

EINFLUSS DER KURVENMORPHOLOGIE UND -LOKALISATION AUF DIE
EFFEKTIVITÄT DER RIGIDEN KONSERVATIVEN THERAPIE BEI
PATIENTEN MIT ADOLESZENTER IDIOPATHISCHER SKOLIOSE

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

von Maria Gunold

geboren am 23.03.1994, in Leipzig

Gutachter

- 1. Herr Prof. Dr. med. Georg Matziolis, Eisenberg**
- 2. Herr Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Gunter Hofmann, Jena**
- 3. Herr PD Dr. med. Marc Dreimann, Hamburg**

Tag der öffentlichen Verteidigung: 01.03.2022

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
ZUSAMMENFASSUNG	V
ABSTRACT	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 HISTORISCHER HINTERGRUND	1
1.2 DEFINITION	2
1.3 EINTEILUNG NACH ART DER SKOLIOSE	3
<i>1.3.1 Klassifikation nach Lenke</i>	5
1.4 ÄTIOLOGIE UND PATHOGENESE	7
1.5 KLINISCHES PROBLEM UND BEHANDLUNGSNOTWENDIGKEIT	10
<i>1.5.1 Progressionsrisiko</i>	11
1.6 DIAGNOSTIK	13
<i>1.6.1 Klinische Untersuchung</i>	13
<i>1.6.2 Radiographische Messungen</i>	15
1.7 THERAPEUTISCHE OPTIONEN	18
<i>1.7.1 Physiotherapeutische Übungen</i>	18
<i>1.7.2 Indikation zur Korsetttherapie</i>	19
<i>1.7.3 Operative Verfahren</i>	20
1.8 KORSETTBEHANDLUNG	22
<i>1.8.1 Historische Entwicklung</i>	22
<i>1.8.2 Tragedauer</i>	23
2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE DER ARBEIT	24
2.1 ARBEITSHYPOTHESEN	25
3 PATIENTEN UND METHODIK	26
3.1 STUDIENDESIGN	26
3.2 DATENERHEBUNG	30
4 ERGEBNISSE	34
4.1 KLINISCHE ERGEBNISSE	34
4.2 RADIOGRAPHISCHE ERGEBNISSE	36

5 DISKUSSION	44
5.1 EINFLUSS MORPHOLOGISCHER PARAMETER AUF DEN BEHANDLUNGSERFOLG	44
5.2 EINFLUSS DES KRÜMMUNGSTYPUS AUF DEN BEHANDLUNGSERFOLG	44
5.2.1 Einfluss der Compliance auf das Ergebnis	46
5.2.2 Einfluss von Skoliose- spezifische Übungen (PSE).....	46
5.2.3 Einfluss der Skelettreife nach Risser	47
5.2.4 Einfluss der unterschiedlichen Korsetttypen	48
5.2.5 Einfluss weiterer morphologischer Parameter	48
5.2.6 Einfluss des Geschlechts	50
5.3 VERGLEICH DER DEUTSCHEN RICHTLINIEN MIT DEN INTERNATIONALEN GUIDELINES.....	50
5.4 LIMITATIONEN DER STUDIE	51
5.5 AUSBLICK IN DIE ZUKUNFT	54
6 SCHLUSSFOLGERUNG.....	56
7 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	57
8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	66
9 ANHANG.....	67
9.1 EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG	67
9.2 LEBENS LAUF.....	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.
9.3 DANKSAGUNG	68

Abkürzungsverzeichnis

a.p.	anterior- posterior
AIS	adoleszente idiopathische Skoliose
BLR	binär logistische Regression
B-PSE	Chêneau- Korsett und physiotherapeutische spezifische Übungen
BrAIST	Bracing in Adolescent Idiopathic Scoliosis Trial
BWK	Brustwirbelkörper
CI	Konfidenzintervall
CNC	Computerized Numerical Control
CSVL	Center sacral vertical line
FTRB	Full- time- rigid- bracing
HWK	Halswirbelkörper
IR	Interquartilabstand
LoC1	Länge ober unter unterhalb des Apex für den major Winkel
LoC2	ber unter unterhalb des Apex für den minor Winkel
LSM	lumbar spine modifier
LWK	Lendenwirbelkörper
(m)Lenke	modifizierter Lenke- Typ
MRT	Magnetresonanztomographie
NaM	Nash and Moe
OR	Odds Ratio
PACS	Picture Archiving and Communication System
SD	einfache Standardabweichung
SOSORT	International Society on Scoliosis Orthopaedic a. Rehabilitation Treatment
SRS	Scoliosis Research Society
TLSO	thorakolumbosakrales Korsett
VBS	Vertebral Body Stapling

Zusammenfassung

Wissenschaftlicher Hintergrund und aktueller Forschungsstand

Mit einer Inzidenz von 1% ist die idiopathische Skoliose eine der häufigsten Deformitäten der Wirbelsäule. Je nach Altersgruppe variiert die Prävalenz, am häufigsten sind adoleszente Mädchen betroffen. Ein wesentlicher Anteil der Therapie ist die konservative Behandlung mit Korsett und skoliosespezifischer Krankengymnastik. Es sind hierunter dennoch nur 75% Erfolgsraten bei gleichzeitig hoher Einschränkung der Lebensqualität zu verzeichnen. Daher ist es essentiell zu überprüfen, ob es unterschiedliche morphologische Kriterien der Krümmungen gibt, die den Erfolg einer rigiden konservativen Therapie beeinflussen, um die Behandlung weiter zu optimieren oder unnötige Einschränkungen der Lebensqualität durch diese zu vermeiden und ggf. zeitiger eine Operationsindikation zu stellen. Rotationsgrad, Kurvenflexibilität und Größe des Cobb Winkels sind bereits aus vorangegangenen Studien bekannt. Unterschiedliche Kurventypen, speziell bei Einzel- vs. Doppelkrümmungen und die Kurvenlänge wurden bisher nicht untersucht.

Fragestellung und Ziele

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss der Kurvenmorphologie und -lokalisierung auf die Wirkung einer rigiden konservativen Behandlung bei Patienten mit adoleszenter idiopathischer Skoliose (AIS) zu untersuchen.

Methodik

In der vorliegenden Arbeit wurden retrospektiv AIS-Patienten mit Einfach- und Doppelkurven analysiert, die mit Chêneau- Korsett und physiotherapeutischen spezifischen Übungen (B-PSE) behandelt worden waren. Das Einschlusskriterium war das Vorhandensein von strukturellen Hauptkurven $\geq 20^\circ$ und $<50^\circ$ (Risser-Stadium 0–2) zum Zeitpunkt der Initiierung der B-PSE. Die Patienten wurden je nach Behandlungsergebnis in zwei Gruppen eingeteilt: Versager (Kurvenverlauf bis $\geq 45^\circ$ oder Operation) und Erfolg. Der Kurventyp gemäß der modifizierten Lenke ((m)Lenke) - Klassifikation, die Größe und Länge der Kurve (insgesamt, über und unter dem Scheitelpunkt), der Lumbar spine modifier, die apikale Rotation sowie die Korrektur und Derotation der Anfangskurve durch das Korsett wurden zwischen den beiden Gruppen verglichen. Die primäre statistische Untersuchung erfolgte mittels univariater

Analyse der untersuchten Einflussfaktoren zwischen den Gruppen Erfolg und Versager. Signifikante Ergebnisse der univariaten Analyse flossen in eine binär-logistische Regressionsanalyse (BLR) ein.

Ergebnisse und Diskussion

Es wurden insgesamt 127 Patienten eingeschlossen. Die Versagensrate der rigiden konservativen Behandlung hing signifikant von (1) (m)Lenke- Typ der Hauptkurve ($p=0,008$); (2) der apikalen Rotation der Hauptkurve vor ($p=0,007$) und während der Orthesenbehandlung ($p<0,001$); (3) den Anfangs- und der im-Korsett Cobb- Winkel der Haupt- ($p=0,001$ bzw. $p<0,001$) und Nebenkurven ($p=0,015$ und $p=0,002$); (4) der Flexibilität der Hauptkrümmung ($p=0,005$) und der Rate der Krümmungskorrektur im Korsett (major $p=0,008$, minor $p=0,034$); und (5) der Länge der Hauptkurve über ($p<0,001$) und unter ($p=0,002$) dem Scheitelpunkt ab.

Des Weiteren waren (1) ($p<0,05$ Vergleich der (m)Lenke- Typen), (5) (Länge über $p=0,003$ und unter $p=0,005$ dem Scheitelpunkt) und die Cobb- Winkel im Korsett (major $p=0,002$ und minor $p=0,027$) signifikante Einflussfaktoren auf den Therapieerfolg in der BLR.

Schlussfolgerung

Es wurde festgestellt, dass Kurvengröße, Lage und Morphologie das Ergebnis einer rigiden konservativen Behandlung von Patienten mit adoleszenter idiopathischer Skoliose beeinflussen. Diese Ergebnisse können einerseits das zukünftige Design des Korsetts und die Patientenselektion für eine konservative Behandlung verbessern. Andererseits ist es durch die konkretere Auswahl möglich, Patienten eine potentiell ineffektive Korsett- Therapie mit Einschränkungen der Lebensqualität zu ersparen. Die operative Strategie könnte nach entsprechender Aufklärung bei selektierten Kurventypen in einem früheren Erkrankungsstadium durchgeführt werden, wenn die Aussicht auf Erfolg der rigiden konservativen Therapie aufgrund der morphologischen Kriterien ohnehin nur sehr gering ist.

Abstract

Scientific background and current state of research

With an incidence of 1%, idiopathic scoliosis is one of the most common deformities of the spine. The prevalence varies depending on the age group; adolescent girls are most frequently affected. A significant part of the therapy is conservative treatment with a brace and scoliosis-specific exercises. Nevertheless, according to this only 75% success rates are recorded with a simultaneous high reduction of quality of life. It is therefore essential to check whether there are different morphological criteria of the curves that influence the success of a rigid conservative therapy in order to further optimize the treatment or to avoid unnecessary restrictions on the quality of life and, if necessary, to indicate an operation earlier. In previous studies, degree of rotation, curve flexibility and the size of the Cobb angle have already been identified as risk factors for failure. Different curve types, especially in single vs. double curves and curve length were not researched so far.

Purpose and scientific issues

The aim of the present study was to research the impact of curve morphology and location on the effect of rigid conservative treatment in adolescent idiopathic scoliosis (AIS) patients.

Methods

We retrospectively analysed AIS patients with single and double curves who had been treated with a Chêneau- brace and physiotherapeutic specific exercises (B-PSE). The inclusion criteria were the presence of structural major curves $\geq 20^\circ$ and $< 50^\circ$ (Risser stage 0–2) at the time when B-PSE was initiated. The patients were divided into two groups according to the outcome of treatment: failure (curve progression to $\geq 45^\circ$ or surgery) and success. The curve type according to the modified Lenke (mLenke) classification, curve magnitude and length (overall, above and below the apex), lumbar spine modifier, apical rotation, and initial curve correction and derotation by the brace were compared between the two groups. Univariate analysis of the factors described was used for primary comparison of the groups failure and success. Significant results from univariate analysis served as variables in binary logistic regression analysis (BLR).

Results and discussion

A total of 127 patients were included. The failure rate of rigid conservative treatment depended significantly on (1) mLenke ($p=0.008$); (2) the apical rotation of the major curve before ($p=0.007$) and during brace treatment ($p<0.001$); (3) the initial and in-brace Cobb angles of the major ($p=0.001$ and $p<0.001$, respectively) and minor curves ($p=0.015$ and $p=0.002$); (4) major curve flexibility ($p=0.005$) and the in-brace curve correction rates (major $p=0.008$, minor $p=0.034$); (5) the length of the major curve above ($p<0.001$) and below ($p=0.002$) the apex. Furthermore, (1) ($p<0.05$ in MCT comparisons), (5) (upper length $p=0.003$, lower length $p=0.005$), and in-brace Cobb angles (major $p=0.002$, minor $p=0.027$) were significantly influencing clinical success rate in BLR.

Conclusion

Curve size, location and morphology were found to influence the outcome of rigid conservative treatment of patients with AIS. These findings may improve future brace design and patient selection for conservative treatment.

By a more specific patient selection, an ineffective brace treatment and therefore its restriction on quality of life can potentially be avoided. After informed consent surgical treatment strategy could be carried out at an earlier stage of the disease if rigid conservative treatment has only a little chance of success because of the curve morphology.

1 Einleitung

1.1 Historischer Hintergrund

Das Krankheitsbild der Skoliose ist das am längsten bekannte orthopädische Leiden. So beweisen Skelettfunde aus der Jungsteinzeit (6000-180 v. Chr.), dass bereits unsere Vorfahren von der Erkrankung betroffen waren. Hippokrates (um 460-370 v. Chr.) beschrieb in seinem Werk „de articulis“ als erster diese Erkrankung und ihre Behandlung. Die heutige Bezeichnung der Skoliose prägte Galen (130-201 n. Chr.). Diese leitet sich vom altgriechischem Wort „σκολιός, skolios“ ab und bedeutet „krumm“ (Abel et al. 2001). Dass die Auseinandersetzung mit Deformitäten der Wirbelsäule eine große Rolle in der Geschichte der Orthopädie spielt, beweist auch das bis heute aktuelle Standessignum orthopädischer Fachgesellschaften. Es zeigt ein krummes Bäumchen, dass mit Hilfe von Seilen an einen Pfahl geschlungen ist und damit begradigt werden soll (Abb. 1). Dieser Vergleich geht auf Nicolas Andry, einen französischen Kinderarzt, zurück.



Abb. 1: „Bäumchen von Andry, 1741“ Fassadenschmuck am ehemaligen Orthopädischen Klinikgebäude der Universitätsklinik Halle (Saale), Fotografie: PD Dr. med. Patrick Strube

1.2 Definition

Bei der Skoliose handelt es sich um eine strukturelle Deformität der Wirbelsäule. Im Allgemeinen kann sie als dreidimensionale Abweichung definiert werden, welche sich aus seitlicher Biegung, Wirbeltorsion und Achsrotation zusammensetzt (Niethard FU und Carstens C 2009). Gemäß der „Scoliosis Research Society (SRS)“ handelt sich um eine fixierte Seitenausbiegung mit einem radiologischen Krümmungswinkel größer zehn Grad. Diese besteht dauerhaft und kann nicht vollständig aufgerichtet werden (Scoliosis Research Society, Webpage). Die typische Asymmetrie des Rumpfes der Patienten entsteht durch die Torsion der Wirbel, welche zu einer Rotation der Wirbelkörper und der Dornfortsätze führt. Wie Abb. 2 zeigt, erfolgt die Torsion der Wirbelkörper zur Konvexität, die der Dornfortsätze zur Konkavität hin.

Durch muskulären Ausgleich entstehen häufig neben der Hauptkrümmung auch Nebenkrümmungen, die dem statischen Gleichgewicht dienen. In diesem Fall macht sich die Krümmung allerdings nur in der koronaren Ebene bemerkbar. Davon zu differenzieren sind strukturelle Nebenkrümmungen, die genau wie die Hauptkrümmung, eine Torsion und Rotation aufweisen.

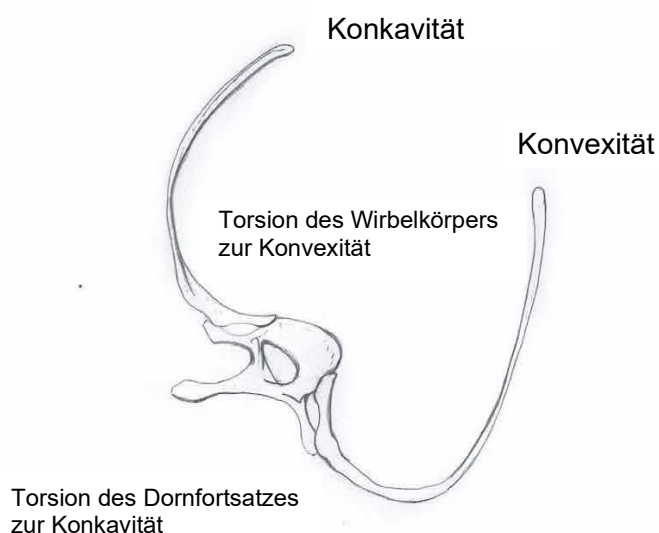


Abb. 2: Torsion von Wirbelkörper, Rippen und Dornfortsatz

1.3 Einteilung nach Art der Skoliose

Um die unterschiedlichen Formen der Skoliose zu klassifizieren, kann u.a. die Entstehungsursache, das Alter bei Diagnosestellung, das Krümmungsmuster, als auch die Flexibilität genutzt werden. Nach Entstehungsgrund kann u.a. in neuromuskuläre, kongenitale und idiopathische Skoliosen eingeteilt werden, wobei die Hauptgruppe mit einem Anteil von ca. 85% durch die idiopathischen Skoliosen gestellt wird (Niethard FU und Carstens C 2009). Da eine Verschlechterung einer vorhandenen skoliotischen Wirbelsäulendeformität vor allem den Wachstumsschüben zugeschrieben wird und sich die Therapiemöglichkeiten ebenfalls anhand des Erkrankungsbeginn abschätzen lassen (Kim et al. 2009), unterteilt man in eine infantile (0-3 Jahre), in eine juvenile (4-10 Jahre) sowie in eine adoleszente (ab dem 11. Lebensjahr bis zum Wachstumsabschluss) Form (Weinstein 1999, Wu et al. 2019). Innerhalb der idiopathischen Skoliosen sind die während der Adoleszenz auftretenden, mit rund 90% die häufigsten (Tabelle 1) (Weinstein 1999). Auch eine Säuglingsskoliose ist bekannt und zeigt sich stets als thorakolumbale, linkskonvexe Krümmung mit sehr guter Prognose (Spontanheilung in über 96% aller Fälle). Da bei Diagnosestellung allerdings häufig nicht der genaue Erkrankungsbeginn festgestellt werden kann, wird heute häufig auch eine vereinfachte Unterteilung in Early-onset- (Erkrankungsbeginn vor dem 10. Lebensjahr) und Late-onset- (Erkrankungsbeginn nach dem 10. Lebensjahr) Skoliose vorgenommen (Negrini et. al 2012). Nach Lokalisation des Scheitelwirbels werden Skoliosen mit thorakaler, thorakolumbaler und lumbaler Krümmung differenziert. Auch Kombinationen mehrerer Lokalisationen sind möglich (Tabelle 2). Bezüglich des Krümmungstyps muss man zwischen C-förmigen (eine Hauptkrümmung), S-förmigen (zwei Hauptkrümmungen) und Triple-Skoliosen (drei Hauptkrümmungen) unterscheiden. Das Krümmungsausmaß lässt ebenfalls eine Unterteilung der idiopathischen Skoliose zu. Dabei spricht man von leichten Skoliosen bei Cobb- Winkeln von 10- 20 Grad, von moderaten bei Cobb- Winkeln von 20- 40 Grad und von schweren bei Cobb- Winkeln von größer 40 Grad (Negrini et al. 2012). Um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen, führte King 1983 eine Klassifikation für die idiopathische Skoliose ein, bei der er fünf Krümmungstypen unterschied (King et al. 1983). 2001 wurde diese von Lenke modifiziert (Lenke et al. 2001).

Tabelle 1: Einteilung von Skoliosen nach Weinstein (Weinstein 1999)

Idiopathische Skoliosen ~ 90% (Ätiopathogenese unbekannt)	Sekundäre Skoliosen ~10% (Zusammenhang mit einer Grunderkrankung)
infantil ~ 0,5%	neuromuskulär
juvenil ~ 10,5%	kongenital
adoleszent ~ 89%	andere (Trauma, Tumoren, Infektionen, usw.)

Tabelle 2: Einteilung nach Lokalisation des Scheitelwirbels nach Lenke (Lenke et al. 2001)

Krümmungslokalisation	Scheitelwirbel
Cervial	HWK 1 bis HWK 6/7
Cervikothorakal	HWK 7, BWK1 oder HWK 7 bis BWK 1
Thorakal	BWK 2 bis BWK 11/12
Thorakolumbal	BWK 12, LWK 1 oder BWK 12 bis LWK 1
Lumbal	LWK 1/2 bis LWK 4/5
Lumbosakral	LWK 5 oder unter LKW 5

1.3.1 Klassifikation nach Lenke

Für diese Klassifikation definierte Lenke einige neue Begriffe: Bei der „major Kurve“ handelt sich um die Krümmung mit dem größten Cobb- Winkel, welche immer strukturell ist. Die „minor Kurve“ ist im Vergleich kleiner und kann sowohl strukturell, als auch nicht-strukturell sein. Bei „nicht-strukturellen“ Kurven handelt sich um Krümmungen, die in der seitlichen Bending- Aufnahme weniger als 25 Grad abweichen (Lenke et al. 2001). Lenke bezieht neben sechs Hauptkurventypen, auch den „Lumbar spine modifier“ (Lenke et al. 2001), womit Veränderungen im lumbalen Teil der Skoliose erfasst werden, ein. Er unterscheidet dabei in die Modifier Typen A, B und C, je nachdem, wie weit der lumbale Scheitelwirbel von einem zentralen Lot über der Mitte des Kreuzbeins (Central sacral vertical line = CSVL) seitlich abweicht. Der Wirbel, der durch die CSVL in etwa zwei gleiche Anteile geteilt wird, wird als stabiler Wirbel bezeichnet. Zusätzlich wird in dieser Einteilung auch das sagittale Profil der Wirbelsäule betrachtet, welches Rückschlüsse auf den Grad der thorakalen Kyphose ermöglicht. Dabei findet eine Unterteilung in Hypokyphose, normale Kyphose und Hyperkyphose statt. Da die Lenke- Klassifikation eine präzisere Festlegung des Skoliosetyps zulässt, entscheidend für die Therapieplanung sein kann (Lenke et al. 2001) und sich ihre Anwendung international immer weiter durchsetzt, wird sie auch in dieser Arbeit als Grundlage für die Auswertungen genutzt (Abb. 3).

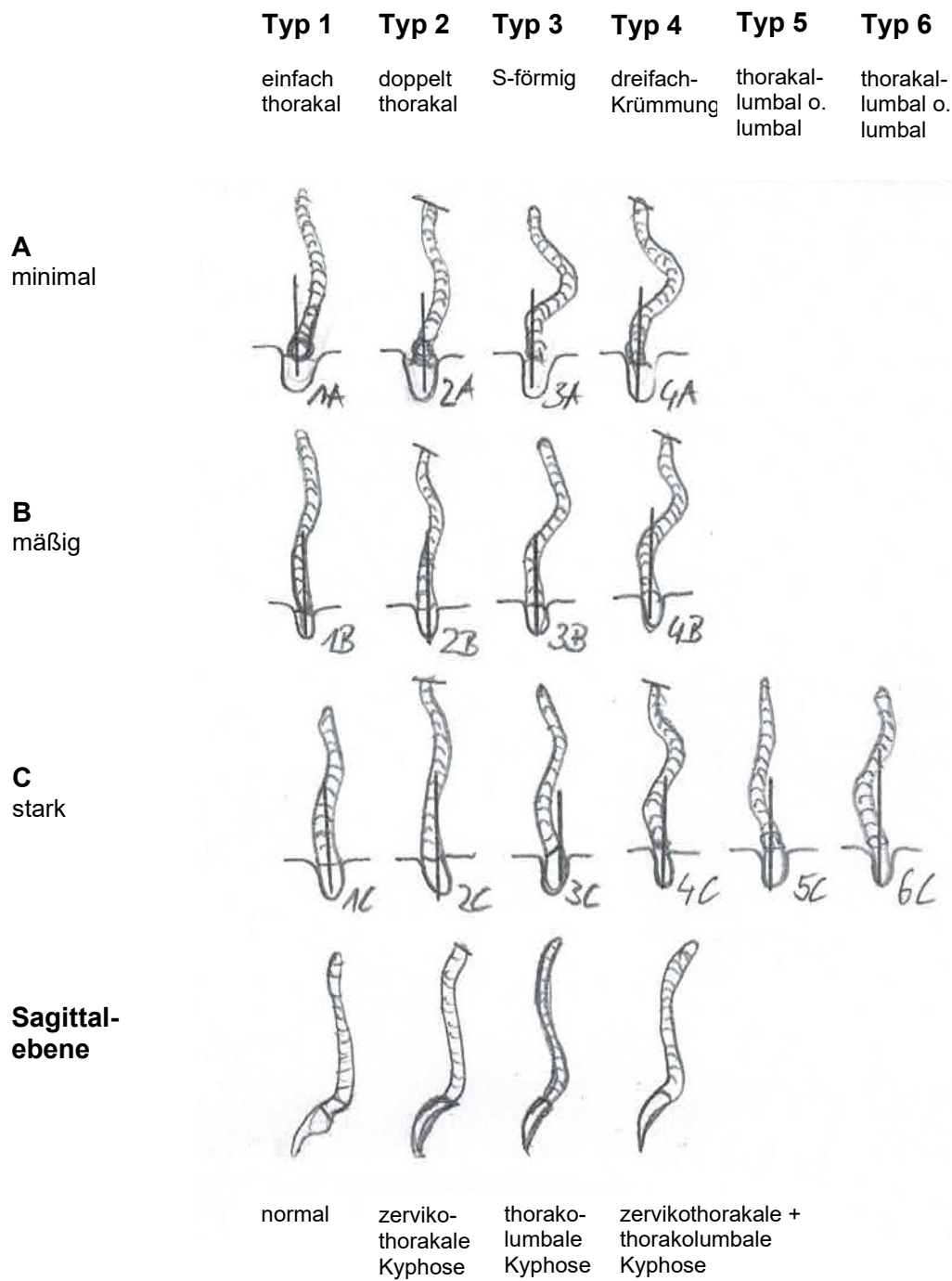


Abb. 3: Kurventypen nach Lenke (Lenke et al. 2001)

1.4 Ätiologie und Pathogenese

Während bei den sekundären Skoliosen die Deformitäten auf einer Grunderkrankung basieren, kann bei der idiopathischen Form bis heute nur über eventuelle Entstehungsgründe spekuliert werden. Durch viele verschiedene Publikationen scheint allerdings klar, dass bei der Ätiopathogenese der Skoliose zahlreiche Faktoren und pathologische Mechanismen eine Rolle spielen. Als eine der Ursachen wird eine genetische Veranlagung angenommen, welche Bar-On und Kollegen 2000 als multifaktorielle X-chromosomale Heredität herausarbeiteten (Bar-On et al. 2000). 2003 konnten Justice und Mitarbeiter zeigen, dass die Häufigkeit an einer Skoliose zu erkranken bei 7-11% liegt, wenn bereits ein Verwandter 1. Grades betroffen ist (Justice et al. 2003). Ogilvie et al. postulierten 2006, dass 97% der Patienten mit AIS Verwandte haben, die an der genannten Erkrankung leiden (Ogilvie et al. 2006). Die genetische Prädisposition für AIS wirkt sich sowohl auf die Inzidenz, als auch auf die Progression der Erkrankung aus (Ward et al. 2010).

Bei der adoleszenten Form werden auch Wachstumsstörungen zwischen den ventralen und dorsalen Wirbelkörperanteilen verantwortlich gemacht. So gingen Machida und Kollegen 1994 von einem Missverhältnis zwischen Körperwachstum und des Wachstums der dorsalen Strukturen aus. Durch ein stärkeres ventrales Wachstum, welches gleichzeitig die Höhenzunahme der dorsalen Strukturen behindert, wird eine Lordose bedingt (Machida et al. 1994). Die vordere Säule wird zum Ausweichen in die Rotation gezwungen (Rotationslordose). Eine neuere Studie von 2003 konnte dies untermauern und spezifizieren: Im Vergleich zu den Kontrollen hatten die Patienten mit Skoliose längere Wirbelkörper zwischen Th1 und Th12 in der vorderen Säule und kürzere Pedikel mit größerem interpedikulären Abstand in der hinteren Säule (Guo et al. 2003). Mehrere Studien beschäftigten sich mit Anomalien der Muskulatur bei Skoliose. Intraoperativ entnommene Muskelbiopsien wurden dabei histologisch und histochemisch untersucht und dabei immer ein erhöhter Anteil an Typ I- Muskelfasern auf der Konvexseite der Skoliose gegenüber der Konkavseite festgestellt (Bylund et al. 1987, Ford et al. 1988, Kennelly et al. 1993). Da es vor der Diagnosestellung aus ethischen Gründen derartige Untersuchungen nicht gibt, kann nicht abschließend geklärt werden, ob es sich um Ursache oder Folge der Skoliose handelt. Zusätzlich diskutierten Archer und Dickson über einen relativen Beckenschiefstand während des Wachstums als möglichen Auslöser für eine Skoliose

(Archer et al. 1985). Zwischen Beinlängendifferenz und Skoliose konnte jedoch nur eine sehr schwache Korrelation festgestellt werden (Hoikka et al. 1989). Auch hormonelle Einflüsse werden als Gründe für die Entstehung einer Skoliose in Erwägung gezogen. Bei Erkrankten wurden erhöhte Konzentrationen des Wachstumshormons Somatotropin im Serum gemessen. Dieser Faktor könnte als Begründung dienen, wieso Patienten mit Skoliose häufig etwas größer sind als gleichaltrige Gesunde (Archer et al. 1985, Byrd 1988). Das Hormon führt zu einem stärkeren Höhenwachstum und sorgt dafür, dass der pubertäre Wachstumsschub früher und ausgeprägter auftritt (Hägglund et al. 1992). Auch ein Melatoninmangel stand unter Verdacht eine Skoliose auszulösen, da durch Entfernung der Epiphysen im Experiment bei Küken eine Skoliose induziert werden konnte (Machida et al. 2001, Turgut et al. 2003). Dieser Pathomechanismus konnte durch Lowe und Kollegen aber 2000 als irrelevant für den Menschen erklärt werden (Lowe et al. 2000).

Auch neurologische Faktoren scheinen einen Einfluss zu haben. Als Auslöser einer skoliotischen Fehllhaltung der Wirbelsäule spekulierte Borwell 1992 über Veränderungen im zentralen Nervensystem (Burwell et al. 1992). Während einer anderen Studie wurden Patienten mit somatosensorisch evozierten Potenzialen untersucht. Es zeigte sich, dass über 50% der Probanden mit idiopathischer Skoliose pathologische evozierte Potenziale aufwiesen (Rechts-Links-Seitendifferenz der Potenzial-Latenzen bzw. Amplituden, sowie generell verzögerte peripher-zentrale Überleitungszeiten bezogen auf die Körpergröße) (Schneider et al. 1991). MRT-Untersuchungen zeigten, dass auch intraspinale Anomalien (z.B. intraspinale Syrinx) vorliegen können (Graul et al. 2019).

Bei der adoleszenten idiopathischen Skoliose wird auch ein Zusammenhang mit Osteoporose nicht ausgeschlossen. Biopsien aus dem Beckenkamm der Patienten zeigten eine verminderten Osteozytenzahl und legen damit eine Störung des Knochenumsatzes nahe. Der abnorme Metabolismus könnte zu der geringeren Knochendichte beitragen und eine wichtige Rolle bei der Ätiologie und Pathogenese der jugendlichen idiopathischen Skoliose spielen (Cheng et al. 2001). Nicht nur der Knochenstoffwechsel scheint verändert, sondern auch derer wichtiger Spurenelemente. So zeigte eine Studie von Dastyh und Kollegen, dass das Level von Kupfer und Zink, sowohl im Serum als auch in den Haaren bei Erkrankten erhöht ist. Der Selen-Spiegel ist hingegen vermindert (Dastyh et al. 2008). Keine ätiologische

Bedeutung haben hingegen asymmetrische sportliche Betätigung, häufiges Sitzen oder Stehen in skoliotischer Haltung und die Händigkeit (Carr et al. 1993).

Wie die Ausführungen zeigen ist die Ätiologie und Pathogenese ein äußerst komplexer Sachverhalt und benötigt weiterhin eine grundlegende Erforschung.

1.5 Klinisches Problem und Behandlungsnotwendigkeit

Mit einer Inzidenz von mehr als 1%, ist die idiopathische Skoliose eine der häufigsten Deformitäten der Wirbelsäule (Abel 2017, Thompson et al. 2017). Je nach Altersgruppe variiert die Prävalenz. Während die idiopathische Skoliose bei Säuglingen und Kleinkindern äußerst selten auftritt, lässt sie sich bei Heranwachsenden bis zum 16. Lebensjahr bereits mit einer Prävalenz von 1-2% finden (Willner et al. 1982). Bei einem von sechs Patienten mit adoleszenter idiopathischer Skoliose wird eine Behandlung notwendig. Rund ein Viertel der Behandelten muss sich einer operativen Maßnahme unterziehen (Negrini et al. 2014). Seit vielen Jahren gehört die Korsett-Versorgung bei idiopathischen Skoliosen zum konservativen Behandlungsschema. Deren Effektivität konnte bereits in mehreren Studien gezeigt werden, so beispielsweise auch in der „BrAIST study“ (Weinstein et al. 2013). Bei noch vorhandenem Wachstumspotential wird meist die Verordnung einer Orthese ab einem Cobb-Winkel von 20 Grad in Betracht gezogen. Dabei muss immer bedacht werden, dass sich die Krankheit am häufigsten während der Adoleszenz demaskiert und damit in einen Zeitraum fällt, der durch körperliches Wachstum und allgemeine Veränderungen geprägt ist und damit ohnehin schon eine physische und psychische Belastung darstellen kann. Die mentale Belastung während einer Korsett-Behandlung ist ähnlich der von Patienten nach einer Herztransplantation, Fettleibigkeit oder Krebs (Sanders et al. 2018). Im Alter von 14 Jahren haben 1,2% aller Jugendlichen (1,9% aller Mädchen) eine Skoliose von über 10 Grad und 0,5% des gesamten Kollektivs eine Skoliose mit Cobb-Winkeln über 20 Grad (Bunnell 1993). Mädchen sind dabei 3,5-mal häufiger betroffen als gleichaltrige Jungen (Bunnell 1993). Für eine erfolgreiche Therapie spielt die Compliance der Patienten eine entscheidende Rolle, denn das Tragen des Korsetts muss konsequent und über einen meist mehrere Jahre langen Zeitraum fortgeführt werden. Die Heranwachsenden sollten ermutigt werden, die konservative Therapie zur Progressionsverhinderung und zum Vermeiden einer operativen Korrektur zu befolgen. Trotz bewiesener Effektivität der konservativen Behandlung, kommt es bei bis zu 30% der Patienten zu einer Verschlechterung der Krümmung, möglicherweise sogar zu einer Operation (Thompson et al. 2017).

1.5.1 Progressionsrisiko

Die Behandlungsnotwendigkeit ergibt sich aus dem hohen Progressionsrisiko einer unbehandelten Skoliose, welches vom Krümmungsausmaß und dem Restwachstum bzw. Alter abhängig ist (Tabelle 3) (Weinstein et al. 1983). Bei allen Ausprägungsgraden der Skoliose findet die Progression vor allem während des pubertären Wachstumsschubes statt.

Während bei leichten Skoliosen mit Cobb- Winkeln von unter 20 Grad nach Wachstumsabschluss keine Progression zu erwarten ist, zeigt sich bei schweren Skoliosen mit Initialwinkeln von über 60 Grad ein Progressionsrisiko von 70% auch nach dem Wachstumsschub.

Tabelle 3: Progressionsrisiko in Abhängigkeit von Krümmung und Alter (Weinstein et al. 1983)

Cobb-Winkel	10- 12 Jahre alt	13- 15 Jahre alt	16 Jahre alt
<20°	25%	10%	0%
20° - 29°	60%	40%	10%
30° - 59°	90%	70%	30%
>60°	100%	90%	70%

In verschiedenen Publikationen wurden Faktoren veröffentlicht, die sich auf die Progression einer bestehenden Skoliose auswirken. Nach Malfair et al. handelt es sich um eine signifikante Progression, wenn innerhalb eines Jahres der Cobb- Winkel um mindestens 5 Grad zunimmt (Malfair et al. 2010). Weitere wichtige Einflussfaktoren sind nach Soucacos et al. die Kurvenlokalisierung und Richtung, das Geschlecht und der Grad der körperlichen Reife (Soucacos et al. 1998). Zhang et al. postulieren, dass ein Cobb- Winkel von größer 35 Grad, die Rotation des Scheitelwirbels über Grad 3 nach Nash und Moe, ein Risser- Stadium von kleiner 2 sowie ein Wirbelsäulenwachstum von mehr als 2 cm pro Jahr ein Progressionsrisiko von mehr als 5 Grad vorhersagen (Zhang et al. 2015). Studien zeigten, dass unbehandelte Skoliose-Patienten durchaus produktiv sind und nur geringe physische Einschränkungen verkraften müssen, allerdings leiden sie gehäuft an Rückenschmerzen. Dabei ist die Prävalenz für chronische Schmerzen dreifach höher und die Inzidenz starker Schmerzen nach 40 Jahren sogar zwanzigfach höher.

Ab einem Cobb-Winkel von 70 Grad kommt es bei den Patienten zu relevanten Lungenfunktionseinschränkungen (Weinstein et al. 2003, Asher et al. 2006).

Mit Spätfolgen haben allerdings auch behandelte Patienten mit Skoliose zu rechnen. In einer Studie von Danielsson und Nachemson zeigte sich eine signifikant erhöhte Inzidenz für Bandscheibendegenerationen, sowohl für operativ, als auch für konservativ behandelte Patienten, im Vergleich zur Normalbevölkerung (Danielsson et al. 2001). Auch nach dem Wachstumsabschluss besteht das Risiko der Verschlechterung einer bestehenden Skoliose (Tabelle 4) (Weinstein et al. 1983). Bei Cobb-Winkeln unter 30° findet keine wesentliche Progression statt. Kurven mit über 50° zeigen dagegen eine starke Tendenz zur Zunahme der Krümmung, wobei bei thorakalen Kurven die Progression stärker ist als bei lumbalen Kurven. Aufgrund dieser Tatsache erreichen Patienten mit Skoliosekrümmungen von 50° oder mehr zum Wachstumsabschluss im mittleren Lebensalter durchaus deutlich höhere Krümmungswinkel und entwickeln dementsprechend dann auch schwerere Symptome. Daher wird bei Kindern und Jugendlichen mit idiopathischer Skoliose in jedem Wachstumsalter heute so gut wie immer ab einem Krümmungswinkel von 50° eine Operation empfohlen.

Tabelle 4: Progression nach Wachstumsende (Weinstein et al. 1983)

Cobb-Winkel	Thorakale Kurven		Lumbale Kurven	
	nach Wachstumsabschluss	nach 40 Jahren	nach Wachstumsabschluss	nach 40 Jahren
<30°	keine	keine	keine	keine
30° - 50°	~ 0,25°/ Jahr	~10°	~ 0,4°/ Jahr	~ 15°
50° - 70°	~ 0,75°/ Jahr	~30°	~ 0,5°/ Jahr	~ 18,5°

1.6 Diagnostik

1.6.1 Klinische Untersuchung

Primär erfolgt eine Anamneseerhebung, welche Alter, Größe, Größe der Eltern, Menarche, Wachstumsgeschwindigkeit mit Wachstumsschüben und eventuelle Auffälligkeiten beinhalten sollte. Des Weiteren sollte nach Schmerzen und Einschränkungen des Bewegungsumfanges gefragt werden. Begleiterkrankungen, wie kardiopulmonale oder urologischen Probleme, können auf eine nicht-idiopathische Genese hindeuten. Zusätzlich wird eine körperliche Untersuchung am entkleideten Patienten, bei der der Schulterstand, eventuelle Brustkorbdeformitäten, die Kopfhaltung, ein möglicher Beckenschiefstand und die Bewegungsumfänge im Fokus stehen, durchgeführt. Die Inspektion sollte neben der Frontal-, auch die Sagittalebene, mit Beurteilung von Kyphose und Lordose, einschließen (Abb. 4 und 5). Um das Lot der Wirbelsäule (Hinterhaupt bis Rima ani) beurteilen zu können, wird die Abweichung vom Lot in Zentimeter gemessen. Bei Betrachtung der Dornfortsätze kann eine C- oder S-förmige Seitabweichung auffallen, welche infolge der Rotation dieser, zur Konkavseite der Skoliose, entsteht. Die Rigidität der Skoliose sollte durch Seitneigung des Oberkörpers überprüft werden. Die Beurteilung des Schultergürtels, sowie die Form der Taillendreiecke, ermöglichen Rückschlüsse auf Fehlhaltungen oder Fehlstellungen, beispielsweise als Ausdruck von kompensatorischen Gegenkrümmungen. Eine der wichtigsten Untersuchungen stellt der Adams-Vorbeugetest dar (Abb. 6). Der Patient beugt sich mit durchgestreckten Beinen nach vorn (bestehende Beinlängendifferenzen müssen mit Brettchen ausgeglichen werden) und der Untersucher betrachtet von dorsal eventuelle Asymmetrien. Dabei können thorakale und lumbale Rotationen detektiert werden, die als Rippenbuckel bzw. Lendenwulst, moderner auch Rippen- oder Lendenberg, bezeichnet werden und beide auf der konvexen Seite der Deformität liegen. Damit die strukturellen Deformitäten gut diagnostiziert werden können, wird die körperliche Inspektion vor einem Raster vorgenommen. Auch gering ausgeprägte Skoliosen, lassen sich so für den Untersucher schneller erkennen. Durch die häufig fehlende klinische Symptomatik werden die Patienten meist vorstellig, wenn Angehörigen Deformitäten des Rumpfes auffallen. Um die Patienten eher einer eventuell nötigen Therapie zuzuführen, wird ein Schulscreening befürwortet (Landauer et al. 1997).



Abb. 4: Inspektion in Frontalebene



Abb. 5: Inspektion in Sagittalebene

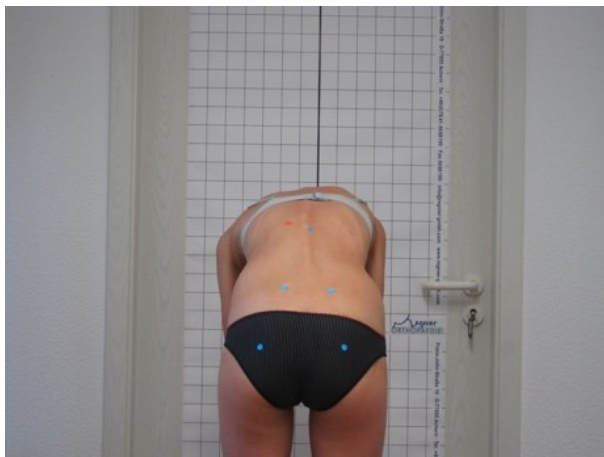


Abb. 6: Adams- Vorbeugetest

Abb. 4-6: Bereits im Stand zeigt sich bei der Patientin eine leichte Asymmetrie der Taillendreiecke und ein Schulterschiefstand. Beim Vorbeugen wird die Rotation der Wirbelsäule in Form eines rechtsseitigen Rippenbuckels sichtbar.

1.6.2 Radiographische Messungen

Nach Anamnese und Inspektion wird bei erhärtetem Verdacht die Diagnose mit Hilfe eines Röntgenbildes des aufrechtstehenden Patienten im anterior- posterioren Strahlengang gestellt. Hierbei sollte es sich um eine Gesamtaufnahme der Wirbelsäule handeln, welche auch beide Beckenkämme abbildet. Anhand der lateralen Ossifikation der Darmbeinkammaphyse kann nach Risser die Skelettreife beurteilt werden (Quelle Risser) und hat damit prognostische Relevanz (Abb. 7). Mädchen befinden sich in etwa mit Beginn der Menarche, welche den Höhepunkt des pubertären Wachstumsschubes markiert, im Stadium I. Innerhalb von circa zwei Jahren werden die nächsten Stadien durchlaufen, bis der Wachstumsschub in Stadium IV abgeschlossen ist. Während dieses Schubes ist mit der größten Progredienz der Skoliose zu rechnen (Dimeglio 2001). Im Stadium V erfolgt die vollständige Verknöcherung und das Wachstum sowie das Risiko der Progredienz einer Skoliose beschränken sich auf ein Minimum.

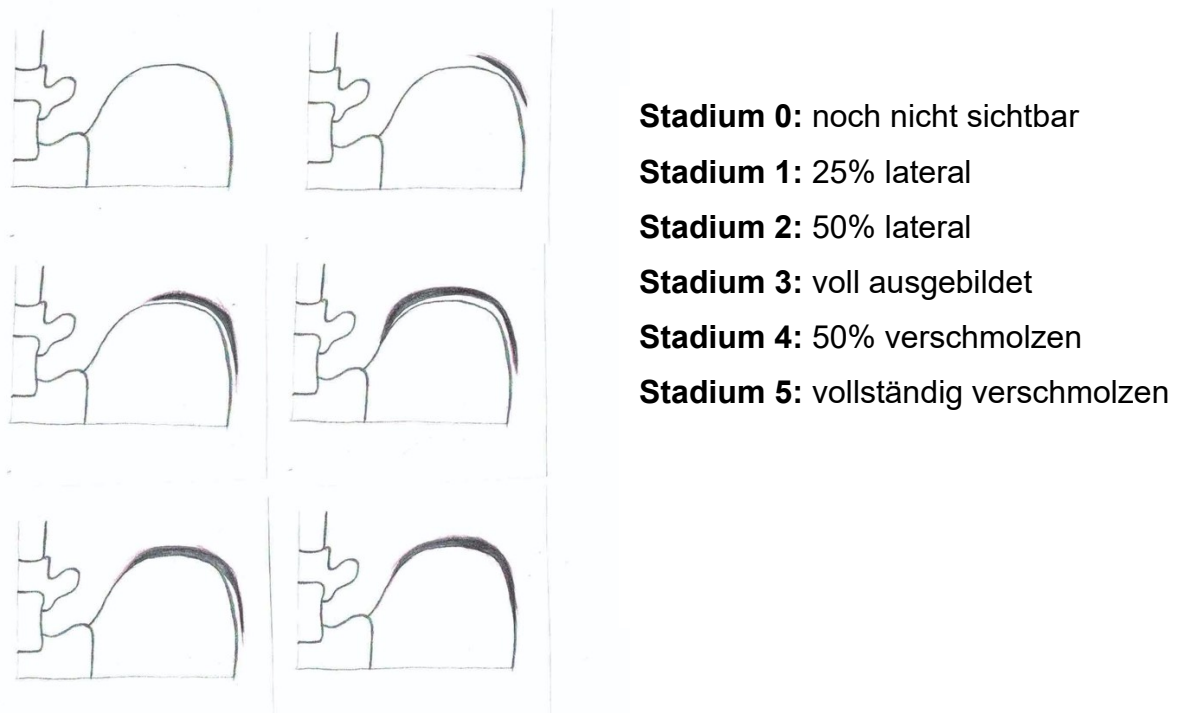


Abb. 7: Risser- Zeichen zur Beurteilung der Skelettreife

Auch die Sagittalebene sollte als radiologische Aufnahme festgehalten werden, um Brust- und Lendenwirbelsäule mit Kyphose und Lordose beurteilen zu können. Die sogenannte Bending-Aufnahme (Röntgenbild in Rückenlage bei maximaler aktiver Seitneigung) kann Auskunft über die Flexibilität der Skoliose geben. Um das Ausmaß der Wirbelsäulendeformität feststellen zu können, sind verschiedene radiographische Parameter heranzuziehen. Vorrangig wird der Cobb- Winkel von Haupt- und Nebenkrümmung bestimmt. Dieser ergibt sich als Winkel zwischen den beiden Wirbelkörpern, die am stärksten von der Horizontalen abkippen, als Neutralwirbel bezeichnet werden und den Beginn und das Ende der Krümmung darstellen. Um das Winkelmaß zu bestimmen wird eine Tangente von der Deckplatte des oberen und eine Tangente von der Grundplatte des unteren Neutralwirbels gezogen (Abb. 8). Der Winkel zwischen den beiden Tangenten ermöglicht die Quantifizierung der Skoliose in der Frontalebene (Malfair et al. 2010). Ein Cobb- Winkel von größer 10 Grad weist gemäß der „Scoliosis Research Society“ einen pathologischen Wert auf. Der Scheitelwirbel, auch als Apex bezeichnet, liegt am Scheitelpunkt der Krümmung, ist am stärksten rotiert und lateralisiert, aber nicht geneigt.

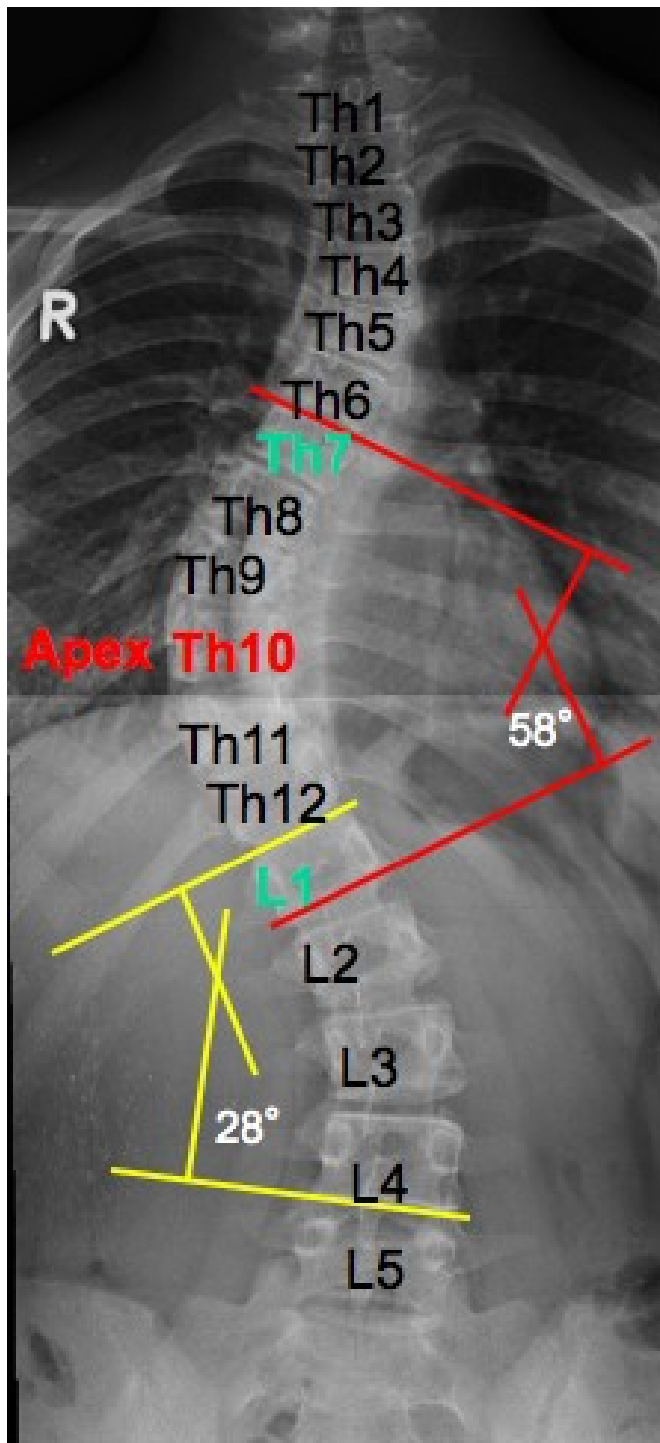


Abb. 8: Ermittlung des Winkelmaßes nach Cobb.

Am Beispiel sind die Cobb-Winkel der tiefthorakalen Hauptkrümmung (rot) und der lumbalen Nebenkrümmung (gelb) aufgezeigt. Die Messung erfolgt jeweils von der Grundplatte des unteren Endwirbels zur Deckplatte des oberen Endwirbels.

1.7 Therapeutische Optionen

Die Therapie der idiopathischen Skoliose basiert auf drei Säulen. Als Ausgang für die Entscheidung über das Therapiekonzept dienen die radiologischen Parameter. Dabei muss zwischen nationalen und internationalen Behandlungsempfehlungen unterschieden werden. 2011 wurden die SOSORT- („International Society on Scoliosis Orthopaedic and Rehabilitation Treatment“) Kriterien als Leitlinie für die Korsetttherapie etabliert. Bis zu einer Abweichung von 20 Grad wird den Patienten empfohlen, sich zur Kontrolle der Progredienz in 4- bis 6- monatigen Abständen bei ihrem behandelnden Orthopäden vorzustellen (Trobisch et al. 2010, Negrini et al. 2012). Additiv kann zu diesem Zeitpunkt auch mit speziellen Physiotherapie-Behandlungen einer Verschlechterung entgegengesteuert werden.

1.7.1 Physiotherapeutische Übungen

Negrini et al postulierten 2012, dass spezifische physiotherapeutische Übungen als Prävention gegen die Kurvenprogression bei AIS eingesetzt werden können (Negrini et al. 2012). Laut SOSORT sollen physiotherapeutischen Übungen zur Anwendung kommen, deren Effektivität in Studien belegt wurden und die auf folgenden Kriterien basieren: Dreidimensionale Selbstkorrektur, Stabilisation der korrekten Körperhaltung sowie Training der Aktivitäten des täglichen Lebens (Weiss et al. 2006). Das bekannteste Konzept stellt die von Katharina Schroth entwickelte Schroth-Therapie dar. Deren grundlegende Elemente setzen sich aus Entdrehen, Entbiegen und Aufrichten zusammen, welche durch eine spezielle Atem-Technik, die „Dreh-Winkel-Technik“, realisiert werden sollen. Der Enkel der Begründerin, selbst Orthopäde, postuliert eine bis zu 2,9- fache verringerte Inzidenz der Kurvenprogredienz bei mehrwöchiger stationärer Schroth- Therapie (Weiss et al. 2003). Unabhängige Langzeitstudien, die seine Beobachtungen bekräftigen können, fehlen jedoch bis heute.

1.7.2 Indikation zur Korsetttherapie

Eine Korsettversorgung sollte bei Patienten, deren Knochenwachstum noch nicht abgeschlossen ist, mit Skoliosen mit Cobb- Winkeln zwischen 20- 40 Grad erfolgen (Hopf 2000). Die Lokalisation der Krümmung beeinflusst die Behandlungsstrategie. So besteht die Indikation zur Korsetttherapie bei Skoliosen mit thorakaler Hauptkrümmung zwischen 20 und 40 Grad, während bei lumbalen Hauptkrümmungen bereits zwischen 15 und 30 Grad mit der Versorgung begonnen wird. Bei Patienten mit einer gering ausgeprägten Skoliose mit Winkeln < 20 Grad, bei denen innerhalb von sechs Monaten eine Progredienz von 5 Grad zu verzeichnen ist, gilt die Behandlung mittels Korsett ebenfalls als empfehlenswert (Negrini et al. 2012). Das in dieser Studie untersuchte Chéneau- Korsett, zählt zu den am häufigsten verordneten Derotationsorthesen und entspricht dem Goldstandard des Full- time- rigid- bracing (FTRB). Regelmäßig werden neue oder modifizierte Korsetttypen entwickelt und hinsichtlich ihres Therapieerfolgs untersucht. Hier können stellvertretend das SpineCor® oder das Dresdner Night-Time Brace genannt werden. Leichtere und diskretere Modelle sowie solche mit geringerer Tragedauer pro Tag können die Compliance der Patienten signifikant erhöhen. Auch Teilzeitkorsette können effektiv wirken (Jarvis et al. 2008), sollten aber aufgrund der noch nicht ausreichenden Datenlage nur als Einzelfallentscheidung oder für Studienzwecken genutzt werden. Zusätzlich wird die Korsetttherapie in Deutschland physiotherapeutisch begleitet, vor allem durch obengenanntes Prinzip nach Schroth (Kwan et al. 2017). Generell kann gesagt werden, dass das Therapieschema in Deutschland eher als rigide bezeichnet werden kann, da bereits ab 20 Grad mit FTRB-Versorgung begonnen wird (Seifert et al. 2016). Im anglo-amerikanischen Raum verfolgt man zum Teil hingegen bis zu einem Winkel von 25 Grad die Strategie des „Watchfull Waiting“ (beobachtendes Abwarten) und beginnt erst ab diesem Winkelmaß mit der Korsettversorgung (Weinstein et al. 2008). Im Korsett wird eine Aufrichtung von 50% angestrebt. Der Korrektoreffekt und die Passgenauigkeit werden mithilfe einer Kontroll-Röntgenaufnahme des Patienten im Korsett überprüft.

1.7.3 Operative Verfahren

Bei Cobb- Winkeln von mehr als 40-50° Grad und bei progredient fortschreitenden Skoliosen (Verschlechterung um 10 Grad pro Jahr) werden mit dem Betroffenen operative Verfahren diskutiert (El-Hawary et al. 2014). Neben dem Kurvenausmaß müssen auch die Skelettreife, das Patientenalter, die Neigung zur Progression sowie klinische Symptome in die Entscheidung über eine Operationsindikation einbezogen werden (Kim et al. 2009). Bei adoleszenten Skoliosen handelt es sich in der Regel um Korrekturspondylodesen. Die Versteifung der betroffenen Wirbel kann durch ventrale, dorsale oder kombinierte Verfahren erfolgen (El-Hawary et al. 2014). Die konventionellen Operationstechniken sind kaum flexibel und führen zu relevanten Bewegungseinschränkungen. Außerdem kann die minimierte Anzahl an Bewegungssegmenten zu Fehl- und Überbelastungen führen und damit frühzeitige Abnutzungserscheinung bedingen. Die Anzahl der versteiften Segmente soll möglichst geringgehalten werden, um die Komplikationsrate zu senken und die Flexibilität der Wirbelsäule weitestgehend zu erhalten, dennoch muss gleichzeitig die dauerhafte Kurvenkorrektur ermöglicht werden (Hopf 2000). Die infantilen und juvenilen Formen der Skoliose stellen eine Ausnahme dar, da sie operativ mit Implantaten versorgt werden, welche im Nachhinein aufgrund des weiteren Wachstums angepasst werden können bzw. Wachstum bei gleichzeitiger Korrektur erlauben. Als weiteren Ansatz postulierten Betz et al. die konvexseitige Wirbelsäulenklammerung (engl. „Vertebral Body Stapling“, VBS), welche zu einer unilateralen Wachstumshinderung führt. Sie kann als minimalinvasives Verfahren bei Patienten im Risser- Stadium 0 bis 1 mit einer thorakalen Skoliose < 35 Grad beziehungsweise einer lumbalen Skoliose < 45 Grad durchgeführt werden und sorgt für Korrektur und Verhinderung der Kurvenprogression (Betz et al. 2010). Seit 2018 ist auch das in den USA entwickelte Verfahren „Vertebral Body Tethering“ (VBT) in Deutschland zugelassen. Bei dieser Methode wird ein Kunststoffseil an der konvexen Seite der Krümmung mit Hilfe von tief in den Wirbel gebohrten Schrauben angebracht. Eine primäre Korrektur erfolgt schon während der OP, die restliche folgt während des weiteren Wachstums. Patienten mit idiopathischen Skoliosen mit Cobb- Winkeln von über 30 Grad, bei denen sich die Korsetttherapie als nicht effizient erweist oder abgelehnt wird und deren Restwachstum noch mindestens zwei Jahre beträgt, können dieser Methode zugeführt werden (Padhye et al. 2018). Aufgrund des sehr neuen Verfahrens und der damit verbundenen geringen Anzahl an

behandelten Patienten, fehlen bis heute große Studien, die ein eindeutiges Indikationsspektrum der neuen Verfahren definieren. Samdani et al. führten 2015 eine Untersuchung an 32 VBT- Patienten durch und konnten zeigen, dass es sich um eine wirksame Behandlungsoption handelt und die Studienteilnehmer alle eine Verbesserung ihrer Skoliose erzielten (Padhye et al. 2018).

1.8 Korsettbehandlung

1.8.1 Historische Entwicklung

Bereits während der Antike wurde sich mit der Behandlung von Wirbelsäulendeformitäten beschäftigt. Hippokrates entwickelte mit seiner „Hippokratischen Bank“ ein Verfahren, welches vorrangig auf Extensionskräften beruhte. In Bezug auf die Korsetttherapie muss als Wegbereiter der Orthesenversorgung Ambroise Paré genannt werden. Der französische Feldarzt entwickelte im 16. Jahrhundert Metallkorsette zur Korrektur der Wirbelsäule. Im 18. Jahrhundert begann Roux mit der Entwicklung von Korrekturorthesen, gefolgt von Le Vacher und Sheldrake (Harms et al. 2015). Auch in der heutigen Zeit existiert eine Vielzahl verschiedener Orthesen zur Behandlung der idiopathischen Skoliose. Als bekannteste können hier das Milwaukee-, das Boston-, das Charleston- Bending-, oder das Chéneau- Korsett genannt werden. Einige konnten sich aufgrund der schwierigen Anpassung, des hohen Materialgewichtes oder eines schlechten Tragekomforts nicht nachhaltig durchsetzen. Bei einer Therapiedauer von meist mehreren Jahren und der täglichen Tragezeit zwischen 15- 23 Stunden, sollten die meist ohnehin als störend empfunden Orthesen, optimal auf den jeweiligen Patienten angepasst sein und ihn in seinen alltäglichen Unternehmungen so wenig wie möglich einschränken. Da im Waldkrankenhaus Rudolf Elle vor allem das modifizierte Chéneau-Korsett verordnet und in der ansässigen technischen Orthopädie dessen Bau und Anpassung umgesetzt wird, fokussieren sich die Ausführungen auf diesen Typ der Orthese. Das 1978 von Jacques Chéneau eingeführte Korsett zählt zu den Inspirations- Derotationsorthesen. Wie auch beim Boston- Korsett beruht die Wirkung auf einem 3-Punkte-Prinzip: 1) Abstützung am Becken durch den Beckenkorb, 2) Abstützung unter der Axilla auf der Konkavseite, 3) Redression unterhalb des Apex der Skoliose auf der Konvexseite. Die Wirkung dieses Korsetts beruht also auf der queren transversalen Krafteinwirkung und besteht sowohl aus einer aktiven als auch aus einer passiven Komponente. Der Patient lernt aktiv gegen den passiven Pelottendruck an den konvexen Abschnitten der Skoliose zu atmen und somit in die freigelassenen Räume des Korsetts auf den konkaven Seiten der Krümmung auszuweichen.

1.8.2 Tragedauer

Auch hinsichtlich der täglichen Tragedauer können verschiedene Ansätze der Korsetttherapie verglichen werden. Im deutschsprachigen Raum stellen Orthesen, die den ganzen Tag (Fulltime- Korsett) getragen werden und nur für die Körperpflege abgenommen werden sollen, den Goldstandard dar. Es handelt sich dabei um eine einschneidende therapeutische Maßnahme, die für die Jugendlichen oft eine physische und psychische Belastung mit sich bringt (Climent et al. 1999). Dabei steht nicht der Scham im Vordergrund, sondern die Unbequemlichkeit und die geringen Erfolgschancen bei einer rigiden Skoliose (Bunge et al. 2010). Um den Patienten die Tragezeit zu verkürzen, gibt es auch den Ansatz der Parttime- Korsette. Hier kann das Charleston- Bending- Korsett genannt werden. Dieses wirkt durch das Prinzip der Überkorrektur und wird auch als Umkrümmungskorsett bezeichnet. Das Korsett hält den Patienten in einer maximalen Seitwärtsneigung zur behandelnden Krümmung (Abel 2017). Katz und Mitarbeiter publizierten 2010 die erste prospektive, verblindete und randomisierte Orthesenstudie. Alle Patienten erhielten eine Orthesenbehandlung und wurden entsprechend der Tragezeit randomisiert. Die Autoren beobachteten eine lineare Verminderung der Kurvenprogredienz sowie der Operationsnotwendigkeit mit steigender Tragedauer. Während mehr als zwei von drei Kindern ohne Korsett eine Verschlechterung der Skoliose erfuhren, waren es bei konsequentem Tragen eines Korsetts weniger als 1 von 5 (Katz et al. 2010). Allerdings zeigte sich auch, dass mit steigender Korsetttragedauer pro Tag die Compliance sinkt (Morton et al. 2008, Weinstein et al. 2013) und die Depressionsrate steigt (Misterska et al. 2010). 2017 wurden in einer retrospektiven Studie drei Patientengruppe mit unterschiedlicher täglicher Korsett-Tragezeit verglichen. Dabei wurde gezeigt, dass sich eine Tragedauer von mehr als zwölf Stunden täglich positiv auf die Verhinderung einer Progression des Cobb-Winkels auswirkt. Es stellte sich auch heraus, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Gruppe mit einer 12 bis 16-stündigen Tragedauer und der Gruppe mit einer Tragezeit von mehr als 16 Stunden besteht (Konieczny et al. 2017). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Versorgung von mehr als 12 Stunden angestrebt werden sollte, jedoch die Wünsche und vor allem die Compliance der Patienten stets hinterfragt werden müssen. Anhand dieser kann entschieden werden, ob eine Vollzeit-Versorgung sinnvoll ist, oder eine Teilzeit-Versorgung erwogen werden sollte.

2 Problemstellung und Ziele der Arbeit

Das primäre Ziel der vorliegenden Arbeit soll es sein, zu untersuchen, inwiefern sich die Kurvenmorphologie und die Lokalisation der Krümmung auf den Erfolg der Korsett-Therapie einer Skoliose auswirken. Gleichzeitig sollen bekannte Risikofaktoren für das Versagen einer konservativen Behandlung bezogen auf das rigide konservative Setup der Einrichtung analysiert werden (Rotation des Scheitelwirbels nach Nash und Moe, Alter und Geschlecht). Bei der Korsettbehandlung handelt es sich um eine etablierte und erfolgversprechende Therapie für die betroffenen Patienten, allerdings muss auch auf die Versagensrate von bis zu 30% hingewiesen werden (Abel 2017). Da das Tragen eines Korsetts eine relevante Einschränkung der Lebensqualität der jungen Heranwachsenden mit sich bringt und dadurch immer wieder Compliance- Probleme den Therapieerfolg gefährden können, ist es umso wichtiger, prognostische Faktoren zu identifizieren, die vor einer Über- oder Untertherapie schützen können. Bevor Patienten einer jahrelangen Korsetttherapie mit wenig Aussicht auf einen Therapieerfolg zugeführt werden, könnte so schneller die Indikation zur operativen Versorgung gestellt werden. Außerdem sollen die Prognosefaktoren helfen, die uneinheitlichen nationalen und internationalen Behandlungsstrategien zu bewerten und gegebenenfalls die Identifizierung von Untergruppen mit Korsettoptimierungspotential ermöglichen. Aus vorangegangenen Studien ist bereits bekannt, dass das Alter, die Compliance und auch morphologische Kriterien, wie das Ausmaß und die Flexibilität der Kurve, das Risser- Stadium und der Grad der Rotation den Therapieerfolg beeinflussen (Soucacos et al. 1998, Noshchenko et al. 2015, Zhang et al. 2015). Daneben gibt es allerdings auch einige Parameter, deren Einfluss noch nicht untersucht wurde. Vor allem bei Doppelkrümmungen oder lumbalen Lotabweichungen bzw. speziellen Krümmungsformen fehlen prognostische Faktoren. Daher war es Ziel der Arbeit, zu analysieren inwiefern der (m)Lenke- Haupttyp, die Anzahl der Krümmungen und die Teillängen der Haupt- und Nebenkrümmungen das Behandlungsergebnis beeinflussen.

2.1 Arbeitshypothesen

Die vorliegende Arbeit soll es ermöglichen folgenden Hypothesen zu beantworten:

1. Die Erfolgsrate der rigiden konservativen Behandlung hängt von den unterschiedlichen (m)Lenke- Haupttypen ab
2. Die Erfolgsrate ist abhängig von morphologischen Kurvenkriterien:
 1. Krümmungsausmaß im und außerhalb des Korsetts
 2. Lumbar Spine Modifier
 3. Länge der (oberen und unteren Teil-)Krümmungen
 4. Rotation des Scheitelwirbels im und außerhalb des Korsetts
 5. Veränderung des Cobb-Winkels und apikalen Rotationsgrades von Haupt- und Nebenkrümmung durch das Korsett

3 Patienten und Methodik

3.1 Studiendesign

Ein- und Ausschlusskriterien

Für diese retrospektive Studie wurden die Röntgenaufnahmen von Patienten mit Einzel- und Doppelkrümmungen im Rahmen einer adoleszenten idiopathischen Skoliose, welche im Zeitraum von 2012 bis 2017 in unserer orthopädischen Universitätsabteilung in Eisenberg klinisch vorstellig wurden, ausgewertet. Alle in die Studie einbezogenen Patienten waren über 10 Jahre alt, zeigten ein Risser-Stadium 0-2 und wurden gemäß den SOSORT-SRS-Konsensempfehlungen von 2014 (Alter > 10 Jahre, Risser 0-2, Cobb-Winkel 20-40 Grad) (Negrini et al. 2015) mit einem Chêneau-Korsett und additiver physiotherapeutischer Begleitung nach Schroth behandelt. Es fanden regelmäßige Konsultationen während des Therapieverlaufs bis 6 Monate nach Beendigung der Therapie statt. Beendet wurde die Therapie bei Behandlungserfolg (Hauptkurve <45 Grad nach 6- monatiger Nachbeobachtung nach Korsettentwöhnung), einer Knochenreife nach Risser ≥ 4 oder bei Feststellung einer Operationsindikation. Die Behandlung (einschließlich der 6 Monate nach Beginn der Entwöhnung) musste vor Studien- Aufnahme abgeschlossen sein. Weitere Einschlusskriterien waren die Dokumentation der Compliance und das Vorhandensein von Gesamt- Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule anterior-posterior (einschließlich Bilder der seitlichen Biegung) nach der Anpassung der Orthese und nach Abschluss der Behandlung (bei chirurgischer Behandlung vor der Operation).

Zu Behandlungsbeginn musste eine Krümmung ≥ 20 Grad und <50 Grad vorliegen (Erweiterung der Einschlusskriterien im Vergleich zum SOSORT-SRS-Konsens aufgrund des rigiden Behandlungsansatzes). Patienten mit sekundärer oder kongenitaler Skoliose sowie Patienten mit doppel-thorakalen und dreifachen Krümmungen wurden ausgeschlossen. Darüber hinaus wurden Patienten mit unvollständigen Daten oder Patienten, die während der Behandlung verloren gingen (Selbstentwöhnung / Beendigung der Therapie), nicht in die Studie aufgenommen.

Für die Studie liegt ein positives Votum der Ethikkommission der Friedrich-Schiller-Universität Jena vor.

Gruppen

Wie in vorangegangenen Studien bereits vorgeschlagen (Thompson et al. 2017) wurde bei der vorliegenden Arbeit in die Gruppen „Versager“ (Kurvenprogression auf ≥ 45 Grad oder erforderliche Operation während oder nach der Behandlung / Entwöhnung bis zum Zeitpunkt der Datenerfassung) und „Erfolg“ eingeteilt.

Therapeutisches Procedere

Das Procedere bei Patienten mit adoleszenter idiopathischer Skoliose lässt sich am Waldkrankenhaus Rudolf Elle wie folgt beschreiben: Patienten mit leichten Skoliosen (Cobb- Winkel $< 20^\circ$) werden in engmaschigen Intervallen klinisch untersucht und werden physiotherapeutisch begleitet, um einer Progression vorzubeugen. Alle Patienten mit moderaten Skoliosen (Cobb- Winkel $> 20^\circ$) werden mit einem Chéneau-Korsett aus der eigenen orthopädischen Werkstatt versorgt. Über die Scan-Software M4D Soft (Rodin GmbH, Gerstetten-Heldenfingen, Deutschland) werden die Patienten dreidimensional gescannt, der Scan mit den Röntgenbildern gematcht und mittels der Modellierungs- bzw. Bearbeitungssoftware Rodin4D (Rodin GmbH) ein virtuelles Korsett-Modell erstellt. Hierauf basierend erfolgte der Korsettbau mit nachfolgender Anpassung. Um die Umsetzung der ärztlichen Verordnung einer Orthese nachvollziehen zu können, wurden mir in der technischen Orthopädie Einblicke gewährt. Diese habe ich, mit Genehmigung der Patientin, als Fotodokumentation festgehalten. Zu Beginn werden die Patienten mithilfe eines 3D-Körperscanners vermessen (Abb. 9 und 10) und sämtliche Daten an ein Auswertungsprogramm übermittelt. Dieses addiert die Daten aus einer Röntgenaufnahme der Wirbelsäule hinzu und sendet diese an eine CNC (Computerized Numerical Control) - Fräse. Mit dieser wird ein Modell aus einem Hartschaum hergestellt, welches als Grundlage zur Modellierung des Korsetts dient (Abb. 11). Das Korsett besteht aus einem Polypropylen, der entlang des Hartschaum-Modelles abgeformt wird. Je nach Wunsch der Patienten kann auf den weißen Kunststoff ein Design-Papier aufgebracht werden (Abb. 12).

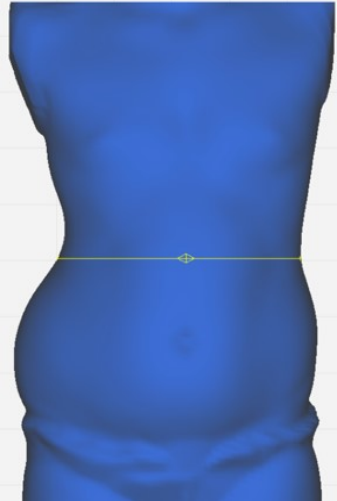


Abb. 9: 3D-Scan ventral

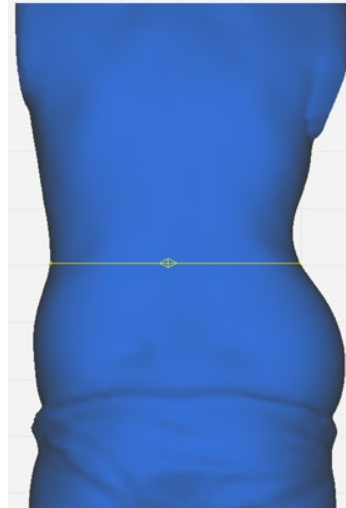


Abb. 10: 3D-Scan dorsal



Abb. 11: Modell aus Hartschaum



Abb. 12: Abformung des Korsetts

Nach Fertigstellung des Grundkörpers der Orthese wird der Patient zur Korsett-Anpassung bestellt. Bei dieser wird u.a. auf Passgenauigkeit, Aufrichtung des Patienten, Tragegefühl oder etwaige Druckstellen geachtet und ggf. Korrekturen vorgenommen (Abb. 13 und 14).



Abb. 13: Kürzung nach erster Trageprobe



Abb. 14: Abfeilen des Grades

Sind alle Korrekturen durchgeführt, wird das Korsett nochmals probiert und Fotoaufnahmen vor einem Raster aufgenommen. Diese Bilder werden genutzt, um später den Korrektoreffekt und die Passgenauigkeit des Korsetts anhand der Wirbelsäulenaufnahmen mithilfe eines Programmes zu bestimmen (Abb. 15 und 16).



Abb. 15: Tragebild von ventral



Abb. 16: Tragebild von dorsal

Nach ca. vier- bis sechswöchiger Tragezeit erfolgte die Röntgenkontrolle mit ärztlicher Abnahme sowie eine Nachkontrolle vom Techniker. Alle drei Monate erfolgen Kontrolltermine, abwechselnd beim Arzt und Techniker. In der Skoliose-Sprechstunde wurden die Patienten durch eine körperliche Untersuchung sowie mithilfe von Röntgendiagnostik (a.-p.- Wirbelsäulenganzaufnahme) reevaluiert. Während der

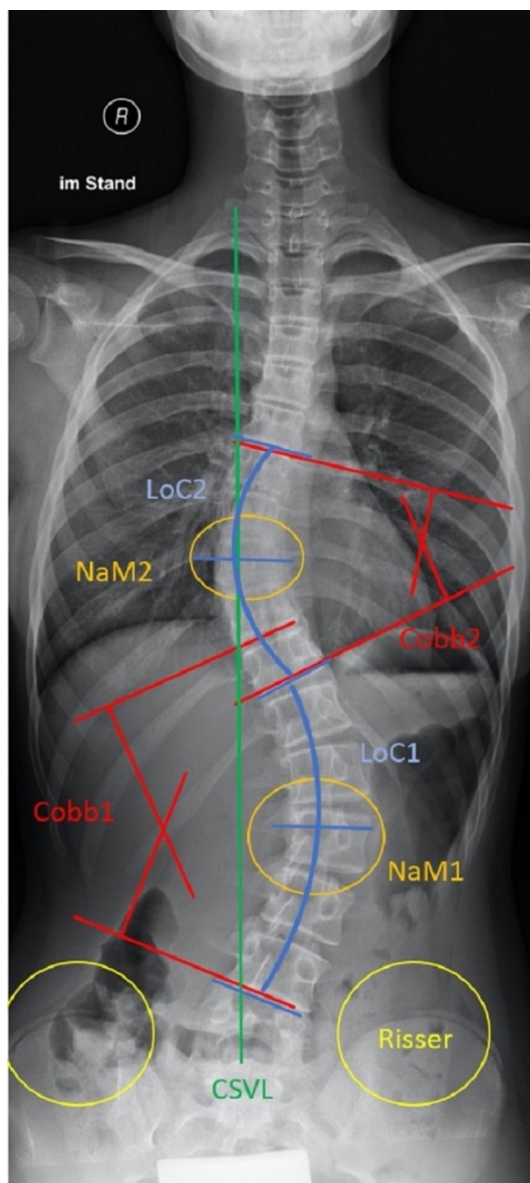
gesamten Therapie wurde kontinuierlich Krankengymnastik nach Katharina Schroth verordnet und einmal pro Woche mit einem speziell ausgebildetem Physiotherapeuten durchgeführt. Falls notwendig wurde bei starkem Wachstum ein neues Korsett nach obigem Herstellungsprozess angefertigt. Die Behandlung endete und die Entwöhnung begann mit der Knochenreife (Risser ≥ 4) oder bei Erreichen einer Operationsindikation. Während des Absetzens wurden die Patienten gebeten, die Korsett- Tragezeit um 30 Minuten pro Tag zu reduzieren, während die PSE noch 6 Monate nach der Behandlung durchgeführt wurde.

3.2 Datenerhebung

Radiographische Messungen

Die Bildauswertung wurde digital auf Basis von im PACS (Picture Archiving and Communication System, Fa. AGFA Digitalsysteme GmbH) gespeicherten Röntgenaufnahmen, mithilfe des Programmes Surgimap® (2019 Nemaris, Inc.), analysiert. Die Aufnahme des stehenden Patienten im anterior-posterior Strahlengang wurde verwendet, um die Skoliose auf Basis einer modifizierten Lenke-Klassifikation ((m)Lenke) in die Haupttypen 1, 3, 5 und 6 (1 - thorakale Einzelkrümmung, 3 - major thorakale Doppelkrümmung, 5 - lumbale Einzelkrümmung, 6 - major lumbale Doppelkrümmung) einzuteilen. Die Differenzierung zwischen strukturellen und Ausgleichskrümmungen wurde anhand der Flexibilität der Krümmungen in den Bending-Aufnahmen vorgenommen. Aufgrund geringeren Krümmungswinkel als zum Zeitpunkt einer OP-Indikationsstellung diente, anders als in der Lenke-Klassifikation, eine Restkrümmung von 10° oder mehr als Entscheidungskriterium für das Bestehen einer strukturellen Krümmung. Um einen möglichen Therapieerfolg festzustellen, wurden für alle strukturellen Krümmungen (Nash et al. 1969) die Cobb-Winkel vor Therapiebeginn und nach Therapieabschluss sowie das Ausmaß der Rotation, nach dem Schema von Nash und Moe, gemessen. In Fällen mit zwei strukturellen Krümmungen wurden beide separat gemessen und entsprechend ausgewertet (Cobb1, Cobb2, NaM1, NaM2). Der größere von beiden Winkeln wurde mit Cobb1 benannt. Die Röntgenaufnahme nach Anpassung der Orthese wurde verwendet, um die Aufrichtung der Wirbelsäule im Korsett bewerten zu können. Die knöcherne Reife wurde anhand der abgebildeten Beckenkammaphyse (Einteilung in Risser-Stadien)

(Hacquebord et al. 2012) beurteilt. Zusätzlich wurde aus den Bildern vor Therapiebeginn der Hauptkrümmungstyp (Einzelkurven: (m)Lenke 1 und 5, Doppelkurven: (m)Lenke 3 und 6) und der lumbar spine modifier (LSM A/B/C) basierend auf der (m)Lenke-Klassifikation (Lenke et al. 2001, Thompson et al. 2017) festgelegt. Außerdem wurde die Länge von Haupt- und Nebenkrümmung nach beteiligter Segmentzahl (LoC1 bzw. LoC2), die Länge der oberen (LoC1_{obere}/ LoC2_{obere}) und der unteren (LoC1_{untere}/ LoC2_{untere}) Teilkrümmung (Zahl der Segmente ober- oder unterhalb des Scheitelwirbels) für die major and minor Kurven ausgewertet.



Cobb1 - Cobb- Winkel der größeren Krümmung
Cobb2 - Cobb- Winkel der kleineren Krümmung

LoC1 - Länge der größeren Teilkrümmung
LoC2 - Länge der kleineren Teilkrümmung

NaM1 - Rotation des größeren Scheitelwirbels
NaM2 - Rotation des kleineren Scheitelwirbels

CSVL - central sacral vertical line, Lot

Risser - Beurteilung der Knochenreife anhand der Ossifikation der Beckenkammaphyse

Abb. 17: Radiographische Messungen

Die Rotation des Scheitelwirbels (nach Nash und Moe), der Lumbar Spine Modifier, die Länge der Krümmung (Länge der oberen und unteren Teilkrümmung sowie der Hautkrümmungstyp nach Lenke, sind unseren Hypothesen nach, prognostisch relevante Messgrößen und wurden daher in jedem Röntgenbild der Studienteilnehmer ausgewertet (Abb. 17).

Klinische Daten

Die Erhebung der patientenbezogenen Daten, wie Alter, Alter bei Therapiebeginn und Geschlecht, erfolgte aus den stationären Akten, mithilfe des Programms PACS. Daneben wurde die von den Patienten berichtete und zu den Nachkontrollen standardisiert abgefragte Compliance (Tragedauer in Stunden/Tag) erfasst und individuell gemittelt. Ebenso wurde die Behandlungsdauer bis zum Abtrainieren des Korsetts dokumentiert. Die für die Studie relevanten Daten sowie die radiographischen Messdaten wurden mit Microsoft Excel 2016 erfasst und bearbeitet.

Datenanalyse

Beide Gruppen (Erfolg vs. Versager) wurden hinsichtlich der voran genannten radiographischen und klinischen Parameter verglichen. Zusätzlich wurde die Primärkorrektur durch das Korsett bestimmt = Vergleich der Änderung der Cobb-Winkel ($\Delta\text{Cobb1}/\Delta\text{Cobb2}$) und die der Scheitelrotationsgrade ($\Delta\text{NaM1}/\Delta\text{NaM2}$) zwischen Erstbefund und Erstversorgungsbild. Außerdem wurde die Kurvenflexibilität bewertet, indem die Änderung der Cobb-Winkel zwischen der a.p.- Aufnahme und der Bending-Aufnahme zur konvexen Seite der Krümmung erfasst wurde ($\Delta\text{Cobb1bend}/\Delta\text{Cobb2bend}$) und zwischen der Gruppe der Versager und der Gruppe des Erfolges verglichen.

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte softwaregestützt entsprechend einer statistischen Beratung mittels SPSS V24 (IBM, Armonk, USA). Sämtliche kontinuierlichen Variablen wurden bei Normalverteilung mittels 2-seitigem Student's T-Test, oder mittels Mann-Whitney-U-Test verglichen. Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte mittels Kolmogorov-Smirnov-Test. Nominale Daten wurden mittels Fisher's Exact Test analysiert. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0.05$. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0.05$ eingestellt. Signifikant getestete Parameter in univariaten Tests dienten als

Kovariaten für eine binär-logistische Regressionsanalyse (BLR) hinsichtlich des Behandlungserfolgs (Wahrscheinlichkeit für schrittweisen Einschluss 0.05, Ausschluss 0.1, Vorwärtsauswahl-Wahrscheinlichkeitsverhältnis). Darüber hinaus wurde für Cobb1 und Cobb2 mit und ohne Korsett eine ROC-Analyse (receiver operating characteristic) durchgeführt, um einen Grenzwert für die Vorhersage des Behandlungsversagens zu ermitteln. Für diese Grenzwerte wurden sofern möglich die zugehörigen Odds Ratios (OR) für beide Parameter und beide Bedingungen berechnet.

4 Ergebnisse

4.1 Klinische Ergebnisse

Von 266 untersuchten Patienten, die im genannten Zeitraum mit einem Korsett behandelt wurden, erfüllten 127 alle Ein- und Ausschlusskriterien und konnten somit analysiert werden (Abb. 18).

Die Patienten waren zu Beginn der Therapie im Mittel 13,1 (95% Konfidenzintervall (CI) 12,8-13,4) Jahre alt. Die Behandlung dauerte im Mittel 2,4 Jahre (95%CI 1,97-2,30). 110 Patienten waren weiblich, 17 männlich.

Von den Patienten hatten 104 eine Einzel- und 23 eine Doppelkrümmung, wobei die Verteilung auf die (m)Lenke-Haupttypen sich wie folgt darstellte: Typ 1 - 46 Patienten, Typ 3 - 10 Patienten, Typ 5 - 58 Patienten, Typ 6 - 13 Patienten.

Von den 127 Patienten mussten 18 der Gruppe „Versager“ zugeordnet werden. Dies entspricht einer Versagensrate von 14,1%. Eine Übersicht der demographischen Daten inklusive Gruppenvergleich findet sich in Tabelle 5.

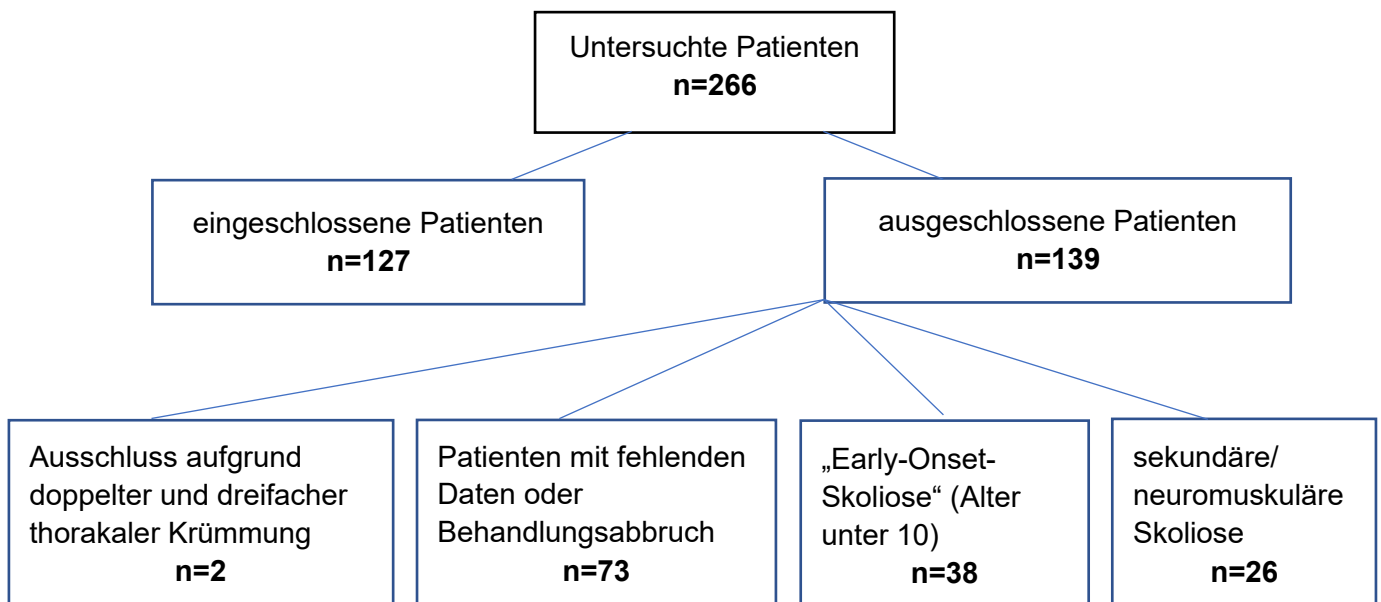


Abb. 18: Flussdiagramm der Ein- und Ausschlusskriterien

Tabelle 5: Überblick über die demographischen Daten und Gruppenvergleich

Parameter		Gruppe „Versager“ n=18	Gruppe „Erfolg“ n=109	p-Wert	Insgesamt n=127
Geschlecht (w/m)	Verhältnis	14 / 4	96 / 13	0,262#	110 / 17
Alter bei Behandlungsbeginn (Jahre)	Mittelwert (min-max)	12,5 (10-16)	13,2 (10-16)	0,107*	13,1 (10-16)
	Median	12	13		13
	IR	11-14	12-14		12-14
	95% CI	11,7-13,3	12,9-13,5		12,8-13,4
Behandlungsdauer (Jahre)	Mittelwert (min-max)	2,6 (1,5-4,5)	2,1 (1-4)	0,189*	2,1 (1-4,5)
	Median	2	2		2
	IR	2-3	1,5-2,5		1,5-2,5
	95% CI	1,9-3,2	1,9-2,2		2,0-2,3
Compliance (mittlere tägl. Tragedauer in h)	Mittelwert (min-max)	15,8 (9-23)	15,2 (8-23)	0,567*	15,2 (8-23)
	Median	15,5	15		15
	IR	13-19	13-17		13-17
	95% CI	13,9-17,6	14,6-15,8		14,6-15,7

p-Wert berechnet mit „Fisher's exact test“

w - weiblich; m - männlich; SD - einfache Standardabweichung;

* p-Werte berechnet mit „Mann-Whitney-U test“

IR - Interquartilabstand; CI - Konfidenzintervall

4.2 Radiographische Ergebnisse

Alle Zahlenwerte der radiographischen Ergebnisse kommen in der Tabelle 7 (siehe unten) zur Darstellung. Während es keinen Unterschied ($p=0,095$) in der Häufigkeit von Einzel- und Doppelkrümmungen zwischen den Gruppen gab, hatte der (m)Lenke-Haupttyp einen signifikanten Einfluss auf die Versagensrate (Fisher's exact Test $p=0,008$, BLR siehe Tabelle 6 und Abb. 19). Die Abbildung 19 visualisiert die Verteilung der Patienten auf die unterschiedlichen (m)Lenke-Haupttypen. Sowohl der (m)Lenke Typ 1, als auch Typ 6 wiesen eine höhere Versagensrate auf.

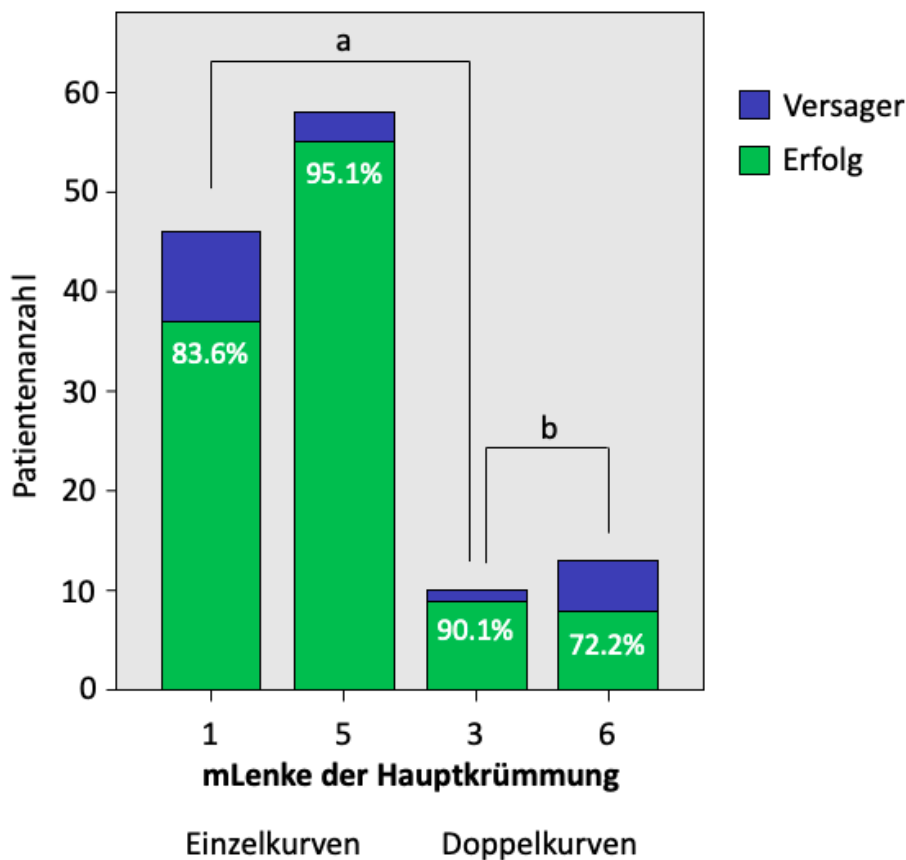


Abb. 19: Verteilung auf die (m)Lenke- Haupttypen.

Im Diagramm kommen auf der linken Seite die Einzelkrümmungen (Typ 1 - major thorakal und Typ 5 - major lumbal) und auf der rechten Seite die Doppelkrümmungen (Typ 3 - major thorakal und Typ 6 - major lumbal) zur Darstellung. Grüne Säulen stehen für Therapieerfolg, die blauen für Therapieversagen. Die Erfolgsrate wird für die jeweiligen Krümmungstypen in Prozent angegeben. Im Fisher's exact test zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Erfolgsrate zwischen den mLenke Typen der Hauptkrümmung ($p=0,008$). (a) $p=0,043$ und (b) $p=0,017$ geben die Signifikanz zwischen den Hauptkurventypen in der binären logistischen Regression (Tabelle 6) an.

Tabelle 6: Daten der binären logistischen Regression

Parameter		Regressions- Koeffizient	Wald-Test	Odds Ratio	p-Wert
Major Kurve	Cobb Winkel im Korsett (Cobb1 Korsett)	-0,189	9,267	0,828	0,002
	Länge der Kurve über dem Apex (LoC_obere)	-2,340	8,007	0,096	0,005
	Länge der Kurve unter dem Apex (LoC_untere)	2,427	8,533	11,320	0,003
(m)Lenke- Haupttyp	(m)Lenke- Typ 1 vs. 3	-3,263	4,101	0,038	0,043
	(m)Lenke- Typ 5 vs. 3	-2,979	2,300	0,051	0,129
	(m)Lenke- Typ 6 vs. 3	-4,575	5,688	0,010	0,017
Minor Kurve*	Cobb Winkel im Korsett (Cobb2 Korsett)	-0,205	4,923	0,815	0,027

Daten der binären logistischen Regression, Chi-Quadrat=58,667, R-Quadrat (Nagelkerke)=0,663, Effektgröße nach Cohen $f=1,403$, $p<0,001$

*Daten von Patienten mit Doppelkurve ($n=23$), Chi-Quadrat=9,328, R-Quadrat (Nagelkerke)=0,488, Effektgröße nach Cohen $f=0,976$, $p=0,002$

Alle weiteren Parameter wurden in univariaten Analysen auf Signifikanz getestet und konnte in dieses Model nicht eingeschlossen werden / waren nicht signifikant

Die Unterschiede zwischen Erfolg und Versager waren bei Haupt- und Nebenkrümmung statistisch signifikant, sowohl vor der Behandlung als auch während der Korsetttherapie. Die Cobb-Winkel der Haupt- und Nebenkrümmungen waren vor und während der Korsettbehandlung bei Therapieversagern größer als bei Patienten mit erfolgreicher konservativer Therapie ($p_{\text{Cobb1prä}}=0,001$; $p_{\text{Cobb2prä}}=0,015$; $p_{\text{Cobb1Korsett}}<0,001$; $p_{\text{Cobb2Korsett}}=0,002$). Die Ergebnisse finden sich in den Abbildungen 20a und 20b wieder. Zwischen den Gruppen zeigte sich hinsichtlich der absoluten Primärkorrektur kein signifikanter Unterschied der Cobb-Winkel von Haupt- und Nebenkurven jedoch bezüglich der relativen Primärkorrektur ($p_{\text{deltaCobb1}[\text{°}]}=0,319$; $p_{\text{deltaCobb2}[\text{°}]}=0,063$; $p_{\text{deltaCobb1}[\%]}=0,008$; $p_{\text{deltaCobb2}[\%]}=0,034$).

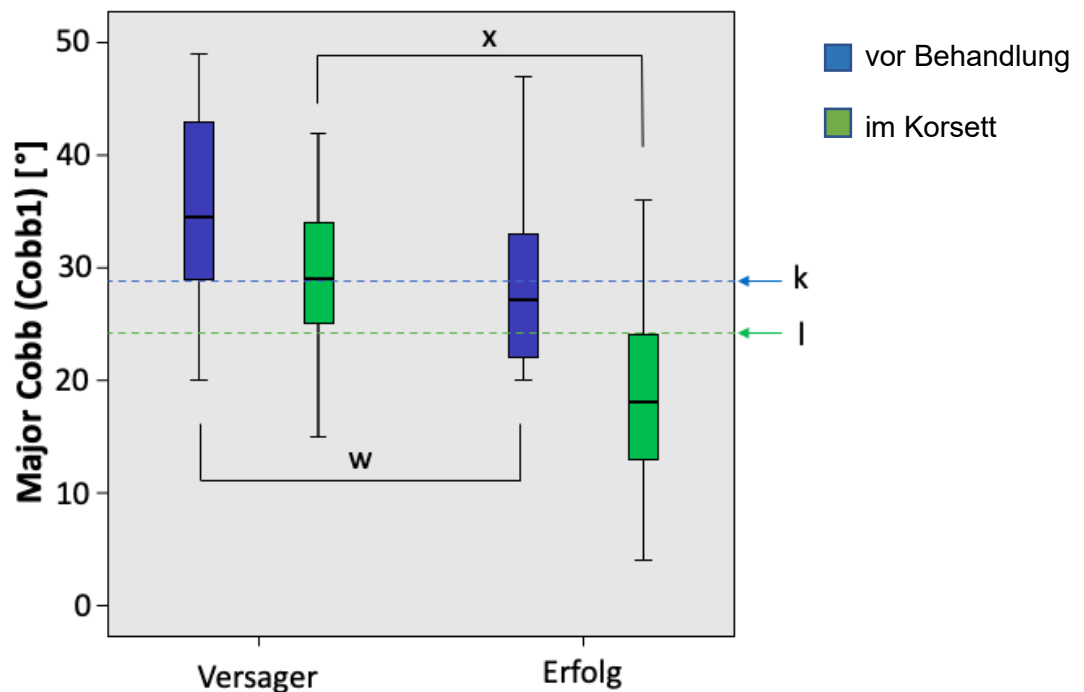


Abb. 20a: Vergleich der Hauptkrümmung der Gruppen

Abbildung 20a und 20b zeigen die Cobb- Winkel vor Behandlung (blau) und die unter Korsetttherapie (grün) der major (19a Cobb1, n=127) und minor (19b Cobb2, n=23) Kurven in Bezug auf den Behandlungserfolg. Die gepunkteten Linien veranschaulichen die durch ROC-Analyse (Abb. 21a/b) ermittelten Grenzwerte (k: $\text{Cobb1}_{\text{vor Behandlung}}=28,5^\circ$, Sensitivität 83,3%, Spezifität 58,7%; l: $\text{Cobb1}_{\text{im Korsett}}=24,5^\circ$, Sensitivität 77,8%, Spezifität 77,1%; m: $\text{Cobb2}_{\text{vor Behandlung}}=35,5^\circ$, Sensitivität 66,7%, Spezifität 100%; n: $\text{Cobb2}_{\text{im Korsett}}=32^\circ$, Sensitivität 66,7%, Spezifität 100%), welche als Schwellenwert interpretiert werden können. Wenn der Cobb-Winkel über diesem Schwellenwert liegt, ist ein Therapieversagen wahrscheinlicher (a: blaue Linie (k) - Odds Ratio $[\text{OR}]_{\text{Cobb1 vor Behandlung}}=7,1$, grüne Linie (l) - $\text{OR}_{\text{Cobb1 im Korsett}}=11,8$; für Cobb2 konnten keine OR berechnet werden).

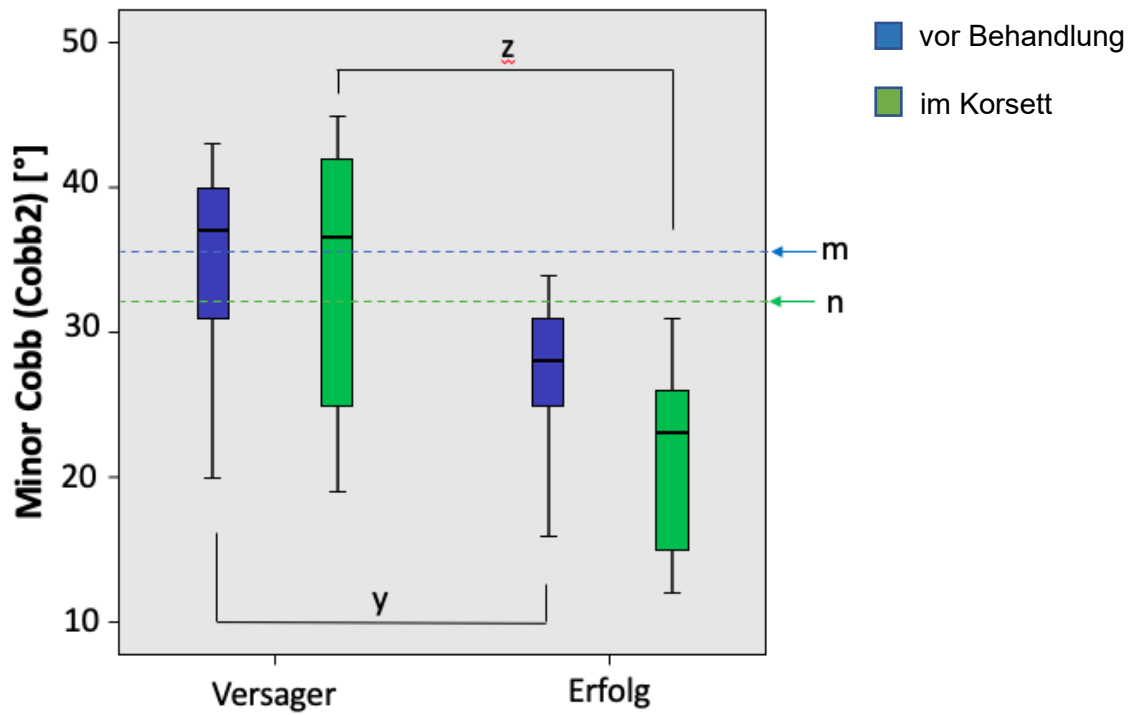


Abb. 20b: Vergleich der Nebenkrümmung der Gruppen

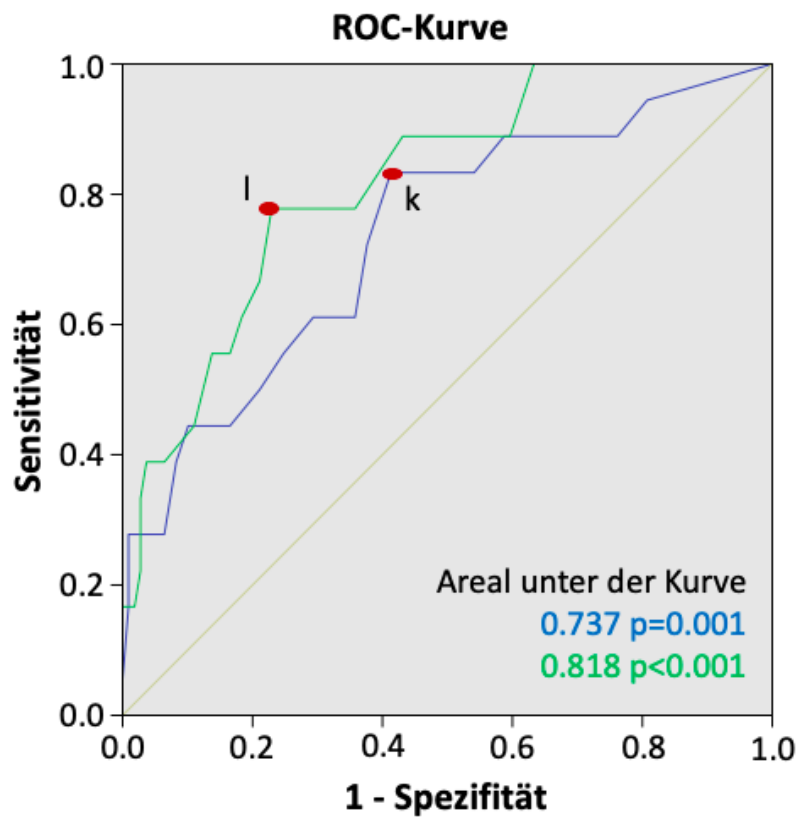


Abbildung 21a: ROC-Kurve der Cobb-Winkel der Hauptkrümmung

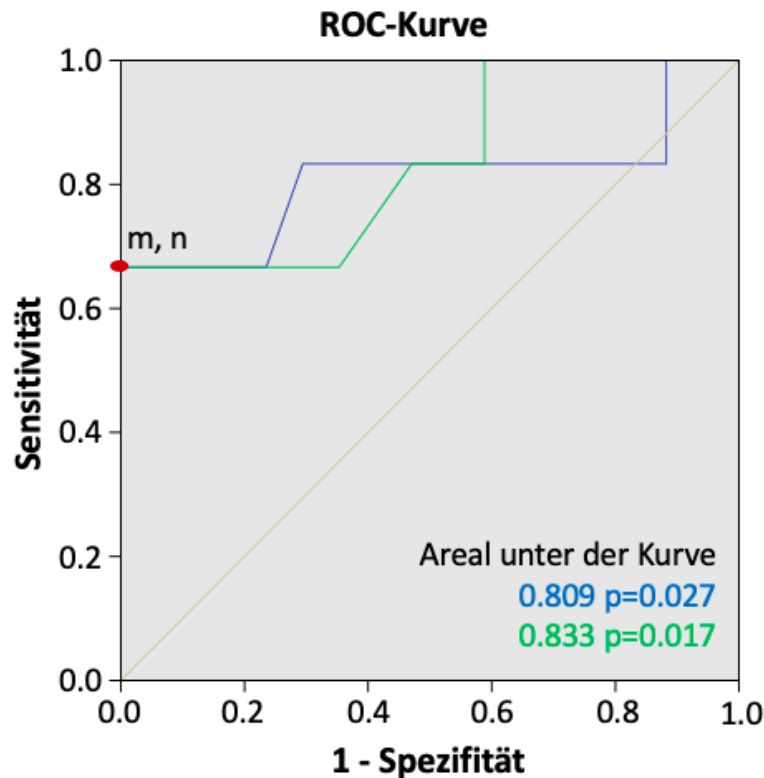


Abbildung 21b: ROC-Kurve der Nebenkrümmung

ROC-Analyse der Cobb-Winkel (a) Cobb1 und (b) Cobb2. Basierend auf der Analyse lassen sich die Punkte k und m (vor Behandlung) und l und n (im Korsett), die als Grenzwert für ein gesteigertes Versagensrisiko genutzt werden können ermitteln. (Abb. 20a und b).

In der univariaten Analyse zeigte sich im Gegensatz zur Regressionsanalyse ein signifikanter Einfluss des apikalen Rotationsgrades der Hauptkrümmung vor und unter Therapie auf den Therapieerfolg ($p_{\text{NaM1prä}}=0,007$; $p_{\text{NaM1Korsett}}<0,001$). Dabei führten höhere Rotationsgrade zu einer höheren Versagensrate.

Der Rotationsgrad der Nebenkrümmung (NaM2) und die Primärkorrektur der Rotation im Korsett zeigten keinen Einfluss ($p_{\text{NaM2prä}}=0,124$; $p_{\text{NaM2Korsett}}=1,000$, $p_{\text{deltaNaM1}}=0,479$; $p_{\text{deltaNaM2}}=0,309$). Auch der Lumbar spine modifier (LSM $p=0,155$) und die Gesamtlänge der Haupt- (LoC1 $p=0,509$) und Nebenkrümmungen (LoC2 $p=0,664$) waren nicht unterschiedlich zwischen den Gruppen.

Dagegen fanden sich bei den erfolgreich Therapierten signifikant kürzere obere ($p<0,001$) und längere untere ($p=0,002$) Teilkrümmungen in der Hauptkurve (Abb. 22). Dieses Ergebnis zeigte sich ebenso in der BLR (obere Krümmung: $p=0,005$, untere Krümmung: $p=0,003$). Bei den Nebenkrümmungen ergab sich in der BLR kein signifikantes Ergebnis ($p_{\text{LoC2_obere}}=0,533$; $p_{\text{LoC2_untere}}=0,334$).

Das Risser Stadium war nicht unterschiedlich zwischen den Gruppen ($p=0,355$).

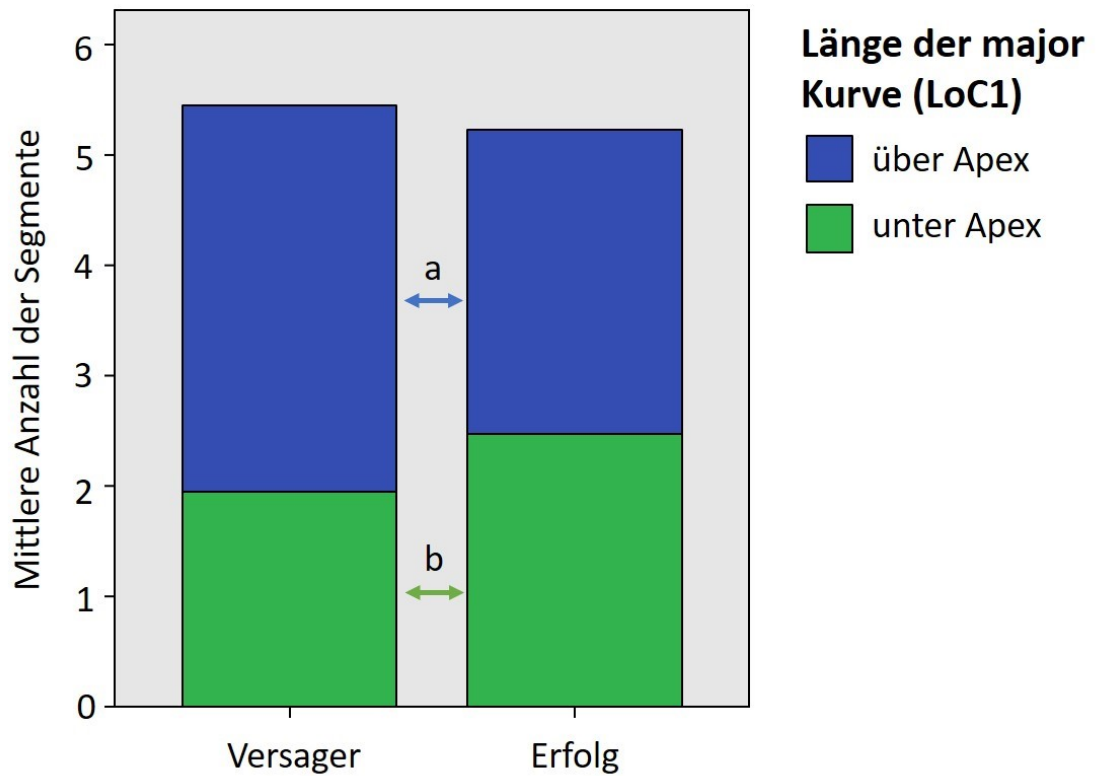


Abbildung 22: Länge der Hauptkrümmung

Das Diagramm bildet den Zusammenhang zwischen Erfolg und Misserfolg in Bezug auf die mittlere Anzahl der beteiligten Segmente in oberen und unteren Hauptkurven ab. Dabei stellt der blaue Anteil die Länge über dem Apex, der grüne Anteil die Länge unter dem Apex dar. In der Fehlergruppe war die mittlere Anzahl von Segmenten über dem Scheitelpunkt größer (a, $p=0.005$) und die mittlere Anzahl von Segmenten unter dem Scheitelpunkt niedriger (b, $p=0.003$), was den Scheitelpunkt der Hauptkurven nach unten verschob und in asymmetrischeren Kurven resultierte.

Tabelle 7: Überblick der radiographischen Daten mit Gruppenvergleich

Parameter			Versager	Erfolg	p-Wert	Insgesamt
Major Cobb Winkel [°] (Cobb1) n=127	vor Behandlung	Median (IR)	34,5 (29-43,5)	27 (22-33,5)	0,001*	28 (22-35)
	im Korsett	Median (IR)	29 (23,8-34,3)	18 (13-24)	<0,001*	19 (13-26)
	ΔCobb1	Median (IR)	7.5 (1,5-13,3)	9 (5,5-13,5)	0,319*	9 (5-13)
Minor Cobb Winkel [°] (Cobb2) n=23	vor Behandlung	Mittelwert (SD)	34,7 (8,2)	26,8 (5,5)	0,015‡	28,9 (7)
	im Korsett	Mittelwert (SD)	34 (10,3)	21,4 (6,5)	0,002‡	24,7 (9,3)
	ΔCobb2	Mittelwert (SD)	0,7 (6,2)	5,4 (4,7)	0,063‡	4,2 (5,4)
Einzel- vs. Doppelkrümmungen		Einzelkrümmungen	12	92		104
		Doppelkrümmungen	6	17	0,095#	23
Grad der apikalen Rotation der major Kurve (NaM1)	vor Behandlung	Grad 0	0	1		1
		Grad 1	3	61		64
		Grad 2	14	45		59
		Grad 3	1	2	0,007#	3
	im Korsett	Grad 0	1	16		17
		Grad 1	3	65		68
		Grad2	14	28	<0,001#	42
	Änderung Korsett	+1 Grad	0	4		4
		keine Änderung	15	68		83
		-1 Grad	3	34		37
-2 Grad		0	3	0,479#	3	
Grad der apikalen Rotation der minor Kurve (NaM2)	vor Behandlung	Grad 1	6	10		16
		Grad 2	0	7	0,124#	7
	im Korsett	Grad 1	5	12		17
		Grad 2	1	5	1,000#	6
	Änderung Korsett	+1 Grad	1	0		4
		keine Änderung	5	15		83
	-1 Grad	0	2	0,309#	37	

Parameter			Versager	Erfolg	p-Wert	Insgesamt
Risser Stadium (initial)		Stadium 0	7	28		35
		Stadium 1	2	27		29
		Stadium 2	9	54	0,355#	63
Länge der major Kurve (LoC1) [Segmente]	insgesamt	Median (IR)	5 (5-6)	5 (4-6)	0,509*	5 (4-6)
	über Apex	Median (IR)	3 (3-4)	3 (2-3)	<0,001*	3 (2-3)
	unter Apex	Median (IR)	2 (2-2)	2 (2-3)	0,002*	2 (2-3)
Länge der minor Kurve (LoC2) [Segmente]	insgesamt	Median (IR)	4,5 (4-6)	5 (4-5,5)	0,664*	5 (4-6)
	über Apex	Median (IR)	2,5 (2-3)	3 (2-3)	0,621*	3 (2-3)
	unter Apex	Median (IR)	2 (2-3)	2 (2-3)	1,000*	2 (2-3)
Lumbar spine modifier		A	8	34		42
		B	1	28		29
		C	9	47	0,155#	56

p-Wert berechnet mit Fisher's Exact Test

* p-Werte berechnet mit Mann-Whitney-U Test

‡ p-Werte berechnet mit 2-seitigem Student's T-test

w - weiblich; m - männlich

SD – einfache Standardabweichung; IR – Interquartilabstand (engl. interquartile range)

5 Diskussion

5.1 Einfluss morphologischer Parameter auf den Behandlungserfolg

Das Ziel der Arbeit bestand darin, herauszuarbeiten, welche morphologischen Kriterien mit dem Versagen einer rigiden konservativen Therapie der idiopathischen Skoliose (Korsettversorgung in Ergänzung mit Physiotherapie nach Schroth) assoziiert sind. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Erfolgsraten der Behandlung bei Einzel- und Doppelkrümmungen abhängig vom Hauptkurventyp nach (m)Lenke sind. Zusätzlich wiesen Patienten, deren Therapie nicht erfolgreich war größere Cobb-Winkel und höhere apikale Rotationsgrade vor und unter Therapie sowie längere obere und kürzere untere Teilkrümmungen auf. Der Lumbar Spine Modifier und die Veränderung des Cobb-Winkels und des Rotationsgrades unter Therapie (DeltaCobb, DeltaNaM) zeigten keinen Unterschied zwischen Erfolg und Nicht-Erfolg der konservativen Behandlung.

5.2 Einfluss des Krümmungstyps auf den Behandlungserfolg

Der (m)Lenke Typ 5 (lumbale Kurve) zeigte innerhalb der Einzelkrümmungen einen größeren Therapieerfolg als der Typ 1 (thorakal Kurve) nach Lenke. Somit ergibt sich, dass lumbale Einzelkrümmungen besser mit der Behandlung zu beeinflussen sind als thorakale. Während weder Sanders et al. 2007, noch Sitoula et al. 2015 in Ihren Arbeiten einen Zusammenhang zwischen dem Kurventyp und der Effektivität der Korsetttherapie feststellen konnten, zeigte sich in der Studie von Thompson und Kollegen 2017 ebenso, dass hauptsächlich lumbale Krümmungen einen besseren Therapieerfolg nach sich ziehen (Sanders et al. 2007, Sitoula et al. 2015).

Obwohl Thompson et al. ein ähnliches Studiendesign wählten, sind die Ergebnisse nicht direkt zu vergleichen. Die Erfolgsrate lag in deren Studie bei 95% für Patienten mit lumbalen Kurven, die ihr thorakolumbosakrales Korsett (TLSO) länger als 12,9 Stunden pro Tag trugen. Bei Patienten mit thorakaler Krümmung war es hingegen nur eine Erfolgsrate von 66% (Thompson et al. 2017). Allerdings muss dabei gesagt werden, dass Thompson et al. keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der einzelnen Haupttypen erarbeiten konnten, da sie in ihrer Studie eine andere Gruppeneinteilung vornahmen. Es wurden die Krümmungen in major thorakal (Typ 1,

2, 3) und major lumbal (Typ 5 und 6), ohne Rücksicht auf Einzel- oder Doppelkrümmung, eingeteilt. Im Gegensatz zu den vorherigen Studien konnten wir bei Doppelkrümmungen eine höhere Erfolgsrate für den Haupttyp 3 (major thorakal) im Vergleich zum Haupttyp 6 (major lumbal) aufzeigen. Dies bedeutet, dass das lumbale Segment bei Einzelkrümmungen bessere Aussichten auf Korrektur durch die Korsetttherapie hat, während bei Doppelkrümmungen die thorakalen Segmente besser adressiert werden. Ursächlich hierfür könnten die besseren Ansatzpunkte für ein Korsett zur Korrektur einer lumbalen Einzelkurve sein. So sind bei der Versorgung von thorakalen Einzelkurven verschiedene anatomische Gegebenheiten zu beachten. Aufgrund der oberen Extremitäten lässt sich beispielsweise die obere Pelotte des Korsetts schlechter positionieren. Zusätzlich muss in Erwägung gezogen werden, dass der knöcherne Thorax nicht ausreichend Freiheit für eine vollständige Redression ermöglicht. Bei Doppelkrümmungen hingegen wird häufig die Tatsache genutzt, dass zur passiven Korrektur der bestehenden lumbalen Kurve, eine aktive Gegensteuerung des Patienten im thorakalen Bereich hinzukommt. Somit wird lumbal hier deutlich überkorrigiert, wodurch final auch eine bessere aktive thorakale Korrektur erzielt werden kann. Zum Wachstumsende verhindert dann der korrigierte knöcherne Thorax den Rückfall in die Krümmung. Lumbal fehlt eine derartige „Haltestruktur“ und so lässt sich bei Doppelkrümmungen die bessere thorakale, als lumbale Korrektur erklären. Insgesamt war die Versagensrate in der vorliegenden Studie eher gering. Dies liegt möglicherweise an der rigiden Behandlungsstrategie. Auch im Vergleich zur Studie von Thompson et al. (Versagensrate von 29,8%) war, trotz des ähnlichen Studiendesigns, die Versagensrate von 14,1% in der vorliegenden Studie damit deutlich geringer. Erklären lässt sich diese Differenz durch 1) den Einschluss von Skoliosen ab 20°, statt 25°, 2) der höheren Patientencompliance von 15,3 Stunden gegenüber 12,9h, 3) der begleitenden physiotherapeutischen Übungen nach Schroth bei unseren Patienten, 4) dem unterschiedlichen Korsett-Typ (Chéneau- Korsett in unserer Studie gegenüber TLSO bei Thompson et al.) und 5) der geringeren Rate von Patienten mit Risser 0 in unserer Studie zu Behandlungsbeginn. Die Effekte muss man jedoch unterschiedlich bewerten. Von moderaten Kurven weiß man, dass 25- 75% der Kurven sich weiter verschlechtern können (Lonstein 1988, Negrini et al. 2008), diese große Spanne ergibt sich aus der aktuellen Datenlage und zeigt, wie unterschiedlich die Ergebnisse der einzelnen Studien doch sind.

5.2.1 Einfluss der Compliance auf das Ergebnis

Die Compliance hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Behandlungsergebnis (Katz et al. 2010). Die Compliance ist jedoch in der vorliegenden Arbeit mit im Mittel 15,2 Stunden Tragedauer als relativ hoch einzustufen oder zumindest als akzeptabel zu bezeichnen, auch wenn die Daten im Wesentlichen nur auf Angaben der Patienten beruhen, nicht auf Messdaten. Dennoch ist es wenig überraschend, dass die Patienten das Korsett nicht wie empfohlen 23 Stunden pro Tag trugen. Die kosmetischen Beeinträchtigungen in dieser vulnerablen Lebensphase beeinträchtigen die Compliance relevant. Im Vergleich der Erfolgsraten zwischen der Studie von Thompson et al. (12,9h Tragedauer pro Tag) und der hier dargestellten Arbeit kann man jedoch die Differenzen nicht wirklich auf den Complianceunterschied zurückführen, da Konieczny, Hieronymus, und Krauspe in ihrer Arbeit zeigen konnten, dass sich die Erfolgsraten zwischen zwölf- bis sechzehnständiger Tragedauer und einer Tragezeit von mehr als sechzehn Stunden nicht wesentlich unterscheiden (Konieczny et al. 2017).

5.2.2 Einfluss von Skoliose- spezifische Übungen (PSE)

Einerseits existieren zahlreiche kontrolliert randomisierte Studien, welche zeigen konnten, dass physiotherapeutische Skoliose- spezifische Übungen (PSE) einen positiven Einfluss auf die Verlangsamung der Kurvenprogression, das kosmetische Erscheinungsbild und die Lebensqualität haben (Weiss et al. 2006, Negrini et al. 2008, Negrini et al. 2019). Da der Einschluss der behandelten Patienten allerdings sehr heterogen, u.a. hinsichtlich Skelettreife, Krümmungsausmaß und Behandlungsstrategie war, bleibt andererseits bis heute unvollständig geklärt, ob und in welchem Ausmaß die krankengymnastische Begleitung erfolgen sollte und welchen zusätzlichen Nutzen diese im klinischen Setting bringt. Während in den USA die krankengymnastischen Übungen eine untergeordnete Rolle einnehmen, wird in Europa das Ziel verfolgt, frühzeitig mit der spezifischen Therapie zu beginnen. In Deutschland gibt es Richtlinien, welche die haltungskorrigierende Krankengymnastik nach Schroth bereits ab 20 Grad empfehlen (Seifert et al. 2016). Negrini et al. beschrieben, dass die spezifische haltungskorrigierende Krankengymnastik der Physiotherapie überlegen ist (Negrini et al. 2018). Auch Kwan et al. konnten 2017

herausarbeiten, dass Patienten, die additiv zur Korsettverordnung auch durch eine Schroth- Therapie begleitet wurden, ein besseres Outcome hinsichtlich einer Verhinderung der Kurvenprogression hatten als Patienten, die ausschließlich mittels Korsett und ohne Übungen behandelt wurden (Kwan et al. 2017). Generell kann gesagt werden, dass jede regelmäßige körperliche Betätigung durch die damit verbundene Muskelkräftigung und Aktivität einen positiven Einfluss auf den Verlauf der Skoliose haben kann (Negrini et al. 2019). Lange wurde auch der Zusammenhang zwischen Leistungssport und Skoliose diskutiert. Kenanidis und Mitarbeiter konnten zeigen, dass systematisches Training wahrscheinlich nicht mit der Entwicklung von adoleszenter idiopathischer Skoliose in Zusammenhang steht. Ist die Erkrankung diagnostiziert, spricht für einen beschwerdefreien Patienten nichts gegen eine aktive Teilnahme an sportlichen Aktivitäten, da diese den Grad der skoliotischen Hauptkurve nicht beeinflussen zu scheinen (Kenanidis et al. 2008).

5.2.3 Einfluss der Skelettreife nach Risser

Das zu Beginn höhere Risser-Stadium unserer Patienten wirkte sich sicherlich positiv auf die Therapieversagensrate aus, da somit das Wachstumspotential, welches zur Kurvenprogression führen kann, gemindert ist (Ovadia et al. 2012). Bereits in mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass eine nach Risser niedrige Skelettreife das Risiko auf Progression erhöht (Weinstein et al. 1983, Bunnell 1986). Ein Zusammenhang zwischen körperlicher Reife und Kurvenprogression, lässt sich bei weiblichen Patienten auch in Bezug auf die Menarche darstellen. Soucacos et al. veröffentlichen 1998 in ihrer Studie, dass Skoliosen, die bereits vor der Menarche diagnostiziert werden, ein fast doppelt so hohes Progressionsrisiko aufweisen, wie die Krümmungen, die erst nach der Menarche auftreten (Soucacos et al. 1998). Dabei sollte allerdings auch kritisch hinterfragt werden, ob das Erkrankungsalter dem Diagnosealter entspricht. Da bei der AIS häufig zunächst keine klinischen Symptome auftreten und die Patienten nur selten über körperliche Beeinträchtigungen klagen, handelt es sich meist um einen Zufallsbefund. Meist bemerken Angehörige der Patienten eine Rumpfdeformität und erst danach erfolgt die ärztliche Vorstellung mit eventueller Diagnosesicherung einer AIS. Zu welcher Zeit die Erkrankung entstanden ist, lässt sich allerdings nicht feststellen und somit ist die Abschätzung der Progression

mit dem Maß „Erkrankung vor Menarche“ oder „Erkrankung nach Menarche“ aus unserer Sicht eher als Richtwert zu sehen.

5.2.4 Einfluss der unterschiedlichen Korsetttypen

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlichster Korsette. Dabei gibt es derzeit nicht den einen überlegenen Typus, der sich gegen andere komplett durchgesetzt hat. Üblicherweise kommen heutzutage im Rahmen der Vollzeitversorgung mit rigiden Korsetten sogenannte semi-aktive Derotationsorthesen zum Einsatz, bei denen passiv Pelotten gegen konvexe Bereiche drücken. Durch den Pelottendruck wird der Patient zu einer aktiven Gegenrotation angehalten, während passiv der weiteren Progression der Krümmung Einhalt geboten wird. Gleichzeitig existiert im Korsett dreidimensional gegenüberliegend Raum, in den der Patient aktiv hineinatmen kann. In Studie von Thompson et al. kam beispielsweise ein TSLO-Korsett zum Einsatz. Sowohl die TSLO bei den Patienten von Thompson et al., als auch das Chéneau- Korsett unserer Patienten, wirken als solche semi-aktive Derotationsorthesen. Bei beiden werden die Pelotten in der Orthese so platziert, dass ihr Druck unterhalb des Apex der Kurve wirkt. Durch die Abstützung am Becken kann so der Rumpfrotation entgegengewirkt werden. Die TSLO adressiert dabei vor allem die lumbale Krümmung, während das Chéneau-Korsett auch thorakale Krümmungen korrigiert. Der unterschiedliche Korrektoreffekt der Orthesen könnte einerseits zu der höheren Versagensrate bei Thompson et al. geführt haben und andererseits auch die bessere Wirksamkeit bei lumbalen im Vergleich zu thorakalen Krümmungen in deren Studie erklären.

5.2.5 Einfluss weiterer morphologischer Parameter

In der vorliegenden Studie konnten zusätzlich zum (m)Lenke Haupttyp in der multivarianten Analyse die folgenden Risikofaktoren für ein Versagen der Therapie identifiziert werden. Ein größerer initialer Cobb- Winkel der Haupt- und Nebenkrümmungen sowie der unter Korsettkorrektur gemessene Cobb- Winkel sind für einen verminderten Therapieerfolg verantwortlich. Demnach zeigte sich die Möglichkeit eines Versagens erhöht, wenn der major Cobb-Winkel vor Beginn der Behandlung $28,5^\circ$ (OR=7,1) überschritt und wenn er im Korsett $24,5^\circ$ (OR=11,8) überschritt.

Auch eine längere Teilkrümmung oberhalb sowie eine kürzere Teilkrümmung unterhalb des Scheitels konnten als Gründe für ein Therapieversagen erfasst werden. Möglicherweise sollte eine Operation früher in Erwägung gezogen werden, wenn die oben beschriebenen Schwellenwerte überschritten werden, um eine unnötige psychische Belastung durch die Behandlung mittels Korsett zu vermeiden. Die Ergebnisse zum anfänglichen Cobb-Winkel, zur anfänglichen Korrekturrate und zur apikalen Rotation waren dagegen nur in der univariaten Analyse signifikant.

In vorangegangenen Arbeiten zeigten sich hinsichtlich des initialen Cobb-Winkels und der apikalen Rotation die gleichen Ergebnisse. Katz et al. konnten zeigen, dass Krümmungswinkel größer 35 Grad bei Doppelkurven als Risikofaktor für ein Therapieversagen gelten (Katz et al. 2001). In einer retrospektiven Risikoanalyse fanden Li et al. bei Skoliosen der (m)Lenke- Typen 5 und 6 einen initialen lumbalen Cobb-Winkel von größer/gleich 30 Grad und die apikale Scheitelrotation größer/gleich Grad III als Risikofaktoren (Li et al. 2017). Hieraus lässt sich ableiten, dass die Erfolgchancen der konservativen Therapie geringer werden, wenn der Schweregrad der Deformität zunimmt und sich dem Grenzwert der Operation nähert. Yamane et al. konnten in Ihrer Studie herausarbeiten, dass es im Falle einer Verschlechterung der apikalen Rotation durch die Korsettkorrektur zu einer höheren Versagensrate kommt, als bei Patienten, bei denen der Rotationsgrad durch das Korsett verbessert wurde oder gleichblieb (Yamane et al. 2016). Das Ausmaß der Korrektur von Cobb und Rotationsgrad (Δ Cobb, Δ NaM) durch das Korsett hatte im Gegensatz zu vorangegangenen Studien (Katz et al. 2001, Yamane et al. 2016) in der vorliegenden Studie keinen signifikanten Einfluss auf den Erfolg der Behandlung, sodass man schlussfolgern kann, dass die absolute Korrekturfähigkeit der Krümmungen durch ein Korsett sein Limit erreicht. Dies bedeutet, dass relativ gesehen die prozentuale Primärkorrektur bei initial größeren Krümmungen herabgesetzt ist und somit auch der Therapieerfolg weniger wahrscheinlich wird. Entgegen der Erwartungen unserer Arbeitshypothesen, konnten wir in Hinblick auf den Lumbar spine modifier und die Gesamtlänge der Kurve keinen signifikanten Einfluss auf ein Versagen der Therapie durch diese radiographischen Parameter feststellen. Erstmals konnten wir jedoch die Länge der Teilkrümmungen der Hauptkurve als Risikofaktor identifizieren. Asymmetrische Kurven mit einem nach unten verschobenen Scheitel führten hier zu einer höheren Versagensrate. Möglicherweise lässt sich die Asymmetrie durch den äußeren Druck der Pelotten weniger adressieren. Zusätzlich limitiert der Beckenkamm

die optimale Position der Pelotten zur Korrektur einer lumbalen Hauptkrümmung. Bei thorakalen, nach kranial lang auslaufenden Krümmungen kann die Korrektur ebenfalls nur bedingt umgesetzt werden, da hier der Schultergürtel als begrenzende Struktur vorhanden ist.

5.2.6 Einfluss des Geschlechts

In der Literatur wird immer wieder auf die Geschlechterverteilung und den Einfluss des Geschlechtes auf Erkrankungsbeginn und -ausmaß eingegangen. Während bei den infantilen Skoliosen die Verteilung noch ausgeglichen ist, verschiebt sie sich mit zunehmendem Alter in Richtung der Mädchen. Bei der adoleszenten Form dominiert das weibliche Geschlecht mit einem Verhältnis von 6:1 gegenüber dem männlichen. Auch in unserer Arbeit zeigte sich diese klare Tendenz, denn 110 Patienten waren weiblich und nur 17 männlich. Auch in Anbetracht des Kurvenausmaßes muss zwischen den Geschlechtern unterschieden werden. Während Jungen bei gering ausgeprägten Skoliosen etwas häufiger betroffen sind, sind Mädchen bei Skoliosen mit Cobb- Winkeln von mehr als 20 Grad 5- mal häufiger und bei Cobb- Winkeln von mehr als 30 Grad sogar 10- mal häufiger betroffen (Trobisch et al. 2010). Hinsichtlich des Progressionsrisikos kann ebenfalls zwischen den Geschlechtern differenziert werden. Soucacos et al. postulieren 1998, dass Jungen mit rechtskonvexen lumbalen Kurven und prämenarchale Mädchen mit rechtskonvexer thorakaler Kurve oder Doppelkrümmung größer 10 Grad ein erhöhtes Risiko für das Voranschreiten ihrer Skoliose aufweisen (Soucacos et al. 1998). Das Geschlecht hatte jedoch in der vorliegenden Studie keinen Einfluss auf die Erfolgsrate der konservativen Behandlung.

5.3 Vergleich der deutschen Richtlinien mit den internationalen Guidelines

Bis heute gibt es keinen einheitlichen Standard für den Beginn und die exakte Form der Korsetttherapie (Negrini et al. 2014, Karol et al. 2016, Seifert et al. 2016, Negrini et al. 2018). In vielen bisherigen Studien zeigten sich differente Ergebnisse hinsichtlich der Erfolgsrate einer Orthesenbehandlung. Dies führte dazu, dass die Effektivität immer wieder kontrovers diskutiert wurde. Ursächlich hierfür könnte vor allem die Heterogenität der Einschlusskriterien sein. 2007 konnten die Autoren eines systematischen Reviews keinen Vorteil der Korsettbehandlung gegenüber reiner

Beobachtung sehen (Dolan et al. 2007). Um eine bessere Vergleichbarkeit der Studien zu gewährleisten, hat die SOSORT eine offizielle Empfehlung vorgelegt, welche die Einschlusskriterien aufführt, die in Studien über die Wirksamkeit der Orthesenbehandlung einer adoleszenten idiopathischen Skoliose berücksichtigt werden sollen. Die Patienten müssen zehn Jahre oder älter sein und die Skelettreife muss nach dem Risser- Zeichen als Stadium 0- 2 vorliegen. Die Compliance der behandelten muss erfasst und röntgendiagnostisch das Ausmaß der Krümmung vor und nach der Behandlung, sowie die Korrektur im Korsett ermittelt werden. Als stets mittels Korsetttherapie behandlungswürdig wurden Skoliosen mit Winkeln zwischen 25- 40 Grad nach Cobb gehalten (Negrini et al. 2012). In einem 2018 erschienenen Update der SOSORT Guidelines wird eine FTRB-Behandlung als maximal mögliche Therapie für moderate Krümmungen (21-36°) bei Patienten mit Risser-Stadien 0-4 eingestuft, wobei auch Teilzeitkorsette und skoliosespezifische Krankengymnastik als mögliche Optionen der Behandlung beschrieben wurden (Negrini et al. 2018).

Auch wir haben in dieser Studie die Empfehlungen als Grundlage genutzt, auch wenn wir etwas striktere Kriterien zum Einschluss in die Behandlung wählten. Im deutschen Behandlungsregime beginnt die Orthesenversorgung stets bereits bei Skoliosen mit Cobb- Winkeln von 20 Grad (Seifert et al. 2016). Dieser frühere aggressive Therapiebeginn findet sich auch in unserem Patientenkollektiv wieder. Die rigide Therapie zeichnete sich jedoch auch durch eine konsequente Krankengymnastik nach Schroth in Begleitung der Korsettbehandlung und durch eine Korsettindikationsausweitung auf Cobb-Winkel bis zu <50° aus.

5.4 Limitationen der Studie

Die vorliegende Studie ist natürlich nicht ohne Limitationen. Zuerst muss die Messung des Cobb- Winkels als mögliche Fehlerquelle in der Studie genannt werden. Es gibt bereits mehrere Arbeiten, die zeigen konnten, dass es eine Fehlerbreite von 2 bis 7 Grad bei der Bestimmung des Cobb- Winkels gibt (Goldberg et al. 1988, Pruijs et al. 1994). Sowohl die Winkelmessung an sich als auch die Röntgenaufnahme können dabei fehlerbehaftet sein (Malfair et al. 2010). Unsere Messungen wurden an digitalisierten Röntgenbildern (PACS) vorgenommen. Dies bedeutet laut Kuklo et al. keine höhere Ungenauigkeit, als die Messung an konventionellen Röntgenaufnahmen (Kuklo et al. 2005). Auch die Tragedauer des Korsetts wurde nur abgefragt und nicht

mit Thermomessstreifen o.Ä. überprüft (Nicholson et al. 2003, Benish et al. 2012). Jedoch ist auch bei derartigen Methoden zur Compliance-Prüfung eine Manipulation durch die Patienten nicht ausgeschlossen. Aus unserer Sicht ist es jedoch möglich, durch die regelmäßige Abfrage des Trageverhaltens in den engmaschigen Untersuchungsintervallen im Beisein der Eltern, die anamnestischen Fehlerquellen zu reduzieren. Außerdem wurde der Body-Mass-Index der Patienten nicht erfasst. O'Neill et al. publizierten in ihrer Studie 2005, dass der Behandlungserfolg mittels Korsett bei übergewichtigen bzw. adipösen Patienten geringer ist (O'Neill et al. 2005). Laut einer Studie von Matusik und Kollegen haben übergewichtige Patienten mit AIS einen höheren Schweregrad der Skoliose (Matusik et al. 2012). Bei beiden körperlichen Maßen handelt es sich also um Faktoren, die den Therapieerfolg beeinflussen können (Ramírez et al. 2013). Des Weiteren muss kritisch hinterfragt werden, inwiefern das sagittale Profil der Patienten für die Therapieentscheidung von Nöten ist. Bei der Skoliose handelt es sich, wie bereits erwähnt, um eine dreidimensionale Deformität. Nur durch Ergänzung der seitlichen Röntgenaufnahme zu der Aufnahme in Frontalebene, um die Bestimmung des Cobb-Winkels vorzunehmen, wäre es möglich diese Ebene der Wirbelsäulenkrümmung abzubilden und zu bewerten. Diese wurde in unserer Studie allerdings nicht ausgewertet und somit das sagittale Ausmaß der Krümmung nicht in die Therapieentscheidung mit einbezogen. Es ist denkbar, dass eine weitere Verschlechterung nach der letzten Nachuntersuchung (6 Monate nach Beginn der Entwöhnung) auftreten kann, die jedoch radiologisch nicht verfolgt wurde. Außerdem könnte das Absetzen in späten Stadien des Skelettwachstums eine Überbehandlung darstellen. Sicherlich wäre auch eine interindividuelle Variation der PSE möglich, in der vorliegenden Studie wurde jedoch jedem Patienten PSE nach dem gleichen Konzept (Katharina Schroth) in der gleichen Häufigkeit und Zeit pro Woche verschrieben. Zusätzlich ist die Subgruppe der Therapieversager, speziell auch in den einzelnen (m)Lenke-Haupttypen zum Teil relativ klein, sodass Risikofaktoren mit geringer ausgeprägten Effekten der statistischen Auswertung nicht zugänglich waren. Letztendlich haben wir auch drei Patienten mit Krümmungen von 45 bis zu 49 Grad in die Analyse aufgenommen. Bei zwei von diesen musste ein Versagen der Therapie festgestellt werden. Dies kann kritisch diskutiert werden, da hier schon eine relative OP-Indikation besteht. Ziel war es jedoch, eine rigide konservative Behandlung zu untersuchen. Darüber hinaus ist die Effektivität einer rigiden konservativen Therapie auch für Krümmungen über 45° belegt (Lusini et al.

2014). Hinsichtlich des Therapieerfolges wurde in der vorliegenden Arbeit nur die Form des Vollzeit- Korsetts eingeschlossen. Dabei konnte schon gezeigt werden, dass auch Teilzeit- Korsette einen positiven Einfluss auf den Behandlungserfolg haben (Jarvis et al. 2008). Für die Patienten würde dies eine geringere tägliche Tragedauer und damit verbunden eine geminderte Einschränkung körperlicher Aktivitäten bedeuten. Kosmetische Faktoren und die Umständlichkeit des Tragens eines Korsetts sorgen dafür, dass die Compliance der jungen Heranwachsenden negativ beeinflusst wird. Die Therapieoption mit Teilzeit- Korsetten oder semirigidem Orthesen würde durch eine gesteigerte Trageakzeptanz eventuell auch den Behandlungserfolg steigern.

5.5 Ausblick in die Zukunft

Generell ist die Orthesenversorgung in Hinblick auf die Patienten- Individualität zu überdenken. Aus unserer Sicht wäre es in Zukunft realisierbar, dank neuer Untersuchungstechniken und Software- gestützter Berechnungen, Korsette zu entwickeln, die sich den jeweiligen Gegebenheiten des Patienten noch besser anpassen. Hierbei denken wir vor allem an diverse Veränderungen an den Pelotten. Wie bereits erläutert, zeigte sich, dass die unterschiedlichen Kurventypen different auf die jeweilige Korrektur ansprechen. Diese Grundlage sollte genutzt werden, den betroffenen Patienten eine passgenaue typenspezifische Orthese anzufertigen, welche sich zwar an den Grundlagen des Chéneau-Korsetts orientiert, aber individuell sehr spezifisch variiert werden kann. Um noch genauere Vermessungen und Modellierungen vornehmen zu können und um ggf. die hier dargestellten Ergebnisse in Zukunft zu validieren und spezifizieren wäre das Prinzip der dreidimensionalen Bildgebung ein sehr guter Ansatz. Hier existieren mittlerweile Geräte, die eine dreidimensionale Erfassung der gesamten Wirbelsäule strahlungsfrei oder zumindest -arm ermöglichen, wie z.B. upright-MRTs oder das „EOS- Imaging-System“. Letzteres ermöglicht eine 1:1 Ganzkörperaufnahme des stehenden Patienten, in dem es Röntgenaufnahmen von vorn und von der Seite kombiniert. Neben qualitativ hochwertigeren Bildern ohne vertikale Verzerrungsfehler, welche beim konventionellen Röntgen auftreten können und so die Längenmaße beeinflussen, liefert das System eine dreidimensionale Darstellung des Achsenskeletts und dessen Haltung. Basierend auf diesen Aufnahmen kann der Behandlungsplan sehr individuell angelegt werden.

Neben diesen positiven Punkten für die Auswertung der Deformität für den Behandler setzt EOS- Röntgen den Patienten einer deutlich reduzierten Strahlenbelastung aus. Dieser Faktor ist für Skoliose- Patienten, die während Diagnostik und Therapieverlauf mehrfachen Röntgenkontrollen ausgesetzt sind, nicht zu verachten. Neben der genannten Röntgendiagnostik ließe sich mit Hilfe von (upright-)MRT- Aufnahmen neben des Achsenskelettes auch der Muskel- und Weichteilmantel abbilden. Aus unserer Sicht könnte dieser ebenfalls einen Einfluss auf das den Behandlungsverlauf und das Therapieergebnis haben. Leider sind beide Techniken heutzutage noch sehr teuer und nicht ubiquitär verfügbar.

Neben der Korsettoptimierung stellt sich natürlich auch die Frage, ob man nicht

basierend auf allen morphologischen Risikofaktoren für das Versagen der Korsetttherapie eine Formel kalkulieren kann, über die man die Entscheidung zu einer Operation individuell eher oder seltener stellt. Die in dieser Arbeit kalkulierten Odds Ratios könnten als erste Orientierungsgrenzen dienen, zumal sich die oberen Erfolgsgrenzen von ca. $28,5^\circ$ bzw. $35,5^\circ$ des initialen Cobb-Winkels mit der vorangegangenen Literatur fast decken. Neue Versorgungstechniken wie das vertebral body tethering könnten hier eine sinnvolle Alternative für Krümmungen mit eher geringen Erfolgsraten bieten, auch wenn klare Indikationsgrenzen und Langzeitergebnisse diesbezüglich noch ausstehen (Samdani et al. 2015, Padhye et al. 2018).

6 Schlussfolgerung

Zusammenfassend kann man sagen, dass wir neben schon bekannten Risikofaktoren (Größe der Krümmungen, apikale Rotation) erstmals für Einzel- und Doppelkrümmungen (m)Lenke Haupttypen identifizieren konnten, die mit einer höheren Versagensrate einer rigiden konservativen Therapie einhergehen. Im Kontrast zu vorangegangenen Untersuchungen fanden wir bei Doppelkrümmungen hier ein schlechteres Ergebnis bei Skoliosen mit lumbaler Hauptkrümmung. Daneben konnten wir erstmals zeigen, dass asymmetrische Hauptkrümmungen mit einem kaudaleren Scheitel ebenfalls mit einem geringeren Erfolg der konservativen Behandlung assoziiert sind. Zusätzlich konnten Schwellenwerte für Cobb-Winkel im Korsett und vor Therapie für ein signifikant erhöhtes Versagensrisiko definiert werden. Die genannten Ergebnisse unserer Studie deuten darauf hin, dass idiopathische Skoliosen mit diesen Parametern und den betroffenen (m)Lenke Haupttypen nur unzureichend auf die Korsett- Therapie ansprechen. Diese Informationen können dazu dienen, in Zukunft eine bessere Patientenselektion für die konservative Behandlung der adoleszenten idiopathischen Skoliose vorzunehmen. Durch die konkretere Auswahl ist es möglich, betroffenen Patienten langjährige Orthesen-Therapie, welche in diesen Fällen mit der derzeit angewandten Form ohnehin keinen oder nur einen sehr geringen therapeutischen Wert aufweist und zu einer starken Einschränkung der Lebensqualität führt, zu ersparen. Stattdessen könnten Veränderungen im Korsettdesign es ermöglichen, das schlechtere Outcome bestimmter (m)Lenke- Typen aufzufangen. In Zusammenarbeit mit den Orthopädietechnikern wäre es möglich die Orthese dem jeweiligen Haupttyp anzupassen und so den Eigenschaften der jeweiligen Krümmungen entgegenzutreten.

Auch die operative Strategie als Alternative gegenüber der konservativen Behandlung könnte bei den selektierten (m)Lenke- Kurventypen folglich schneller in Erwägung gezogen und nach entsprechender Aufklärung damit in einem früheren Erkrankungsstadium durchgeführt werden. Laut Hopf bedeutet ein früherer Operationszeitpunkt, dass die Wirbelsäule der Patienten flexibler ist und damit das Risiko hinsichtlich neurologischer Defizite durch die Operation geringer ist. Ihm zufolge werden dabei auch bessere Korrekturwerte und eine kürzere Behandlungsdauer ermöglicht (Hopf 2000).

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

Abel MF. 2017. Brace Success as Related to Curve Type, Compliance, and Maturity in Adolescents with Idiopathic Scoliosis: Commentary on an article by Rachel M. Thompson, MD, et al.: "Brace Success Is Related to Curve Type in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis". *J Bone Joint Surg Am*, 99(11): e59.

Abel R, Beisse R, von Bremen-Kühne R, Burgkart R, Engel JM, Gerner HJ, Gradinger R, Haaker R, Halm H, Jeanneret B, Krämer J, Kummer B, Landauer F, Ludwig J, Moll H, Reinhardt B, Steffen R, von Stempel A, Weiß H-R, Winkelmüller W, Wittenberg RH, Zielke K. 2001. *Die Wirbelsäule*. Stuttgart: Thieme.

Archer IA, Dickson RA. 1985. Stature and idiopathic scoliosis. A prospective study. *J Bone Joint Surg Br*, 67(2): 185-188.

Asher MA, Burton DC. 2006. Adolescent idiopathic scoliosis: natural history and long term treatment effects. *Scoliosis*, 1(1): 2.

Bar-On E, Floman Y, Sagiv S, Katz K, Pollak RD, Maayan C. 2000. Orthopaedic manifestations of familial dysautonomia. A review of one hundred and thirty-six patients. *J Bone Joint Surg Am*, 82(11): 1563-1570.

Benish BM, Smith KJ, Schwartz MH. 2012. Validation of a miniature thermochron for monitoring thoracolumbosacral orthosis wear time. *Spine (Phila Pa 1976)*, 37(4): 309-315.

Betz RR, Ranade A, Samdani AF, Chafetz R, D'Andrea LP, Gaughan JP, Asghar J, Grewal H, Mulcahey MJ. 2010. Vertebral body stapling: a fusionless treatment option for a growing child with moderate idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(2): 169-176.

Bunge EM, de Bekker-Grob EW, van Biezen FC, Essink-Bot ML, de Koning HJ. 2010. Patients' preferences for scoliosis brace treatment: a discrete choice experiment. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(1): 57-63.

Bunnell WP. 1986. The natural history of idiopathic scoliosis before skeletal maturity. *Spine (Phila Pa 1976)*, 11(8): 773-776.

Bunnell WP. 1993. Outcome of spinal screening. *Spine (Phila Pa 1976)*, 18(12): 1572-1580.

Burwell RG, Cole AA, Cook TA, Grivas TB, Kiel AW, Moulton A, Thirlwall AS, Upadhyay SS, Webb JK, Wemyss-Holden SA, et al. 1992. Pathogenesis of idiopathic scoliosis. The Nottingham concept. *Acta Orthop Belg*, 58 Suppl 1: 33-58.

Bylund P, Jansson E, Dahlberg E, Eriksson E. 1987. Muscle fiber types in thoracic erector spinae muscles. Fiber types in idiopathic and other forms of scoliosis. *Clin Orthop Relat Res*, (214): 222-228.

Byrd JA. 1988. Current theories on the etiology of idiopathic scoliosis. *Clin Orthop Relat Res*, (229): 114-119.

Carr AJ, Jefferson RJ, Turner-Smith AR. 1993. Family stature in idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 18(1): 20-23.

Carter OD, Haynes SG. 1987. Prevalence rates for scoliosis in US adults: results from the first National Health and Nutrition Examination Survey. *Int J Epidemiol*, 16(4): 537-544.

Cheng JC, Tang SP, Guo X, Chan CW, Qin L. 2001. Osteopenia in adolescent idiopathic scoliosis: a histomorphometric study. *Spine (Phila Pa 1976)*, 26(3): E19-23.

Climent JM, Sánchez J. 1999. Impact of the type of brace on the quality of life of Adolescents with Spine Deformities. *Spine (Phila Pa 1976)*, 24(18): 1903-1908.

Danielsson AJ, Nachemson AL. 2001. Radiologic findings and curve progression 22 years after treatment for adolescent idiopathic scoliosis: comparison of brace and surgical treatment with matching control group of straight individuals. *Spine (Phila Pa 1976)*, 26(5): 516-525.

Dasty M, Cienciala J, Krbec M. 2008. Changes of selenium, copper, and zinc content in hair and serum of patients with idiopathic scoliosis. *J Orthop Res*, 26(9): 1279-1282.

Dimeglio A. 2001. Growth in pediatric orthopaedics. *J Pediatr Orthop*, 21(4): 549-555.

Dolan LA, Weinstein SL. 2007. Surgical rates after observation and bracing for adolescent idiopathic scoliosis: an evidence-based review. *Spine (Phila Pa 1976)*, 32(19 Suppl): S91-S100.

El-Hawary R, Chukwunyerewa C. 2014. Update on evaluation and treatment of scoliosis. *Pediatr Clin North Am*, 61(6): 1223-1241.

Ford DM, Bagnall KM, Clements CA, McFadden KD. 1988. Muscle spindles in the paraspinal musculature of patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 13(5): 461-465.

Goldberg MS, Poitras B, Mayo NE, Labelle H, Bourassa R, Cloutier R. 1988. Observer variation in assessing spinal curvature and skeletal development in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 13(12): 1371-1377.

Graul I, Zippelius T, Hölzl A, Strube P. 2019. Elongated conus medullaris, sacral agenesis and scoliosis- a case report of a patient with trisomy 19q and monosomy 7q. *World Neurosurg.*

Guo X, Chau WW, Chan YL, Cheng JC. 2003. Relative anterior spinal overgrowth in adolescent idiopathic scoliosis. Results of disproportionate endochondral-membranous bone growth. *J Bone Joint Surg Br*, 85(7): 1026-1031.

Hacquebord JH, Leopold SS. 2012. In brief: The Risser classification: a classic tool for the clinician treating adolescent idiopathic scoliosis. *Clin Orthop Relat Res*, 470(8): 2335-2338.

Hägglund G, Karlberg J, Willner S. 1992. Growth in girls with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 17(1): 108-111.

Harms J, Rauschmann M, Rickert M. 2015. [Therapy of scoliosis from a historical perspective]. *Unfallchirurg*, 118 Suppl 1: 28-36.

Hoikka V, Ylikoski M, Tallroth K. 1989. Leg-length inequality has poor correlation with lumbar scoliosis. A radiological study of 100 patients with chronic low-back pain. *Arch Orthop Trauma Surg*, 108(3): 173-175.

Hopf C. 2000. [Criteria for treatment of idiopathic scoliosis between 40 degrees and 50 degrees. Surgical vs. conservative therapy]. *Orthopade*, 29(6): 500-506.

Jarvis J, Garbedian S, Swamy G. 2008. Juvenile idiopathic scoliosis: the effectiveness of part-time bracing. *Spine (Phila Pa 1976)*, 33(10): 1074-1078.

Justice CM, Miller NH, Marosy B, Zhang J, Wilson AF. 2003. Familial idiopathic scoliosis: evidence of an X-linked susceptibility locus. *Spine (Phila Pa 1976)*, 28(6): 589-594.

Karol LA, Virostek D, Felton K, Wheeler L. 2016. Effect of Compliance Counseling on Brace Use and Success in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 98(1): 9-14.

Katz DE, Durrani AA. 2001. Factors that influence outcome in bracing large curves in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 26(21): 2354-2361.

Katz DE, Herring JA, Browne RH, Kelly DM, Birch JG. 2010. Brace wear control of curve progression in adolescent idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 92(6): 1343-1352.

Kenanidis E, Potoupnis ME, Papavasiliou KA, Sayegh FE, Kapetanios GA. 2008. Adolescent idiopathic scoliosis and exercising: is there truly a liaison? *Spine (Phila Pa 1976)*, 33(20): 2160-2165.

Kennelly KP, Stokes MJ. 1993. Pattern of asymmetry of paraspinal muscle size in adolescent idiopathic scoliosis examined by real-time ultrasound imaging. A preliminary study. *Spine (Phila Pa 1976)*, 18(7): 913-917.

Kim HJ, Blanco JS, Widmann RF. 2009. Update on the management of idiopathic scoliosis. *Curr Opin Pediatr*, 21(1): 55-64.

King HA, Moe JH, Bradford DS, Winter RB. 1983. The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 65(9): 1302-1313.

Konieczny MR, Hieronymus P, Krauspe R. 2017. Time in brace: where are the limits and how can we improve compliance and reduce negative psychosocial impact in patients with scoliosis? A retrospective analysis. *Spine J*, 17(11): 1658-1664.

Kuklo TR, Potter BK, O'Brien MF, Schroeder TM, Lenke LG, Polly DW, Group SDS. 2005. Reliability analysis for digital adolescent idiopathic scoliosis measurements. *J Spinal Disord Tech*, 18(2): 152-159.

Kwan KYH, Cheng ACS, Koh HY, Chiu AYY, Cheung KMC. 2017. Effectiveness of Schroth exercises during bracing in adolescent idiopathic scoliosis: results from a preliminary study-SOSORT Award 2017 Winner. *Scoliosis Spinal Disord*, 12: 32.

Landauer F, Krismer M, Bauer R. 1997. [Conservative treatment of idiopathic scoliosis]. *Orthopade*, 26(9): 808-817.

Lenke LG, Betz RR, Haheer TR, Lapp MA, Merola AA, Harms J, Shufflebarger HL. 2001. Multisurgeon assessment of surgical decision-making in adolescent idiopathic scoliosis: curve classification, operative approach, and fusion levels. *Spine (Phila Pa 1976)*, 26(21): 2347-2353.

Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, Blanke K. 2001. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am*, 83(8): 1169-1181.

Li Z, Li G, Chen C, Li Y, Yang C, Li M, Xu W, Zhu X. 2017. The radiographic parameter risk factors of rapid curve progression in Lenke 5 and 6 adolescent idiopathic scoliosis: A retrospective study. *Medicine (Baltimore)*, 96(52): e9425.

Lonstein JE. 1988. Natural history and school screening for scoliosis. *Orthop Clin North Am*, 19(2): 227-237.

Lowe TG, Edgar M, Margulies JY, Miller NH, Raso VJ, Reinker KA, Rivard CH. 2000. Etiology of idiopathic scoliosis: current trends in research. *J Bone Joint Surg Am*, 82(8): 1157-1168.

Lusini M, Donzelli S, Minnella S, Zaina F, Negrini S. 2014. Brace treatment is effective in idiopathic scoliosis over 45°: an observational prospective cohort controlled study. *Spine J*, 14(9): 1951-1956.

Machida M, Dubousset J, Imamura Y, Iwaya T, Yamada T, Kimura J, Toriyama S. 1994. Pathogenesis of idiopathic scoliosis: SEPs in chicken with experimentally induced scoliosis and in patients with idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop*, 14(3): 329-335.

Machida M, Dubousset J, Satoh T, Murai I, Wood KB, Yamada T, Ryu J. 2001. Pathologic mechanism of experimental scoliosis in pinealectomized chickens. *Spine (Phila Pa 1976)*, 26(17): E385-391.

Malfair D, Flemming AK, Dvorak MF, Munk PL, Vertinsky AT, Heran MK, Graeb DA. 2010. Radiographic evaluation of scoliosis: review. *AJR Am J Roentgenol*, 194(3 Suppl): S8-22.

Matusik E, Durmała J, Matusik P, Piotrowski J. 2012. Evaluation of nutritional status of children and adolescents with idiopathic scoliosis: a pilot study. *Ortop Traumatol Rehabil*, 14(4): 351-362.

Misterska E, Glowacki M, Harasymczuk J. 2010. Personality characteristics of females with adolescent idiopathic scoliosis after brace or surgical treatment compared to healthy controls. *Med Sci Monit*, 16(12): CR606-615.

Morton A, Riddle R, Buchanan R, Katz D, Birch J. 2008. Accuracy in the prediction and estimation of adherence to bracewear before and during treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop*, 28(3): 336-341.

Nash CL, Moe JH. 1969. A study of vertebral rotation. *J Bone Joint Surg Am*, 51(2): 223-229.

Negrini S, Atanasio S, Zaina F, Romano M. 2008. Rehabilitation of adolescent idiopathic scoliosis: results of exercises and bracing from a series of clinical studies. *Europa Medicophysica-SIMFER 2007 Award Winner. Eur J Phys Rehabil Med*, 44(2): 169-176.

Negrini S, Aulisa AG, Aulisa L, Circo AB, de Mauroy JC, Durmala J, Grivas TB, Knott P, Kotwicki T, Maruyama T, Minozzi S, O'Brien JP, Papadopoulos D, Rigo M, Rivard CH, Romano M, Wynne JH, Villagrasa M, Weiss HR, Zaina F. 2012. 2011 SOSORT guidelines: Orthopaedic and Rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis*, 7(1): 3.

Negrini S, De Mauroy JC, Grivas TB, Knott P, Kotwicki T, Maruyama T, O'Brien JP, Rigo M, Zaina F. 2014. Actual evidence in the medical approach to adolescents with idiopathic scoliosis. *Eur J Phys Rehabil Med*, 50(1): 87-92.

Negrini S, Hresko TM, O'Brien JP, Price N, SOSORT Boards and SRS Non-Operative Committee. Recommendations for research studies on treatment of idiopathic scoliosis: Consensus 2014 between SOSORT and SRS non-operative management committee. *Scoliosis* 2015; 10:8

Negrini S, Donzelli S, Aulisa AG, Czaprowski D, Schreiber S, de Mauroy JC, Diers H, Grivas TB, Knott P, Kotwicki T, Lebel A, Marti C, Maruyama T, O'Brien J, Price N, Parent E, Rigo M, Romano M, Stikeleather L, Wynne J, Zaina F. 2018. 2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis Spinal Disord*, 13: 3.

Negrini S, Donzelli S, Negrini A, Parzini S, Romano M, Zaina F. 2018. Specific exercises reduce the need for bracing in adolescents with idiopathic scoliosis: A practical clinical trial. *Ann Phys Rehabil Med*.

Negrini S, Donzelli S, Negrini A, Parzini S, Romano M, Zaina F. 2019. Specific exercises reduce the need for bracing in adolescents with idiopathic scoliosis: A practical clinical trial. *Ann Phys Rehabil Med*, 62(2): 69-76.

Nicholson GP, Ferguson-Pell MW, Smith K, Edgar M, Morley T. 2003. The objective measurement of spinal orthosis use for the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 28(19): 2243-2250; discussion 2250-2241.

Niethard FU, Carstens C. 2009. *Kinderorthopädie, 50 Tabellen*. 2. Stuttgart: Thieme.

Noshchenko A, Hoffecker L, Lindley EM, Burger EL, Cain CM, Patel VV, Bradford AP. 2015. Predictors of spine deformity progression in adolescent idiopathic scoliosis: A systematic review with meta-analysis. *World J Orthop*, 6(7): 537-558.

O'Neill PJ, Karol LA, Shindle MK, Elerson EE, BrintzenhofeSzoc KM, Katz DE, Farmer KW, Sponseller PD. 2005. Decreased orthotic effectiveness in overweight patients with adolescent idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 87(5): 1069-1074.

Ogilvie JW, Braun J, Argyle V, Nelson L, Meade M, Ward K. 2006. The search for idiopathic scoliosis genes. *Spine (Phila Pa 1976)*, 31(6): 679-681.

Ovadia D, Eylon S, Mashiah A, Wientroub S, Lebel ED. 2012. Factors associated with the success of the Rigo System Chêneau brace in treating mild to moderate adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop*, 6(4): 327-331.

Padhye K, Soroceanu A, Russell D, El-Hawary R. 2018. Thoracoscopic Anterior Instrumentation and Fusion as a Treatment for Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Systematic Review of the Literature. *Spine Deform*, 6(4): 384-390.

Prujls JE, Hageman MA, Keessen W, van der Meer R, van Wieringen JC. 1994. Variation in Cobb angle measurements in scoliosis. *Skeletal Radiol*, 23(7): 517-520.

Ramírez M, Martínez-Llorens J, Sanchez JF, Bagó J, Molina A, Gea J, Cáceres E. 2013. Body composition in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*, 22(2): 324-329.

Risser JC. 1958. The iliac apophysis; an invaluable sign in the management of scoliosis. *Clin Orthop*, 11: 111-120.

- Samdani AF, Ames RJ, Kimball JS, Pahys JM, Grewal H, Pelletier GJ, Betz RR. 2015. Anterior vertebral body tethering for immature adolescent idiopathic scoliosis: one-year results on the first 32 patients. *Eur Spine J*, 24(7):1533-9.
- Sanders AE, Andras LM, Lantorno SE, Hamilton A, Choi PD, Skaggs DL. 2018. Clinically Significant Psychological and Emotional Distress in 32% of Adolescent Idiopathic Scoliosis Patients. *Spine Deform*, 6(4): 435-440.
- Sanders JO, Browne RH, McConnell SJ, Margraf SA, Cooney TE, Finegold DN. 2007. Maturity assessment and curve progression in girls with idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 89(1): 64-73.
- Schneider E, Niethard FU, Schiek H, Carstens C, Pfeil J. 1991. [How idiopathic is idiopathic scoliosis? Results of neurological studies with somatosensory evoked potentials (SSEP) in children and adolescents]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 129(4): 355-361.
- Schwab F, Dubey A, Gamez L, El Fegoun AB, Hwang K, Pagala M, Farcy JP. 2005. Adult scoliosis: prevalence, SF-36, and nutritional parameters in an elderly volunteer population. *Spine (Phila Pa 1976)*, 30(9): 1082-1085.
- Seifert J, Thielemann F, Bernstein P. 2016. [Adolescent idiopathic scoliosis : Guideline for practical application]. *Orthopade*, 45(6): 509-517.
- Sitoula P, Verma K, Holmes L, Gabos PG, Sanders JO, Yorgova P, Neiss G, Rogers K, Shah SA. 2015. Prediction of Curve Progression in Idiopathic Scoliosis: Validation of the Sanders Skeletal Maturity Staging System. *Spine (Phila Pa 1976)*, 40(13): 1006-1013.
- Scoliosis Research Society. 2015. Adolescent Idiopathic Scoliosis. Online verfügbar unter: <https://www.srs.org/professionals/online-education-and-resources/conditions-and-treatments/adolescent-idiopathic-scoliosis>, zuletzt aktualisiert am 06.10.2018, zuletzt geprüft am 22.02.2020
- Soucacos PN, Zacharis K, Gelalis J, Soultanis K, Kalos N, Beris A, Xenakis T, Johnson EO. 1998. Assessment of curve progression in idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*, 7(4): 270-277.
- Thompson RM, Hubbard EW, Jo CH, Virostek D, Karol LA. 2017. Brace Success Is Related to Curve Type in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 99(11): 923-928.
- Trobisch P, Suess O, Schwab F. 2010. Idiopathic scoliosis. *Dtsch Arztebl Int*, 107(49): 875-883; quiz 884.
- Turgut M, Yenisey C, Uysal A, Bozkurt M, Yurtseven ME. 2003. The effects of pineal gland transplantation on the production of spinal deformity and serum melatonin level following pinealectomy in the chicken. *Eur Spine J*, 12(5): 487-494.

Ward K, Ogilvie JW, Singleton MV, Chettier R, Engler G, Nelson LM. 2010. Validation of DNA-based prognostic testing to predict spinal curve progression in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*, 35(25): E1455-1464.

Weinstein SL. 1999. Natural history. *Spine (Phila Pa 1976)*, 24(24): 2592-2600.

Weinstein SL, Dolan LA, Cheng JC, Danielsson A, Morcuende JA. 2008. Adolescent idiopathic scoliosis. *Lancet*, 371(9623): 1527-1537.

Weinstein SL, Dolan LA, Spratt KF, Peterson KK, Spoonamore MJ, Ponseti IV. 2003. Health and function of patients with untreated idiopathic scoliosis: a 50-year natural history study. *Jama*, 289(5): 559-567.

Weinstein SL, Dolan LA, Wright JG, Dobbs MB. 2013. Design of the Bracing in Adolescent Idiopathic Scoliosis Trial (BrAIST). *Spine (Phila Pa 1976)*, 38(21): 1832-1841.

Weinstein SL, Dolan LA, Wright JG, Dobbs MB. 2013. Effects of bracing in adolescents with idiopathic scoliosis. *N Engl J Med*, 369(16): 1512-1521.

Weinstein SL, Ponseti IV. 1983. Curve progression in idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 65(4): 447-455.

Weiss HR. 2002. Rehabilitation of scoliosis patients with pain after surgery. *Stud Health Technol Inform*, 88: 250-253.

Weiss HR, Negrini S, Hawes MC, Rigo M, Kotwicki T, Grivas TB, Maruyama T, SOSORT mot. 2006. Physical exercises in the treatment of idiopathic scoliosis at risk of brace treatment -- SOSORT consensus paper 2005. *Scoliosis*, 1: 6.

Weiss HR, Weiss G, Petermann F. 2003. Incidence of curvature progression in idiopathic scoliosis patients treated with scoliosis in-patient rehabilitation (SIR): an age- and sex-matched controlled study. *Pediatr Rehabil*, 6(1): 23-30.

Willner S, Uden A. 1982. A prospective prevalence study of scoliosis in Southern Sweden. *Acta Orthop Scand*, 53(2): 233-237.

Wu AM, Cheung JPY, Cheung KMC, Lin JL, Jin HM, Chen D, Wang XY, Zhao J, Kwan KYH. 2019. Minimum 2-Year Experience with Magnetically Controlled Growing Rods for the Treatment of Early-Onset Scoliosis: A Systematic Review. *Asian Spine J*: 682-693.

Yamane K, Takigawa T, Tanaka M, Sugimoto Y, Arataki S, Ozaki T. 2016. Impact of Rotation Correction after Brace Treatment on Prognosis in Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Asian Spine J*, 10(5): 893-900.

Zhang Y, Yang Y, Dang X, Zhao L, Ren J, Zhang L, Sun J. 2015. Factors relating to curve progression in female patients with adolescent idiopathic scoliosis treated with a brace. *Eur Spine J*, 24(2): 244-248.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Es handelt sich um eine private Fotografie, die mir durch Prof. Dr. med. Strube überlassen wurde.

Alle weiteren Abbildungen entstammen nur eigenen Quellen und sind selbst gezeichnet, fotografiert bzw. grafisch gestaltet.

9 Anhang

9.1 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich- Schiller- Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Prof. Dr. med. Georg Matziolis, Prof. Dr. med. Patrick Strube und PD Dr. med. Timo Zippelius,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers

9.3 Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Georg Matziolis für das freundliche Überlassen des Themas und die wissenschaftliche Betreuung bedanken.

Herrn Prof. Dr. med. Patrick Strube und Herrn Privatdozent Dr. med. Timo Zippelius möchte ich herzlich danken. Beide haben meine Arbeit direkt betreut und mir in allen fachlichen Belangen immer zur Seite gestanden.

Außerdem möchte ich meiner gesamten Familie danken, die mich immer in jeglicher Hinsicht unterstützt hat.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, welche mir meinen Werdegang ermöglicht haben und es immer verstanden mich zu motivieren.

Ich danke meinem Mann, Benjamin Gunold, für seine Geduld und die liebevolle Betreuung unserer Kinder.