 0.478** | < 0.001 |
| C4 | Höhe | 0.339** | 0.010 | 0.423** | 0.001 |
| C5 | Höhe | 0.337* | 0.010 | 0.392** | 0.003 |
| C6 | Höhe | 0.310* | 0.019 | 0.501** | < 0.001 |
| C7 | Höhe | 0.315* | 0.017 | 0.371** | < 0.001 |

Tabelle 10: Pearson-Korrelation zwischen Patientengröße in cm und innerem/äußerem Pedikeldurchmesser (in mm)

Die Daten zeigen die Pearson-Korrelation und den p-Wert der Korrelation zwischen Patientengröße und dem inneren und dem äußeren Pedikeldurchmesser.

*: Korrelation ist signifikant mit p-Wert < 0.05

**: Korrelation ist signifikant mit p-Wert < 0.01

Es zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen der Patientengröße und dem inneren und dem äußeren Pedikeldurchmesser. Die Signifikanz der Korrelation ist mit p-Werten von < 0.01 für alle Halswirbelkörper beim äußeren Pedikeldurchmesser noch ausgeprägter als beim inneren Pedikeldurchmesser. Beim inneren Pedikeldurchmesser zeigt sich auf Höhe C5 bis C7 eine Signifikanz mit p-Werten < 0.05.

4.5.2 Patientenalter – Pedikelbreite

| Korrelation Alter- Pedikelbreite (n=100) | Korrelation nach Pearson | p-Wert |
|--|--------------------------|---------|
| C3 | 0.118 | 0.241 |
| C4 | 0.118 | 0.244 |
| C5 | 0.26 | 0.009** |
| C6 | 0.272 | 0.006** |
| C7 | 0.333 | 0.001** |

Tabelle 11: Pearson-Korrelation zwischen dem Patientenalter in Jahren und der Pedikelbreite (in mm)

Die Daten zeigen die Pearson-Korrelation und den p-Wert der Korrelation zwischen Patientenalter und der Pedikelbreite.

** : Korrelation ist signifikant mit p-Wert < 0.01

Bezüglich der Korrelation zwischen dem Patientenalter und der Pedikelbreite zeigen sich Unterschiede zwischen den verschiedenen Wirbelkörperebenen der Halswirbelsäule.

Für die Höhen C3 und C4 besteht keine signifikante Korrelation zwischen dem Patientenalter und der Pedikelbreite.

Im Verlauf der Halswirbelsäule steigt die Pearson-Korrelation und somit zeigen sich signifikante Korrelationen für C5, C6 und C7 mit p-Werten < 0.01.

4.5.3 BMI – Pedikelbreite

| Korrelation BMI - Pedikelbreite | Korrelation nach Pearson | p-Wert |
|---------------------------------------|--------------------------|--------|
| C3 | 0.036 | 0.792 |
| C4 | 0.010 | 0.940 |
| C5 | 0.137 | 0.311 |
| C6 | 0.093 | 0.490 |
| C7 | 0.080 | 0.556 |

Tabelle 12: Pearson-Korrelation BMI - Pedikelbreite

Die Daten zeigen die Pearson-Korrelation und den p-Wert der Korrelation zwischen dem BMI und der Pedikelbreite.

Obwohl signifikante Korrelationen zwischen der Patientengröße und dem inneren und äußeren Pedikeldurchmesser nachgewiesen werden konnten, spiegelt sich dies nicht in einer möglichen Korrelation zwischen dem BMI und der Pedikelbreite wider.

Der BMI wird mithilfe von Patientengröße und dem Patientengewicht berechnet (Patientengröße in cm/ Patientengewicht in kg Körpergewicht zum Quadrat). Er ermöglicht über das Gewicht in kg hinaus eine Aussage über ein mögliches Übergewicht der Patienten, da er das Körpergewicht in Bezug zur Patientengröße setzt.

Der BMI zeigt im Gegensatz zur Patientengröße keine Korrelation mit der Pedikelmorphologie.

4.6 Interrater-Reliabilität

Um die Aussagekraft der oben aufgeführten Messmethode mit der *Impax*-Software zu beurteilen, wurde die Interrater-Reliabilität mithilfe des ICC (intraclass correlation coefficient) zwischen allen Messungen zwei unabhängiger geübter Personen erhoben.

Je höher der ICC, desto ähnlicher waren die Ergebnisse der beiden Untersucher/-innen.

| Parameter | ICC |
|----------------------------|-------|
| Pedikelbreite | 0.863 |
| Pedikelhöhe | 0.840 |
| Pedikelachsenlänge | 0.544 |
| Innerer Pedikeldurchmesser | 0.840 |
| Äußerer Pedikeldurchmesser | 0.789 |
| Transversalwinkel | 0.637 |
| Sagittalwinkel | 0.786 |
| Kortikalisdicke 90° | 0.437 |

Tabelle 13: Interrater-Reliabilität

Die Daten zeigen den intraclass correlation coefficient (ICC) zwischen allen Messungen von zwei unabhängigen Personen.

Die Korrelationen wurden anhand des Modells mit gemischten Zwei-Weg-Effekten in unzureichend (0 - 0.20), angemessen (0.21 - 0.40), moderat (0.41 – 0.60), gut (0.61 – 0.80) oder sehr gut (0.81 – 1) eingeteilt.

Sehr gute Korrelationen zeigen die Messungen der Pedikelbreite (PW), Pedikelhöhe (PH) und des inneren Pedikeldurchmessers (IPD).

Die Winkelparameter (PTA/PSA) und der äußere Pedikeldurchmesser (OPD) zeigen gute Korrelationen.

Moderate Korrelationen findet man bei der Erhebung der Pedikelachsenlänge (PAL) und der Kortikalisdicke (COT).

| Korrelationsklasse | Parameter |
|--------------------|---|
| sehr gut | Pedikelbreite Pedikelhöhe Innerer Pedikeldurchmesser |
| gut | Transversalwinkel Sagittalwinkel Äußerer Pedikeldurchmesser |
| moderat | Pedikelachsenlänge Kortikalisdicke |
| angemessen | - |
| unzureichend | - |

Tabelle 14: Parameter in der jeweiligen Korrelationsklasse

5 Diskussion

5.1 Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

Signifikante geschlechtsspezifische Unterschiede zeigen sich für die Pedikelbreite (PW), Pedikelhöhe (PH), Pedikelachsenlänge (PAL) und den inneren und äußeren Pedikeldurchmesser (IPD, OPD). Hier zeigen die Pedikel männlicher Patienten stets höhere Maße als die der weiblichen Patientinnen.

Sowohl für den Transversalwinkel als auch für den Sagittalwinkel zeigen sich keine geschlechtsspezifischen Unterschiede.

Ein nennenswerter Anteil an Pedikeln mit einer Breite < 4.5 mm findet sich vor allem in den kranial gelegenen Halswirbeln der Frauen. Über 50% der Pedikel weiblicher Patientinnen auf Höhe C3 zeigen eine Breite von < 4.5 mm.

Die Kortikalisdicke des Pedikels ist kranial und kaudal am größten. Es zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen medialer und lateraler Kortikalis, wobei die laterale Schicht die dünnste ist.

Es zeigt sich außerdem eine signifikante Korrelation zwischen der Patientengröße und dem inneren und äußeren Pedikeldurchmesser.

Korrelationen zwischen dem BMI und der Pedikelbreite finden sich wiederum nicht.

Eine Korrelation zwischen dem Patientenalter und der Pedikelbreite findet sich lediglich für C5 – C7. C3 und C4 zeigen diesbezüglich keine Korrelationen.

5.2 Vergleich mit der Literatur

5.2.1 Pedikelbreite, innerer Pedikeldurchmesser und äußerer Pedikeldurchmesser

Bezüglich der Pedikelbreite und des inneren und äußeren Pedikeldurchmessers zeigen alle vorherigen Studien einen konstanten Anstieg der Werte von kranial nach kaudal (C3 bis C7) mit breiteren Pedikeln für Männer als für Frauen^{31,37,40,47}. Unsere Messungen zeigen ebenfalls konstant steigende Werte bezüglich der Pedikelbreite. Innerer und äußerer Pedikeldurchmesser zeigen lediglich auf Höhe C5 einen Knick im linearen Anstieg. Die Interrater-Reliabilität bezüglich der Pedikelbreite wurde genau wie bei Herrero et al. als sehr gut bewertet⁴⁰.

Als Limitierung für die Platzierung der kleinsten Pedikelschraube (3.5 mm Gewindedurchmesser) wurde eine nötige Pedikelbreite von > 4.5 mm beschrieben^{37,40}. Herrero et al. beschreiben für die lateinamerikanische Kohorte, dass auf Höhe C3 20% der männlichen Pedikel und 66 % der weiblichen Pedikel < 4.5 mm breit sind⁴⁰. Eine malaysische Kohorte zeigt mit 15% der männlichen Pedikel und 48% der weiblichen Pedikel niedrigere Werte³⁷. Dieser Prozentsatz ist für die männlichen Pedikel in den Daten dieser Studie mit 27% < 4.5 mm deutlich höher. 57% der weiblichen Pedikel waren auf Höhe C3 < 4.5mm, was im Vergleich zu den lateinamerikanischen Studien einen geringeren Anteil ausmacht.

Diese Daten liefern eine mögliche Erklärung für die erhöhten Perforationsraten der Schrauben bei weiblichen Patientinnen im Vergleich zu männlichen Patienten. Die Pedikel der Frauen sind somit möglicherweise zu klein, um risikoarm eine Pedikelschraube mit einem Durchmesser von 3.5 mm einzubringen. Pedikelperforationen könnten Folge zu kleiner Pedikeldurchmesser sein⁴⁸.

5.2.2 Pedikelachsenlänge

Die Spannweite der Pedikelachsenlänge unserer Messungen bietet Werte zwischen 29.2 und 34.7 mm. Ähnliche Werte zeigten schon Herrero et al. (29.4 – 33.4 mm). Auch eine amerikanische Studie beschreibt ähnliche Daten^{38,40}. Trotzdem finden sich Unterschiede zwischen dieser Studie und den in der Literatur beschriebenen Daten. In der Literatur wird die kürzeste Pedikelachsenlänge auf Höhe C7 beschrieben, während in dieser Studie die kleinsten Werte auf Höhe C4 liegen. Die Studie weist für C7 sogar die zweitlängsten Pedikelachsen nach.

Diese Unterschiede könnten auf ethnische Unterschiede in der Pedikelmorphologie hinweisen. Unsere Messungen zeigen mit einer lediglich als moderat ermittelten Interrater-Reliabilität (ICC = 0.544) eine Erklärung für mögliche Messungenauigkeiten und abweichende Ergebnisse. Rao et al. zeigten im Gegensatz allerdings eine gute Interrater-Reliabilität für die Pedikelachsenlänge³⁸.

5.2.3 Pedikelhöhe

Die Pedikelhöhe zeigt in unseren Messungen bezüglich Messwerte und Verteilung ähnliche Werte wie sie in der Literatur beschrieben wurden. Hier wurde eine Spannweite der Pedikelhöhe von 5.9 – 7.4 mm erhoben. Herreros Studie beschreibt Werte von 6.1 – 7.3 mm⁴⁰. Raos amerikanische Studie zeigt mit 6.3 – 6.7 mm eine geringere Spannweite³⁸.

Alle Studien sowie unsere Messungen weisen die niedrigste Pedikelhöhe bei C5 und C6 nach, während sich die höchste Pedikelhöhe in der Ebene C7 findet. Frauen zeigen signifikant niedrigere Pedikelhöhen als Männer.

Die Interrater-Reliabilität wurde in der aktuellen Studie als sehr gut beschrieben. Herrero et al. zeigen diesbezüglich gute Werte.

5.2.4 Transversalwinkel

Unsere Messungen zeigen einen durchschnittlichen Transversalwinkel zwischen 34.6° und 48.1°. Herrero et al. zeigen eine geringere Spannweite mit Werten zwischen 41° und 46.3°. Im Gegensatz dazu findet sich bei Raos Studie eine deutlich größere Spannweite, die Werte zwischen 21.8° und 59.3° umschließt^{38,40}.

Genau wie in der aktuellen Studie findet sich in der Literatur der kleinste Transversalwinkel bei C7 und die größten Winkel auf Höhe C4 und C5.

Diese Unterschiede im Verlauf der Halswirbelsäule und die teilweise große Spannweite der Transversalwinkel in der Literatur könnten Grund für Fehlplatzierungen und Perforationen der Schrauben sein.

Die erhöhte Rate an lateralen Perforationen zwischen dem 3. und 5. Halswirbel könnte sich somit nicht nur durch die geringere Pedikelbreite in den kranialen Halswirbeln erklären. Auch die Annahme eines zu kleinen Transversalwinkels könnte eine Rolle spielen. Wird beispielsweise von einem kleinen Transversalwinkel ausgegangen (am Beispiel C7) und die Schraube auf einer kranialen Wirbelebene mit einem größeren Transversalwinkel (am Beispiel C4 oder C5) platziert, kann dies zu einer erhöhten Rate an lateralen Perforationen führen^{26,49}. Die genaue Kenntnis über die Transversalwinkel jeder einzelnen Ebene ist somit von essenzieller Bedeutung.

5.2.5 Sagittalwinkel

Unsere Messungen zeigen starke Veränderungen der Sagittalwinkel im Verlauf der HWS. Hier wurden Sagittalwinkel zwischen 29.3° up und 8.1° dn mit einer Spannweite von 37.4° gemessen.

Ludwigs Kadaver-Studie berichtet über eine deutlich geringere Spannweite zwischen 8.6° up und 4.2° dn, während Herreros lateinamerikanische Kohorte mit Werten zwischen 16.3° up und 22.6° dn eine ähnlich große Variabilität der Sagittalwinkel zeigt.

Die größte Variabilität ist sowohl in unserer Studie als auch bei Herrero et al.⁴⁰ und Ludwig et al.²⁷ zwischen dem Sagittalwinkel C3 (größter kranial gerichteter Winkel) und C6 (größter kaudal gerichteter Winkel) zu vermerken.

5.2.6 Kortikalisdicke

Die Kortikalisdicke ist einer der entscheidenden Faktoren, um Schrauben-Perforationen zu vermeiden. Die laterale Kortikalis ist mit 0.77 mm die dünnste Stelle des Pedikels und zudem signifikant dünner als die mediale Seite des Pedikels mit 1.51 mm. Ähnliche Ergebnisse zeigen Panjabi et al.³⁹.

Somit bestätigen sich auch mithilfe der aktuellen CT-Technologie und der Auswertung von Dünnschicht-Aufnahmen die bereits in der Literatur beschriebenen Werte bezüglich der Kortikalisdicke.

Diese Ergebnisse sind eine Erklärung für die in der Literatur häufiger beschriebenen lateralen Perforationen der Pedikelschraube^{26,49}. Zusätzlich wird die Bedeutung der Kortikalis zur Stabilität der Pedikelschraube bestätigt.

5.3 Interpretation und Bezug zu den beschriebenen Komplikationen

Laterale Komplikationen werden in der Literatur am häufigsten beschrieben. Diese haben aufgrund der anatomischen Nachbarschaft mögliche Verletzungen der Arteria vertebralis oder der Spinalnervenwurzel zur Folge. Der nachgewiesene dünnere laterale Pedikelrand stellt durch die nur halb so dicke Kortikalis im Vergleich zum medialen, kranialen und kaudalen Pedikelrand somit eine logische Bruchstelle dar.

Auch variable Transversalwinkel können Ursache einer lateralen Perforation sein. Die Größe des Transversalwinkels ändert sich im Verlauf der HWS. Wird die Schraube im klinischen Alltag immer in einem standardisierten Winkel eingebracht, kann dies auf bestimmten Höhen der Halswirbelsäule zu einer zu großen Belastung der dünneren lateralen Pedikelwand und somit zur lateralen Perforation führen. Mahesh et al. beschrieben bereits die Vorteile einer stärkeren Ausrichtung der Pedikelschraube nach medial zur Vermeidung lateraler Perforationen⁵⁰. Die dickere mediale Pedikelwand kann somit als stabile Führungslinie dienen.

Die signifikanten Korrelationen zwischen der Patientengröße und dem inneren und äußeren Pedikeldurchmesser könnten eine Erklärung für die in der Literatur beschriebenen ethnischen Unterschiede in der Pedikelmorphologie bieten ⁴².

Die fehlende Korrelation zwischen dem BMI und der Pedikelbreite lassen vermuten, dass das Gewicht keinen Einfluss auf die Pedikelmorphologie hat.

Korrelationen zwischen dem Patientenalter und der Pedikelbreite findet sich lediglich für C5-C7. Somit könnten die kaudalen Wirbel der Halswirbelsäule anfälliger für degenerative Erkrankungen im Alter und somit Veränderungen der Pedikelmorphologie sein als C3 oder C4.

Die dorsale transpedikuläre Verschraubung ist die biomechanisch stabilste Methode ²⁶, die aber durch das kleine Kaliber der zervikalen Pedikel zu einer höheren Komplikationsrate führt als das Platzieren von Massa-lateralis-Schrauben. Gerade in den kranialen Halswirbeln und beim weiblichen Geschlecht wird die Sicherheit dieser Operationsmethode in der Literatur immer wieder diskutiert. Auch unsere Messungen zeigen einen relevanten Anteil von Pedikeln mit einer Breite < 4.5 mm. Dies stellt eine mögliche Limitierung für das Nutzen von standardisierten Pedikelschrauben (3.5 mm Gewindedurchmesser) dar. Ein Verlust an Stabilität und ein hohes neurovaskuläres Verletzungsrisiko können die Folge sein. Gerade bei Frauen muss somit der Einsatz von Pedikelschrauben in den kranialen Wirbeln individuell evaluiert und geplant werden.

Neben der präoperativen Planung zur Auswahl des optimalen Gewindedurchmessers kann die intraoperative Bildgebung, wie z.B. die CT-Navigation, eine genauere Platzierung der Pedikelschraube bei variablen Transversal- und Sagittalwinkeln ermöglichen und somit die Perforationsrate senken ³⁰. Gerade bei kleinkalibrigen Pedikeln der kranialen weiblichen Wirbelsäule scheint unseren Daten nach eine intraoperative CT-Navigation notwendig zu sein.

5.4 Limitationen und Aussagekraft der Studie

Die Ausschlusskriterien dieser Studie wurden klar definiert, um nur intakte und damit morphologisch repräsentative Wirbel auszuwerten. Ein möglicher Nachteil ist, dass die Pedikel nicht in vivo begutachtet wurden. Dafür konnte die bis dato größte europäische CT-basierte Studie durchgeführt werden, die die Morphologie der Pedikel der Halswirbelsäule beschreibt.

Da die Pedikelmaße nicht von einem Computerprogramm generiert wurden, sondern mithilfe der *Impax*-Software manuell ausgewertet wurden, bestand die Gefahr Messungenauigkeiten miteinzubeziehen. Die drei verschiedenen Ebenen müssen ebenfalls manuell anhand von bestimmten Landmarken eingestellt werden und unterliegen der Einstellung des/der Untersuchers/-in. Die Bearbeitungstools erleichtern dem/der Untersucher/-in das Ausmessen. Trotzdem entscheidet auch bei hochauflösenden CT-Bildern mit Vergrößerungsmöglichkeit das Augenmaß des/der Untersuchers/-in über Ebeneneinstellung und die Auswahl der Randpunkte. Die Interrater-Reliabilität zeigte allerdings keine signifikanten Messungenauigkeiten. Alle Parameter außer Kortikalisdicke und Pedikelachsenlänge zeigten sehr gute bis gute Ergebnisse. Für diese Parameter wurde die Interrater-Reliabilität als moderat beschrieben. Die Untersuchungsmethode zeigt also eine untersucherunabhängige hohe Präzision und kann von verschiedenen Untersuchern mit wenig Übung angewendet werden. Somit stellt die Software eine Möglichkeit dar, im klinischen Alltag eine schnelle und individuelle präoperative Planung vorzunehmen.

Durch die guten Messergebnisse und die Größe der untersuchten Kohorte kann angenommen werden, dass die Ergebnisse der Studie repräsentativ für europäische Patienten/-innen sind.

5.5 Zusammenfassung

Die steigenden Fallzahlen zervikaler Spondylodesen zeigen die immer größer werdende Bedeutung dieser Operationsmethode in unserer Gesellschaft. Die Risikominimierung der dorsalen Spondylodese der Halswirbelsäule steht, bedingt durch den Nachweis einer guten biomechanischen Stabilität, im Vordergrund.

Die Ergebnisse unserer Messungen zeigen deutlich die Notwendigkeit einer präoperativen Planung vor einer dorsalen Spondylodese. Es wurden ausgeprägte Variabilitäten der Morphologie der Halswirbelkörper gezeigt. Ein standardisiertes OP-Verfahren mit einem standardisierten Gewindedurchmesser eignet sich an der HWS nicht und führt zu einem erhöhten Komplikationsrisiko.

Eine intensivierete präoperative Planung, sowie eine intraoperative CT-Navigation sollte gerade bei kleinkalibrigen Pedikeln der kranialen Wirbelsäule der weiblichen Patientinnen erfolgen.

Die Ergebnisse der europäischen Kohorte sind vergleichbar mit den Ergebnissen aus Studien anderer Kontinente wie Lateinamerika oder Asien. Trotz signifikanter Korrelationen

zwischen Patientengröße und Pedikelmaße scheinen keine ethnischen Unterschiede in der Pedikelmorphologie vorzuliegen.

Ein genaues Wissen über die Variationen des Transversal- und Sagittalwinkels im Verlauf der Halswirbelsäule ist essenziell, um die Schraube richtig zu platzieren und Perforationen zu vermeiden. Der Transversalwinkel variiert im Verlauf zwischen 34.6° und 48.0°. Schon kleine Unterschiede im Einführungswinkel können vor allem zu lateralen Perforationen führen. Eine intraoperative Überwachung mittels CT-Navigation scheint somit auch diesbezüglich sinnvoll zu sein.

Durch die hohe Präzision und die sehr gute bis gute Interrater-Reliabilität des Messverfahrens eignet sich die *Impax*-Software gut zur präoperativen Planung im klinischen Alltag.

Die laterale Pedikelwand ist die dünnste, was zu einem hohen Risiko lateraler Perforationen führt. Die stabilere mediale Pedikelwand sollte als Führungslinie dienen.

Geht man von einer Mindestpedikelbreite von 4.5 mm als Grenze zur sicheren Platzierung der kleinsten Pedikelschraube (3.5 mm) des Standardsystems der Uniklinik Köln aus, so muss diese operative Methode vor allem bei der Stabilisierung der kranialen Pedikel der weiblichen Patientinnen als risikoreich angesehen werden. Erst auf Höhe C5 liegt der Anteil der Pedikelbreite der Frauen < 4.5 mm unter 50%. Die Pedikelbreite der Männer ist bereits auf Höhe C3 mit lediglich 27% < 4.5 mm beschrieben.

Auch wenn die transpedikuläre Instrumentierung die biomechanisch stabilste Methode ist, muss gerade bei weiblichen Patientinnen die Pedikelbreite präoperativ evaluiert werden. Zeigen sich präoperativ zu kleine Pedikelmaße, muss ein anderes operatives Verfahren wie das Einbringen von Massa-lateralis-Schrauben in Erwägung gezogen werden.

6 Literaturverzeichnis

1. Schünke M SE, Schumacher U, Voll M, Wesker K. Prometheus LernAtlas der Anatomie Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2011.
2. Singh K, Masuda K, Thonar EJ, An HS, Cs-Szabo G. Age-related changes in the extracellular matrix of nucleus pulposus and annulus fibrosus of human intervertebral disc. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009; **34**(1): 10-6.
3. Waxenbaum JA, Futterman B. Anatomy, Back, Vertebrae, Cervical. StatPearls. Treasure Island (FL); 2018.
4. Breusch S, Clarius M, Mau H, Sabo D. Klinikleitfaden Orthopädie Unfallchirurgie. München: Elsevier; 2017.
5. Hilton RC, Ball J. Vertebral rim lesions in dorsolumbar spine. *Ann Rheum Dis* 1984; **43**(6): 856-7.
6. Pearce RH, Grimmer BJ, Adams ME. Degeneration and the chemical composition of the human lumbar intervertebral disc. *J Orthop Res* 1987; **5**(2): 198-205.
7. Kalichman L, Hunter DJ. Diagnosis and conservative management of degenerative lumbar spondylolisthesis. *Eur Spine J* 2008; **17**(3): 327-35.
8. Meyerding H. Spodylolisthesis: surgical treatment and results: Surgery, Gynecology & Obstetrics; 1932.
9. European Prospective Osteoporosis Study G, Felsenberg D, Silman AJ, et al. Incidence of vertebral fracture in europe: results from the European Prospective Osteoporosis Study (EPOS). *J Bone Miner Res* 2002; **17**(4): 716-24.
10. Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, Harms J, Nazarian S. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J* 1994; **3**(4): 184-201.
11. Shimada H, Setoguchi T, Yokouchi M, et al. Metastatic bone tumors: Analysis of factors affecting prognosis and efficacy of CT and (18)F-FDG PET-CT in identifying primary lesions. *Mol Clin Oncol* 2014; **2**(5): 875-81.
12. Mesfin A, Buchowski JM, Gokaslan ZL, Bird JE. Management of metastatic cervical spine tumors. *J Am Acad Orthop Surg* 2015; **23**(1): 38-46.
13. Frangen TM, Kalicke T, Gottwald M, et al. [Surgical management of spondylodiscitis. An analysis of 78 cases]. *Unfallchirurg* 2006; **109**(9): 743-53.
14. Fuhrmann R. Spondylodese. In: Verlag S, editor. Engelhardt Lexikon Orthopädie und Unfallchirurgie: Springer Verlag; 2017.
15. Matzen KA. Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie: Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften, 2002.
16. Schwenk U. Daten, Analysen, Perspektiven: Bertelsmann Stiftung, 2017.
17. Niethard F, Malzahn J, Schäfer T. Uneinheitliches Versorgungsgeschehen. *Deutsches Ärzteblatt* 2013; **27-28**.
18. Davis H. Increasing rates of cervical and lumbar spine surgery in the United States, 1979-1990. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994; **19**(10): 1117-23; discussion 23-4.
19. Smith GW, Robinson RA. The treatment of certain cervical-spine disorders by anterior removal of the intervertebral disc and interbody fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1958; **40-A**(3): 607-24.
20. Castellvi AE, Castellvi A, Clabeaux DH. Corpectomy with titanium cage reconstruction in the cervical spine. *J Clin Neurosci* 2012; **19**(4): 517-21.
21. Kothe R, Ruther W, Schneider E, Linke B. Biomechanical analysis of transpedicular screw fixation in the subaxial cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 2004; **29**(17): 1869-75.

22. Kotani Y, Cunningham BW, Abumi K, McAfee PC. Biomechanical analysis of cervical stabilization systems. An assessment of transpedicular screw fixation in the cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994; **19**(22): 2529-39.
23. Jones EL, Heller JG, Silcox DH, Hutton WC. Cervical pedicle screws versus lateral mass screws. Anatomic feasibility and biomechanical comparison. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; **22**(9): 977-82.
24. Johnston TL, Karaikovic EE, Lautenschlager EP, Marcu D. Cervical pedicle screws vs. lateral mass screws: uniplanar fatigue analysis and residual pullout strengths. *Spine J* 2006; **6**(6): 667-72.
25. Vertex Select, Reconstruction System Posted Screw Module, Surgical Technique. Memphis: Medtronic Worldwide Headquarter, 2009.
26. Nakashima H, Yukawa Y, Imagama S, et al. Complications of cervical pedicle screw fixation for nontraumatic lesions: a multicenter study of 84 patients. *J Neurosurg Spine* 2012; **16**(3): 238-47.
27. Ludwig SC, Kramer DL, Balderston RA, Vaccaro AR, Foley KF, Albert TJ. Placement of pedicle screws in the human cadaveric cervical spine: comparative accuracy of three techniques. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000; **25**(13): 1655-67.
28. Abumi K, Itoh H, Taneichi H, Kaneda K. Transpedicular screw fixation for traumatic lesions of the middle and lower cervical spine: description of the techniques and preliminary report. *J Spinal Disord* 1994; **7**(1): 19-28.
29. Bredow J, Beyer F, Oppermann J, et al. A novel classification of screw placement accuracy in the cervical spine. *Technol Health Care* 2016; **24**(6): 919-25.
30. Bredow J, Meyer C, Siedek F, et al. Accuracy of 3D fluoro-navigated anterior transpedicular screws in the subaxial cervical spine: an experimental study on human specimens. *Eur Spine J* 2017; **26**(11): 2934-40.
31. Tomasino A, Parikh K, Koller H, et al. The vertebral artery and the cervical pedicle: morphometric analysis of a critical neighborhood. *J Neurosurg Spine* 2010; **13**(1): 52-60.
32. Ugur HC, Attar A, Uz A, et al. Surgical anatomic evaluation of the cervical pedicle and adjacent neural structures. *Neurosurgery* 2000; **47**(5): 1162-8; discussion 8-9.
33. Shin BJ, James AR, Njoku IU, Hartl R. Pedicle screw navigation: a systematic review and meta-analysis of perforation risk for computer-navigated versus freehand insertion. *J Neurosurg Spine* 2012; **17**(2): 113-22.
34. Luther N, Iorgulescu JB, Geannette C, et al. Comparison of navigated versus non-navigated pedicle screw placement in 260 patients and 1434 screws: screw accuracy, screw size, and the complexity of surgery. *J Spinal Disord Tech* 2015; **28**(5): E298-303.
35. Bozbuga M, Ozturk A, Ari Z, Sahinoglu K, Bayraktar B, Cecen A. Morphometric evaluation of subaxial cervical vertebrae for surgical application of transpedicular screw fixation. *Spine (Phila Pa 1976)* 2004; **29**(17): 1876-80.
36. Karaikovic EE, Daubs MD, Madsen RW, Gaines RW, Jr. Morphologic characteristics of human cervical pedicles. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; **22**(5): 493-500.
37. Yusof MI, Ming LK, Abdullah MS, Yusof AH. Computerized tomographic measurement of the cervical pedicles diameter in a Malaysian population and the feasibility for transpedicular fixation. *Spine (Phila Pa 1976)* 2006; **31**(8): E221-4.
38. Rao RD, Marawar SV, Stemper BD, Yoganandan N, Shender BS. Computerized tomographic morphometric analysis of subaxial cervical spine pedicles in young asymptomatic volunteers. *J Bone Joint Surg Am* 2008; **90**(9): 1914-21.
39. Panjabi MM, Shin EK, Chen NC, Wang JL. Internal morphology of human cervical pedicles. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000; **25**(10): 1197-205.

40. Herrero CF, Luis do Nascimento A, Maranhão DA, et al. Cervical pedicle morphometry in a Latin American population: A Brazilian study. *Medicine (Baltimore)* 2016; **95**(25): e3947.
41. Chazono M, Tanaka T, Kumagai Y, Sai T, Marumo K. Ethnic differences in pedicle and bony spinal canal dimensions calculated from computed tomography of the cervical spine: a review of the English-language literature. *Eur Spine J* 2012; **21**(8): 1451-8.
42. Tan SH, Teo EC, Chua HC. Quantitative three-dimensional anatomy of cervical, thoracic and lumbar vertebrae of Chinese Singaporeans. *Eur Spine J* 2004; **13**(2): 137-46.
43. Gupta R, Kapoor K, Sharma A, Kochhar S, Garg R. Morphometry of typical cervical vertebrae on dry bones and CT scan and its implications in transpedicular screw placement surgery. *Surg Radiol Anat* 2013; **35**(3): 181-9.
44. Pathria M, Sartoris DJ, Resnick D. Osteoarthritis of the facet joints: accuracy of oblique radiographic assessment. *Radiology* 1987; **164**(1): 227-30.
45. Westermann L, Spemes C, Eysel P, et al. Computer tomography-based morphometric analysis of the cervical spine pedicles C3-C7. *Acta Neurochir (Wien)* 2018; **160**(4): 863-71.
46. von Elm E, Altman DG, Egger M, et al. The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) statement: guidelines for reporting observational studies. *Lancet* 2007; **370**(9596): 1453-7.
47. Onibokun A, Khoo LT, Bistazzoni S, Chen NF, Sassi M. Anatomical considerations for cervical pedicle screw insertion: the use of multiplanar computerized tomography measurements in 122 consecutive clinical cases. *Spine J* 2009; **9**(9): 729-34.
48. Wang Y, Xie J, Yang Z, et al. Computed tomography assessment of lateral pedicle wall perforation by free-hand subaxial cervical pedicle screw placement. *Arch Orthop Trauma Surg* 2013; **133**(7): 901-9.
49. Uehara M, Takahashi J, Ikegami S, et al. Screw perforation features in 129 consecutive patients performed computer-guided cervical pedicle screw insertion. *Eur Spine J* 2014; **23**(10): 2189-95.
50. Mahesh B, Upendra B, Vijay S, Arun K, Srinivasa R. Perforations and angulations of 324 cervical medial cortical pedicle screws: a possible guide to avoid lateral perforations with use of pedicle screws in lower cervical spine. *Spine J* 2017; **17**(3): 457-65.

7 Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Westermann L, Spemes C, Eysel P, et al. Computer tomography-based morphometric analysis of the cervical spine pedicles C3-C7. *Acta Neurochir (Wien)* 2018; **160**(4): 863-71.

