

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor Univ.-Prof. Dr. med. Windolf

**Upper- und Lowest instrumented vertebra bei der operativen
Versorgung von Skoliosen**

Dissertation

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

vorgelegt von
Philip Denz
Jahr der Promotion 2024

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

gez.:

Dekan/in: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: PD Dr. med. M. R. Konieczny

Zweitgutachter: PD Dr. med. D.B. Abrar

familia ad primum in aeternum

Zusammenfassung

Zur operativen Korrektur von idiopathischen Skoliosen gibt es verschiedene Therapieoptionen, wie die Versorgung mit *all-screw*-Systemen oder eine Hybridversorgung mit Schrauben und Haken und ggf. dem zusätzlichen Einsatz von sublaminären Bändern. Diese Therapieverfahren unterscheiden sich jedoch durch unterschiedliche Risikoprofile. Weiterhin kann differenziert werden, ob lediglich eine selektive Fusion der Hauptkurve oder eine nicht selektive Fusion, welche auch die Nebenkurven mit einbezieht, erfolgt. Ziel der Arbeit war es, die verschiedenen Therapieoptionen im Hinblick auf die Frage des Korrekturpotentials für Haupt- und Nebenkurven sowie die sagittale Balance zu prüfen. Wir führten eine retrospektive Datenanalyse durch, in der wir Patient*innen in die Untersuchung einschlossen, welche in unserer Einrichtung wegen einer idiopathischen Skoliose mittels der oben genannten Operationstechniken versorgt wurden. Neben der Erhebung von demographischen Daten führten wir Messungen der Cobb Winkel der Haupt- und Nebenkurven sowie von Parametern des sagittalen Profils an den prä- und postoperativen Röntgenaufnahmen durch. Es wurden 55 konsekutive Patient*innen eingeschlossen. Bei 22 Patient*innen (40,0 %) wurde ein Hybridverfahren ohne sublaminäre Bänder, bei 25 (45,5 %) Patient*innen ein Hybridverfahren mit sublaminären Bändern und bei 8 Patient*innen (14,5 %) ein *all-screw*-Verfahren angewandt. Bei 32 Patient*innen (58,2 %) wurde eine selektive Fusion durchgeführt, bei 23 Patient*innen (41,8 %) eine nicht selektive Fusion.

In Bezug auf das Korrekturpotential für die Hauptkurve konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Hybridverfahren und dem *all-screw*-Verfahren festgestellt werden ($p > 0,05$). In Bezug auf das Korrekturpotential für die Nebenkurven zeigte sich ein signifikant ($p < 0,05$) höheres Korrekturpotential durch die nicht selektive Fusion, wobei auch durch die selektive Fusion eine Korrektur der Nebenkurven von durchschnittlich 15° (39 %) möglich war. In Bezug auf die Korrektur der sagittalen Balance gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen der selektiven und der nicht selektiven Fusion ($p > 0,05$).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass es in Bezug auf das Korrekturpotential der Hauptkurve keine signifikanten Unterschiede zwischen Hybridverfahren mit oder ohne sublaminäre Bänder sowie *all-screw*-Verfahren gibt. In unserer Patient*innengruppe wurde durch das Instrumentieren der Nebenkurve im Gegensatz zur selektiven Fusion eine bessere Korrektur des frontalen Profils erzielt, jedoch konnte auch ohne die Instrumentierung der Nebenkurve eine Korrektur von durchschnittlich 39 % erreicht werden. Da es in unserer Patient*innenkohorte zudem keinen signifikanten Unterschied in der Korrektur der sagittalen Balance zwischen selektiver und nicht selektiver Fusion gab, scheint es zielgerecht zu sein, bei ausgewählten Patient*innen die selektive Fusion zu bevorzugen und so ein größeres Restbewegungsausmaß zu erhalten.

Summary

For the surgical correction of idiopathic scoliosis, there are various operative techniques, such as treatment with all-screw systems or hybrid treatment with screws and hooks and, if necessary, additional application of sublaminar tapes. However, these operative techniques differ in their risk profiles. Furthermore, it can be differentiated whether only a selective fusion of the main curve or a non-selective fusion, which also includes the minor curves, is performed. The aim of this work was to evaluate the different treatment options regarding the question of the correction potential for main and minor curves as well as the impact of the regarded techniques on sagittal balance. We performed a retrospective data analysis including patients who were treated at our institution for idiopathic scoliosis by the above-mentioned surgical techniques. In addition to collecting demographic data, we also recorded radiological parameters as Cobb angles of the major and minor curves and the parameters of the sagittal profile on pre- and postoperative radiographs. Fifty-five consecutive patients were included. A hybrid procedure without sublaminar tapes was applied in 22 patients (40.0 %), a hybrid procedure with sublaminar tapes was performed in 25 (45.5 %) patients, and an all-screw procedure was used in 8 patients (14.5 %). Selective fusion was performed in 32 patients (58.2 %) and nonselective fusion in 23 patients (41.8 %). In terms of correction potential for the main curve, no significant difference was found between the hybrid procedures and the all-screw procedure ($p > 0.05$). Regarding the correction potential for the minor curves, a significantly ($p < 0.05$) higher correction potential was found for the non-selective fusion. However, a correction of the minor curves of an average of 15° (39 %) was achieved by selective fusion. In terms of correction of sagittal balance, there was no significant difference between selective and nonselective fusion ($p > 0.05$). Regarding the correction potential of the main curve, hybrid procedures with or without sublaminar tapes as well as all-screw procedures may, based on these data, be considered as equivalent. Instrumenting the minor curve achieved better correction of the frontal profile compared to selective fusion, but correction of an average of 39 % could be achieved even without instrumenting the minor curve. Since there was also no significant difference in the correction of sagittal balance between selective and nonselective fusion in our patient cohort, selective fusion may be preferred in selected patients and thus a greater residual range of motion may be preserved.

Abkürzungsverzeichnis

a.p.	<i>anterio-posterioren</i>
AIS	<i>adoleszente idiopathische Skoliose</i>
ASDeg	<i>Anschlusssegmentdegeneration</i>
ASDis	<i>Anschlusssegment Erkrankung</i>
BVO	<i>Berufsverbandes der Ärzte für Orthopädie</i>
BWS	<i>Brustwirbelsäule</i>
C7	<i>7. Halswirbel</i>
C7SVA	<i>C7 sagittal vertical axis</i>
CSVL	<i>central sacral vertical line</i>
DGOOC	<i>Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und orthopädische Chirurgie</i>
EW	<i>Endwirbel</i>
HI	<i>Hybridinstrumentierung</i>
ICD	<i>International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems</i>
IP	<i>inflection point</i>
KiGGS	<i>Kinder- und Jugendgesundheitssurvey</i>
L1	<i>1. Lendenwirbelkörper</i>
lat.	<i>lateralen</i>
LBX1	<i>Ladybird-homeobox-1-Gen</i>
LIV	<i>lowest instrumented vertebra</i>
LWS	<i>Lendenwirbelsäule</i>
MW	<i>Mittelwert</i>
OPS-Codes	<i>Operationen- und Prozedurenschlüssel</i>
p.a.	<i>postero-anterioren</i>
PI	<i>Pelvic Incidence</i>
PT	<i>pelvic tilt</i>
S1	<i>1. Sakralsegment</i>
SD	<i>Standardabweichung</i>
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
SRS	<i>Scoliosis Research Society</i>
SS	<i>sacral slope</i>
SSA	<i>spino sacral angle</i>
SSI	<i>Schrauben-Stab-Instrumentierung</i>
ST	<i>sacral tilt</i>
SV	<i>Stable Vertebra, stable vertebra</i>
TPA	<i>T1 pelvic angle</i>
UIV	<i>upper instrumented vertebra</i>
WK	<i>Wirbelkörper</i>

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG.....	1
1.1 DEFINITION	1
1.2 EPIDEMIOLOGIE	1
1.5 ÄTIOLOGIE	2
1.3 EINTEILUNG.....	3
1.4 SYMPTOMATIK.....	4
1.6 DIAGNOSTIK.....	5
1.6.1 Anamnese und klinische Untersuchung.....	5
1.6.2 Radiologische Diagnostik.....	7
1.7 THERAPIEOPTIONEN: KONSERVATIV VS. OPERATIV.....	8
1.7.1 Konservative Therapie	8
1.7.2 Operative Therapie	9
1.7.3 Risiken und Komplikationen der operativen Therapie	11
1.8 ZIELE DER ARBEIT	12
MATERIAL UND METHODEN	14
2.1 STUDIENDESIGN	14
2.2 PATIENTENGUT	14
2.3 KLASSIFIKATION.....	15
2.3.1 Lenke.....	15
2.3.2 Risser-Stadium	20
2.3.3 Rotation nach Nash und Moe	21
2.3.4 Anschlusssegmentdegeneration (Weiner Grade)	22
2.3.5 Frontale und sagittale Ausrichtung	23
2.4 RADIOLOGISCHE PATIENT*INNENUNTERSUCHUNG	24
2.4.1 Auswertung der frontalen Röntgenaufnahmen.....	24
2.4.2 Auswertung der sagittalen Röntgenaufnahmen	27
2.4.3 Auswertung der bending-Aufnahmen	36
2.5 MATERIALVERARBEITUNG UND DATENVERARBEITUNG	36
2.6 STATISTISCHE AUSWERTUNG	36
ERGEBNISSE	38
3.1 DESKRIPTIVE STUDIENDATEN	38
3.2 KORREKTURPOTENTIAL DER HAUPT- UND NEBENKURVE	40
3.3 WAHL DER INSTRUMENTATIONSHÖHE	42
3.4 KOMPLIKATIONEN DER PATIENT*INNEN	43

DISKUSSION	48
4.1 DESKRIPTIVE STUDIENDATEN	48
4.2 KORREKTURPOTENTIAL DER HAUPT- UND NEBENKURVE	48
4.3 WAHL DER INSTRUMENTATIONSHÖHE	50
4.4 KOMPLIKATIONEN	51
4.5 LIMITATION DER STUDIE	53
SCHLUSSFOLGERUNG	54
LITERATURVERZEICHNIS	55
DANKSAGUNG.....	1

Einleitung

1.1 Definition

Der Begriff Skoliose wurde in der Antike von den griechischen Ärzten Hippokrates und Galen beschrieben. Er kommt aus dem altgriechischen und bedeutet übersetzt Krümmung/Verkrümmung [7-9]. Die Skoliose ist definiert als seitliche Krümmung der Wirbelsäule von mehr als 10° Cobb Winkel und geht mit einer dreidimensionalen Rotationsdeformität einher [9, 10].

Die adoleszente idiopathische Skoliose (AIS) ist als Skoliose definiert, bei der die Patient*innen bei Diagnosestellung älter als 11 Jahre sind und die Skoliose auf keine Grunderkrankung zurückzuführen ist (idiopathisch) [2, 11]. Die AIS manifestiert sich überwiegend rechtskovex und befindet sich am häufigsten im thorakalen Abschnitt der Wirbelsäule [2, 11].

1.2 Epidemiologie

Die idiopathische Skoliose stellt mit 90 % die häufigste Form der strukturellen Skoliose dar. Die adoleszenten idiopathischen Skoliosen machen wiederum 90 % der idiopathischen Skoliosen aus [2, 10].

In einer Metaanalyse aus dem Jahre 2010 wurden 34 Studien aus verschiedenen Ländern, überwiegend basierend auf Schuluntersuchungen in Bezug auf die Früherkennung von AIS, analysiert. Sie ergab, dass die Prävalenz für einen Cobb Winkel über 10°, sprich die Diagnose einer Skoliose, bei 1,34 % [95 %-KI: 0,98 %; 1,7 %] lag [12]. Die Studie von Konieczny et al. aus 2013, weist eine Prävalenz der AIS von weltweit 0,47 % - 5,2 % aus [13]. In einer anderen Studie wurde gezeigt, dass die Prävalenz der AIS zunimmt, je weiter nördlich die Patient*innen vom Äquator leben [14].

Auf Deutschland bezogen ergab der Kinder- und Jugendgesundheitssurvey (KiGGS) von 2007, dass die Prävalenz unter deutschen Kindern und Jugendlichen für Skoliosen bei 5,2 % lag (Tabelle 1). Dies zeigt, dass die Skoliose, in Bezug auf die Prävalenz, in Deutschland häufiger verbreitet ist als im globalen Durchschnitt.

	Alter in Jahren	Prävalenz	95 % Konfidenzintervall
Gesamt	0-17	5,2	4,7–5,6
Mädchen	11-13	8,2	6,6–10,0
	14-17	13,4	11,8–15,2
Jungen	11-13	4,8	3,8–6,2
	14-17	8,9	7,4–10,7

Tabelle 1: Prävalenz der Skoliosen in Deutschland (KiGGS 2007) [15]

Im Alter von 11-13 sowie im Alter von 14-17 Jahren zeigt sich, wie in Tabelle 1 dargestellt, dass die weiblichen Patient*innen im Vergleich zu den männlichen Patient*en eine höhere Prävalenz für Skoliosen aufweisen. Zudem zeigen auch andere Studien, dass das Verhältnis zugunsten der weiblichen Patient*innen zunimmt, je größer der Cobb Winkel ist und je älter die Studienteilnehmer*innen bei Diagnose sind [2, 10, 13, 15, 16].

1.5 Ätiologie

Nach aktuellem Stand der Forschung gibt es keine bekannte Ätiologie für die Entstehung von AIS, dennoch werden verschiedenste Theorien und multifaktorielle Ursachen für deren Entstehung diskutiert [2, 9, 10, 17-19]. Die Erforschung der AIS stellt sich komplex dar, da sich die Skoliose nur am Menschen manifestiert. Dennoch ist feststellbar, dass bei vielen Patient*innen mit AIS eine positive Familienanamnese beobachtbar ist [19].

Eine genomweite Assoziationsstudie aus dem Jahr 2011 konnte ein Zusammenhang zwischen dem *Ladybird-homeobox-1-Gen* (LBX1) („*Homeobox-Gen, Maus: Schlüsselregulator der Muskelvorläuferzellmigration und zuständig für die dorsale Identität der Muskeln der oberen Extremität*“ [19]) und dem Auftreten von AIS unter japanischen Patient*innen nachweisen [20]. Eine Metaanalyse aus dem Jahr 2019 konnte eine ebenso signifikante Assoziation von LBX1 zur AIS nachweisen [21].

Weiterhin zeigte eine andere Metaanalyse Zusammenhänge von Vitamin-D-Rezeptor-Genen mit dem Auftreten von AIS [22].

Ferner wurde in einer Studie aufgezeigt, dass Patient*innen mit AIS im Vergleich zu Kontrollgruppen ein verändertes Wachstum der Wirbelsäule sowie eine verminderte Knochenbauqualität aufwiesen [9].

Bis heute konnten viele Hinweise auf genetische Assoziationen gefunden werden, dennoch ist weitere Forschung nötig, um die Ätiologie der AIS abschließend klären zu können.

1.3 Einteilung

Die Skoliose kann in funktionelle und strukturelle Skoliosen unterteilt werden.

Funktionelle Skoliosen können reversibel sein und zeichnen sich durch eine alleinige seitliche Krümmung der Wirbelsäule, ohne Rotationskomponente, aus. Die strukturellen Skoliosen hingegen sind meist nicht reversibel und besitzen eine Rotationskomponente.

Anschließend werden die Skoliosen in die folgenden Gruppen eingeteilt: Idiopathische Skoliosen, osteopathische/osteogene Skoliosen, neuropathische Skoliosen, myopathische Skoliosen, fibropathische Skoliosen sowie durch eine Grunderkrankung verursachte Skoliosen [2].

Idiopathische Skoliosen werden durch verschiedenste Klassifikationen weiter untergliedert. Zunächst wird die idiopathische Skoliose nach Alter in Jahren bei Diagnosestellung nach dem *early onset scoliosis consensus statement* von 2015 in verschiedene Gruppen geteilt, siehe Tabelle 2 [23].

	<i>Early onset</i>	<i>Late onset</i>
Alter bei Diagnose	0-10	über 10

Tabelle 2: Einteilung der idiopathischen Skoliose nach Alter [23]

Die von King et al. publizierte King-Klassifikation, welche eine numerische Einteilung der verschiedenen Wirbelsäulenkrümmungen vorsieht, wurde als erste Klassifikation 1983 publiziert. Entwickelt wurde diese als Hilfestellung zur Planung der Instrumentierungshöhe mittels des Harrington-*Rod*-Systems [24, 25].

Eine neue Klassifikation wurde im Jahr 2001 von Lenke et al. etabliert. Diese ist die aktuell geläufigste Klassifikation [26]. Mithilfe der Lenke-Klassifikation lassen sich die Skoliosen je nach Krümmung eines oder mehrerer Wirbelsäulenabschnitte in verschiedene Gruppen und Schweregrade einteilen. Diese Klassifikation berücksichtigt im Gegensatz zur King-Klassifikation auch das sagittale Profil der Wirbelsäule. Zudem gibt sie eine Hilfestellung zur Planung der Instrumentierungshöhe bei segmentaler Instrumentierung. Die Lenke-Klassifikation wird in Kapitel 2.3.1 näher erläutert.

Die Rotation der Wirbelsäule wird mithilfe der Klassifikation nach Nash und Moe beschrieben [4]. Diese wird in Kapitel 2.3.3 erläutert.

1.4 Symptomatik

Durch die Rotations- und Krümmungskomponente der Wirbelsäule können konsekutiv verschiedenste Fehlstellungen des Körpers entstehen. Einige Beispiele hierfür sind der Lendenwulst, der Rippenbuckel und der Schulterschiefstand [2, 10, 11]. Ab einen Cobb Winkel von über 70° können zunächst Kurzatmigkeit, bei höheren Schweregraden auch Insuffizienzen der Herz- und Lungenfunktion der Patient*innen nachgewiesen werden [27].

Die Skoliose hat somit auch deutliche Auswirkungen auf die alltäglichen Aktivitäten und kosmetischen Aspekte des Körpers der oftmals jungen Patient*innen. Payne et al. zeigten in deren Arbeit, dass Patient*innen mit adoleszenter Skoliose vermehrt an suizidalen Gedanken leiden (adjustiertes Odds Ratio von 1,4; $p = 0,044$) und zusätzlich mehr um ihre körperliche Entwicklung besorgt sind (adjustiertes Odds Ratio von 1,82; $p = 0,001$), als Patient*innen der Kontrollkohorte ohne Skoliose [28].

1.6 Diagnostik

Die Diagnostik der AIS lässt sich in die übergeordneten Bereiche Anamnese und klinische Untersuchung sowie die radiologische Diagnostik einteilen.

1.6.1 Anamnese und klinische Untersuchung

Die Anamnese beinhaltet vor allem allgemeine Fragen nach Alter, Erstsymptomen wie beispielsweise Rückenschmerzen, Vorerkrankungen und der Familiengeschichte. Zudem werden neurologische Auffälligkeiten erfragt, da diese atypisch für die AIS sind. Außerdem sollte der Untersucher bei weiblichen Patientinnen die Frage nach dem Zeitpunkt der Menarche und bei männlichen Patienten nach dem Zeitpunkt des Stimmbruchs stellen, da diese Angaben dabei helfen, das potentielle Restwachstum der Wirbelsäule einzuschätzen [29].

In der körperlichen Untersuchung soll das Augenmerk auf sekundären Fehlstellungen durch die Skoliose liegen. Hierzu zählen vor allem, wie auch oben schon genannt, der Rippenbuckel, der Lendenwulst und der Schulterschiefstand. Außerdem soll auf die Taillensymmetrie sowie auf die Kyphose der Brustwirbelsäule (BWS) und die Lordose der Lendenwirbelsäule (LWS) geachtet werden. Ferner sollte bei der Inspektion ein möglicher Beckenschiefstand oder eine Beinlängendifferenz detektiert werden [2, 10].

Im Adams-Vorbeugetest, bei dem die Patient*innen mit dem Rücken zum Untersucher stehen und anschließend versuchen mit den Händen vornübergebeugt den Boden zu berühren, wird mithilfe des Skoliometers die Rotation, beziehungsweise die Auswirkungen der Rotation, gemessen. Lendenwulst und Rippenbuckel werden bei der Vorneigung verstärkt und können mithilfe des Skoliometers gemessen werden. Das Skoliometer bietet eine kostengünstige und sensitive Methode, um die Patient*innen zu untersuchen und die Rotation der Wirbelsäule grob zu erfassen [2, 29-31].



Abb. 1: Adams Vorbeugetest [32]

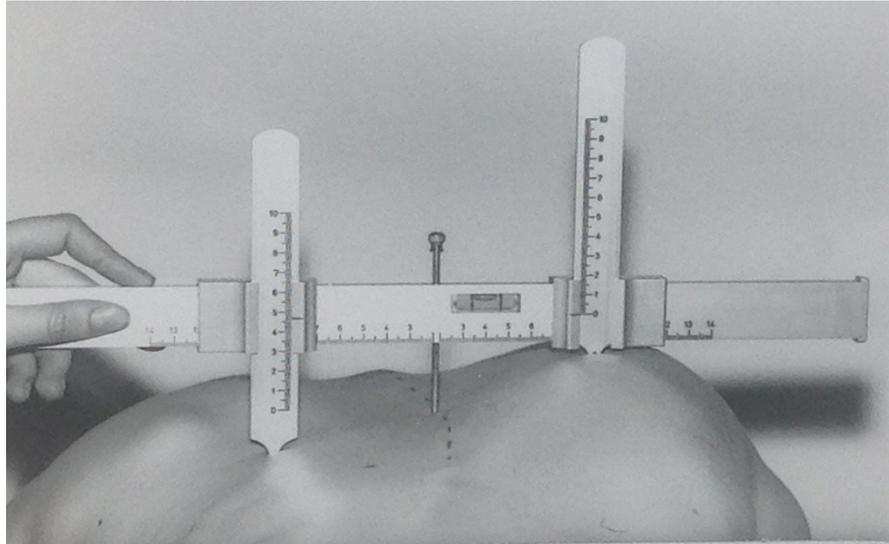


Abb. 2: Skoliometer nach Götze et al. [1]

1.6.2 Radiologische Diagnostik

Nach Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC) und des Berufsverbandes der Fachärzte für Orthopädie (BVO) ist die Röntgenaufnahme im postero-anterioren (p.a.) sowie im lateralen (lat.) Strahlengang als ganzheitliche Wirbelsäulenaufnahme im Stehen anzufertigen. Außerdem sollten in der p.a. Aufnahme die Beckenkämme zu sehen sein, da diese für die Bestimmung des Risser-Stadiums notwendig sind. Mithilfe des Risser-Stadiums, welches den Grad der Verknöcherung der Iliumapophysen beurteilt, lassen sich Aussagen zum Restwachstum und der möglichen Progression der Skoliose der Patient*innen beurteilen [10, 33, 34]. Die Bestimmung des Risser-Stadiums wird in Kapitel 2.3.2 genauer erläutert.

Zusätzlich werden sogenannte *bending*-Aufnahmen angefertigt. Diese entstehen im antero-posterioren (a.p.) Strahlengang und werden mit maximaler Lateralflexion nach rechts und links im Liegen aufgenommen. Die *bending*-Aufnahmen werden benötigt, um die Haupt- und Nebenkurven und insbesondere die Flexibilität der jeweiligen Kurven der Skoliose zu identifizieren. Dies wiederum ermöglicht eine Spondylodese zu planen sowie einen Ausblick auf die mögliche Korrektur der Skoliose nach der Operation zu geben [2].

Computertomographische- und magnetresonanztomographische Aufnahmen können ebenfalls Anwendung finden. Diese werden häufig bei unklaren Röntgenaufnahmen oder teils schwierigen Operationsgebieten hinzugezogen, um präoperativ

offene Fragen zu den jeweiligen Patient*innen zu beantworten oder die Operationsplanung zu erleichtern [2].

Der Grad der Wirbelsäulenkrümmung wird anhand des sogenannten Cobb Winkels gemessen. Dieser wird in Kapitel 2.4.1 näher beschrieben.

1.7 Therapieoptionen: Konservativ vs. operativ

Die Wirbelsäulenkrümmungen werden je nach Schweregrad auf unterschiedliche Art und Weise therapeutisch behandelt. Krümmungen ab einem Cobb Winkel von 10° werden klinisch und radiologisch im Verlauf beobachtet. Im Bereich von 10° bis 20° Cobb Winkel wird zusätzlich Physiotherapie verordnet. Wenn der Cobb Winkel lumbal zwischen 20° und 40° oder thorakal zwischen 20° und 50° beträgt, wird zusätzlich eine Korsetttherapie veranlasst. Falls die Krümmung mehr als 40° lumbal oder 50° thorakal betragen sollte, so wird eine operative Versorgung der Skoliose empfohlen [2].

1.7.1 Konservative Therapie

Wie oben bereits erwähnt wird bei Patient*innen bis 20° Cobb Winkel Physiotherapie empfohlen. Es gibt viele verschiedene Arten der Physiotherapie, welche weltweit anerkannt sind. Beispielhaft wäre hier die Skoliosetherapie der Deutschen Katharina Schroth. Für die Therapie nach Schroth konnten Kuru et al. 2016 zeigen, dass die Progression des Cobb Winkels signifikant ($p = 0,003$) geringer war als die der Patient*innen, welche die Übungen zuhause durchführten oder der Kontrollgruppe angehörten [35]. Die Internationale Wissenschaftliche Gesellschaft für Skoliose-Orthopädie und Rehabilitation hat 2016 eine neue Leitlinie zur Versorgung der Skoliose publiziert. In dieser wird beschrieben, dass es mittlerweile verschiedenste Studien gibt, welche zeigen, dass Physiotherapie eine positive Auswirkung auf die Progression der Skoliose haben kann [36].

Die Korsetttherapie hingegen wird ab einem Cobb Winkel von 20° empfohlen. Wichtig ist hierbei zu nennen, dass durch die Korsetttherapie lediglich eine Progression verhindert werden kann. Der Ausgangszustand der Patient*innen hingegen kann

nur unwesentlich verbessert werden [2]. Beispielhaft dafür ist das Chenau-Korsett, welches in Europa am häufigsten eingesetzt wird [2].

Die empfohlene Tragedauer des Korsetts beträgt 22 Stunden pro Tag, was die Compliance der jungen Patient*innen besonders fordert [10]. Es konnte gezeigt werden, dass die Patient*innen, welche eine hohe Compliance aufwiesen und ihr Korsett regelmäßig trugen, weniger Kurvenprogression hatten als die Patient*innen, welche dieses weniger trugen [37].

1.7.2 Operative Therapie

Es existieren viele verschiedene Techniken und Operationsmethoden, welche sich über die letzten Jahre etabliert haben [2].

Dabei unterscheiden sich die operativen Therapien unter anderem aufgrund verschiedener Zugangswege. Die ventrale Instrumentierung wurde von Dwyer Mitte bis Ende der 1960er Jahre entwickelt und publiziert [38]. Sie sieht vor, dass auf der konvexen Seite der Wirbelsäulenkrümmung Schrauben in die Wirbelkörper eingebracht und mittels eines flexiblen Titankabels verbunden werden, um so die Korrektur der Skoliose zu bewirken [2, 38].

Als Weiterentwicklung der ventralen Spondylodese publizierte Zielke et al. Mitte der 1970er Jahre die ventrale Derotationsspondylodese, welche eine Derotation bei gleichzeitiger Lordosierung der Skoliose ermöglichte [39]. Ähnlich zu Dwyer, wird auch nach Zielke der ventrale Zugang zur Wirbelsäule ausgewählt. Anschließend werden spezielle Winkelplatten mittels Schrauben an den jeweiligen Wirbelkörpern im skoliotischen Abschnitt der Wirbelsäule befestigt. Diese wiederum, werden mittels Gewindekompressionsstab und Muttern verbunden. Nachdem dies geschehen ist, wird mittels eines Derotators die Rotation und Lordosierung der Skoliose individuell angepasst [39].

Neben der ventralen Instrumentierung wurden gleichzeitig auch mehrere dorsale Operationsmethoden entwickelt und publiziert. Eine der bekanntesten dorsalen operativen Techniken wurde von Harrington et al. Mitte bis Ende der Fünfzigerjahre entwickelt und im Jahr 1958 beim Treffen der *american academy of orthopedic surgeons* vorgestellt [40, 41]. Sie sieht vor, dass von dorsal aus, am proximalen und distalen Ende der Wirbelsäulenkrümmung, Haken sublaminär eingebracht werden.

Ergänzend werden spezielle Metallstäbe eingebracht, welche auf der konvexen Seite für Kompression und auf der konkaven Seite für Distraction sorgen und so die Wirbelsäule nach und nach aufrichten [2, 40, 41]. Diese Methode wird heutzutage kaum noch angewandt [2].

Eine weitere dorsale Operationsmethode ist die in den 1980er Jahren publizierte nach Cotrel-Dobousset. Die Spondylodese besteht hierbei hauptsächlich aus zwei langen Metallstäben, an welchen Haken und/oder Schrauben befestigt werden. Diese werden segmental in die Wirbelkörper eingebracht und ermöglichen so eine dreidimensionale Korrektur der Skoliose [42, 43].

Heutzutage werden viele verschiedene Operationsmethoden eingesetzt, welche auf den eben erläuterten beruhen. Bei besonders schweren Fällen von Skoliose kann eine Kombination von ventraler und dorsaler Instrumentierung erfolgen [2, 19].

Wie oben aufgeführt werden die operativen Methoden nach ihrem Zugangsweg in ventral, dorsal oder ventrodorsal eingeteilt. Zusätzlich werden diese aber auch nach Art der Instrumentierung eingeteilt. Zunächst ist dort die alleinige Instrumentierung mittels Haken zu nennen, anschließend die alleinige Instrumentierung mittels Schrauben sowie die Hybridmethode. Als „hybrid“ werden Instrumentierungen bezeichnet, welche aus einer Mischung von Schrauben, Haken, Klammern oder sublaminären Bändern bestehen [44]. Bei dieser Methode werden meist proximal Haken, Klammern und/oder sublaminäre Bänder und distal Schrauben in die Wirbelkörper eingebracht.

Zur Bestimmung des zu instrumentierenden Bereichs der Skoliose wird die Lenke-Klassifikation zu Hilfe genommen. Die Lenke-Klassifikation gibt an, welchen Krümmungstyp die Skoliose hat und welcher Fusionsbereich nach Lenke gewählt werden sollte.

Weiter ist zu beachten, dass postoperativ eine frontale und sagittale Ausrichtung der Wirbelsäule zum Becken der Patient*innen geben sein sollte, um für ein optimales Ergebnis zu sorgen. Falls die frontale und sagittale Ausrichtung im Nachhinein nicht stimmen sollte, kann es zu Komplikationen wie einem *flat-back*-Syndrom oder verschiedenen degenerativen Erkrankungen wie der Anschlusssegmenterkrankung kommen [45, 46]. Die Beschreibung der frontalen und sagittalen Ausrichtung erfolgt in Kapitel 2.3.5.

Bei besonders schweren Skoliosen von mehr als 75° Cobb Winkel, kann präoperativ eine sogenannte *HALO-gravity-traction* in Erwägung gezogen werden [2, 47]. Bei der *HALO-gravity-traction* werden Metallpins in den Schädelknochen der Patient*innen eingebracht und später mit einem Metallgestell verbunden. Dieses Metallgestell kann an einem Bett, einem speziellen Rollstuhl oder einem speziellen Gehwagen befestigt werden, um so die Bewegungsfreiheit der Patient*innen zu ermöglichen und trotzdem die Traktion aufrecht zu erhalten.

Zu Beginn der Behandlung wird mit wenig Gewicht begonnen, welches nach und nach gesteigert wird, sodass am Ende der Behandlung knapp 33 - 50 % des eigenen Körpergewichts als Traktion anliegen. Im Verlauf wird so eine Aufrichtung der Wirbelsäule erzielt und der präoperative zu korrigierende Krümmungsgrad der Wirbelsäule verkleinert sich.

Diese Prozedur dauert in der Regel zwischen zwei und zwölf Wochen. Bei sehr stark ausgeprägten Skoliosen kann diese zusätzlich durch ein ventrales *release* ergänzt werden, um eine maximale präoperative Korrektur der Skoliose zu erreichen [48].

1.7.3 Risiken und Komplikationen der operativen Therapie

Wie bei allen operativen Therapien treten auch bei der Versorgung von Skoliosen Risiken und Komplikationen auf. Im Allgemeinen sind Blutverlust, Nerven- und Gefäßverletzungen bis hin zu Lähmungen sowie Querschnittssyndromen und Wundheilungsstörungen zu nennen.

Spezifisch bei der Versorgung von Skoliosen können zusätzlich auch Schraubenfehlagen, Materiallockerung bis hin zum Materialversagen mit Brechen von einliegenden Schrauben oder Stäben, vorkommen. Außerdem können die Bildung von Pseudarthrosen oder das *crankshaft*-Phänomen auftreten [2].

Weitere Komplikationen können eine Anschlusssegmentdegeneration (ASDeg) oder ein *loss of balance* darstellen. Die ASDeg ist definiert als Degeneration des Segments kranial oder kaudal des fusionierten Bereichs der Spondylodese [49]. Unterschieden wird die ASDeg von der Anschlusssegment Erkrankung (ASDis), welche vorliegt, sobald der/die Patient*in Symptome äußert, welche auf der

Degeneration des kranialen oder kaudalen Segments beruhen [50]. Die Degeneration der Segmente kann vielerlei Ausmaß annehmen.

Park et al. zeigten, dass zu den häufigsten degenerativen Entwicklungen die Bandscheibendegeneration (Höhenverlust und Schrumpfung), Spondylolisthesis (antero/retrolisthesis), sowie Osteophyten-Bildung zählen [49].

Mithilfe der Weiner-Klassifikation wird die ASDeg radiologisch klassifiziert, diese wird in Kapitel 2.3.4 genauer erörtert [51].

1.8 Ziele der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den aktuell am häufigsten angewendeten Methoden, um die AIS operativ zu versorgen, der sogenannten dorsalen Schrauben-Stab-Instrumentierung (SSI) und der dorsalen Hybridinstrumentierung (HI).

Für diese operativen Versorgungen ist bis heute nicht eindeutig geklärt, von welchem Wirbelkörper bis zu welchem Wirbelkörper die Wirbelsäule instrumentiert werden soll, um eine optimale Korrektur der Skoliose zu erreichen. Eine zu kurze Instrumentierung kann postoperativ ein *adding-on*-Phänomen zur Folge haben. Dies bedeutet, dass der nicht instrumentierte Teil der Wirbelsäule im Verlauf eine deutliche Progression der Krümmung erfährt [52, 53]. Dennoch sollte vermieden werden, zu viele Wirbel zu instrumentieren, da dies mit einer deutlichen Einschränkung der Beweglichkeit einhergehen würde.

Konkret wird intensiv diskutiert, welches der oberste (UIV; *upper instrumented vertebra*) und welches der unterste (LIV; *lowest instrumented vertebra*) zu instrumentierende Wirbel sein soll und wie dieser zu den Endpunkten der einzelnen Wirbelsäulenkrümmungen in Verbindung steht [52-61].

Ziel der Arbeit ist es, einen Ausblick zu geben, über wie viele Segmente die jeweilige Spondylodese durchgeführt werden sollte, um ein optimales Korrekturergebnis der Rotation und Wirbelsäulenkrümmung zu ermöglichen sowie die bestmögliche Balance des frontalen und sagittalen Wirbelsäulenprofils wiederherzustellen.

Dies wird ermittelt, indem das Verhältnis des UIV und LIV zum Endwirbel (EW) der jeweiligen Kurve sowie das Verhältnis zum *stable vertebra* (SV) beschrieben wird,

um daraus einen Rückschluss auf die bestmögliche Auswahl des UIV und LIV zu geben.

Außerdem wird das Verhältnis der in den *bending*-Aufnahmen präoperativ gemessenen Korrektur der Kurven, zu denen der postoperativ erreichten Korrektur gesetzt und in Bezug auf das Outcome und deren Auswirkungen hin untersucht. Ferner soll sich in einem Vergleich zeigen, inwiefern sich die klassische Instrumentierung mittels Schrauben-Stab-System im Vergleich zu der Hybridinstrumentation sowie die selektive Fusion im Vergleich zur nicht selektiven Fusion in Bezug auf das Korrekturpotential verhält. Zuletzt wird untersucht, inwiefern sich die Instrumentierungsarten (Schrauben-Stab vs. Hybridinstrumentation) sowie die Fusionsarten (selektive vs. nicht selektive Fusion) hinsichtlich der Komplikationsrate (Blutverlust, neurologische Komplikationen etc.) und des generellen Ergebnisses (ASDeg, *loss of balance*) unterscheiden.

Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Bei dieser Dissertation handelt es sich um eine retrospektive klinische Studie. Ein Ethikvotum wurde eingeholt (Studennummer: 4948). Es erfolgte die Genehmigung durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Diese Studie wurde gemäß der revidierten Deklaration von Helsinki durchgeführt.

2.2 Patientengut

Die potentiellen Patient*innen, welche sich im Zeitraum von 2002 bis 2020 einer dorsalen Spondylodese aufgrund einer Skoliose unterzogen hatten, wurden retrospektiv mittels *international statistical classification of diseases and related health problems* (ICD) und dem Operationen- und Prozedurenschlüssel (OPS-Codes) aus der lokalen Datenbank der orthopädischen und unfallchirurgischen Klinik des Universitätsklinikums Düsseldorf akquiriert. Nach Datenbanksuche und Aktenstudium sowie Ausschluss von Doppelungen ergaben sich primär 224 konsekutive Patient*innen, welche anschließend auf die vorher festgelegten Ein- und Ausschlusskriterien geprüft wurden.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none">• Mehr als 40° Cobb Winkel der Hauptkurve• Mindestens 3 Wiedervorstellung in der Sprechstunde• Operative Aufrichtung der Skoliose mittels dorsaler Spondylodese	<ul style="list-style-type: none">• Maligne Erkrankung• Frakturen der Wirbelsäule in Patient*innenanamnese• Patient*innen mit neurologischen Erkrankungen wie:<ul style="list-style-type: none">○ Fokalem neurologischen Defizit○ Status post cerebraler Ischämie○ Status post cerebraler Hämorrhagie○ Infantiler Cerebralparese○ Spastiken○ Ataxien

Tabelle 3: Ein- und Ausschlusskriterien

In die Analyse wurden noch die folgenden prä-, postoperativ und bei *follow-up* ermittelten Faktoren eingeschlossen: Geschlecht, Alter, Risser-Stadium [33, 34], Rotation gemessen nach Nash und Moe [4, 62], Operationsmethode (Schrauben-Stab, Hybrid), Lage der Instrumentierung, Lage der Implantate (Haken, sublaminäre Bänder, Schrauben), Aufenthalt Intensivstation (in Tagen), Aufenthalt gesamt (in Tagen), Komplikationen, Schmerzen bei Entlassung und bei *follow-up* (gemessen an visueller Analogskala (VAS), numerischer Analogskala (NRS)), sonstige Komplikation, Durchführung einer selektiven Fusion nach Lenke [2, 26], Anzahl der *follow-up Untersuchungen*, Zeitraum postoperativ bis zum letztem *follow-up* (in Monaten) und weitere radiologisch bestimmte Faktoren die unter Kapitel 2.3 und 2.4 noch genauer erläutert werden.

Nach weiterer gründlicher Prüfung der Datensätze und Analyse der vorhandenen Röntgenbilder ergaben sich 55 verbleibende Patient*innen.

2.3 Klassifikation

Im Folgenden werden die verwendeten Klassifikationen näher erläutert.

2.3.1 Lenke

Im Folgenden wird die Lenke-Klassifikation dargestellt. Zunächst wird nach Lenke der Apex der jeweiligen Wirbelsäulenkrümmung in einer frontalen Röntgenaufnahme bestimmt. Der Apex ist definiert als Wirbelkörper oder Bandscheibenfach, welcher innerhalb der jeweiligen Kurve am weitesten horizontal und lateral zu einer Seite der Wirbelsäulenkrümmung abweicht und zwischen den Neutralwirbeln der Krümmung liegt [26].

Im Anschluss wird mit Hilfe des Apex der Abschnitt der Krümmung bestimmt. Wenn der Apex der Krümmung zwischen dem 2. Thorakalwirbel (Th2) und der Bandscheibe des 11. Thorakalwirbels (Th11) liegt, ist diese als thorakale Krümmung einzustufen. Falls der Apex auf dem 12. Thorakalwirbel (Th12) oder dem 1. Lumbalwirbel (L1) liegt, ist die Krümmung als thorakolumbale Krümmung zu werten.

Eine lumbale Krümmung liegt vor, wenn der Apex zwischen der Bandscheibe des 1. Lumbalwirbels (L1) und der des 4. Lumbalwirbels (L4) liegt [26].

Lokalisation der Krümmung	Höhe des Apex
thorakal	Th2 – Bandscheibe Th11/Th12
thorakolumbal	Th12 – L1
lumbal	Bandscheibe L1 – L4

Tabelle 4: Lokalisation der Krümmung in Bezug auf den Apex nach Definition der *scoliosis research society (SRS)*[26]

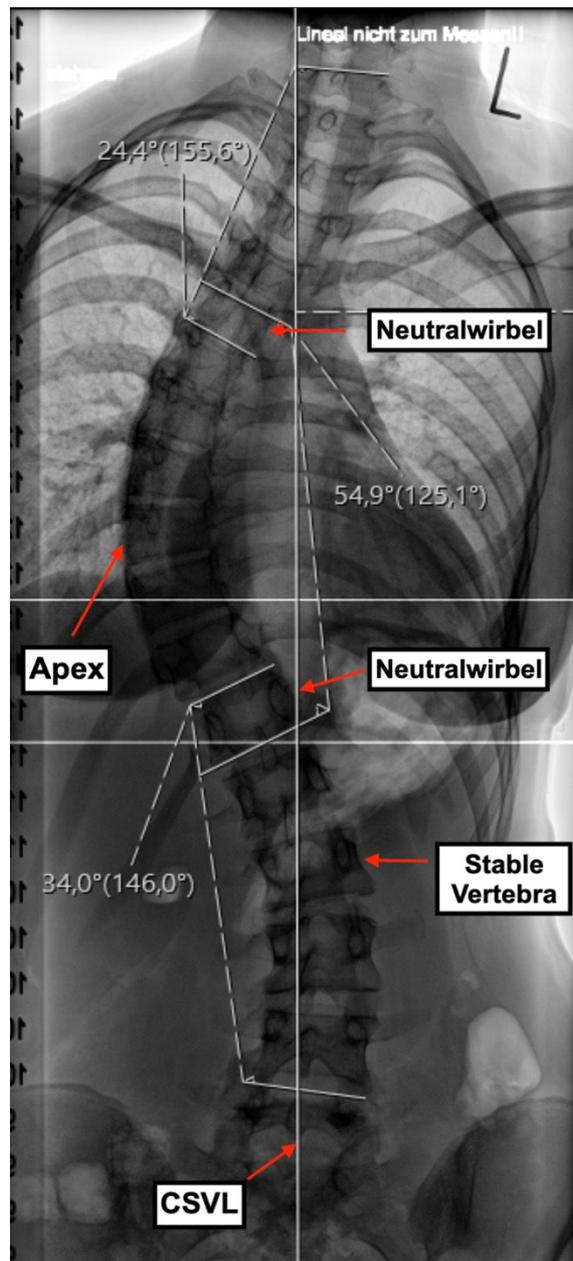


Abb. 3: Darstellung Apex, CSVL, Neutralwirbel und Stable Vertebra

In Tabelle 5 sind die Krümmungstypen der Skoliosen und ihre zugehörige Einteilung nach Lenke dargestellt. Lenkes Einteilung nach strukturell (primär) und nicht strukturell beruht auf den *reversen bending*-Aufnahmen der Patient*innen. Als *reverse bending*-Aufnahme wird die Aufnahme bezeichnet, in welcher die Patient*innen sich maximal zur Seite der Wirbelsäulenkrümmung lateralflektieren. Wenn die Wirbelsäulenkrümmung rechtskonvex ist, krümmen sich die Patient*innen auf der Aufnahme nach rechts und gleichen dadurch die Krümmung teilweise aus [2, 26].

Wenn die Studienteilnehmer*innen in der *reversen bending*-Aufnahme noch mehr als 25° Cobb Winkel in der untersuchten Kurve aufweisen, dann ist diese Wirbelsäulenkrümmung als strukturell zu werten [26].

Krümmungstyp	hochthorakal	thorakal	thorakolumbal/lumbal	Beschreibung des Kurventyps
1	nicht strukturell	strukturell (primär)	nicht strukturell	thorakal einbogig
2	strukturell	strukturell (primär)	nicht strukturell	thorakal doppelbogig
3	nicht strukturell	strukturell (primär)	strukturell	doppelbogig (S-förmig)
4	strukturell	strukturell (primär)	strukturell	dreibogig
5	nicht strukturell	nicht strukturell	strukturell (primär)	thorakolumbal/lumbal
6	nicht strukturell	strukturell	strukturell (primär)	thorakolumbal/lumbal, thorakal

Tabelle 5: **Klassifikation der Skoliosen nach Lenke et al. [2, 26]**

Ferner werden nach Lenke sogenannte *lumbar spine modifiers* definiert. Diese werden an einer frontalen p.a. Röntgenaufnahme bestimmt. Zu beachten ist, dass falls ein Beckenschiefstand über 2 cm besteht, dieser vor der Aufnahme des Röntgenbildes ausgeglichen werden muss [26].

Zunächst wird eine senkrechte Linie, die sogenannte *central sacral vertical line* (CSVL), welche durch die Mitte des ersten Sakralwirbels gelegt wird, auf der Röntgenaufnahme eingezeichnet.

Anschließend wird entschieden, welcher der am weitesten kranial gelegene Wirbelkörper ist, welcher von der CSVL nahezu mittig geschnitten wird. Dieser Wirbelkörper wird nun als *stable vertebra* (SV) angenommen. Der SV befindet sich meist am kaudalen Ende des thorakalen Wirbelsäulenabschnitts, beziehungsweise am kranialen Ende des lumbalen Abschnitts der Wirbelsäule.

Falls der am weitesten kranial gelegene, mittig geschnittene Anteil der Wirbelsäule ein Bandscheibenfach sein sollte, so wird der Wirbelkörper kaudal des Bandscheibenfachs als SV angenommen [26].

Nachdem die CSVL eingezeichnet und der SV definiert wurde, wird nun der *lumbar spine modifier* bestimmt. Man unterscheidet in *lumbar spine modifier A*, B und C. *lumbar spine modifier A* wird vergeben, wenn die CSVL bis zum SV zwischen den Pedikeln des lumbalen Wirbelsäulenabschnitts verläuft.

Lumbar spine modifier B wird vergeben, wenn die CSVL aufgrund einer Krümmung des lumbalen Wirbelsäulenabschnitts nicht mehr mittig zwischen den Pedikeln der lumbalen Wirbelsäule verläuft, sondern zwischen dem medialen Rand des konkavseitigen Pedikel und dem konkavseitigen Rand des Apex der lumbalen Krümmung.

Der *lumbar spine modifier C* ist zu vergeben, wenn die CSVL, aufgrund einer starken lumbalen Krümmung, medial des Apex der Krümmung verläuft.

Dies ist in der folgenden Abbildung noch einmal veranschaulicht.

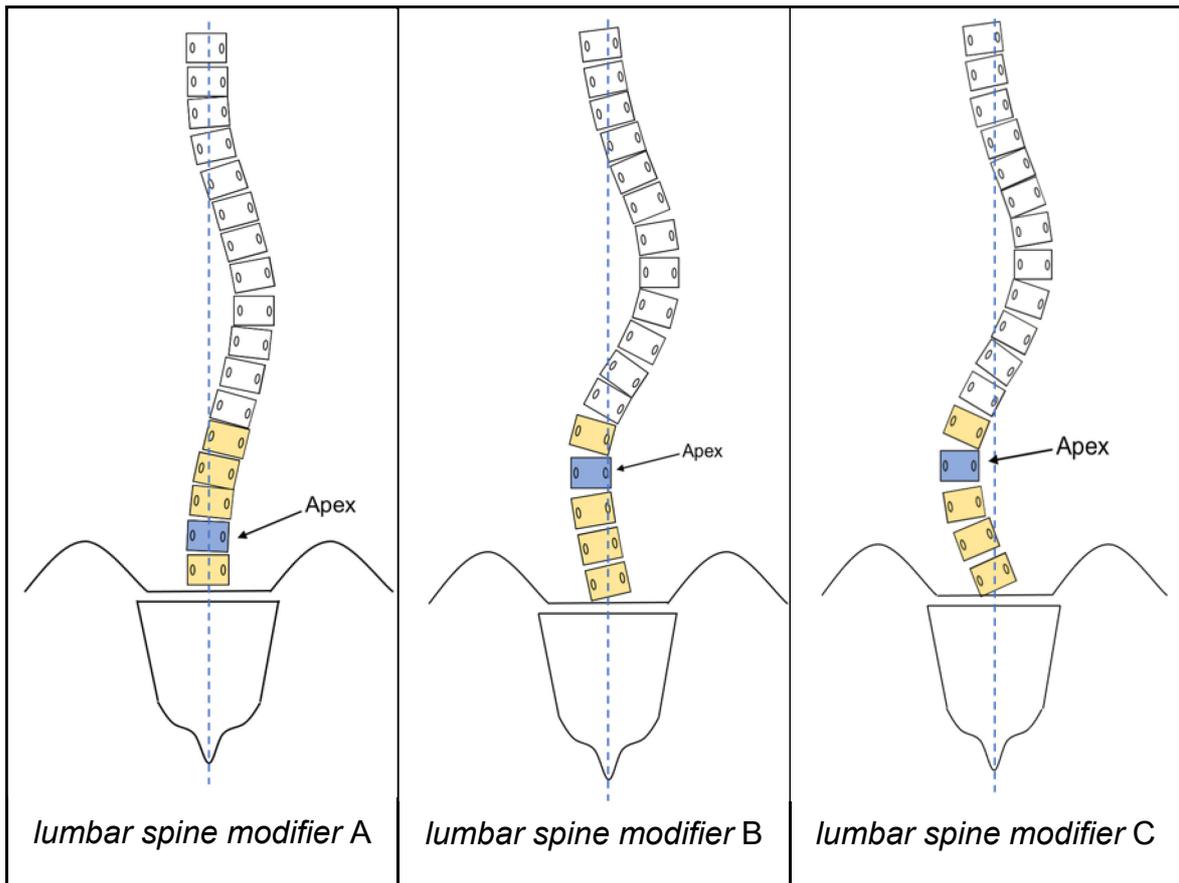


Abb. 4: **lumbar spine modifier** modifiziert nach Lenke et al. [26]

CSVL = Blau gestrichelte Linie

Zuletzt wird noch der *sagittal thoracic modifier* oder auch der T5-12 *sagittal alignment modifier* bestimmt. Dieser trifft eine Aussage über das sagittale Profil der thorakalen Wirbelsäule. Bestimmt wird dieser mithilfe eines Winkels zwischen dem 5. und dem 12. Thorakalwirbel auf einer lateralen Röntgenaufnahme. Die Einteilung des *sagittal thoracic modifier* erfolgt nach -, N und +, wobei - für einen Winkel kleiner als 10° , N für einen Winkel von $10^\circ - 40^\circ$ und + für einen Winkel über 40° steht [26].

Letztendlich wird die Lenke-Klassifikation [26] durch drei Dinge bestimmt:

1. Kurventyp (1-6)
2. *lumbar spine modifier* (A, B, C)
3. *sagittal spine modifier* (-, N, +)

Daraus ergibt sich dann beispielhaft die folgende Schreibweise: 1B-, 2AN, 6C+

In der folgenden Tabelle sind die von Lenke in seiner Publikation genannten Zugangswege für die jeweiligen Fusionsbereiche dargestellt.

Krümmungstyp nach Lenke	Fusionsbereich der Skoliose	Zugangsweg
1	thorakal	ventral & dorsal
2	thorakal & hochthorakal	dorsal
3	thorakal & lumbal	dorsal
4	thorakal, hochthorakal & lumbal	dorsal
5	thorakolumbal & lumbal	ventral oder dorsal
6	thorakolumbal & lumbal & thorakal	dorsal alternativ Kombination aus ventrodorsal

Tabelle 6: **Fusionsbereiche der Skoliose nach Krümmungstyp [2, 26]**

2.3.2 Risser-Stadium

Mithilfe des Risser-Stadiums lässt sich die Skelettreife der jeweiligen Patient*innen abschätzen. Dies ist besonders wichtig, um ein Maß für die potenzielle Progredienz der skoliotischen Veränderungen zu bekommen und dementsprechend das therapeutische Vorgehen planen zu können [2, 33, 34]. Die Ossifikation der Iliumapophyse verläuft von lateral nach medial und wird nach Risser in die Stadien von 0 bis 5 eingeteilt. In der folgenden Tabelle und der anschließenden Abbildung wird dies noch einmal verdeutlicht. Wichtig ist, dass die Stadien 0 und 5 nicht miteinander verwechselt werden dürfen, da diese röntgenologisch nicht unterschieden werden können [2].

Risser-Stadium	Prozent der Ossifikation der Iliumapophyse
0	0 %
1	bis 25 %
2	25 % - 50 %
3	50 % - 75 %
4	75 % - 99 %
5	100 %

Tabelle 7: **Risser-Stadium und Grad der Ossifikation der Iliumapophyse [2, 33, 34]**

Nachstehend eine Abbildung zur Verdeutlichung des Verlaufs des Iliumapophysenverschlusses nach Risser et al..

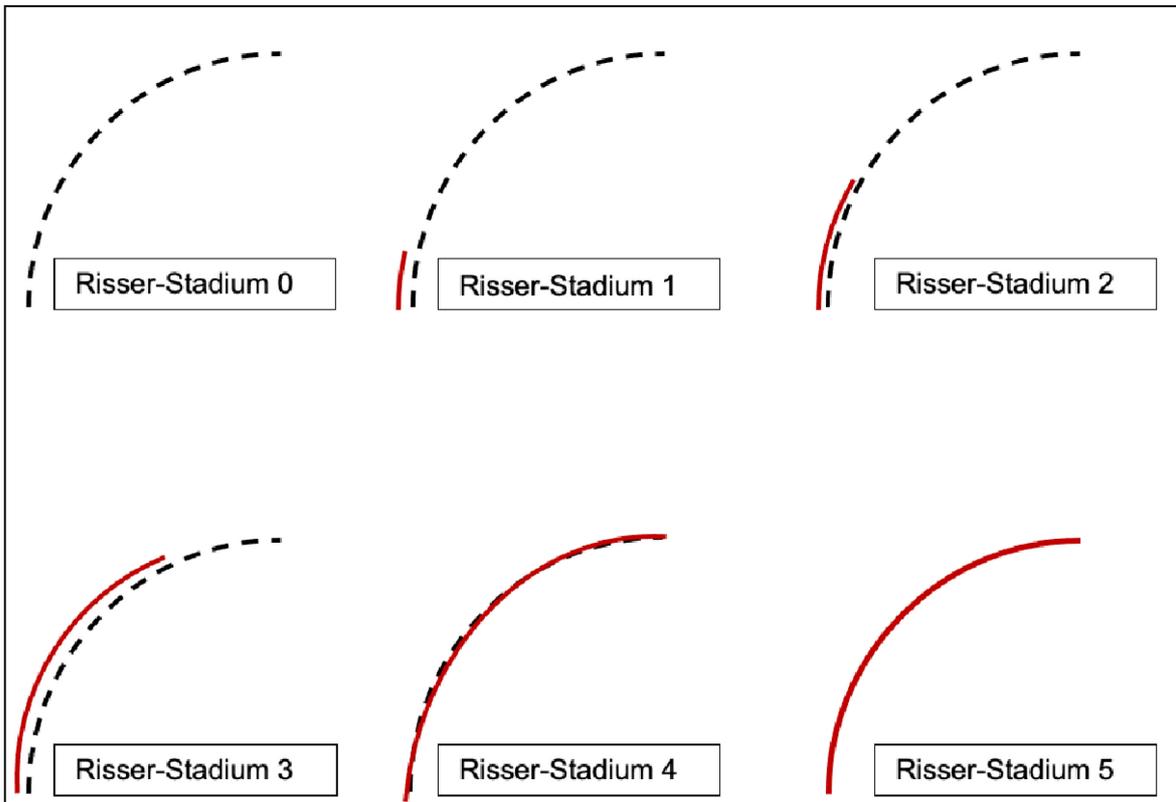


Abb. 5: **Risser-Stadien modifiziert nach Konieczny et al. [3]**

Hier in Rot dargestellt, der Schluss der Iliumapophyse von lateral nach medial

Hier in Schwarz dargestellt, das Os Ilium nach Risser in verschiedenen Stadien

2.3.3 Rotation nach Nash und Moe

Die Messung nach Nash und Moe ermöglicht eine Schätzung der Rotation des Scheitelwirbels der Skoliose zur Wirbelsäule. Nash und Moe unterteilen den Wirbelkörper, mithilfe von senkrecht zur Deckplatte eingezeichneten Linien, in sechs gleichgroße Teilabschnitte. Zur Abschätzung der Rotation dient der konvexseitige Pedikel des Scheitelwirbels der Skoliose. Dieser bewegt sich je nach Rotation des Wirbelkörpers zur Mittellinie des Wirbelkörpers. Das Ausmaß der Rotation wird mithilfe der zuvor eingezeichneten Linien bestimmt und eine Zahl von 0-4 vergeben, wobei 0 keine Rotation und 4 ein Überschreiten der Mittellinie beschreibt [4, 62].

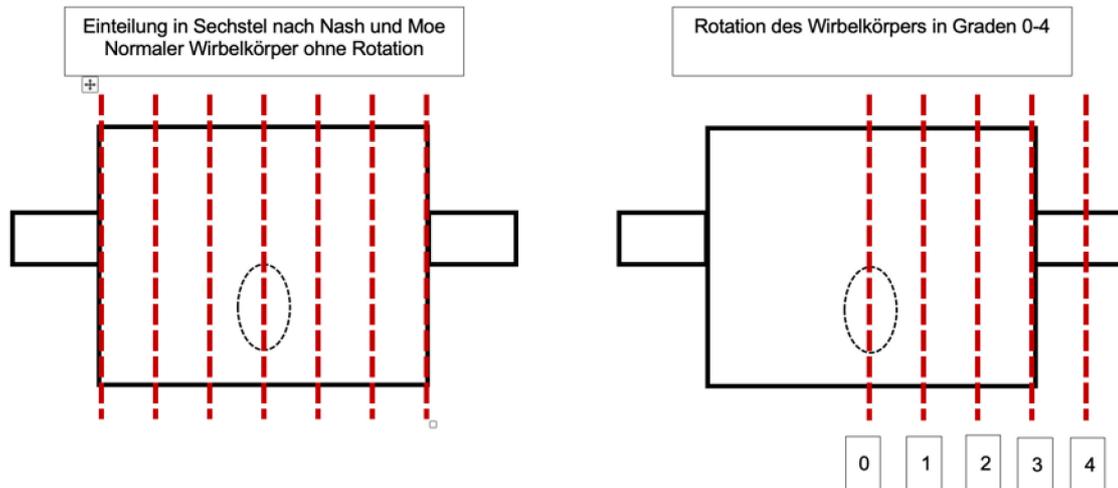


Abb. 6: Rotation modifiziert nach Nash and Moe [4]

2.3.4 Anschlusssegmentdegeneration (Weiner Grade)

Um die ASDeg radiologisch klassifizieren zu können wurde die Weiner-Klassifikation angewandt.

Diese beschreibt die osteoartrischen Veränderungen an Facettengelenken und den Bandscheiben des lumbalen Wirbelsäulenabschnitts [51]. Die Klassifikation teilt die Veränderungen aufsteigend nach ihren Schweregraden von 0 bis 3 ein. Der übersichtshalber ist dies in Tabelle 8 dargestellt.

Die ASDeg wurde mittels Vergleichs der Röntgenbilder bei prä-/ postoperativ sowie *follow-up* erhoben. Hierfür wurde ermittelt, ob eine subchondrale Sklerosierung, ein ostophytärer Anbau oder eine Minderung des Bandscheibenfaches vorlag. Zudem wurden die Bandscheiben auf das Vakuumphänomen untersucht, welches in der Weiner-Klassifikation als Gas betitelt wird. Anschließend wurde der Grad von 0-3 vergeben.

Weiner score	Facet joints	Intervertebral discs
0	<i>Normal</i>	<i>Normal, no disease, defined by normal disc height, no spur formation, and no gas</i>
1	<i>Narrowing of joint and/or mild eburnation</i>	<i>Mild disease, defined by <25 % disc space narrowing, small spur formation, minimal eburnation, and no gas</i>
2	<i>Moderate narrowing and moderate eburnation and osteophytes</i>	<i>Moderate disease, defined by 25 % - 75 % disc space narrowing, moderate spur formation, moderate eburnation, and no gas</i>
3	<i>Severe osteoarthritis with narrowing, eburnation, and osteophytes</i>	<i>Advanced disease, defined by > 75 % disc space narrowing, large spur formation, marked eburnation, and gas present</i>

Tabelle 8: **Klassifikation der Facettengelenke und der Bandscheiben nach Weiner et al. [51]**

2.3.5 Frontale und sagittale Ausrichtung

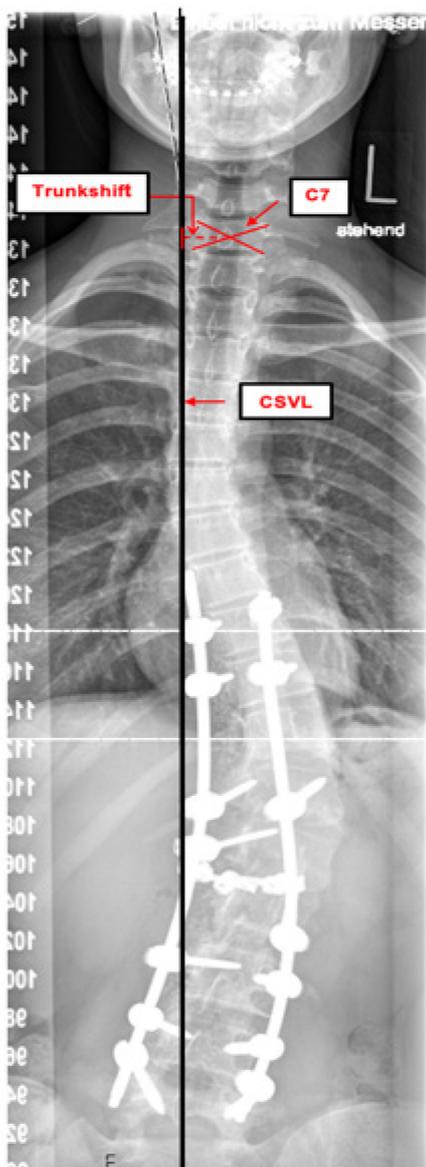
Die frontale und sagittale Ausrichtung wurde mittels des *loss of balance* bewertet. Dieser wurde definiert als Abweichung des 7. Halswirbels gegenüber der CSVL um ≥ 20 mm. Weiterhin wurde der *loss of balance* im Verlauf der Therapie bewertet und ermittelt, ob dieser im Verlauf der Therapie zu- oder abnahm.

2.4 Radiologische Patient*innenuntersuchung

Im Nachfolgenden wird ein Überblick über die angewandten radiologischen Untersuchungen gegeben und diese genauer erläutert.

Bei der Patient*innenuntersuchung wurden pro Patient*in präoperativ die frontalen p.a. Röntgenaufnahmen, lateralen Röntgenaufnahmen sowie die *bending*-Aufnahmen ausgewertet. Bei der postoperativen und *follow-up* Auswertung wurden die frontalen p.a. Röntgenaufnahmen und lateralen Röntgenaufnahmen verwendet.

2.4.1 Auswertung der frontalen Röntgenaufnahmen



Trunkshift

Der *trunkshift* wurde von uns definiert als Abstand (in mm) zwischen der Mitte des 7. Halswirbels (C7) zur CSVL.

Gemessen wurde dieser auf den frontalen prä-/postoperativen und *follow-up* Röntgenaufnahmen. Er gibt an, wie weit die Wirbelsäule frontal aus dem Lot fällt.

Abb. 7: Messung des Trunk shift in mm

Zusätzlich wurden die Abstände (in mm) des Endwirbels der Hauptkurve und des LIV zur CSVL gemessen.

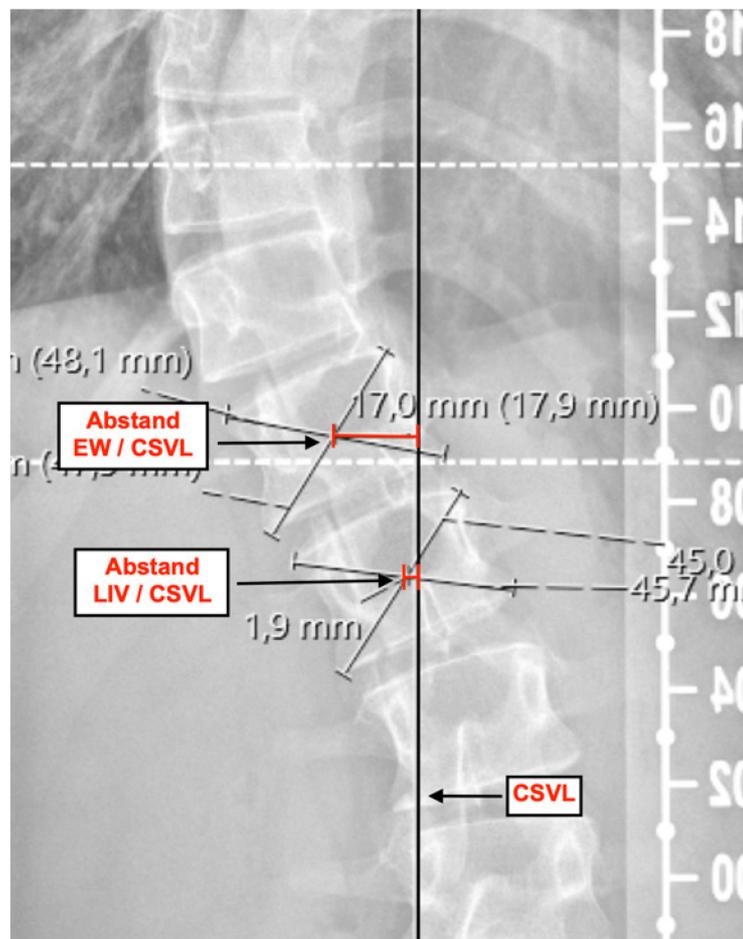


Abb. 8: Messung der Abstände EW & LIV zur CSVL

Krümmungswinkel nach Cobb

Zur Bestimmung des Grades der Wirbelsäulenkrümmung wird der Krümmungswinkel nach Cobb bestimmt. Dieser wird anhand einer zuvor angefertigten frontalen Röntgenaufnahme ermittelt. Der Cobb Winkel wird zwischen der Deckplatte des oberen und der Grundplatte des unteren Neutralwirbels der Krümmung erfasst. Diese sind definiert als die Wirbel einer Krümmung, bei denen die Deck- und Grundplatten am stärksten gegeneinander verkippt sind [2].

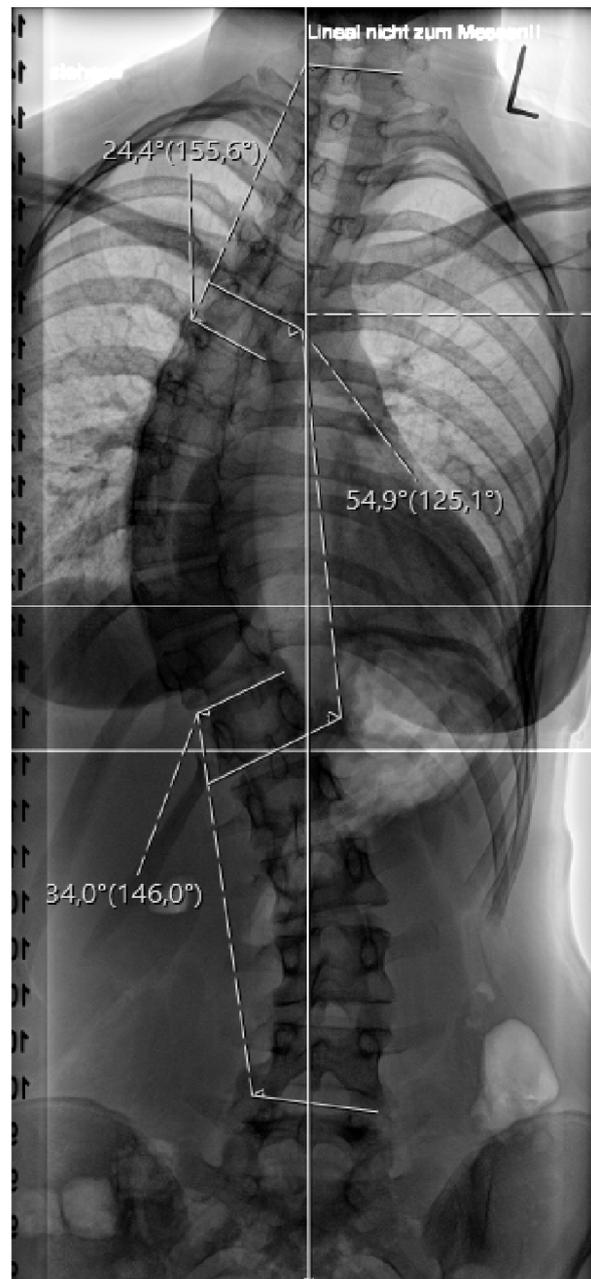


Abb. 9: **Messung der Krümmungswinkel nach Cobb [2]**

2.4.2 Auswertung der sagittalen Röntgenaufnahmen

Kyphosierung der Brustwirbelsäule

Zur Bestimmung der Kyphose der Brustwirbelsäule werden zwei Winkel auf der sagittalen Röntgenaufnahme gemessen. Der erste Winkel wird zwischen der Deckplatte des 1. Brustwirbels (Th1) und der Bodenplatte des 12. Brustwirbels (Th12) gezeichnet. Der zweite Winkel wird zwischen der Deckplatte des 5. Brustwirbels (Th5) und der Bodenplatte des 12. Brustwirbels (Th12) gezeichnet.

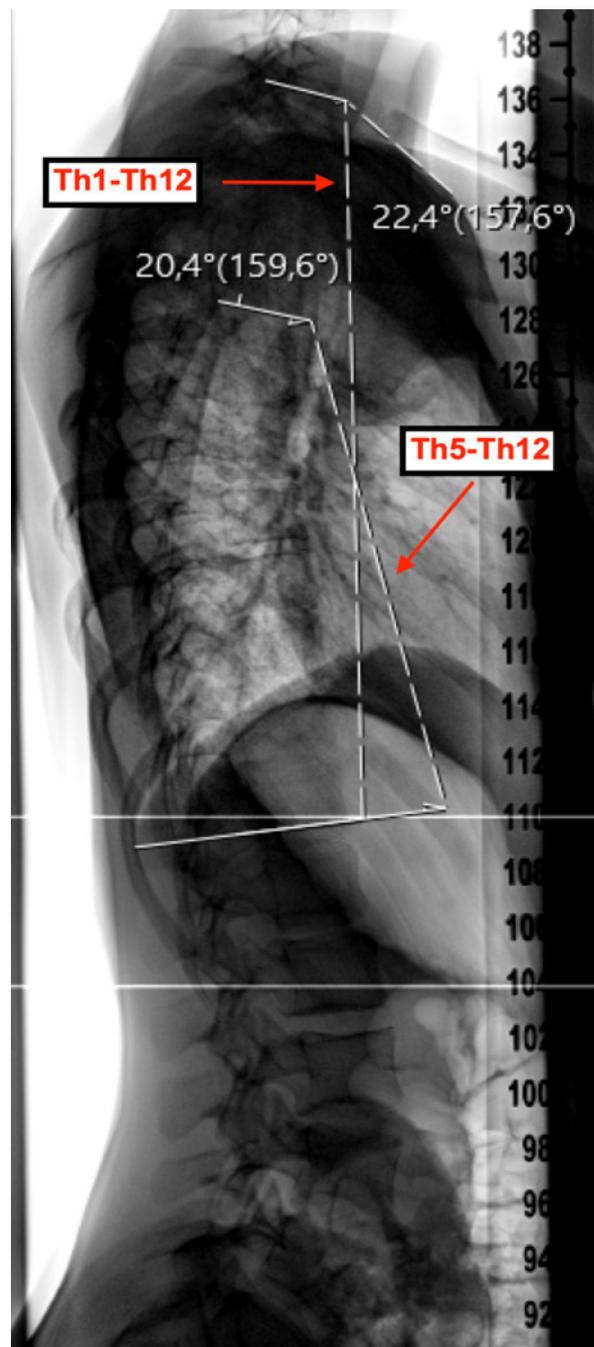


Abb.10: Darstellung der Kyphosierungswinkel

Lumbale Lordose

Die Messung der lumbalen Lordose erfolgt, indem ein Winkel zwischen der Deckplatte des 1. Lendenwirbels (L1) und der Deckplatte des 1. Sakralsegments (S1) gezeichnet wird.

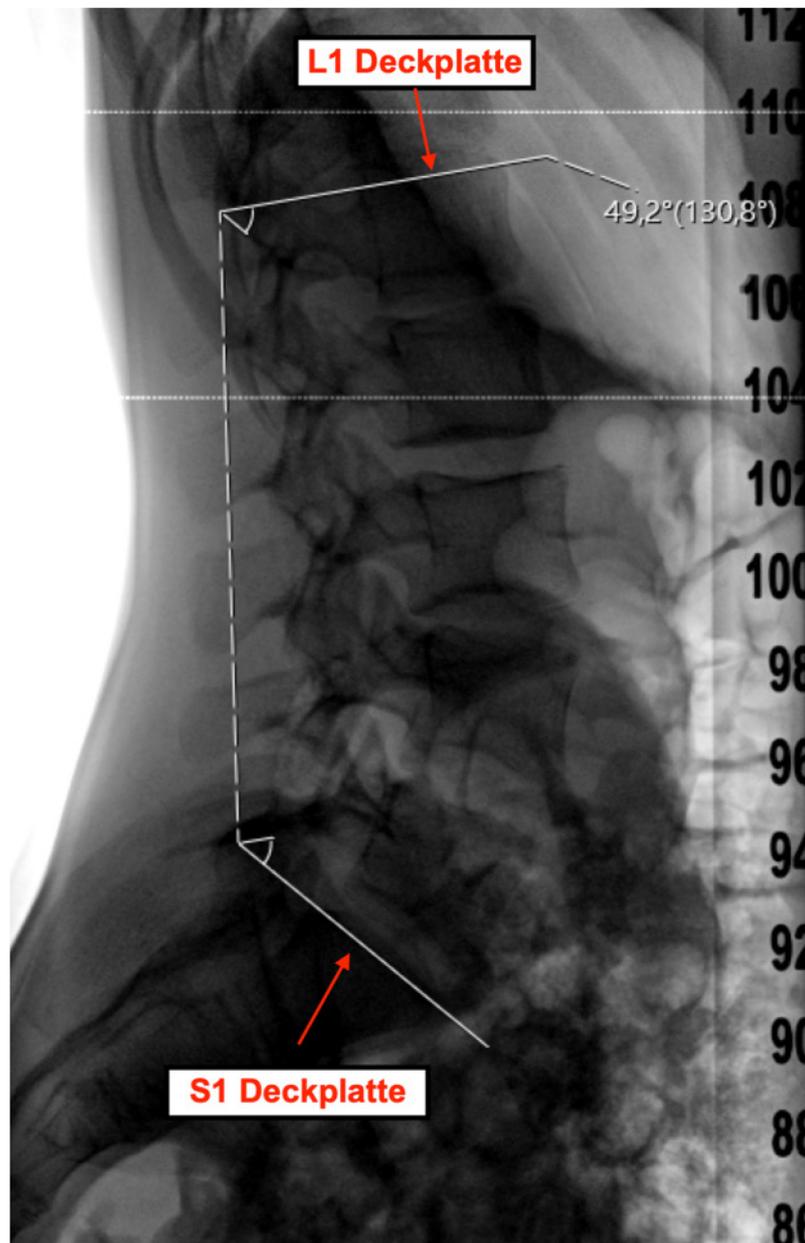


Abb. 11: Messung der lumbalen Lordose

Apex der lumbalen Lordose

Der Apex der lumbalen Lordose wurde ermittelt, indem eine senkrechte Linie an den lumbalen Abschnitt der Wirbelsäule von ventral herangelegt wurde und der Wirbel, welcher diese als erstes berührte, als Apex angenommen wurde.

Falls es ein Bandscheibenfach war, so wurde der nächstuntere Wirbelkörper als Apex angenommen. Siehe nachfolgende Abbildung.

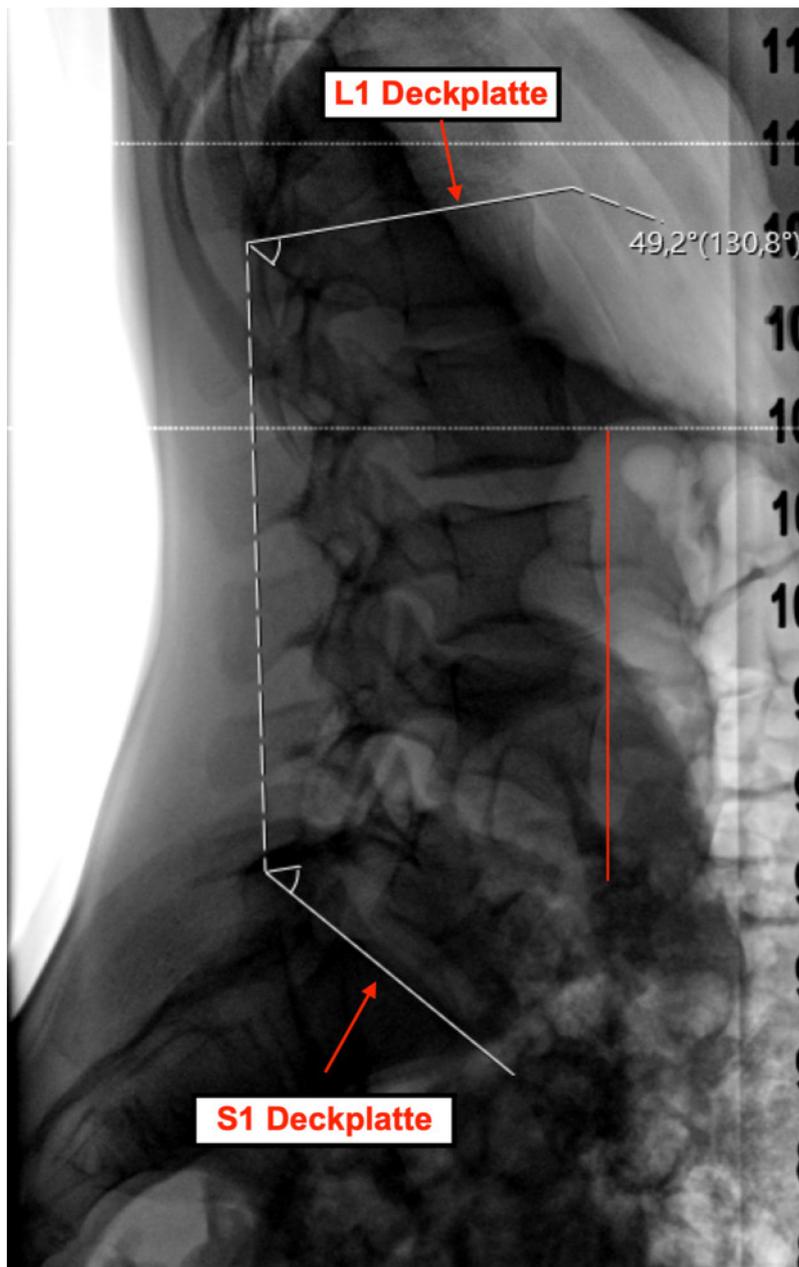


Abb. 12: Bestimmung des Apex der LL

Inflection point der lumbalen Lordose zur thorakalen Kyphose

Im sagittalen Röntgenbild wird zudem der *inflection point* (IP) des lumbalen Wirbelsäulenabschnitts nach Berthonnaud et al. bestimmt [63]. Dieser gibt an, an welchem Punkt der Wirbelsäule die kaudale Lordose in die weiter kranial gelegene Kyphose übergeht. Zusätzlich wurde auch der Abstand des LIV zum *inflection point* in Wirbelkörpern ermittelt. Dies verdeutlicht die untenstehende Abbildung noch einmal.

Beckenparameter und Wirbelsäulen-Beckenparameter

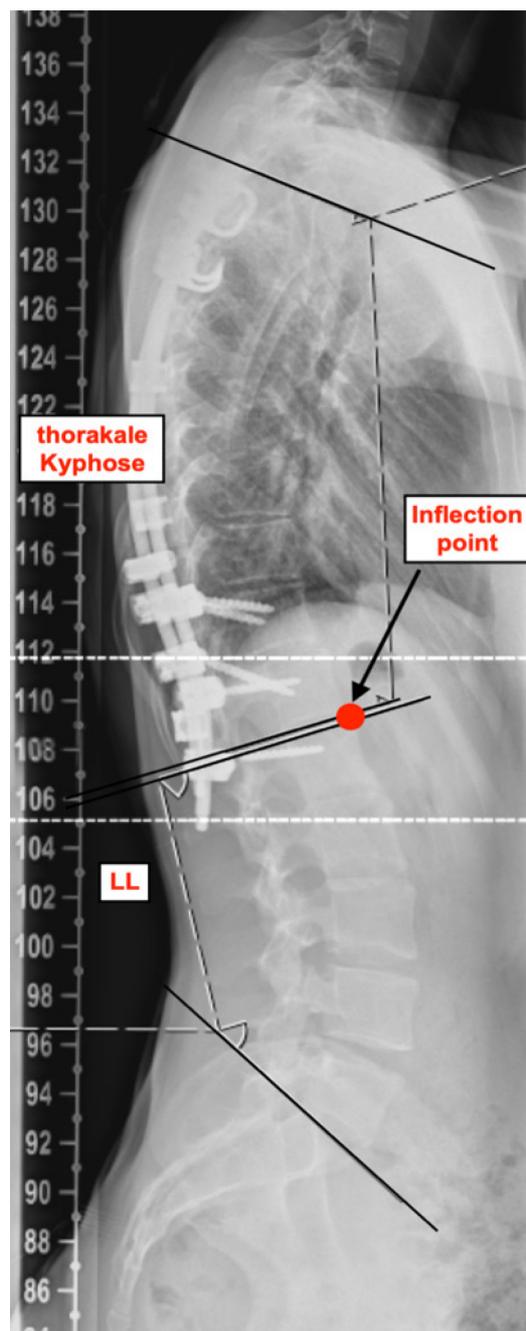


Abbildung 13: Messung des *inflection point*

Die gemessenen Beckenparameter bestehen aus Beckeninzidenz (*pelvic incidence* (PI)), Beckenneigung (*pelvic tilt* (PT)), Sakrumneigung (*sacral slope* (SS)), Wirbelsäulenneigung (*spinal tilt* (ST)) und Wirbelsäulen-Becken-Winkel (*spino sacral angle* (SSA)).

Das Verhältnis der Femurköpfe zur sakralen Deckplatte wird durch die Beckeninzidenz (PI) als Winkel beschrieben. Die erste Gerade des Winkels wird zwischen dem Zentrum der Deckplatte von S1 und dem Zentrum der Femurköpfe gebildet. Die zweite Gerade wird von dem Zentrum von S1 im rechten Winkel zur S1 Deckplatte gezeichnet. Die PI ist bei jedem Menschen einzigartig, da diese dem morphologischen Wandel unterliegt. Nach Roussouly ist die PI ein konstanter Parameter [5, 64].

Die Beckenneigung (PT) wird als Winkel durch eine Senkrechte, welche im Zentrum der Femurköpfe endet, und einer Gerade zwischen dem Zentrum der Femurköpfe und dem Zentrum der Deckplatte von S1, gemessen [5, 64]. Die Sakrumneigung (SS) wird als Winkel einer horizontalen Linie und einer Geraden, welche parallel zur Deckplatte von S1 verläuft, beschrieben [5].

Die Wirbelsäulenneigung (ST) ist ein Winkel, welcher die Orientierung der Wirbelsäule zum Becken ausdrückt. Dieser Winkel wird gebildet von einer Geraden aus dem Zentrum von C7 zum Zentrum der Deckplatte von S1 und einer Horizontalen mit Beginn im Zentrum der Deckplatte von S1 [6].

Der Wirbelsäulen-Becken-Winkel (SSA) von Roussouly et al. beschreibt die globale Kyphosierung der Wirbelsäule. Der Winkel wird von einer Geraden aus dem Zentrum von C7 zum Zentrum der Deckplatte von S1 und einer Geraden, welche parallel zur Deckplatte von S1 verläuft, gebildet. Wie auch die Beckeninzidenz unterliegt der Wirbelsäulen-Becken-Winkel einem morphologischen Wandel [6].

Für die eben erläuterten Parameter wurden von Roussouly et al. mathematische Zusammenhänge erkannt und charakterisiert [46, 65].

$PI = SS + PT$
$ST = SSA - SS$

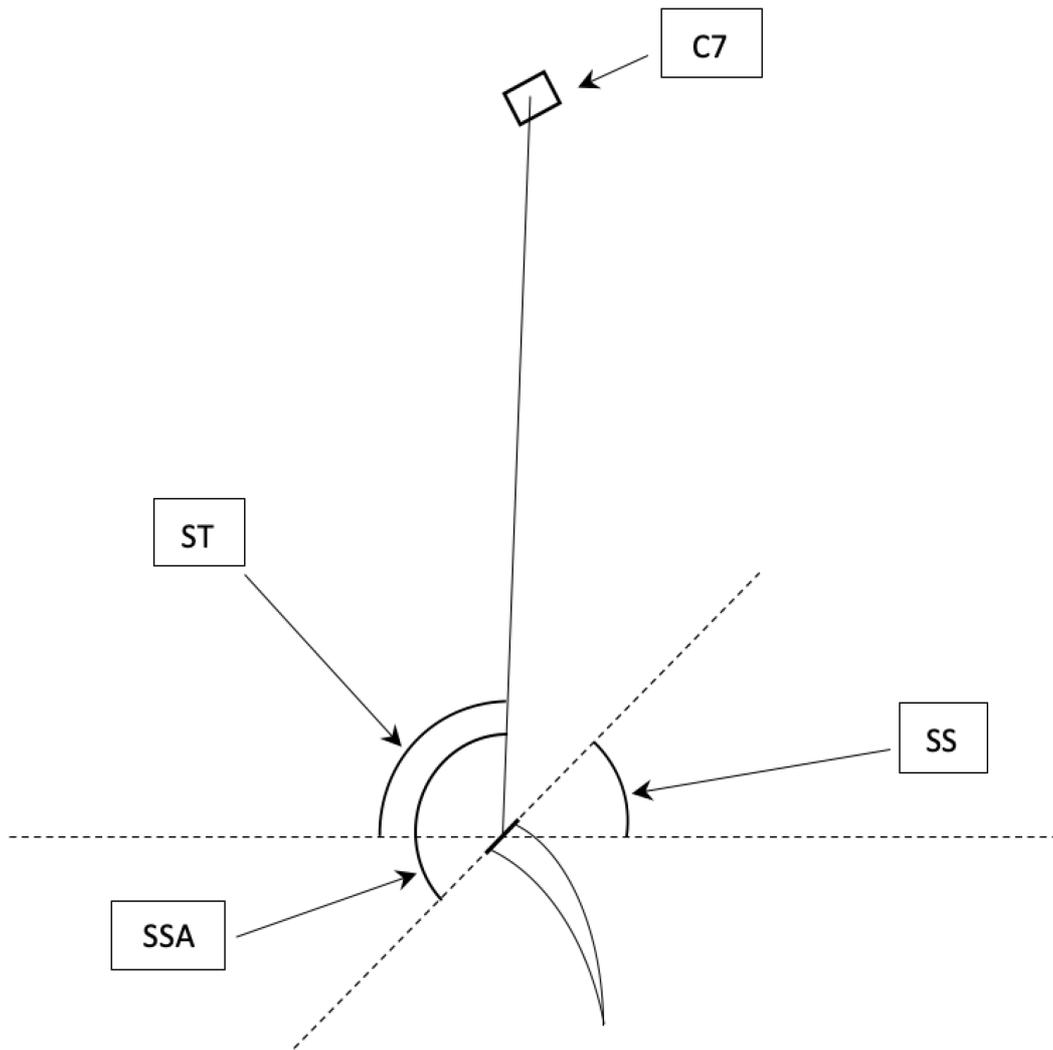


Abb. 16: **sagittale Parameter modifiziert nach Roussouly et al. [6]**

C7 sagittal vertical axis

Ein weiterer Parameter ist die *C7 sagittal vertical axis (C7SVA)*, welche ein Maß für die sagittale Translation der Wirbelsäule ist [5, 64, 66]. Sie wird als Horizontale zwischen der *C7-plumbline* und einer senkrechten Linie am dorsalen Ende der Deckplatte des 1. Sakralwirbels gemessen. Die *C7-plumbline*, ist eine Senkrechte aus dem Mittelpunkt des 7. Halswirbels [64, 65]. Die *C7-plumbline* sollte bei einer ausbalancierten Wirbelsäule hinter dem dorsalen Ende der Deckplatte von S1 liegen. Falls dies nicht der Fall ist, lässt sich ein Ungleichgewicht der Wirbelsäule vermuten [6, 64].

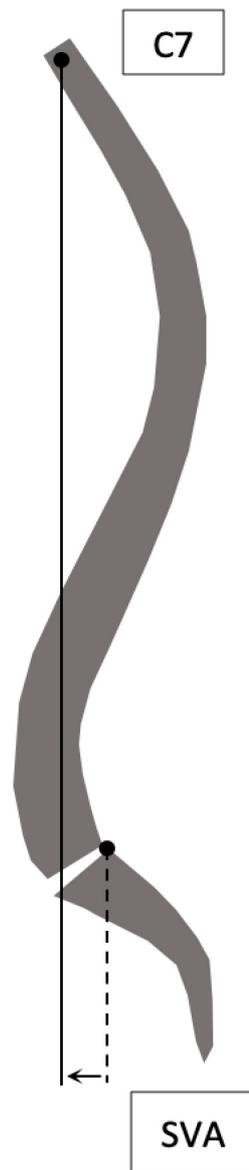


Abb. 17: C7SVA nach Schwab et al. [5]

Pelvic incidence und lumbale Lordose

Nach Bestimmung der *pelvic incidence* und der lumbalen Lordose wurde deren Differenz gebildet. Dies wurde prä- und postoperativ sowie bei der letzten Funktionsuntersuchung errechnet.

T1 pelvic angle (TPA)

Der TPA nach Protopsaltis et al. beschreibt die globale sagittale Wirbelsäulenform eines Individuums. Der Winkel wird gemessen, indem eine Gerade zwischen dem Zentrum des Femurkopfes und dem Zentrum des ersten Brustwirbels (Th1) und eine Gerade zwischen dem Zentrum des Femurkopfes und dem Zentrum der Deckplatte von S1 gezeichnet wird [67]. Die nachstehende Abbildung verdeutlicht dies noch einmal.

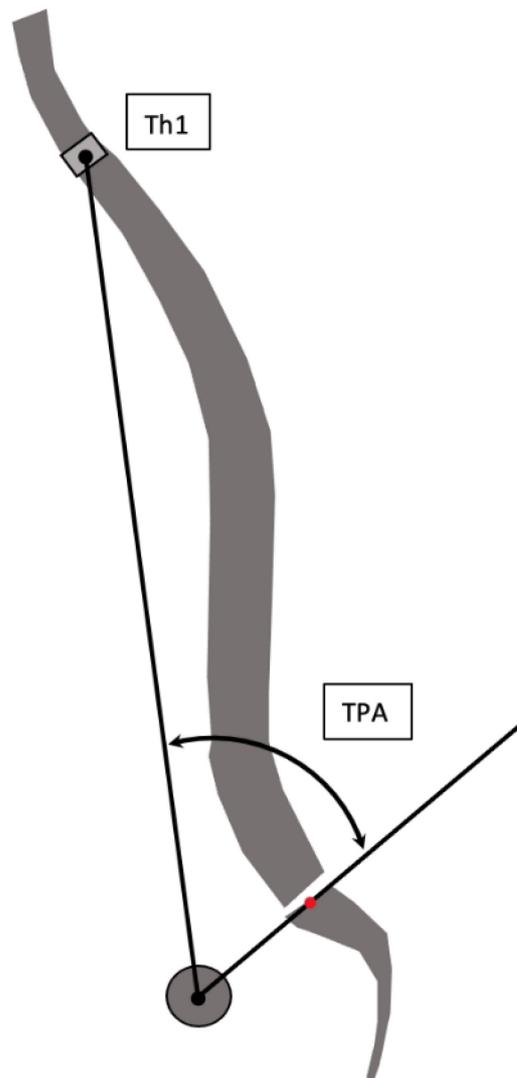


Abb. 18: **Messung des TPA nach Protopsaltis et al. [63]**

2.4.3 Auswertung der *bending*-Aufnahmen

Die Auswertung der *bending*-Aufnahmen erfolgte mit Messung der Cobb Winkel der cervicalen, thorakalen und lumbalen Abschnitte der Wirbelsäule in maximaler Lateralflexion. Zudem wurden die Bandscheibenfächer unterhalb des LIV und des EW in den *bending*-Aufnahmen untersucht. Hierzu wurden die Winkel der Bandscheibenfächer bei der Lateralflexion zwischen den Deck- und Grundplatten der angrenzenden Wirbelkörper bestimmt.

Zudem erfolgte die Bestimmung der Mobilität der Bandscheibenfächer unterhalb des LIV. Diese wurde definiert als eine Änderung des zuvor beschriebenen Winkels zwischen den anfangs erstellten a.p. nativradiologischen Aufnahmen und den *bending*-Aufnahmen.

2.5 Materialverarbeitung und Datenverarbeitung

Die Vermessung der Röntgenbilder erfolgte teils analog auf Röntgenaufnahmen, teils digital über das *picture archiving and communication system* IDS7 PACS Version 19.3.6 der Firma Sectra AB, Linköping, Schweden. Weiterhin wurden über CMG Medico, einem Krankenhausinformationssystem, sowie über das digitale Patient*innenarchiv des Universitätsklinikums Düsseldorf und analoge Patient*innenakten Informationen über die Patient*innen gesammelt und verarbeitet. Die ermittelten Daten wurden in einer Microsoft Excel-Tabelle (*Microsoft Corporation*, Redmond, USA) gesichert. Weiterhin wurden Berechnungen mit Microsoft Excel vorgenommen und später in das Statistikprogramm *statistical package for the social sciences* (SPSS) Nummer 25 (©IBM) Armonk, New York, USA übertragen.

2.6 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Daten wurden sowohl deskriptive als auch vergleichende Tests angewandt.

Die deskriptiven Daten werden als Mittelwert (*MW*) und Standard- Abweichung (*SD*) sowie Minimum und Maximum, bzw. mittels Häufigkeit (*n*) sowie Prozenten (%), dargestellt.

Die Daten der Analyse hinsichtlich des Korrekturpotentials der Haupt- und Nebenkurve zeigten sich normalverteilt, sodass t-Tests angewendet wurden.

Hauptthema der Arbeit war es, einen Ausblick bezüglich der Instrumentationshöhe bei Skoliosen, in Bezug auf den obersten und untersten zu instrumentierenden Wirbelkörper, zu geben. Um dies herauszufinden, führten wir einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) durch. Einfaktorielle Varianzanalysen werden angewendet, wenn bewiesen werden soll, dass sich mehrere Gruppen im Vergleich statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Zur Testung der Varianzhomogenität wurde der Levene-Test angewandt. Die Varianzhomogenität wird bei einem $p < 0,05$ als verletzt beschrieben, jedoch kann bei einem $p > 0,05$ von einer Varianzhomogenität ausgegangen werden.

Je nach Skalenniveau wurden für die Testung der non-parametrischen Korrelationen das Chi-Quadrat, Phi/Cramer-V, Eta-Koeffizient, Spearman sowie Kendal-Tau angewandt.

Ergebnisse

3.1 Deskriptive Studiendaten

Die Daten der Patient*innen wurden prä- und postoperativ sowie beim *follow-up* erhoben. Tabelle 9 zeigt den Mittelwert, den Median, die Standardabweichung sowie das Minimum und Maximum von Alter (in Jahren), OP-Dauer (in Minuten), Aufenthalt der Patient*innen auf der Intensivstation (in Tagen), sowie den gesamten Krankenhaushalt (in Tagen) und den Abstand der letzten Funktionsuntersuchung nach der Operation (in Monaten).

	Alter (Jahre)	OP-Dauer (Minuten)	Aufenthalt Intensivstation (Tage)	Aufenthalt gesamt (Tage)	Follow-up (Monate)
Anzahl (n)	55	55	55	55	55
Mittelwert (MW)	14,7	323	0,94	16,67	36,61
Median	15	295	0	12	20
Standardab- weichung (SD)	1,27	94	1,33	12,28	38,46
Minimum (Min)	12	215	0	7	3
Maximum (Max)	18	690	6	69	163

Tabelle 9: Alter, OP-Dauer, Intensivstationsaufenthalt, Krankenhausaufenthalt, follow-up

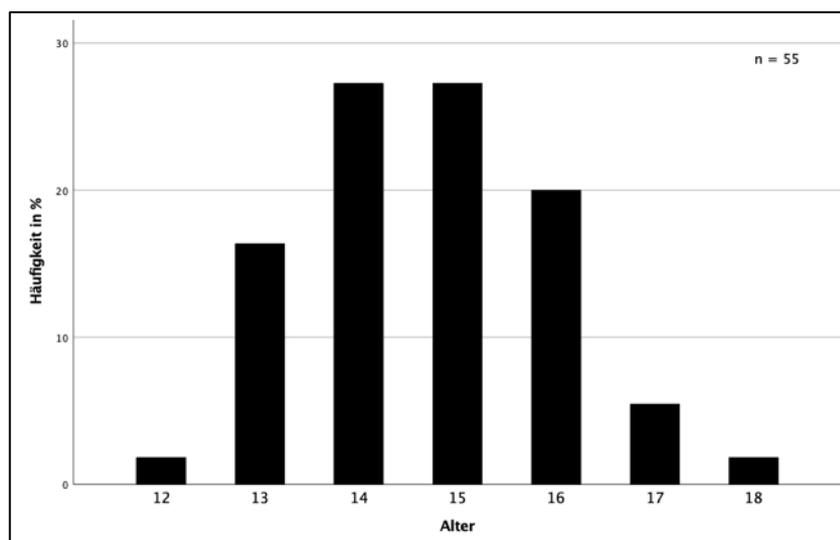


Abb. 19: Altersverteilung in Jahren

$n = 55$, $MW = 14,7$, $SD = 1,27$, $Max = 18$, $Min = 12$

Wie aus Tabelle 10 entnommen werden kann, zeigte die Analyse auf die Geschlechterverteilung bezogen, 47 weibliche und 8 männliche Patient*innen. In Bezug auf das Alter der Patient*innen bei Operation stellte sich heraus, dass der Mittelwert bei 14,7 und der Median bei 15 lag. Zudem zeigte sich, dass die Kohorte zu 85,5 % aus weiblichen Patient*innen bestand.

	Häufigkeit (n)	Prozente (%)
Weiblich	47	85,5
Männlich	8	14,5
Gesamt	55	100

Tabelle 10: **Geschlechterverteilung**

Die Kohorte zeigte in Bezug auf die Krümmungstypen nach Lenke, eine kumuliert prozentuale Verteilung von 76,4 % der Typen 1 und 2, wie der nachstehenden Abbildung entnommen werden kann.

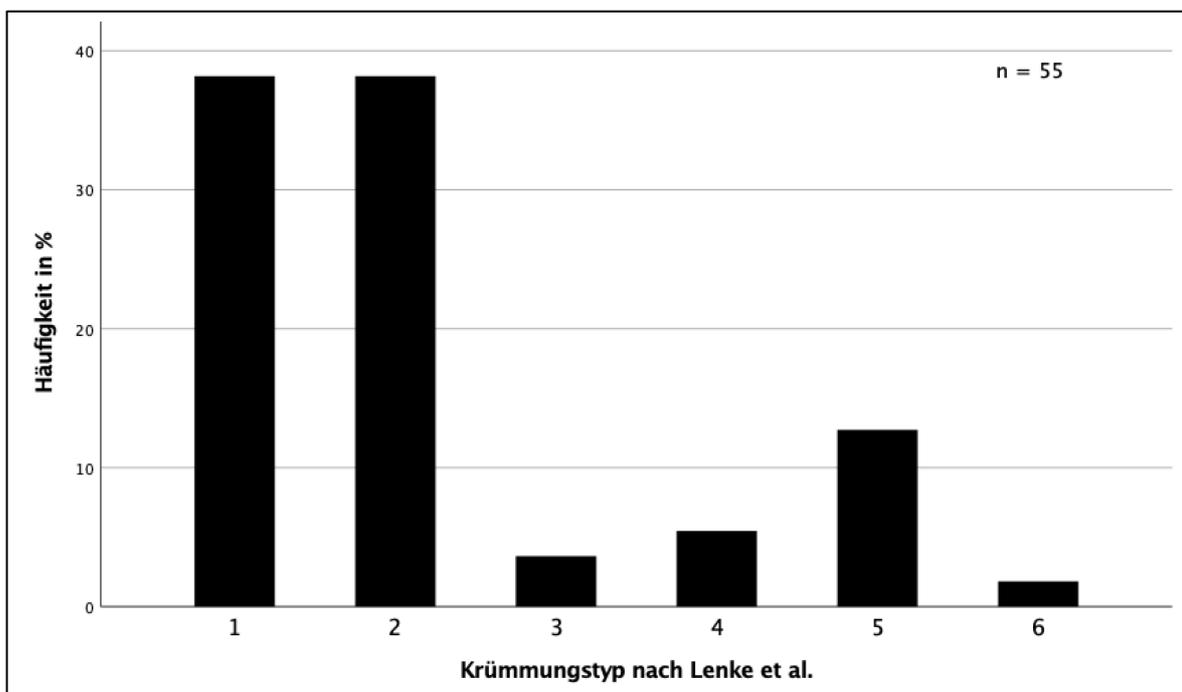


Abb. 20: **Prozentuale Verteilung der Krümmungstypen nach Lenke et al.**

3.2 Korrekturpotential der Haupt- und Nebenkurve

Wie in Tabelle 11 zu sehen ist, wurden insgesamt 85,5 % der Patient*innen mit einer Hybridinstrumentierung (HI) versorgt. Lediglich 8 der 55 Patient*innen erhielten eine Schrauben-Stab Instrumentierung (SSI).

	Häufigkeit (n)	Prozente (%)
Hybridverfahren ohne sublaminiäre Bänder	22	40
Hybridverfahren mit sublaminiären Bändern	25	45,5
Schrauben-Stab-Instrumentierung	8	14,5
Gesamt	55	100

Tabelle 11: Häufigkeit der Hybrid- und Schrauben-Stab Instrumentierung

Das Korrekturpotential der Hauptkurve zeigte keinen signifikanten ($p > 0,05$) Unterschied zwischen der Hybridinstrumentierung und der Schrauben-Stab-Instrumentierung. Die Häufigkeitsverteilung der selektiven Fusion und nicht selektiven Fusion ergab eine Mehrheit zugunsten der selektiven Fusion mit 58,2 %.

	Häufigkeit (n)	Prozente (%)
Selektive Fusion	32	58,2
Nicht selektive Fusion	23	41,8
Gesamt	55	100

Tabelle 12: Häufigkeit der selektiven Fusion

Hinsichtlich der Nebenkurve zeigte sich ein signifikant ($p < 0,05$) höheres Korrekturpotential ($MW = 26,89$; $SD = 14,3$) durch die nicht selektive Fusion. Jedoch zeigte sich auch bei der selektiven Fusion eine mittlere Korrekturrate von $15,1^\circ$ ($SD = 9,21$) was eine Korrektur von 39 % entspricht.

Die Betrachtung der Korrektur der sagittalen Balance ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen der selektiven und der nicht selektiven Fusion ($p > 0,05$).

Die Untersuchung, in Bezug auf die präoperativ gemessenen *bending*-Aufnahmen und die Mobilität im Verhältnis zur Korrektur der Haupt- und Nebenkurve, zeigte keinen signifikanten Unterschied ($p > 0,05$). Jedoch zeigten die gemessenen Cobb Winkel der präoperativen *bending*-Aufnahmen eine Differenz zur Hauptkurve der präoperativ aufgenommenen Röntgenaufnahme von $24,06^\circ$ ($SD = 10,63^\circ$). Zudem zeigte sich im Vergleich der prä- und postoperativ gemessenen Hauptkurven eine Korrektur von $30,33^\circ$ ($SD = 10,76^\circ$). Die Korrelation miteinander ergab ein signifikantes Ergebnis von $p < 0,0001$ ($r = 0,484$).

Bei der Korrektur der Rotation nach Nash und Moe ergab sich bei 24 Patient*innen eine Verbesserung der Rotation um einen oder mehr Grade. Lediglich bei zwei Patient*innen mit Hybridinstrumentierung kam es zu einer Rotationsverschlechterung vom zweiten auf den dritten Grad.

Korrekturgrad	+1	0	-1	-2	Gesamt
Schrauben-Stab-Instrumentierung	0	5	3	0	8
Hybridverfahren	2	23	12	9	46

Tabelle 13: Korrektur der Rotation in Graden nach Nash und Moe

3.3 Wahl der Instrumentationshöhe

Bei der Wahl der Instrumentationshöhe stellte sich heraus, dass nur ein Abstand des untersten instrumentierten Wirbels (LIV) zum Endwirbel (EW) von mehr als 5 Wirbelkörpern (WK), in Bezug auf die Differenz der Nebenkurve von präoperativ zu postoperativ, signifikante Auswirkungen ($p < 0,001$) hatte.

Weiterhin hatte, im Vergleich von prä- zu postoperativ, nur ein Abstand des LIV zum *stable vertebra* (SV) von mehr als 4 WK einen signifikanten Einfluss ($p < 0,01$) auf die Korrektur der Nebenkurve. Zudem zeigte sich eine statistisch signifikante Auswirkung ($p < 0,01$) des Abstands von 3 oder mehr WK vom LIV zum *inflection point* hinsichtlich des Korrekturpotentials der Nebenkurve. Es konnte kein signifikantes Ergebnis ($p = 0,425$), bezüglich des Abstands zwischen LIV zum Apex der lumbalen Lordose in Bezug auf das Korrekturpotential, dargestellt werden.

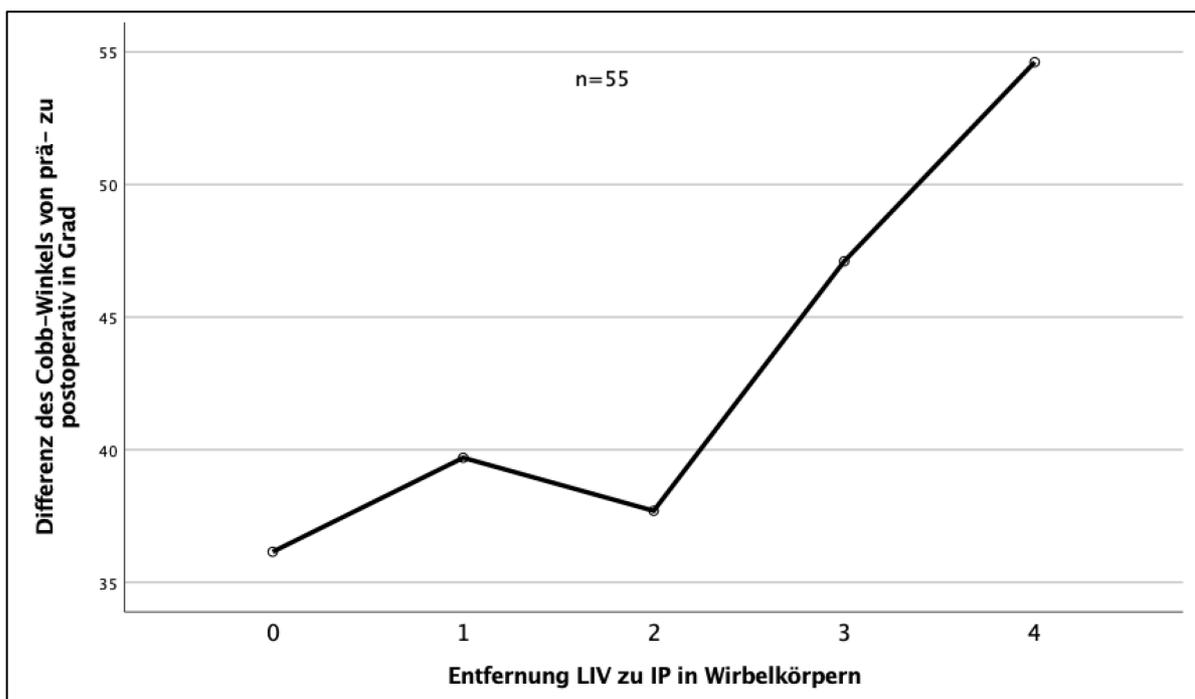


Abb. 21: Abstand LIV zu IP in Wirbelkörpern

3.4 Komplikationen der Patient*innen

Die Analyse bezüglich der Komplikationsraten nach dorsaler Instrumentierung ergab, dass in absteigender Häufigkeit die Wundheilungsstörungen/Wundinfektionen und mechanische Komplikationen die häufigsten Komplikationen waren. Andere Komplikationen waren passagere Hypästhesien und Parästhesien. Mit 80 % hatten die meisten der Patient*innen keine Komplikationen nach der Operation.

	Häufigkeit (n)	Prozente (%)
Wundheilungsstörung, Wundinfektionen	3	5,5
Mechanische Komplikation	2	3,6
ASDis	1	1,8
Keine Komplikationen	44	80
Andere	5	9,1
Gesamt	55	100

Tabelle 14: Postoperative Komplikationen

Eine selektive Analyse bezüglich der Komplikationsrate und der operativen Versorgung mittels Schrauben-Stab- oder Hybridinstrumentierung ergab eine Überlegenheit der Schrauben-Stab-Instrumentierung gegenüber des Hybridverfahrens.

Bei 87,5 % der Patient*innen, die mittels Schrauben-Stab System instrumentiert wurden, gab es keinerlei Komplikationen. Hingegen hatten nur 78,7 % der mittels Hybridverfahren instrumentierten Patient*innen keine Komplikationen.

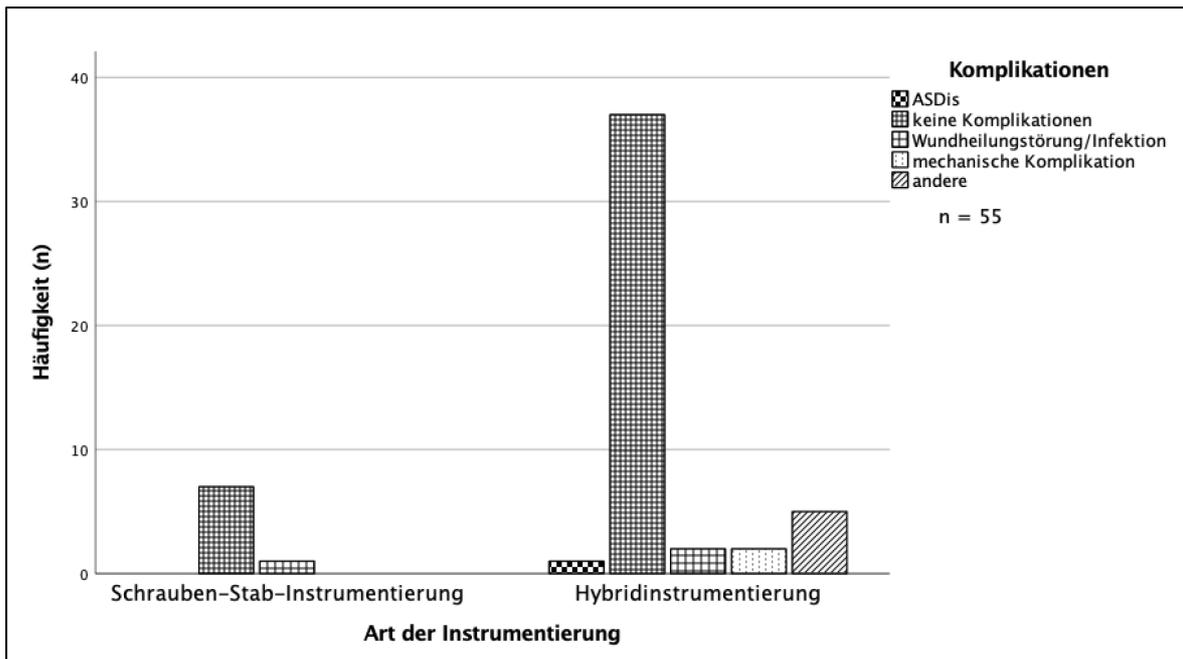


Abb. 22: Art und Häufigkeit der Komplikationen in Bezug auf die Art der Instrumentierung

In der untersuchten Kohorte zeigte sich, dass 21,8 % ein *loss of balance* entwickelten, jedoch bei 78,2 % kein *loss of balance* entstand. Im Vergleich der Instrumentierungen zeigte sich eine seltenere Entwicklung von *loss of balance* (12,5 % zu 23,4 %) in der mit Schrauben-Stab-Instrumentierung versorgten Gruppe von Patient*innen.

	SSI	HI	SSI	HI
	Häufigkeit (n)		Prozente (%)	
Loss of balance	1	11	12,5	23,41
Kein loss of balance	7	33	87,5	70,21
Datenerhebung nicht möglich	0	3	0	6,38
Gesamt	8	47	100	100

Tabelle 15: Häufigkeit des *loss of balance* in Bezug auf die Art der Instrumentierung

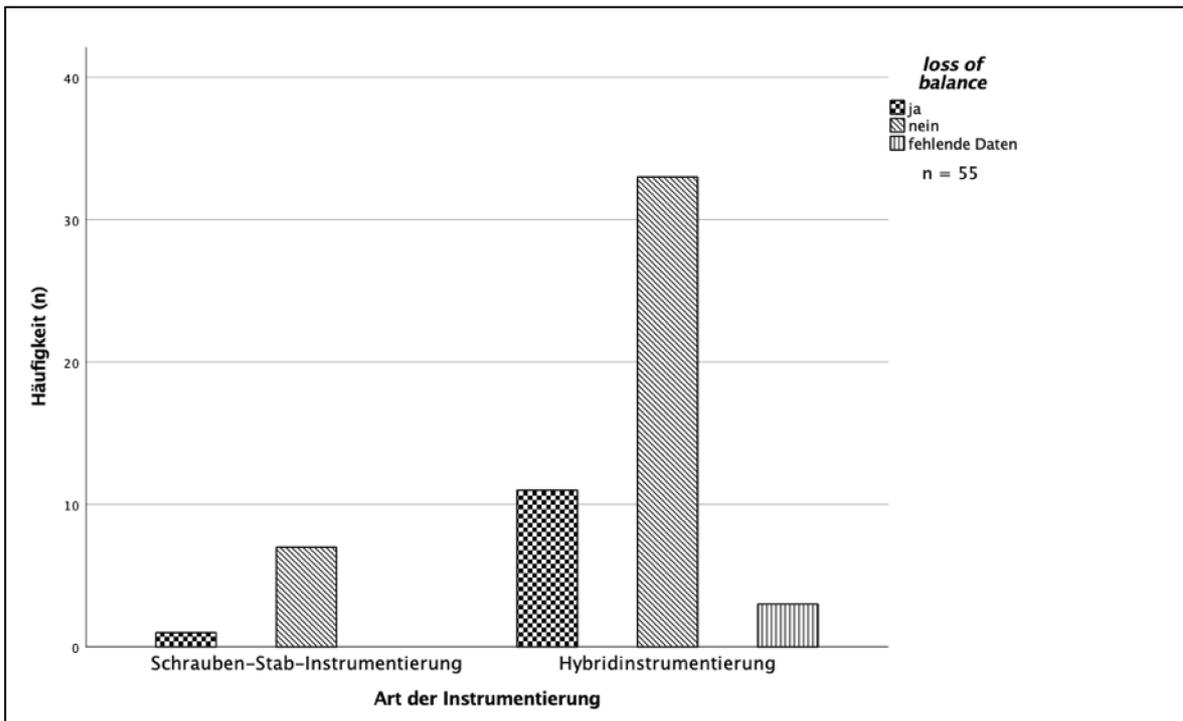


Abb. 23: Häufigkeit des *loss of balance* in Bezug auf die Art der Instrumentierung

Ein *loss of balance* zeigte sich im Vergleich der selektiven und nicht selektive Fusion nahezu prozentual gleichverteilt mit 21,9 % und 21,7 %.

	Selektive Fusion	Nicht selektive Fusion	Selektive Fusion	Nicht selektive Fusion
	Häufigkeit (n)		Prozente (%)	
<i>loss of balance</i>	7	5	21,9	21,7
Kein <i>loss of balance</i>	24	16	75	69,6
Datenerhebung nicht möglich	1	2	3,1	8,7
Gesamt	32	23	100	100

Tabelle 16: Häufigkeit des *loss of balance* in Bezug auf die Art der Fusion

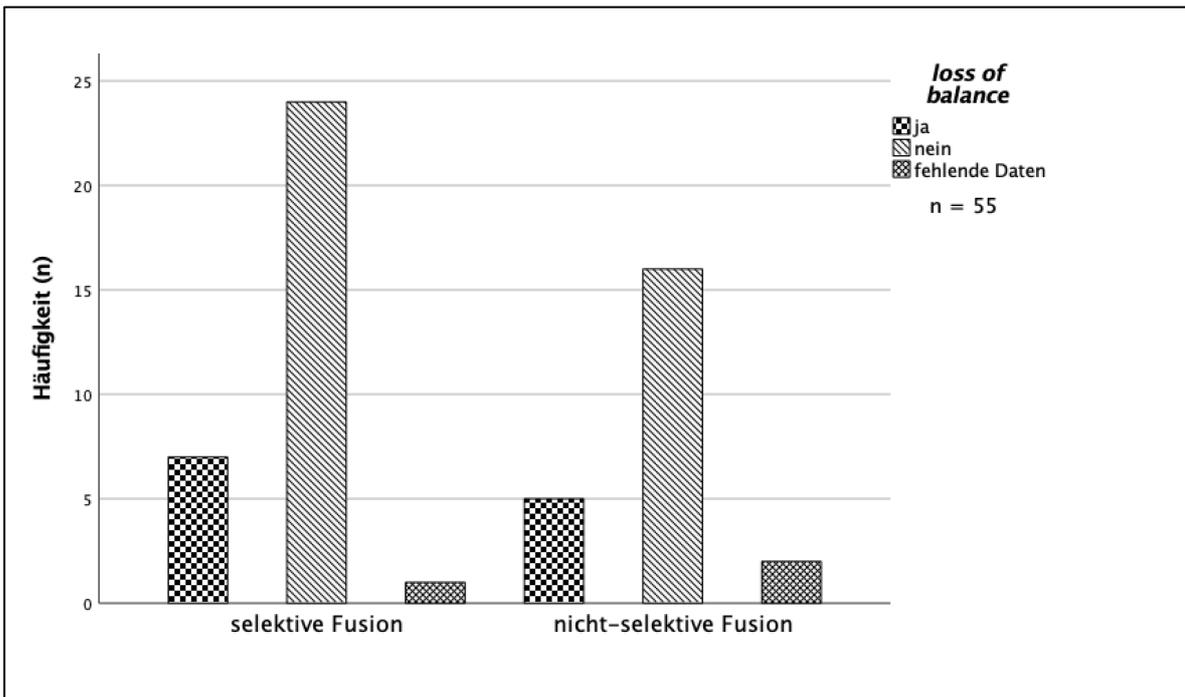


Abb. 24: Häufigkeit des *loss of balance* in Bezug auf die Art der Fusion

Weiterhin zeigte sich, dass bei 82,69 % der Patient*innen keine ASDeg im Verlauf nachgewiesen werden konnte. Jedoch konnte bei 7 Patient*innen eine milde und bei 2 Patient*innen eine moderate Ausbildung der ASDeg festgestellt werden. Eine von 55 Patient*innen wurde aufgrund der Entwicklung einer ASDis einer Korrekturspondylodese unterzogen.

	SSI	HI	SSI	HI
Weiner Grad	Häufigkeit (n)		Prozente (%)	
Grad 0	6	37	75	78,72
Grad 1	1	6	12,5	12,76
Grad 2	0	2	0	4,25
Grad 3	0	0	0	0
Datenerhebung nicht möglich	1	2	12,5	4,25
Gesamt	8	47	100	100

Tabelle 17: Häufigkeit der ASDeg

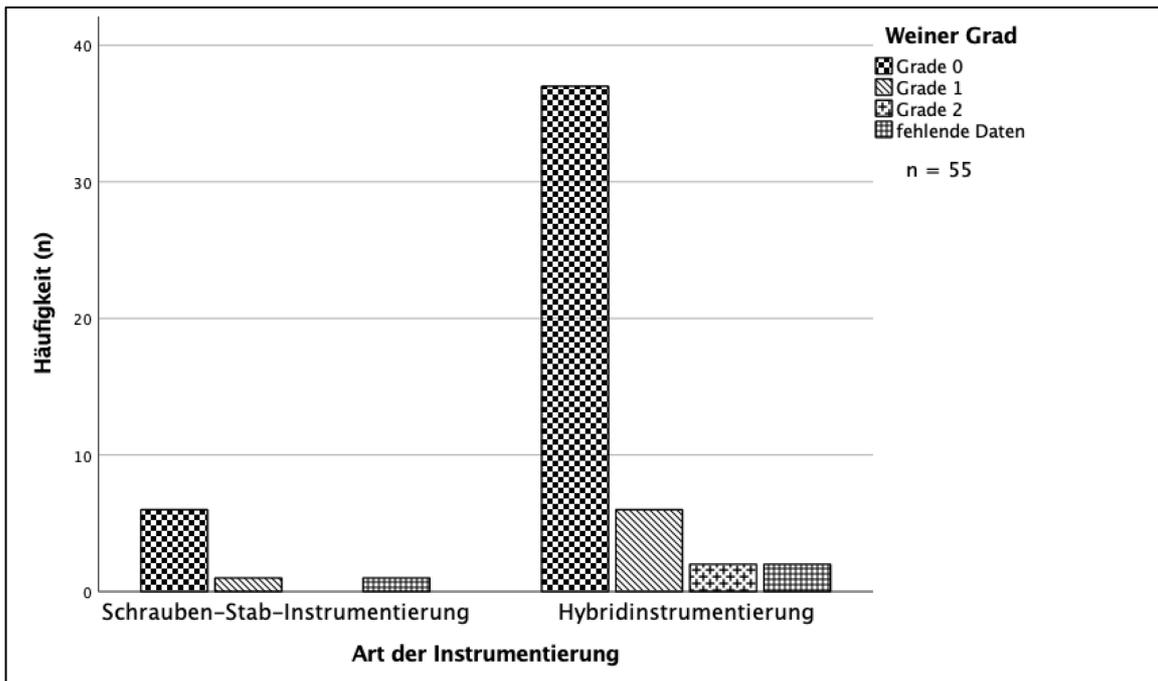


Abb. 25: Häufigkeit der ASDeg in Bezug auf die Art der Instrumentierung

Diskussion

4.1 Deskriptive Studiendaten

In dieser Studie zeigte sich ein mittleres Alter der Patient*innen von 14,7 Jahren. Zudem stellte sich eine Mehrheit zugunsten der weiblichen Patient*innen mit 85,5 % dar. Sowohl diese Parameter als auch die präoperativ gemessenen Cobb Winkel und Einteilungen nach Lenke-Krümmungstypen sind mit anderen aktuellen Studien vergleichbar [52, 58, 59, 68-76]. Dies weist darauf hin, dass diese Studie eine repräsentative Patient*innenkohorte darstellt und gut mit anderen Studien vergleichbar ist.

4.2 Korrekturpotential der Haupt- und Nebenkurve

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass in der untersuchten Kohorte, hinsichtlich des Korrekturpotentials der Hauptkurve, keine signifikanten Unterschiede zwischen den zwei verglichenen Operationsmethoden zu finden waren. Tsirikos et al. beschreiben in deren Studie ähnliche Ergebnisse im Vergleich von Hybridinstrumentierung und Schrauben-Stabinstrumentierung in Bezug auf das Korrekturpotential des frontalen Profils, der sagittalen Balance und der thorakalen Kyphose [73]. Im Gegensatz zu der Studie von Tsirikos et al., wurden in dieser Studie aber mehr als nur Lenke Typ 1 Patient*innen verglichen, weshalb diese Studie in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Instrumentierungen einen Vorteil darstellt. Dennoch gibt es auch Studien, welche zu anderen Ergebnissen des Vergleichs kommen. Beispielsweise zeigten Ruiz et al., dass in deren Kohorte nur eine geringere Korrektur des frontalen Profils mit der Hybridinstrumentierung erreicht wurde [71]. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass in deren Hybridkohorte zudem Patient*innen waren, welche ausschließlich mit Haken, ohne Schrauben, instrumentiert wurden. In den Studien von Bullman et al. und Yilmaz et al. konnte belegt werden, dass die Instrumentierung von Skoliosen nur mit Haken, denen mit Haken und Schrauben oder nur Schrauben, unterlegen war [77, 78]. Im Gegensatz zu Ruiz et al. wurden in dieser Studie keine Patient*innen eingeschlossen, welche einer reinen Hakeninstrumentierung unterzogen wurden. Lou et al. konnten nachweisen, dass die Instrumentierung mittels Schrauben-Stab System im Vergleich zur Hybridinstrumentierung eine

bessere Korrektur des koronaren Profils erlaubte, dennoch eine schlechtere Wiederherstellung der thorakalen Kyphose ermöglichte. Weiter konnte gezeigt werden, dass die Reoperationsrate und die Rate an Komplikationen bei der Schrauben-Stabkohorte kleiner als bei der Hybridkohorte war [79]. Eine höhere Rate an Reoperationen und Komplikationen konnte in unserer Kohorte nicht nachgewiesen werden. Es zeigte sich im Gegensatz dazu sogar eine geringere Komplikationsrate bei der Hybridkohorte mit 36,2 % im Vergleich zur Schrauben-Stabkohorte mit 50 %.

Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Schrauben-Stabinstrumentierung eine deutlich kostenintensivere Instrumentierung pro fusioniertem Level der Wirbelsäule und Grad der Korrektur der Skoliose im Vergleich zur Hybridinstrumentierung aufweist [80]. Daher sollten bei der Wahl des Instrumentierungsverfahrens ebenso die anfallenden Kosten in die Entscheidung mit einbezogen werden, da in unserer Studie kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen der Hybridinstrumentierung und der Schrauben-Stab-Instrumentierung, in Bezug auf das Korrekturpotential der Hauptkurve, gefunden werden konnte.

Hinsichtlich der Nebenkurve zeigte sich ein signifikant ($p < 0,05$) höheres Korrekturpotential ($MW = 26,89$; $SD = 14,3$) durch die nicht selektive Fusion im Vergleich zur selektiven Fusion. Dies zeigen auch die Ergebnisse der Studie von Boniello et al. [68]. Jedoch stellte sich auch bei der selektiven Fusion eine mittlere Korrekturrate von $15,1^\circ$ ($SD = 9,21$) dar. Im Vergleich der nicht selektiven Fusion mit der selektiven Fusion konnten zudem in unserer Studie keine Unterschiede in Bezug auf die Korrektur der sagittalen Balance festgestellt werden ($p > 0,05$). Um eine maximale Korrektur der Skoliose mittels selektiver Fusion zu erreichen, ist es zudem wichtig, die präoperativen *bending*-Aufnahmen mit in die Planung der Instrumentierung einzubeziehen. Dobbs et al. konnten zeigen, dass es bei einer Überkorrektur der Hauptkurve der Skoliose mittels Instrumentierung, bei zuvor ermitteltem Korrekturpotential mittels *bending*-Aufnahme, zu einem *loss of balance* sowie einem negativen Einfluss auf die Nebenkurve in Form von kompensatorischer Zunahme des Cobb Winkels kam [81]. In unserer Kohorte zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen den präoperativ gemessenen *bending*-Aufnahmen und der postoperativ erreichten Korrektur ($p < 0,0001$; $r = 0,484$).

4.3 Wahl der Instrumentationshöhe

In dieser Patient*innenkohorte konnte gezeigt werden, dass bei der Wahl der Instrumentationshöhe die Nebenkurve der Patient*innen lediglich signifikant besser korrigiert werden konnte, wenn der Abstand von LIV zu EW mehr als 5 WK betrug ($p < 0,001$). Der Einfluss des EW, gemessen an der Korrektur, wurde auch schon in anderen Studien untersucht. In der Studie von Suk et al. beispielsweise wurde der Abstand des Neutralwirbels zum EW beschrieben, jedoch wurde der Abstand des LIV zum EW nicht miteinbezogen [82]. Bezugnehmend auf diese Ergebnisse und diese Kohorte, sollte der EW in Bezug auf die Korrektur der Nebenkurve, nicht zur Bestimmung des LIV genutzt werden.

Weiter zeigte sich in der Untersuchung der Instrumentationshöhe bei Betrachtung des Abstandes des LIV zum *stable vertebra* (SV), dass nur ein Abstand von mehr als 4 WK einen signifikanten Einfluss ($p < 0,01$) auf die Korrektur der Nebenkurve hatte. Takashi et al. konnten in deren Studie nachweisen, dass die bestmögliche Korrektur der Nebenkurve erreicht wird, wenn der LIV auf Höhe oder unterhalb des SV liegt [55].

Bei der Auswahl des EW oder des SV im nativradiologischen Bild konnten Potter et al. nachweisen, dass es bei der Wahl des EW und des SV zu unterschiedlicher Auswahl dieser, bei der Auswertung durch verschiedenen Personen, kam [83]. Aufgrund einer so entstehenden inkonsistenten Datenlage sollte daher der EW und der SV nur als Hilfestellung zur Findung des LIV dienen.

Bei der Betrachtung des sagittalen Profils der Skoliosen wurde in der Vergangenheit immer wieder auf die Wichtigkeit desselben hingewiesen [75, 76, 84]. In einer Metaanalyse von Liu et al. von 2020 wurde der aktuelle Studienstand der Bestimmung des LIV im Röntgenbild zusammengefasst. Dort wurde keine Studie gefunden, welche die Bestimmung des LIV im sagittalen Bild beschreibt [85]. In unserer Kohorte konnte gezeigt werden, dass bei der nicht instrumentierten Nebenkurve ein Abstand des LIV zum *inflection point* von größer gleich 3 WK eine signifikant bessere Korrektur dieser ermöglichte ($p < 0,01$). Dies weist daraufhin, dass die sagittale Beurteilung der Skoliose präoperativ bei der Auswahl des LIV miteinbezogen werden sollte, um das bestmögliche Korrekturpotential der Nebenkurve zu generieren.

4.4 Komplikationen

Bei Betrachtung der Wundheilungsstörungen und Wundinfektionen zeigten sich diese mit 5,5 % gering. Tsirikos et al. gaben für deren Kohorte, bei 160 Patient*innen, 3,8 % Wundinfektionen an. Daran lässt sich zeigen, dass es in unserer Kohorte nicht zu vermehrten Wundinfektion kam [73].

Eine selektive Analyse bezüglich der Komplikationsrate und der operativen Versorgung mittels Schrauben-Stab oder Hybrid ergab eine Überlegenheit des Hybridverfahrens gegenüber der Schrauben-Stab-Instrumentierung. 63,8 % der Patient*innen, die mittels Hybridverfahren instrumentiert wurden, hatten keinerlei Komplikationen. Hingegen hatten nur 50 % der Schrauben-Stab instrumentierten Patient*innen keine Komplikationen. Die Studie von Tsirikos et al. zeigt, dass deren Analyse auf Komplikationen eine ähnliche Rate im Vergleich der Operationsmethoden ergab (10 % Hybrid vs. 8,75 % Strauben-Stab), wobei hier erwähnt werden muss, dass deren Analyse eine geringere Anzahl an Komplikationsmerkmalen berücksichtigt [73].

In der Untersuchung des *loss of balance* zeigte sich in der gesamten Kohorte ein *loss of balance* des frontalen Profils bei 21,8 % der Patient*innen. Bezugnehmend auf die verschiedenen Instrumentierungen entstand ein *loss of balance* in der Gruppe der Schrauben-Stabinstrumentierung in 12,5 % und in der Gruppe der Hybridinstrumentierung in 23,4 %. Banno et al. kommen in deren Studie von 2022 zu ähnlichen Ergebnissen. Bei 108 Patient*innen, welche mittels Schrauben-Stab instrumentiert wurden, kam es bei 9 % zu einem *loss of balance* [86].

Im Vergleich der Fusionsarten zeigte sich ein nahezu gleichhäufiges Auftreten von *loss of balance* mit 21,9 % bei der selektiven Fusion und 21,7 % bei der nicht selektive Fusion. Die Daten von Singla et al. zeigen eine deutlich geringere Rate von *loss of balance* in der Gruppe der nicht selektiv Fusion von 10,2 % im Vergleich zu 56 % in der Gruppe der selektiv Instrumentierten [87]. Die Studiengruppe Behensky et al. konnte hingegen zeigen, dass in einer Kohorte von 36 Patient*innen, welche alle mittels selektiver Fusion versorgt wurden, 28 % der Studienteilnehmer*innen ein *loss of balance* entwickelten [88]. Dies zeigt, dass in unserer Studienkohorte eine durchschnittliche Rate an *loss of balance* vorliegt.

Bezüglich der Rate an ASDis zeigte sich, dass insgesamt nur eine Patientin aufgrund der Entwicklung einer symptomatischen ASDis erneut operiert werden musste. Weiterhin untersuchten wir die Anzahl an ASDeg nach operativer Versorgung. Hier zeigte sich, dass bei den meisten Patient*innen (82,69 %) keine ASDeg im Verlauf nachgewiesen werden konnte. Dennoch konnte nativradiologisch bei 7 Patient*innen eine milde und bei 2 Patient*innen eine moderate Ausbildung der ASDeg festgestellt werden. Im Vergleich der Fusionsarten zeigte sich bei 16,7 % der selektiv fusionierten und bei 18,2 % der nicht selektiv fusionierten Patient*innen eine nativradiologisch nachweisbare ASDeg. Die Literaturrecherche bezüglich eines Auftretens von ASDeg oder ASDis bei adoleszenten Skoliosen gestaltete sich schwierig, da die meisten Daten zu degenerativen Veränderungen im fortgeschrittenen Erwachsenenalter erhoben wurden. Ghasemi et al. konnten zeigen, dass bei 1,04 % der Patient*innen mit posteriorer Fusion eine ASDis auftrat [89]. Dies zeigt, dass unsere Kohorte mit einem Auftreten von 1,81 % einer symptomatischen ASD dem Durchschnitt entspricht. Zudem zeigen die Daten aus dem *Review* von Park et al., dass eine ASDeg nativradiologisch bei 5,2 % - 100 % der Patient*innen nachweisbar war. Weiterhin konnte dieser auch nachweisen, dass die Inzidenz der ASDis nur bei 5,2 % - 18,5 % lag [49]. In der Langzeituntersuchung von Joo et al. zeigte sich nach 45 Jahren *follow-up* bei adoleszenter Skoliose eine ASDis bei 14,3 % der Patient*innen [90].

Diese Studien zeigen, obwohl unsere Studienpopulation im Durchschnitt jünger ist, dass diese, bezüglich der Rate von ASDeg und ASDis, repräsentativ ist. Dennoch sollten weitere Studien zur Rate von ASDeg und ASDis bei adoleszenten Skoliosen nach operativer Versorgung durchgeführt werden, da die jungen Patient*innen ein langes Leben vor sich, und somit auch ein potenziell höheres Risikopotential für das Auftreten von ASDis und deren Komplikationen haben. Bezüglich der Rate an ASDeg und ASDis bei der selektiven und nicht selektiven Fusion, ist weitere Forschung nötig, um einen deutlichen Unterschied darstellen zu können, wie auch Lark et al. in deren Studie anmerkten [70]. Die Gruppe um Bertram et al. konnte zeigen, dass es zu einer früheren Bandscheibendegeneration bei Patient*innen mit Skoliose im Vergleich zu Patient*innen mit physiologischer Wirbelsäule kam [91]. Daher sollte an dieser Stelle auch angemerkt werden, dass es schwierig ist, eine ASDeg von einer natürlichen Bandscheibendegeneration zu unterscheiden.

4.5 Limitation der Studie

Bei einer retrospektiven Studie lassen sich bestimmte Daten im Nachhinein nicht mehr erheben, sodass nur eine beschränkte Aussagekraft gegeben ist und ein Vergleich der Daten mit anderen Patient*innen der gleichen Kohorte nur erschwert möglich ist. Einheitliche Fragebögen, wie sie bei prospektiven Studien etablierbar sind, waren nicht vorhanden. Die untersuchten Daten mussten manuell aus Patient*innenakten herausgesucht werden. Die Datenerhebung bezüglich der verschiedenen Schmerzskaalen war teils nicht oder nur unvollständig durchführbar, sodass aufgrund der geringen Teststärke, bedingt durch einen Mangel an Daten, keine Analyse dieser Daten stattfand.

Aufgrund der Kohortenverteilung zugunsten der Hybridinstrumentierung mit 85,5 % zu 14,5 % bei der Schrauben-Stab-Instrumentierung, könnte es zu einer Verzerrung der Ergebnisse gekommen sein.

Schlussfolgerung

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den zwei zu vergleichenden operativen Therapien in Hinsicht auf das Korrekturpotential der Hauptkurve gab. Bezugnehmend auf die Balance der Wirbelsäule konnten zudem keine signifikanten Unterschiede zwischen der selektiven und der nicht selektiven Fusion gefunden werden.

Ferner wurde darlegt, dass eine nicht selektive Fusion ein signifikant besseres Korrekturpotential der Nebenkurve aufwies. Dennoch ermöglichte die selektive Fusion eine Korrektur der Nebenkurve um 39 %.

In Zusammenschau der vorliegenden Daten und den bekannten Vorteilen einer selektiven Fusion in Hinblick auf die Komplikationsrate, die postoperativen Ergebnisse und das Outcome sowie die erhöhte Mobilität der Patient*innen, kann geschlossen werden, dass bei individuell ausgewählten Patient*innen eine selektive Fusion der nicht selektiven Fusion vorgezogen werden kann.

Außerdem zeigte sich, hinsichtlich der Messungen des LIV und IP, dass die nicht instrumentierte Nebenkurve am besten korrigiert werden konnte, wenn der Abstand drei oder mehr Wirbelkörper betrug. Daher sollte dieser Abstand bei der präoperativen Auswahl der Instrumentierungshöhe berücksichtigt werden.

Zuletzt konnte dargestellt werden, dass die Korrektur des frontalen Profils nur in extremen Ausprägungen eine statistisch signifikante Auswirkung hatte. Dies signalisiert, dass das sagittale Profil der Patient*innen in die präoperative Planung mit einfließen sollte.

Literaturverzeichnis

1. Götze, H.-G., *Skoliometer nach Götze*. 2020, Hans-Günter Götze: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skoliometer_nach_Götze.jpg#filelinks.
2. Matussek, J., *Kinderorthopädie und Kindertraumatologie*. Auflage Nr.1 ed. 2013: Springer Verlag Berlin Heidelberg. 145.
3. Konieczny, M.R. and R. Krauspe, *Adoleszente idiopathische Skoliosen*, in *Orthopädie und Unfallchirurgie*, M. Engelhardt and M. Raschke, Editors. 2020, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 1-20.
4. Nash, C.L., Jr. and J.H. Moe, *A study of vertebral rotation*. J Bone Joint Surg Am, 1969. **51**(2): p. 223-9.
5. Schwab, F., et al., *Sagittal plane considerations and the pelvis in the adult patient*. Spine (Phila Pa 1976), 2009. **34**(17): p. 1828-33.
6. Roussouly, P. and J.L. Pinheiro-Franco, *Sagittal parameters of the spine: biomechanical approach*. Eur Spine J, 2011. **20 Suppl 5**(Suppl 5): p. 578-85.
7. Vasiliadis, E.S., T.B. Grivas, and A. Kaspiris, *Historical overview of spinal deformities in ancient Greece*. Scoliosis, 2009. **4**: p. 6.
8. Marketos, S.G. and P. Skiadas, *Hippocrates. The father of spine surgery*. Spine (Phila Pa 1976), 1999. **24**(13): p. 1381-7.
9. Cheng, J.C., et al., *Adolescent idiopathic scoliosis*. Nat Rev Dis Primers, 2015. **1**(1): p. 15030.
10. C. P. Hassler, A.M., H. Waizy, D. Frank, R.A. Fuhrmann, Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC) Berufsverband der Fachärzte für Orthopädie, *Idiopathische Skoliose im Wachstumsalter*. Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC) und des Berufsverbandes der Ärzte für Orthopädie (BVO), 1999, Überarbeitet 10.2009, Abgerufen: 15.09.20.
11. Hefti, F., *Pathogenesis and biomechanics of adolescent idiopathic scoliosis (AIS)*. J Child Orthop, 2013. **7**(1): p. 17-24.
12. Fong, D.Y., et al., *A meta-analysis of the clinical effectiveness of school scoliosis screening*. Spine (Phila Pa 1976), 2010. **35**(10): p. 1061-71.
13. Konieczny, M.R., H. Senyurt, and R. Krauspe, *Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis*. J Child Orthop, 2013. **7**(1): p. 3-9.
14. Grivas, T.B., et al., *Association between adolescent idiopathic scoliosis prevalence and age at menarche in different geographic latitudes*. Scoliosis, 2006. **1**(1): p. 9.
15. Kamtsiuris, P., et al., *[Prevalence of somatic diseases in German children and adolescents. Results of the German Health Interview and Examination Survey for Children and Adolescents (KiGGS)]*. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz, 2007. **50**(5-6): p. 686-700.

16. Suh, S.W., et al., *Idiopathic scoliosis in Korean schoolchildren: a prospective screening study of over 1 million children*. Eur Spine J, 2011. **20**(7): p. 1087-94.
17. Lowe, T.G., et al., *Etiology of idiopathic scoliosis: current trends in research*. J Bone Joint Surg Am, 2000. **82**(8): p. 1157-68.
18. Veldhuizen, A.G., D.J. Wever, and P.J. Webb, *The aetiology of idiopathic scoliosis: biomechanical and neuromuscular factors*. Eur Spine J, 2000. **9**(3): p. 178-84.
19. Bernstein, P. and J. Seifert, *Die Skoliose im Wachstumsalter*. Orthopädie und Unfallchirurgie up2date, 2015. **10**(04): p. 259-276.
20. Takahashi, Y., et al., *A genome-wide association study identifies common variants near LBX1 associated with adolescent idiopathic scoliosis*. Nat Genet, 2011. **43**(12): p. 1237-40.
21. Jiang, H., et al., *Association between ladybird homeobox 1 gene polymorphisms and adolescent idiopathic scoliosis: A MOOSE-compliant meta-analysis*. Medicine (Baltimore), 2019. **98**(27): p. e16314.
22. Dai, J., et al., *Association between polymorphisms in vitamin D receptor gene and adolescent idiopathic scoliosis: a meta-analysis*. Eur Spine J, 2018. **27**(9): p. 2175-2183.
23. David L. Skaggs, M., MMM, Tenner Guillaume, MD, and M. Ron El-Hawary, John Emans, MD, Michael Mendelow, MD, John Smith, MD, the members of the SRS Growing Spine Committee, *EARLY ONSET SCOLIOSIS CONSENSUS STATEMENT, SRS GROWING SPINE COMMITTEE, 2015*. Spine Deformity 3 (2015) 107, 2015.
24. King, H.A., et al., *The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis*. J Bone Joint Surg Am, 1983. **65**(9): p. 1302-13.
25. Ovadia, D., *Classification of adolescent idiopathic scoliosis (AIS)*. J Child Orthop, 2013. **7**(1): p. 25-8.
26. Lenke, L.G., et al., *Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis*. J Bone Joint Surg Am, 2001. **83**(8): p. 1169-81.
27. Sakic, K., M. Pecina, and F. Pavicic, *Cardiorespiratory function in surgically treated thoracic scoliosis with respect to degree and apex of scoliotic curve*. Respiration, 1992. **59**(6): p. 327-31.
28. Payne, W.K., 3rd, et al., *Does scoliosis have a psychological impact and does gender make a difference?* Spine (Phila Pa 1976), 1997. **22**(12): p. 1380-4.
29. Studer, D. and C. Hasler, *[Etiology and significance of growth disturbances of the spine]*. Orthopade, 2019. **48**(6): p. 469-476.
30. Nash, C.L.J., et al., *Risks of exposure to X-rays in patients undergoing long-term treatment for scoliosis*. JBJS, 1979. **61**(3): p. 371-374.
31. Bunnell, W.P., *An objective criterion for scoliosis screening*. JBJS, 1984. **66**(9): p. 1381-1387.
32. Konieczny, M.R., *Adams Vorbeugetest*. 2022.

33. Manring, M.M. and J. Calhoun, *Joseph C. Risser Sr., 1892-1982. Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2010. **468**(3): p. 643-645.
34. Risser, J.C., *The classic: The iliac apophysis: an invaluable sign in the management of scoliosis. 1958. Clin Orthop Relat Res*, 2010. **468**(3): p. 643-53.
35. Kuru, T., et al., *The efficacy of three-dimensional Schroth exercises in adolescent idiopathic scoliosis: a randomised controlled clinical trial. Clin Rehabil*, 2016. **30**(2): p. 181-90.
36. Negrini, S., et al., *2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. Scoliosis Spinal Disord*, 2018. **13**(1): p. 3.
37. Aulisa, A.G., et al., *Correlation between compliance and brace treatment in juvenile and adolescent idiopathic scoliosis: SOSORT 2014 award winner. Scoliosis*, 2014. **9**(1): p. 6.
38. Dwyer, A.F., *Experience of anterior correction of scoliosis. Clin Orthop Relat Res*, 1973. **93**(93): p. 191-206.
39. Zielke, K., R. Stunkat, and F. Beaujean, [*Ventrale derotations-spondylodesis (author's transl)*]. *Arch Orthop Unfallchir*, 1976. **85**(3): p. 257-77.
40. Harrington, P.R., *Treatment of scoliosis: correction and internal fixation by spine instrumentation. June 1962. J Bone Joint Surg Am*, 2002. **84**(2): p. 316.
41. Hall, J.E., *Spinal surgery before and after Paul Harrington. Spine (Phila Pa 1976)*, 1998. **23**(12): p. 1356-61.
42. Cotrel, Y., J. Dubousset, and M. Guillaumat, *New universal instrumentation in spinal surgery. Clin Orthop Relat Res*, 1988. **227**: p. 10-23.
43. Olgun, Z.D. and M. Yazici, *Posterior instrumentation and fusion. J Child Orthop*, 2013. **7**(1): p. 69-76.
44. Ohrt-Nissen, S., et al., *Radiographic and Functional Outcome in Adolescent Idiopathic Scoliosis Operated With Hook/Hybrid Versus All-Pedicle Screw Instrumentation-A Retrospective Study in 149 Patients. Spine Deform*, 2017. **5**(6): p. 401-408.
45. Phan, K., et al., *Relationship between sagittal balance and adjacent segment disease in surgical treatment of degenerative lumbar spine disease: meta-analysis and implications for choice of fusion technique. Eur Spine J*, 2018. **27**(8): p. 1981-1991.
46. Roussouly, P., et al., *Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position. Spine (Phila Pa 1976)*, 2005. **30**(3): p. 346-53.
47. Cheng, M.F., et al., *Anterior release may not be necessary for idiopathic scoliosis with a large curve of more than 75 degrees and a flexibility of less than 25. Spine J*, 2018. **18**(5): p. 769-775.
48. Rinella, A., et al., *Perioperative halo-gravity traction in the treatment of severe scoliosis and kyphosis. Spine (Phila Pa 1976)*, 2005. **30**(4): p. 475-82.

49. Park, P., et al., *Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature*. Spine (Phila Pa 1976), 2004. **29**(17): p. 1938-44.
50. Harrop, J.S., et al., *Lumbar adjacent segment degeneration and disease after arthrodesis and total disc arthroplasty*. Spine (Phila Pa 1976), 2008. **33**(15): p. 1701-7.
51. Weiner, D.K., et al., *Does radiographic osteoarthritis correlate with flexibility of the lumbar spine?* J Am Geriatr Soc, 1994. **42**(3): p. 257-63.
52. Ohrt-Nissen, S., et al., *Selection of the lowest instrumented vertebra in main thoracic adolescent idiopathic scoliosis: Is it safe to fuse shorter than the last touched vertebra?* Eur Spine J, 2020. **29**(8): p. 2018-2024.
53. Wang, Y., et al., *Distal adding-on phenomenon in Lenke 1A scoliosis: risk factor identification and treatment strategy comparison*. Spine (Phila Pa 1976), 2011. **36**(14): p. 1113-22.
54. Fischer, C.R., et al., *Optimal Lowest Instrumented Vertebra for Thoracic Adolescent Idiopathic Scoliosis*. Spine Deform, 2018. **6**(3): p. 250-256.
55. Takahashi, J., et al., *Selective thoracic fusion in adolescent idiopathic scoliosis: factors influencing the selection of the optimal lowest instrumented vertebra*. Spine (Phila Pa 1976), 2011. **36**(14): p. 1131-41.
56. Sun, Z., et al., *Lowest instrumented vertebrae selection for selective posterior fusion of moderate thoracolumbar/lumbar idiopathic scoliosis: lower-end vertebra or lower-end vertebra+1?* Eur Spine J, 2014. **23**(6): p. 1251-7.
57. Ketenci, I.E., H.S. Yanik, and S. Erdem, *The effect of upper instrumented vertebra level on cervical sagittal alignment in Lenke 1 adolescent idiopathic scoliosis*. Orthop Traumatol Surg Res, 2018. **104**(5): p. 623-629.
58. Rizkallah, M., et al., *Selecting the lowest instrumented vertebra in adolescent idiopathic scoliosis: Comparison of the Lenke, Suk, and Dubousset criteria*. Orthop Traumatol Surg Res, 2018. **104**(5): p. 631-635.
59. Oba, H., et al., *Upper instrumented vertebra to the right of the lowest instrumented vertebra as a predictor of an increase in the main thoracic curve after selective posterior fusion for the thoracolumbar/lumbar curve in Lenke type 5C adolescent idiopathic scoliosis: multicenter study on the relationship between fusion area and surgical outcome*. J Neurosurg Spine, 2019. **31**(6): p. 1-8.
60. Daniels, A.H., et al., *Upper-thoracic versus lower-thoracic upper instrumented vertebra in adult spinal deformity patients undergoing fusion to the pelvis: surgical decision-making and patient outcomes*. J Neurosurg Spine, 2019. **32**(4): p. 1-7.
61. Zhuang, Q., et al., *How to select the lowest instrumented vertebra in Lenke type 5 adolescent idiopathic scoliosis patients?* Spine J, 2021. **21**(1): p. 141-149.
62. Waldt, S., M. Eiber, and K. Wörtler, *Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskelettalen Radiologie*. 2017, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York.

63. Berthonnaud, E., et al., *Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters*. J Spinal Disord Tech, 2005. **18**(1): p. 40-7.
64. Roussouly, P. and J.L. Pinheiro-Franco, *Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology*. Eur Spine J, 2011. **20 Suppl 5**(Suppl 5): p. 609-18.
65. Roussouly, P., et al., *The vertical projection of the sum of the ground reactive forces of a standing patient is not the same as the C7 plumb line: a radiographic study of the sagittal alignment of 153 asymptomatic volunteers*. Spine (Phila Pa 1976), 2006. **31**(11): p. E320-5.
66. Matsubayashi, Y., et al., *C7 sagittal vertical axis is the determinant of the C5-C7 angle in cervical sagittal alignment*. Spine J, 2017. **17**(5): p. 622-626.
67. Protopsaltis, T., et al., *The T1 pelvic angle, a novel radiographic measure of global sagittal deformity, accounts for both spinal inclination and pelvic tilt and correlates with health-related quality of life*. J Bone Joint Surg Am, 2014. **96**(19): p. 1631-40.
68. Boniello, A.J., et al., *Selective versus nonselective thoracic fusion in Lenke 1C curves: a meta-analysis of baseline characteristics and postoperative outcomes*. J Neurosurg Spine, 2015. **23**(6): p. 721-30.
69. Kim, Y.J., et al., *Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis*. Spine (Phila Pa 1976), 2006. **31**(3): p. 291-8.
70. Lark, R.K., et al., *Adding thoracic fusion levels in Lenke 5 curves: risks and benefits*. Spine (Phila Pa 1976), 2013. **38**(2): p. 195-200.
71. Ruiz, J.N.M., et al., *Selective Thoracic Fusion for Idiopathic Scoliosis: A Comparison of Three Surgical Techniques with Minimum 5-year Follow-up*. Spine (Phila Pa 1976), 2022. **47**(7): p. E272-E282.
72. Scaramuzza, L., et al., *Thoraco-lumbar selective fusion in adolescent idiopathic scoliosis with Lenke C modifier curves: clinical and radiographic analysis at 10-year follow-up*. Eur Spine J, 2017. **26**(Suppl 4): p. 514-523.
73. Tsirikos, A.I. and T.E. McMillan, *All Pedicle Screw versus Hybrid Hook-Screw Instrumentation in the Treatment of Thoracic Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS): A Prospective Comparative Cohort Study*. Healthcare (Basel), 2022. **10**(8).
74. Pahys, J.M., et al., *Assessment of Proximal Junctional Kyphosis and Shoulder Balance With Proximal Screws versus Hooks in Posterior Spinal Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis*. Spine (Phila Pa 1976), 2018. **43**(22): p. E1322-E1328.
75. Diebo, B.G., et al., *Recruitment of compensatory mechanisms in sagittal spinal malalignment is age and regional deformity dependent: a full-standing axis analysis of key radiographical parameters*. Spine (Phila Pa 1976), 2015. **40**(9): p. 642-9.
76. Blondel, B., et al., *Reciprocal sagittal alignment changes after posterior fusion in the setting of adolescent idiopathic scoliosis*. Eur Spine J, 2012. **21**(10): p. 1964-71.

77. Bullmann, V., et al., *[Posterior operative correction of idiopathic scoliosis. Value of pedicle screws versus hooks]*. Orthopade, 2009. **38**(2): p. 198-200, 202-4.
78. Yilmaz, G., et al., *Comparative analysis of hook, hybrid, and pedicle screw instrumentation in the posterior treatment of adolescent idiopathic scoliosis*. J Pediatr Orthop, 2012. **32**(5): p. 490-9.
79. Luo, M., et al., *Pedicle screw versus hybrid instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis: A systematic review and meta-analysis with emphasis on complications and reoperations*. Medicine (Baltimore), 2017. **96**(27): p. e7337.
80. Jaquith, B.P., et al., *Screws versus hooks: implant cost and deformity correction in adolescent idiopathic scoliosis*. J Child Orthop, 2012. **6**(2): p. 137-43.
81. Dobbs, M.B., et al., *Can we predict the ultimate lumbar curve in adolescent idiopathic scoliosis patients undergoing a selective fusion with undercorrection of the thoracic curve?* Spine (Phila Pa 1976), 2004. **29**(3): p. 277-85.
82. Suk, S.I., et al., *Determination of distal fusion level with segmental pedicle screw fixation in single thoracic idiopathic scoliosis*. Spine (Phila Pa 1976), 2003. **28**(5): p. 484-91.
83. Potter, B.K., et al., *Reliability of end, neutral, and stable vertebrae identification in adolescent idiopathic scoliosis*. Spine (Phila Pa 1976), 2005. **30**(14): p. 1658-63.
84. Pasha, S. and K. Baldwin, *Preoperative Sagittal Spinal Profile of Adolescent Idiopathic Scoliosis Lenke Types and Non-Scoliotic Adolescents: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Spine (Phila Pa 1976), 2019. **44**(2): p. 134-142.
85. Liu, C.W., et al., *Selection of the Lowest Instrumented Vertebra and Relative Odds Ratio of Distal Adding-on for Lenke Type 1A and 2A Curves in Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Systematic Review and Meta-analysis*. Neurospine, 2020. **17**(4): p. 902-909.
86. Banno, T., et al., *Risk factors and clinical impact of persistent coronal imbalance after posterior spinal fusion in thoracolumbar/lumbar idiopathic scoliosis*. J Neurosurg Spine, 2022. **37**(6): p. 883-892.
87. Singla, A., et al., *Results of selective thoracic versus nonselective fusion in Lenke type 3 curves*. Spine (Phila Pa 1976), 2014. **39**(24): p. 2034-41.
88. Behensky, H., et al., *Fixed lumbar apical vertebral rotation predicts spinal decompensation in Lenke type 3C adolescent idiopathic scoliosis after selective posterior thoracic correction and fusion*. Eur Spine J, 2007. **16**(10): p. 1570-8.
89. Ghasemi, A.A., *Adjacent segment degeneration after posterior lumbar fusion: An analysis of possible risk factors*. Clin Neurol Neurosurg, 2016. **143**: p. 15-8.

90. Joo, P., et al., *Ultralong Follow-Up of Spinal Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis: Harrington Instrumentation vs Uninstrumented Fusion*. *Int J Spine Surg*, 2022.
91. Bertram, H., et al., *Accelerated intervertebral disc degeneration in scoliosis versus physiological ageing develops against a background of enhanced anabolic gene expression*. *Biochem Biophys Res Commun*, 2006. **342**(3): p. 963-72.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegenbringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn PD Dr. med. Markus R. Koniczny, für die Möglichkeit der Dissertation in seinem Fachgebiet und seine Unterstützung in jeder Phase des Entstehungsprozesses dieser Arbeit.

Ich danke Herrn Dr. med. Max Prost, der mir in allen Situationen immer mit Rat und Tat zur Seite stand und mich dabei stets hilfsbereit wissenschaftlich betreut hat.

Weiter möchte ich Herrn Prof. Dr.med. Joachim Windolf für sein Verständnis und seine guten Ratschläge wie auch seine unermüdliche Motivation danken.

Im Rückblick auf mein absolviertes Studium der Humanmedizin und die Erstellung dieser Dissertationsschrift möchte ich mich bei meiner Familie von Herzen bedanken, da sie mir das Studium der Humanmedizin in Düsseldorf ermöglicht und mich immer bei allen Höhen und Tiefen unterstützt hat. Dabei gilt mein besonderer Dank meinen Eltern Anette und Harry Denz sowie meiner Schwester Lara Sophie Denz.

Weiter möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mir jederzeit eine große Hilfe und Stütze waren. Besonders hervorheben möchte ich dabei meine Freundin Julia Janocha und meinen langjährigen Freund Erhan Karsli, für ihre unglaublich hilfreiche Unterstützung und ihr Verständnis bei der Anfertigung dieser Dissertation.