

Aus der Klinik für Neurochirurgie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Direktor: Univ.- Prof. Dr. med. D. Hänggi

Die Sicherheit der transpedikulären HWK 2 Verschraubung im Zeitalter der  
Navigation – radiologische und klinische, retrospektive Evaluation an einer  
neurochirurgischen Universitätsklinik

Dissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Judith Gelja Witte

2023

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der Medizinischen  
Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:  
Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker  
Erstgutachter: PD Dr. med. Richard Bostelmann  
Zweitgutachter: PD Dr. med. Jan P. Graßmann

## Zusammenfassung

Die Platzierung von Pedikelschrauben im kraniozervikalen Übergang ist aufgrund der komplexen Anatomie und dem variablen Verlauf der Arteria vertebralis eine chirurgische Herausforderung. Der verstärkte Einsatz von intraoperativen Navigationsverfahren (3D-Durchleuchtung/CT-basiert) in den letzten Jahren verspricht eine größere Genauigkeit der Schraubenlage. Ob daraus jedoch auch ein zusätzlicher Nutzen in Hinsicht auf die Patientensicherheit bzgl. neurovaskulärer Komplikationen im Vergleich zum traditionellen Operationsverfahren resultiert, gilt es zu untersuchen. Ziel dieser Studie ist es daher, die Genauigkeit der Pedikelschraubenplatzierung in C2 mittels herkömmlicher Durchleuchtung und intraoperativer Orientierung anhand anatomischer Landmarken zu untersuchen und die Sicherheit dieses Verfahrens für den Patienten zu beurteilen.

In dieser retrospektiven Einzelzentrum-Studie sind die Daten von 39 Patienten, die aufgrund einer C2-Instabilität von Januar 2008 bis Februar 2018 in der neurochirurgischen Universitätsklinik der Universität Düsseldorf behandelt wurden, analysiert worden. Es erfolgte eine Auswertung der postoperativen CT-Bilder hinsichtlich der Schraubenlage in C2, wobei als Bewertungsgrundlage für die Genauigkeit unter anderem das von Bredow et al. vorgeschlagene Klassifikationssystem verwendet wurde. Das Patientenoutcome wurde anhand der medizinischen Dokumentation (Operationsberichte, Entlassbriefe, Nachsorge) ermittelt und anhand VAS, McCormick-Score und ODOM-Score bewertet. Insgesamt wurden die medizinischen Aufzeichnungen von 21 Frauen und 18 Männern mit einem Durchschnittsalter von 67.1 Jahren (18 – 84 Jahre) analysiert. Instabile Pathologien umfassten 19 Frakturen aufgrund von Trauma, 7 durch Tumor, 11 durch Degeneration und 2 sonstige. Korrekte Schraubenlage (Klasse 1 und 2, Pedikelwandperforation < 2mm) wurde in 69 Schrauben (92%) von 75 C2 Pedikelschrauben beobachtet.

Bei keinem der 39 Patienten traten intra- oder postoperativ neurologisch oder vaskuläre Komplikationen auf, die dem Operationsverfahren geschuldet waren. Auch das klinische Outcome der Patienten zeigte eine signifikante Verbesserung beim Vergleich der Werte präoperativ, bei Entlassung und in der Nachkontrolle. In 2 Fällen wurde zur Gewährleistung einer besseren Stabilität eine Revision durchgeführt. Ein Vergleich mit ausgewählten Studien zur navigierten Platzierung von Pedikelschrauben in C2 zeigte eine hohe Genauigkeit von 98,6% gegenüber 92%. Auch wenn durch die Schraubenplatzierung mittels Navigationssystemen bessere Genauigkeiten erzielt werden, so konnte in dieser Arbeit unter Einbezug anderer Studien kein signifikanter, klinischer Benefit für die Patienten ermittelt werden.

Es ist somit festzuhalten, dass aktuell navigierte und nicht-navigierte transpedikuläre Verschraubung in HW2 als gleichwertig hinsichtlich der Patientensicherheit gesehen werden dürfen.

## Summary

Pedicle screw placement in the craniocervical junction remains a delicate procedure due to the complex anatomy and the highly variable course of the vertebral artery. An increase of navigated screw placement (3D-fluoroscopy/CT-based) over the last decade promised better accuracy. However, if a net benefit for patients' safety regarding neurovascular complications compared to traditional methods results from this, has yet to be established. Therefore the purpose of this study was to assess the accuracy of pedicle screw placement in C2 using conventional fluoroscopy and intraoperative orientation via anatomic landmarks with the aim to determine the overall patient safety of this approach.

In this retrospective, single-center study the data of 39 patients with C2 instability who were hospitalized between January 2008 and February 2018 was analyzed. Data was obtained by evaluating postoperative CT-scans regarding screw position in C2 using as reference for accuracy the grading system proposed by Bredow et al. Patient outcome was determined based on medical reports (operative records, discharge papers, follow up reports).

The medical records of 21 females and 18 males with a mean age of 67.1 years (range 18 to 84 years) were analyzed. Unstable pathologies included 19 fractures due to trauma, 7 due to tumor, 11 due to degeneration and 2 other. Correct screw positioning (Grade 1 and 2, pedicle wall perforation <2mm) was observed in 69 screws (92%) of 75 C2 pedicle screws.

None of the 39 patients had neurological or vascular complications due to the surgical procedure. The clinical outcome, measured by VAS, McCormick score and ODOM score, showed a significant improvement when comparing the values preoperatively, at discharge and in the follow-up control. A revision was carried out in 2 cases to ensure better stability. A comparison with selected studies on the navigated placement of pedicle screws in C2 showed a high accuracy of 98.6% versus 92%. Even if the screw placement by means of navigation systems apparently achieves better accuracy, no significant clinical benefit for the patients could be determined in this work, including other studies. So currently navigated and non-navigated transpedicular screw connections in C2 can be seen as equivalent in terms of patient safety.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abb.</b>	Abbildung
<b>ANOVA</b>	Analysis of variance (Varianzanalyse)
<b>CT</b>	Computertomographie
<b>HRVA</b>	High riding vertebral artery
<b>HWK</b>	Halswirbelkörper
<b>HWS</b>	Halswirbelsäule
<b>IOM</b>	Intraoperatives Monitoring
<b>k.A.</b>	Keine Angabe
<b>KZÜ</b>	Kraniozervikaler Übergang
<b>Lig.</b>	Ligamentum
<b>Ligg.</b>	Ligamenta
<b>MEP</b>	Motorisch evozierte Potentiale
<b>OP</b>	Operation
<b>SD</b>	Standard deviation (Standardabweichung)
<b>SEP</b>	Somatosensibel evozierte Potentiale
<b>RA</b>	Rheumatoide Arthritis
<b>VAG</b>	Vertebral artery groove

# Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: VERTEILUNG DER KRANKHEITSBILDER AM KRANIO-ZERVIKALEN ÜBERGANG MIT OPERATIVER STABILISIERUNGSNOTWENDIGKEIT MODIFIZIERT NACH GLUF ET AL, 2005 [1].....	1
ABB. 2: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER HWS-FRAKTUREN NACH GOLDBERG ET AL. 2001 [4] .....	2
ABB. 3: ANATOMIE DES ZWEITEN HALSWIRBELS [18] .....	6
ABB. 4: KLASSIFIKATION DER ATLASFRAKTUREN NACH GEHWEILER ET AL. 1983 [28] .....	9
ABB. 5: DENS FRAKTUREN NACH ANDERSON UND D'ALONZO, 1974 [30].....	10
ABB. 6: KLASSIFIKATION DER TRAUMATISCHE SPONDYLOLISTHESE NACH EFFENDI [4].....	11
ABB. 7: EINTEILUNG DER ATYPISCHEN FRAKTUREN DES 2. HALSWIRBELKÖRPERS (CORPUSFRAKTUREN) NACH BENZEL ET AL., 1994 [4].....	12
ABB. 8: CT REKONSTRUKTION VON HW 2 MIT SAFE ZONE ZUR PLATZIERUNG DER PEDIKELSCHRAUBEN [34] 13	
ABB. 9: KLASSIFIKATION DER VAG NACH WANG ET AL., 2013[34].....	14
ABB. 10: TRANSARTIKULÄRE VERSCHRAUBUNG NACH MAGERL [37] .....	15
ABB. 11: TRANSPEDIKULÄRE VERSCHRAUBUNG HW 2 [37] .....	17
ABB. 12: ALTERSVERTEILUNG NACH GESCHLECHT.....	33
ABB. 13: OPERATIONSINDIKATIONEN.....	34
ABB. 14: AUSWERTUNG WIRBELSÄULEN-SCHMERZINTENSITÄT.....	47
ABB. 15: AUSWERTUNG EXTREMITÄTEN-SCHMERZINTENSITÄT .....	47
ABB. 16: AUSWERTUNG NEUROLOGISCHES OUTCOME ANHAND MCCORMICK-SCORE .....	48
ABB. 17: AUSWERTUNG ODOM-BEWERTUNG.....	50

# Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: EINTEILUNG DER VAG NACH WANG ET AL. 2013 [34] .....	13
TABELLE 2: KLASSIFIKATION NACH GERTZBEIN & ROBBINS [48] .....	25
TABELLE 3: KLASSIFIKATION NACH RICHTER ET AL. 2005 [49] .....	25
TABELLE 4: KLASSIFIKATION NACH BREDOW ET AL. 2016 [47] .....	25
TABELLE 5: MODIFIZIERTER MCCORMICK SCORE [56] .....	28
TABELLE 6: ODOM-KRITERIEN [54] .....	28
TABELLE 7: AUFLISTUNG MÖGLICHER KOMPLIKATIONEN .....	29
TABELLE 8: INTERVALLSKALIERTE VARIABLEN .....	31
TABELLE 9: ORDINAL- UND NOMINALSKALIERTE VARIABLEN .....	32
TABELLE 10: OPERATIONSINDIKATIONEN .....	34
TABELLE 11: PEDIKELDICKE UND PEDIKELHÖHE .....	35
TABELLE 12: PEDIKELDICKE UND PEDIKELHÖHE NACH GESCHLECHT .....	36
TABELLE 13: AUSWERTUNG DER PEDIKEL HW2 ENTSPRECHEND DER EINTEILUNG NACH WANG ET AL. ....	37
TABELLE 14: VORLIEGEN EINER HRVA .....	37
TABELLE 15: AUSWERTUNG DER OP-DAUER, RÖNTGENZEIT, DOSISFLÄCHENPRODUKT .....	38
TABELLE 16: KORRELATIONEN OP-DAUER, RÖNTGENZEIT, ANZAHL OPERierter HÖHEN, ANZAHL KOMPLIKATIONEN .....	39
TABELLE 17: ÜBERSICHT KOMPLIKATIONEN .....	40
TABELLE 18: AUSWERTUNG DER SCHRAUBENLAGE HW 2 NACH BREDOW .....	42
TABELLE 19: AUSWERTUNG DER SCHRAUBENLAGE HW 2 NACH GERTZBEIN .....	42
TABELLE 20: AUSWERTUNG DER SCHRAUBENLAGE HW 2 NACH RICHTER .....	43
TABELLE 21: VERGLEICH NAVIGIERTE MIT NICHT-NAVIGIERTER STUDIE .....	45
TABELLE 22: ODOM-KRITERIEN [54] .....	50
TABELLE 23: ANATOMISCHE PARAMETER DER PEDIKEL VON HW2 NACH XU ET AL., 1995 [64] .....	54
TABELLE 24: AUSWERTUNG RÖNTGENZEIT, DOSISFLÄCHENPRODUKT .....	57
TABELLE 25: KOMPLIKATIONEN IN ZUSAMMENHANG MIT POSTERIORER CERVIKALER SCHRAUBENINSERTION IN SIEBEN STUDIEN MODIFIZIERT NACH ABUMI ET AL. [73] .....	59

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Epidemiologie und Ätiologie</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Anatomie der Halswirbelsäule</b> .....	<b>5</b>
<b>1.3 Verletzungen des kranio-zervikalen Übergangs (KZÜ)</b> .....	<b>9</b>
<b>1.5 Operationsverfahren</b> .....	<b>14</b>
<b>1.6 Spinale Navigationsverfahren</b> .....	<b>18</b>
<b>1.7 Fragestellung / Studienziele</b> .....	<b>21</b>
<b>2. Material und Methoden</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Studiendesign</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2 Patientenkollektiv und Einschlusskriterien</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3 Ausschlusskriterien</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4 Auswertung der postoperativen CT-Bilder</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5 Klinische Beurteilung</b> .....	<b>26</b>
<b>2.6 Statistische Auswertung</b> .....	<b>30</b>
<b>3. Ergebnisse</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1 Charakterisierung des Patientenkollektivs</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1.2 Operationsindikation</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1.3 Charakterisierung der Pedikel</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.4 Dorsale Instrumentierung</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1.5 Klassifikation Wang und HRVA</b> .....	<b>37</b>
<b>3.1.6 Operationsdauer und Röntgenzeit</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1.7 Krankenhausverweildauer</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2 Komplikationen</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3 Bewertung der Schraubenlage</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3.1 Bewertung nach Bredow, Gertzbein und Richter</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3.2 Bewertung Schraubenlage HRVA</b> .....	<b>44</b>
<b>3.3.3 Vergleich Schraubenlage zwischen navigierten und nicht-navigierten Verfahren</b> .....	<b>44</b>
<b>3.4 Auswertung Klinik (Schmerz, Neurologie, Vaskulär)</b> .....	<b>46</b>
<b>3.4.1 visuelle Analogskala Schmerz</b> .....	<b>46</b>
<b>3.4.2 Neurologisches Outcome</b> .....	<b>48</b>
<b>3.4.3 Vaskuläres Outcome</b> .....	<b>49</b>
<b>4. Diskussion</b> .....	<b>51</b>
<b>4.1 Zielsetzung</b> .....	<b>51</b>
<b>4.2 Vergleich navigierter und nicht-navigierter Verfahren</b> .....	<b>51</b>
<b>4.3 Traumatische Verletzungen</b> .....	<b>53</b>
<b>4.4 Anatomie der Pedikel</b> .....	<b>54</b>
<b>4.5 HRVA</b> .....	<b>55</b>
<b>4.6 Strahlenbelastung</b> .....	<b>56</b>
<b>4.7 Komplikationen / Revisionen</b> .....	<b>58</b>
<b>4.8 Zukunftsausblick</b> .....	<b>59</b>

<b>4.10 Fazit.....</b>	<b>61</b>
<b>5. Literatur – und Quellenverzeichnis .....</b>	<b>62</b>
<b>6. Danksagung .....</b>	<b>69</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Epidemiologie und Ätiologie

Der kraniozervikale Übergang (KZÜ), der die Gelenke vom Okziput (HWK 0), über den Atlas bis zum Segment HWK 2/HWK 3 umfasst, stellt eine komplexe anatomische Region dar, bei der vielfältige Pathomechanismen zu Hypermobilitäten und Instabilitäten führen können. Insbesondere durch die von Natur aus große Mobilität des KZÜ im dreidimensionalen Raum werden oftmals operative Stabilisierungsverfahren bei den unterschiedlichen Krankheitsbildern nötig. Zu diesen zählen unter anderem neben traumatischen Verletzungen, degenerative und chronisch-entzündliche Prozesse sowie Tumore und kongenitale Läsionen. Wie häufig es einer operativen Stabilisierung bedarf, variiert jedoch deutlich zwischen den Erkrankungen. Die Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Krankheitsbilder am kraniozervikalen Übergang mit operativer Stabilisierungsnotwendigkeit bei Erwachsenen, die auf Daten von Gluf et al. 2005 [1] beruht. Beim Erwachsenen sind traumatische Verletzungen mit ca. 80% und die rheumatoide Arthritis mit ca. 60% somit die häufigsten Ursachen, die zu einer Operation führen. Aus diesem Grund wurde auch für dieses Forschungsvorhaben das Patientenkollektiv auf die unterschiedlichen obengenannten Entitäten hin untersucht.

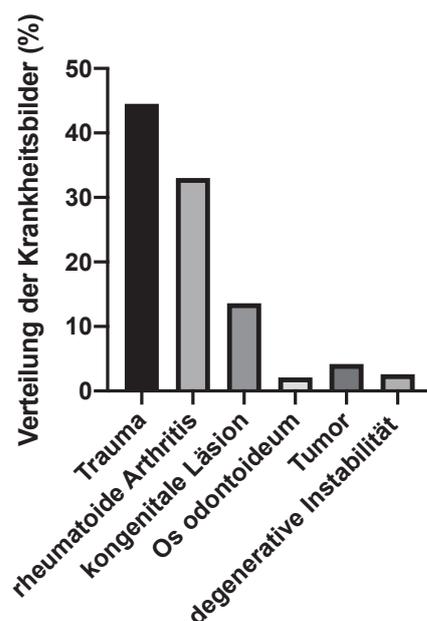


Abb. 1: Verteilung der Krankheitsbilder am kranio-zervikalen Übergang mit operativer Stabilisierungsnotwendigkeit modifiziert nach Gluf et al, 2005 [1]

## Trauma

Verletzungen der Wirbelsäule und des Rückenmarks sind relativ häufig und ihre Inzidenz in den Industrieländern beziffert sich auf ca. 60/100000 Einwohner/Jahr, wovon 25-40% mit neurologischen Störungen einhergehen. Männer sind dabei im Vergleich zu Frauen doppelt so häufig von traumatischen Verletzungen betroffen [2].

Als Hauptunfallursache für Verletzungen der Halswirbelsäule gelten laut einer Untersuchung von Fredø et al. Verkehrsunfälle und Stürze aus großer Höhe wobei ca. 30% der Verletzungen auf den oberen Abschnitt der HWS (HWK 0 bis HWK 2) entfallen [3]. Auch das Lebensalter nimmt Einfluss auf die Art der Verletzung, so dass bei jüngeren Menschen eher ligamentäre Schäden festzustellen sind, während beim älteren Patienten knöcherne Verletzungen führen [4] [3].

Es konnte beobachtet werden, dass Frakturen von HWK 2 ebenfalls mit steigendem Lebensalter zunehmen. Die Abbildung 2 nach Goldberg et al. 2001 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der HWS-Frakturen, bei der mehr als 20% alleine den Axis (Corpus und Dens) betreffen [5]. Es sollte jedoch bedacht werden, dass nicht nur Hochenergie-Traumata, sondern auch banale Sturzereignisse mit geringer Energieeinwirkung auf den Knochen bei z.B. osteoporotisch veränderter Knochensubstanz zu Frakturen führen können, so dass eine klare Abgrenzung zwischen pathologischer Fraktur und traumatischer nicht immer sicher gelingt.

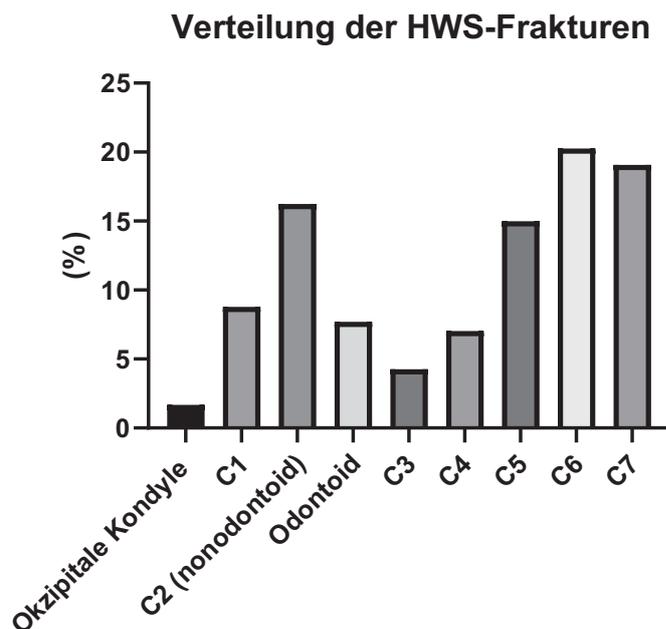


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der HWS-Frakturen nach Goldberg et al. 2001 [4]

## Degeneration

Degenerative Veränderungen der Wirbelsäule sind ein natürlicher Teil des Alterungsprozesses und häufiger Auslöser für Schmerzen und Funktionsstörungen. An der HWS finden sich der zervikale Bandscheibenvorfall, die zervikale Spondylosis, die als häufigste fortschreitende Erkrankung der alternden Halswirbelsäule erachtet wird [6] sowie die zervikale Spinalkanalstenose.

Sie alle können ursächlich für eine cervicale Myelopathie sein, die sich durch eine Funktionsstörung des jeweils betroffenen Myelonabschnittes äußert und in der Symptomatik sehr unterschiedlich ist. Frühe Symptome sind sowohl Sensibilitätsstörungen und Ungeschicklichkeiten im Sinne einer Feinmotorikstörung der Hände, als auch Gangstörungen. Im Verlauf kommt es häufig zur Muskelschwäche und auch eine spinale Ataxie und Spastik ist laut Meyer und Klekamp charakteristisch für dieses Krankheitsbild. Auch Blasen- und Mastdarmstörungen können auftreten [7]. Die cervicale Myelopathie ist der häufigste Grund für eine Para- bzw. Tetraparese, die nicht auf ein Trauma zurückzuführen ist und der Altersgipfel befindet sich zwischen der 5. und 6. Lebensdekade.

Operative Therapieverfahren zielen darauf ab durch Dekompression dem Rückenmark und seinen versorgenden Gefäßen wieder genügend Raum zu verschaffen und Instabilitäten bzw. Hypermobilitäten oder Fehlstellungen zu beseitigen [8].

## Tumor

Die Unterteilung der Tumore der Wirbelsäule erfolgt zunächst in intraspinalen Weichteiltumoren, die abhängig von der Lokalisation des Tumors weiter in intramedulläre, extramedulläre intradurale, extramedulläre mit Ausdehnung nach extradural, und rein extradurale unterschieden werden können sowie knöcherne Tumore. Bei den knöchernen Tumoren der Wirbelsäule wird wiederum zwischen primären Knochentumoren (z.B. Osteoidosteom oder Osteosarkom) und spinalen Metastasen unterschieden [9].

Insgesamt betrachtet stellen extradurale spinale Wirbelsäulenmetastasen solider Tumore die häufigste Entität der Wirbelsäulentumoren dar. Sie kommen etwa 40 mal so häufig wie primäre Läsionen vor, so dass im Weiteren die primär knöchernen Tumore, die laut Meyer und Pitzen [10] eine Rarität, sind sowie andere Tumore des ZNS vernachlässigt werden [11]. Laut Marquardt et al. entwickeln 70-85% aller Krebspatienten Skelettmetastasen, wovon 30-70% die Wirbelsäule betreffen.

Schätzungsweise 85% dieser sekundären Läsionen sind Folge eines Brustkrebs, Lungenkarzinoms, Prostatakarzinoms, Schilddrüsenkrebs oder Nierenzellkarzinoms [12]. Während die Brustwirbelsäule und die LWS mit je 60% bzw. 30% besonders häufig betroffen sind, so sind nur etwa 10% der spinalen Metastasen in der HWS lokalisiert.

Klinisch imponiert der lokalisierte Rückenschmerz, der durch Mikro- und Makrofrakturen der Wirbelkörper bedingt ist, sowie radikuläre Schmerzen, wenn die Nervenwurzel mitbeteiligt ist. Ein operatives Therapieverfahren wird in der Regel bei neurologischen Defiziten und spinaler Instabilität aufgrund von z.B. pathologischen Frakturen gewählt, sofern der Patient sich nicht in der Endphase der Erkrankung befindet und ein Eingriff in ein ungünstiges Nutzen-Risiko Verhältnis für den Patienten bedeuten würde. Die Schmerzen alleine lassen sich sonst häufig gut mit einer medikamentösen und/oder der Strahlentherapie beherrschen [10].

#### Chronisch-entzündliche Erkrankungen (RA und Spondylitis ankylosans)

Bei der rheumatoiden Arthritis (RA), die zu den chronisch entzündlichen Erkrankungen zählt und eine systemische Autoimmunerkrankung darstellt, kommt es aufgrund des chronischen Entzündungsprozesses zur Destruktion der Gelenke. An der Wirbelsäule ist insbesondere die HWS betroffen. Durch die entzündliche Proliferation der Synovialis wird im Atlantoaxialgelenk der Bandapparat so zerstört, dass eine vermehrte Beweglichkeit zwischen Atlas und Axis entsteht (atlanto-axiale Subluxation), die auch eine knöcherne Destruktion des Atlas zur Folge haben kann. Auch an der subaxialen HWS führt die Erkrankung zur Zerstörung der Facetten- und Uncovertebralgelenke und sorgt somit für eine verstärkte Gleitbewegung oder auch zur Fusion von einzelnen Segmenten. Die Gefahr der Ausbildung einer zervikalen Myelopathie besteht in allen Krankheitsstadien und die Prognose einer klinisch manifesten Myelopathie ohne operativen Eingriff ist schlecht [13].

In Deutschland leben ca. 800 000 Patienten mit RA und der Anteil der Frauen an dieser Erkrankung ist etwa dreimal so hoch. Laut Kothe und Winking liegt bei Rheumapatienten zudem deutlich häufiger eine *high riding vertebral artery*, also eine Erweiterung der Vertebralisfurche, vor als in einem vergleichbaren Normalkollektiv, was für die Planung und Durchführung eines operativen Eingriffs relevant ist [14].

### Axiale Spondylarthritis (Morbus Bechterew)

Auch die axiale Spondylarthritis ist eine Erkrankung aus dem rheumatischen Formenkreis und manifestiert sich häufig als erstes am Sacroiliakgelenk und den Sehnenansätzen. Im späteren Verlauf kommt es aufgrund der kyphotischen Fehlstellungen der Brustwirbelsäule zur kompensatorischen HWS-Hyper-Lordose. Durch die Entzündungsprozesse am gelenknahen Knochen entsteht zunächst eine Osteopenie, die das Frakturrisiko stark begünstigt, zudem sind viele Patienten auch von Osteoporose betroffen. Im fortgeschrittenen Krankheitsstadium ossifiziert das fibrotisch umgebaute Gewebe, so dass die Gelenke vollständig überbrückt werden und sich im Röntgen der charakteristische „Bambusstab“ zeigt. Frakturen finden sich insbesondere an der unteren HWS und dem cervikothorakalen Übergang, aber auch isolierte Frakturen des Dens axis nach Trauma sind keine Seltenheit [15]. Die operative Versorgung wird gegenüber der konservativen Therapie in diesen Fällen aufgrund der verminderten Knochenqualität in der Regel bevorzugt. Die Prävalenz der Spondylitis ankylosans beträgt in Deutschland zwischen 0.3 und 0.5% und bei 80% der Patienten liegt der Krankheitsbeginn zwischen dem 15. und 40. Lebensjahr. Männer erkranken doppelt so häufig wie Frauen, zudem ist eine Assoziation der Erkrankung mit dem Antigen HLA-B27 nachgewiesen [16].

## **1.2 Anatomie der Halswirbelsäule**

Im Folgenden wird der knöcherne Aufbau der Halswirbelsäule mit seinem Bandapparat und seiner Funktionsweise sowie der Verlauf der Arteria vertebralis mit ihren Besonderheiten kurz erläutert.

### Aufbau der oberen HWS

Die Halswirbelsäule besteht aus insgesamt 7 Halswirbeln, die sich grundsätzlich in ihrem knöchernen Aufbau ähneln. Aufgrund der anatomischen Besonderheiten, die beim ersten und zweiten Halswirbel, Atlas und Axis, bestehen und ihrer besonderen Funktionsweise, wird die Halswirbelsäule in eine obere und eine untere Halswirbelsäule aufgeteilt.

Die untere HWS (HW 3 – HW 7) wird auch als subaxiale HWS bezeichnet. Beim knöchernen Aufbau des Atlas fällt auf, dass er keinen Wirbelkörper besitzt, sondern

aus zwei Halbbögen aufgebaut ist, die über die Massae laterales seitlich miteinander verbunden sind.

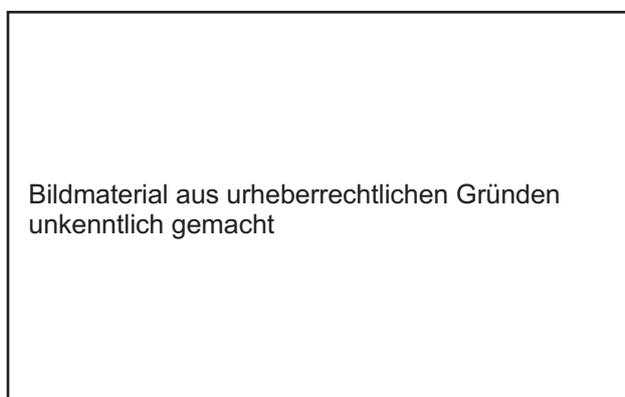
Auf der Oberseite artikuliert der Atlasbogen mit den Condylen des Okziputs. Dieses Atlantooccipitalgelenk entspricht einem Elipsoidgelenk, das fast ausschließlich eine Nickbewegung zulässt [17].

Am hinteren Atlasbogen findet sich in der Mitte das Tuberculum posterius, vergleichbar mit einem rudimentären Dornfortsatz und auf der gegenüberliegenden Seite findet sich das Tuberculum anterius. An dessen Innenseite artikuliert der Atlas mit dem Dens axis, einem nach cranial ziehenden Ausläufer des Wirbelkörper des zweiten Halswirbels.

Der Dens axis wird über mehrere Bandstrukturen, den Ligg. alaria und dem Lig. transversum atlantis in seiner Position gesichert und bildet so mit dem Atlas das Atlantoaxialgelenk aus. Dieses Gelenk stellt ein Zapfengelenk dar und ermöglicht die Rotation des Kopfes in beide Richtungen.

Der Axis ist wie in der Abbildung 3 dargestellt aus einem Wirbelkörper mit nach cranial auslaufendem Dens axis, dem Arcus vertebrae, der sich aus den Laminae arcus vertebrae und Pediculi arcus vertebrae bildet sowie dem Processus spinosus und den beiden Processus transversa aufgebaut. Beide Halswirbel weisen, wie auch die subaxialen Halswirbel, jeweils lateral die Foramina transversaria auf, durch deren Öffnung die A. vertebralis nach cranial zieht. Zusätzlich findet sich am hinteren Atlasbogen auf beiden Seiten der Sulcus arteriae vertebralis über den die Vertebralarterien zum Foramen magnum ziehen.

Während zwischen Atlas und Axis keine Bandscheibe existiert, so bilden der zweite und dritte Halswirbel, wie auch der Rest der subaxialen HWS, ein typisches Gelenk aus, bestehend aus Bandscheibe und klassischen Gelenkflächen [17].



**Abb. 3: Anatomie des zweiten Halswirbels [18]**

### Arteria vertebralis

Die paarige Arteria vertebralis entspringt in der Regel aus der A. subclavia der jeweiligen Seite und ziehen geschützt durch den knöchernen Kanal im Processus transversum nach cranial, um sich nach Durchtritt durch das Hinterhauptsloch zur Arteria basilaris zu vereinigen. Abgangs anomalien sind äußerst selten und werden laut Schmieder et al. mit einer Wahrscheinlichkeit von 2.4-5.8% für einen Abgang direkt aus dem Aortenbogen angegeben [19]. Eine geläufige Einteilung der Arteria vertebralis erfolgt in 4 Segmente, V1, V2, V3, V4, wobei jedes Segment durch einen Lagewechsel im Verlauf des Gefäßes markiert wird. Das V1 Segment verläuft regulär vom Abgang aus der A. subclavia bis zum Foraminis transversi des sechsten Halswirbels. Hier schließt das Segment V2 an, das sich bis zum Axis erstreckt [20]. Auf Höhe des dritten Halswirbels tritt die Vertebralisarterie beidseits aus den Foramina transversa aus, um dann von außen zu den Foramina transversa des Dens axis zu ziehen. Hiernach zieht sie fast senkrecht nach cranial zum Foraminis transversarum des Atlas (V3) und verläuft dann in einer Schlinge nach dorsal cranial zum Foramen magnum. Das Segment V4 beginnt dort, wo die beiden Vertebralarterien die Dura mater durchstoßen und sich zur Arteria basilaris vereinigen [20]. Laut Schmieder liegen jedoch in bis zu 25% der Fälle Normvarianten dieses Gefäßverlaufes vor, die für die Planung operativer Eingriffe von Relevanz sein können [17]. Zu den Varianten, die eine sichere Schraubenplatzierung erschweren, gehört die sog. *high riding vertebral artery*, die durch eine verringerte Höhe (<5mm) des Isthmus des zweiten Halswirbels bedingt wird. Die Besonderheiten der *high riding vertebral artery* werden dezidiert in Kapitel 1.4. erläutert. Darüber hinaus gibt es auch anatomische Varianten, wie die hypoplastische oder eine stark gewundene Vertebralisarterie. In Einzelfällen kann die A. vertebralis teilweise oder auch komplett außerhalb der knöchernen Strukturen verlaufen.

### Biomechanik der oberen HWS

Die Biomechanik befasst sich mit dem Aufbau und der Funktion biologischer Systeme und erforscht diese mittels physikalischer Prinzipien. Die Halswirbelsäule ist der beweglichste der drei Wirbelsäulenabschnitte, was insbesondere auf die Stellung der Gelenkflächen der Facettengelenke zurückzuführen ist. Die Freiheitsgrade sind die Inklination und Reklination, Lateralflexion und Rotation. Neben dem Tragen und der Stabilisierung des Kopfes ist eine der wichtigsten Funktionen des Atlantoaxialgelenks

die Ermöglichung der Axisrotation. Das Bewegungsausmaß der Axisrotation beträgt physiologischerweise durchschnittlich  $25^\circ$  zu beiden Seiten [21]. Dies wird durch das untere Kopfgelenk (Articulatio atlantoaxialis), das Atlas und Axis über vier Einzelgelenke verbindet und ein Zapfengelenk darstellt, ermöglicht. Damit diese Rotation gelingt muss der vordere Atlasbogen sich um das Odontoid drehen, während die ipsilaterale Massa lateralis des Atlas rückwärts und nach medial gleitet und die kontralaterale Massa lateralis nach vorne und medial gleitet [22].

Das obere Kopfgelenk (Articulatio atlantooccipitalis) ermöglicht als Ellipsoidgelenk Nickbewegungen nach vorne und hinten mit einem Bewegungsausmaß von ca.  $30^\circ$  sowie die Lateralflexion bis ca.  $10-15^\circ$ . Bei diesen beiden Gelenken handelt es sich um sogenannte echte Gelenke, da keine Zwischenwirbelscheiben existieren, was zur großen Beweglichkeit beiträgt, aber eine geringere Stabilität bedingt [23]. Für die Bewegung und Stabilisierung der Wirbelsäule generell ist ein Zusammenspiel der Gelenke, Bänder und Muskeln nötig und ihre Gesamtbeweglichkeit setzt sich aus der Summe der Einzelsegmente, auch funktionelle Wirbelsäulenabschnitte genannt, zusammen [24]. Um die Stabilität der Wirbelsäule in seiner Gesamtheit zu beschreiben wurde von Denis das 3-Säulen-Modell entwickelt, das die Wirbelsäule in eine ventrale Säule, bestehend aus dem Ligamentum longitudinale anterius und  $2/3$  des Wirbelkörpers inklusive der Bandscheibe und Vorderkante, in eine mittlere Säule, bestehend aus dem Ligamentum longitudinale posterius und dem hinteren Drittel des Wirbelkörpers inklusive der Hinterkante und des Anulus fibrosus der Bandscheibe, sowie eine dorsale Säule, bestehend aus den Wirbelbögen und Wirbelfortsätzen, den Facettengelenken und den Ligamenta supraspinale, interspinale, flavum und der Facettenkapsel, einteilt. Mit dem Modell lassen sich Verletzungen nach ihrer Stabilität einteilen. Ist lediglich die ventrale Säule betroffen, so wird hinlänglich von einer stabilen Verletzung ausgegangen. Sind jedoch zwei oder alle drei Säulen verletzt, so ist eine instabile Fraktur anzunehmen [25].

### 1.3 Verletzungen des kranio-zervikalen Übergangs (KZÜ)

Im anschließenden Abschnitt werden vier typische Frakturen des KZÜs hinsichtlich ihrer Klassifikationen erläutert und das grundsätzliche Therapieschema dargestellt.

#### Atlasfrakturen

Schätzungsweise sind bis zu 13% aller Halswirbelsäulenverletzungen Frakturen des Atlas [26]. Diese Berstungsfrakturen des Atlasrings werden nach Gehweiler in 5 Typen eingeteilt, wobei hier dem Typ 3, der sog. Jefferson-Fraktur, bei der sowohl vorderer als auch hinterer Atlasbogen gebrochen sind, besondere Bedeutung zukommt. Die Fraktur gilt als stabil, wenn das Lig. transversum atlantis intakt ist (Typ 3a). Bei instabilen Frakturen (Typ 3b) liegt eine Verletzung des Lig. transversum atlantis vor. Dies ist wichtig für die Therapieentscheidung, da Verletzungen vom Typ 3b operativ behandelt werden, während bei den anderen Frakturtypen, so lange keine zu starke Dislokation vorliegt, in der Regel konservativ mit harter Cervicalstütze vorgegangen werden kann [4].

Bildmaterial aus urheberrechtlichen Gründen unkenntlich gemacht

**Abb. 4: Klassifikation der Atlasfrakturen nach Gehweiler et al. 1983 [28]**

- a Typ 1: Fraktur des vorderen Atlasbogens
- b Typ 2: Fraktur des hinteren Atlasbogens
- c Typ 3a: Fraktur des vorderen und hinteren Atlasbogens bei intaktem Lig. transversum atlantis (stabil)
- d Typ 3b: Fraktur des vorderen und hinteren Atlasbogens mit Ruptur des Lig. transversum atlantis (instabil)
- e Typ 4: Fraktur der Massa lateralis
- f Typ 5: Verletzung des Proc. transversus

## Densfrakturen

Frakturen des Dens werden nach der Klassifikation von Anderson und D'Alonzo (1974) in drei Typen eingeteilt, wobei der Typ I, bei dem es sich um einen Bruch der Densspitze handelt, in der Regel als stabil, hingegen Typ II und III als instabil gewertet werden [28]. Densfrakturen sind allgemein betrachtet die häufigste Frakturform des zweiten Halswirbels und sind für ca. 10-15% aller Halswirbelfrakturen verantwortlich [28]. Der Typ II, der durch eine Fraktur der Basis des Dens axis gekennzeichnet ist, ist mit etwa 65-80% die häufigste Form einer Densfraktur. Aufgrund der erhöhten Gefahr einer Pseudarthrose durch Dislozierung bei diesem Typ, insbesondere beim älteren Patienten, wird in der Regel die operative Versorgung gewählt [29]. Je nach Verlauf des Frakturspalt kann dies sowohl von ventral als auch von dorsal erfolgen, wobei laut Winking durch die dorsale transartikuläre Densverschraubung die Fusionsrate höher (>90%) als durch die ventrale Verschraubung (87.1%) ist [28]. Beim Typ III verläuft die Fraktur durch den Corpus vertebrae des zweiten Halswirbels. Häufig können diese Frakturen, wie auch die des Typ I, konservativ mit einer festen Halsstütze oder besser noch mit einem Halo-Fixateur behandelt werden [29].

Bildmaterial aus urheberrechtlichen Gründen unkenntlich gemacht

### **Abb. 5: Dens Frakturen nach Anderson und D'Alonzo, 1974 [30]**

a Typ I, b Typ II, c Typ III

## Traumatische Spondylolisthese HW2/3

Bei der traumatischen Spondylolisthese handelt es sich um eine Fraktur, die transversal durch den Dens axis verläuft und nach Effendi in drei Gruppen eingeteilt wird. Es ist eine typische Hyperextensionsverletzung, wie sie häufig bei Hochrasanztraumen auftritt [28]. Der Typ I zeichnet sich durch eine kaum dislozierte (< 1mm) Isthmusfraktur aus.

Beim Typ II ist der HWK 2 mehr als 1mm nach ventral disloziert, zudem ist in der Regel die Bandscheibe zwischen zweiten und dritten Halswirbel beschädigt. Nach Levine gibt es eine Subklassifizierung des Typ II in einen Typ II bei dem die Bandscheibe

beschädigt, das vordere Längsband aber intakt ist und einen Typ IIa bei dem zusätzlich das vordere Längsband durchtrennt ist.

Der Typ III ist instabil und entspricht dem Typ II, zusätzlich sind die Facettengelenke ein- oder beidseitig luxiert [29]. Während Typ I und Typ II nach Levine in der Regel konservativ durch Ruhigstellung behandelt werden können, so sollten Typ IIa und Typ III operativ versorgt werden. In der Regel wird bei diesen Verletzungen die ventrale monosegmentale Spondylodese HW 2/3 gewählt. Für Typ-3-Verletzungen, die nicht geschlossen reponiert werden können, ist laut Kandziora et al. die dorsale Reposition mit Spondylodese HW 2/3 angebracht [4].

Bildmaterial aus urheberrechtlichen Gründen unkenntlich gemacht

**Abb. 6: Klassifikation der traumatische Spondylolisthese nach Effendi [4]**

a Typ 1: kaum dislozierte Isthmusfraktur (Dislokation <1 mm)

b Typ 2: dislozierte Isthmusfraktur (>1 mm)

c Typ 3: dislozierte Isthmusfraktur mit Luxation des Facettengelenks HW 2/3

Atypische Corpusfrakturen des Axis

Atypische Corpusfrakturen des zweiten Halswirbels sind selten und werden nach Benzel in drei Typen eingeteilt [31]. Beim Typ 1 liegt ein coronarer Frakturverlauf vor, Typ 2 zeichnet sich durch einen sagittalen Frakturverlauf aus und beim Typ 3 ist die Frakturlinie horizontal, wie auch in der Abbl. 5 dargestellt. Die Übergänge zwischen diesen Typen können fließend sein. Bei isolierten Corpusfrakturen ist häufig eine konservative Therapie durch Ruhigstellung möglich. Bei größerer Dislozierung der Fragmente oder aber auch einer Einengung der A. vertebralis muss ggf. eine operative dorsale Stabilisierung erfolgen [4].

Bildmaterial aus urheberrechtlichen Gründen unkenntlich gemacht

**Abb. 7: Einteilung der atypischen Frakturen des 2. Halswirbelkörpers (Corpusfrakturen) nach Benzel et al., 1994 [4]**

- a Typ 1: coronarer Frakturverlauf
- b Typ 2: sagittaler Frakturverlauf
- c Typ 3: horizontaler Frakturverlauf

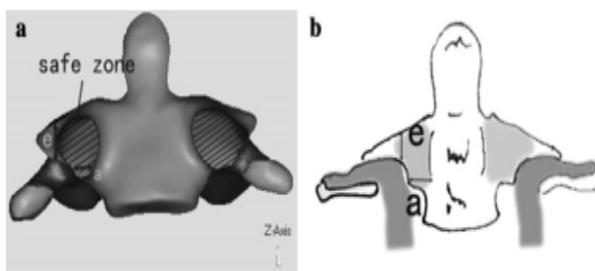
## 1.4 High riding vertebral artery

Bei Operationen am kraniozervikalen Übergang gilt es insbesondere das Vorliegen einer *high riding vertebral artery (HRVA)* besonders zu berücksichtigen, da bei Vorliegen dieser anatomischen Variation eine sichere Schraubenplatzierung, sowohl bei der transartikulären, als auch der transpedikulären Verschraubung erschwert ist. Es wird von Verletzungsraten der A. vertebralis bei posteriorer atlantoaxialer transartikulärer Verschraubung von 4.1%- 8.2% berichtet und Schätzungen für die transpedikuläre Verschraubung in HW 2, bei der es zu Gefäßverletzungen kommt variieren von 5.3 – 21% [32]. Verletzungen der A. vertebralis sind in einem Patientenkollektiv mit *HRVA* deutlich erhöht und zahlreiche anatomische Studien lassen vermuten, dass bis zu 20% der Patienten eine atlantoaxiale Anatomie vorweisen, die eine sichere Schraubenplatzierung ausschließt [33]. Daraus erwuchs die Bestrebung potentiell gefährdete Patienten präoperativ zu erkennen, um mit weiterer Diagnostik, z.B. einer CT-Angiographie ein risikoärmeres Operationsverfahren wählen zu können. Und obwohl die Gefäßdarstellung mittels CT-Angiographie ein probates und gut etabliertes Diagnostikum ist, so geht sie doch stets mit einer Kontrastmittelexposition für den Patienten und den damit verbundenen Risiken einher. Wang et al. haben eine Klassifikation aufgestellt, anhand derer an präoperativ gewonnener CT-Bildern eine vereinfachte Erkennung von *HRVAs* ermöglicht und ein individualisiertes Therapiekonzept erleichtert wird. Liegt laut Wang eine *HRVA* vor, so solle statt einer transpedikulären Schraube, die in der Regel aufgrund ihrer höheren Festigkeit und Belastbarkeit bevorzugt wird, eine translaminäre

Verschraubung in Erwägung gezogen werden. In der Literatur ist das Vorliegen einer *high riding vertebral artery* regelhaft definiert, wenn der Isthmus des zweiten Halswirbels kleiner als 5mm hoch ist und und/oder der Pedikel besonders schmal ist [32]. Die Klassifikation nach Wang unterteilt die *vertebral artery groove* (VAG) von HW 2 in 4 Typen ein, wobei Typ II einer *HRVA* gleichgesetzt wird, da hier die sog. „*safe zone*“, der Bereich, um eine transpedikuläre Schraube sicher im Pedikel zu verankern, zu gering ist [34]. Wangs Klassifikation wurde bereits in unterschiedlichen Studien zur Beurteilung von VAGs in HW 2 angewendet und gilt damit als gemeinhin verlässliche Methode [32].

**Tabelle 1: Einteilung der VAG nach Wang et al. 2013 [34]**

Typ	Kriterien	Schraube
I, weit und flach	$a > 4,5\text{mm}$ , $e > 4,5\text{mm}$	transpedikuläre Schraube
II, eng und hoch	$a < 4,5\text{mm}$ , $e < 4,5\text{mm}$	HRVA / translaminäre Schraube
III, eng und flach	$a < 4,5\text{mm}$ , $e > 4,5\text{mm}$	transpedikuläre Schraube
IV, weit und hoch	$a > 4,5\text{mm}$ , $e < 4,5\text{mm}$	transpedikuläre Schraube



**Abb. 8: CT Rekonstruktion von HW 2 mit *safe Zone* zur Platzierung der Pedikelschrauben [34]**

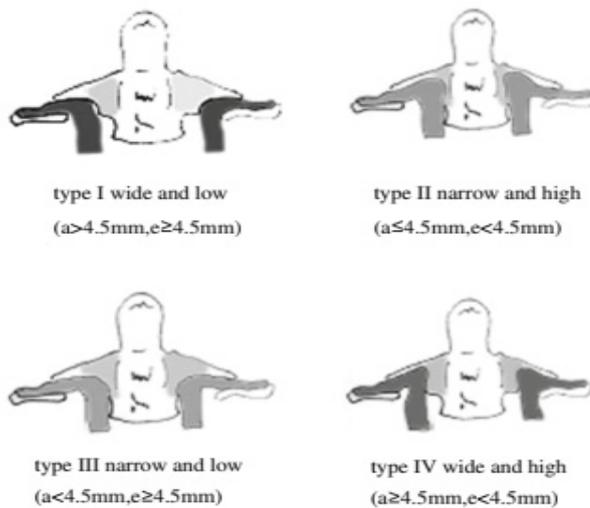


Abb. 9: Klassifikation der VAG nach Wang et al., 2013[34]

## 1.5 Operationsverfahren

Eingriffe an der HWS von dorsal erfolgen in der Regel in Bauchlagerung, wobei der Kopf des Patienten zur stabilen Fixation ohne Druckbelastung für das Gesicht in einer stabilen Kopfhaltung (in dieser Studie wurde eine Mayfield-Klemme verwendet) eingespannt ist. Auch eine Lagerung im Sitzen ist möglich, insbesondere günstig bei stark adipösen Patienten oder Patienten mit einer deutlichen HWS-Kyphose, wird aber aufgrund des erhöhten Risikos für Luftembolien selten angewandt [35]. Je nach Verletzung und Anatomie des Patienten sind unterschiedliche Operationsverfahren möglich.

Im Folgenden werden die transartikuläre atlantoaxiale Stabilisierung nach Magerl, die translaminäre sowie die transpedikuläre Verschraubung dargestellt.

### Transartikuläre atlantoaxiale Stabilisierung nach Magerl

Zu den Indikationen zur Durchführung einer transartikulären atlantoaxialen Stabilisierung nach Magerl gehören neben der atlantoaxialen Instabilität oder Luxation bei rheumatoider Arthritis, Tumoren und einem Os odontoideum, die Pseudarthrose, die durch andere Stabilisierungsverfahren oder konservative Therapie entstanden ist, Densfrakturen (insbesondere vom Typ III) und die Nonfusion von Densfrakturen. Dieses Verfahren ist sehr wirkungsvoll, um eine rigide Fixation des atlantoaxialen Komplexes zu erreichen.

Zunächst werden die dorsalen Strukturen von HW 1 und 2 sowie die Wirbelgelenke von HW 2/3 dargestellt und der mediale Isthmus von HW 2 getastet. Dann wird die Schraube mittig in den Isthmus des HW 2 eingebracht. Der Zielpunkt der Schraube ist die Massa lateralis HW 1 oberhalb des Tuberculum majus atlantis in seitlicher Projektion zur Vermeidung einer Vertebralisverletzung“ [36]. Die Bohrung und Schraubeneinbringung finden unter Durchleuchtung in zwei Ebenen statt. Anschließend wird Knochen aus dem Beckenkamm angelagert und mit Draht oder kräftigem, resorbierbarem Faden fixiert [36]. Aufgrund des individuellen Verlaufs der A. vertebralis und zur Beurteilung der Knochenqualität ist eine präoperative Bildgebung (CT oder MRT, ggf. Angiographie/MR-Angiografie) zwingend erforderlich. Laut Richter und Reith ist in 15-20% der Fälle, dieses Operationsverfahren aufgrund einer Anomalie im Verlauf der A. vertebralis nicht anwendbar [37]. Ist es intraoperativ bei der ersten Schraube zu einer Verletzung der A. vertebralis gekommen, so soll laut Börm die Gegenseite nicht operiert werden, da bei einem Verschluss beider Vertebralarterien das Mortalitätsrisiko hoch ist [36].

Bildmaterial aus urheberrechtlichen Gründen unkenntlich gemacht

**Abb. 10: Transartikuläre Verschraubung nach Magerl [37]**

### Translaminäre Verschraubung von HW 2

Bei der translaminären Verschraubung des zweiten Halswirbels, die 2004 von Wright eingeführt wurde, liegt der Eintrittspunkt für die gekreuzt anzulegenden Laminaschrauben im Übergang von der jeweils gegenseitigen Lamina zum Processus spinosus. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die beiden Schrauben aneinander vorbei passen müssen [38]. Ansonsten stellt dieses technisch weniger anspruchsvolle Verfahren eine gute Alternative zur transpedikulären HW 2 Verschraubung dar und geht mit einem deutlich geringeren Risiko für die Verletzung der A. vertebralis einher.

Von Nachteil ist, „dass der HW 2-Bogen bei [solchen] HW 1/2 -Instrumentationen für die Spondylodese nicht so gut langstreckig spongiös angefrischt werden kann, da man sonst ein Ausreißen der Schrauben aus der Lamina riskiert“ [38]. Daher stellen sehr schmale Laminae von weniger als 3.5mm auch eine Kontraindikation für dieses Verfahren dar. Zu den Indikationen für das Einbringen von translaminären Schrauben in den Axis gehören die atlantoaxiale Instabilität, Pseudarthrosen, nicht konservativ oder von anterior versorgbare Densfrakturen bzw. Nonfusion von Densfrakturen.

### Transpedikuläre Verschraubung der HWS

Die Stabilisierung mittels Pedikelschrauben findet aufgrund der hohen Primärstabilität bei Verwendung von winkelstabilen Implantaten an der gesamten Wirbelsäule Anwendung. Auch wenn an der HWS gerade die Pedikel von HW 3-5 besonders grazil sind und somit das Risiko für Schraubenfehllagen hier erhöht ist. In den Segmenten HW 2, HW 6 und HW 7 sind die anatomischen Verhältnisse dagegen günstiger für die Platzierung von Pedikelschrauben, so dass die Rate der Schraubenfehlplatzierungen vergleichbar mit der in den anderen Wirbelsäulenabschnitten ist [39]. Jedoch kann insbesondere der zum Teil variable Verlauf der Arteria vertebralis eine sichere Schraubenplatzierung im HW 2 deutlich erschweren. Beim Vorliegen einer *high riding vertebral artery* gilt es deshalb besonders sorgfältig abzuwägen, ob nicht präoperativ weitere Diagnostik z.B. eine CT Angiographie erfolgen sollte. Hierzu haben Wang et al. eine Klassifikation aufgestellt, die es anhand der Auswertung von präoperativen CT Bildern vereinfacht, eine *high riding artery* präoperativ zu detektieren und ggf. weitere Bildgebung anzuschließen bzw. ein anderes Stabilisierungsverfahren auszuwählen. Für die sichere Platzierung der Pedikelschrauben müssen neben der guten Kenntnis der anatomischen Landmarken, intraoperativ die Lagekontrolle mittels Röntgen in zwei Ebenen erfolgen. Hierbei gilt es insbesondere den Durchmesser der Pedikel, den Eintrittspunkt, die Richtung der transversalen und sagittalen Ebene, die Schraubenlänge und Knochendichte zu berücksichtigen [40].

Bei atlantoaxialen Instabilitäten kann auch die HW 1/2 Verschraubung nach Harms als Alternative zur transartikulären Verschraubung gewählt werden. Hierbei werden Schrauben in die Massae laterales des Atlas eingebracht und eine Stabverbindung zu den Pedikelschrauben im HW 2 erstellt. Der Eintrittspunkt für die HW 2-

Pedikelschraube liegt dabei in der Pars interarticularis, im oberen medialen Quadranten. Die Trajektorie ist dabei 20-30° konvergierend und nach kranialwärts gerichtet. Nach Anbringung der Stabverbindung zwischen HW 1 und HW 2 wird Beckenkammpongiosa auf die angefrischten HW 1 und HW 2-Bögen angelagert sowie ein Beckenkammspan zwischen dem Bogen von HW 1 und HW 2 eingesetzt [41].

Vorteile dieses Verfahrens im Vergleich zur transartikulären atlantoaxialen Stabilisierung sind zum einen ein geringeres Verletzungsrisiko der A. vertebralis, das Atlantoaxialgelenk bleibt intakt und ein intakter hinterer Atlasbogen ist für die sichere Stabilität nicht notwendig. Zum anderen kann aufgrund der separaten Instrumentierung von HW 1 und HW 2 besser auf anatomische Varianten eingegangen werden [41]. Zusätzlich kann Knochenmaterial gut angelagert werden.

Bildmaterial aus urheberrechtlichen Gründen unkenntlich gemacht

**Abb. 11: Transpedikuläre Verschraubung HW 2 [37]**

### Pedikelschrauben

Pedikelschrauben, die in HWK 2 eingebracht werden haben in der Regel einen Durchmesser von 3.5mm und sind selbstschneidend. Sie sind entweder monoaxial oder polyaxial, das heißt, dass der Schraubenkopf bei polyaxialen Schrauben beweglich ist, um im Anschluss flexibel mit dem Stabsystem verbunden werden zu können. Die Länge der Schrauben variiert zwischen 14mm und 36mm, abhängig von der jeweiligen Anatomie und der Größe des Frakturspaltes, den es zu überwinden gilt. Als Material findet sich in der Regel Titan oder Titanlegierungen.

## 1.6 Spinale Navigationsverfahren

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Navigationsverfahren, die für Wirbelsäulenoperationen klinisch etabliert sind sowie ihre Vor- und Nachteile beschrieben. Während die Verfahren zuerst bei Operationen der lumbalen Wirbelsäule Einzug gehalten haben, so werden diese jetzt auch vermehrt bei Eingriffen an der Halswirbelsäule mit ihrer komplexen Anatomie verwendet.

Computergestützte chirurgische Interventionen haben zunächst in der kranialen Neurochirurgie Einzug gehalten und sind dort inzwischen fest etabliert. Seit Anfang der 1990er, mit Zunahme der Fortentwicklung der rahmenlosen Stereotaxie, entwickelte sich ein rapide wachsendes Forschungs- und Anwendungsfeld auch für die spinale Navigation, die jedoch bis heute in ihrer klinischen Bedeutung der kranialen Navigation unterlegen ist [42].

Bei der spinalen Navigation existieren im Prinzip drei unterschiedliche Navigationsverfahren. Die zweidimensionale virtuelle Fluoroskopie, die aber aufgrund der fehlenden axialen Schicht keinen zusätzlichen Informationsgewinn für die Platzierung der Schrauben bringt aber intraoperativ angewendet werden kann; die CT-basierte dreidimensionale Navigation und die Röntgen-basierte Navigation mit rotierenden Bildwandlern.

Eines der klassischen Verfahren, die CT-basierte dreidimensionale Navigation, beruht auf der Erstellung eines dreidimensionalen Datensatzes anhand eines präoperativ erstellten CT-Bildes. Intraoperativ wird dann durch die Verwendung von Referenzklemmen, die an den entsprechenden Wirbelkörpern fixiert werden, ein Abgleich zwischen dem realen und virtuellen Situs erzeugt. Hierzu gibt es unterschiedliche Techniken des Referenzierens, zum einen das sogenannte *paired point matching*, das *surface* oder *regional matching* und das *Fluoro-3D-CT-matching*. Beim *paired point matching* werden zunächst am virtuellen Bild spezifische, anatomische Punkte festgelegt, die dann am Patienten abgetastet werden. Hierzu muss die Wirbelsäule entsprechend freigelegt werden und eine möglichst exakte Übereinstimmung von virtuellem und realen Punkt vorliegen, um die Fehlerquote zu minimieren. Schröder und Börm beschreiben dieses Verfahren als „zwar sicheres und technisch wenig aufwendiges, aber fehlerbehaftetes Verfahren“ [42]. Bei der Verwendung von *regional matching* wird vom Navigationssystem ein 3D Model der Wirbelsäule erstellt und zufällig gewählte Oberflächenpunkte werden dem System präsentiert. Die so erzeugte Punktwolke wird von der Software dann mit dem

entsprechenden Abschnitt auf dem 3D Modell in Übereinstimmung gebracht. Das *Fluoro-3D-CT-matching* ist eine Methode, bei der aus einem präoperativ erstellten CT-Bild mit spinaler 3D Rekonstruktion mit intraoperativ gewonnenen 2D Durchleuchtungsbildern abgeglichen wird und die Software aus diesen Daten die Position des 3D-Modells bestimmt [43].

Ein großer Nachteil der präoperativen CT-basierten Navigation ist die Tatsache, dass die initialen CT-Bilder in der Regel in Rückenlage des Patienten gewonnen werden, der Patient für den operativen Eingriff an der Wirbelsäule aber in Bauchlage gelagert wird. Dies birgt die Gefahr, dass eine Verzerrung im Hinblick auf die tatsächlichen anatomischen Verhältnisse erfolgt. Um diese Verzerrung auszugleichen, müssen insbesondere bei multisegmentaler Instrumentierung, entsprechend viele Registrierungen zum Abgleich der realen mit der virtuellen Welt durchgeführt werden. Die Genauigkeit dieses Navigationsverfahren hängt somit stark von der Genauigkeit der initialen Registrierung ab und wird unter anderem maßgeblich auch durch die Erfahrung des Anwenders mitbeeinflusst [43].

Die Navigation mit rotierenden Bildwandlern (Iso C 3D oder O-Arm) nutzt die intraoperativ gewonnen Bilddaten, die direkt in die Navigationssoftware eingespielt und in einen 3D Datensatz umgewandelt werden, zur Navigation und erfordert kein manuelles *matching*. Dieses Verfahren ist zeitlich sehr effizient, erlaubt eine schnelle intraoperative Implantatkontrolle, erfordert aber auch höhere Investitionen [42].

Zudem ist der Einsatz von mobilen, intraoperativen CT-Scannern mit integrierter 3D Navigation (iCT) auf dem Vormarsch. Laut einer prospektiven Studie von Navarro-Ramirez et al. soll diese sogenannte *total navigation* die Wirbelsäulen Chirurgie deutlich sicherer und präziser machen sowie die Strahlenbelastung für das Operationsteam reduzieren können [44]. Ein weiterer Vorteil der iCT ist laut Kothe und Richter die exzellente Bildqualität, die insbesondere an der HWS mit ihrer komplexen Anatomie sinnvoll ist, da gerade bei der beliebten Navigation mit rotierenden 3D Bildwandlern eine mangelnde Detailschärfe bei komplexen anatomischen Verhältnissen (z. B. rheumatoide Arthritis) zu beanstanden ist [45].

Bei allen Verfahren, die mit Referenzklemmen und sogenannten *tracking tools* arbeiten, entsteht im OP-Gebiet, selbst bei großzügiger Freilegung, eine Konkurrenzsituation zwischen optimaler Referenzierung und Schraubenapplikation,

da je dichter der Einsatz von Referenzklemmen, desto geringer der Platz für die optimale Einbringung der Schrauben ist. Zudem besteht grundsätzlich die Gefahr, dass die Klemmen durch die Arbeit im Operationsgebiet verrutschen und eine Wiederholung des Referenzierungsvorgangs nötig wird. Schröder und Börm nennen als weitere Problematik die „Scheinsicherheit“, die gerade beim unerfahrenen Operateur durch den kontinuierlichen Blick auf den virtuellen Situs entsteht. Auch erfahrene Wirbelsäulenchirurgen bedürfen einer Lernkurve bis die Technik und Interpretation der virtuellen Bilder sicher beherrscht werden. Untersuchungen von Arand, 2002 und Herz et al., 2003 zeigten, dass ein zusätzlicher Zeitaufwand von 8-14 Minuten pro Wirbelkörper bei Verwendung von manuellem *matching* entsteht, der in der Lernkurve auch höher sein kann [42].

Viele Arbeiten haben sich systematisch mit der Frage bzgl. der Genauigkeit der Schraubenlage zwischen navigierter und nicht-navigierter posteriorer Instrumentierung beschäftigt und Vergleiche zeigen, dass die Genauigkeit in der Schraubenapplikation bei Verwendung von Navigationssystemen höher liegt. Verma et al. haben hierzu eine Meta-Analyse mit 23 Studien zum Thema dorsale Schraubenplatzierung in der Halswirbelsäule, als auch Brust- und Lendenwirbelsäule, ausgewertet und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass beim Einsatz von Navigationssystemen 93.3% der platzierten Schrauben im Vergleich zu 84.7% ohne Navigation mit hoher Genauigkeit appliziert wurden [46]. Bei der Frage, ob sich dies auch in einen Benefit für den Patienten hinsichtlich des klinischen Outcomes übersetzen lässt, ist hingegen keine klare Aussage zu treffen. Bei der Auswertung gab es zwar bei den Navigierten keine neurologischen Komplikationen, im Gegensatz zu den Nicht-navigierten, wo es in 2.3% der Fälle zu neurologischen Komplikationen gekommen ist. Dieses Ergebnis war jedoch statistisch nicht signifikant, so dass Ringel et al. die Empfehlung aussprechen in künftigen Studien nicht nur die bildbasierte Genauigkeit zu bewerten, sondern verstärkt das klinische Outcome in den Vordergrund zu stellen [43].

## 1.7 Fragestellung / Studienziele

Ziel dieser retrospektiven Arbeit ist einerseits die Qualitätskontrolle des hauseigenen Operationsverfahren sowie der Fragestellung nachzugehen, ob eine intraoperative Orientierung anhand anatomischer Landmarken in Kombination mit konventionellem Röntgen gleich gute Ergebnisse in Hinblick auf Genauigkeit der Schraubenlage und Patientensicherheit im Vergleich zu navigierten Verfahren erzielt. Hierzu wird zum einen das eigene Patientenkollektiv auf untengenannte Parameter untersucht, sowie die Ergebnisse mit ausgewählten navigierten Studien mit einem vergleichbaren Patientenkollektiv verglichen. Als Aspekte, die zur Beurteilung der Patientensicherheit herangezogen werden, werden zum einen neurologische und vaskuläre Komplikationen, die im Zusammenhang mit dem operativen Eingriff stehen sowie das generelle Outcome der Patienten. Ein weiteres Augenmerk liegt auf der in der Diskussion bisher wenig beachteten anatomischen Besonderheiten wie dem Vorhandensein einer *high riding vertebral artery (HRVA)* und daraus möglicherweise resultierenden Komplikationen intra- und postoperativ.

Im Folgenden sollen untengenannte Fragen und Problematiken genauer beleuchtet werden:

- Wie hoch ist die Genauigkeit (Accuracy Kriterium <2mm) der Schraubenlage bei nicht-navigierten Eingriffen? Wie hoch ist unter Umständen die Abweichung der Ergebnisse im Vergleich zur internationalen Literatur bei navigierten und bei nicht-navigierten Eingriffen?
- Gibt es einen signifikanten Unterschied in der Häufigkeit von neurologischen und vaskulären Komplikationen bei nicht-navigierten Eingriffen im Vergleich zu navigierten Eingriffen?
- Beeinflusst das Vorliegen einer *high riding vertebral artery* die Genauigkeit der Schraubenlage?
- Erhöht sich die Rate der vaskulären und neurologischen Schäden sowie der Revisions-OP aufgrund von Schraubenfehlage beim Vorliegen einer *high riding vertebral artery*?
- Wird die Genauigkeit der Schraubenlage von Höhe und Dicke des Pedikels beeinflusst?

## **2. Material und Methoden**

### **2.1 Studiendesign**

Es handelt sich hierbei um eine retrospektive Arbeit, die alle Patienten untersucht, die im Zeitraum vom 01.01.2008 bis 01.02.2018 in der Neurochirurgischen Klinik des Universitätsklinikums der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf aufgrund einer Instabilität der oberen (kraniozervikaler Übergang) und/oder der mittleren Halswirbelsäule operativ versorgt wurden.

Die zur Auswertung genutzten Patientendaten entstammen dem klinikinternen digitalen Krankenhausarchiv Pegasos, den elektronischen Patientendatenbanksystemen Medico und WPO sowie dem PACS-System für radiologische Bildgebung. Bei den ausgewerteten Dokumenten handelt es sich vornehmlich um stationäre Entlassungsbriefe, Operationsberichte, ambulante Verlaufsdokumente sowie postoperative CT-Bilder. Die erhobenen Daten wurden mittels Microsoft Excel in pseudonymisierter Form gespeichert und anschließend mit Hilfe des Statistikprogrammes SPSS ausgewertet.

Die Studie ist von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf geprüft und genehmigt worden. (Studiennummer: 2018-34-RetroDEuA 08.06.2018)

### **2.2 Patientenkollektiv und Einschlusskriterien**

Das Patientenkollektiv dieser retrospektiven Studie setzt sich aus Patienten zusammen, die aufgrund einer Instabilität der oberen (kraniozervikaler Übergang) und/oder mittleren Halswirbelsäule eine dorsale Stabilisierung erhielten. Eines der Einschlusskriterien besagt, dass mindestens eine Schraube transpedikulär in den zweiten Halswirbelkörper eingebracht worden sein muss. Zu den ursächlichen Krankheitsbildern, die einer operativen Versorgung bedurften zählen traumatische Verletzungen, pathologische Frakturen im Rahmen von Tumorgeschehen oder Osteoporose, degenerative Veränderungen, insbesondere die Spinalkanalstenose sowie Instabilitäten durch entzündlich bedingte Prozesse bei chronisch-entzündlichen Grunderkrankungen, wie der rheumatoiden Arthritis oder der Spondylitis ankylosans (Morbus Bechterew).

Insgesamt wurden 39 Patienten, davon 21 Frauen und 18 Männer mit einem Durchschnittsalter von 67.1 Jahren (18 – 84 Jahre) in die Studie eingeschlossen.

### **2.3 Ausschlusskriterien**

Patienten, die zwar eine HWK-2 Fraktur bzw. Instabilität in diesem Segment aufwiesen, jedoch nicht mit einer transpedikulären Schraube, sondern transartikulär, translaminär oder ausschließlich von ventral versorgt wurden, sind nicht in die Studie mitaufgenommen worden. Ebenso wurden Patienten ausgeschlossen deren operative Versorgung zwar durch die Neurochirurgische Klinik erfolgte, die aber nicht in die Teilnahme an dieser Studie eingewilligt haben.

### **2.4 Auswertung der postoperativen CT-Bilder**

Neben der systematischen Auswertung der klinischen Patientendaten wurde auch das radiologische Bildmaterial erfasst. Dazu wurden die postoperativen CT-Bilder zunächst im digitalen Bildarchivierungs- und Kommunikationssystem PACS (Picture Archiving and Communication System) gesichtet und anschließend in pseudonymisierter und geblindeter Form dreimal ausgewertet. Die Auswertung bestand sowohl aus der Vermessung der Pedikel des Axis in der sagittalen, transversalen und koronaren Ebene um die Dicke und Höhe der Pedikel zu bestimmen, als auch der Bestimmung des *vertebral artery groove* (VAG) zur Einteilung in die 4 Typen nach Wang et al. (Siehe Tab.1) Der Typ II wird hierbei mit dem Vorliegen einer *high riding vertebral artery* gleichgesetzt. Dadurch wird anatomisch die Knochenstruktur, die für eine Pedikelschraube benötigt wird, deutlich reduziert. Aufgrund der Enge und Nähe zum Spinalkanal sowie des Verlaufs der Arteria vertebralis besteht laut Wang et al. daher bei diesem Typ die Gefahr, dass es beim Verwenden von Pedikelschrauben häufiger zum Durchbrechen des Pedikels komme und somit eine erhöhte Verletzungsgefahr für Gefäße und/oder Rückenmark bestehe [34]. Entsprechend der Angaben Wangs et al. wurden die HWK 2 aller 39 Patienten vermessen und in die Typen I, II, III und IV eingeteilt.

Zur Beurteilung der Schraubenlage wurden unterschiedliche Klassifikationsverfahren angewendet, die sich in ihrer Struktur und Bewertungsgrundlage allerdings ähneln.

Gertzbein und Robbins Klassifikation aus den 1970er Jahren ist ein weitverbreiteter und gut etablierter Score zur Evaluation der Schraubenplatzierung, wurde aber ursprünglich für die Brust- und Lendenwirbelsäule entwickelt [47]. Die Einteilung nach Gertzbein und Robbins, die in Tabelle 2 dargestellt ist, besteht aus 5 Abstufungen, wobei Grad A keiner Überschreitung der Pedikelgrenzen entspricht und Grad E einer Pedikelperforation von mehr als 6mm [48]. Dazwischen sind die Abstufungen um jeweils 2mm festgelegt. In der Literatur werden Pedikelperforationen bis 2 mm (Grad A und B nach Gertzbein und Robbins) als akzeptabel beurteilt [47].

Auch Richter et al. haben ein Klassifikationssystem etabliert bei dem die Pedikelperforation in drei Gruppen unterteilt wird (siehe Tabelle 3). Hier entspricht Gruppe 1 einer korrekten Schraubenlage ohne Perforation oder mit Perforation bis zu 1mm, der Gruppe 2 werden alle Pedikelperforationen größer 1mm zugeordnet, die keiner Revision bedurften und in Gruppe 3 sind alle die eingeteilt, die eine Abweichung von mehr als 1mm aufwiesen und eine Korrektur aufgrund von Nervenverletzung oder reduzierter biomechanischer Stabilität erfolgte [49]. Als weiteres Verfahren zur Beurteilung der Genauigkeit der Schraubenlage wurde die Klassifikation von Bredow et al. genutzt, die speziell für die Halswirbelsäule entwickelt wurde und eine Modifizierung der Klassifikation von Gertzbein und Robbins darstellt [47]. Diese Klassifikation ist in Tabelle 4 abgebildet.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Bewertung der Schraubenlage im Dens axis, aber auch Fehllagen in anderen Segmenten wurden miterfasst, um ein ganzheitliches Bild zu erzeugen.

Sofern die Angaben, wie Länge und Durchmesser zu den verwendeten Schrauben nicht eindeutig dem Operationsbericht bzw. Operationsprotokoll zu entnehmen waren, wurden diese ebenfalls anhand der CT-Bilder vermessen und dokumentiert.

**Tabelle 2: Klassifikation nach Gertzbein & Robbins [48]**

<b>Klassifikation Gertzbein &amp; Robbins</b>	
Grad A	Keine Überschreitung der Pedikelgrenzen
Grad B	Pedikelperforation 0.1 – 2 mm
Grad C	Pedikelperforation 2.1 – 4 mm
Grad D	Pedikelperforation 4.1 – 6 mm
Grad E	Pedikelperforation >6 mm

**Tabelle 3: Klassifikation nach Richter et al. 2005 [49]**

<b>Klassifikation Richter et al.</b>	
Group 1	keine Pedikelperforation oder <1mm
Group 2	Pedikelperforation >1mm ohne Notwendigkeit zur Korrektur der Schraube
Group 3	Pedikelperforation >1mm mit Notwendigkeit zur Korrektur aufgrund von Nervenirritation (Wurzel/Rückenmark) oder reduzierter biomechanischer Stabilität

**Tabelle 4: Klassifikation nach Bredow et al. 2016 [47]**

<b>Klassifikation Bredow et. al</b> pp= Pedikelperforation	
Grad1	pp <1 mm
Grad 2	pp 1 - 2 mm
Grad 3	pp 2 - 3 mm
Grad 4	pp 3 - 4 mm
Grad 5	Kortikalisbruch>4mm und/oder Verlegung des Foramen transversum um mehr als die Hälfte des Schraubendurchmessers

## 2.5 Klinische Beurteilung

Zur Evaluation des funktionellen Operationsergebnisses wurden standardisierte, im klinischen Alltag gebräuchliche und häufig angewendete und somit gut vergleichbare Messmethoden verwendet. Alle verwendeten Messmethoden sind bereits in anderen Arbeiten validiert worden und überzeugen durch eine hohe Reliabilität.

### Visuelle analoge Schmerzskala

Die visuelle analoge Schmerzskala ist ein klinisch erprobtes und validiertes Messverfahren, um subjektive Schmerzeindrücke von Patienten zu erheben und bei Kontrolluntersuchungen den Verlauf evaluieren zu können. Dazu bekommt der Patient in der Regel einen Balken oder eine Strecke von 100mm Länge vorgelegt auf der die Empfindungsstärke als Abstand vom linken Rand eingetragen wird. Die gemessene Strecke wird dann in einen entsprechenden numerischen Wert umgewandelt. Die Erstbeschreiber dieser visuellen Analogskala sind Hayes und Paterson im Jahr 1921, die die Methode zur Beurteilung von Arbeitern durch deren Vorgesetzte einführten [50]. Die dazu benötigten Angaben wurden den Krankenakten entnommen. Huskisson beschrieb 1974 die visuelle analoge Schmerzskala als sensitivste Methode zur Beurteilung von Schmerzzuständen [51], die im Folgenden in weiteren Arbeiten validiert wurde [52].

Das subjektive Schmerzempfinden der Patienten ist sowohl präoperativ, bei Entlassung und bei der Nachkontrolle routinemäßig mit Hilfe der visuellen Analogskala erfasst und in numerischer Form dokumentiert worden. Die Skala basiert auf Werten von 0 bis 10, wobei 0 keinem Schmerz und 10, dem größtmöglich vorstellbaren Schmerz entspricht. Hierzu wurden jeweils separat Werte für Schmerzen der Wirbelsäule und der oberen, sowie unteren Extremitäten erhoben.

### Klinische Bewertung

Die neurologischen Befunde vor und nach der Operation, d.h. präoperativ, bei Entlassung und bei der Nachkontrolle konnten den Patientenakten entnommen werden. Hierzu wurden die klinischen Symptome entsprechend der motorischen und sensiblen Zustände bewertet und anhand des modifizierten McCormick Scores (Tabelle 5) eingeteilt. Diese ordinal skalierte Klassifikation wurde von McCormick 1990 [53] zunächst für Operationen an intraduralen Tumoren entwickelt, gilt inzwischen in der

neurochirurgischen Literatur jedoch als gängige Messmethode zur Erfassung des neurologischen und klinisch-funktionellen Status eines Patienten. Wenn postoperativ neue Defizite auftraten, so wurden diese separat dokumentiert. Zusätzlich wurden die klinischen Gesamtergebnisse, sowie die anamnestisch bei Entlassung und in der Nachkontrolle erhobenen subjektiven Empfindungen der Patienten anhand der Odom-Kriterien beurteilt und den entsprechenden ordinal skalierten Graden zugeteilt. Die Odom-Kriterien wurden 1958 von Odom [54] eingeführt und sind ein weitverbreiteter, aus 4 Abstufungen bestehender Score zur Beurteilung des klinischen Outcome nach zervikaler Wirbelsäulenoperationen. Dieser Score wurde zuletzt durch die Arbeit von Broekema et. al in seiner Reliabilität und Validität bestätigt [55].

**Tabelle 5: Modifizierter McCormick Score [56]**

<b>Grad</b>	<b>Erläuterung</b>
I	Neurologisch intakt
II	Leichtes sensomotorisches Defizit ohne funktionelle Beeinträchtigung
III	Moderates sensomotorisches Defizit mit Funktionsbeeinträchtigung
IV	Schweres sensomotorisches Defizit, funktionell abhängig
V	Paraplegie oder Tetraplegie

**Tabelle 6: ODOM-Kriterien [54]**

<b>Grad</b>	<b>Erläuterung</b>
1	Sehr gut, keine Symptome, keine Beeinträchtigung
2	Gut, vorübergehende Beschwerden, keine Beeinträchtigung der täglichen Arbeit
3	Ausreichend, subjektive Verbesserung, signifikante Beeinflussung der körperlichen Aktivität
4	Mangelhaft, keine Verbesserung oder sogar Verschlechterung gegenüber dem präoperativen Zustand

## Komplikationen

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Beurteilung der Patientensicherheit bei der konventionell, also ohne spinale Navigationssysteme, durchgeführten transpedikulären Verschraubung im HWK 2. Dazu wurden mögliche intra- und postoperative Komplikationen dieses Operationsverfahren anhand einschlägiger Literatur [37, 57] erfasst und analysiert. Neben Komplikationsrisiken speziell dieses Eingriffes, wie z.B. Schraubendislokation oder Verletzung der Arteria vertebralis, wurden auch allgemeine Risiken, die bei jeder Operation bestehen, wie z.B. Infektionen und Wundheilungsstörungen beurteilt. Eine Auflistung aller ausgewählten Komplikationen findet sich in Tabelle 7.

**Tabelle 7: Auflistung möglicher Komplikationen**

<b>Komplikationen</b>
Schraubendislokation
Schraubenbruch
Komplikationen intraoperativ
Infektionen
Wundheilungsstörung
Liquorfistel
Vaskuläre Komplikation (z.B. Verletzung d. Arteria vertebralis)
Neurologische Komplikation (z.B. Verletzung d. Rückenmarks / Spinalnerv)
Revisions-Operation <ul style="list-style-type: none"><li>• aufgrund von Wundheilungsstörung</li><li>• aufgrund von Implantatfehlage</li></ul>

## 2.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung des Datensatzes erfolgte mit Hilfe von IBM SPSS Statistics 25. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von  $\alpha = .05$  verwendet. Im Rahmen der deskriptiven Analyse wurden für die mindestens intervallskalierten Variablen Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet, für die nominal- oder ordinalskalierten Variablen relative Häufigkeitsverteilungen. Im Rahmen der inferenzstatistischen Analyse wurden verschiedene Hypothesentest angewendet: Zur Analyse der Verteilung nominalskalierter Variablen wurden Chi-Quadrat-Anpassungstests angewendet; zur Auswertung von Zusammenhängen zwischen intervallskalierten Variablen wurden Pearson-Korrelationen berechnet, für ordinalskalierte Variablen Spearman-Korrelationen, für nominalskalierte Variablen Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests; zur Auswertung von Zwischen-Gruppen-Vergleichen wurden für mindestens intervallskalierte abhängige Variablen t-Tests vorgenommen, für ordinalskalierte abhängige Variablen Mann-Whitney-U-Tests; zur Auswertung von Zeitpunkt-Vergleichen fand für mindestens intervallskalierte abhängige Variablen die messwiederholte ANOVA sowie Post-hoc-t-Tests Anwendung, für ordinalskalierte abhängige Variablen Friedman-Tests sowie Post-hoc-Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests. Für die p-Werte der Post-hoc-Tests wurden Bonferroni-Korrekturen vorgenommen.

### 3. Ergebnisse

Mithilfe einer Reihe statistischer Tests wurden die abhängigen Variablen ausgewertet. Deskriptive Statistiken sind für die als mindestens intervallskaliert anzunehmenden Variablen in Tabelle 8 zu finden und für die ordinal- und nominalskalierten Variablen in Tabelle 9. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von  $\alpha = .05$  verwendet. Für die p-Werte von Post-hoc-Tests wurden Bonferroni-Korrekturen vorgenommen.

**Tabelle 8: Intervallskalierte Variablen**

Intervallskalierte Variablen
<ul style="list-style-type: none"><li>• Alter</li><li>• Anzahl der operierten Höhen</li><li>• Schraubenanzahl</li><li>• Schraubendicke in mm (C2) links</li><li>• Schraubendicke in mm (C2) rechts</li><li>• Schraubenlänge in mm (C2) links</li><li>• Schraubenlänge n mm (C2) rechts</li><li>• Pedikeldicke links</li><li>• Pedikeldicke rechts</li><li>• Pedikelhöhe links</li><li>• Pedikelhöhe rechts</li><li>• Foramen transversum links n. Wang a (horizontal) mm</li><li>• Foramen transversum links n. Wang e (vertikal) mm</li><li>• Foramen transversum rechts n. Wang a (horizontal) mm</li><li>• Foramen transversum rechts n. Wang e (vertikal) mm</li><li>• OP-Dauer /Schnitt-Naht Zeit in Minuten</li><li>• Röntgenzeit (min,dmin)</li><li>• Dosisflächenprodukt (FDP in cGy*cm<sup>2</sup>)"</li><li>• Blutverlust in ml</li><li>• VAS spine präOP</li><li>• VAS leg/a präOP</li><li>• VAS spine Entlassung</li><li>• VAS leg/a Entlassung</li><li>• VAS spine Nachkontrolle</li><li>• VAS Arm Nachkontrolle</li><li>• Komplikationen insgesamt</li><li>• Krankenhausverweildauer in Tagen (OP-Tag bis Entlassung)</li><li>• Anzahl der fehlplatzierten Schrauben ohne HWK2</li><li>• Anzahl der fehlplatzierten Schrauben mit HWK2</li><li>• Korrektheit der Schraubenlage in %</li></ul>

**Tabelle 9: Ordinal- und nominalskalierte Variablen**

<b>Ordinal- und nominalskalierte Variablen</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Geschlecht</li><li>• Diagnose</li><li>• Schraubenlage_Bredow_links</li><li>• Schraubenlage_Bredow_rechts</li><li>• Schraubenlage_Richter_links</li><li>• Schraubenlage_Richter_rechts</li><li>• Schraubenlage_Gertzbein_links</li><li>• Schraubenlage_Gertzbein_rechts</li><li>• KlassifikationnachWang_links</li><li>• KlassifikationnachWang_rechts</li><li>• HighRidingVertebralArtery</li><li>• Bluttransfusion</li><li>• Neurologie_präOP</li><li>• Neurologie_Entlassung</li><li>• Neurologie_Nachkontrolle</li><li>• ODOM_Entlassung</li><li>• ODOM_Nachkontrolle</li><li>• Schraubendislokation</li><li>• Schraubenbruch</li><li>• Komplikationen_intraoperativ</li><li>• Infektionen</li><li>• Wundheilungsstörung</li><li>• CFSFistel</li><li>• vaskuläreKomplikation</li><li>• neurologischeKomplikation</li><li>• RevisionsOP_</li><li>• Art RevisionsOP1_</li><li>• ImplantatfehlageC2</li><li>• FehllageandererSchrauben</li><li>• Revisionsbedürftigkeit_ohneHWK2</li><li>• Schraubenanzahl_inC2</li></ul>

## 3.1 Charakterisierung des Patientenkollektivs

### 3.1.1 Alters- und Geschlechtsverteilung

Insgesamt wurden 39 Patienten, davon 21 Frauen und 18 Männer mit einem Durchschnittsalter von 67.1 Jahren (SD 17.4 J) operativ versorgt. Die Spannweite vom jüngsten bis ältesten Patienten betrug 66 Jahre (18 – 84 Jahre). Das Verhältnis von Frauen zu Männern betrug 7:6 (siehe Abb.12).

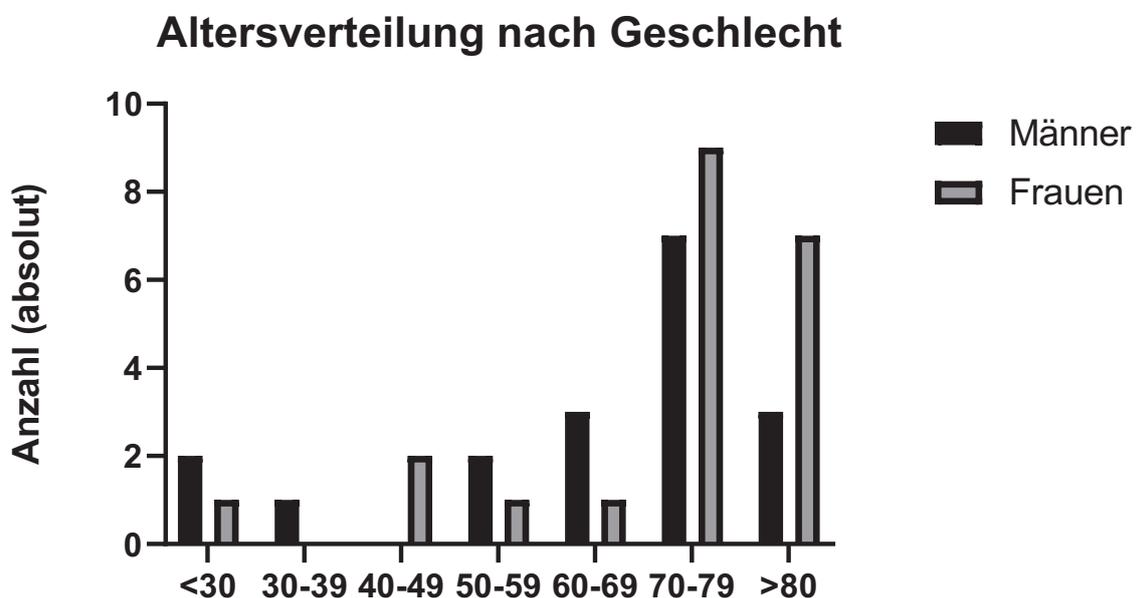


Abb. 12: Altersverteilung nach Geschlecht

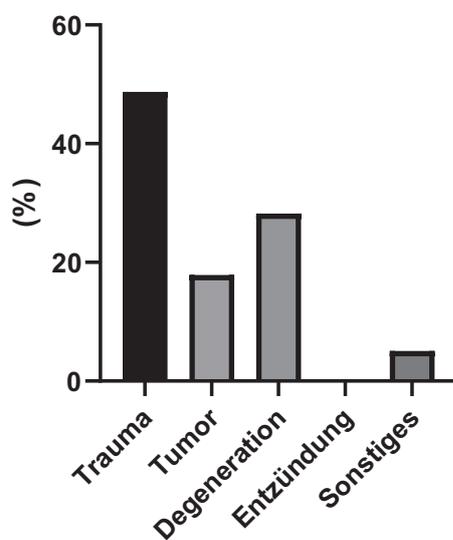
### 3.1.2 Operationsindikation

Die präoperativ gestellten Operationsindikationen wurden insgesamt 5 verschiedenen Gruppen (Trauma, Tumor, Degeneration, Entzündung, Sonstiges) zugeteilt. Traumatische Geschehen dominierten in fast der Hälfte der Fälle (19 = 48.7%), gefolgt von degenerativen Pathologien (11 = 28.2%) und Tumoren (7 = 17.9%) (siehe Abb. 13). Keiner der Patienten litt an einem akuten entzündlichen Krankheitsgeschehen. Unter den Diagnosen der Kategorie Sonstiges fand sich eine HWS-Hypermobilität und eine zervikale Myelopathie unklarer Genese. Bei den degenerativen Grundliden fanden

sich überwiegend Spinalkanalstenosen im Zervikalbereich mit und ohne Myelopathie und die Spondylolisthesis.

**Tabelle 10: Operationsindikationen**

Entität	Häufigkeit absolut	Häufigkeit %
Trauma	19	48.7
Tumor	7	17.9
Degeneration	11	28.2
Entzündung	0	0.0
Sonstiges	2	5.1
Gesamt	39	100



**Abb. 13: Operationsindikationen**

Bei 13 der 18 Männern lag ein Trauma als Operationsindikation vor, während dies bei nur 6 der 21 Frauen die Indikation darstellte. Der angewendete Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests zeigte, dass das Auftreten von Traumata mit dem Geschlecht zusammenhing,  $\chi^2(1) = 7.39$ ,  $p = .007$ , wobei Traumata häufiger bei Männern (72.22 %) als bei Frauen (28.57 %) vorlagen.

Degenerative Erkrankungen als Indikation zur Operation stellten nach traumatischen Ereignissen den zweithäufigsten Grund dar, eine signifikante positive Korrelation mit dem Patientenalter und dem Auftreten degenerativer Erkrankungen konnte aber nicht gezeigt werden ( $r_s = .25$ ,  $p = .123$ ).

### 3.1.3 Charakterisierung der Pedikel

Die Pedikel von HW 2 aller Patienten wurden hinsichtlich ihrer Höhe und Dicke vermessen (siehe Tabelle 9). Paarweise Zwei-Stichproben-t-Tests zeigten, dass bei Männern ( $M_{links} = 9.25$ ,  $M_{rechts} = 9.62$ ) auf beiden Seiten signifikant größere Pedikelhöhen gemessen wurden als bei Frauen ( $M_{links} = 8.00$ ,  $M_{rechts} = 8.24$ ), beide  $t(37) > 26.08$ , beide  $p < .010$ , beide  $d > 0.91$ . Es zeigten sich jedoch keine signifikanten Geschlechtsunterschiede in der Pedikeldicke, beide  $t(37) < 0.24$ , beide  $p > .812$ .

**Tabelle 11: Pedikeldicke und Pedikelhöhe**

<b>Pedikeldicke</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>SD</b>
links (mm)	3.3	7.9	6.2	1.18
rechts (mm)	4.7	9.1	6.4	0.93
<b>Pedikelhöhe</b>				
links (mm)	5	12.5	8.5	1.47
rechts (mm)	6.9	12.6	8.8	1.25

**Tabelle 12: Pedikeldicke und Pedikelhöhe nach Geschlecht**

<b>Pedikeldicke links (mm)</b>		<b>N</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Standardabweichung</b>	<b>Standardfehler des Mittelwertes</b>
	männlich	18	6.23	1.18	0.28
	weiblich	21	6.18	1.21	0.26
<b>Pedikeldicke rechts (mm)</b>					
	männlich	18	6.48	0.99	0.23
	weiblich	21	6.40	0.91	0.19
<b>Pedikelhöhe Links (mm)</b>					
	männlich	18	9.25	1.69	0.39
	weiblich	21	8.00	0.96	0.21
<b>Pedikelhöhe rechts (mm)</b>					
	männlich	18	9.62	1.19	0.28
	weiblich	21	8.24	0.93	0.20

### **3.1.4 Dorsale Instrumentierung**

Alle 39 Patienten haben eine dorsale Instrumentierung von HW 2, aber teilweise auch angrenzender Segmente (HW 0 bis TH 2) erhalten. Bei einem Patienten wurden 8 Segmente operativ versorgt, im Mittel wurden jedoch 3.5 Segmente einschließlich HW 2 operiert. Insgesamt wurden 267 Schrauben eingebracht, davon 76 in HWK 2, wobei bei 2 Patienten jeweils nur eine Pedikelschraube verwendet wurde. Die Schrauben in HW 2 variierten in ihrer Schraubendicke zwischen 3.5mm und 4.35mm und in der Länge zwischen 14mm und 36mm.

### 3.1.5 Klassifikation Wang und HRVA

Anhand der Klassifikation von Wang et al. wurden die HWK 2 aller 39 Patienten jeweils für den linken und rechten Pedikel vermessen und einem der vier Typen zugeteilt. In einem Fall war sowohl links als auch rechts keine Beurteilung möglich (n=38). In vier Fällen lagen sowohl rechts als auch links ein Typ II vor, sodass insgesamt in 10 (25,6%) Fällen eine *high riding vertebral artery (HRVA)* vorlag. Eine HRVA trat bei 7 Frauen und 3 Männern auf, der durchgeführte Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests zeigte jedoch, dass das Auftreten von HRVA,  $\chi^2(1) = 1.64$ ,  $p = .200$ . nicht mit dem Geschlecht zusammenhing.

**Tabelle 13: Auswertung der Pedikel HW2 entsprechend der Einteilung nach Wang et al.**

Typ	links	rechts
I	8 (20.5%)	11 (28.2%)
II	8 (20.5%)	6 (15.4%)
III	22 (56.4)	20 (51.3)
IV	0	1 (2.6%)
Gesamt	38	38

**Tabelle 14: Vorliegen einer HRVA**

HRVA	
nein	28
ja	10
Gesamt	38

### 3.1.6 Operationsdauer und Röntgenzeit

Die Operationen, gemessen wurde die dokumentierte Zeitspanne zwischen Schnitt und Nahtende, dauerten durchschnittlich 149.8 Minuten (SD 52.6min), wobei der kürzeste Eingriff 45min und der längste 290min betrug. Die durchschnittliche Röntgenzeit intraoperativ lag bei 0.39min (SD 0.29min). Das dabei applizierte Dosisflächenprodukt (FDP in  $\text{cGy}\cdot\text{cm}^2$ ) betrug im Mittel 43.33 (SD 40.79), jedoch stand es lediglich in 22 Fällen der elektronischen Auswertung zur Verfügung. Es zeigten sich signifikante positive Korrelationen der OP-Dauer mit der Anzahl operierter Höhen, mit der Krankenhausverweildauer und mit der Anzahl Komplikationen.

**Tabelle 15: Auswertung der OP-Dauer, Röntgenzeit, Dosisflächenprodukt**

	N	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Standardabweichung
OP-Dauer / Schnitt-Naht Zeit in Minuten	39	45	290	149.77	52.682
Röntgenzeit (min,dmin)	33	0.08	1.40	0.3879	0.29085
Dosisflächenprodukt (FDP in $\text{cGy}\cdot\text{cm}^2$ )	22	4.65	192.69	43.3291	40.78910

### 3.1.7 Krankenhausverweildauer

Die Krankenhausverweildauer benennt in diesem Kontext den Zeitraum vom Tag der Operation bis zur Entlassung, wobei 2 der 39 Patienten nicht in die Häuslichkeit, sondern zurück in die initial verlegende Klinik entlassen wurden. Im Durchschnitt betrug die Krankenhausverweildauer 14.78 Tage (SD 10.16 Tage (min. 4 Tage, max. 54)). Es zeigten sich signifikante positive Korrelationen der Krankenhausverweildauer mit der Dauer der Operationen sowie der Anzahl der Komplikationen. Keine dieser Variablen zeigte signifikante Korrelationen mit der Röntgenzeit. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten und p-Werte sind Tabelle 16 zu entnehmen.

**Tabelle 16: Korrelationen OP-Dauer, Röntgenzeit, Anzahl operierter Höhen, Anzahl Komplikationen**

	<b>OP-Dauer</b>	<b>Röntgenzeit</b>	<b>Anzahl Komplikationen</b>	<b>Krankenhausverweildauer</b>
<b>Anzahl operierter Höhen</b>	$r = .57^*$ $p < .001$ $n = 39$	$r = -.24$ $p = .178$ $n = 33$	$r = .21$ $p = .205$ $n = 38$	$r = .14$ $p = .425$ $n = 37$
<b>OP-Dauer</b>		$r = .34$ $p = .055$ $n = 33$	$r = .38^*$ $p = .017$ $n = 38$	$r = .39^*$ $p = .019$ $n = 37$
<b>Röntgenzeit</b>			$r = .12$ $p = .506$ $n = 32$	$r = .17$ $p = .342$ $n = 32$
<b>Anzahl Komplikationen</b>				$r = .45^*$ $p = .005$ $n = 37$

## 3.2 Komplikationen

Tabelle 17: Übersicht Komplikationen

Komplikationen	
Schraubendislokation	0
Schraubenbruch	0
Komplikationen intra- und perioperativ	<p>5 (12.8%)→</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intraoperativ: das IOM zeigte beim Anziehen der Schrauben mit dem Drehmoment (Dekompression war bereits abgeschlossen) einen raschen Verlust der SEP, der sich im Verlauf nahezu komplett erholte mit sogar Verringerung der Latenz. MEP waren erhalten geblieben</li> <li>• Postoperativ: Larynxschwellung und Reintubation/Intensivstation</li> <li>• Intraoperativ: Liquorleck, übernächt</li> <li>• Postoperativ: verzögertes Weaning, es zeigte sich eine dezente Anisokorie links &gt; rechts bei engen, lichtreagiblen Pupillen sowie eine Minderbewegung des rechten Arms. →Mediainfarkt links aufgrund kardioembolischer Genese</li> <li>• Intraoperativ: venöse Blutung, durch Tamponieren gut beherrschbar</li> </ul>
Infektionen	2 (5.1%)→ Wundinfektion mit anschließender Revisions-OP bei Wundheilungsstörung
Wundheilungsstörung	6 (15.4%) → davon wurden 5 aufgrund der Wundheilungsstörung revidiert (inklusive 2 Patienten bei denen Infektion und Wundheilungsstörung vorlag), eine Revisionsoperation bei Implantatfehlage, eine rein konservative Therapie mit Antibiose
Liquorfistel	0
Vaskuläre Komplikationen	0
Neurologische Komplikation	0
Revisions-OP	<p>4 (10.3%) aufgrund von Wundheilungsstörung</p> <p>4 (10.3%) aufgrund von Implantatfehlage, davon 2 Fehllagen in HW2</p>

Hinsichtlich der Komplikationen im Zusammenhang mit dem operativen Eingriff zeigte sich, dass es zu keinem Schraubenbruch oder Schraubendislokation kam, keine Liquorfistel oder vaskuläre Komplikationen wie z.B. Verletzung der A. vertebralis oder andere Gefäßverletzung auftraten, auch nicht in den Fällen, in denen eine *HRVA* vorlag. Es traten zwei tiefe Wundinfektionen auf, die bei gleichzeitig bestehender Wundheilungsstörung operativ revidiert wurden. Insgesamt bestanden sechs Wundheilungsstörungen, wovon eine rein konservativ mit Antibiotika behandelt und fünf revidiert wurden. In einem dieser Fälle lag eine Implantatfehlage bei gleichzeitig bestehender Wundheilungsstörung vor, weshalb es zur Revision kam.

In drei weiteren Fällen wurde ebenfalls bei Implantatfehlage die Revisions-Operation durchgeführt, wobei in zwei dieser Fälle die Fehllage in HW 2 bestand. Insgesamt wurden in 16 Fällen 35 Schrauben, die nicht in HW 2 eingebracht waren, als fehlplatziert gewertet. In den überwiegenden Fällen handelte sich um eine Kortikalisüberschreitung, aber auch lateraler Pedikeldurchbruch oder ein Verlauf außerhalb des Pedikels traten auf.

Einige Schrauben kamen im kleinen Wirbelgelenk zu liegen, jedoch bestand lediglich in zwei Fällen die Indikation zur Revision. Diese Fehllagen lösten keine neurologischen Beschwerden aus, sondern wurden zur Sicherung der langfristigen Stabilität revidiert. Intraoperativ kam es in einem Fall zu einem Liquorleck, das im gleichen Eingriff übernäht wurde und keine Komplikationen für den Patienten nach sich zog. Bei einem weiteren Patienten bestand intraoperativ eine verstärkte venöse Blutung, die sich durch eine Tamponade gut beherrschen ließ und keinen größeren Blutverlust bedeutete. Keiner der 39 Patienten und Patientinnen erhielt intraoperativ eine Bluttransfusion.

In einem Fall zeigte das intraoperative Monitoring (IOM) beim Anziehen der Schrauben mit dem Drehmoment einen raschen Verlust der somatosensiblen evozierten Potentiale (SEP). Zu diesem Zeitpunkt war die spinale Dekompression bereits abgeschlossen und im Verlauf erfolgte eine nahezu komplette Erholung mit Verringerung der Latenz. Die motorisch evozierten Potentiale waren erhalten geblieben. Postoperativ musste ein Patient aufgrund einer Larynxschwellung reintubiert und intensivmedizinisch überwacht werden. Bei einer Patientin kam es postoperativ zu einem verzögertem Weaning und es fiel direkt eine Anisokorie sowie

Minderbewegung des rechten Armes auf. Es wurde ein linkseitiger Hirninfarkt kardioembolischer Genese diagnostiziert. Dies stellte die einzige neurologische Komplikation in diesem Patientenkollektiv dar und steht nicht im direkten Zusammenhang mit dem Operationsverfahren. Insgesamt zeigten sich somit fünf intra- bzw. perioperative Komplikationen.

### 3.3 Bewertung der Schraubenlage

#### 3.3.1 Bewertung nach Bredow, Gertzbein und Richter

Tabelle 18: Auswertung der Schraubenlage HW 2 nach Bredow

Klassifikation nach Bredow	Schraubenlage links		Schraubenlage rechts	
	Häufigkeit	%	Häufigkeit	%
pp= Pedikelperforation				
Grad1 pp<1 mm	32	82.1	33	84.6
Grad 2 pp 1 - 2 mm	1	2.6	3	7.7
Grad 3 pp 2 - 3 mm	1	2.6	2	5.1
Grad 4 pp 3 - 4 mm	2	5.1	1	2.6
Grad 5 Kortikalisbruch>4mm und/oder Verlegung des Foramen transversum um mehr als die Hälfte des Schraubendurchmessers	0	0	0	0
Gesamt	36	92.3	39	100.0

Tabelle 19: Auswertung der Schraubenlage HW 2 nach Gertzbein

Klassifikation nach Gertzbein	Schraubenlage links		Schraubenlage rechts	
	Häufigkeit	%	Häufigkeit	%
pp= Pedikelperforation				
Grad A Keine Überschreitung der Pedikलगrenzen	31	79.5	32	82.1
Grad B pp 0.1 – 2 mm	2	5.1	4	10.3
Grad C pp 2.1 – 4 mm	2	5.1	3	7.7
Grad D pp 4.1 – 6 mm	1	2.6	0	0
Grad E pp >6 mm	0	0	0	0
Gesamt	36	92.3	39	100.0

**Tabelle 20: Auswertung der Schraubenlage HW 2 nach Richter**

Klassifikation nach Richter	Schraubenlage links		Schraubenlage rechts	
	Häufigkeit	%	Häufigkeit	%
pp= Pedikelperforation				
Group 1 keine pp oder <1mm	32	82.1	33	84.6
Group 2 pp>1mm ohne Notwendigkeit zur Korrektur	2	5.1	6	15.4
Group 3 pp>1mm mit Notwendigkeit zur Korrektur	2	5.1	0	0
Gesamt	36	92.3	39	100.0

Die Bewertung der Schraubenlage in HW 2 erfolgte bei allen 39 Patienten getrennt für jeweils den linken und rechten Pedikel. Links erfolgte nur in 36 Fällen eine Bewertung, da in zwei Fällen keine Schraube eingebracht wurde und in einem Fall die Schraube transartikulär gelegt wurde und somit nicht den Bewertungskriterien entsprach. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18-20 dargestellt. Als eine gute Genauigkeit (*good accuracy*) der Schraubenlage wurden die Grade 1 und 2 nach Bredow (pp<2mm) gewertet, sodass insgesamt von den 75 Pedikelschrauben in HW 2 69 Schrauben (92%) (linke Seite 91.67 %) (rechte Seite 92.31 %) eine gute Lage aufweisen.

In Bezug auf die Fragestellung, ob die Dicke bzw. Höhe des Pedikels einen Einfluss auf die Genauigkeit der Schraubenlage nimmt, zeigte sich allein für die Pedikelhöhe der rechten Seite eine signifikante Korrelation mit der Schraubenlage nach Bredow  $r_s = .47$ ,  $p = .003$ , dies gilt ebenfalls für die Bewertung der Schraubenlage nach Gertzbein und Richter. Weder die Pedikelhöhe der linken Seite noch die Pedikeldicke beider Seiten zeigten eine signifikante Korrelation mit der Schraubenlage, alle  $r_s < .15$ , alle  $p > .390$ . Möglicherweise ist dies dem kleinen Patientenkollektiv geschuldet und würde sich bei einer größeren Fallzahl anders darstellen.

### **3.3.2 Bewertung Schraubenlage HRVA**

Es erfolgte eine Auswertung mit der Fragestellung ob Patienten bei denen eine *HRVA* vorliegt, eine schlechtere Genauigkeit der Schraubenlage vorweisen. Ein Mann-Whitney-U-Test zeigte, dass sich die Schraubenlage nach Bredow weder links noch rechts signifikant zwischen Patienten mit und ohne *HRVA* unterschied, beide  $U < 133.00$ , beide  $p > .672$ . Zusammenhänge zwischen dem Vorliegen einer *HRVA* und vaskulären oder neurologischen Komplikationen, sowie der Durchführung von Revisionsoperationen wurden aufgrund der geringen Fallzahlen, wie aus der deskriptiven Statistik hervorgeht, nicht untersucht.

### **3.3.3 Vergleich Schraubenlage zwischen navigierten und nicht-navigierten Verfahren**

Die Ergebnisse dieser nicht-navigierten Studie wurden hinsichtlich der Genauigkeit der Schraubenlage mit einer Reihe von Studien verglichen, in der ein Navigationssystem zur Platzierung der Schraube verwendet wurde. Hierzu wurden die Studien von Bredow, Czabanka und Yang, Zhou & He [58], [59] und [60] analysiert. Als gemeinsame Bewertungsgrundlage für die Schraubenlage wurde die Einteilung nach Bredow et al. mit  $< 2\text{mm}$  Abweichung als gute Genauigkeit gewählt. Tabelle 21 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse. In einem Chi-Quadrat-Anpassungstest wurde die Genauigkeit der Schraubenlage mit dem durch vergleichbare Untersuchungen mit navigierten Eingriffen zu erwartenden Wert (98.67 %) verglichen. Dieser ergab, dass die Genauigkeit der Schraubenlage in der vorliegenden Stichprobe sowohl für die linke Seite (91.67 %) signifikant niedriger war,  $\chi^2(1) = 13.46$ ,  $p < .001$ , als auch für die rechte Seite (92.31 %),  $\chi^2(1) = 12.03$ ,  $p = .001$ . Sowohl in der navigierten als auch nicht-navigierten Gruppe sind keine neurologischen oder vaskulären Komplikationen aufgetreten. Lediglich in der nicht-navigierten erfolgten zwei Revisionen in HW 2 zur Sicherung der langfristigen Stabilität.

**Tabelle 21: Vergleich navigierte mit nicht-navigierter Studie**

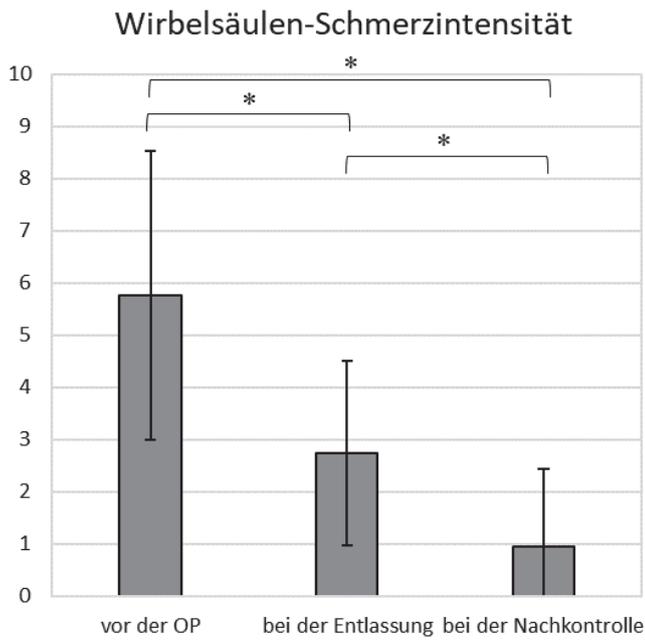
	<b>Navigierte Studien (3*)</b>	<b>Unsere Studie</b>
Anzahl an Patienten	52	39
Schraubenanzahl C2	75	75
Accuracy (<2mm)	98.67%	92%
Vaskuläre Komplikationen	0	0
Neurologische Komplikationen	0	0
Revision aufgrund von Schraubenfehlage in C2	0	2

\*Bredow J, Oppermann J, Kraus B, et al. The accuracy of 3D fluoroscopy-navigated screw insertion in the upper and subaxial cervical spine. *Eur Spine J* 2015;24:2967-2976 (study 1)  
 Czabanka M, Haemmerli J, et al. Spinal navigation for posterior instrumentation of C1-C instability using a mobile intraoperative CT scanner *J Neurosurg Spine* 2017 27:268-275 (study 3)  
 Yang YL, Zhou DZ, et al. Comparison of isocentric C-Arm 3-Dimensional navigation and conventional fluoroscopy for C1 lateral mass and C2 pedicle screw placement for atlantoaxial instability *J Spinal Disord Tech* 2013;26:127-134 (study 2)

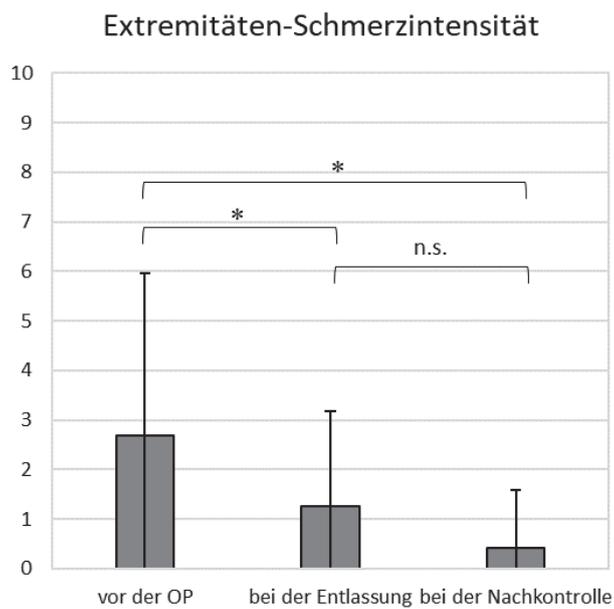
## 3.4 Auswertung Klinik (Schmerz, Neurologie, Vaskulär)

### 3.4.1 visuelle Analogskala Schmerz

Alle Patienten wurden präoperativ, bei Entlassung und in der Nachkontrolle hinsichtlich ihrer Schmerzen in der Wirbelsäule und Extremitäten mittels visueller Analogskala befragt. Die Schmerzintensitäten wurden mithilfe von einfaktoriellen messwiederholten ANOVAs mit dem Innersubjektfaktor Zeitpunkt (vor der OP, bei der Entlassung, bei der Nachkontrolle) ausgewertet. Nach Greenhouse-Geisser-Korrektur der Freiheitsgrade zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt der Zeitpunkts sowohl in Bezug auf Schmerzen in der Wirbelsäule,  $F(1.34, 28.11) = 47.81$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .70$ , als auch in Bezug auf Schmerzen in den Extremitäten,  $F(1.22, 25.70) = 14.94$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .42$ . Paarweise Post-hoc-t-Tests zeigten anschließend, dass die Wirbelsäulen-Schmerzintensität bei der Entlassung signifikant geringer war als zum Zeitpunkt vor der OP,  $t(33) = 7.43$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.27$ , und auch bei der Nachkontrolle signifikant geringer als bei der Entlassung,  $t(21) = 5.96$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.27$ . Dementsprechend war sie auch signifikant geringer bei der Nachkontrolle als zum Zeitpunkt vor der OP,  $t(23) = 7.49$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.53$ . Die Extremitäten-Schmerzintensität war bei der Entlassung zwar signifikant geringer als zum Zeitpunkt vor der OP,  $t(33) = 4.42$ ,  $p < .001$ ,  $d = 0.76$ , war bei der Nachkontrolle jedoch nur deskriptiv, nicht signifikant geringer als bei der Entlassung,  $t(21) = 2.16$ ,  $p = .127$ . Dementsprechend war sie aber signifikant geringer bei der Nachkontrolle als zum Zeitpunkt vor der OP,  $t(23) = 4.17$ ,  $p = .001$ ,  $d = 0.85$ . Die entsprechenden deskriptiven Statistiken sind in Abbildung 14 und 15 dargestellt.



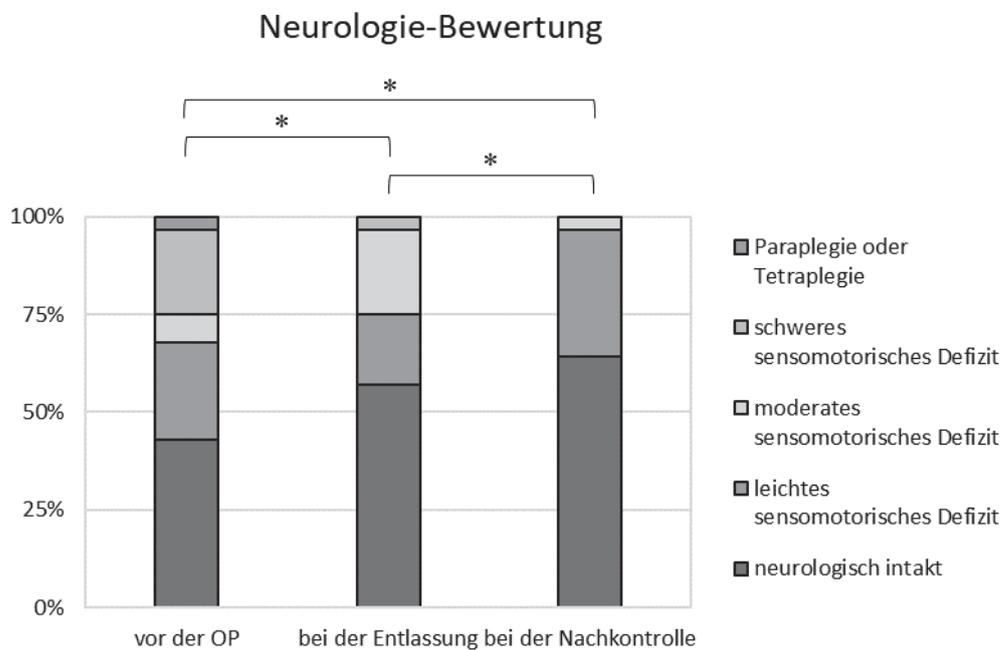
**Abb. 14: Auswertung Wirbelsäulen-Schmerzintensität**



**Abb. 15: Auswertung Extremitäten-Schmerzintensität**

### 3.4.2 Neurologisches Outcome

Alle Patienten wurden präoperativ, bei Entlassung und in der Nachkontrolle auf ihre neurologische Klinik hin untersucht und anhand des McCormick-Scores beurteilt. Die Bewertungen nach McCormick [53] wurden mithilfe eines Friedman-Tests mit dem Innersubjektfaktor Zeitpunkt (vor der OP, bei der Entlassung, bei der Nachkontrolle) ausgewertet, wobei nur Patienten einbezogen wurden, für die zu allen drei Zeitpunkten Daten vorhanden waren (N = 28). Es zeigte sich ein signifikanter Effekt des Zeitpunkts auf die Neurologie-Bewertungen,  $\chi^2(2) = 25.48$ ,  $p < .001$ . Paarweise Post-hoc-Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zeigten anschließend, dass die Neurologie-Bewertung bei der Entlassung einen signifikant geringeren Rang erreichte als zum Zeitpunkt vor der OP,  $z = 3.61$ ,  $p = .001$ ,  $r = .68$  und bei der Nachkontrolle einen signifikant geringeren Rang als bei der Entlassung,  $z = 3.00$ ,  $p = .008$ ,  $r = .57$ . Dementsprechend war sie auch signifikant geringer bei der Nachkontrolle als zum Zeitpunkt vor der OP,  $z = 3.40$ ,  $p = .002$ ,  $r = .64$ . In Abbildung 16 ist der Verteilung der Patienten auf die fünf Neurologie-Klassen nach McCormick für die drei Zeitpunkte veranschaulicht.



**Abb. 16: Auswertung neurologisches Outcome anhand McCormick-Score**

### **3.4.3 Vasculäres Outcome**

Es trat bei keinem der 39 Patienten und Patientinnen im Zusammenhang mit dem gewählten Operationsverfahren ein vasculäres Ereignis bzw. eine Komplikation auf, die 10 Patienten mit einer *HRVA* eingeschlossen.

### **3.4.4 Auswertung Odom Kriterien**

Die Odom-Bewertungen wurden für die Zeitpunkte bei der Entlassung und bei der Nachkontrolle mithilfe eines Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests verglichen, wobei nur Patienten einbezogen wurden, für die zu beiden Zeitpunkten Daten vorhanden waren ( $N = 28$ ). Es zeigte sich, dass die Odom-Bewertung bei der Nachkontrolle einen signifikant geringeren Rang erreichte als bei der Entlassung,  $z = 3.00$ ,  $p = .003$ ,  $r = .57$ . In Abbildung 17 ist die Verteilung der Patienten auf die vier Odom-Grade für beide Zeitpunkte veranschaulicht.

Insgesamt zeigt sich eine Verbesserung zwischen Entlassung und Nachkontrolle hinsichtlich der Beschwerden, subjektiven Beeinträchtigung und Alltagsbelastung der Patienten.

Tabelle 22: ODOM-Kriterien [54]

Grad	Erläuterung
1	Sehr gut, keine Symptome, keine Beeinträchtigung
2	Gut, vorübergehende Beschwerden, keine Beeinträchtigung der täglichen Arbeit
3	Ausreichend, subjektive Verbesserung, signifikante Beeinflussung der körperlichen Aktivität
4	Mangelhaft, keine Verbesserung oder sogar Verschlechterung gegenüber dem präoperativen Zustand

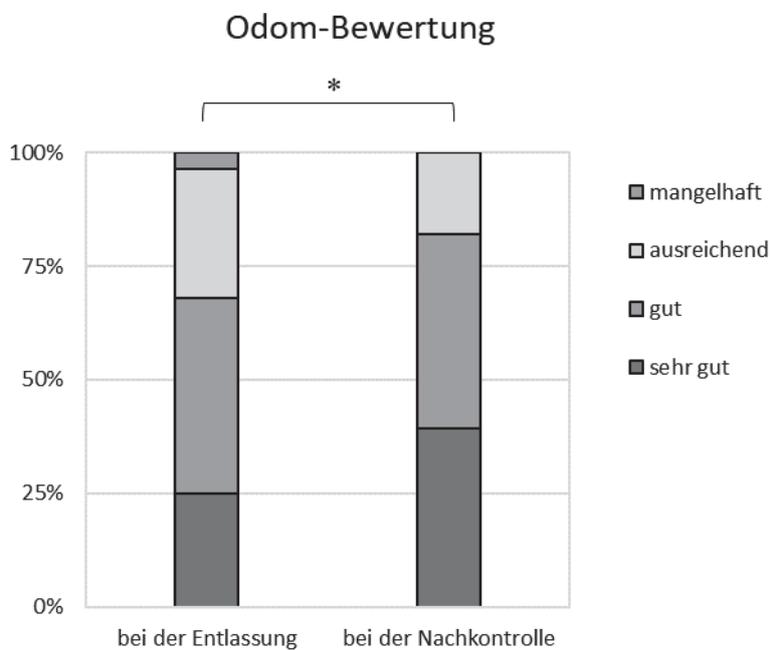


Abb. 17: Auswertung Odom-Bewertung

## 4. Diskussion

### 4.1 Zielsetzung

Ziel dieser retrospektiven Arbeit war einerseits die Qualitätskontrolle des hauseigenen Operationsverfahren, sowie andererseits der Fragestellung nachzugehen, ob eine intraoperative Orientierung anhand anatomischer Landmarken in Kombination mit konventionellem Röntgen gleich gute Ergebnisse in Hinblick auf Genauigkeit der Schraubenlage und Patientensicherheit im Vergleich zu navigierten Verfahren erzielt. Als Aspekte, die zur Beurteilung der Patientensicherheit herangezogen wurden, sind neurologische und vaskuläre Komplikationen, die im Zusammenhang mit dem operativen Eingriff stehen, mögliche Revisionsoperationen sowie das generelle Outcome der Patienten zu nennen. Ein weiteres Augenmerk lag auf bisher weniger beachteten anatomischen Besonderheiten wie dem Vorhandensein einer *high riding vertebral artery (HRVA)* und daraus möglicherweise resultierenden Komplikationen intra- und postoperativ.

### 4.2 Vergleich navigierter und nicht-navigierter Verfahren

Die Auswertung der eigenen Ergebnisse zeigt zunächst, dass hinsichtlich der Patientensicherheit das konventionelle Operationsverfahren ohne spinale Navigation sehr gute Ergebnisse erzielt hat. Bei keinem der 39 Patienten traten intra- oder postoperativ neurologisch oder vaskuläre Komplikationen auf, die dem Operationsverfahren geschuldet waren. Auch das klinische Outcome der Patienten, gemessen mittels VAS, McCormick-Score und ODOM-Score zeigte eine signifikante Verbesserung beim Vergleich der Werte präoperativ, bei Entlassung und in der Nachkontrolle. Sowohl der Wert für die Wirbelsäulen-Schmerzintensivität als auch für die Extremitäten-Schmerzintensivität war signifikant geringer bei der Nachkontrolle als zum Zeitpunkt vor der OP,  $t(23) = 7.49$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.53$  (Wirbelsäule) bzw.  $t(23) = 4.17$ ,  $p = .001$ ,  $d = 0.85$  (Extremitäten). Gleiches zeigte sich auch beim McCormick und Odom-Score. Die klinisch-neurologische Bewertung nach McCormick erreichte bei der Entlassung einen signifikant geringeren Rang als zum Zeitpunkt vor der OP,  $z = 3.61$ ,  $p = .001$ ,  $r = .68$  und bei der Nachkontrolle einen signifikant geringeren Rang als bei der Entlassung,  $z = 3.00$ ,  $p = .008$ ,  $r = .57$ . Dementsprechend war sie auch signifikant geringer bei der Nachkontrolle als zum Zeitpunkt vor der OP,

$z = 3.40$ ,  $p = .002$ ,  $r = .64$ . Die Bewertungen des Outcomes nach Odom wurden für die Zeitpunkte bei der Entlassung und bei der Nachkontrolle mithilfe eines Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests verglichen und es zeigte sich, dass die Odom-Bewertung bei der Nachkontrolle einen signifikant geringeren Rang erreichte als bei der Entlassung,  $z = 3.00$ ,  $p = .003$ ,  $r = .57$ .

Betrachtet man nun die Ergebnisse der 3 navigierten Studien von Bredow, Czabanka und Yang, Zhou & He [58], [59] und [60] (siehe Tabelle 21) hinsichtlich der Schraubengenauigkeit, so ist diese mit 98.67% signifikant höher als in unserem nicht navigierten Kollektiv. Jedoch sind sowohl in der navigierten als auch nicht-navigierten Gruppe keine neurologischen oder vaskulären Komplikationen aufgetreten. Lediglich in der nicht-navigierten erfolgten zwei Revisionen in HW 2 zur Sicherung der langfristigen Stabilität.

Im Gegensatz dazu zeigte eine retrospektive Arbeit von Hlubek et al. von 2018 bei dem CT-basierte navigierte Schraubenplatzierung in C2 mit nicht-navigierter (*free-hand*) Schraubenplatzierung verglichen wurde, eine größere Genauigkeit bei vergleichbarer Komplikationsrate beim *free-hand* Verfahren. Insgesamt wurden 426 C2 Pars oder Pedikelschrauben (312 nicht-navigiert, 114 navigiert) in ein Kollektiv von 220 Patienten (160 nicht-navigiert, 60 navigiert) eingebracht. Die Bestimmung der Lagegenauigkeit mittels CT Bildgebung konnte an 182 Schrauben erfolgen (131 *free-hand*, 51 navigiert). Kein Durchbruch zeigte sich in 113 der nicht-navigierten Schrauben (86%) im Vergleich zu 34 der navigierten Schrauben (67%) ( $p=.006$ ). Mit einer guten Genauigkeit (Grad A und B) wurden in der nicht-navigierten Gruppe 123 von 131 Schrauben (94%) bewertet. Dies waren in der navigierten Gruppe lediglich 42 von 51 (82%) ( $p=.02$ ) [61].

In einer großangelegten systemischen Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse bestehend aus 79 Studien und insgesamt 4431 Patienten von Azimi et al. aus dem Jahr 2020, die die Genauigkeit und Sicherheit von Pedikelschrauben und Pars Schrauben in HW 2 bei navigierten und nicht-navigierten Studien untersuchte, konnte kein Unterschied in der Sicherheit zwischen nicht-navigierter (*free-hand*) und navigierter Schraubenplatzierung festgestellt werden. Es wurden insgesamt 4558 Pedikelschrauben ohne Navigation und 941 mit Navigation, wobei unterschiedliche Navigationsverfahren (O-Arm, CT bzw. MRT basiert) verwendet wurden, in HW 2

eingbracht. Bei den 79 Studien handelte es sich um 67 retrospektive Studien und 12 prospektive Arbeiten, wobei klinisch randomisierte und kontrollierte Studien nicht darunter waren [62]. Auf die Genauigkeit der Schraubenplatzierung bezogen ergaben sich für das nicht-navigierte Einbringen von Pedikelschrauben in dieser gepoolten Analyse 93.8% korrekt eingebrachte Schrauben und für navigierte Verfahren 92.2%. Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede, weshalb die Autoren schlussfolgerten, dass es derzeit keinen wissenschaftlichen Beweis für die häufig postulierte verbesserte Genauigkeit durch Einsatz von Navigationssystemen gäbe. Gleichwohl bedarf es laut der Autoren weiterer gut durchgeführter Studien mit detaillierter Stratifikation zur Komplementierung der bisher gewonnenen Erkenntnisse [62]. Unsere eigenen Daten, Genauigkeit (<2mm) von 92%, sind somit mit den Ergebnissen von Azimi et al. gut vereinbar.

### **4.3 Traumatische Verletzungen**

Verletzungen der Wirbelsäule und des Rückenmarks sind relativ häufig und der gängigen Literatur zufolge sind Männer im Vergleich zu Frauen doppelt so häufig von traumatischen Verletzungen betroffen [2]. Roche et al. zeigten in ihrer Arbeit, die sich mit der Epidemiologie von spinalen Verletzungen beschäftigte, dass in der Altersspanne von 15-49 Jahren fast 75% der Männer ein Trauma erlitten hatten im Vergleich zu ungefähr 40% der Frauen. Dieser Unterschied stellte sich als statistisch signifikant heraus (T test  $p < 0.002$ ) [63]. Auch in unserer Arbeit sind deutlich mehr Männer (72.22 %) aufgrund einer traumatischen Genese behandelt worden als Frauen (28.57 %). Der angewendete Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests zeigte, dass das Auftreten von Traumata mit dem Geschlecht zusammenhing,  $\chi^2(1) = 7.39$ ,  $p = .007$ .

## 4.4 Anatomie der Pedikel

Xu et al. untersuchten in ihrer Arbeit die Morphologie des zweiten Halswirbels und vermaßen dazu diesen von insgesamt 50 Körperspendern (30 Männer, 20 Frauen). Die Auswertung der Pedikeldicke, sowie Höhe und Länge sind in Tabelle 23 dargestellt. Es zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen beiden Geschlechtern mit einer Pedikeldicke von 8.6 mm (SD 1.4) bei den Männern und 7.9mm (SD 1.1) bei den Frauen sowie einer Höhe von 7.7mm (SD 1.2) und 6.9mm (SD 1.4) [64]. Die Arbeit von Xu et al. unterstützt somit die Ergebnisse in der hier vorliegenden Arbeit. Auch bei uns zeigten sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der Pedikelhöhe zwischen beiden Geschlechtern, für die Pedikeldicke ließ sich dies jedoch nicht zeigen. Paarweise Zwei-Stichproben-t-Tests zeigten, dass bei Männern (Mlinks = 9.25, Mrechts = 9.62) auf beiden Seiten signifikant größere Pedikelhöhen gemessen wurden als bei Frauen (Mlinks = 8.00, Mrechts = 8.24), beide  $t(37) > 26.08$ , beide  $p < .010$ , beide  $d > 0.91$ . Es zeigten sich jedoch keine signifikanten Geschlechtsunterschiede in der Pedikeldicke, beide  $t(37) < 0.24$ , beide  $p > .812$

**Tabelle 23: Anatomische Parameter der Pedikel von HW2 nach Xu et al., 1995 [64]**

In Milimeter	Pedikeldicke		Pedikelhöhe		Pedikellänge	
	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen
Durchschnitt	8.6	7.9	7.7	6.9	25.6	25.5
Minimum	6	6	5	6	23	23
Maximum	12	10	10	10	31	29
Standardabweichung	1.4	1.1	1.2	1.4	1.8	1.4

## 4.5 HRVA

Laut Schmieder et al. liegen in bis zu 25% der Fälle Normvarianten des Gefäßverlaufes der A. vertebralis, zu denen auch die *HRVA* zählt, vor [17]. In einer Kadaverstudie mit 25 Individuen konnten Madawi et al. zeigen, dass in 20% der Fälle eine *HRVA* bestand [65] und auch zahlreiche, andere anatomische Studien lassen vermuten, dass bis zu 20% der Patienten eine atlantoaxiale Anatomie vorweisen, die eine sichere Schraubenplatzierung ausschließt [33]. In einer Übersichtsarbeit von Klepinowski et al. aus dem Jahr 2021 konnte gezeigt werden, dass insbesondere Patienten mit einer Rheumatoiden Arthritis ein deutlich erhöhtes Risiko für die Ausbildung einer *HRVA* (RR = 2.11 [95% CI 1.47–3.05]) aufweisen und somit präoperativ besonders intensiv diagnostiziert werden sollten [66].

Wajanavisit et al. berichten von Verletzungsraten der A. vertebralis bei transpedikulärer Verschraubung in HW 2 von 5.3 – 21% [32]. Sie beschreiben zusätzlich, dass die präoperative Detektion einer *HRVA* durch eine pedikulär ausgerichtete Dünnschicht CT Rekonstruktion signifikant erhöht werden kann. In einer Studie von Yeom et al. aus dem Jahr 2013 wurde die transartikuläre Verschraubung nach Magerl mit der transpedikulären Verschraubung in C1/C2 verglichen und die Autoren kamen zu der Feststellung, dass bei Vorliegen einer *HRVA* die transpedikuläre Verschraubung, die sicherere Methode bei generell erhöhtem Risiko darstellt [67].

Park et al. untersuchten in ihrer Arbeit die Sicherheit bei Verwendung von alternativen Schrauben (Superior pars Schraube, Inferior pars Schraube, translaminäre Schraube) anstelle von Pedikelschrauben bei Vorliegen einer *HRVA*. Im untersuchten Kollektiv lag bei 90 (35.9%) von 251 Patienten eine uni- bzw. bilaterale *HRVA* vor. Insgesamt wurden 117 alternative C2 Schrauben mittels *free-hand* Technik bei 90 Patienten eingebracht; 7 superior pars Schrauben (6%), 69 inferior pars Schrauben (59.0%) und 41 translaminäre (35%) Schrauben. Bei 31 Schrauben wurde die Kortikalis bei der Platzierung durchbrochen (26.5%), jedoch in lediglich 2 Fällen (1.7%) wurde dies als nicht akzeptabel gewertet und bedurfte einer Revision [68]. Die Autoren fassen abschließend zusammen, dass sowohl die nicht-navigierte Schraubenplatzierung, als auch die Verwendung von alternativen Schrauben eine gute und sichere Möglichkeit ist eine operative Stabilisierung bei vorliegender *HRVA* durchzuführen. Es wird zudem die Wichtigkeit der guten präoperativen Diagnostik betont, um Patienten mit *HRVA*

bzw. atypischer Anatomie im kraniozervikalen Übergang rechtzeitig zu erkennen und somit Risiken minimieren zu können [68].

In unserem Patientenkollektiv wurde bei 10 (25.6%) von 39 Patienten eine *high riding vertebral artery* festgestellt, was somit die Ergebnisse aus der Literatur gut widerspiegelt. Bemerkenswerterweise kam es in diesem Patientenkollektiv, auch unter den Patienten mit *HRVA*, d. h. trotz erschwerter anatomischer Bedingungen, zu keiner vaskulären oder neurologischen Komplikation.

#### **4.6 Strahlenbelastung**

Sowohl der Patient als auch das Operationsteam sind intraoperativ Röntgenstrahlung in unterschiedlicher Dosis ausgesetzt. Insbesondere die Streustrahlung auf den Chirurgen und das OP-Personal sollte beim Vergleich von navigierten und nicht-navigierten Verfahren mitberücksichtigt werden, da diese im Unterschied zum Patienten der Belastung fast täglich ausgesetzt sind [69]. Hinsichtlich der Strahlenbelastung gibt es nur wenige Arbeiten, die sich mit dieser Fragestellung eingehend beschäftigt haben, wobei in der Regel die einzelnen Verfahren direkt miteinander verglichen wurden. Die Arbeit von Bandela et al. ergab zwar, dass bei der Verwendung eines intraoperativen CT (O-Arm) basierten Navigationssystem, die Strahlenbelastung für den Operateur auf ein Minimum reduziert werden kann, da für diesen die Möglichkeit den Operationssaal während des Scans zu verlassen bestünde, jedoch die Gesamtdosis für den Patienten aufgrund des Verfahrens im Vergleich zur konventionellen Durchleuchtung signifikant erhöht sei [70]. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die prä- und post-operative Bilddiagnostik, sowie die Tatsache, dass häufig mehrere Strahlenquellen pro Fall zum Einsatz kommen, die kumulative Strahlendosis erhöhen und die Berechnung dieser deutlich erschweren.

Sowohl Kim et al [71], als auch Linhardt et al [72] konnten in ihren Arbeiten zeigen, dass sich durch die fluoroskopisch navigierte Pedikelschraubenimplantation die Strahlenbelastung im Vergleich zur konventionellen, bildwandlergestützten Instrumentierung signifikant reduzieren ließ.

Yang [60] et al. untersuchten in ihrer Arbeit von 2013 24 Patienten mit atlantoaxialer Instabilität, die mit Lateral Mass Schrauben in C1 und Pedikelschrauben in C2 versorgt wurden, wobei 12 Patienten nach dem konventionellen Verfahren operiert wurden und die andere Gruppe eine fluoroskopisch navigierte Schraubenimplantation erhielt.

Die Durchleuchtungszeit in der konventionellen Gruppe betrug  $64.0 \pm 3.0$  Sekunden, während sie für die fluoroskopisch navigierte Schraubenimplantation lediglich  $47.5 \pm 1.5$  Sekunden betrug und sich als signifikant geringer zeigte.

In unserer Studie lag die durchschnittliche Röntgenzeit intraoperativ bei 0.39min (24 Sekunden) (SD 0.29min (18 Sekunden)). Das dabei applizierte Dosisflächenprodukt (FDP in  $\text{cGy} \cdot \text{cm}^2$ ) betrug im Mittel 43.33 (SD 40.79), jedoch wurde es lediglich in 22 Fällen korrekt erfasst. Somit zeigt sich im Vergleich zur Arbeit von Yang et al. keine signifikant schlechtere Durchleuchtungszeit.

**Tabelle 24: Auswertung Röntgenzeit, Dosisflächenprodukt**

	<b>N</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>Standardabweichung</b>
Röntgenzeit (min,dmin)	33	0.08	1.40	0.3879	0.29085
Dosisflächenprodukt (FDP in $\text{cGy} \cdot \text{cm}^2$ )	22	4.65	192.69	43.3291	40.78910

## 4.7 Komplikationen / Revisionen

In unserer Arbeit traten bei einem Drittel der Patienten Komplikationen intra- oder postoperativ auf. Bei diesen Komplikationen handelte es sich hauptsächlich um sechs Wundheilungsstörungen (15.4%), sowie Implantatfehlagen, die jedoch keine neurologischen oder vaskulären Komplikationen zur Folge hatte. Es erfolgten acht Revisions-Operationen (20.5%), davon vier aufgrund von Wundheilungsstörungen, wobei bei zwei Patienten zusätzlich eine tiefe Wundinfektion vorlag, sowie vier Revisionen aufgrund von Implantatfehlage zur Sicherung der langfristigen Stabilität. Bei einer der Implantatfehlagen bestand zeitgleich auch eine Wundheilungsstörung, die im gleichen Eingriff behoben wurde. Bei fünf Patienten kam es intra- bzw. perioperativ zu Komplikationen, die aber nicht direkt im Zusammenhang mit dem Operationsverfahren standen, sondern generelle Operationsrisiken darstellten.

In einem Fall ereignete sich ein Liquorleck, das im gleichen Eingriff übernäht wurde und keine Komplikationen für den Patienten nach sich zog. Bei einem weiteren Patienten bestand intraoperativ eine verstärkte venöse Blutung, die sich durch eine Tamponade gut beherrschen ließ und keinen größeren Blutverlust bedeutete. In einem weiteren Fall zeigte das intraoperative Monitoring (IOM) beim Anziehen der Schrauben mit dem Drehmoment einen raschen Verlust der somatosensiblen evozierten Potentiale (SEP). Zu diesem Zeitpunkt war die Dekompression bereits abgeschlossen und im Verlauf erfolgte eine nahezu komplette Erholung mit Verringerung der Latenz. Die motorisch evozierten Potentiale waren erhalten geblieben.

Postoperativ musste ein Patient aufgrund einer Larynxschwellung reintubiert und intensivmedizinisch überwacht werden. Bei einer Patientin kam es postoperativ zu einem verzögerten Weaning und es fiel eine Anisokorie, sowie eine Minderbewegung des rechten Armes auf. Es wurde ein linkseitiger Hirninfarkt kardioembolischer Genese diagnostiziert.

In der Arbeit von Abumi et al. erfolgte eine retrospektive Evaluation von Komplikationen bei 180 Patienten, die eine zervikale Pedikelschraubenplatzierung erhalten hatten. Bei 2 Patienten (1.1%) zeigte sich eine tiefe Wundinfektion und bei 8 Patienten ereignete sich ein Liquorleck, das 10-14 Tage lang drainiert werden musste [73]. Abumi et al. verglichen in ihrer Arbeit die eigenen Ergebnisse mit sechs weiteren Studien, die auch die Komplikationsrate hinsichtlich Wundinfektionen nach zervikaler, posteriorer Schraubenplatzierung evaluierten, siehe Tabelle 23. Die Raten von

Wundinfektionen variierten hier von 0 – 12.5%. Es lässt sich somit festhalten, dass in unserem Kollektiv die Rate für Wundheilungsstörungen mit 15.4% erhöht erscheint, wobei aus der Literatur nicht eindeutig hervorgeht, ob unter der Kategorie Infektionen, lediglich tiefe Wundinfektionen oder auch Wundheilungsstörungen gefasst wurden. Tiefe Wundinfektionen sind auch in unserer Arbeit nur in 2 Fällen (5.1%) aufgetreten.

**Tabelle 25: Komplikationen in Zusammenhang mit posteriorer cervikaler Schraubeninsertion in sieben Studien modifiziert nach Abumi et al. [73]**

	Abumi	Fehlings	Graham	Heller	Levine	Wellman	Zlotolow
Anzahl Patienten	180	44	21	78	24	43	87
Anzahl Schrauben	712	210	164	654	k.A.	281	556
Neurologische Komplikation	3	0	3	6	6	0	1
Vaskuläre Komplikation	1	0	0	0	0	0	0
Wundinfektion	2 (1.1%)	1 (4.5%)	0	1 (1.2%)	3 (12.5%)	2 (4.7%)	2 (2.3%)

## 4.8 Zukunftsausblick

Mit Fortschreiten der technologischen Entwicklung und ihrer Möglichkeiten, immer präziser werdender Bildgebungsverfahren, breiter Verfügbarkeit dieser und vermutlich langfristig sinkender Kosten für Anschaffung, Betrieb und Wartung der Navigationssysteme werden navigierte Operationsverfahren auch in der Wirbelsäulenchirurgie in der Breite Einzug halten und zum Standard werden [74]. Insbesondere der Einsatz robotisch-assistierter Verfahren wird zukünftig verstärkt verwendet werden. D’Souza et al. stellen in ihrer Arbeit zum Thema robotisch-assistierter Wirbelsäulenchirurgie die Verwendung von künstlicher Intelligenz (AI), *augmented reality*, *virtual reality* sowie durch schnelle Internetverbindungen die Möglichkeit des remoten Operieren [75] in naher Zukunft in Aussicht.

Auch Madhavan et al. sehen im *machine learning* großes Potential und erwarten, dass in nächster Zeit, auch wenn wir von vollständig autonom arbeitenden Operationsrobotern weit entfernt sind, den Einsatz von Sprachsteuerung für z.B. bildgebende Verfahren [76]. Nichtsdestotrotz bleibt eine gute technische Ausbildung der angehenden Chirurgen und Chirurginnen sowie eine fundierte Kenntnis der Anatomie elementar, zumal die letzte Kontrolle des Navigationssystems beim Chirurgen liegt.

#### **4.9 Limitationen**

Zunächst einmal ist festzuhalten, dass es sich bei dieser retrospektiven Arbeit um ein relativ kleines Patientenkollektiv handelt. Von den initial 39 Patienten konnten lediglich 28 Patienten nachuntersucht werden, da zwischenzeitlich 3 Patienten verstorben waren. Zwei Patienten sind ihren Grunderkrankungen erlegen, bei einer Patientin war die Todesursache nicht dokumentiert. Über die restlichen 8 Patienten existiert keine Dokumentation über die Gründe, weshalb sie nicht zu den Nachkontrollterminen erschienen sind. Somit verringert sich das Patientenkollektiv für die Untersuchung hinsichtlich klinischem Outcome auf 28 Patienten. Generell hängt die Qualität einer retrospektiven Arbeit maßgeblich von der Qualität der Dokumentation ab. Die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Arztbriefe, Operationsberichte und andere klinische Dokumentation können als relativ vollständig und detailliert angesehen werden. Jedoch fiel hinsichtlich der Strahlenbelastung auf, dass die Dokumentation des Dosisflächenproduktes bei lediglich 22 Patienten korrekt erfasst wurde, während die Erfassung der Röntgenzeit zumindest bei 33 von 39 Patienten erfolgte. Dies stellt sicherlich eine deutliche Einschränkung bezüglich der Aussagekraft dieser Werte dar. Zudem handelt es sich bei dieser Arbeit um eine monozentrische Studie.

## 4.10 Fazit

Trotz des insgesamt kleinen Patientenkollektives und der damit verbundenen geringeren, allgemeingültigen Aussagekraft dieser Arbeit, darf festgestellt werden, dass unser konventionelles Operationsverfahren, ohne spinale Navigation, hinsichtlich der Patientensicherheit sehr gute Ergebnisse erzielt hat. Bei keiner der 39 Patienten und Patientinnen traten intra- oder postoperativ neurologische oder vaskuläre Komplikationen auf, die dem Operationsverfahren geschuldet waren. Ebenso zeigte das klinische Outcome der Patienten, gemessen mittels VAS, McCormick-Score und ODOM-Score eine signifikante Verbesserung beim Vergleich der Werte präoperativ, bei Entlassung und in der Nachkontrolle.

Auch wenn durch die Schraubenplatzierung mittels Navigationssystemen scheinbar bessere Genauigkeiten erzielt werden, so konnte in dieser Arbeit unter Einbezug anderer Studien kein signifikanter, klinischer Benefit für die Patienten ermittelt werden. Es ist somit festzuhalten, dass aktuell navigierte und nicht-navigierte transpedikuläre Verschraubung in HW 2 als gleichwertig hinsichtlich der Patientensicherheit gesehen werden dürfen. Dies erscheint auch bei einem besonderen Verlauf der A. vertebralis gegeben. Gleichwohl bedarf es weiterer gut durchgeführter, insbesondere prospektiver, Studien zur Komplementierung der bisher gewonnen Erkenntnisse.

## 5. Literatur – und Quellenverzeichnis

1. Gluf, W.M., M.H. Schmidt, and R.I. Apfelbaum, *Atlantoaxial transarticular screw fixation: a review of surgical indications, fusion rate, complications, and lessons learned in 191 adult patients*. Journal of Neurosurgery, 2005. **2**: p. 155-163.
2. Schirmer, M., *Neurochirurgie*. Vol. 10. 2005, München: Elsevier.
3. Fredø, H., et al., *The epidemiology of traumatic cervical spine fractures: a prospective population study from Norway*. Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine, 2012. **20**.
4. Kandziora, F., et al., *Verletzungen der Halswirbelsäule*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 174-193.
5. Goldberg, W., et al., *Distribution and Patterns of Blunt Traumatic Cervical Spine Injury*. ANNALS OF EMERGENCY MEDICINE, 2001. **38**: p. 17-21.
6. Gerlach, R., G. Marquardt, and V. Seifert, *Degenrative Disease*, in *Neurosurgery*, C.B. Lumenta, et al., Editors. 2010, Springer: Heidelberg. p. 373-391.
7. Moskopp, D. and W.J. Pöll, *Verletzungen des kraniozervikalen Übergangs*, in *Neurochirurgie: Handbuch für die Weiterbildung und interdisziplinäres Nachschlagewerk*, D. Moskopp and H. Wassmann, Editors. 2005, Schattauer: Stuttgart. p. 540-552.
8. Meyer, F. and J. Klekamp, *Cervicale Myelopathie*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 73-87.
9. Klekamp, J., *Tumoren - Anamnese und Klinik*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 238-239.
10. Meyer, F. and T. Pitzen, *Sekundäre Wirbeltumoren und tumorbedingte pathologische Frakturen*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 263-270.
11. Sautter-Bihl, M.-L. and R. Engenhardt-Cabillic, *Strahlentherapie bei Wirbelsäulentumoren*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative*

- und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 270-285.
12. Marquardt, G., R. Gerlach, and V. Seifert, *Spinal Tumours*, in *Neurosurgery*, C.B. Lumenta, et al., Editors. 2010, Springer: Heidelberg. p. 353-371.
  13. Kothe, R., L. Wiesner, and W. Rütger, *Therapy of cervical involvement in rheumatoid arthritis*. Zeitschrift für Rheumatologie, 2004. **63**: p. 303-311.
  14. Kothe, R. and M. Winking, *Rheumatoide Arthritis*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 292-297.
  15. Winking, M. and R. Kothe, *Axiale Spondylarthritis*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 297-302.
  16. Braun, J. and J. Sieper, *Ankylosing spondylitis*. Lancet, 2007: p. 1379-90.
  17. Schmieder, K., *Relevante Anatomie der Wirbelsäule - Craniocervicaler Übergang*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 3-5.
  18. Schünke, M., E. Schulte, and U. Schumacher, *Prometheus Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem LernAtlas der Anatomie*. Vol. 4. 2014: Thieme.
  19. Schmieder, K., *Relevante Anatomie der Wirbelsäule - Subaxiale Halswirbelsäule*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 5-8.
  20. Tomasino, A., et al., *The vertebral artery and the cervical pedicle: morphometric analysis of a critical neighborhood*. J Neurosurg Spine, 2010. **13**(1): p. 52-60.
  21. Sacher, R., *Zur Biomechanik der Halswirbelsäule*. Manuelle Medizin 2008, 2008. **46**: p. 99-104.
  22. Bogduk, N. and S. Mercer, *Biomechanics of the cervical spine I: Normal kinematics*. Clinical Biomechanics, 2000. **15**: p. 633±648.
  23. Wurzinger, L.J., *Kopfgelenke*, in *Duale Reihe Anatomie A. G.*, et al., Editors. 2017, Thieme: Stuttgart.

24. Schmölz, W. and R. Bostelmann, *Biomechanik der Wirbelsäule*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 21-29.
25. Denis, F., *The Three Column Spine and Its Significance in the Classification of Acute Thoracolumbar Spinal Injuries*. Spine (Phila Pa 1976), 1983: p. 817-831.
26. Kakarla, U.K., et al., *Atlas Fractures*. Neurosurgery, 2010. **66**: p. 60-67.
27. Vetter, S., *Verletzung der Halswirbelsäule im Alter*. Der Chirurg, 2019. **10**: p. 782-790.
28. Winking, M., *Halswirbelsäule*, in *Spinale Neurochirurgie: Operatives Management von Wirbelsäulenerkrankungen*, W. Börm and F. Meyer, Editors. 2009, Schattauer: Stuttgart. p. 123-129.
29. Börm, W., *Dekompressions- und Stabilisierungsverfahren am kraneo-zervikalen Übergang*, in *Neurochirurgie: Handbuch für die Weiterbildung und interdisziplinäres Nachschlagewerk*, D. Moskopp and H. Wassmann, Editors. 2015, Schattauer: Stuttgart. p. 751-762.
30. Ulrich, C., *Treatment of cervical spine injuries*, in *Orthopaedic Spine Surgery: An Instructional Course Textbook*, W. Käfer, et al., Editors. 2008, Springer: Heidelberg. p. 105-114.
31. Benzel, E.C., et al., *Fractures of the C-2 vertebral body*. Journal of Neurosurgery, 1995. **81**(2).
32. Wajanavisit, W., et al., *Prevalence of High-Riding Vertebral Artery and Morphometry of C2 Pedicles Using a Novel Computed Tomography Reconstruction Technique*. Asian Spine J, 2016. **10**(6): p. 1141-1148.
33. Wright, N.M. and C. Laurysen, *Vertebral artery injury in C1–2 transarticular screw fixation: results of a survey of the AANS/CNS Section on Disorders of the Spine and Peripheral Nerves*. Neurosurg, 1998. **88**: p. 634-640.
34. Wang, J., et al., *An anatomic consideration of C2 vertebrae artery groove variation for individual screw implantation in axis*. Eur Spine J, 2013. **22**(7): p. 1547-52.

35. Kothe, R., *Halswirbelsäule von dorsal - Zugang zur dorsalen HWS*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 476-479.
36. Börm, W., *Transartikuläre atlantoaxiale Stabilisierung*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 480-483.
37. Richter, M. and M. Reith, *Posterior instrumentation of the cervical spine using the neon occipito-cervical system*, in *Orthopaedic Spine Surgery: An Instructional Course Textbook*, W. Käfer, et al., Editors. 2008, Springer: Heidelberg. p. 3-14.
38. Meyer, D., *HW 2-Laminaschrauben*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 485-487.
39. Kast, E., *Subaxiale Fusionstechniken - Stabilisierung mittels Pedikelschrauben*, in *Spinale Neurochirurgie: Operatives Management von Wirbelsäulenerkrankungen*, W. Börm and F. Meyer, Editors. 2009, Schattauer: Stuttgart. p. 327-333.
40. Grochulla, F., *Lendenwirbelsäule - Anatomische Grundlagen für die Pedikelschraubenfixation*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 13-14.
41. Meyer, D. and F. Meyer, *HW 1/2-Verschraubung nach Harms*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 483-485.
42. Schröder, J. and W. Börm, *Spinale Navigation*, in *Wirbelsäule interdisziplinär: Operative und konservative Therapie*, W. Börm, et al., Editors. 2017, Schattauer: Stuttgart. p. 581-585.
43. Ringel, F., et al., *Navigation, Robotics, and Intraoperative Imaging in Spinal Surgery*, in *Advances and Technical Standards in Neurosurgery*, J. Schramm, Editor. 2014, Springer: Heidelberg. p. 3-22.
44. Navarro-Ramirez, R., et al., *Total Navigation in Spine Surgery; A Concise Guide to Eliminate Fluoroscopy Using a Portable Intraoperative Computed Tomography 3-Dimensional Navigation System*. WORLD NEUROSURGERY, 2017: p. 325-335.

45. Kothe, R. and M. Richter, *Relevanz der spinalen Navigation in der rekonstruktiven Halswirbelsäulen Chirurgie*. Der Orthopäde, 2018. **47**: p. 518-525.
46. Verma, R., et al., *Functional outcome of computer-assisted spinal pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of 23 studies including 5,992 pedicle screws*. European Spine Journal, 2010. **19**: p. 370-375.
47. Bredow, J., et al., *A novel classification of screw placement accuracy in the cervical spine*. Technol Health Care, 2016. **24**(6): p. 919-925.
48. Gertzbein, S. and S.E. Robbins, *Accuracy of Pedicular Screw Placement In Vivo*. Spine, 1990. **15**(1): p. 11-14.
49. Richter, M., B. Cakir, and R. Schmidt, *Cervical pedicle screws: conventional versus computer-assisted placement of cannulated screws*. Spine (Phila Pa 1976), 2005. **30**(20): p. 2280-7.
50. Funke, F., *Vergleich visueller Analgskalen mit Kategorienskalen in Offline- und Onlinedesign*. 2004.
51. Huskisson, E.C., *The Measurement of pain*. The Lancet, 1974: p. 1127-1131.
52. Price, D.D., et al., *The validation of visual analogue scales as ratio scale measures for chronic and experimental pain*. Pain, 1983. **17**: p. 45-56.
53. McCormick, P.C., et al., *Intramedullary ependymoma of the spinal cord*. Journal of Neurosurgery, 1990. **72**: p. 523-532.
54. Odom G, Finney W, and W. B, *Cervical disc lesions*. Journal of the American Medical Association 1958. **166**: p. 23-28.
55. Broekema, A.E.H., et al., *The Odom Criteria: Validated at Last A Clinimetric Evaluation in Cervical Spine Surgery*. The Journal of Bone and Joint Surgery, 2019. **101-A**: p. 1201-1308.
56. Bellut, D., et al., *Assessment of outcome in patients undergoing surgery for intradural spinal tumor using the multidimensional patient-rated Core Outcome Measures Index and the modified McCormick Scale*. Neurosurgical Focus, 2015. **39**.
57. Barnes, B.B. and J.T. Alexander, *Cervical Pedicle Screw Fixation*, in *Neurosurgical Operative Atlas: Spine and Peripheral Nerves*, C.E.

- Wolfla and D.K. Resnick, Editors. 2006, Thieme: New York. p. 112-115.
58. Bredow, J., et al., *The accuracy of 3D fluoroscopy-navigated screw insertion in the upper and subaxial cervical spine*. Eur Spine J, 2015. **24**(12): p. 2967-76.
  59. Czabanka, M., et al., *Spinal navigation for posterior instrumentation of C1-2 instability using a mobile intraoperative CT scanner*. J Neurosurg Spine, 2017. **27**(3): p. 268-275.
  60. Yang, Y.L., D.S. Zhou, and J.L. He, *Comparison of isocentric C-arm 3-dimensional navigation and conventional fluoroscopy for C1 lateral mass and C2 pedicle screw placement for atlantoaxial instability*. J Spinal Disord Tech, 2013. **26**(3): p. 127-34.
  61. Hlubek, R.J., et al., *Safety and accuracy of freehand versus navigated C2 pars or pedicle screw placement*. The Spine Journal, 2018. **18**: p. 1374-1381.
  62. Azimi, P., et al., *Accuracy and Safety of C2 pedicle or pars screw placement: a systematic review and meta-analysis*. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 2020. **15**.
  63. Roche, S.J., P.A. Sloane, and J.Ö. McCabe, *Epidemiology of spine trauma in an Irish regional trauma unit: A 4-year study*. Injury, Int. J. Care Injured, 2008. **39**: p. 436-442.
  64. Xu, R., et al., *Morphology of the second cervical vertebra and the posterior projection of the C2 pedicle axis*. Spine (Phila Pa 1976), 1995. **20**(3): p. 259-63.
  65. Madawi, A.A., et al., *Radiological and anatomical evaluation of the atlantoaxial transarticular screw fixation technique*. Journal of Neurosurgery, 1997. **86**: p. 961-968.
  66. Klepinowski, T., J. Cembik, and L. Sagan, *Risk of the high-riding variant of vertebral arteries at C2 is increased over twofold in rheumatoid arthritis: a meta-analysis*. Neurosurgical Review, 2021. **44**: p. 2041-2046.
  67. Yeom, J.S., et al., *Risk of vertebral artery injury: comparison between C1–C2 transarticular and C2 pedicle screws*. The Spine Journal, 2013. **13**: p. 775-785.
  68. Park, J.-H., et al., *Accuracy evaluation of placements of three*

- different alternative C2 screws using the freehandtechnique in patients with high riding vertebral artery.* *Medicine*, 2019. **98**: p. 1-8.
69. Gebhard, F., et al., *Strahlendosis im OP – ein Vergleich computerassistierter Verfahren.* *Unfallchirurg*, 2003. **106**: p. 492-497.
70. Bandela, J.R., et al., *Use of CT-Based Intraoperative Spinal Navigation: Management of Radiation Exposure to Operator, Staff, and Patients.* *WORLD NEUROSURGERY*, 2013. **79**: p. 390-394.
71. Kim, C.W., et al., *Use of navigation-assisted fluoroscopy to decrease radiation exposure during minimally invasive spine surgery.* *The Spine Journal*, 2008. **8**: p. 584-590.
72. Linhardt, O., et al., *Extrakorporale Einzeldosis und Durchleuchtungszeit bei bildwandler-kontrollierter und fluoroskopisch navigierter Implantation von Pedikelschrauben.* *Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete*, 2005. **143**: p. 175-179.
73. Abumi, K., et al., *Complications of Pedicle Screw Fixation in Reconstructive Surgery of the Cervical Spine.* *Spine*, 2000. **25**: p. 962-969.
74. healthcare-in-europe.com. *Wirbelsäulen-Kongress blickt auf Wandel in der Zukunft.* 2019 [02.04.2021]; Available from: <https://healthcare-in-europe.com/de/news/wirbelsaeulen-kongress-blickt-auf-wandel-in-der-zukunft.html>.
75. D'Souza, M., et al., *Robotic-Assisted Spine Surgery: History, Efficacy, Cost, And Future Trends.* *Robotic Surgery: Research and Reviews*, 2019. **6**: p. 9-23.
76. Madhavan, K., et al., *Augmented-reality integrated robotics in neurosurgery: are we there yet?* *Neurosurgical Focus*, 2017. **42**: p. 1-9.

## **6. Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn PD Dr. med. Richard Bostelmann für die Überlassung des Themas, die verlässliche Hilfe bei Fragen und die stets konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Dissertation.

Für die statistische Betreuung bedanke ich mich bei Armin Halbach.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden, insbesondere bei Frau Al Mansoor, Frau Yusuf und Frau Lipp bedanken, die mich stets motiviert und tatkräftig unterstützt haben sowie der Neurochirurgischen Klinik der Universität Düsseldorf unter Leitung von Herrn Prof. Dr. Hänggi und seinem Vorgänger Herrn Prof. Dr. Steiger.