

**Langzeitverlauf des Schulterstandes nach Korrekturspondylodese
bei adoleszenter idiopathischer Skoliose**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors

des Fachbereichs Medizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Farag, Mohamed

aus **Giza, Ägypten**

Gießen 2020

Aus der Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, unter der Leitung des Direktors der Klinik Univ.-Prof. Dr. med. Dr. h.c. Christian Heiß, des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen.

Gutachter: Priv.-Doz. Dr. med. Heinrich Böhm

Gutachter: Prof. Dr. med. Markus Rickert

Tag der Disputation: 16.09.2020

Diese Arbeit widme ich meiner Familie.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Einführung | 1 |
| 1.2 | Definition der Skoliose und der idiopathischen Skoliose | 2 |
| 1.3 | Inzidenz, Prävalenz und Geschlechtverteilung | 2 |
| 1.4 | Ätiologie | 3 |
| 1.5 | Skelettwachstumszeichen | 3 |
| 1.6 | Prognose und Prävention | 4 |
| 1.7 | Klassifikationssysteme..... | 5 |
| 1.7.1 | Klassifikation nach Ponseti | 7 |
| 1.7.2 | King-Klassifikation | 7 |
| 1.7.3 | Lenke Klassifikation | 8 |
| 1.8 | Behandlung der idiopathischen Skoliose | 11 |
| 1.8.1 | Indikation und Ziele der operativen Versorgung | 11 |
| 1.8.2 | Korrekturverfahren..... | 12 |
| 1.9 | Der Schulterstand..... | 16 |
| 2 | Fragestellung | 18 |
| 3 | Material und Methoden | 19 |
| 3.1 | Patientenauswahl | 19 |
| 3.2 | Einschluss- und Ausschlusskriterien | 19 |
| 3.3 | Präoperatives Untersuchungsprogramm | 19 |
| 3.3.1 | Das klinische Bild | 19 |
| 3.3.2 | Präoperative und postoperative Bildgebungsverfahren..... | 22 |
| 3.3.3 | Radiologische Beurteilung des Schulterstandes und Messungen | 23 |
| 3.3.4 | Fotografische Dokumentation der AIS | 27 |
| 3.4 | Schulterbalance spezifische Einteilung | 30 |
| 3.4.1 | RCIA-Skala und CA-Skala | 30 |
| 3.4.2 | Schulterbalance-Skala | 30 |
| 3.5 | Lot-Skala..... | 31 |
| 3.6 | Auswertung der schriftlichen und bildgebenden Dokumentation | 31 |
| 3.7 | Ethikkommission | 32 |
| 4 | Ergebnisse | 33 |
| 4.1 | Schulterbalance..... | 33 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4.2 | Schulterhochstand | 49 |
| 4.3 | Das Lot..... | 53 |
| 4.4 | Schulterstand und Lot | 55 |
| 4.5 | Radiologische und klinische Parameter des Schulterstandes..... | 56 |
| 4.6 | Skoliosenkorrektur im Langzeitverlauf | 61 |
| 4.7 | Lumbale Krümmung | 64 |
| 5 | Diskussion | 66 |
| 5.1 | Schulterbalance | 66 |
| 5.2 | Schulterstand nach Korrekturspondylodese..... | 74 |
| 5.3 | Spielt das Lot eine Rolle bei den Veränderungen des Schulterstandes nach Korrekturspondylodese? | 76 |
| 5.4 | Radiologische und klinische Parameter des Schulterstandes..... | 77 |
| 5.5 | Lumbale Krümmung | 79 |
| 5.6 | Kritische Betrachtung der eigenen Untersuchungen | 80 |
| 6 | Schlussfolgerung..... | 82 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 83 |
| 8 | Summary..... | 84 |
| 9 | Literaturverzeichnis..... | 85 |
| 10 | Anhang | 91 |
| I. | Abkürzungsverzeichnis..... | 95 |
| II. | Abbildungsverzeichnis | 97 |
| III. | Tabellenverzeichnis..... | 100 |
| IV. | Erklärung..... | 101 |
| V. | Danksagung | 102 |

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die Skoliose ist eine dreidimensionale Deformität der Wirbelsäule, welche in den verschiedenen Altersklassen sowie Abschnitten der Wirbelsäule auftreten kann. Eine fixierte koronare Krümmung von mindestens 10° wird als Skoliose bezeichnet. Die idiopathische Skoliose ist eine Ausschlussdiagnose und muss von anderen Skoliosearten, z.B. kongenitaler oder neuromuskulärer Skoliose unterschieden werden. Wenn gleich in höherem Lebensalter eine degenerative Ursache für die Skoliose angenommen wird, ist bei Kindern und Jugendlichen von multifaktorieller Ätiologie, u.a. hereditärer Genese auszugehen.

Je nach Altersklasse unterscheidet man zwischen infantiler, juveniler und adoleszenter idiopathischer Skoliose. Bei Erstdiagnose zwischen dem 10. und 18. Lebensjahr spricht man von adoleszenter idiopathischer Skoliose (AIS). Die adoleszente idiopathische Skoliose wird zwischen dem 10. und 18. Lebensjahr festgestellt. Mädchen werden im Rahmen des präpubertären Wachstumsschubs deutlich häufiger betroffen als Jungen. Das durchschnittliche Krümmungsausmaß ist bei Mädchen mit AIS ebenfalls stärker [1].

Die strukturellen Formveränderungen der Wirbelsäule bei AIS können auch zu Veränderungen des Schulterstands führen [2]. Deswegen ist die Schulterdysbalance eine häufige Begleiterscheinung bei AIS. Die resultierende und für jedermann sichtbare Asymmetrie der Schultern kann zur psychologischen Auswirkung mit Beeinträchtigung der Teilnahme am Sozialleben führen [3]. Die chirurgische Behandlung der AIS ist die Korrekturspondylodese mit dem Ziel, die Deformität zu beseitigen. Ein ungleicher Schulterstand beeinträchtigt das Erscheinungsbild genauso wie eine Lotabweichung und ein Rippenbuckel. Ein persistierender Schulterhochstand von mehr als 2 cm nach dem operativen Eingriff ist eine mögliche Ursache von Patientenunzufriedenheit [4-7].

Eine einheitliche Methode zur Bestimmung des Schulterstandes und Definition der Dysbalance nach Korrekturspondylodesen bei AIS gibt es allerdings bisher nicht [4, 8].

1.2 Definition der Skoliose und der idiopathischen Skoliose

Die Skoliose ist eine dreidimensionale Wirbelsäulendeformität, die durch fixierte Seitabweichung und Rotation eines Wirbelsäulenabschnitts gekennzeichnet ist [1]. Bei dieser dreidimensionalen Deformität der Wirbelsäule beträgt die koronare Achsabweichung mindestens 10° . Eine begleitende Fehlstellung in der sagittalen Ebene der entsprechenden Wirbelsäulensegmente in Form einer Hypo-/Hyperkyphose bzw. Hypo-/Hyperlordose ist meistens vorhanden [3].

Bei spontanem Auftreten einer Skoliose ohne erkennbare Ursache spricht man von einer idiopathischen Skoliose. Diese ist bei weitem der häufigste Skoliosentyp im Jugendalter. Trotz der idiopathischen Natur der Skoliose ist es möglich, das Risiko für ein Fortschreiten der Krümmung einzuschätzen und gute Behandlungsmethoden festzulegen [1].

Eine genaue Definition der normalen physiologischen Kyphose und Lordose ist schwierig. Stagnara sprach aufgrund der relativ großen Bandbreite von einer individuellen Physiognomie [9]. Eine Kyphose zwischen 20° bis 50° gilt in den thorakalen Wirbelsäulenabschnitten zwischen dem Brustwirbelkörper (BWK) 1 bis 12 als normal. Bedingt durch Schulterüberlagerung ist die Beurteilung und Messung der oberen Wirbelsäulenabschnitten allerdings erschwert [10]. In der 2001 vorgestellten Lenke-Klassifikation der AIS wurde eine Kyphose $10-40^\circ$ zwischen BWK 4-12 als normal gesehen, weniger als 10° wurde als Hypokyphose und mehr als 40° als Hyperkyphose eingestuft [11].

Die physiologische Lordose kennzeichnet die zervikalen und lumbalen Wirbelsäulenabschnitte. Man spricht von einer normalen lumbalen Lordose zwischen $40-70^\circ$. Weniger als 40° wird als Hypolordose und mehr als 70° als Hyperlordose betrachtet [10].

1.3 Inzidenz, Prävalenz und Geschlechterverteilung

AIS kann bei etwa drei Prozent der Kinder und Jugendlichen unter 16 Jahren, in der Regel im frühen Jugendalter festgestellt werden. Krümmungen größer als 40° treten in weniger

als 1 pro 1000 auf [12]. Es wird geschätzt, dass AIS ca. 80% von den gesamten Skoliosen darstellen [1].

Mädchen sind häufiger betroffen als Jungen. Die Verteilung liegt bei 6:1 und steigt bis auf 10:1 für Skoliosen mit mehr als 30° [3].

1.4 Ätiologie

Trotz jahrzehntelanger Forschung konnte eine spezifische Ursache der adoleszenten idiopathischen Skoliose nicht gefunden werden. Es ist von einer multifaktoriellen Ätiologie der AIS auszugehen. Das vermehrte Auftreten bei Verwandten und bis zu 70% Inzidenz bei eineiigen Zwillingen lassen eine hereditäre Ursache der AIS vermuten [13]. Eine Reihe möglicher genetischer Loci wurde identifiziert, was zu der Schlussfolgerung führt, dass es sich bei der idiopathischen Skoliose um eine komplexe genetische Störung handelt, bei der genetische Faktoren mit Umweltfaktoren und dem Wachstum der Patienten interagieren, um eine Wirbelsäulendeformität zu erzeugen [1, 14, 15].

1.5 Skelettwachstumszeichen

Ein entscheidender Faktor für die Progredienz und Prognose der adoleszenten Skoliose ist die Skelettreife. Bei Einsetzen der Menarche ist noch für ca. 2 Jahre ein Wirbelsäulenwachstum zu erwarten [3]. Für eine genauere Abschätzung ist die Beurteilung der Wachstumsfugen an einer Röntgenaufnahme des Handskeletts nach Greulich und Pyle möglich [16]. Eine einfachere und praktische Methode zur Beurteilung der Skelettreife ohne zusätzliche röntgenologische Belastung ist das Risserzeichen [17, 18]. Dabei wird der Verknöcherungsgrad der Beckenkammmapophysen auf den Wirbelsäulenganzaufnahmen bestimmt (Abb. 1).

Risser-Klassifikation

Risser 0: Keine Verknöcherung des Beckenkamms

Risser 1: Verknöcherung der lateralen Apophyse, weniger als ein viertel

Risser 2: Verknöcherung der lateralen Hälfte der Beckenkammmapophyse

Risser 3: Verknöcherung bis zu drei Viertel der Beckenkammmapophyse

Risser 4: Verknöcherung der gesamten Beckenkammmapophyse ohne vollständige Fusion

Risser 5: Vollständige Fusion und Verknöcherung der Beckenkammmapophyse

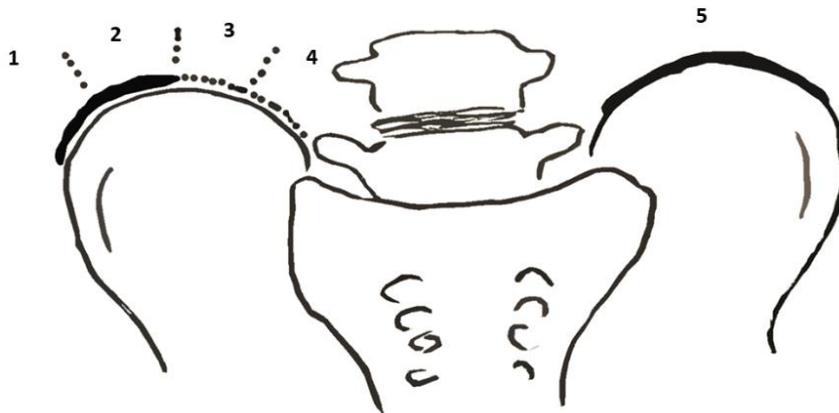


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Risser-Klassifikation (Illust. M. Farag).

1.6 Prognose und Prävention

Skoliosen mit weniger als 30° nach Abschluss der Skelettreife werden als stabil betrachtet. Bei mehr als 50° ist allerdings mit einer Progredienz zu rechnen [19-21]. Weinstein et al. dokumentierte eine Verschlechterung der lumbalen Krümmungen schon bei 30° und der thorakalen mehr als 50° bei Erwachsenen mit einer Rotation des Scheitelwirbels von 30° [22].

Eine präventive Maßnahme für AIS ist bisher nicht bekannt. Bei frühzeitiger Diagnosestellung und konservativer Behandlung kann allerdings die Prognose verbessert werden [3, 23].

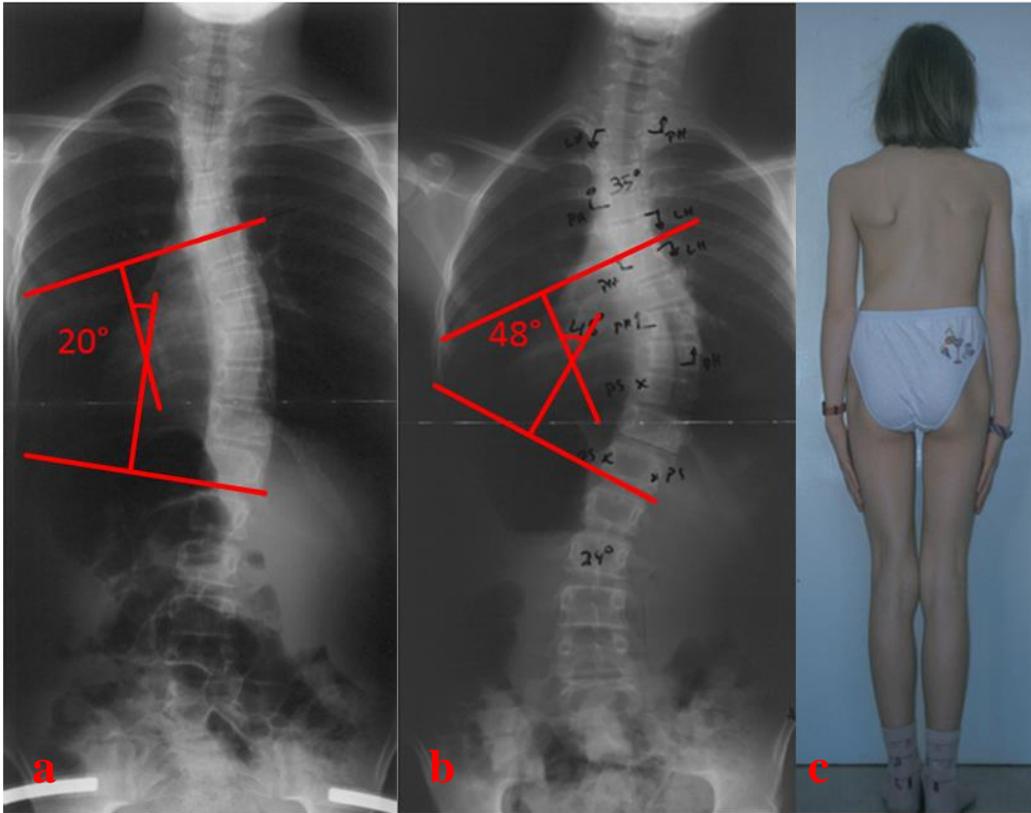


Abbildung 2. Spontanverlauf einer adoleszenten idiopathischen Skoliose mit einer beginnenden thorakalen Krümmung bei einem 8-jährigen Mädchen (Abb. 2a). Trotz konservativer Behandlung ist eine Verschlechterung der Skoliose nach 4 Jahren zu beobachten (Abb. 2b und c) (Datenbank der Zentralklinik Bad Berka, Wirbelsäulenchirurgie).

1.7 Klassifikationssysteme

Über die Jahre erschienen mehrere Klassifikationssysteme für die AIS. Es besteht bis zum heutigen Tag kein Konsens über das beste Einteilungssystem [5]. Die verschiedenen Klassifikationen versuchen, einen einheitlichen Maßstab zur Beurteilung der Skoliosen zu erstellen, um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Studien sowie Therapieverfahren der AIS zu ermöglichen [24]. Dafür sind von besonderer Bedeutung die Reproduzierbarkeit und die Reliabilität. Während erstere als ein Intraobserver-Zuverlässigkeitsparameter dient, ist letztere ein Interobserver-Zuverlässigkeitsparameter. Die Klassifikationssysteme basieren meistens auf die röntgenologischen Untersuchungen der AIS [25].

Einteilung der idiopathischen Skoliosen nach Zeitpunkt des Auftretens

Idiopathische Skoliosen können nach Alter beim ersten Auftreten eingeteilt werden.

- Infantile Skoliose, bei Neugeborenen und Säuglingen jünger als 3 Jahre
- Juvenile Skoliose, bei Kinder zwischen 3 und 9 Jahren
- Adoleszente Skoliose zwischen 10-18 Jahren

Für diese Arbeit wurde der Schulterstand bei adoleszenten idiopathischen Skoliosen vor und nach Korrekturingriffen untersucht.

Einteilung nach Lokalisation und Richtung der Hauptkrümmung

Hier wird differenziert zwischen thorakaler, thorakolumbaler und lumbaler Hauptkrümmung. Meistens sind die idiopathischen Skoliosen thorakal rechtskonvex, thorakolumbal und lumbal jedoch linkskonvex gekrümmt.

Die Mehrheit der wissenschaftlichen Arbeiten über den Schulterstand bei Skoliosen beschäftigen sich mit den thorakalen Krümmungen (Lenke-Typ 1 und 2) [2, 5, 7]. In dieser Arbeit wurden sowohl die thorakalen als auch die lumbalen strukturellen Krümmungen (Lenke-Typ 3, 4, 5 und 6) ausgewertet.

Strukturelle Krümmung versus nicht strukturelle (Gegen-) Krümmung

Für die Planung der operativen Korrektur ist die Differenzierung zwischen strukturellen Krümmungen und kompensatorischen Krümmungen wichtig. Strukturelle Kurven lassen sich mechanisch nicht mehr vollständig ausgraden. Das Ausmaß der Rigidität wird durch die Korrektur im Bending-Test festgestellt. Kompensatorische Krümmungen sind initial völlig ausgradbar und zeigen bei Adoleszenten auch nach längerem Verlauf eine gute spontane Korrigierbarkeit, so dass sie nicht in die Korrekturspondylodese einbezogen werden müssen [3, 11, 19].

Die dynamische Entwicklung der kompensatorischen nicht strukturellen Krümmungen nach Korrekturspondylodese bei AIS und deren Relevanz für die Schulterbalance wurde in dieser Studie untersucht.

1.7.1 Klassifikation nach Ponseti

1950 präsentierten Ponseti und Friedman die erste Klassifikation der AIS. Diese Klassifikation war eher deskriptiv. Die Lokalisation der Skoliose wurde dabei erwähnt (thorakal, thorakolumbal und lumbal). Außerdem wurde dabei die Anzahl der Krümmungen (ein, zwei oder drei Krümmungen) beschrieben. Damit konnten Zusammenhänge zwischen der Lokalisation und Art der Krümmung festgestellt werden. S-Förmige Skoliosen und lumbale Krümmungen hatten dann eine schlechtere Prognose [26].

1.7.2 King-Klassifikation

1983 stellte King et al. die erste systematische Klassifizierung der idiopathischen Skoliose bei Adoleszenten vor [27]. Bei der Tabelle 1 und Abbildung 3 werden die verschiedenen Typen der King-Klassifikation dargestellt.

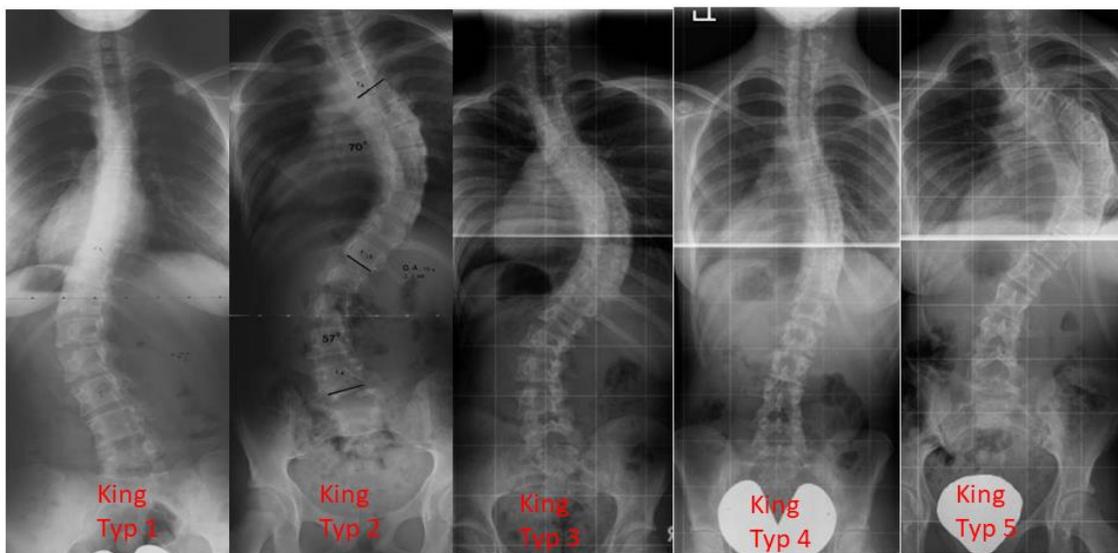


Abbildung 3. Beispiele für Krümmungstypen 1-5 nach der King-Klassifikation für adoleszente Skoliose (aus der Datenbank, Zentralklinik Bad Berka, Wirbelsäulenchirurgie).

Tabelle 1. King-Klassifikation für adoleszente idiopathische Skoliose (AIS).

| Typ | Beschreibung |
|-----------------|---|
| King Typ I | zeigt eine S-förmige Krümmung, bei der die Mittellinie von der thorakalen und der lumbalen Krümmung überquert wird. Die lumbale Krümmung ist größer und rigider als die thorakale Krümmung. |
| King Typ II | zeigt eine S-förmige Krümmung, wobei sowohl die thorakale Hauptkrümmung als auch die lumbale Sekundärkrümmung die Mittellinie überschreiten. Die thorakale Krümmung ist größer. |
| King Typ III | zeigt eine thorakale Krümmung, bei der die lumbale Krümmung die Mittellinie nicht überquert. |
| King Typ IV | zeigt eine langbogige thorakale Krümmung, bei der sich der 5. Lendenwirbel über das Os sacrum (Kreuzbein) zentriert, der 4. Lendenwirbel aber bereits in Richtung der Krümmung gekippt ist. |
| King Typ V | zeigt eine thorakale Doppelkrümmung, wobei sich der 1. Brustwirbel (Th 1) in die Konvexität der oberen Krümmung neigt. |

Die Defizite der King-Klassifikation wurden in mehreren Studien bewiesen [11, 24, 28]. Die fehlende klinische und radiologische Betrachtung der Schulterbalance und des Beckenstandes sowie des sagittalen Profils wurden kritisiert [24].

1.7.3 Lenke Klassifikation

Die King Klassifikation betrachtet die Deformität hauptsächlich in den koronaren Ebenen und ist für eine Klassifikation der thorakalen Krümmungen relativ gut geeignet. Die Skoliose ist allerdings eine dreidimensionale Deformität. Das war das Anlass für die Lenke-Klassifikation, welche 2001 publiziert wurde [11, 28]. Bei dieser Klassifikation wurden Kriterien für die strukturellen und nicht strukturellen proximalen thorakalen, thorakalen und lumbalen Krümmungen nun definiert (Abb. 4 und 5). Die sagittale Ebene wurde zum ersten Mal klassifiziert und als wichtige Komponente der Deformität einbezogen.

| Lokalisation der strukturellen Krümmung | Lenke-Typ |
|---|-----------|
| Hauptthorakal (MT) | 1 |
| Proximal- und Hauptthorakal (PT und MT) | 2 |
| Hauptthorakal und lumbal (MT und L) | 3 |
| Proximal- und Hauptthorakal sowie lumbal (PT, MT und L) | 4 |
| Lumbal (L) | 5 |
| Thorakal und lumbal (MT und L) | 6 |

| Verhältnis vom CSVL zum apikalen Wirbel | Lumbar Modifier |
|---|-----------------|
| CSVL zwischen den Pedikeln | A |
| CSVL trifft den konkaven Pedikel | B |
| CSVL lateral zu der Konkavität | C |

| Winkel zwischen BWK 5 und 12 | Sagittal Modifier |
|------------------------------|-------------------|
| < 10° | Hypo |
| 10-40° | Normal |
| > 40° | Hyper |

MT: main thoracic (hauptthorakal), PT: proximal thoracic (proximal thorakal), L: lumbar (lumbal), CSVL: central sacral vertical line (mittlere sakrale vertikale Linie).

Abbildung 4. Die Komponenten der Lenke Klassifikation [25].

Krümmungen der AIS sind hier in 6 Kurvenarten I-VI eingeteilt. Zusätze für das sagittale Profil und die lumbale koronare Krümmung sind Bestandteil dieser Klassifikation. Zur Entscheidung über die Kurvenart sind Ganzaufnahmen in 2 Ebenen und Bendingaufnahmen der Wirbelsäule erforderlich. Hauptthorakale Krümmungen (main thoracic, MT) und thorakolumbale / lumbale Krümmungen (thoracolumbar/lumbar TL/L) werden in große strukturelle (major), kleine strukturelle (minor) oder nicht strukturelle Krümmungen unterteilt. Die proximalen thorakalen Krümmungen sind jedoch immer klein. Wichtig ist hier, zu differenzieren, ob die Kurve strukturell oder nicht strukturell ist.

Strukturelle Krümmungen erkennt man an der Rigidität in der Bendingaufnahme mit Restkrümmungen von über 25°. Sollte in der Sagittalebene zwischen Th2-5 oder am thorakolumbalen Übergang zwischen Th10-L2 eine Kyphose von mehr als 20° nachweisbar sein, spricht man auch hier von einer strukturellen Krümmung, selbst wenn eine gute Korrektur in der Koronarebene bei der Bendingaufnahme nachweisbar ist.

Eine Untergliederung der 6 Typen erfolgt durch die lumbalen und sagittalen Zusätze, „lumbar modifier“ und „sagittal modifier“. Der lumbale Modifier wird in Abhängigkeit vom Verhältnis des CSVL (central sacral vertical line, mittlere sakrale vertikale Linie) zu dem stabilen bzw. apikalen Wirbel bestimmt (Abb. 5).

- Lumbaler Modifier A: CSVL verläuft zwischen den Pedikeln des stabilen Wirbels. Der stabile Wirbel bzw. stable vertebra, ist der höchst stehende Wirbel unterhalb der Hauptkrümmung.
- Lumbaler Modifier B: CSVL trifft den konkaven Pedikel des apikalen Wirbels. Der apikale Wirbel ist der Wirbel, welcher am weitesten von der vertikalen Achse abweicht.
- Lumbaler Modifier C: CSVL verläuft lateral zu der Konkavität.

| Curve Type | | | | |
|------------|-------------------|---------------------|------------------------|--|
| Type | Proximal Thoracic | Main Thoracic | Thoracolumbar / Lumbar | Curve Type |
| 1 | Non-Structural | Structural (Major*) | Non-Structural | Main Thoracic (MT) |
| 2 | Structural | Structural (Major*) | Non-Structural | Double Thoracic (DT) |
| 3 | Non-Structural | Structural (Major*) | Structural | Double Major (DM) |
| 4 | Structural | Structural (Major*) | Structural | Triple Major (TM) |
| 5 | Non-Structural | Non-Structural | Structural (Major*) | Thoracolumbar / Lumbar (TL/L) |
| 6 | Non-Structural | Structural | Structural (Major*) | Thoracolumbar / Lumbar - Main Thoracic (TL/L - MT) |

STRUCTURAL CRITERIA
(Minor Curves)

Proximal Thoracic: - Side Bending Cobb $\geq 25^\circ$
- T2 - T5 Kyphosis $\geq +20^\circ$

Main Thoracic: - Side Bending Cobb $\geq 25^\circ$
- T10 - L2 Kyphosis $\geq +20^\circ$

Thoracolumbar / Lumbar: - Side Bending Cobb $\geq 25^\circ$
- T10 - L2 Kyphosis $\geq +20^\circ$

*Major = Largest Cobb Measurement, always structural
Minor = all other curves with structural criteria applied

LOCATION OF APEX
(SRS definition)

| CURVE | APEX |
|---------------|------------------|
| THORACIC | T2 - T11-12 DISC |
| THORACOLUMBAR | T12 - L1 |
| LUMBAR | L1-2 DISC - L4 |

| Modifiers | | |
|-----------------------|-------------------------------|--|
| Lumbar Spine Modifier | CSVL to Lumbar Apex | |
| A | CSVL Between Pedicles | |
| B | CSVL Touches Apical Body(ies) | |
| C | CSVL Completely Medial | |

| Thoracic Sagittal Profile T5 - T12 | | |
|------------------------------------|----------|----------|
| - | (Hypo) | < 10° |
| N | (Normal) | 10°- 40° |
| + | (Hyper) | > 40° |

Curve Type (1-6) + Lumbar Spine Modifier (A, B, or C) + Thoracic Sagittal Modifier (-, N, or +)
Classification (e.g. 1B+): _____

Abbildung 5. Lenke Klassifikation für die idiopathische Skoliose [25].

Der sagittale Modifier wird anhand der Winkelmessung zwischen Th5-Th12 bestimmt:

- $< 10^\circ$: Hypokyphose
- $10-40^\circ$: normale Kyphose
- $> 40^\circ$: Hyperkyphose

Ein positiver Klavikula-Winkel bzw. Schulterhochstand (Clavicle Angle, CA°) ist ein Hinweis auf die strukturelle Natur der proximalen thorakalen Krümmungen.

Als Vorteil dieser Klassifikation gelten die erstmalige systematische Betrachtung des sagittalen Profils und die Festlegung von Kriterien für die strukturellen Krümmungen der AIS. Die Reliabilität dieser Klassifikation wurde in mehreren Studien bestätigt [29, 30].

Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien wurde in dieser Arbeit die Lenke-Klassifikation angewendet, um die Erfassung des Schulterstands im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese einem initialen Skoliosetyp zu zuordnen. Da die Mehrzahl der in dieser Arbeit untersuchten Patienten vor der Fertigstellung dieses Klassifikationssystems operiert wurden, erfolgte die Einteilung nachträglich.

1.8 Behandlung der idiopathischen Skoliose

In Abhängigkeit vom Skoliosenausmaß und Alter des Patienten wird zwischen konservativer (Beobachtung mit Krankengymnastik und Korsettbehandlung) oder operativer Versorgung entschieden [10]. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse des Schulterstandes im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese. Ausschließlich konservativ- und korsettbehandelte Fälle fanden keinen Zugang in diese Studie.

1.8.1 Indikation und Ziele der operativen Versorgung

Die Indikationen zur operativen Intervention bei AIS sind: schnelle Progredienz, Skoliosenausmaß von mehr als 50° thorakal bzw. 35° lumbal, erhebliche Deformität und Rippenbuckelbildung sowie ein schlechtes Sagittalprofil [3]. Das Ziel der

Korrekturspondylodese ist, eine dreidimensionale Korrektur der Deformität und eine Wiederherstellung des sagittalen Profils zu erreichen [31].

1.8.2 Korrekturverfahren

Je nach Krümmungsausmaß, -rigidität und -lokalisierung variierte die operative Versorgung zwischen dorsaler, ventraler oder ventrodorsaler Korrekturspondylodese.

Dorsale Korrekturspondylodese

Es erfolgt die behutsame Bauchlagerung des Patienten. Die Entlastung des Bauches hilft den Blutverlust zu reduzieren. Nach Wischdesinfektion und steriler Abdeckung erfolgt die gerade Mittellinieninzision an der geplanten Korrekturstrecke der Brust- bzw. Lendenwirbelsäule. Nach Darstellung der Dornfortsätze wird eine subperiostale Präparation mit Verlagerung der paravertebralen Muskulatur nach beiden Seiten durchgeführt. Die Facettengelenke und die Querfortsätze werden dargestellt. Für eine solide Spondylodese ist eine gute knöcherne Vorbereitung der Spondylodeseinstrecke sehr

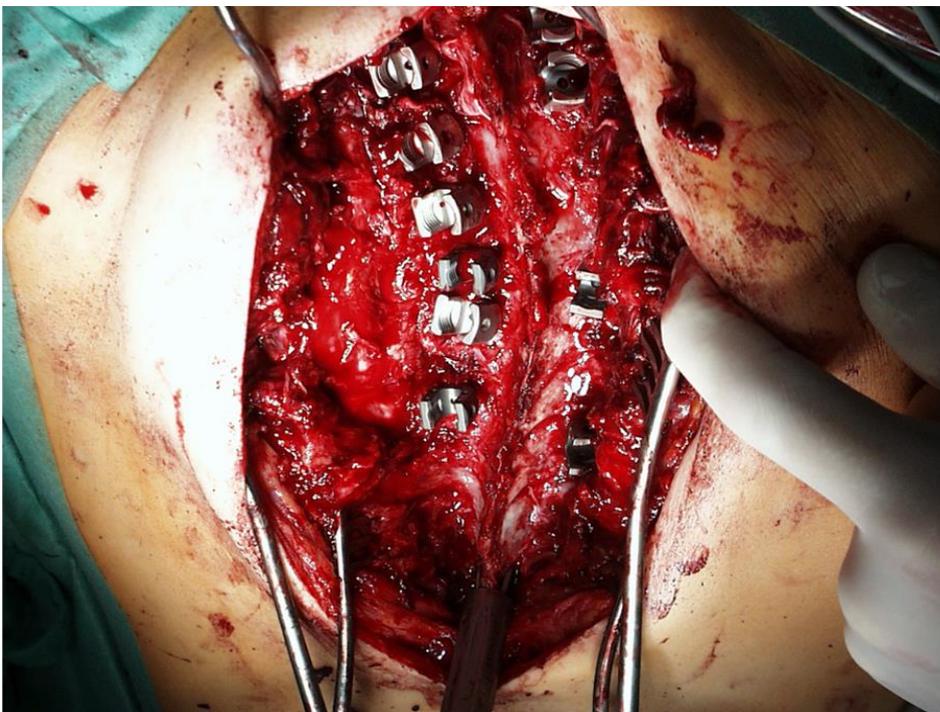


Abbildung 6. Dorsale Korrekturspondylodese.

wichtig. Das Einbringen der Pedikelschrauben bei den eingeschlossenen Patienten dieser Studie erfolgt anatomisch orientiert in Freihandtechnik (Abb. 6). Damit ist die

Strahlenbelastung für den Patienten und Personal deutlich geringer. Die Sicherheit dieser Technik ist auch durch andere Autoren nachgewiesen [3, 32]. Der Bildverstärker (BV)-Einsatz ermöglicht die Kontrolle der Schraubenlage und der geplanten Fusionsstrecke. Nun erfolgt die Facettengelenkabtragung mit oder ohne Osteotomie und die Mobilisierung der Krümmung. Die Stäbe werden zunächst konkav, dann konvex eingebracht und die Korrektur der Skoliose durch Derotation des Apex und Distraction der Konkavität sowie Kompression der Konvexität folgt. Eine autologe Spongiosaplastik ist in den meisten Fällen ratsam. Der Beckenkamm eignet sich in dem Fall als hervorragende Entnahmestelle. Ein schichtweiser Wundverschluss nach Einbringen einer Drainage erfolgt [3].

Ventrale Korrekturspondylodese

In Linksseitenlage erfolgt eine Thorakotomie am oberen Endwirbel, meistens auf Höhe BWK 7/8. Falls notwendig wird eine Thorakoplastie durchgeführt. Diese ermöglicht die Gewinnung von spongiösen Knochen als Autograft und dient als Release für die rigiden Skoliosen. Nach Retraktion der Lunge werden die betroffenen Wirbel dargestellt. Die ventrale Ausräumung der Bandscheiben folgt. Die Schrauben werden ventral bikortikal implantiert und mittels eines Stabes verbunden. Die Korrektur der Skoliose und somit die Wiederherstellung des sagittalen Profils erfolgt nach manueller Derotation durch Kompression über die Schraubenköpfe [33].

Ventrodorsale Korrekturspondylodese

Da die Variante der ventrodorsalen Korrekturspondylodese in Bauchlage bisher wenig verbreitet ist, sei sie im Folgendem kurz dargestellt.

Die ventrodorsale Korrekturspondylodese in dieser Serie erfolgte ausschließlich in einer Lagerung: in Bauchlage. Eine zusätzliche Umlagerung in Seitenlage für den ventralen Anteil wird dadurch eingespart. Ermöglicht wird dies, weil der ventrale Eingriff in endoskopisch assistierter Technik mit gleicher Sicherheit zur Seitenlage auch in Bauchlage durchgeführt werden kann. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Indikation zum zusätzlichen ventralen Release erst gestellt werden muss, wenn nach der dorsalen Mobilisierung keine ausreichende Korrektur erzielt werden kann [34].

Die Pedikelschraubenimplantation erfolgt in gleicher Weise wie bei der allein dorsalen Spondylodese (Seite 12). Bei ventrodorsaler Versorgung kann in aller Regel die Instrumentationsstrecke auf End-zu-End-Wirbel beschränkt werden. Die Mobilisierung der rigiden Krümmungen erfolgt primär mittels Abtragung der Gelenke. Im Weiteren kann eine Osteotomie von dorsal erforderlich werden. Sollte dadurch keine ausreichende Mobilisierung erreicht werden, erfolgt als ventrales Release die Ausräumung der apikalen Bandscheiben, ggf. erweitert durch Resektion des hinteren Längsbandes und der

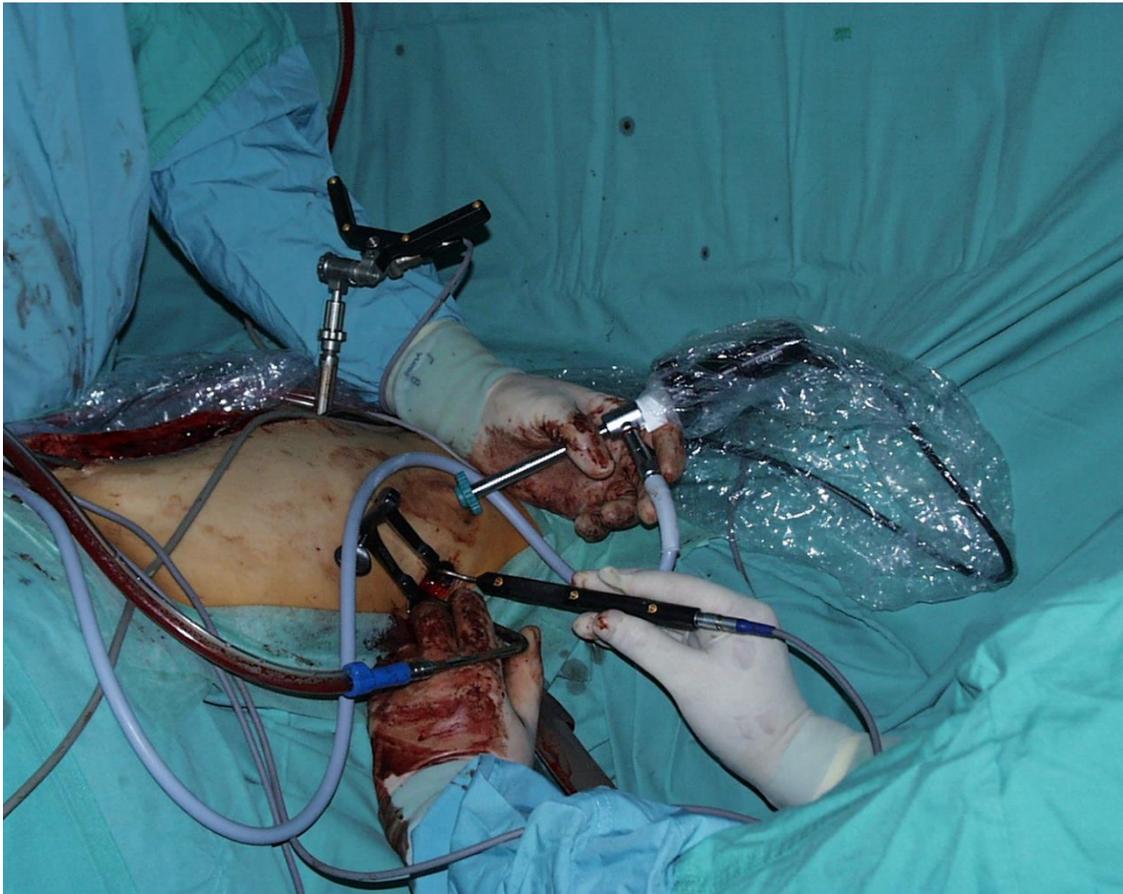


Abbildung 7. Ventrodorsale Korrekturspondylodese bei einer rigiden thorakalen Skoliose.

Rippenköpfchen im Skoliosescheitel in MIC (minimal invasive chirurgische) Technik. Über eine Minithorakotomie (2,5 cm lang) an der Seite der Konvexität wird ein Arbeitskanal eingebracht (Abb. 7). Ein Port für die Optik wird im selben Interkostalraum (1 cm Schnitt) eingeschoben. Nach Entblähen der ipsilateralen Lunge ist der transthorakale Weg zur thorakalen Krümmung gebnet.

Ein aufklappbarer spezieller Lungenretraktor sichert den Zugangsweg und ermöglicht eine gute Darstellung der Wirbelsäule von ventral (Abb. 8a). Die Höhenlokalisierung wird mit einem Bildverstärker gesichert. Nun erfolgen die Inzision der Bandscheibe (Abb. 8b), die Ausräumung des Bandscheibenfaches (Abb. 8c und d), die Mobilisierung der rigiden Segmente und eventuell eine kyphosierende Subtraktionsosteotomie. In den meisten Fällen reicht eine Mobilisierung von drei apikalen Segmenten. Anschließend erfolgt die dreidimensionale Korrektur der mobilisierten Krümmung durch Einbringen der Stäbe

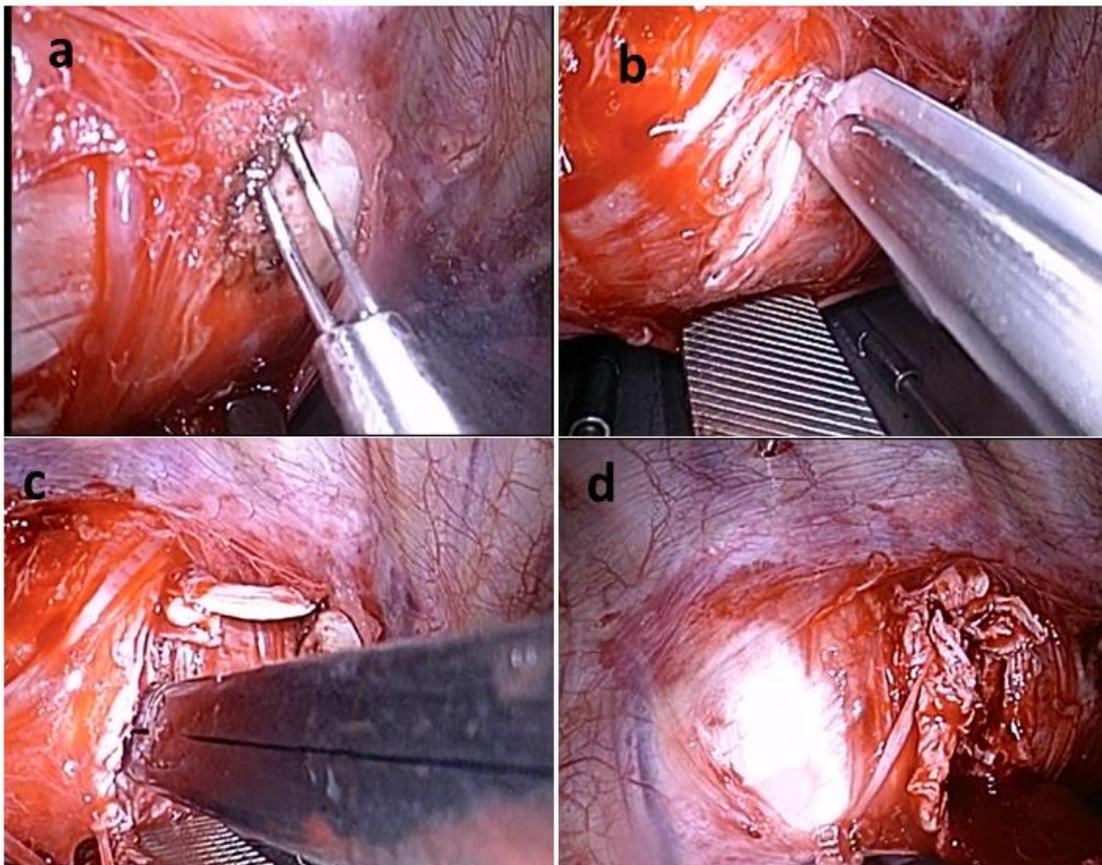


Abbildung 8. Thorakoskopisch ventrales Release in Bauchlage.

über die dorsale Wunde und Kompression bzw. Distraction der Schrauben. Eine Spondylodese durch Einbringen von Spongiosa in die Zwischenwirbelräume von ventral über den MIC-Zugang kann nach erfolgter Korrektur durchgeführt werden [31, 34].

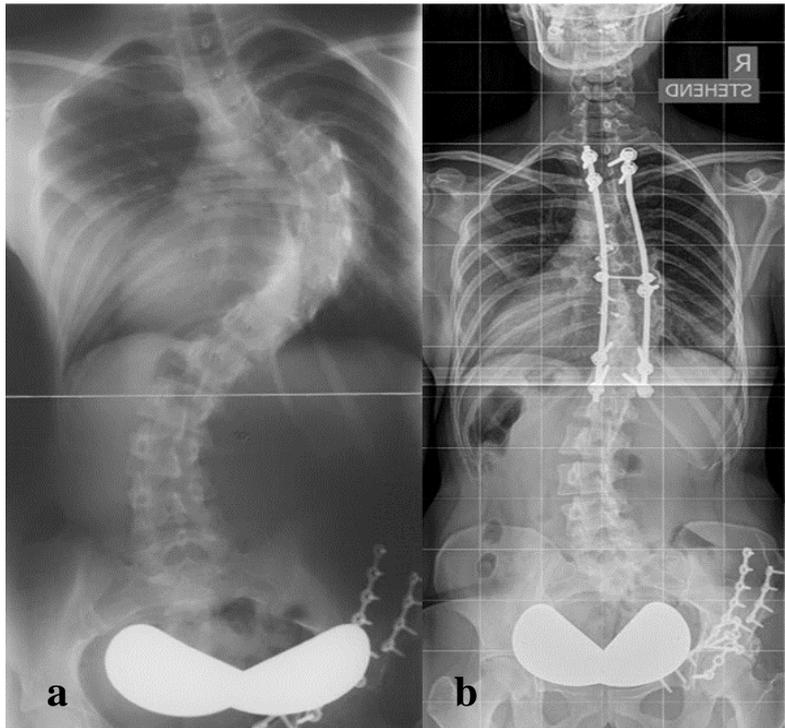


Abbildung 9. Wirbelsäulenganzaufnahmen vor und im Langzeitverlauf nach ventrodorsaler Korrekturspondylodese bei einer rigiden Skoliose.

Abbildung 9 zeigt eine hochgradige idiopathische thorakale Skoliose (Abb. 9a). Während der dorsalen Spondylodese wurde die Entscheidung für ein ventrales Release in Bauchlage (MIC-Technik) getroffen. Dadurch konnte eine gute langfristige (15 Jahre) Korrektur der thorakalen Krümmung erreicht werden (Abb. 9b).

1.9 Der Schulterstand

Der Schulterstand (SS) ist einer der wichtigsten 3 Faktoren, welche eine Wahrnehmung der Skoliosendeformität bestimmen [35]. Eine erfolgreiche operative Korrektur der Seitabweichung und Rotation einer Krümmung führt deshalb nicht automatisch zu Patientenzufriedenheit. Viele Autoren berichten über unzufriedene Patienten trotz eines sehr guten röntgenologischen Korrekturergebnisses bei AIS aufgrund von Schulterasymmetrie [5] (Abb. 10). Schulterdysbalance ist als Asymmetrie der Schultern bzw. eine Schulterhöhendifferenz von mehr als 10 mm zu definieren und stellt keine Seltenheit nach Korrekturspondylodese dar [4, 5].

Seit der Einführung von Instrumentationssystemen der dritten Generation und der zunehmenden Verwendung von Pedikelschrauben wurde eine deutliche Verbesserung der Fusionsrate und Skoliosenkorrektur beobachtet.

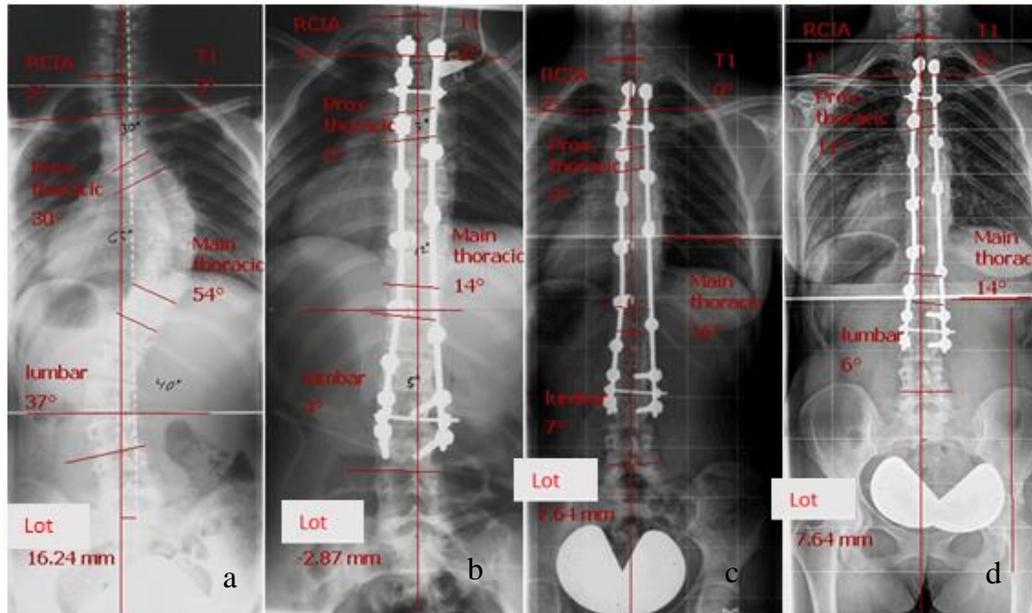


Abbildung 10. Korrekturspondylodese bei doppelthorakal rigider Skoliose mit Schulterdysbalance. Wirbelsäulenganzaufnahmen präoperativ (a), postoperativ (b), 5 Jahre nach der Operation (c) und 20 Jahre (d) nach der operativen Versorgung. Trotz der sehr guten stabilen Korrektur besteht ein Rest-Schulterhochstand rechts (Datenbank der Zentralklinik Bad Berka, Wirbelsäulen Chirurgie).

Dies hat zu Folge, dass Qualitätsparameter und Patientenzufriedenheit mehr ins Licht gerückt werden. Deswegen gewinnt die Schulterbalance zunehmend an Bedeutung. Verschiedene radiologische Parameter werden zur Evaluation des Schulterstandes angewendet. Bisher gibt es allerdings kein Verfahren, welches als Goldstandard zu betrachten wäre.

Unter dem Begriff Schulterbalance wird generell der radiologisch beweisbare Schultergleichstand verstanden. Für die betroffenen Patienten allerdings spielt das Röntgenbild eine sekundäre Rolle. Das Hauptaugenmerk gilt symmetrischen Verhältnissen beim Blick in den Spiegel. Untersuchungen zeigen, dass die Korrelation zwischen den klinischen und radiologischen Parametern des Schulterstandes moderat bis schlecht ist [5]. Deswegen erfolgte in dieser Arbeit sowohl die Evaluation der klinischen als auch der radiologischen Schulterparameter nach Korrekturspondylodese.

2 Fragestellung

Trotz einer guten koronaren Korrektur kann die Schulterdysbalance nach Korrekturspondylodese Patientenunzufriedenheit verursachen. In der Literatur gibt es nur wenige Langzeitstudien zur Beurteilung des Schulterstandes nach Korrekturspondylodese bei adoleszenter idiopathischer Skoliose. Die Mehrzahl der Studien beschäftigen sich mit der Korrektur der Krümmungen und den Instrumentationsebenen. Der Effekt der lumbalen Skoliose und Lotabweichung auf den Schulterstand sind selten analysiert worden. Bei fehlenden Langzeitstudien sind die kompensatorischen Mechanismen der Lendenwirbelsäule und des Lots kaum erfasst worden.

Ziele der vorliegenden Studie sind:

1. die Veränderung des Schulterstands nach operativer Versorgung und Korrekturspondylodese der verschiedenen Lenke-Typen im Langzeitverlauf zu analysieren.
2. den Zusammenhang zwischen der Veränderung des Schulterstands mit den verschiedenen Variablen, wie beispielsweise Lotabweichung, Instrumentationsstrecke, Lenke-Klassifikation und Korrekturverfahren (ventrale, dorsale oder ventrodorsale Zugangswege) zu untersuchen.
3. zwischen dem temporären und persistierenden Schulterhochstand nach Korrekturspondylodese im Langzeitverlauf zu differenzieren.
4. den Effekt der Lendenwirbelsäulenveränderungen auf den Schulterstand zu analysieren.
5. die kompensatorischen Mechanismen der Lendenwirbelsäule und des Lots auszuwerten und die Wirkung der Lotabweichung auf den Schulterstand bei den verschiedenen Lenke-Typen zu dokumentieren.

3 Material und Methoden

3.1 Patientenauswahl

In dieser Arbeit wurden Langzeitverläufe von 103 Korrekturspondylodesen bei AIS ausgewertet. Die operative Versorgung erfolgte in der Zentralklinik Bad Berka, Wirbelsäulenchirurgie zwischen Januar 1994 und Mai 2008.

3.2 Einschluss- und Ausschlusskriterien

Es wurden ausschließlich die adoleszenten Skoliosen idiopathischer Ursache eingeschlossen, bei denen eine vollständige klinische und radiologische Dokumentation des Schulterstandes vorlag. Das heißt, dass nur Patienten mit einem Nachbeobachtungszeitraum von mehr als 10 Jahren analysiert wurden. Auch die insuffiziente Bildqualität war ein Ausschlusskriterium. Sämtliche Skoliosearten der Brustwirbelsäule (BWS) und der Lendenwirbelsäule (LWS) (Lenke-Typen 1-6) wurden ohne Fälle mit nicht idiopathischen Ätiologien (z.B. neuromuskuläre und kongenitale Skoliosen) erfasst.

3.3 Präoperatives Untersuchungsprogramm

Die AIS ist eine Ausschlussdiagnose. Ein standardisiertes präoperatives Untersuchungsprogramm der eingeschlossenen Patienten ermöglichte es, die anderen Ätiologien zu erkennen, und eine gute präoperative Planung zu erreichen. Die präoperative Untersuchung beinhaltete neben der Anamnese die klinische, orthopädische und neurologische Untersuchung sowie die Anfertigung der erforderlichen bildgebenden Untersuchungen.

3.3.1 Das klinische Bild

Anamnese

Eine ausführliche genaue Anamneseerhebung ist unerlässlich. Die wichtigsten Fragen, an die in dieser Arbeit eingeschlossenen AIS-Patienten und deren Eltern, wurden wie folgt zusammengefasst:

- Wirbelsäulenbeschwerden
- Patienten- oder Elternbeobachtung von Schulterhochstand, Brustkorb- und Rumpfasymmetrie sowie Rippenbuckel und Lendenwulst
- Zufriedenheit mit dem eigenen Körper und Profil
- Familienanamnese von Skoliosen bzw. Korrekturspondylodesen bei Verwandten ersten Grades
- Prä- oder intrapartale Probleme oder frühere Krankheiten
- die bisher durchgeführte Behandlung
- Zur Einschätzung des Wachstumspotenzials:
 - o die Körpergröße der Eltern
 - o Datum des Einsetzens der Menarche
 - o Wachstumsschübe in den letzten Monaten

Klinische Untersuchung

Spezifische Inspektion bei AIS beinhaltet:

- das Gangbild, die Körperhaltung und die physiologischen Wirbelsäulenkrümmungen
- das sagittale Profil, insbesondere Hypo- oder Hyperkyphose der BWS
- Erfassung der pubertären Reifezeichen
- Anomalien der Haut, wie Cafe-au-Lait oder Haarnaevi
- Schulterstand und Schulterblattsymmetrie
- Beckenkamm- und Beinlängendifferenz
- Taillendreieckasymmetrie und Rippenbuckel
- Das Lot vom Dornfortsatz des 7. Halswirbels wird inspiziert und eine etwaige Abweichung dokumentiert

Es wurden auf Schmerzpunkte, Muskelhartspann sowie rotationsbedingte Formabweichung wie z.B. Lendenwulst untersucht und analysiert.

Adams-Vorbeuge-Test

Der Adams-Vorneige-Test erleichtert die Erkennung von Skoliose und Wirbelkörperrotation. Mit durchgestreckten zusammengedrückten Beinen wird der Patient aufgefordert, sich langsam nach vorne zu beugen (Abb. 11). Der Untersucher beobachtet das Verhalten der oberen BWS von ventral und des thorakolumbalen Übergangs sowie der LWS von dorsal. Die konvexe Seite der Krümmung lässt sich einfach durch Rippenbuckel oder Lendenwulst erkennen.

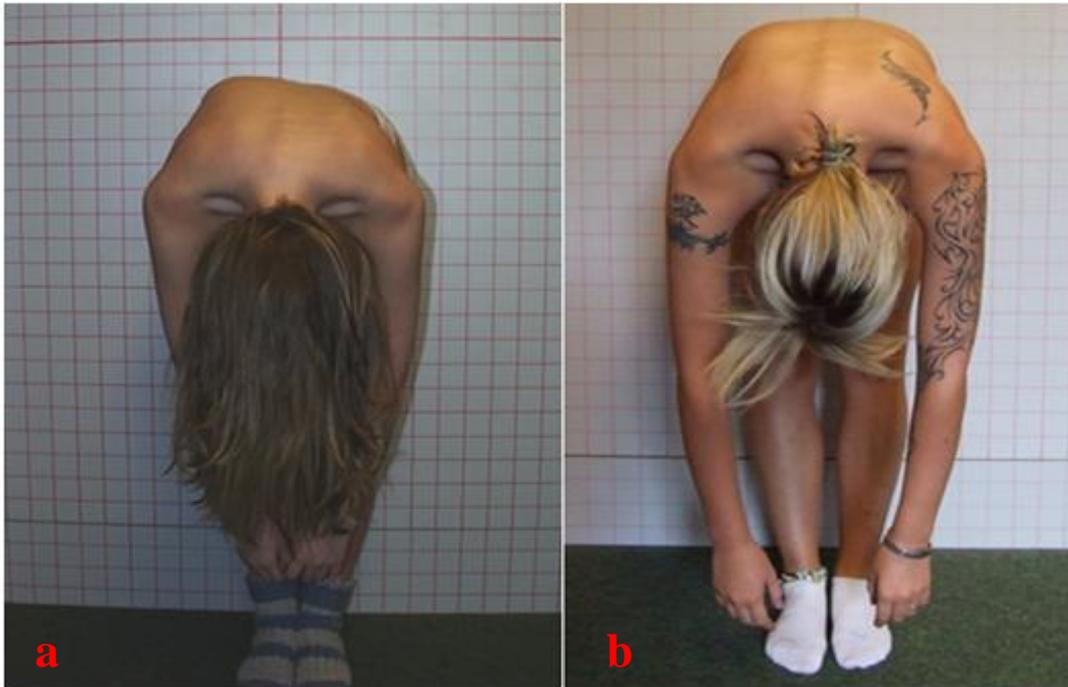


Abbildung 11. Adams-Vorbeuge-Test vor (a) und 10 Jahre nach (b) der Korrekturspondylodese. Es zeigt sich dabei eine deutliche Verbesserung des Rippenbuckels.

3.3.2 Präoperative und postoperative Bildgebungsverfahren

Röntgenaufnahmen

Die standardisierte Bildgebung umfasste eine Wirbelsäulenganzaufnahme in 2 Ebenen und Bendingaufnahmen der Wirbelsäule (Abb. 12). Dabei konnte das Ausmaß, Lokalisation und Kurvenmobilität bzw. -rigidität der Skoliose dargestellt und festgestellt werden.

Die Wirbelsäulenganzaufnahme erfolgt im Stehen. Eine bestehende Beinlängendifferenz wird durch unterlegte Brettchen ausgeglichen und dokumentiert. Postoperativ wurden Ganzwirbelsäulenaufnahmen am 1. oder 2. postoperativen Tag, vor der Entlassung, nach 3 und 12 Monaten, 5 sowie 10 Jahren nach der Operation durchgeführt.

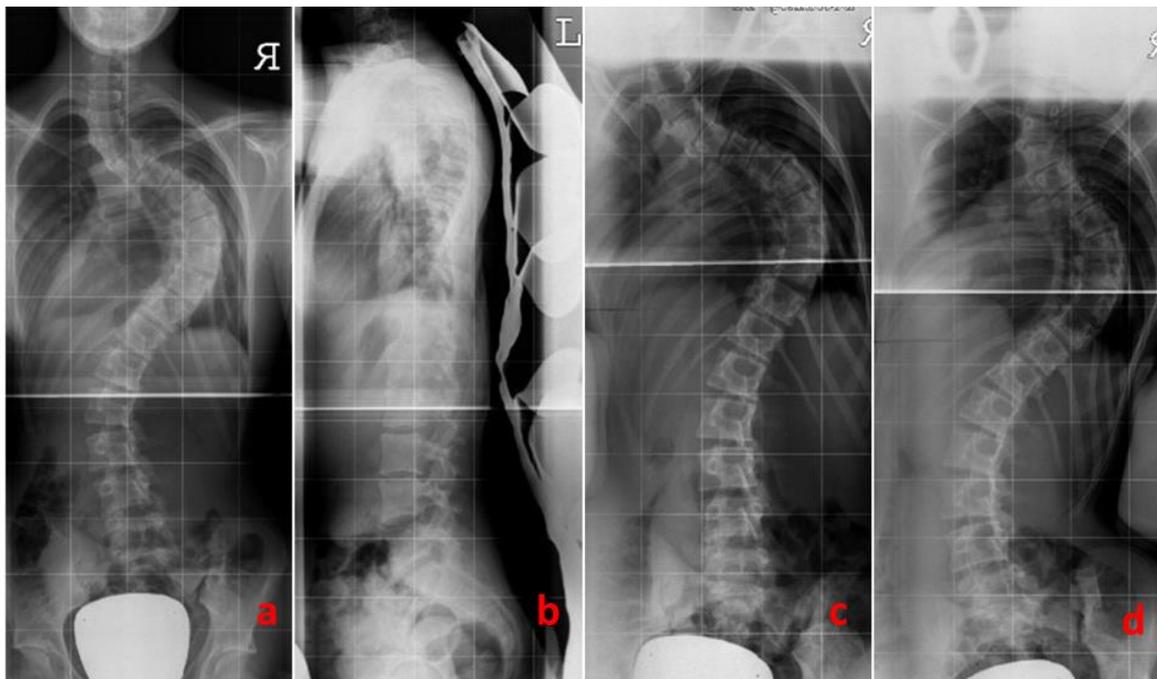


Abbildung 12. Gesamtwirbelsäulenübersicht in 2 Ebenen und Bending-Aufnahmen bei einer adoleszenten idiopathischen Skoliose als präoperative Röntgenbasisdiagnostik bei AIS. Dabei wird die Mobilität der lumbalen Skoliose gegenüber der Rigidität der proximal thorakalen und hauptthorakalen Krümmungen den Bending-Aufnahmen (c und d) eindeutig (Datenbank Zentralklinik Bad Berka, Wirbelsäulenchirurgie).

MRT der gesamten Wirbelsäule

Zusätzlich wurde ein MRT der gesamten Wirbelsäule bei allen Patienten im Rahmen der präoperativen Vorbereitung zum Ausschluss einer kongenitalen Ursache der Skoliose und zur Darstellung des Myelons durchgeführt. Dabei konnte eine strukturelle Veränderung des Myelons ausgeschlossen und gleichzeitig die für die Operationsplanung wichtige Lagebeziehung von neurogenen zu ossären Strukturen dargestellt werden. Entsprechend der festgelegten Einschlusskriterien fanden Patienten mit einer kongenitalen Ursache der Skoliose keinen Eingang in diese Studie. Eine Computertomographie (CT) der geplanten Instrumentationsstrecke war selten notwendig.

3.3.3 Radiologische Beurteilung des Schulterstandes und Messungen

Die folgenden Parameter wurden für die radiologische Auswertung des Schulterstandes anhand der a.p. Wirbelsäulenganzaufnahmen bestimmt:

Cobb-Winkel

Die Scoliosis Research Society (SRS) empfiehlt die Anwendung der Cobb-Methode zur Messung der Krümmung und Kyphose. Zunächst muss der obere und untere Endwirbel bestimmt werden. Dann wird eine senkrechte Linie zur oberen Endplatte des kranialen Wirbels und unteren Endplatte des kaudalen Endwirbels gezeichnet. Der Winkel zwischen den Mittelsenkrechten entspricht dem Skoliosewinkel (Abb. 2) [1].

Für diese Arbeit wurden die Cobb-Winkel für die drei Wirbelsäulenabschnitte in der koronaren Ebene: PT, MT und L gemessen. Die Messungen erfolgten präoperativ, direkt postoperativ, ca. 1 Jahr und im Langzeitverlauf nach der Operation.

Korrekturergebnis der Spondylodesen

Die prozentuale Korrektur der Krümmung wurde für die erwähnten Abschnitte der Wirbelsäule im Langzeitverlauf (durchschnittlich 13 Jahre nach der Operation) durch folgende Formel errechnet:

$$\text{prozentuale Korrektur} = ((\text{Präop. Cobb}^\circ - \text{Cobb}^\circ \text{ nach 13 Jahren}) / \text{präop. Cobb}^\circ) \times 100$$

RCIA (Rib-Clavicle-Intersection-Angle)

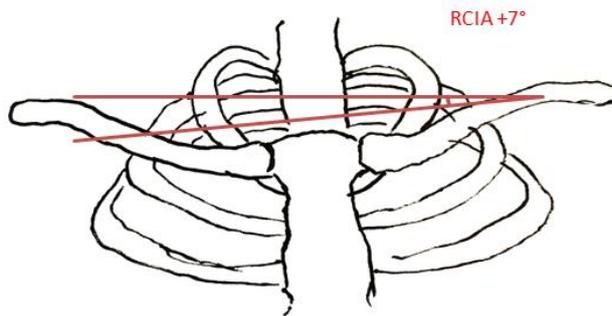


Abbildung 13. Schematische Darstellung des Rib-Clavicle-Intersection-Angles (Illust. M. Farag).

Der Rib-Clavicle-Intersection-Angle (RCIA) ist ein Winkel zwischen der Horizontalen und einer Linie, welche die Schnittpunkte des oberen klavikulären Randes mit dem äußeren Rand der zweiten Rippe beider Seiten verbindet (Abb. 13).

T1-Winkel

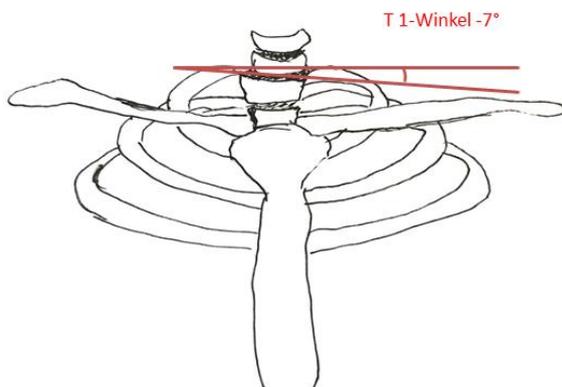


Abbildung 14. Schematische Darstellung des T1-Winkels (Illust. M. Farag).

Der T1-Winkel, auch als T1-Neigung oder T1-Tilt (T1) bekannt, ist der Neigungsgrad der Deckplatte vom ersten Brustwirbel. Der Winkel wird zwischen der Horizontalen und einer Linie entlang der Deckplatte von BWK 1 bestimmt (Abb. 14).

Bei normaler Schulterbalance sind RCIA und T1 parallel und entsprechend 0° . Bei Schulterhochstand signalisiert ein positiver Wert den Hochstand links und ein negativer einen Hochstand rechts. Der RCIA wurde als wichtigstes radiologisches Kriterium für die

Bewertung des Schulterstandes in den prä- und postoperativen Röntgenbildern für diese Arbeit gewählt.

Zentrale sakrale vertikale Linie und Lotbestimmung

Diese Linie, auch bekannt als central sacral vertical line (CSVL), wird an der stehenden Aufnahme bestimmt und läuft senkrecht zu der Horizontalen, beginnend vom Mittelpunkt der S1-Deckplatte. Beinlängendifferenz mehr als 2 cm sollte vor der Aufnahme ausgeglichen werden [10].

In dieser Arbeit wurde die CSVL für die Bestimmung des ‚Lumbar Modifiers‘ für die Lenke Klassifikation verwendet.

Das Lot von C7

Damit ist eine vertikale Linie an der stehenden Aufnahme vom Dornfortsatz C7 fallend auf das Becken gemeint (C7 Plumb line). Maurice et al., betrachtete die C7-Linie als eine der wichtigsten orientierenden Linien der koronaren Balance [24]. Im normalen Fall trifft diese Linie den Mittelpunkt der S1-Deckplatte.

Lotabweichung

Die Lotabweichung wurde definiert als der Abstand zwischen dem Lot vom Mittelpunkt des 7. Halswirbels (C7 Plumb line) und der CSVL. Eine Abweichung von mehr als 2 cm wurde von Ashton-Miller et al. als pathologisch relevant bezeichnet [36]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Lotabweichung nach links als positiv bezeichnet; nach rechts als negativ (Abb. 15).

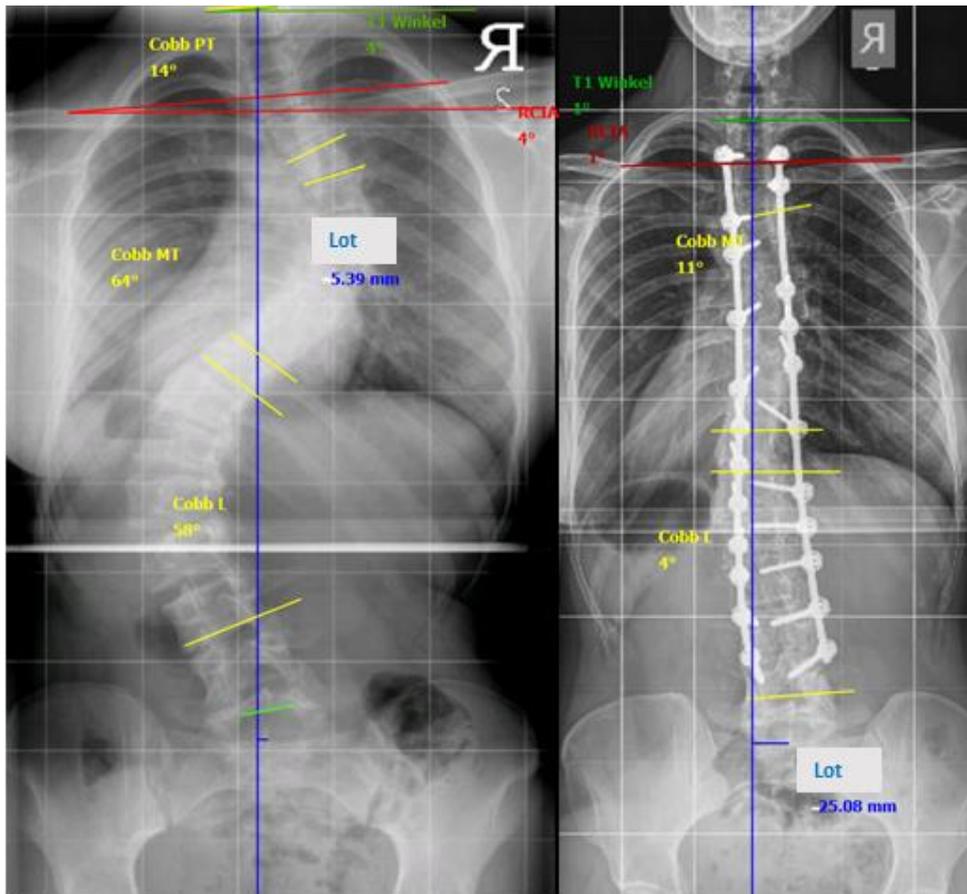


Abbildung 15. S-förmige adoleszente idiopathische Skoliose vor und 10 Jahre nach der Korrekturspondylodese. Korrekturspondylodese von BWK 3 bis LWK 4. Die radiologische Kontrolle 10 Jahre nach der operativen Versorgung zeigt eine sehr gute Korrektur und einen balancierten Schulterstand. Als Kompensation, um die Schultern horizontal zu stellen, weicht der Oberkörper 2,5 cm nach links aus dem Lot. (Datenbank der Zentralklinik Bad Berka, Wirbelsäulen Chirurgie).

Lenke-Typ

Alle eingeschlossenen Fälle wurden anhand der Wirbelsäulenganzaufnahme im Stehen in 2 Ebenen und Bending-Aufnahmen einem Lenke-Typ (1-6) zugeordnet. Damit konnten Zusammenhänge zwischen dem Lenke-Typ und der Schulterbalance (SB) untersucht werden. Außerdem wurden Korrelationen zwischen dem Lumbar Modifier (Seite 10) und Schulterveränderungen untersucht. Eine Eingruppierung der strukturellen Krümmungen bezogen auf die Lokalisation erfolgte auch unabhängig vom Lenke-Typ zur Auswertung von deren Effekt auf den Schulterstand (Abb. 16).

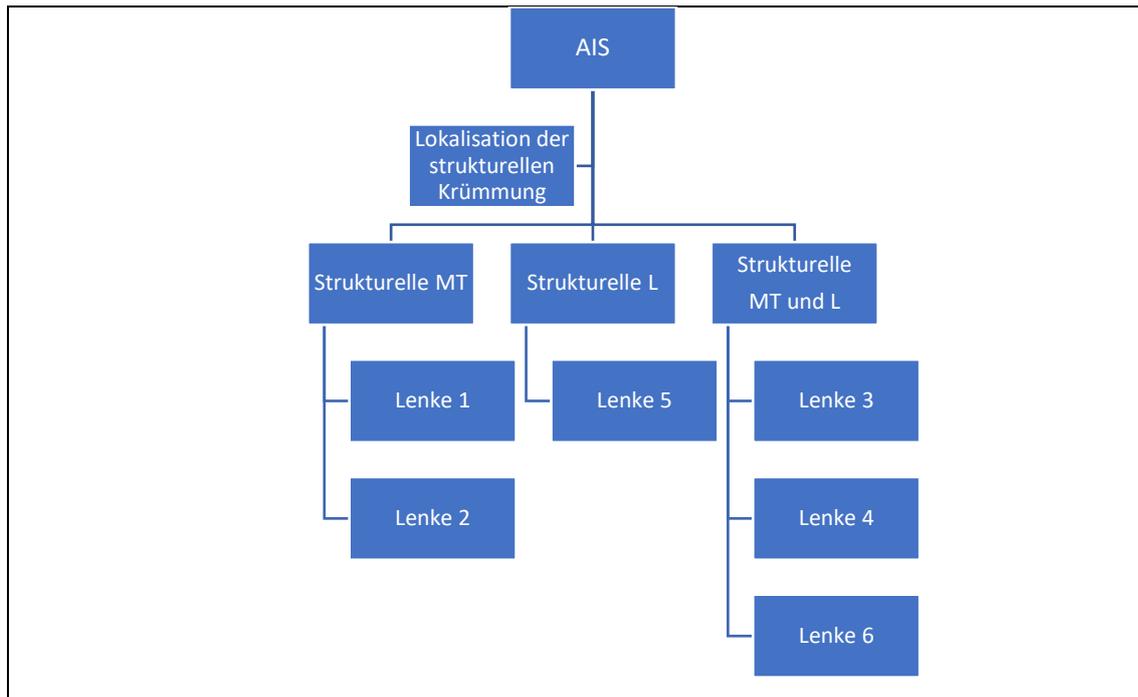


Abbildung 16. Verteilung der hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Krümmungen in 3 Gruppen in Abhängigkeit der Lokalisation unabhängig vom Lenke-Typ (Illust. M. Farag).

3.3.4 Fotografische Dokumentation der AIS

Die standardisierte fotografische Dokumentation im habituellen Stand wurde routinemäßig bei allen idiopathischen Skoliosen durchgeführt. Diese erfolgt nach Aufklärung der Patienten und der Eltern im Rahmen der präoperativen Vorbereitung, postoperativ und bei jeder ambulanten Vorstellung nach der Operation. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Auswertung des Schulterstandes retrospektiv anhand der fotografischen Dokumentationen von vorne.

Für die fotografische Dokumentation stehen die Patienten vor einem standardisierten Raster neutral mit der Blickachse nach vorne gerichtet und den Armen locker hängend. Die Knie sind dabei durchgestreckt. Beinlängendifferenzen (mehr als 3 cm) werden ausgeglichen. Die Kamera wird auf Schulterhöhe des Patienten eingestellt.

Diese Methode bietet auch eine bildgebende Dokumentationsmöglichkeit bei Schwangerschaft oder Ablehnung radiologischer Untersuchungen im postoperativen Verlauf durch die Eltern (Abb. 17).

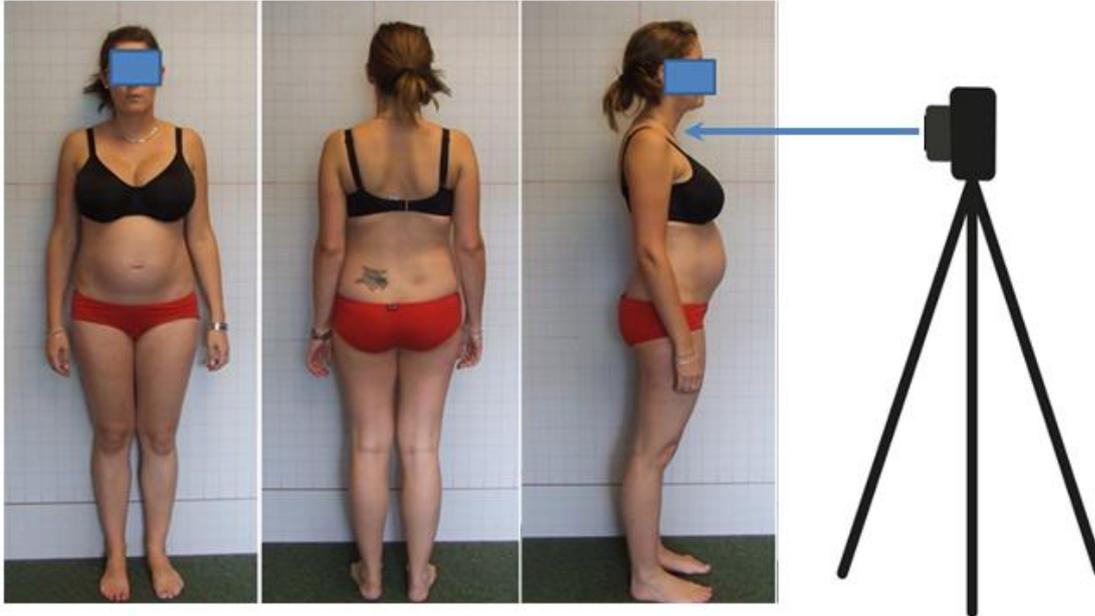


Abbildung 17. Fotografische Dokumentation der Schulterbalance bei Verlaufskontrolle. Die Vorstellung erfolgte 12 Jahre nach der operativen Versorgung. Aufgrund der Schwangerschaft ist eine röntgenologische Untersuchung kontraindiziert. Eine sehr gute Schulterbalance und symmetrische Körperhaltung sind allerdings erkennbar.

Der Klavikula-Winkel

Der Klavikula Winkel bzw. Clavicle Angle (CA) ist der Winkel zwischen der Horizontalen und einer Linie, welche den oberen Rand des Akromions der beiden Seiten verbindet (Abb. 18). Ein positiver Winkel signalisiert einen Schulterhochstand links, ein negativer Winkel rechts [37]. In dieser Arbeit wurde der CA für die klinische fotografische Dokumentation des Schulterstandes verwendet und synchron zum RCIA und T1 im Rahmen derselben ambulanten Vorstellung gemessen. Außerdem erfolgte die Einteilung der Patienten in Abhängigkeit von der CA-Messung in 3 Gruppen: a) Patienten mit neutralem Schulterstand mit einem CA von $0^\circ \pm 1^\circ$, b) kleiner als -1° wurde als

Schulterhochstand rechts, c) größer als 1° Schulterhochstand links betrachtet (Abb. 18 und 19).

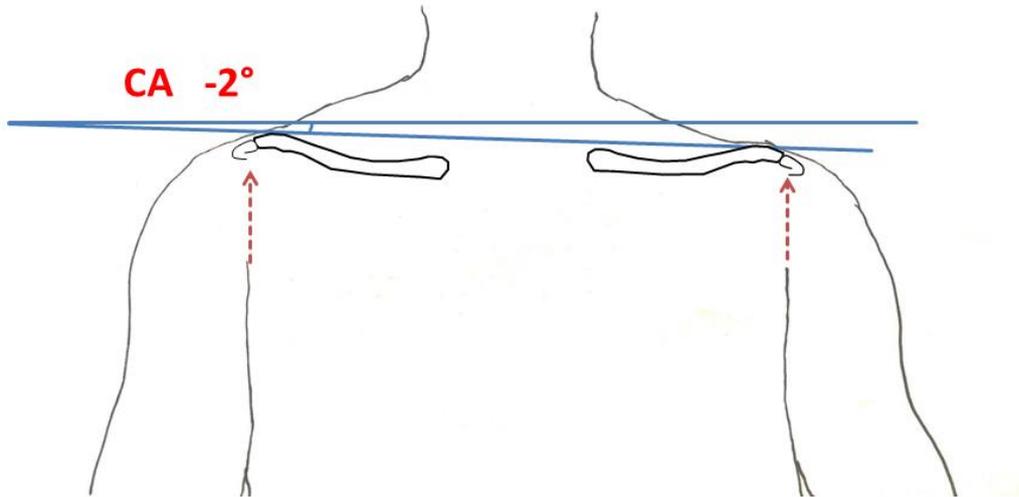


Abbildung 18. Schematische Darstellung des Clavicle Angles (Illust. M. Farag).

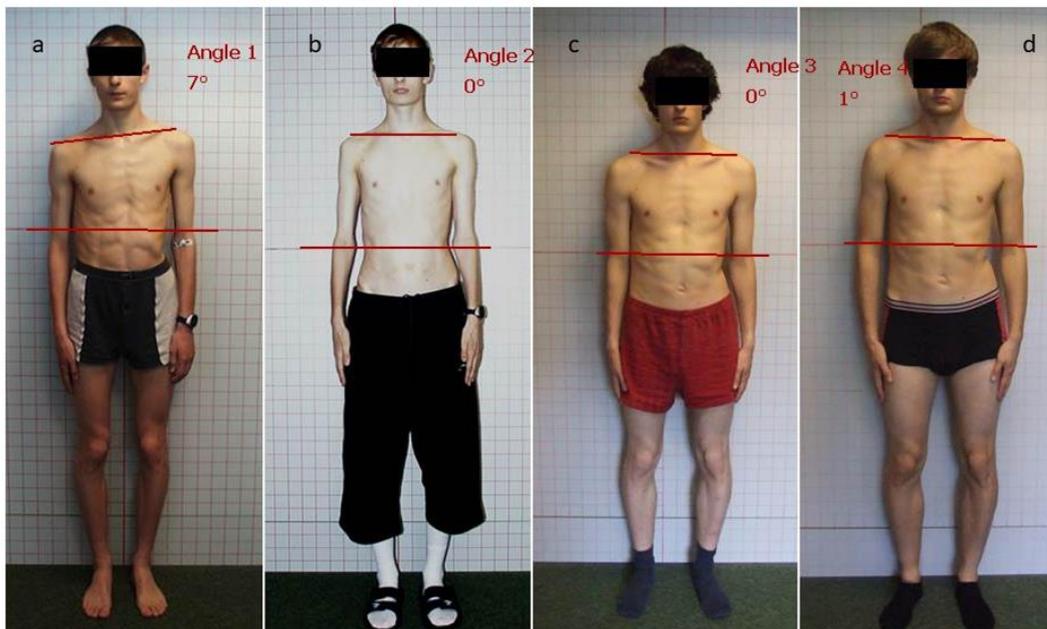


Abbildung 19. Messung des Clavicle-Angles (CA) vor Korrekturspondylodese und im Langzeitverlauf danach. Die klinische fotografische Dokumentation vor (a), postoperativ (b), 1 J (c) und 10 J (d) nach der Operation. Präoperativ bestand ein Schulterhochstand links. Postoperativ konnte eine sehr gute Schulterbalance auch im Langzeitverlauf erreicht werden.

3.4 Schulterbalance spezifische Einteilung

Diese Arbeit beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit dem Schulterstand und dessen Veränderungen vor und nach der Korrekturspondylodese bei AIS. Zur besseren statistischen Auswertung der Korrelationen zwischen den verschiedenen Variablen und der Schulterbalance (SB) wurde die folgende Skala entwickelt.

3.4.1 RCIA-Skala und CA-Skala

Nach einem Punktesystem wurden die Messungen des RCIA's im Röntgen (Abb. 15) und des CA auf den Photographien (Abb. 18 und 19) auf einer Skala von 1-5 eingestuft (Tab. 2). Ein kleinerer Winkel bedeutet bessere Balance und höhere Punktzahl.

Tabelle 2: Rib-Clavicle-Intersection-Angle Skala (RCIA-Skala) bzw. Clavicle-Angle Skala (CA-Skala).

| Gemessene RCIA bzw. CA ° | RCIA-Skala bzw. CA-Skala |
|---------------------------------|---------------------------------|
| | Punkte |
| -1 bis 1° | 5 |
| -2 bis -1° oder 1 bis 2° | 4 |
| -3 bis -2° oder 2 bis 3° | 3 |
| -4 bis -3° oder 3 bis 4° | 2 |
| < - 4° oder >4° | 1 |

3.4.2 Schulterbalance-Skala

Hier werden die klinische Skala (CA-Skala) und die radiologische Skala (RCIA-Skala) addiert.

Schulterbalance Skala = Skala CA + Skala RCIA

Je nach Stand der Schulterpartie vor der OP und im Langzeitverlauf konnten von 2 bis 10 Punkte erreicht werden. Mehr Punkte bedeuten einen besseren Schulterstand. Zehn Punkte erhielt ein Patient mit balancierten Schultern sowohl im klinischen als auch im radiologischen Bild. Weniger Punkte erhielt ein Patient bei Diskrepanz dieser Modalitäten.

Durch die Standardisierung der Schulterbalancemessung konnte dann eine Schulterbalance Änderung für die verschiedenen Gruppen und Einteilungen bestimmt werden.

Schulterbalance Änderung = Schulterbalance Skala im Langzeitverlauf – Schulterbalance Skala vor der OP

In dieser Arbeit befinden sich zwei Betrachtungsweisen der Schultern bei AIS: die Schulterbalance (SB) und der Schulterstand (SS). Die Schulterbalance wurde mittels der SB-Skala ausgewertet. Der Schulterstand wurde mit dem Parameter: CA bestimmt.

3.5 Lot-Skala

Diese dient zur Beurteilung des Profils in der koronaren Ebene bei den verschiedenen Formen der AIS. Die Patienten erhielten je nach Lotabweichung 1 bis 5 Punkte. Dabei wird der maximale Wert 5 erreicht, wenn keine relevante Abweichung vom Lot vorliegt (Tab. 3). Eine Abweichung von +/- 1 cm wurde als Normalbefund definiert.

Tabelle 3. Lot-Skala.

| Abweichung von Lot | Lot-Skala |
|----------------------------------|------------------|
| | Punkte |
| -10 mm bis 10 mm | 5 |
| -20 bis -10 mm oder 10 bis 20 mm | 4 |
| -30 bis -20 mm oder 20 bis 30 mm | 3 |
| -40 bis -30 mm oder 30 bis 40 mm | 2 |
| < -40 mm oder >40 mm | 1 |

3.6 Auswertung der schriftlichen und bildgebenden Dokumentation

Neben radiologischen und klinischen Daten wurden folgende Informationen aus der Datenbank der Zentralklinik Bad Berka, Wirbelsäulenchirurgie, zur Auswertung in dieser Studie herangezogen:

- OP-Datum und Alter der Patienten zum OP-Zeitpunkt
- oberer instrumentierter Wirbel (UIV)
- unterer instrumentierter Wirbel (LIV)
- Anzahl der versteiften Segmente bzw. Versteifungsstrecke
- Operationstechnik (ventral, dorsal und ventrodorsal)

Messungen

Die Auswertung der klinischen und röntgenologischen Bilder erfolgte mit der Software: Surgimap® 2.2.9.9.9 (Nemaris Inc., New York, USA).

Statistische Analyse

Die Patientendaten wurden in Excel-Tabellen (Microsoft ® Excel ® für Office 365, Seattle, USA) erfasst. Für die statistische Auswertung der erhobenen Daten war es notwendig, die Tabellen ins Statistikprogramm SPSS (IBM SPSS Statistics 24.0, Chicago, USA) zu übertragen. Eine limitierte Lizenz von SPSS wurde zur Erstellung dieser Arbeit vom Institut für Medizinische Informatik, Justus-Liebig-Universität Gießen, zur Verfügung gestellt. Die statistische Auswertung in dieser Arbeit wurde entsprechend den Vorgaben von Herr Hudel (Medizinische Informatik, Justus-Liebig-Universität Gießen) durchgeführt.

Der Grad des Zusammenhangs zwischen den verschiedenen metrischen Variablen in dieser Arbeit wurde mit dem Pearson-Korrelationskoeffizienten analysiert. Die statistische Signifikanz wurde für ein Signifikanz-Niveau bei p-Werten kleiner als oder gleich 0,05 angenommen. Für die Erstellung von Diagrammen wurde SPSS verwendet.

3.7 Ethikkommission

Diese retrospektive anonyme Studie wurde der Ethikkommission der Universitätsklinikum Gießen am 07.04.2016 vorgelegt und mit einem positiven Votum versehen (AZ. 51/16).

4 Ergebnisse

Für diese Studie wurden retrospektiv alle operativ versorgten AIS mit Mindest-Nachbeobachtungszeitraum von 10 Jahren und vollständigen Daten untersucht. Es konnten aus dem Zeitraum zwischen Mai 1994 bis Mai 2008 insgesamt 103 operierte Patienten mit vollständigen Verläufen ausgewertet werden. Der durchschnittliche Nachkontrollzeitraum betrug 13 (10-23,1) Jahre.

4.1 Schulterbalance

Schulterbalance präoperativ und im Langzeitverlauf

Die Korrektur der Skoliose war begleitet von einer deutlichen Besserung der Schulterbalance (SB) sowohl unmittelbar postoperativ als auch im Langzeitverlauf. Die Durchschnittswerte der präoperativ erfassten Schulterkala von 5,98 Punkten besserte sich auf 7,94 bei den letzten ambulanten Kontrollen (Tab. 4).

Tabelle 4. Schulterbalance vor der Korrekturspondylodese und 13 Jahre danach, gemessen mit der Schulterkala.

| | N | Minimum | Maximum | Mittelwert | St.abw. |
|------------------------------------|-----|---------|---------|------------|---------|
| Schulterbalance präop. | 103 | 2 | 10 | 5,98 | 2,493 |
| Schulterbalance direkt postop. | 103 | 2 | 10 | 7,22 | 2,380 |
| Schulterbalance 1 J postop. | 103 | 2 | 10 | 7,89 | 2,038 |
| Schulterbalance im Langzeitverlauf | 103 | 2 | 10 | 7,94 | 2,095 |

Schulterbalance und Geschlecht

Die Gruppe setzte sich zusammen aus 85 (82,52%) Frauen und 18 (17,48%) Männern. Beide Geschlechter profitierten von der Korrekturspondylodese und zeigten langfristig einen besseren Schulterstand. Die durchschnittliche Schulterbalance (SB) war bei Frauen besser als bei Männern (8,07:7,33), wobei Männer schlechtere Ausgangswerte hatten (6,08:5,5). Weibliche Patienten standen auch im Langzeitverlauf besser im Lot: Lotskala: 4,51:4,33; (Tab. 5 und Abb. 20).

Tabelle 5. Mittelwerte der Schulterbalance und des Lots für Männer und Frauen.

| Geschlecht | | Schulterbalance (SB) präop. | SB direkt postop. | SB 1 J postop. | SB im Langzeitverlauf | Lot Skala präop. | Lot Skala im Langzeitverlauf |
|------------|------------|-----------------------------|-------------------|----------------|-----------------------|------------------|------------------------------|
| weiblich | Mittelwert | 6,08 | 7,42 | 8,04 | 8,07 | 3,53 | 4,51 |
| | N | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| | Std.abw. | 2,361 | 2,352 | 1,955 | 2,005 | 1,359 | ,684 |
| männlich | Mittelwert | 5,50 | 6,28 | 7,22 | 7,33 | 3,78 | 4,33 |
| | N | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | Std.abw. | 3,073 | 2,347 | 2,340 | 2,449 | 1,114 | ,686 |
| Insgesamt | Mittelwert | 5,98 | 7,22 | 7,89 | 7,94 | 3,57 | 4,48 |
| | N | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 |
| | Std.abw. | 2,493 | 2,380 | 2,038 | 2,095 | 1,31 | ,684 |

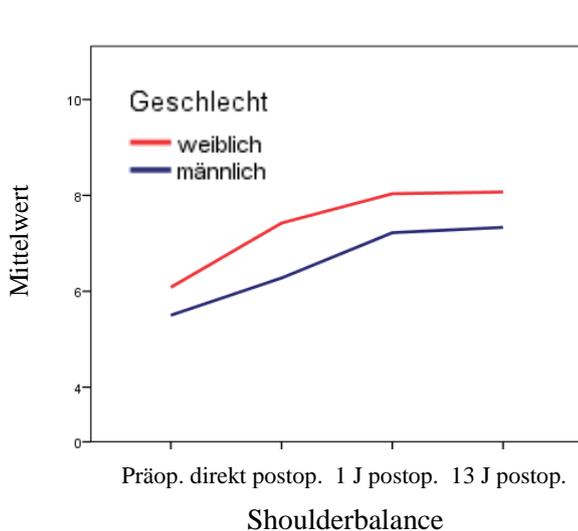


Abbildung 20. Veränderung der Schulterbalance im Langzeitverlauf, nach Geschlecht getrennt.

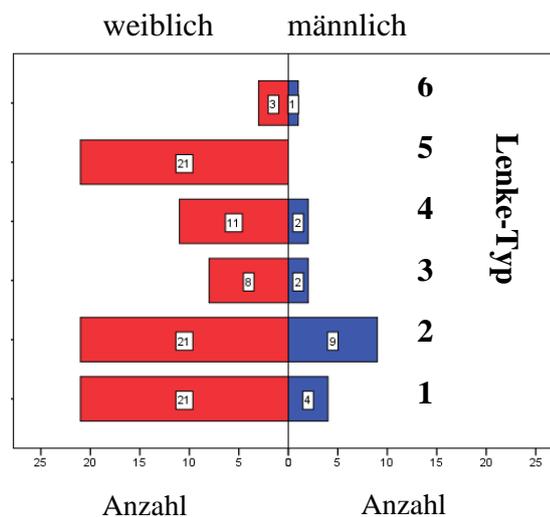


Abbildung 21. Skoliosetypen nach Lenke und deren Verteilung bei Mädchen und Jungen.

Ein Vergleich der Skoliosentypen zwischen Männern und Frauen zeigte, dass die Verteilung auf Typ 1, 2 und 5 mit jeweils 21 Fällen bei weiblichem Geschlecht homogen ist. Bei Männern ist Typ 2 doppelt so häufig wie der Typ 1; eine isolierte lumbale Skoliose (Typ 5) bei Männern lag nicht vor (Abb. 21). Die ausschließlich lumbal lokalisierten Skoliosen Typ 5 waren alle weiblich. Von 18 männlichen Patienten zeigten neun Patienten einen Lenke-Typ 2. Typ 1 konnte in 4 Fällen festgestellt werden. Lenke-Typ 4 wurde bei 13 Adoleszenten dokumentiert (11 weiblich und 2 männlich).

Die Abbildung 22 zeigt die Verbesserung der Schulterbalance nach der Skoliosekorrektur für die männlichen und weiblichen Patienten im Vergleich mit dem präoperativen Zustand. Eine gleichmäßige Verteilung der Schulterbalance konnte präoperativ beobachtet werden (Abb. 22a). Im Langzeitverlauf nach der Korrektur zeigte die Mehrheit der Patienten eine deutlich bessere Schulterbalance (Abb. 22b).

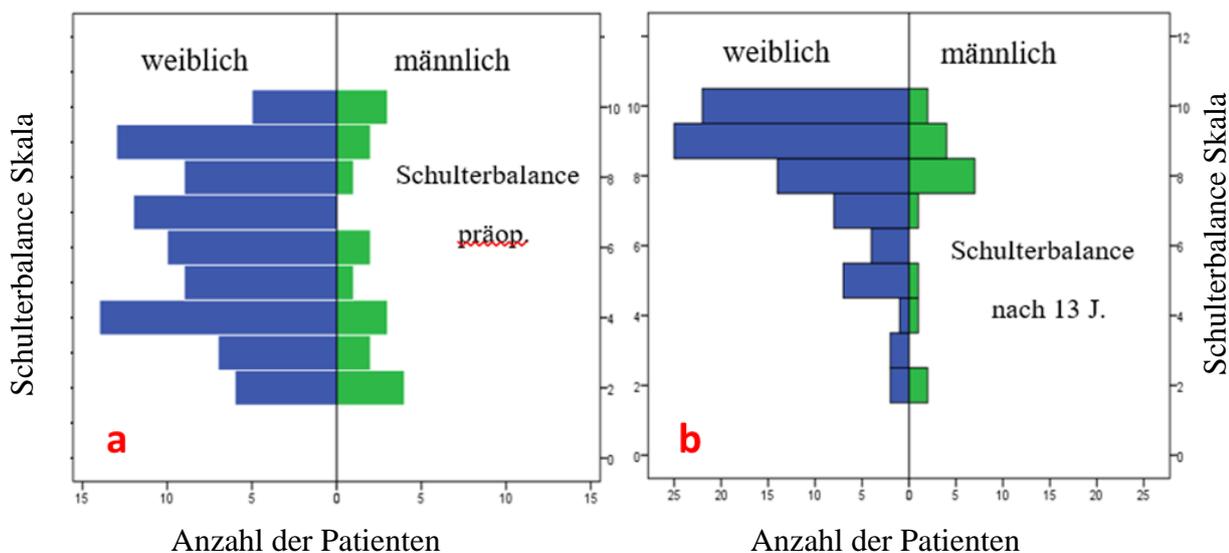


Abbildung 22. Schulterbalance nach Geschlecht getrennt vor der Korrektur und im Langzeitverlauf postoperativ.

Schulterbalance und Skoliosetyp

Alle Krümmungstypen kamen in der vorliegenden retrospektiven Studie vor; 25 Fälle mit thorakal rechtskonvexer Skoliose (Lenke 1), 30 mit doppelthorakaler Krümmung (Typ 2), 10 mit kombinierter Thorakal- und Lumbalskoliose (Typ 3), 13 mit drei strukturellen Krümmungen (Lenke 4), 21 mit lumbaler Krümmung (Typ 5) und 4 Fälle mit Lenke 6 (Abb. 23).

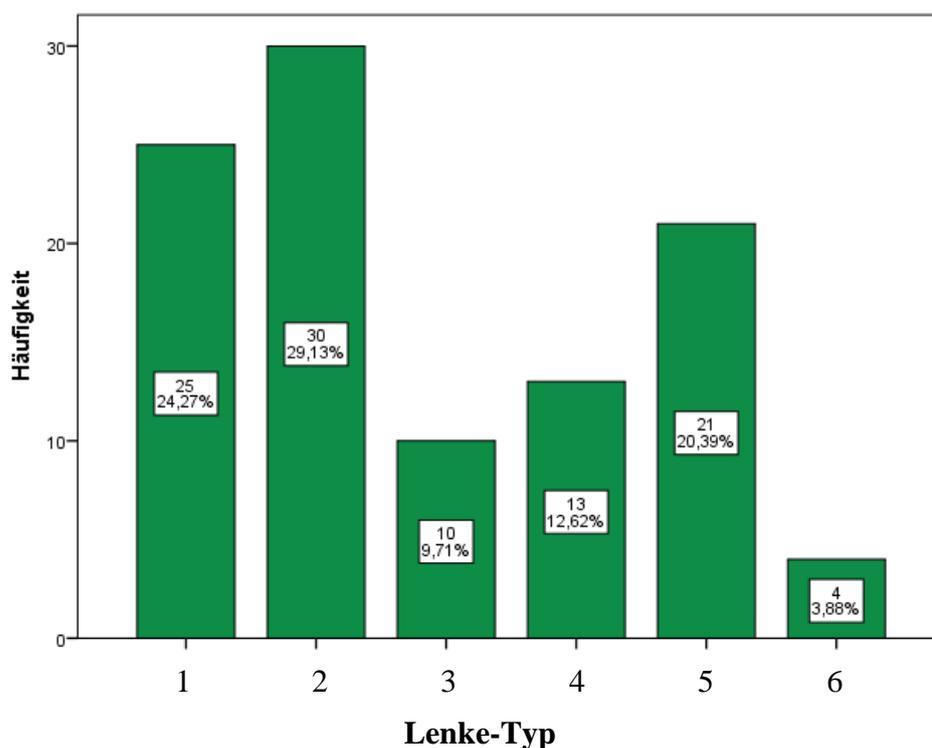


Abbildung 23. Die Verteilung des Krümmungstyps der AIS in der Einteilung nach Lenke.

Eine thorakale Skoliose ohne strukturelle lumbale Beteiligung konnte bei 53,4% der untersuchten Patienten festgestellt werden (Lenke Typ 1 und 2). Eine lumbale Skoliose ohne strukturelle thorakale Beteiligung lag bei 20,39% der Patienten vor. Die kombinierte thorakolumbale Skoliose (Lenke Typ 3, 4 und 6) wurde in 26,21% der Patienten dokumentiert.

Eine Besserung der Schulterbalance im Langzeitverlauf nach der Operation war in allen Gruppen ersichtlich (Tab. 6 und Abb. 24). Präoperativ zeigten die thorakalen Skoliosen (Lenke-Typ 1) eine Schulterbalance von 6,68 Punkte. Diese besserte sich auf 8,16 Punkte im Langzeitverlauf nach der Korrektur. Die Schulterbalance bei den doppelthorakalen Skoliosen (Typ 2) im Langzeitverlauf war leicht schlechter als Lenke 1 (7,5 Punkte), aber deutlich besser im Vergleich mit dem präoperativen Wert (5,93 Punkte). Ein ähnliches Ergebnis zeigten die

lumbalen Skoliosen mit einer Verbesserung der Schulterbalance von 6,38 auf 7,76 Punkte. Den größten Unterschied zwischen den prä- und postoperativen Werten erreichten aber die strukturellen thorakolumbalen Skoliosen. Die Adoleszenten mit Typ 3 besserten sich von 4,9 auf 8,4 Punkte, Typ 4 von 4,9 auf 8 Punkte und Typ 6 von 6 auf 9,5 Punkte.

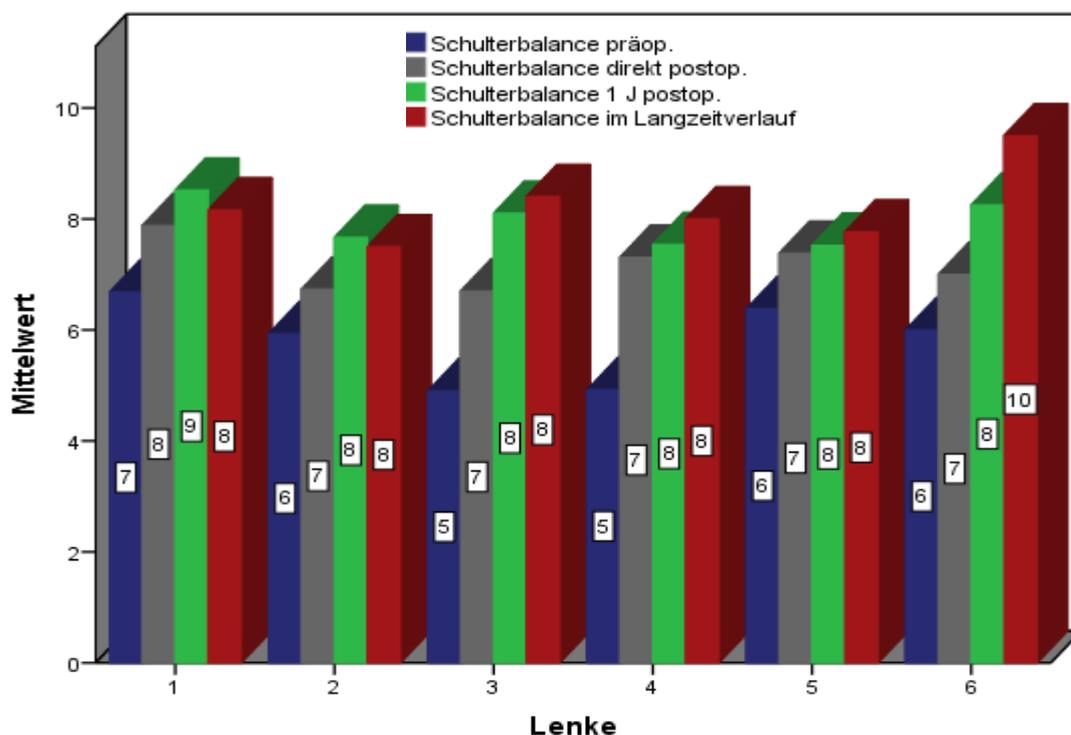


Abbildung 24. Änderung der Schulterbalance vor und nach der Skoliosenkorrektur in Abhängigkeit vom Lenke-Typ.

Tabelle 6. Mittelwerte der Schulterbalance in Abhängigkeit vom Lenke-Typ.

| Lenke-Typ | | Schulterbalance präop. | Schulterbalance (Langzeitverlauf) | Schulterbalance Änderung (Langzeitverlauf) |
|-----------|------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| 1 | Mittelwert | 6,68 | 8,16 | 1,48 |
| | N | 25 | 25 | 25 |
| 2 | Mittelwert | 5,93 | 7,50 | 1,56 |
| | N | 30 | 30 | 30 |
| 3 | Mittelwert | 4,90 | 8,40 | 3,50 |
| | N | 10 | 10 | 10 |
| 4 | Mittelwert | 4,92 | 8,00 | 3,07 |
| | N | 13 | 13 | 13 |
| 5 | Mittelwert | 6,38 | 7,76 | 1,38 |
| | N | 21 | 21 | 21 |
| 6 | Mittelwert | 6,00 | 9,50 | 3,50 |
| | N | 4 | 4 | 4 |
| Insgesamt | Mittelwert | 5,98 | 7,94 | 1,96 |
| | N | 103 | 103 | 103 |

Bei der Abbildung 25 wird die Schulterbalance der verschiedenen Lenke-Typen an vier Untersuchungszeitpunkte festgestellt. Dabei wurde die Schulterbalance-Skala verwendet. Eine deutliche Verbesserung des Schulterstandes erreichten alle Patienten unmittelbar nach der operativen Versorgung. Eine weitere Verbesserung wird bei der ambulanten klinischen Kontrolle nach dem ersten postoperativen Jahr bei allen Patienten dokumentiert. Bei der letzten klinischen Kontrolle der eingeschlossenen Patienten in dieser Arbeit konnte eine leichte Verschlechterung der Schulterbalance bei Lenke-Typ 1 und 2 beobachtet werden. Das war nicht der Fall bei Typ 3, 4 und 6. Bei diesen Skoliosearten konnte eine weitere Besserung des Schulterstandes im Langzeitverlauf festgestellt werden. Adoleszenten mit Lenke-Typ 1 hatten die besten Ausgangswerte der Schulterbalance vor der operativen Versorgung. Lenke 3 und 4 zeigten vor der Operation die schlechteste Schulterbalance in allen Gruppen. Im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese erreichten Patienten mit Lenke Typ 6 die beste Schulterbalance gefolgt von Lenke 3 und Lenke 1.

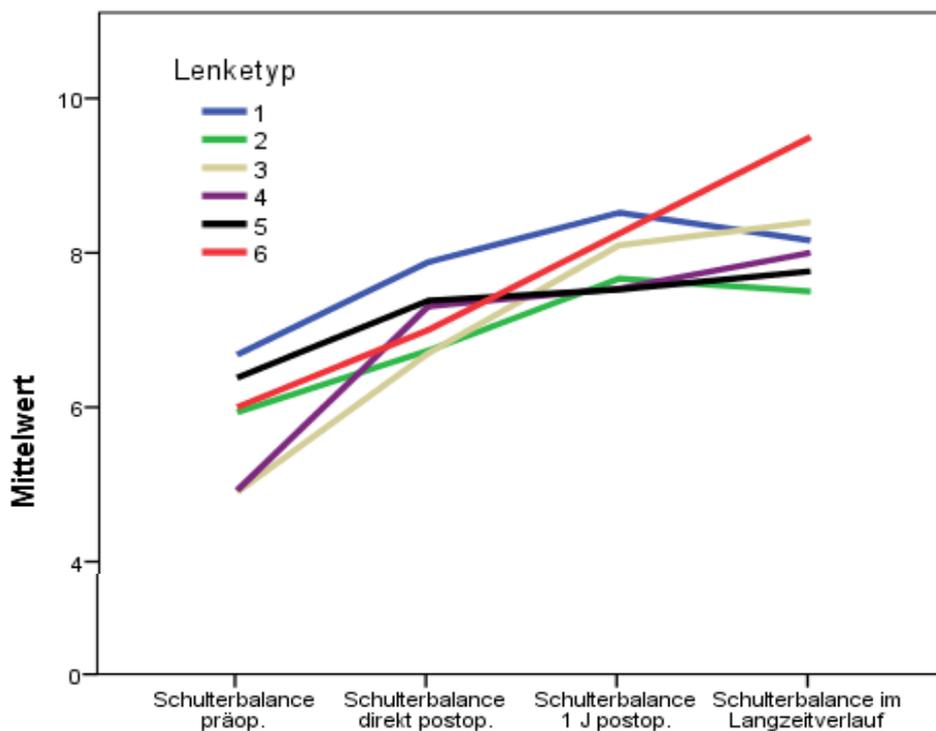


Abbildung 25. Grafische Darstellung der Schulterbalanceveränderung im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese bei den verschiedenen Lenke-Typen.

Eine Übersicht der Skoliosenkorrektur der verschiedenen WS-Abschnitte in den 4 Erfassungszeiträume in Abhängigkeit der Lenke-Klassifikation liefert die Tabelle 7.

Tabelle 7. Mittelwerte der verschiedenen Variablen in Bezug auf den Lenke-Typ.

| Lenke | PT präop. | MT präop. | L präop. | PT nach 13 J | MT nach 13 J | L nach 13 J | Prozentuale Korrektur im Langzeitverlauf | |
|-------|---------------------------|--------------|-------------|--------------------|--------------------|-------------------|--|--------------|
| | Messung nach Cobb in Grad | | | | | | MT | L |
| 1 | 20 | 47 | 28 | 8 | 13 | 11 | 71,25 | 60,58 |
| 2 | 40 | 66 | 32 | 16 | 22 | 11 | 66,09 | 58,88 |
| 3 | 21 | 62 | 51 | 12 | 17 | 11 | 71,73 | 76,38 |
| 4 | 33 | 78 | 45 | 17 | 29 | 15 | 64,44 | 66,17 |
| 5 | 4 | 23 | 44 | 6 | 9 | 8 | 63,69 | 79,16 |
| 6 | 15 | 46 | 54 | 4 | 13 | 10 | 67,81 | 81,14 |

(PT: proximal thorakale, MT: thorakale (main thoracic), L: lumbale, präop: präoperativ)

Die Tabelle zeigt, dass die größte präoperative hochthorakale Krümmung (PT) erwartungsgemäß bei Lenke 2 (double thoracic) lag. Die stärkste präoperative thorakale Hauptkrümmung lag bei Typ 4 (triple major). Die L-Krümmung war bei Lenke 6 am schlimmsten. Im Langzeitverlauf zeigen die AIS mit 3 strukturellen Krümmungen (Typ 4) die größte Restskoliose. Während die thorakale Krümmung in fast allen Gruppen sehr gut korrigiert wurde, gelang das für die lumbale Kurve der doppelthorakalen Skoliose im Langzeitverlauf weniger. Das könnte ein Hinweis auf die kompensatorische Rolle der LWS bei der doppelthorakalen Skoliose nach Korrekturspondylodese sein.

Lumbar Modifier

Der Lumbar Modifier ist eine wichtige Komponente der Lenke-Klassifikation in der Charakterisierung der lumbalen Skoliose (Seite 10). Der Effekt des Krümmungsausmaßes der LWS wurde separat ausgewertet. Die Patienten wurden in 3 Gruppen geteilt: Lumbar Modifier A, B und C. (Abb. 26). Verglichen wurde die Schulterbalanceveränderung vor und im postoperativen Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese bezogen auf den

Lumbar Modifier. Die drei Gruppen zeigten eine Besserung der SB, insbesondere bei starken LWS-Krümmungen B und C. Eine leichte Verschlechterung der Schulterbalance, war aber im Langzeitverlauf in der Gruppe mit der geringgradigen lumbalen Krümmung zu beobachten (Gruppe A).

Strukturelle Krümmung bei AIS

Zur genaueren Beurteilung des Effekts der strukturellen Krümmung auf den Schulterstand erfolgte nach dem Kriterium der Lokalisation der Krümmung die Verteilung der Patienten in 3 Gruppen (Seite 27). Trotz merkbarer Besserung der SB in allen Gruppen zeigten die AIS mit den kombinierten thorakalen und lumbalen Skoliosen die größte Veränderung des Schulterstandes im Vergleich mit den anderen Patienten (Abb. 27). Der Schulterstand verbesserte sich bis zum Ablauf des ersten postoperativen Jahres bei allen Gruppen kontinuierlich. Die strukturellen Skoliosen, welche an der Brustwirbelsäule lokalisiert waren, zeigten eine leichte Verschlechterung der Schulterbalance im Langzeitverlauf im Vergleich mit dem Befund im ersten postoperativen Jahr. Die strukturellen lumbalen und thorakolumbalen Skoliosen zeigten eine kontinuierliche Besserung der Schulterbalance auch im Langzeitverlauf.

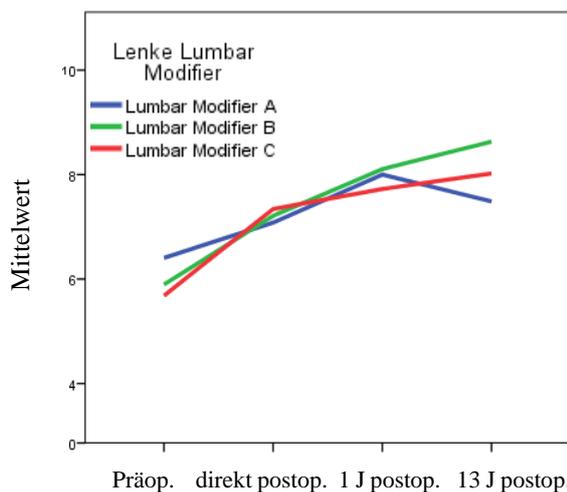


Abbildung 26. Schulterbalancedynamik im Langzeitverlauf bezogen auf den Lumbar Modifier.

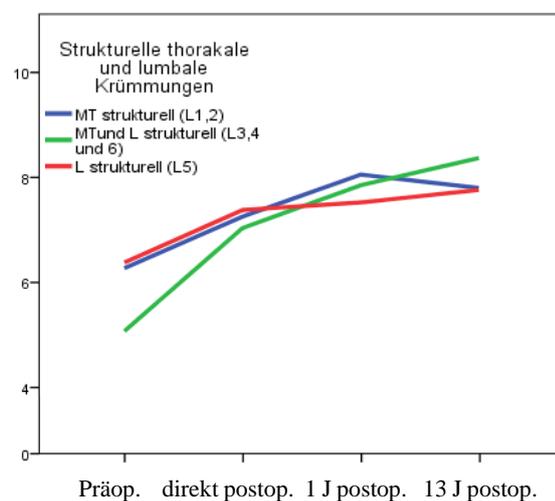


Abbildung 27. Effekt der strukturellen thorakalen und lumbalen Skoliosen auf den Schulterstand im Langzeitverlauf.

Schulterbalance und Korrekturverfahren

Der Zugangsweg für die Korrekturspondylodese variierte in Abhängigkeit von Skoliosenausmaß und -lokalisierung (Seite 12). Es wurden 32 (31,1%) dorsale, 11 (10,7%) ventrale und 60 (58,3%) ventrodorsale Korrekturspondylodosen durchgeführt (Tab. 8).

Tabelle 8. Verteilung der Patienten bezogen auf das operative Verfahren.

| Operationsverfahren | | |
|---------------------|------------|---------|
| | Häufigkeit | Prozent |
| Ventral | 11 | 10,7 |
| dorsal | 32 | 31,1 |
| ventrodorsal | 60 | 58,3 |
| Summe | 103 | 100,0 |

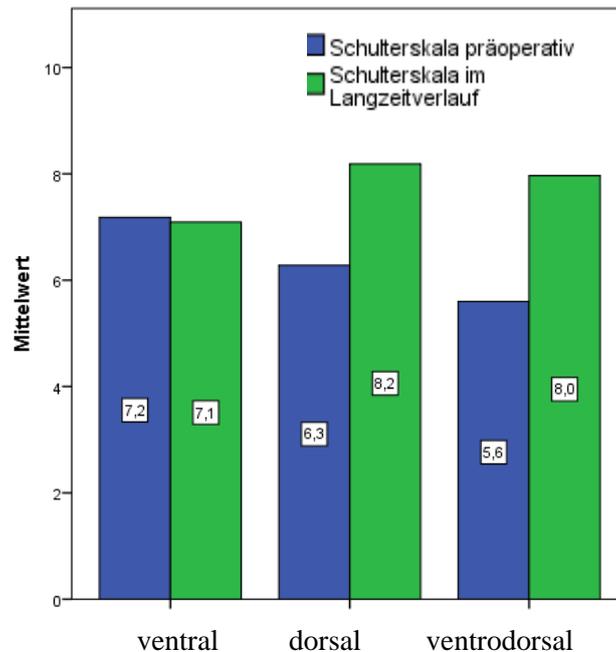


Abbildung 28. Schulterbalance vor und nach der Korrekturspondylodese bezogen auf das Korrekturverfahren.

Vor der Operation hatte die ventrodorsale Gruppe die schlechtesten Ausgangswerte der Schulterbalance (5,6 Punkte). Die ventrale Gruppe zeigte präoperativ die beste Schulterbalance (7,2 Punkte), gefolgt von den dorsalen Korrekturspondylodosen (6,3 Punkte). Die SB-Skala der operativ versorgten AIS lag im Langzeitverlauf bei 8,2 Punkten für die dorsale Korrekturspondylodese. Die ventralen und ventrodorsalen Operationen erreichten im Langzeitverlauf 7,1 und 8 Punkte (Abb. 28). Damit zeigte sich nach allein ventralen Korrekturverfahren später eine leichte Verschlechterung der Schulterbalance, während sich bei ventrodorsal und dorsal operierten Patienten die Schulterbalance im Lauf der Jahre weiter und deutlich verbesserte.

Diese Veränderungen sind deutlicher erkennbar in der Abbildung 29. Die grüne und rote Linie in dieser Abbildung zeigen die deutliche Besserung der Schulterbalance bei den dorsalen und ventrodorsalen Spondylodesen. Diese Besserung trat unmittelbar nach der operativen Versorgung auf und wurde sowohl im ersten postoperativen Jahr als auch im Langzeitverlauf beobachtet. Die Mehrheit der AIS (Tab. 8) in dieser Arbeit wurden dorsal oder ventrodorsal versorgt (89,4%). Die ventrodorsal versorgten Skoliosen (rot) hatten einen schlechteren Ausgangswert, konnten aber fast dieselbe Besserung (wie bei den dorsalen Korrekturspondylodesen) erzielen. Die ventralen Korrekturen (blau) erreichten nach einem Jahr den besten Schulterstand, der sich aber langfristig wieder verschlechterte.

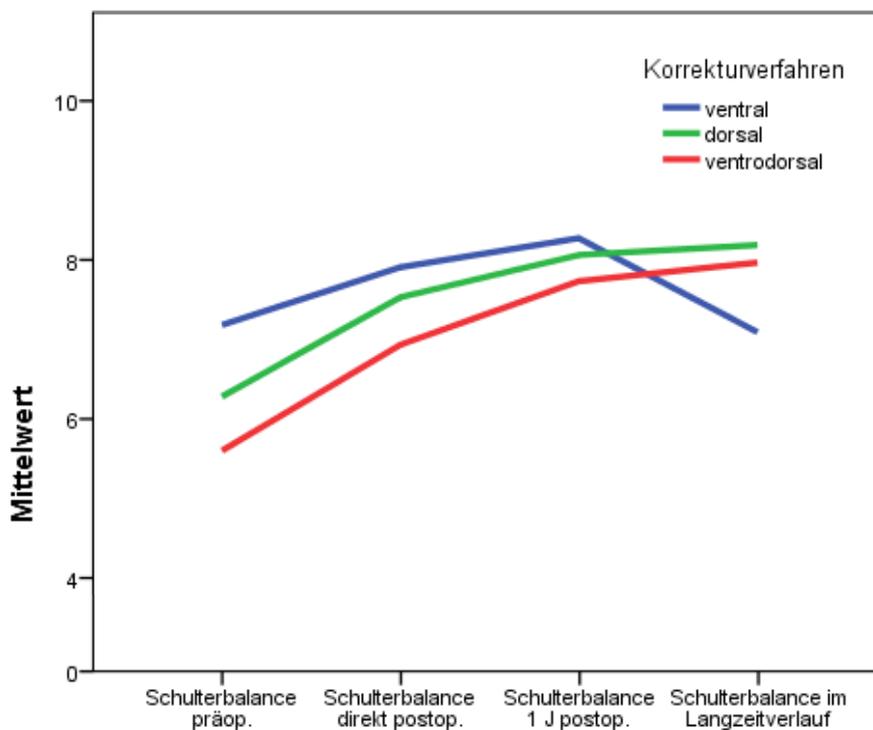


Abbildung 29. Veränderungen der Schulterbalance im Langzeitverlauf bezogen auf den operativen Zugangsweg.

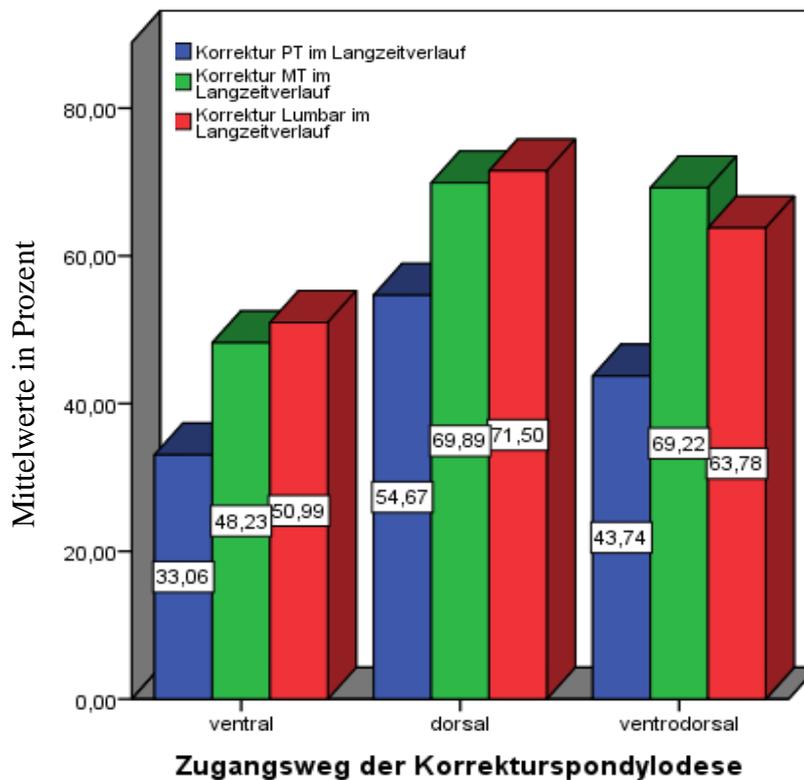


Abbildung 30. Prozentuale Korrektur der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Krümmungen bezogen auf das Korrekturverfahren.

Aufgeschlüsselt auf den Zugangsweg zeigte sich langfristig eine Korrektur der PT-Krümmung von 33,1%, der MT- von 48,2% und der L- von 51% für die ventralen, 54,7%, 69,9% und 71,5% für die dorsalen sowie 43,7%, 69,2% und 63,8% für die ventrodorsalen Spondylodosen. Damit besitzt die ventrale Vorgehensweise die niedrigste Korrektur, während die dorsalen und ventrodorsalen Korrekturen die höchsten Verbesserungswerte aufweisen. Die Korrektur der PT-Skoliose war für die dorsale Gruppe deutlich besser als die ventrodorsale; die MT- und L-Korrektur dagegen nur geringfügig stärker bei den dorsalen Spondylodosen (Abb. 30).

Dieses Ergebnis darf nicht isoliert vom Ausgangsbefund betrachtet werden. Deswegen erfolgte die Analyse der präoperativen PT-, MT- und L-Skoliosen für die drei Zugangswege. Dadurch konnten Schweregrad und Rigidität der Skoliose erkannt werden. Festgestellt wurden für die PT-, MT- und L-Skoliosen durchschnittlichen Werte von 14°,

33°, und 37° für die ventrale, von 18°, 44° und 36° für die dorsale und 29°, 61° und 38° für die ventrodorsale Gruppe. Damit beweist die ventrodorsale Gruppe die beste Korrekturmöglichkeit für die rigiden Skoliosen, insbesondere hochgradige PT- und MT-Skoliosen haben dadurch am meisten profitiert (Abb. 31).

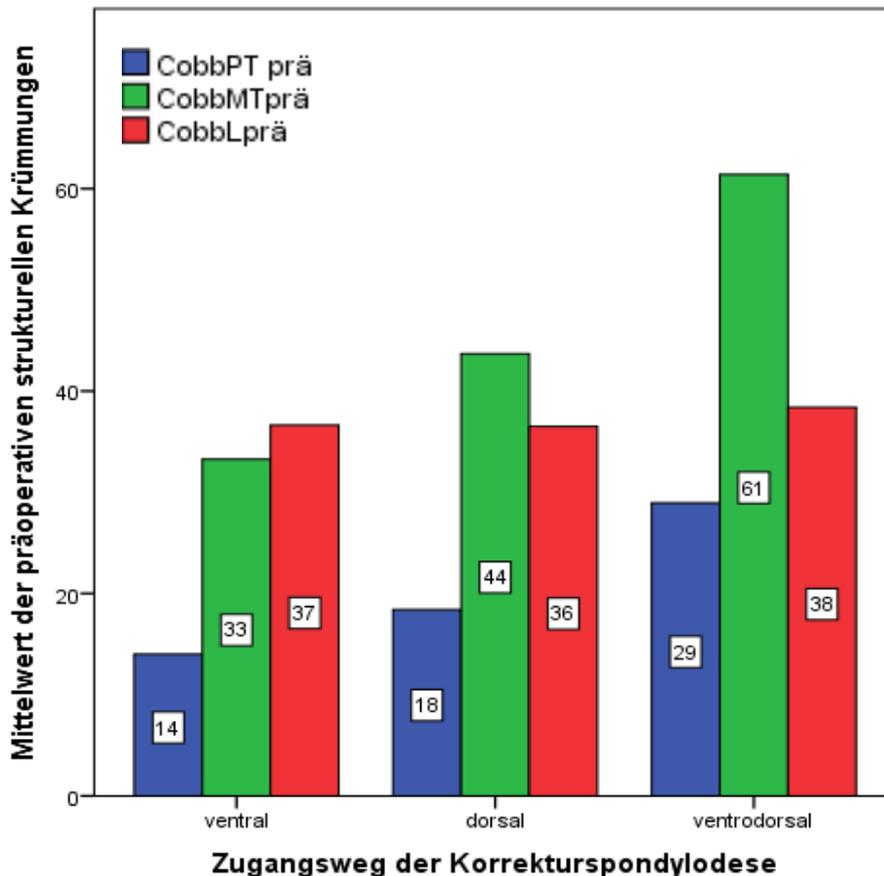


Abbildung 31. Ausgangswerte der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Skoliosen bei den verschiedenen operativen Verfahren. Die Ausgangsdeformitäten der Hauptkrümmung (grüne Säule) lagen bei dorsal versorgten Patienten höher und bei dorsoventral operierten am höchsten.

Die ventralen Korrekturspondylodesen hatten insgesamt eine deutlich kürzere Instrumentationsstrecke im Vergleich zu den dorsalen oder ventrodorsalen Korrekturen (Abb. 33).

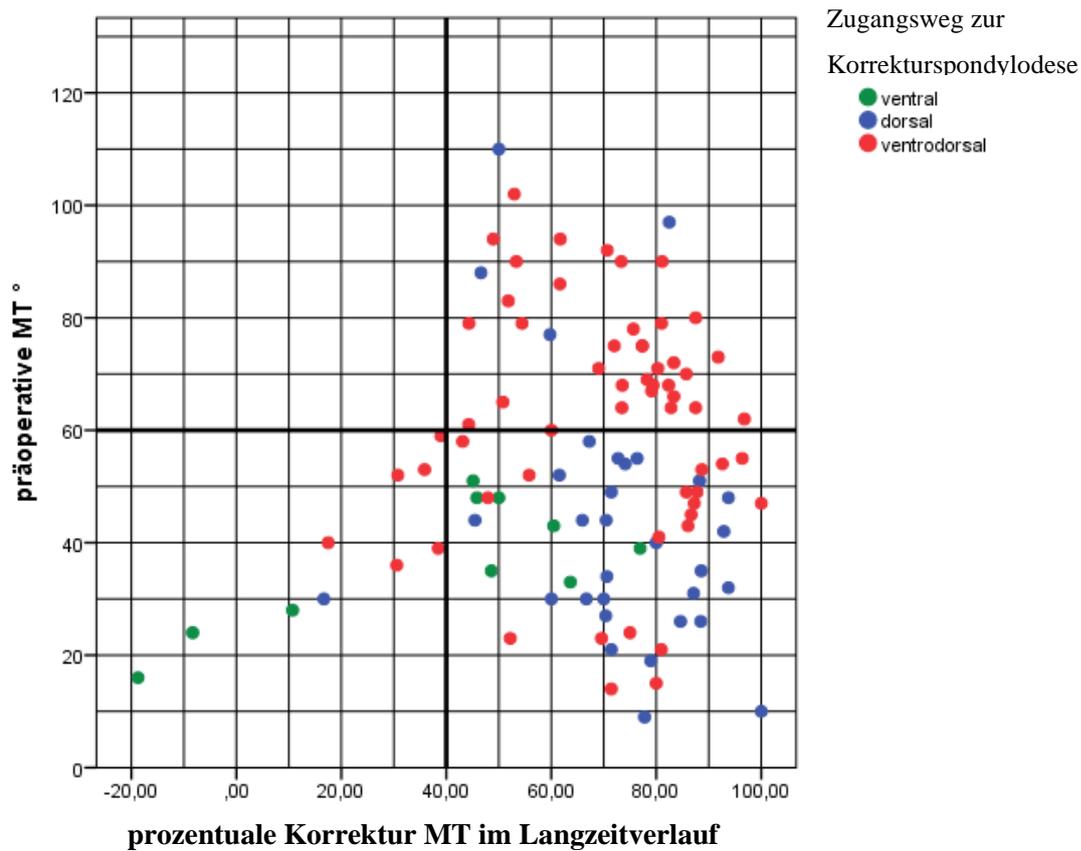


Abbildung 32. Präoperativer Skoliosewinkel und langfristige Korrektur der hauptthorakalen Krümmung (MT) bei den verschiedenen operativen Verfahren.

Die Abbildung 32 zeigt das Verhältnis zwischen der prozentualen Korrektur der thorakalen Krümmung im Langzeitverlauf, welche bei der letzten ambulanten Vorstellung der Patienten bestimmt wurde und dem präoperativen Ausgangswert der Skoliose. Die ventrodorsalen Spondylodesen (rot) finden sich im oberen rechten Quadranten. Das weist auf rigide Skoliosen mit sehr guter Korrektur im Langzeitverlauf hin. Die dorsalen Spondylodesen (blau) sind mehr im unteren rechten Quadranten lokalisiert und zeigen somit sehr gute langfristige Korrektur bei allerdings weniger Rigidität der Skoliose als die ventrodorsale Gruppe.

Schulterbalance und Instrumentationsstrecke

Der obere instrumentierte Wirbel (UIV) lag zwischen dem ersten Brust- und dem ersten Lendenwirbelkörper. Die Instrumentation endet bei allen Patienten zwischen dem fünften Brustwirbel und dem vierten Lendenwirbel (Tab. 9).

Tabelle 9. Lokalisation des jeweiligen oberen (UIV) und unteren (LIV) instrumentierten Wirbels.

| UIV | Häufigkeit | Prozent |
|--------|------------|---------|
| BWK 1 | 6 | 5,8 |
| BWK 2 | 21 | 20,4 |
| BWK 3 | 14 | 13,6 |
| BWK 4 | 16 | 15,5 |
| BWK 5 | 11 | 10,7 |
| BWK 6 | 11 | 10,7 |
| BWK 7 | 2 | 1,9 |
| BWK 8 | 2 | 1,9 |
| BWK 9 | 1 | 1,0 |
| BWK 10 | 3 | 2,9 |
| BWK 11 | 10 | 9,7 |
| BWK 12 | 4 | 3,9 |
| LWK 1 | 2 | 1,9 |
| Gesamt | 103 | 100,0 |

| LIV | Häufigkeit | Prozent |
|--------|------------|---------|
| BWK 5 | 1 | 1,0 |
| BWK 9 | 1 | 1,0 |
| BWK 10 | 3 | 2,9 |
| BWK 11 | 6 | 5,8 |
| BWK 12 | 28 | 27,2 |
| LWK 1 | 14 | 13,6 |
| LWK 2 | 8 | 7,8 |
| LWK 3 | 21 | 20,4 |
| LWK 4 | 21 | 20,4 |
| Gesamt | 103 | 100,0 |

Korrelationen des oberen und unteren instrumentierten Wirbels

Der obere instrumentierte Wirbel (UIV) korrelierte signifikant negativ mit der präoperativen PT- und MT-Skoliose; $p = 0,000$ und $0,000$. Das Ausmaß der PT-Korrektur korrelierte sowohl kurzfristig als auch im Langzeitverlauf signifikant negativ mit dem UIV; $p = 0,001$, während die L-Korrektur signifikant positiv korrelierte; $p = 0,043$. Generell gab es keine signifikante Korrelation mit der MT-Korrektur im Langzeitverlauf, außer bei Typ 1. Hier konnte im Rahmen einer Subgruppenanalyse eine negative Korrelation nachgewiesen werden; $p = 0,007$. Die Höhe des oberen und unteren instrumentierten Wirbels (LIV) hatte keinen Einfluss auf die Schulterbalance im Langzeitverlauf, auch nicht bei einer Subgruppenuntersuchung der verschiedenen Lenke-Typen. Die L-Korrektur korrelierte im Langzeitverlauf signifikant positiv mit dem LIV; $p = 0,000$. Die UIV und LIV korrelierten signifikant negativ mit der präoperativen Lotabweichung; $p = 0,001$ und $0,003$, hatten aber keinen Effekt auf das Lot im Langzeitverlauf.

Instrumentationsstrecke

Die Instrumentationsstrecke betrug durchschnittlich 8,38 Segmente. Die kürzeste Spondylodese erstreckte sich über 2 Segmente, die längste über 14 Segmente. Die Länge der Spondylodese variierte in Abhängigkeit vom Korrekturverfahren. Durchschnittlich wurden 4,5 Segmente bei dem ventralen, 7,8 bei dem dorsalen und 9,4 bei dem ventrodorsalen Zugang versteift (Abb. 33).

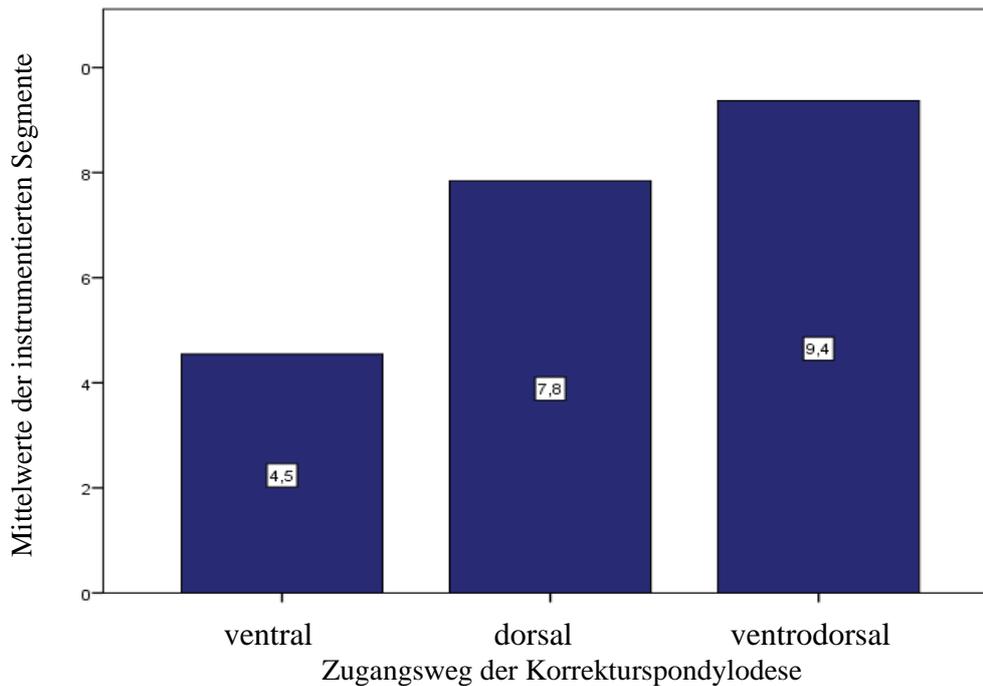


Abbildung 33. Durchschnittliche Instrumentationsstrecke bei den verschiedenen Korrekturverfahren.

Eine positiv signifikante Korrelation zwischen dem Ausmaß der präoperativen PT-, MT- und L-Krümmungen und der Instrumentationsstrecke konnte nachgewiesen werden; $p < 0,05$. Generell ist eine positiv signifikante Korrelation zwischen der Instrumentationsstrecke und der Korrektur der PT und MT nach 13 Jahren nachweisbar. Dieses Verhältnis ist nicht signifikant positiv für die L-Krümmung; $p = 0,168$ (Tab. 10).

In einer Subgruppenanalyse konnte nachgewiesen werden, dass bei Lenke-Typ 1 die Instrumentationsstrecke signifikant positiv mit der langfristigen Korrektur der MT- und L-Krümmungen nach 13 Jahren, $p = 0,004$ und $0,021$ korrelierte. Für Lenke Typ 2 fand sich eine signifikant positive Korrelation zwischen der Instrumentationsstrecke und der langfristigen Korrektur der MT, $p < 0,05$. Dies gilt nicht für die PT-Krümmung; $p =$

0,022. Für die lumbalen Skoliosen besteht nach 13 Jahren eine signifikant positive Korrelation mit der Korrektur der L-Krümmung; $p = 0,034$.

Tabelle 10. Korrelationen zwischen der Instrumentationsstrecke und der Krümmung vor und nach der Korrektur.

| | Instrumentationsstrecke | |
|-------------------------------|--------------------------------|------|
| PT-Krümmung präop. | Korrelation nach Pearson | ,535 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 |
| | N | 103 |
| MT-Krümmung präop. | Korrelation nach Pearson | ,703 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,000 |
| | N | 103 |
| L-Krümmung präop. | Korrelation nach Pearson | ,230 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,020 |
| | N | 103 |
| Korrektur-PT nach 13 J | Korrelation nach Pearson | ,248 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,018 |
| | N | 91 |
| Korrektur-MT nach 13 J | Korrelation nach Pearson | ,230 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,020 |
| | N | 102 |
| Korrektur-L nach 13 J | Korrelation nach Pearson | ,137 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,168 |
| | N | 103 |

4.2 Schulterhochstand

Zur seitenspezifischen Analyse des Schulterhochstandes (SHS) erfolgte die Einteilung der Patienten in 3 Gruppen in Abhängigkeit vom CA: Patienten mit einem neutralen Schulterstand, Schulterhochstand rechts und links. Vor der Operation zeigte die Mehrzahl der Patienten (53,4%) einen Schulterhochstand rechts (Tab. 11). Ein Viertel (27,2%) der Untersuchten hatten einen neutralen Schulterstand (SS). Nach der Korrekturspondylodese hatten 46,6% der AIS einen neutralen Schulterstand; CA $0^{\circ} \pm 1^{\circ}$. Im Langzeitverlauf lag der prozentuale Anteil balancierter Patienten bei 60,2%.

Tabelle 11. Schulterstand der untersuchten AIS vor und im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese.

| | Schulterstand präop. | | Schulterstand direkt postop. | | Schulterstand 1 J postop. | | Schulterstand im Langzeitverlauf | |
|-----------------------------|----------------------|------|------------------------------|------|---------------------------|------|----------------------------------|------|
| | n | % | n | % | n | % | n | % |
| Schulterhochstand rechts | 55 | 53,4 | 21 | 20,4 | 9 | 8,7 | 16 | 15,5 |
| Schulter neutral | 28 | 27,2 | 48 | 46,6 | 57 | 55,3 | 62 | 60,2 |
| Schulterhochstand links | 20 | 19,4 | 34 | 33,0 | 37 | 35,9 | 25 | 24,3 |
| Schulterhochstand insgesamt | 75 | 72,8 | 55 | 53,3 | 46 | 44,6 | 41 | 39,8 |

Aus der Tabelle 11 ist erkennbar, dass die untersuchte Adoleszenten vor der operativen Versorgung überwiegend einen Schulterhochstand aufwiesen (72%), 53,4% rechts und 19,4% links. Im Langzeitverlauf konnte nur bei 39,4% der Fälle eine Dysbalance festgestellt werden. Die Anzahl der Patienten mit SHS rechts reduzierte sich von 55 vor der Korrekturspondylodese auf 21 unmittelbar nach der OP. Bei der klinischen Kontrolle ein Jahr nach der Operation wurden nur neun Fälle mit SHS rechts festgestellt. Im Langzeitverlauf wurden 16 Patienten mit SHS rechts dokumentiert. Nach der Korrekturspondylodese zeigten 34 Patienten einen SHS links. Langfristig hatten nur 25 Patienten einen persistierenden SHS links.

Abbildung 34 verdeutlicht die postoperativen Veränderungen des SS: präoperativ (Abb. 34a) dominierte ein Schulterhochstand rechts. Direkt postoperativ (Abb. 34b) zeigte 46,6% (n=48) der Patienten einen neutralen Schulterstand (grün). Bei den übrigen Fällen überwog der Schulterhochstand links, 33% (n=33, rot) gegenüber rechts, 20,4% (n=21, blau). Im Langzeitverlauf nahm die Anzahl der Patienten mit Schultergeradstand auf 60,2% (n=62) zu. Durch kompensatorische Mechanismen (z.B. an der LWS) reduziert sich der Anteil der Patienten mit linksseitigem Hochstand (24,3%, n=25), verbleibt aber höher als der mit Rechtshochstand (15,5%, n=16) (Abb. 34c und d).

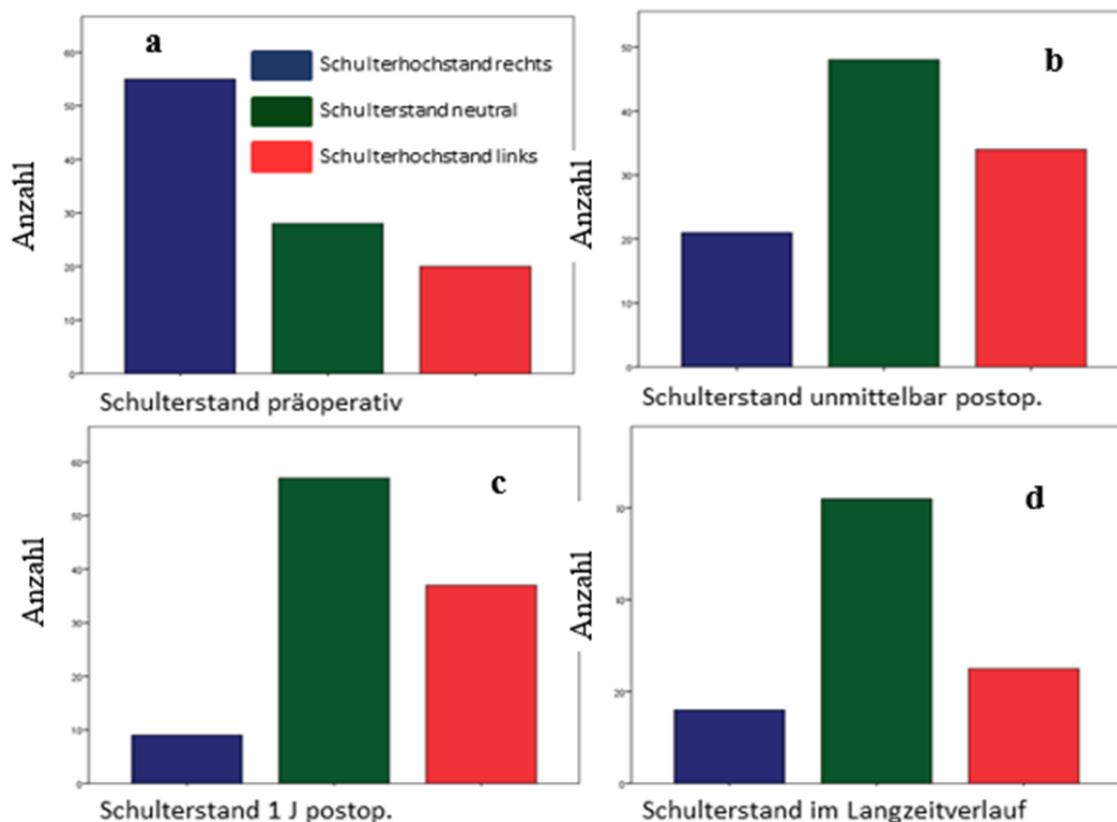


Abbildung 34 a-d. Schulterstand der untersuchten Skoliosen vor und im Langzeitverlauf nach der Skoliosenkorrektur.

Schulterstand und Skoliosetyp

Für die rechtskonvexe thorakale Skoliose (Typ 1) zeigten 44% der Patienten vor der Operation einen Schultergeradstand. Bei den Fällen mit Dysbalance überwog mit 32%

ein Hochstand rechts. Unmittelbar postoperativ konnte bei 56% ein Schultergeradstand erreicht werden (Abb. 35) - langfristig bei 60%. Die doppelthorakalen Skoliosen (Typ II) zeigten präoperativ in 53,3% der Fälle einen SHS rechts. Direkt nach der Korrektur stand bei 46,7% die linke Schulter höher. Im Langzeitverlauf standen 60% der Patienten mit Lenke-Typ 2 gerade.

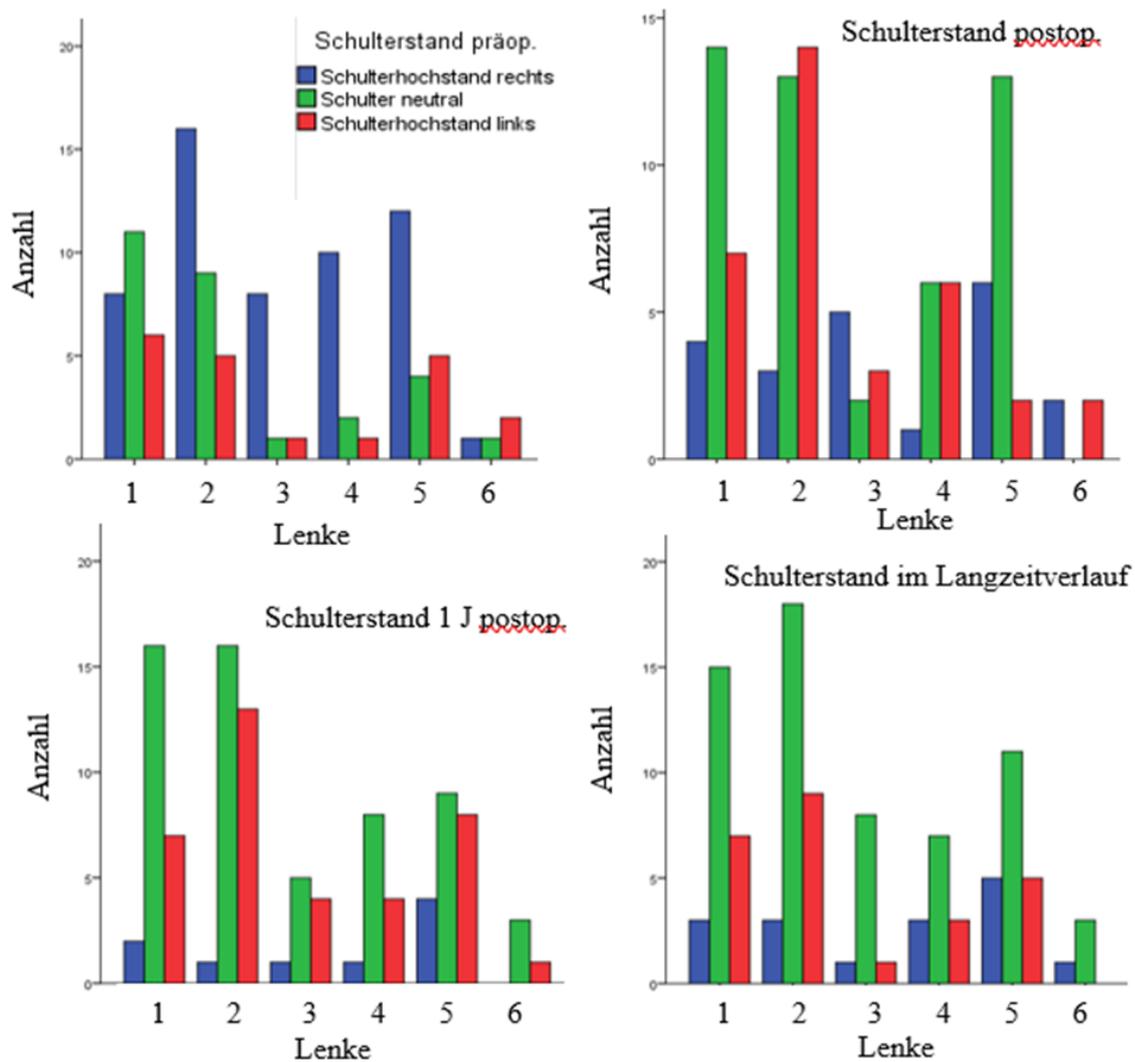


Abbildung 35. Veränderung des Schulterstandes vor und im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese bezogen auf den Lenke-Typ.

Der SS für die lumbal linkskonvexen Skoliosen (Lenke 5) verhielt sich präoperativ ähnlich wie bei den thorakalen. Dies korrigierte sich unmittelbar postoperativ bei 61%

der Patienten auf Geradstand. Im Langzeitverlauf verschlechterte sich dies auf 52,4% entsprechend eines Schulterhochstandes von 23,8% rechts und 23,8% links (Abb. 35).

Bezogen auf das Korrekturverfahren konnte bei den ventrodorsal versorgten Patienten ein Schultergeradstand in 61,7% (n=38) festgestellt werden. Auch bei den allein dorsal versorgten Patienten erreichten 65,6% (n=21) einen geraden Schulterstand.

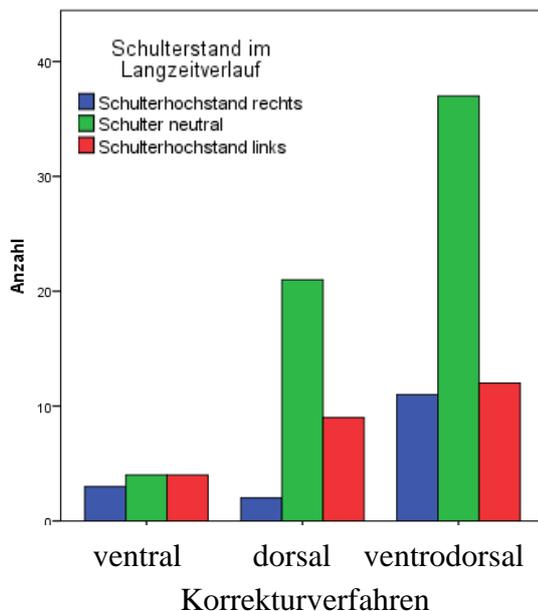


Abbildung 36. Schulterstand im Langzeitverlauf nach operativer Versorgung bezogen auf das Korrekturverfahren.

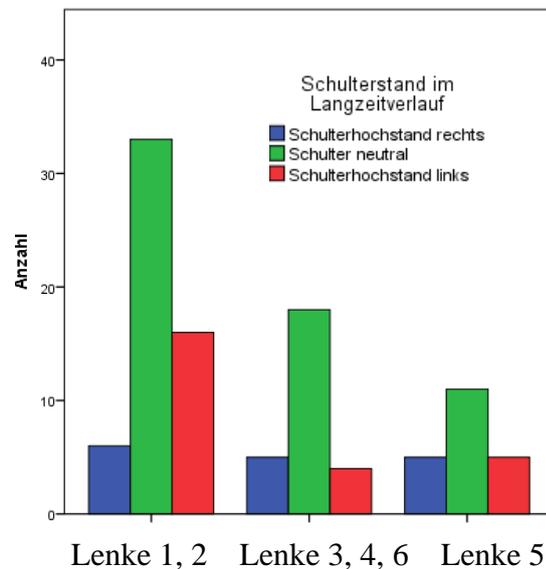


Abbildung 37. Schulterstand im Langzeitverlauf bezogen auf die Lokalisation der strukturellen Krümmung.

Ein Schulterhochstand links konnte in 28,1% (n=9) und rechts in 6,3% (n=2) der Patienten dokumentiert werden. Bei allein ventral versorgten Patienten blieb die Verteilung des SS weitgehend konstant (Abb. 36).

Bei den rigiden Krümmungen zeigte der Langzeitverlauf für alle Lokalisationen (thorakal, lumbal oder thorakolumbal), dass am häufigsten ein Schultergeradstand erreicht wurde (Abb. 37). Die Anzahl des linksseitigen SHS bei thorakalen Krümmungen (Typ 1 und 2) war größer als rechts. Die strukturellen lumbalen und thorakolumbalen Krümmungen verhielten sich im Langzeitverlauf anders: das Verhältnis vom Hochstand rechts und links war fast gleich.

4.3 Das Lot

Die Auswertung der Lotskala (Seite 31) zeigte, dass nach der Korrekturspondylodese eine fortschreitende Besserung erreicht wurde. Die Tabelle 12 zeigt, dass präoperativ eine Lotskala von 3,57 Punkten vorhanden war. Unmittelbar nach der Operation besserte sich diese auf 3,89 Punkte. Eine weitere Besserung des Lots wurde bei den ambulanten Kontrollen im ersten postoperativen Jahr (4,31 Punkte) und auch im Langzeitverlauf (4,48 Punkte) festgestellt (Tab. 12).

Tabelle 12. Lotskala im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese.

| | Lot Skala präop. | Lot Skala postop. | Lot Skala 1 J postop. | Lot Skala im Langzeitverlauf |
|--------------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|
| Mittelwert | 3,57 | 3,89 | 4,31 | 4,48 |
| N | 103 | 103 | 103 | 103 |
| Standardabweichung | 1,318 | 1,187 | ,980 | ,684 |

Die größte Lotabweichung vor der Korrektur zeigten die Patienten mit Lenke-Typ 6, 5 und 3 (Abb. 38). Die beste Lotskala präoperativ konnte bei Lenke 2 und 1 (thorakalen Skoliosen) festgestellt werden. Bei allen Lenke-Typen ist im Langzeitverlauf eine

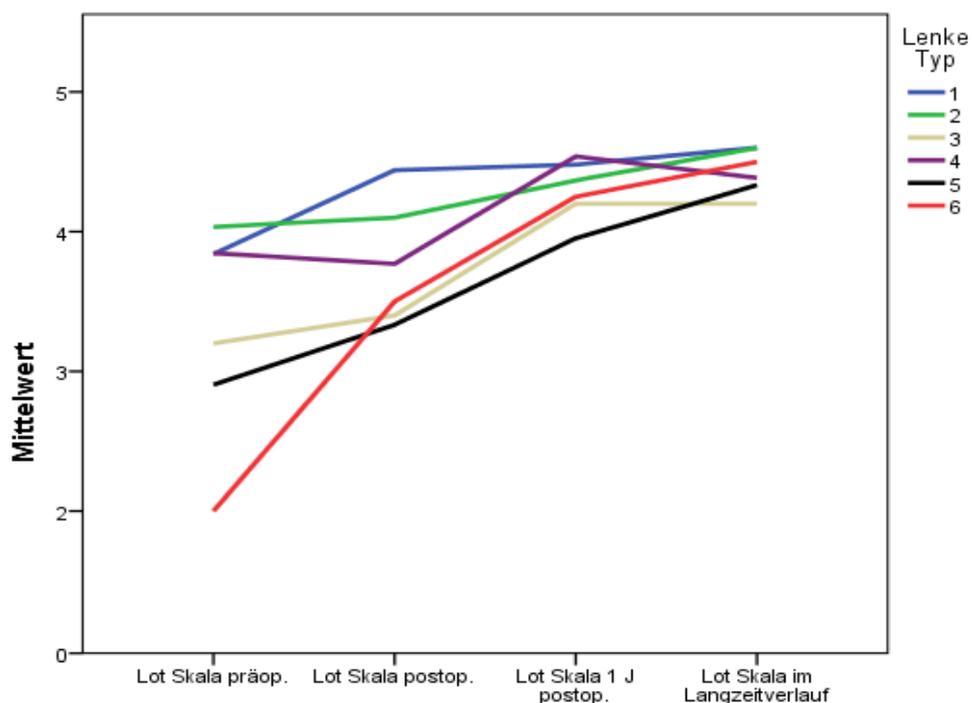


Abbildung 38. Die Veränderungen des Lots bei den verschiedenen Skoliosentypen.

Verbesserung der Lotskala nachweisbar. Die Messungen unmittelbar nach der Operation sowie ein und 13 Jahre nach der Operation bestätigen bei allen Skoliosen eine anhaltende Besserung des Lots. Eine Ausnahme zeigten Typ 3 und 4, bei denen eine minimale Verschlechterung nach 13 Jahren im Vergleich mit dem Ergebnis am ersten postoperativen Jahr feststellbar war. Die besten Werte der Lotskala im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese zeigten die Patienten mit Lenke-Typ 1 und 2, während die schlechtesten, entsprechend einer starken Abweichung vom Lot bei Lenke 3 dokumentiert wurde.

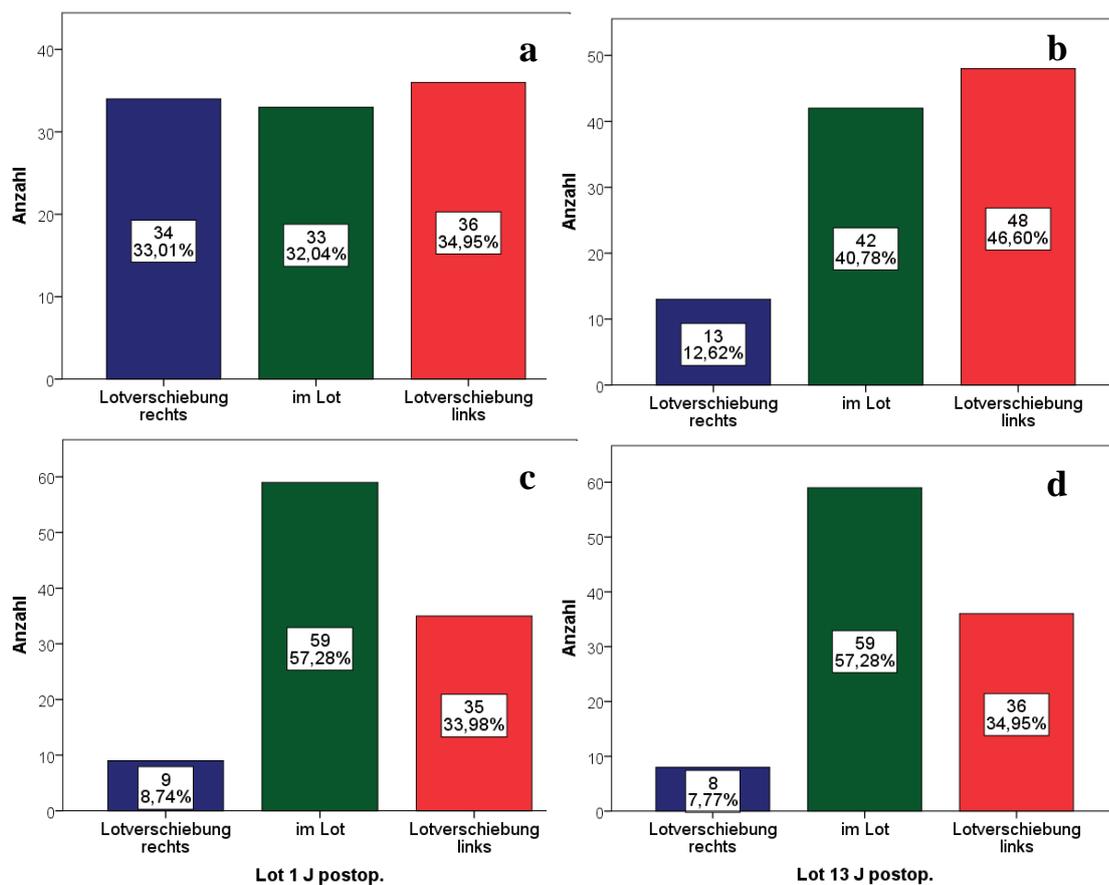


Abbildung 39 a-d. Die Veränderung des Lots vor und nach der Korrekturspondylodese.

Zur seitenspezifischen Analyse des Lots erfolgte die Einteilung der Patienten in 3 Gruppen (Abb. 39). Vor der Operation zeigten 34 Patienten (33%) eine Lotabweichung nach rechts. Im Lot waren 33 (32%) Patienten und 36 Patienten (35%) hatten eine Abweichung nach links (Abb. 39 a). Nach der Korrekturspondylodese waren 42 Patienten im Lot, nur 13 Patienten mit rechtsseitiger Lotabweichung und 46 links (Abb. 39 b). Die Anzahl der im Lot befindlichen Patienten stieg ein Jahr postoperativ auf 59 und blieb im Langzeitverlauf unverändert (Abb. 39c und d).

4.4 Schulterstand und Lot

Vor der operativen Versorgung standen 10 Patienten bei einem neutralen Schulterstand im Lot vs. 35 Patienten nach der Korrektur. Diese 10 zeigten auch nach der Operation im Langzeitverlauf keine Lotabweichung (Abb. 40a). Bei 4 Fällen zeigte sich jedoch ein SHS (Abb. 40b).

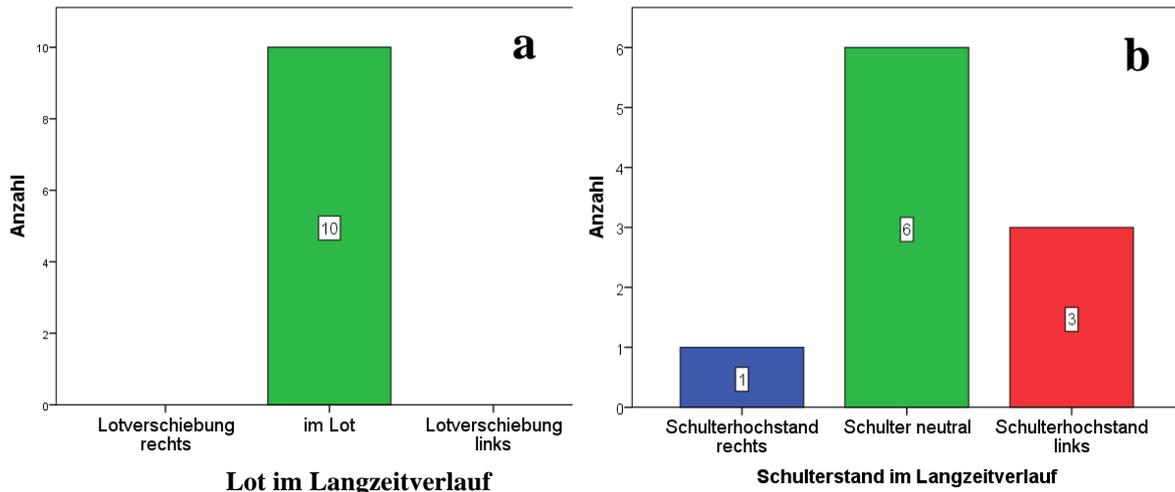


Abbildung 40 a-b. Veränderungen bezüglich Lot und Schulterstand bei der Subgruppe der präoperativ balancierten Patienten nach durchschnittlich 13 Jahren.

Es erfolgte die separate Analyse der Veränderungen des Schulterstandes in Zusammenschau mit dem Lot. Balancierte Schultern im Langzeitverlauf konnten trotz präoperativem SHS rechts in 32 Fällen erreicht werden. Das Lot vor dem Eingriff und 13 Jahre danach für diese Gruppe ist in der Abbildung 41 zu sehen. Im Lot standen 12

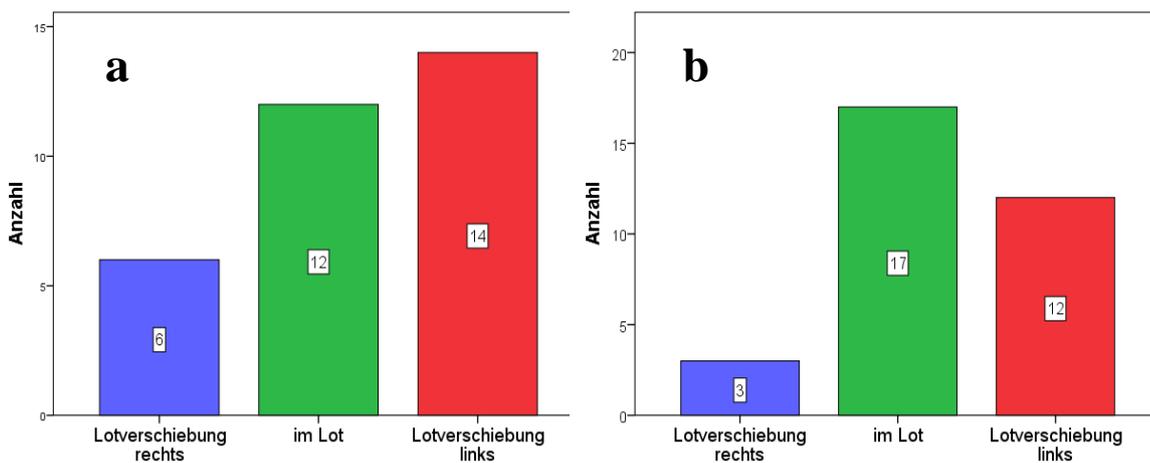


Abbildung 41 a-b. Lotabweichung bei den balancierten Schultern im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese.

Adoleszente vor der Korrektur. Eine Lotverschiebung nach links wurde in 14 Fällen beobachtet (Abb. 41a). Im Langzeitverlauf erreichten 17 Patienten ein neutrales Lot. Eine persistierende Lotverschiebung nach links wurde bei 12 Patienten dokumentiert (Abb. 41b).

Das Lot der Patienten mit einem Schulterhochstand links unmittelbar nach der Korrekturspondylodese, die im Langzeitverlauf einen geraden Schulterstand erreichen konnten (n=18) wurde in der Abbildung 42 dargestellt. Von dieser Gruppe standen 8

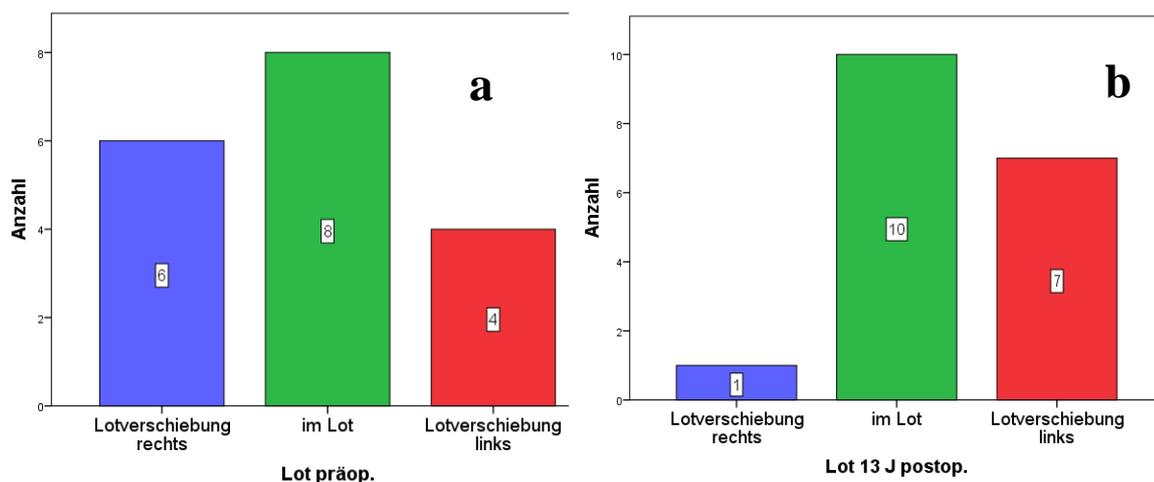


Abbildung 42 a-b. Lotveränderung bei Schulterhochstand links unmittelbar postoperativ.

Patienten im Lot. Eine Lotverschiebung nach rechts wurde in 6 Fällen dokumentiert (Abb. 42a). Die Anzahl der Lotverschiebungen nach links stieg im Langzeitverlauf von 4 auf 7 Patienten. Bei der letzten ambulanten Kontrolle waren 10 Patienten im Lot und nur ein Patient zeigte eine persistierende Lotabweichung nach rechts (Abb. 42b).

Eine Lotabweichung nach links mit gleichzeitigem Schulterhochstand links konnten im Langzeitverlauf in 4 Fällen beobachtet werden, zwei davon sind vom Lenke-Typ 5. Eine entsprechende rechtseitige Veränderung konnte bei keinem Fall festgestellt werden.

4.5 Radiologische und klinische Parameter des Schulterstandes

In dieser Arbeit wurden drei Parameter zur Bestimmung des Schulterstandes verwendet. Die zwei radiologischen Parameter sind der Rib-Clavicle-Intersection Angle (RCIA) und der T1-Winkel (Seite 24) und ein klinischer Parameter: der Clavicle Angle (CA) (Seite 29). Präoperativ lagen der RCIA, der T1-Winkel und der CA durchschnittlich bei $-1,89^\circ$, $-1,74^\circ$ und $-1,32^\circ$. Im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese lagen die Werte

durchschnittlich bei $1,05^\circ$, $1,21^\circ$ und $0,46^\circ$ (Tab. 13). Damit zeigten alle 3 Werte eine langfristige bessere Schulterbalance (SB).

Tabelle 13. Die klinischen und radiologischen Parameter vor der Korrekturspondylodese und deren Dynamik danach.

| Deskriptive Statistik | | | | | |
|-------------------------|-----|---------|---------|------------|--------------------|
| | N | Minimum | Maximum | Mittelwert | Standardabweichung |
| RCIA präop. | 103 | -9 | 7 | -1,89 | 3,627 |
| RCIA direkt postop. | 103 | -6 | 9 | ,95 | 3,135 |
| RCIA 1 J postop. | 103 | -7 | 10 | 1,02 | 2,726 |
| RCIA im Langzeitverlauf | 103 | -5 | 9 | 1,05 | 2,583 |
| T1 präop. | 103 | -22 | 25 | -1,74 | 7,380 |
| T1 direkt postop. | 103 | -22 | 14 | 1,70 | 5,250 |
| T1 1 J postop. | 103 | -17 | 14 | 1,63 | 4,736 |
| T1 im Langzeitverlauf | 103 | -14 | 12 | 1,21 | 4,958 |
| CA präop. | 103 | -8 | 8 | -1,32 | 3,270 |
| CA direkt postop. | 103 | -5 | 6 | ,59 | 2,538 |
| CA 1 J postop. | 103 | -5 | 5 | ,76 | 1,860 |
| CA im Langzeitverlauf | 103 | -5 | 5 | ,46 | 1,979 |

Subgruppenanalyse der verschiedenen Lenke-Typen in Bezug auf die Parameter CA, RCIA und T1

Bezogen auf den Clavicle Angle (CA) konnte ein rechtsseitiger Schulterhochstand bei der präoperativen klinischen Beurteilung der verschiedenen Lenke-Typen mit Ausnahme von Lenke 6 festgestellt werden (Abb. 43a). Im Durchschnitt zeigen alle Skoliosearten bei der ersten Verlaufskontrolle nach der Korrekturspondylodese positive Werte (Hochstand links). Im Langzeitverlauf wurde ein besser balancierter Schulterstand ($0 \pm 1^\circ$) erreicht (Abb. 43b).

In der präoperativen Bildgebung zeigte der radiologische Parameter Rib-Clavicle-Intersection Angle (RCIA) einen Schulterhochstand rechts bei allen Lenke-Typen, außer bei Lenke 6 (Abb. 44a). Nach dem ersten postoperativen Jahr war das Ausmaß des Schulterhochstands links radiologisch ausgeprägter als bei dem CA. Die lumbale Skoliose zeigte zum selben Zeitpunkt einen Schulterhochstand rechts. Im Langzeitverlauf erreichen die Patienten einen besser balancierten Zustand bei Lenke 3, 4 und 6. Eine leichte Dysbalance mit Hochstand links wurde bei Lenke 2 und 5 beobachtet (Abb. 44b).

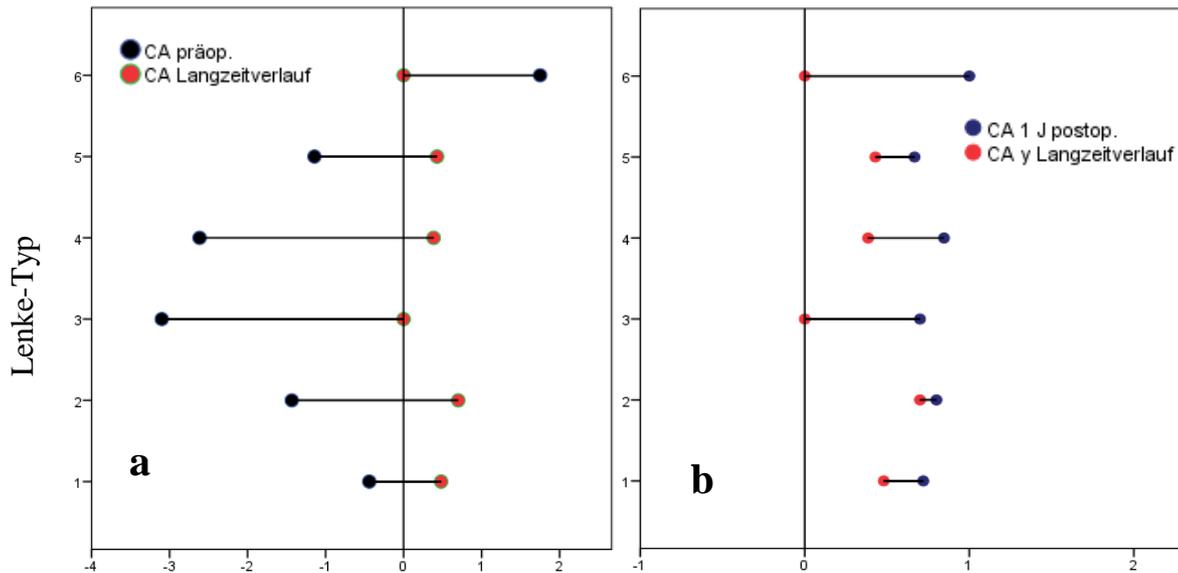


Abbildung 43. Grafische Darstellung der Veränderungen des Clavicle-Angles (CA) nach der Korrekturspondylodese.

Präoperativ zeigte der T1-Winkel einen Schulterhochstand rechts bei allen Lenke-Typen, außer bei Lenke 6 (Abb. 45a). Im Durchschnitt zeigten die gemessene Werte im ersten

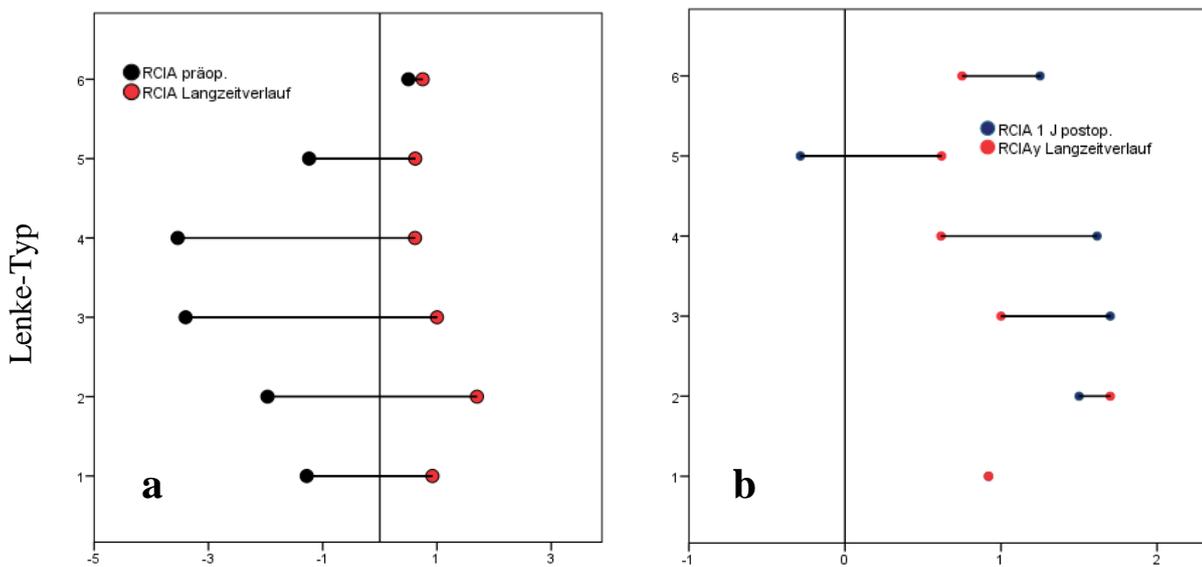


Abbildung 44. Grafische Darstellung der Veränderungen des Rib-Clavicle-Intersection Angles (RCIA) nach der Korrekturspondylodese.

postoperativen Jahr einen Schulterhochstand links höher als CA und RCIA für Lenke 1, 2, 3 und 6. Im Langzeitverlauf zeigen diese Lenke-Typen eine bessere Balance (Abb. 45b).

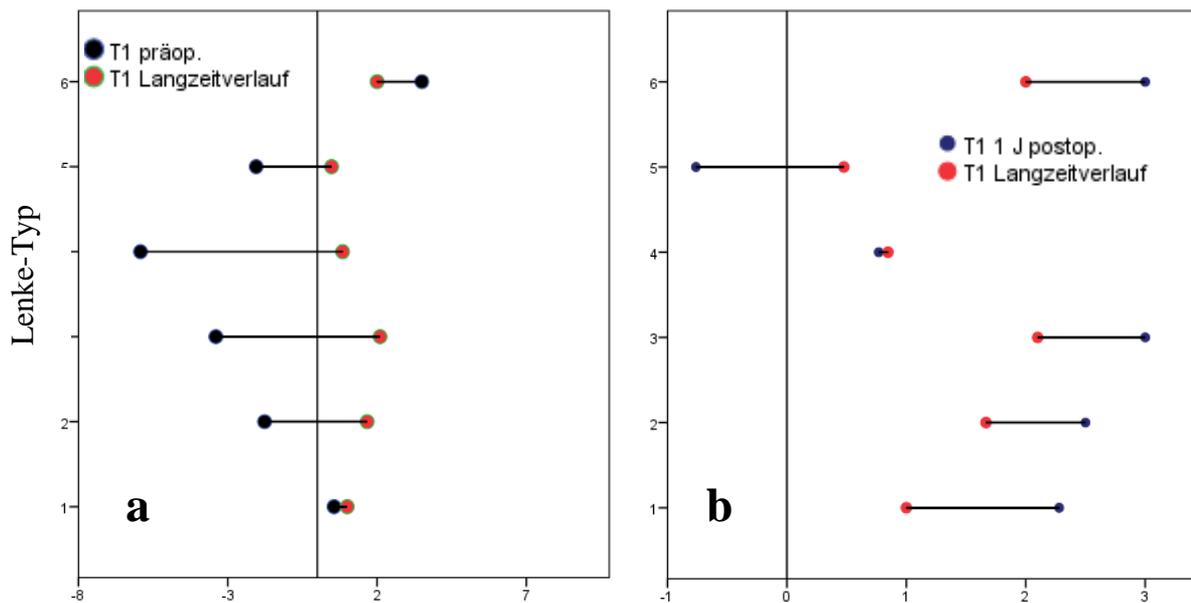


Abbildung 45. Grafische Darstellung der Veränderungen des T1-Winkels nach der Korrekturspondylodese.

Vor der Korrekturspondylodese konnte eine RCIA- und CA-Skala von 2,74 und 3,24 Punkte errechnet werden. Im Langzeitverlauf nach dem Eingriff verbesserten sich diese auf 3,68 und 4,26 (Tab. 14).

Tabelle 14. Schulterbalance und Lot vor der Korrekturspondylodese und im Langzeitverlauf.

| Deskriptive Statistik | | | | | |
|--------------------------------|-----|---------|---------|------------|---------|
| | N | Minimum | Maximum | Mittelwert | St.abw. |
| RCIA Skala präop. | 103 | 1 | 5 | 2,74 | 1,527 |
| CA Skala präop. | 103 | 1 | 5 | 3,24 | 1,445 |
| Schulterbalance präop. | 103 | 2 | 10 | 5,98 | 2,493 |
| RCIA Skala postop. | 103 | 1 | 5 | 3,39 | 1,542 |
| CA Skala postop. | 103 | 1 | 5 | 3,83 | 1,373 |
| Schulterbalance direkt postop. | 103 | 2 | 10 | 7,22 | 2,380 |
| RCIA 1 J postop. | 103 | 1 | 5 | 3,65 | 1,348 |
| CA Skala 1 J postop. | 103 | 1 | 5 | 4,24 | 1,062 |
| Schulterbalance 1 J postop. | 103 | 2 | 10 | 7,89 | 2,038 |
| RCIA Skala im Langzeitverlauf | 103 | 1 | 5 | 3,68 | 1,246 |
| CA Skala im Langzeitverlauf | 103 | 1 | 5 | 4,26 | 1,129 |

| | | | | | |
|------------------------------------|-----|----|----|------|-------|
| Schulterbalance im Langzeitverlauf | 103 | 2 | 10 | 7,94 | 2,095 |
| SB-Änderung im Langzeitverlauf | 103 | -7 | 7 | 1,96 | 3,413 |
| Lot Skala präop. | 103 | 1 | 5 | 3,57 | 1,318 |
| Lot Skala postop. | 103 | 1 | 5 | 3,89 | 1,187 |
| Lot Skala 1 J postop. | 103 | 1 | 5 | 4,31 | ,980 |
| Lot Skala im Langzeitverlauf | 103 | 2 | 5 | 4,48 | ,684 |

Korrelationen zwischen den klinischen und radiologischen Parametern

Die zwei klinischen und radiologischen Parameter für die Schulterstandauswertung RCIA und T1 Winkel korrelierten signifikant positiv in allen 4 Messungen vor und nach dem Eingriff; Pearson-Korrelationskoeffizient: 0,726, 0,645, 0,737 und 0,657, $p < 0,05$. Ebenfalls korrelierten beide Parameter signifikant positiv mit dem klinischen CA zum selben Messzeitpunkt; RCIA Pearson: 0,644, 0,456, 0,515 und 0,669, $p < 0,05$ vs. T1 Pearson: 0,520, 0,337, 0,374 und 0,460, $p < 0,05$. Damit war die Korrelation zwischen den radiologischen Parametern stärker als die Korrelation mit dem CA. Der CA korrelierte signifikant positiver mit dem RCIA als mit dem T1-Winkel.

4.6 Skoliosenkorrektur im Langzeitverlauf

Die durchschnittliche präoperative PT-Krümmung betrug 24° ($0-65^\circ$). Eine Restkrümmung von 11° ($0-40^\circ$) wurde unmittelbar nach der Korrektur festgestellt. Die durchschnittliche Restskoliose blieb bei 11° ($0-40^\circ$) 1 Jahr nach dem Eingriff und 11° ($0-39^\circ$) im Langzeitverlauf. Dies entspricht einer prozentualen Korrektur von ca. 46% (Abb. 46).

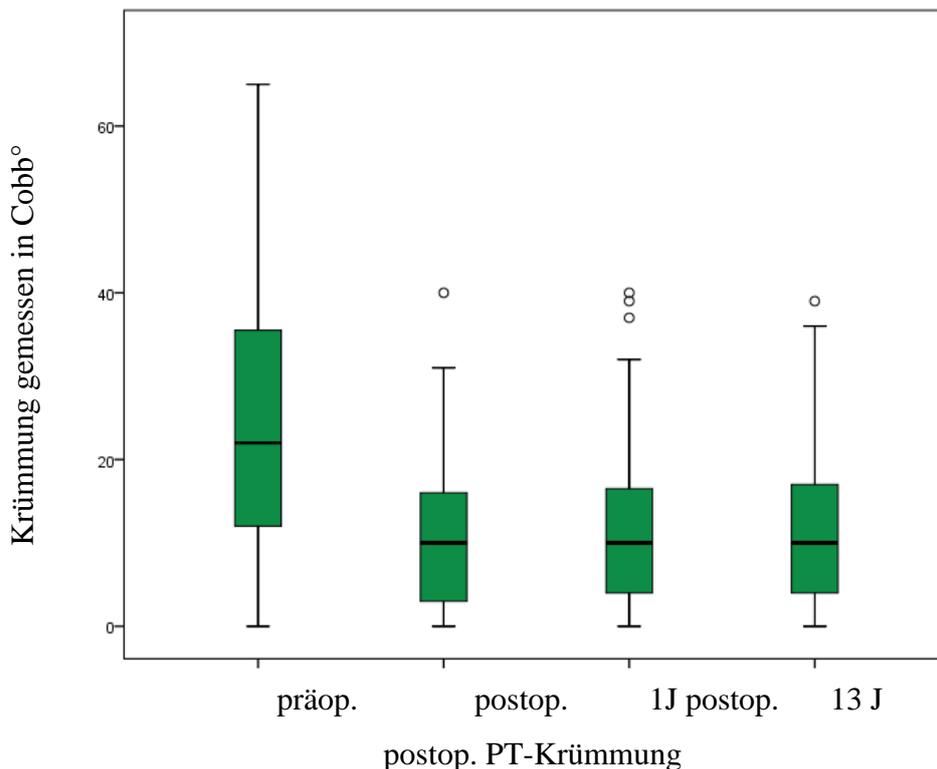


Abbildung 46. Grafische Darstellung des Langzeitverlaufs der Skoliose im Bereich der proximal thorakalen (PT) Krümmung.

Die durchschnittliche präoperative MT-Krümmung betrug 53° ($1-110$). Eine Restkrümmung von 15° ($0-69$) wurde unmittelbar nach der Korrektur festgestellt. Der durchschnittliche Wert betrug 16° ($1-68$) ein Jahr nach dem Eingriff und 17° ($3-55^\circ$) im Langzeitverlauf. Dies entspricht einer prozentualen Korrektur von 68% (Abb. 47).

Die durchschnittliche präoperative TL/L-Krümmung betrug 38° ($5-74$). Eine Restkrümmung von 10° ($0-31$) wurde unmittelbar nach der Korrektur festgestellt. Der durchschnittliche Wert betrug 11° ($0-33$) ein Jahr nach der operativen Versorgung und

blieb bei 11° (0-35) im Langzeitverlauf. Dies entspricht einer prozentualen Korrektur von 65% (Abb. 48).

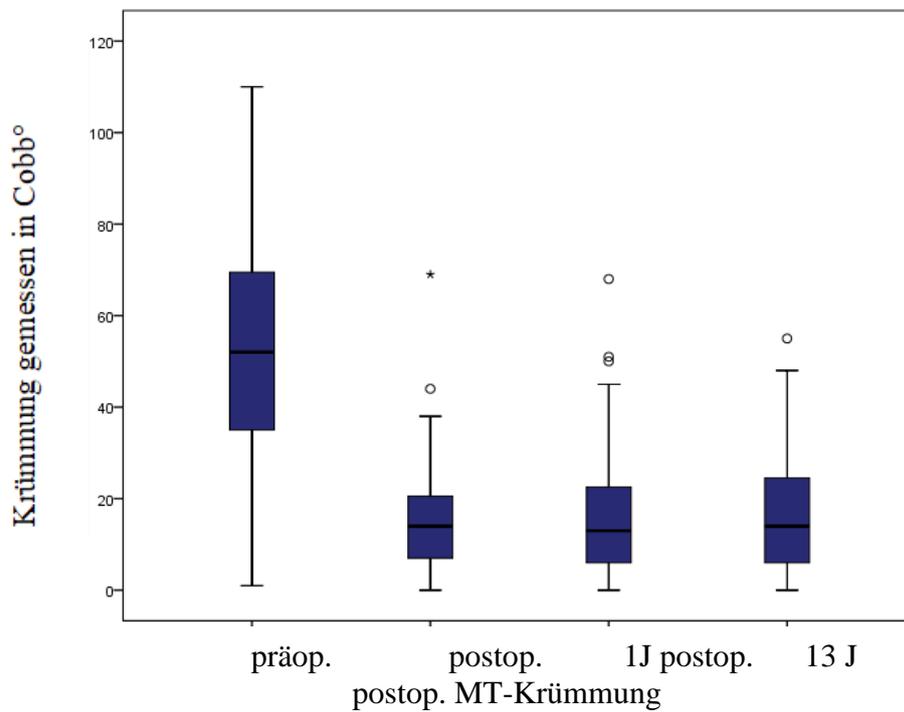


Abbildung 47. Grafische Darstellung des Langzeitverlaufs der Skoliose im Bereich der hauptthorakalen (MT) Krümmung.

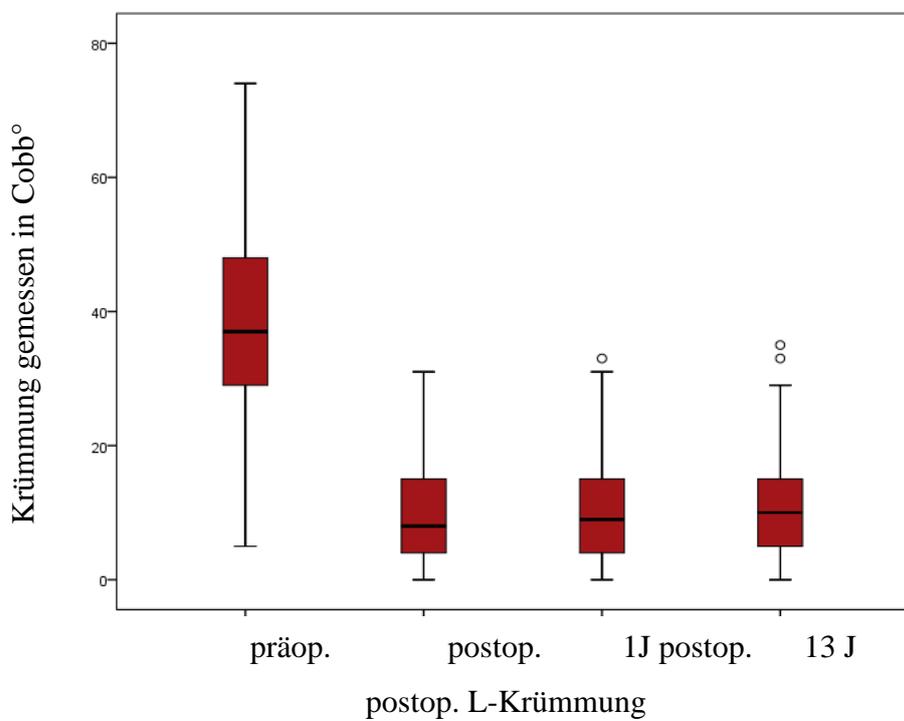


Abbildung 48. Grafische Darstellung des Langzeitverlaufs der Skoliose im Bereich der lumbalen/thorakolumbalen Krümmung.

Im Langzeitverlauf wurde die proximal thorakale Krümmung auf 46% reduziert. Die MT-Skoliose zeigte mit 67,2% die beste langfristige prozentuale Korrektur. Lumbal lag die Korrektur bei 66,9% (Tab. 15).

Tabelle 15. Prozentuale Korrektur der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Skoliosen im Langzeitverlauf.

| | N | Mittelwert der prozentualen Korrektur |
|---------------------------------|-----|---------------------------------------|
| Korrektur PT im Langzeitverlauf | 91 | 46,03 |
| Korrektur MT im Langzeitverlauf | 102 | 67,29 |
| Korrektur L im Langzeitverlauf | 103 | 66,91 |

Tabelle 16. Veränderungen der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Krümmungen im Langzeitverlauf.

| Deskriptive Statistik | | | | | |
|--------------------------------|-----|---------|---------|------------|---------|
| | N | Minimum | Maximum | Mittelwert | St.abw. |
| PT-Krümmung | 103 | 0 | 65 | 24,08 | 16,244 |
| MT-Krümmung | 103 | 1 | 110 | 52,89 | 23,375 |
| L-Krümmung | 103 | 5 | 74 | 37,61 | 14,114 |
| direkt postop. PT-Krümmung | 103 | 0 | 40 | 10,85 | 8,700 |
| direkt postop. MT-Krümmung | 103 | 0 | 69 | 15,10 | 11,419 |
| direkt postop. L-Krümmung | 103 | 0 | 31 | 9,97 | 7,724 |
| PT-Krümmung 1 J postop. | 103 | 0 | 40 | 11,18 | 9,269 |
| MT-Krümmung 1 J postop. | 103 | 0 | 68 | 15,57 | 11,978 |
| L-Krümmung 1 J postop. | 103 | 0 | 33 | 10,62 | 8,068 |
| PT-Krümmung im Langzeitverlauf | 103 | 0 | 39 | 11,27 | 9,271 |
| MT-Krümmung im Langzeitverlauf | 103 | 0 | 55 | 17,03 | 12,591 |
| L-Krümmung im Langzeitverlauf | 103 | 0 | 35 | 10,98 | 7,740 |

Eine Auflistung der durchschnittlichen Werte der PT-, MT- und L-Skoliosen unmittelbar nach der Operation sowie 1 Jahr und im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese ist in Tabelle 16 zusammengestellt. Präoperativ lagen die größten strukturellen Skoliosen bei 65° für die PT-, 110° für die MT- und 74° für die L-Skoliose.

4.7 Lumbale Krümmung

Interessanterweise zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der L-Krümmung und dem Clavicle Angle (CA) im Langzeitverlauf. Dieses Verhältnis variiert je nach Lokalisation der präoperativen strukturellen Krümmung. Die thorakalen rechtskonvexen und doppelthorakalen Skoliosen zeigten im Langzeitverlauf weniger L-Krümmung bei einem

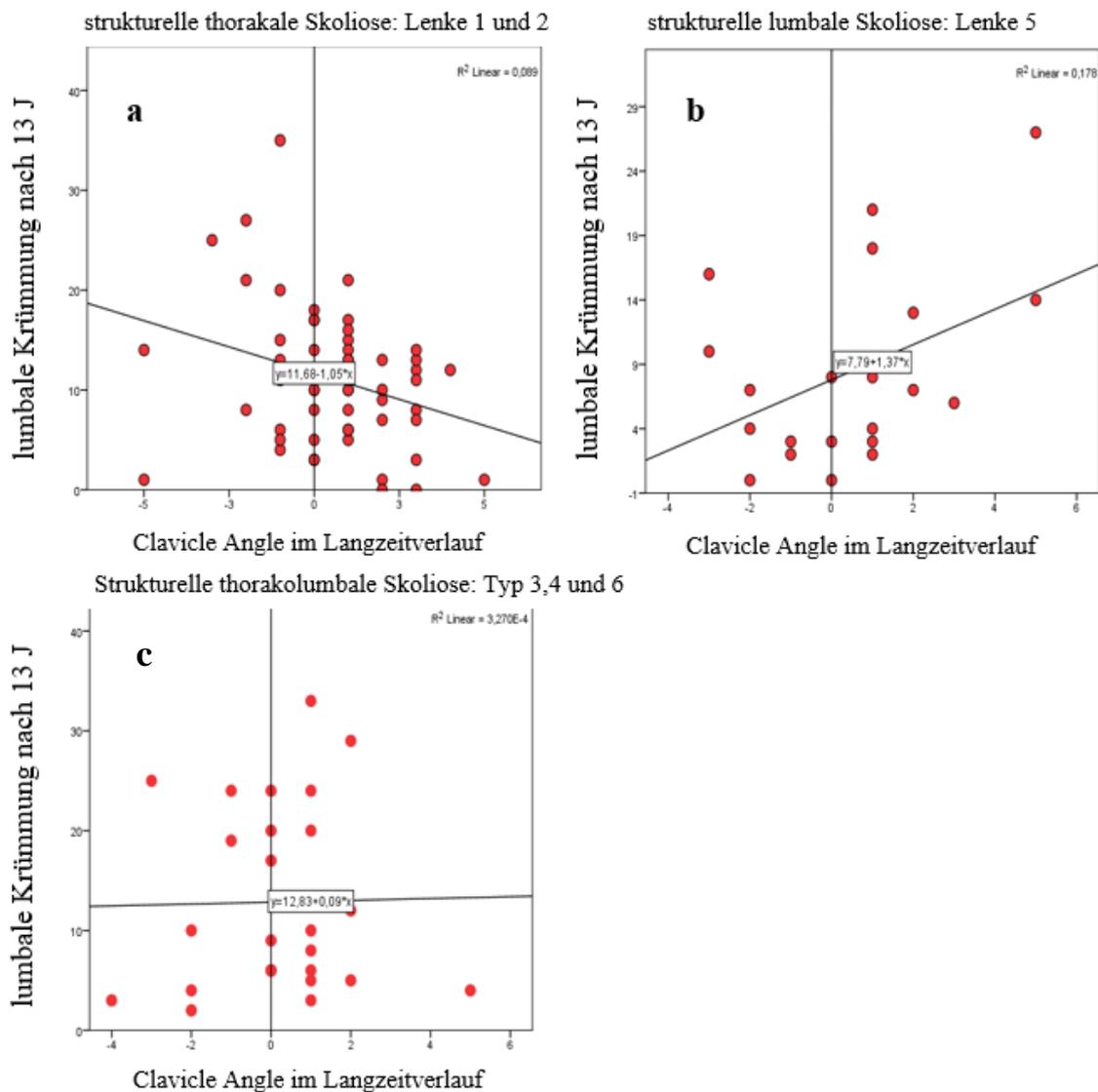


Abbildung 49. Korrelation zwischen dem lumbalen Skoliosenausmaß und dem Clavicle-Angle (CA) im Langzeitverlauf bei den hauptthorakalen (MT) Skoliosen.

linksseitigem SHS. Die balancierten Patienten und die Patienten mit einem SHS rechts zeigten größere L-Krümmungen (Abb. 49a). Eine positive signifikante Korrelation zwischen der Schulterbalance und der L-Krümmung ($p = 0,045$) konnte nachgewiesen

werden. Bei Lenke-Typ 5 (lumbale Skoliosen) war der linksseitige SHS von einer größeren L-Krümmung begleitet (Abb. 49 b). Die Korrelation zwischen der L-Krümmung und Schulterbalance war in dem Fall signifikant negativ, $p = 0,024$. Der Zusammenhang bei den kombinierten thorakalen und lumbalen Skoliosen ist nicht signifikant, $p = 0,199$ (Abb. 49c).

Tabelle 17. Korrelation zwischen dem lumbalen Skoliosenausmaß und dem Schulterstand im Langzeitverlauf.

| L-Krümmung | | RCIA | CA | Schulterbalance |
|--|------------------------|-------------|-------------|------------------------|
| Thorakale Skoliosen Typ 1 und 2 | Pearson Korrelation | -,378 | -,298 | ,272 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,004 | ,027 | ,045 |
| | N | 55 | 55 | 55 |
| Thorakale und lumbale Skoliosen Typ 3, 4 und 6 | Pearson Korrelation | -,124 | ,018 | ,255 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,536 | ,929 | ,199 |
| | N | 27 | 27 | 27 |
| Lumbale Skoliose Typ 5 | Pearson Korrelation | ,533 | ,421 | -,489 |
| | Signifikanz (2-seitig) | ,013 | ,057 | ,024 |
| | N | 21 | 21 | 21 |

Die Tabelle 17 zeigt die festgestellten Korrelationen zwischen der lumbalen Krümmung bei der letzten Verlaufskontrolle und den Schulterparametern RCIA und CA sowie der Schulterbalance. Bei den rechtskonvexen thorakalen sowie doppelthorakalen Skoliosen korrelierte die lumbale Krümmung im Langzeitverlauf signifikant negativ mit dem RCIA ($p=0,004$) und dem CA ($p=0,027$), jedoch signifikant positiv mit der Schulterbalance ($p=0,045$).

Bei den primär im Lumbalbereich gelegenen Skoliosen dagegen korrelierte die lumbale Krümmung im Langzeitverlauf signifikant positiv mit dem RCIA ($p=0,013$) und signifikant negativ mit der Schulterbalance ($0,024$).

5 Diskussion

Die „Adoleszente idiopathische Skoliose (AIS)“ ist eine dreidimensionale Deformität. Rumpfasymmetrie, Fehlstatik, pathologische Biomechanik, veränderte Atemmechanik sowie kosmetische Veränderungen mit Gefahr individueller Befindlichkeitsstörungen und gesellschaftlicher Stigmatisierung („bucklige Hexe“) sind alles Folgen der skoliotischen Deformität [3, 5, 10, 38–40].

Rippenbuckel und Schulterstand sind die am wenigsten zu kaschierenden körperlichen Abweichungen von der Norm. Das Faktum, dass Schulterbalance ein wichtiger Zufriedenheitsparameter nach Korrekturspondylodese ist, wurde bereits von mehreren Autoren bestätigt und bewiesen [4-7]. Schulterdysbalance nach Korrekturspondylodese trotz einer guten koronaren Korrektur ist keine Seltenheit [7, 11, 27] (Abb. 10). In dieser Arbeit befinden sich zwei Betrachtungsweisen der Schultern bei AIS: die Schulterbalance (SB) und der Schulterstand (SS) (Seite 31).

5.1 Schulterbalance

Schulterasymmetrie ist bis zu einem gewissen Ausmaß physiologisch. Eine Toleranzgrenze dieser physiologischen Variabilität ist bisher nicht definiert und scheint individuell zu variieren. Akel et al. zeigten, dass skoliosefreie Adoleszente Schulterhöhendifferenzen bis 27 mm haben können [4]. Auch eine Lotabweichung des Oberkörpers gegenüber dem Becken (gemessen anhand central sacral vertikal line (CSVL)) ist bis 20 mm normal [36]. Deswegen erschien uns die Einführung einer Skala (Seite 30) zur Objektivierung der Schulterveränderungen erforderlich.

In dieser Studie wurden 103 Korrekturspondylodesen bei AIS retrospektiv analysiert. Die gesammelten radiologischen und fotografischen Bilder stammen aus der Datenbank der Zentralklinik Bad Berka, Abteilung für Wirbelsäulen Chirurgie. Diese Arbeit konnte beweisen, dass die Korrekturspondylodese eine deutliche Verbesserung der Schulterbalance (SB) erbrachte. Die Schulterbalance Skala besserte sich von 5,98 Punkten präoperativ zu 7,94 Punkten im Langzeitverlauf (Tab. 4).

Das Verhalten des SS im Langzeitverlauf stand im Zentrum der Untersuchungen dieser Arbeit mit einem durchschnittlichen Nachbeobachtungszeitraum von 13,2 (10-23,1) Jahren. Die Auswertung der Datensätze erfolgte prä- und postoperativ sowie durchschnittlich 1 und 13 Jahre nach der Korrekturspondylodese.

Ono et al. untersuchten die Patienten nur kurzfristig im Rahmen der präoperativen Vorbereitung [37] und Tang et al. berichteten über einen Beobachtungszeitraum von 3 Jahren nach operativer Versorgung [2]. Namikawa et al. und Cao et al. publizierten die postoperative Schulterstandveränderung nach zwei Jahren (Tab. 18) [7, 41].

Die einzige Beobachtung des Schulterstandes über einen längeren Zeitraum nach Korrekturspondylodese wurde von Smyrnis et al. durchgeführt. Dabei wurden ausschließlich thorakale Skoliosen nach 6 Jahren ausgewertet [6], d.h. lumbale und thorakolumbale Deformität nicht analysiert.

Tabelle 18. Metaanalyse der Arbeiten bezüglich des Schulterstandes bei AIS.

| Autor | n= | Beobachtungszeitraum | Lenke Typ |
|-----------------------------|------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Ono et al., 2012 [37] | 113 | präoperativ | Typ 1, 2 |
| Tang et al., 2016 [2] | 75 | 3 Jahre | Lenke 1 |
| Namikawa et al., 2015 [7] | 24 | 2 Jahre | Lenke 1, 2, 3 |
| Cao et al. 2014 [41] | 142 | 2 Jahre | Lenke 2 |
| Amir et al., 2015 [38] | 84 | 2 Jahre | Lenke 1, 2 |
| Smyrnis et al., 2009 [6] | 56 | 6 Jahre | Lenke 1, 2 |
| Qiu et al., 2009 [5] | 34 | präoperativ | Lenke 2 |
| Hong et al., 2013 [39] | 89 | 2-3 Jahre | Lenke 1, 2, 3, 4, 5 und 6 |
| Yagi et al., 2013 [42] | 85 | 3,1 Jahre | Lenke 1, 2 |
| Kwan et al., 2016 [43] | 60 | 5 Jahre | Lenke 1, 2 |
| Terheyden et al., 2018 [44] | 102 | 1 Jahr | Lenke 1, 2, 3, 4, 5 und 6 |
| Diese Arbeit | 103 | 13,1 Jahre | Lenke 1, 2, 3, 4, 5 und 6 |

Geschlecht

Die Verbesserung des Schulterstandes erwies sich als unabhängig vom Geschlecht der Patienten. Die Häufigkeit der Lokalisation der strukturellen Krümmung ist allerdings

zwischen den Geschlechtern unterschiedlich. Es bestand eine homogene Verteilung bei Patientinnen zwischen Typ 1, 2 und 5 mit jeweils 21 Fällen. Bei Männern wurde Typ 2 doppelt so häufig beobachtet wie der Typ 1; eine isolierte lumbale Skoliose (Typ 5) lag bei Männern nicht vor. Eine Auswertung der AIS in Chongming Island, China, zeigte fast eine gleiche Verteilung für die lumbale Skoliose bei Jungen und Mädchen [45]. Damit besteht ein Widerspruch zwischen der chinesischen Studie und dieser Arbeit. Eine geschlechtsbezogene Lokalisation der strukturellen Krümmung für die AIS in Deutschland wurde bisher nicht untersucht. Mehrere große Metaanalysen der Skoliosenepidemiologie zeigen diesbezüglich keine spezifische Verteilung [46, 47].

Im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese ist die Schulterbalance bei Frauen geringfügig, aber nicht signifikant besser als bei Männern. Die Schulterbalance lag durchschnittlich bei 8,07 Punkten bei Frauen und 7,33 Punkten bei Männern.

Lenke-Klassifikation

Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien wurde in dieser Arbeit die Lenke-Klassifikation angewendet, um die Erfassung des Schulterstands im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese einem initialen Skoliosetyp zu zuordnen. Kritik an der Lenke-Klassifikation ist allerdings in der Literatur beschrieben. Die CSVL (central sacral vertical line) sollte als Grundlage für die Evaluation der Krümmungen und für lumbale Modifier genommen werden. Die CSVL setzt voraus, dass die Deckplatte von S1 gerade ist. Ein horizontales Becken ist allerdings nicht die Regel bei AIS. Insbesondere bei s.g. Double Major AIS ist ein geneigtes Becken eine häufige Beobachtung. Sollte der höhere Beckenkamm auf derselben Seite liegen wie die thorakale Konvexität, spricht man von „Pelvis included“, sollte der Beckenkamm niedriger sein, spricht man von „Pelvis excluded“. Dies hat ebenfalls Relevanz für die Therapieentscheidung. Die Mobilität der LWS kann somit eine strukturelle Kurve maskieren. Eine operative Entscheidung allein anhand der Bending-tests ist deswegen problematisch. Die Komplexität der Lenke-Klassifikation im Vergleich mit der King-Klassifikation ist ebenfalls kritisiert worden [24]. Mehreren Studien konnten aber die Reliabilität dieser Klassifikation bestätigen [29, 30]. Außerdem wurde diese Klassifikation sehr häufig von anderen Autoren verwendet [5, 7, 39, 41, 42].

Ono et al., Yagi et al. und Smyrnis et al. untersuchten den Schulterstand nach Korrekturspondylodese für Lenke-Typ 1 und 2 [6, 37, 42]. Tang et al. beobachteten die Veränderungen des Schulterstandes in AIS Lenke 1 [2]. Namikawa et al. analysierten die AIS mit Lenke 1, 2 und 3 [7]. Cao et al. und Qiu et al. werteten die Skoliosen mit Lenke-Typ 2 aus (Tab. 18) [5, 41]. Eine Beobachtung der Schulterveränderungen bei den anderen Lenke-Typen ist selten in der Literatur zu finden. Hong et al. untersuchten 89 Patienten mit allen Kurventypen 2 Jahre nach der operativen Versorgung [39] und Terheyden et al. werteten 102 AIS ein Jahr nach der Korrektur aus [44]. In der vorliegenden Arbeit wurden Patienten mit allen Lenke Klassen 1 bis 6 im Langzeitverlauf (13 Jahre) untersucht und ausgewertet (Seite 36).

Es konnte gezeigt werden, dass im Langzeitverlauf alle Skoliosentypen eine deutliche bessere Schulterbalance (SB) erreichten. Auf ein ähnliches Ergebnis kamen Hong et al. mit einer Nachuntersuchung von 89 Fällen 2 Jahre nach der Korrekturspondylodese [39].

Tang et al. untersuchten 75 Patienten (Lenke 1) und berichteten ebenfalls über eine Besserung des Schulterstandes bei der letzten ambulanten Kontrolle (durchschnittlich 3 Jahre postoperativ) im Vergleich mit dem Entlassungsergebnis [2]. Vor der operativen Versorgung zeigten 37,3% der Patienten einen Schultergeradstand (definiert als kosmetische Schulterbalance von 0 cm +/- 1 cm). Bei der letzten Nachuntersuchung waren 93,3% balanciert.

Bei der Subgruppenanalyse in der vorliegenden Studie hatten 44% der präoperativen rechtskonvex thorakalen Skoliosen einen Schultergeradstand vs. 60% im Langzeitverlauf. Der Nachuntersuchungszeitraum ist allerdings in der aktuellen Arbeit im Durchschnitt 10 Jahre länger.

Die größte positive Veränderung im Schulterstand erreichten die Patienten mit den doppelt strukturellen Krümmungen (MT und L, double majors) mit den Lenke-Typen 3, 4 und 6 (Seite 38). Präoperativ und im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese ist die SB bei Lenke-Typ 2 (doppelthorakal) schlechter als Typ 1 (rechtskonvex thorakal) (Tab. 6).

Nach dem aktuellen Kenntnisstand beschäftigte sich keine vergleichbare Arbeit mit den Auswirkungen der lumbalen Krümmungen auf den Schulterstand im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese. Gründe mögen sein, dass bei ausschließlich lumbal lokalisierten Skoliosen kein negativer Langzeiteinfluss auf die Schulterstellung erwartet wurde. Die SB-Skala besserte sich bei den 21 untersuchten Skoliosen mit Lenke-Typ 5 von 6,38 auf 7,76 Punkte.

Bei Nachuntersuchungen von 102 Patienten ein Jahr postoperativ kamen Terheyden et al. zu der Feststellung, dass geringgradige präoperative lumbale Krümmungen eine der Ursachen für postoperative Schulterdysbalance wären [44]. Durch die Bestimmung des lumbar modifiers nach Lenke in dieser Arbeit (Seite 39) konnte zum selben postoperativen Zeitpunkt (ein Jahr postoperativ) eine Besserung der Schulterbalance für die verschiedenen lumbalen Krümmungen bewiesen werden. Dies widerspricht den Ergebnissen von Terheyden et al.. Außerdem wurden bei der vorliegenden Arbeit die Patienten über diesem Zeitpunkt hinaus beobachtet und die Langzeitveränderungen des Schulterstandes analysiert. Dabei zeigte sich eine Verschlechterung der Schulterbalance nur bei der AIS mit dem lumbar modifier A (niedrige lumbale Krümmung). Bei den modifiers B und C dagegen konnte eine weitere Besserung der Balance beobachtet werden.

Instrumentation und Korrekturverfahren

Das Ziel der Instrumentation bei der AIS ist, intraoperativ eine dreidimensionale Korrektur der Wirbelsäulendeformität zu erreichen. Dabei müssen die strukturellen Krümmungen ausreichend korrigiert werden. Allerdings soll eine Versteifung der kompensatorischen Krümmungen vermieden werden, um vor allem die Lendenwirbelsäule (LWS) beweglich zu erhalten. Außerdem soll das Potenzial für eine spontane postoperative Korrektur der kompensatorischen Krümmungen voll ausgeschöpft werden. Dadurch wird das Risiko einer Dekompensation der Anschlusssegmente reduziert [2, 3, 11, 34, 48].

Oberer und unterer instrumentierter Wirbel

Der obere instrumentierte Wirbel bei den untersuchten Korrekturspondylodosen lag zwischen dem ersten Brust- und dem ersten Lendenwirbelkörper. Die Instrumentation endete bei allen Patienten zwischen dem 5. BWK und dem 4. LWK.

In der Literatur sind mehrere Empfehlungen zum Instrumentationsausmaß bei AIS zu finden [3, 10, 19]. Lenke und Rose empfahlen im Jahr 2007 bei präoperativem Schulterhochstand rechts den 4. oder 5. BWK als obere Instrumentationsende zu nehmen. Die obere Instrumentation sollte am 3. oder 4. BWK bei neutralem Schulterstand und am 2. BWK bei Schulterhochstand links enden [49]. Bjerke et al. bezweifelten die Validität dieser Aussage [50]. Tang et al. untersuchten AIS mit Lenke-Typ 1 und konnten beweisen, dass ein befriedigender Schulterstand trotz weiter kaudal gelegener UIV (upper instrumented vertebra) erreicht werden konnte, da eine spontane Korrektur der proximalen Krümmung über die Jahre zu erwarten ist [2].

Die vorliegende Studie konnte diese Ergebnisse von Tang et al. bestätigen: bei ca. 75% der 25 ausgewerteten AIS mit Lenke-Typ 1 lag die kraniale Instrumentation zwischen dem 4. und 6. und bei einem einzigen beim zweiten Brustwirbel. In keinem Fall endete die Instrumentation kranial bei BWK 3 (s. Anhang). Der Grund dafür dürfte nicht primär im Krümmungsverhalten zu suchen sein, sondern in der anatomischen Situation: In der Regel sind bei PT Skoliosen die Pedikel bei Th3 am meisten dysplastisch. Obwohl die Fälle dieser Arbeit eine kürzere Instrumentationsstrecke und damit weniger Einleitungspunkte für korrigierende Implantate aufwiesen, konnte eine Besserung der SB im Langzeitverlauf nach 13 Jahren festgestellt werden (Abb. 24).

Positiv signifikante Korrelationen zwischen dem oberen instrumentierten Wirbel und der Langzeitkorrektur der PT- und L-Krümmungen konnten nachgewiesen werden. Dies galt nicht für die MT-Skoliose. Das untere Instrumentationsende korrelierte signifikant positiv mit der L-Korrektur nach 13 Jahren und hatte keinen Einfluss auf die PT und MT-Korrektur im Langzeitverlauf. Die Schulterbalance korrelierte nicht mit den UIV und LIV im Langzeitverlauf, auch nicht bei einer Subgruppenuntersuchung der verschiedenen Lenke-Typen.

Korrekturverfahren

Die meisten wissenschaftlichen Arbeiten beziehen sich auf Ergebnisse der allein dorsalen Spondylodesen [7, 39]. Dagegen gibt es wenige Studien, die sich mit dem Effekt der aufwendiger versorgten, also ventralen bzw. ventrodorsalen Aufrichtungsoperationen beschäftigten [51-53]. Die AIS in dieser Arbeit wurden mit ventralen (n = 11, 10,7%), dorsalen (n = 32, 31,1%) und ventrodorsalen Korrekturspondylodesen (n = 60, 58,3%) versorgt. Die ventrodorsale Versorgung erfolgte standardgemäß in Bad Berka in Bauchlage in einer Sitzung.

Es gelang eine durchschnittliche Korrektur der PT-Krümmung um 46%, der MT-Krümmung um 67% und der L-Krümmung um 67% (Tab. 15 und 16). Diese Ergebnisse sind damit mit Cao et al. vergleichbar: 47,4, 70,5 und 71,5% [41]. Ebenso berichten Tang et al. über eine Besserung der PT- und MT- Krümmung auf 41,2% und 66,6%, wobei in dieser Arbeit die lumbale Krümmung nicht ausgewertet wurde [2]. Chang et al. beschrieben für Lenke 2 bei 7 Jahresnachkontrollen 38-50% und 64-71% Korrektur [71]. Die Analyse in der vorliegenden Arbeit für Typ 2 (doppelthorakale Skoliose) zeigte eine vergleichbare durchschnittliche Korrektur von 60% für die PT- und 66% für die MT-Krümmung 13 Jahre nach der operativen Versorgung (Seite 37).

Smyrnis et al. untersuchten 56 thorakale Skoliosen (Lenke 1 und 2) 6 Jahre nach dem Eingriff und berichteten über PT- und MT-Korrekturen von 35% (0-100%) bzw. 53 % (23-83%) [6]. Bei den Patienten dieser Arbeit konnte eine deutlich bessere langfristige Korrektur der MT-Skoliose mit 71% bei Typ 1 und 66% bei Typ 2 erreicht werden. Die PT-Krümmung bei Typ 1 und 2 konnte um 60% korrigiert werden (Tab. 7).

Die durchschnittliche Instrumentationsstrecke der untersuchten AIS betrug bei dorsalen Korrekturen 7,8 Segmente. Mit allein ventraler Skoliosekorrektur konnte die Versteifungsstrecke auf 4,5 Segmente eingeschränkt werden. Für die AIS, die einer ventrodorsalen Korrektur bedurften, bemaß die mittlere Versteifungsstrecke 9,4 Segmente. Damit zeigten die ventralen Spondylodesen die kürzeste instrumentierte Strecke. Die Erklärung dafür ist, dass die ventralen Korrekturen nur bei Lenke 1 und 5 durchgeführt wurden. Diese Fälle hatten eine selektive kurzstreckige Fusion aber die geringste langfristige Skoliosenkorrektur (Abb. 29 und 33). Es konnte eine 48% MT-

Korrektur bei den ventralen vs. 70% bei den dorsalen und 69% bei den ventrodorsalen Eingriffen erreicht werden. Lumbal lag die Korrektur bei 51% vs. 72% bei den dorsalen und 64% bei der ventrodorsalen Versorgung.

Auf der SB Skala konnten von 10 möglichen Punkten im Langzeitverlauf durchschnittlich 7,1, 8,2 und 8 Punkte für die ventralen, dorsalen und ventrodorsalen Korrekturspondylodesen erreicht werden (Abb. 36). Die dorsale und ventrodorsale Korrektur führten zu einem langfristig besseren Schulterstand. Dies geht konform mit den Ergebnissen von Yong et al., die 190 Patienten mit selektiver thorakoskopisch assistierter Instrumentation behandelt haben und eine Besserung der SB feststellten. Allerdings betrug die durchschnittliche Nachuntersuchungszeit nur 24 Monate [54]. In der Langzeitanalyse dieser Arbeit zeigte sich, dass die selektive ventrale Fusion sich bis zum Ablauf des ersten postoperativen Jahres deutlich verbesserte, allerdings in den weiteren Jahren wieder geringfügig verschlechterte. Betz et al. konnten beweisen, dass durch eine selektive ventrale Fusion 2,5 Segmente geschont werden konnten [33]. In dem Patientenkollektiv bei der vorliegenden Arbeit konnten im Vergleich zu den anderen Zugangswegen mit dem allein ventralen Verfahren mindestens 3,3 Segmente eingespart werden (Abb. 33).

Die Zuordnung der untersuchten AIS nach angewandter Korrekturtechnik zeigte, dass die stärkste langfristige Skoliosenkorrektur durch die alleinige dorsale Versorgung erreicht wurde. Dieses Ergebnis darf allerdings nicht ohne Analyse der Ausgangsbefunde ausgewertet werden. Die rigidesten Krümmungen wurden in dieser Studie mittels ventrodorsaler Korrektur behandelt (Abb. 31). Trotz höherer Steifigkeit der Krümmungen bei den ventrodorsalen Fällen mussten nur 1,6 Segmente mehr als bei den dorsalen Korrekturen versteift werden (Abb. 33). Damit ist die gute Derotations- und Aufrichtefähigkeit durch das ventrale Release in MIC-Technik bewiesen (Abb. 30-32). Außerdem erreichten beide Gruppen fast denselben Schulterstand im Langzeitverlauf. Dadurch stellte die ventrodorsale Spondylodese die beste Lösung für die rigiden Krümmungen dar. Eine vergleichbare Arbeit in der Literatur über den langfristigen Effekt der verschiedenen operativen Zugangswege auf den Schulterstand konnte nicht gefunden werden.

Zang et al., untersuchten 49 Fälle mit rigiden AIS und kongenitalen Skoliosen. Die erzeugte Korrektur der MT-Krümmung durch eine ausschließlich dorsale Instrumentation mit präoperativer Traktion lag bei 53,49% (105° vs. 53°) [55]. Saifi et al. erreichten bei solchen Fällen eine 55-prozentige Korrektur und verwendeten vertebrale Osteotomien inklusive Vertebral Column Resection (VCR) [56]. Die vorliegende Arbeit konnte beweisen, dass rigide Skoliosen mit einer kombinierten ventrodorsalen Versorgung in einer Sitzung in Bauchlage (Abb. 32) mit einer durchschnittlichen Korrektur von 68% zufriedenstellend behandelt werden können.

5.2 Schulterstand nach Korrekturspondylodese

Postoperative Schulterhochstände links treten bei den thorakalen Skoliosen häufig auf und können für Patientenunzufriedenheit sorgen [5]. Ein rechtsseitiger Hochstand wird selten in der Literatur als problematisch beschrieben [6]. Smyrnis et al., konnten einen auffälligen Schulterhochstand links in 15 von 56 thorakalen Skoliosen im Rahmen einer Langzeitverlaufsstudie feststellen [6]. Die vorliegende Arbeit zeigte ein ähnliches Ergebnis: in 16 von 55 Fällen (Lenke 1 und 2) persistierte im Langzeitverlauf ein linksseitiger SHS.

Matsumoto et al. analysierten 106 AIS mit Lenke-Typ 1 A. Der radiologische CA lag präoperativ bei $-2.9 \pm 2.8^\circ$, postoperativ bei $2.4 \pm 2.8^\circ$ und 2 Jahre nach der Operation bei $1.8 \pm 2.1^\circ$. Nur 6,6% der Patienten hatten vor der Korrektur einen SHS links. Dies verschlechterte sich unmittelbar nach der OP auf 83% sowie 74,5% bei der letzten Kontrolle. Sie führten auch eine Auswertung des T1-Winkels durch. Bei der japanischen Arbeit wurde allerdings nur zwischen SHS rechts und links unterschieden [57].

In der vorliegenden Arbeit wurden die Patienten in 3 Gruppen aufgeteilt: balanciert, SHS rechts und SHS links. Vor der Operation hatte die Mehrzahl der Patienten (53,4%) einen Schulterhochstand rechts. Unmittelbar nach dem Eingriff waren 46,6% der Fälle mit einem CA $0^\circ \pm 1^\circ$ balanciert. Im Langzeitverlauf lag der prozentuale Anteil balancierter Patienten bei 60,2%. Das spricht dafür, dass der Schulterstand sich in der Folgejahre nach dem Eingriff weiter und deutlich verbesserte (ähnlich zum Ergebnis von Matsumoto et al. [57]). Zur genaueren Abklärung der Schulterveränderung wurde eine separate Analyse der verschiedenen Lenke-Klassen durchgeführt. Die Mehrheit der Patienten

hatten vor der Operation einen Schulterhochstand rechts: Lenke-Typ 2 (53,3%), 3 (80%), 4 (77%) und 5 (57%). Bei 44% der Lenke 1 Patienten standen die Schultern neutral und bei 32% auf der rechten Seite höher. Unmittelbar postoperativ konnte ein neutraler Schulterstand bei 56% der Lenke 1 Patienten, aber nur 43,3% bei Lenke 2 erreicht werden. Der prozentuale Anteil linksseitig hochstehender Schultern lag bei den doppelthorakalen Skoliosen bei der ersten postoperativen Kontrolle mit 46,7% der Fälle noch höher (Abb. 35). Dies steht im Einvernehmen mit der Arbeit von Qiu et al. [5]. Im Langzeitverlauf änderte sich der Schulterstand: Sowohl bei Typ 1 als auch 2 erreichen 60% der Patienten einen geraden Schulterstand. Bei ca. 30% der Patienten persistierte die SHS links in beiden Gruppen.

Der SS der lumbal linkskonvexen Skoliosen (Lenke 5) verhielt sich präoperativ ähnlich wie bei den thorakalen. Dies korrigierte sich unmittelbar postoperativ bei 61% der Patienten auf einen Geradstand. Im Langzeitverlauf verblieben davon 52,4% balanciert, 23,8% standen rechts höher und 23,8% links (Abb. 35).

Zusammengefasst erkennt man hier, dass die Dynamik des Schulterstandes im postoperativen Verlauf bei Typ 1 und 2 Krümmungen am größten ist. Deswegen beschäftigten sich die meisten Autoren mit dem SS nach Korrekturspondylodese thorakaler Skoliosen [2, 5, 53]. Diese Arbeit konnte aber zeigen, dass viele aus dieser Patientengruppe im Langzeitverlauf einen neutralen Stand erreichten. Das spiegelt auch eine kompensatorische Rolle der LWS wider, welche bei den strukturellen thorakalen Skoliosen frei beweglich (ohne Instrumentation) blieb.

Das Problem ist aber, dass eine rigide PT-Skoliose und Schulterdysbalance auch in Lenke 4 und 5 zu finden sind, wobei diese Skoliosearten in der Literatur selten analysiert werden (Tab. 18). Terheyden et al. untersuchten präoperativ und ein Jahr postoperativ 102 AIS mit allen Lenke-Typen. Sie stellten dabei fest, dass die durchschnittliche Schulterhöhe sich signifikant von einem Schulterhochstand rechts von -8,5 mm vor der Operation auf Hochstand links von 3,3 mm bei der Nachuntersuchung ändert. Sie verwendeten drei radiologische Parameter [44]. Zu ähnlichen Ergebnissen kam die vorliegende Arbeit mit einer Änderung des Schulterstandes von SHS rechts; RCIA: $-1,89^\circ$ und CA: $-1,32^\circ$ zu einem SHS links; RCIA: $1,05^\circ$ und CA: $0,46^\circ$ (Tab. 13). Diese Analyse erfolgte allerdings über eine Nachbeobachtungszeitraum von 13 Jahren. Für diesen Zweck wurden zwei

radiologische und ein klinischer Parameter mit einer Gradeinteilung verwendet. Damit war es möglich, die Messungen auch bei fehlendem radiologischen und fotografischen Raster durchzuführen.

Bezogen auf das Korrekturverfahren zeigte sich im Langzeitverlauf ein Schultergeradstand in 65,6% nach dorsaler und in 61,7% nach ventrodorsaler Versorgung. Ein Schulterhochstand links wurde nach dorsalen Korrekturen mit 28,1% 4-mal häufiger beobachtet als rechts (6,3%). Eine gleichmäßige Verteilung zwischen Rechts- und Linkshochstand (20% und 18,3%) fand sich nach der ventrodorsalen Versorgung (Abb. 36).

5.3 Spielt das Lot eine Rolle bei den Veränderungen des Schulterstandes nach Korrekturspondylodese?

Die Besserung der koronaren Balance ist ein Hauptziel der Korrekturspondylodese [64, 65]. Um die Auswirkung des Lots auf den Schulterstand nach Korrekturspondylodese genauer zu untersuchen, wurde das Schulterverhalten im Langzeitverlauf bei ausgewählten Patientengruppen analysiert. Eine Lotverbesserung der untersuchten Patienten konnte mittels der verwendeten Skala (Seite 31) nachgewiesen werden. Die gemessenen Mittelwerte im postoperativen Verlauf besserten sich fortlaufend auch nach der Korrektur (Tab. 12), außer für Typen 3 und 4. In diesen Skoliosenarten konnte eine leichte Verschlechterung des Lots nach 13 Jahren im Vergleich mit den erreichten Werten am ersten postoperativen Jahr (Abb. 38) festgestellt werden. Bei der kombinierten thorakalen und lumbalen strukturellen Skoliose war die positive Veränderung der Schulterbalance am größten im Vergleich zu den anderen Krümmungen (Abb. 24). Eine kompensatorische Abweichung zur Verbesserung des Lots bei diesen langstreckig instrumentierten Patienten war kaum möglich.

Insgesamt erreichten im Langzeitverlauf 57,2% der Patienten ein neutrales Lot (CSVL=0 cm +/- 1 cm) vs. 32% vor der Korrektur. Der Anteil der Patienten mit Linksabweichung blieb unverändert bei 34% im Langzeitverlauf, während die Rechtsabweichung des Lots von 32% auf 7,8% reduziert wurde (Abb. 39). Karami et al. berichteten über 82% vs. 18%, dabei wurde die koronare Dysbalance als 2 cm Lotabweichung definiert [59].

Balancierte Schultern konnten nach 13 Jahren in 32 Fällen trotz präoperativem SHS rechts erreicht werden. Im Lot waren 12 Patienten vor und 17 Fälle im Langzeitverlauf nach der Korrektur (Abb. 41). Das Lotverhalten bei den Patienten mit einem neutralen SS, die unmittelbar nach der Korrektur einen SHS links zeigten, war unterschiedlich. Die Anzahl der Lotabweichung nach links nahm zu, um einen neutralen Schulterstand zu erreichen (Abb. 42).

Eine Rechtsabweichung des Lots im Langzeitverlauf ist deutlich seltener als links bei der operierten AIS. Obwohl eine Besserung des Lots und der Schulterbalance nach Korrekturspondylodese bei vielen Patienten erreicht wurde, waren die Ausreißer bezüglich des Lots eher die rigiden thorakalen und lumbalen Skoliosen mit langstreckigen Instrumentationen.

Interessant waren die Veränderungen der adoleszenten idiopathischen Skoliosen mit präoperativ neutralem Schulterstand und neutralem Lot. Die Langzeitbeobachtung dieser Gruppe zeigte, dass alle 10 Fälle im Lot blieben. Der SS zeigte ein anderes Ergebnis: 6 Patienten neutral, 3 mit links und 1 mit rechts SHS. Die koronare Balance hatte in dieser Gruppe Priorität (Abb. 40).

5.4 Radiologische und klinische Parameter des Schulterstandes

Es fehlt eine einheitliche Methode zur Bestimmung von Schulterstand bzw. -dysbalance nach Korrekturspondylodese bei AIS [5, 37]. Aufgrund dieser Problematik wurden in den letzten Jahren verschiedene Verfahren publiziert [5, 6, 41, 44].

Bei der Auswertung der Schulterbalance (SB) bei AIS muss zwischen der äußeren und inneren Schulterhöhe differenziert werden [5, 60]. Zur Beurteilung der inneren Schulterhöhe stehen mehrere Parameter zur Verfügung: T1-Winkel, erste Rippe-Winkel [5, 61], Trapezius-Abstand, erste Rippe-Klavikula Abstand [5], erste Rippe-Index [6]. Zur Bestimmung der äußeren Schulterhöhe können Coracoidhöhendifferenz (CHD)[4], RCIA, CA, CCAD (Chestcage-Clavicle angle difference) [8, 42, 44] und Akromionhöhendifferenz (AHD) [2, 5] verwendet werden. In der Literatur wurde der Schulterhochstand in der Regel links als positiv und rechts als negativ kodiert [5, 27, 37].

Die verwendeten radiologischen Untersuchungsmethoden in dieser Studie: RCIA und T1 [5-7, 46, 54, 55] und der klinische Parameter: CA [2, 4, 6, 37] wurden auch in anderen Arbeiten zur Bestimmung des SS verwendet. Bago et al. 1998 betrachteten den RCIA als reproduzierbaren Parameter mit einer guten Interobserver-Zuverlässigkeit [62]. Einige Autoren kritisierten die Verwendung des T1-Winkels zur Beurteilung der Schultern und fanden eine starke Korrelation zwischen dem CA und dem SS [4, 38, 39, 43, 54, 63]. Die Arbeitsgruppe von Ono et al. dagegen beschrieb nur eine moderate Korrelation zwischen dem CA und der Schulterbalance und empfahlen T1 als Orientierung für die doppelte thorakale Skoliose (Lenke 2).

Umstritten ist allerdings die Korrelation zwischen den erhobenen Parametern [32, 33, 37], so dass eine präoperative kosmetische Beurteilung des Schulterstandes, insbesondere bei den thorakalen Skoliosen von Qiu et al. empfohlen wurde [5]. Ono et al. berichteten über zwei verschiedene Merkmale der Schulterasymmetrie: CA und Trapeziusprominenz sowie deren Korrelation mit den radiographischen Parametern. Sie untersuchten 113 präoperativ rechtskonvexe Skoliosen mit Lenke-Typ 1 und 2 AIS. Trapezius- und Clavikula-Winkel wurden an den klinischen Fotos gemessen und mit der radiologischen Messung vom T1-Winkel, dem Winkel der ersten Rippe und dem Kurvenausmaß verglichen. Der klinische CA lag im Bereich von $-10,6^\circ$ bis $+5,2^\circ$ und hatte eine mäßige Korrelation mit der T1-Neigung, dem Kurvenausmaß und der apikalen Abweichung an der BWS. Die mediale Trapeziusprominenz gemessen als Trapeziuswinkel ($-16,7$ bis $+9,9^\circ$) und Trapeziusflächenverhältnis ($-1,15$ bis $+0,80$) korrelierte gut mit den radiographischen Messungen. Die Autoren folgern, dass zwei unterschiedliche Bereiche der Schulterhöhenasymmetrie (lateral und medial) vorhanden sind: Die mediale Schulterasymmetrie, die sich in der Trapeziusprominenz widerspiegelt, bezieht sich auf Deformitäten, die durch die geneigten proximalen Rippen und T1-Winkel verursacht werden. Ferner die laterale Schulterasymmetrie, welche durch den Clavicula-Winkel widerspiegelt werden kann und schwach mit den o.g. radiographischen Messungen korreliert. Sie empfahlen, die Trapeziusprominenz als Indikator für Schulterbalance zu nehmen und dem CA vorzuziehen [37]. Die vorliegende Arbeit widerspricht dieser Behauptung. Eine starke Korrelation zwischen der Schulterbalance gemessen mit dem CA und den radiologischen Parametern T1-Winkel und RCIA konnte nachgewiesen werden ($p < 0,05$). Die drei Parameter korrelierten signifikant positiv miteinander (Seite

60), wobei die Korrelation zwischen RCIA und CA (Pearson 0,669, $p < 0,05$) stärker war als T1-Winkel und CA (Pearson 0,460, $p < 0,05$). Eine Erklärung dafür ist die anatomische Nähe vom RCIA und CA zum äußeren Schulterbereich. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Kwan et al.. Sie untersuchten prospektiv AIS mit Lenke-Typ 1 und 2 für Halsneigung (cervical tilt) und Schulterbalance und korrelierten diese mit CHD, CRID (Clavicle-Rib Intersection Difference), CA, RSH (radiographische Schulterhöhe) und T1-Winkel. Es konnte eine positive Korrelation zwischen CHD, CRID, CA und RSH mit der Schulterbalance festgestellt werden. Messungen der T1-Winkel korrelierten positiv mit der Halsneigung [60].

Bei den meisten Studien erfolgte die Auswertung des klinischen SS von hinten [2, 4, 5]. Für die Patienten wichtiger ist, was sie im Spiegel selbst beurteilen können: der Schulterstand von vorn, wie er auch in dieser Arbeit ausgewertet wurde.

Alle drei Parameter zeigten eine Besserung der Schulterbalance im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese (Tab. 13). Die vorliegende Arbeit konnte beweisen, dass sich die durchschnittlich gemessenen Werte von SHS rechts vor der Operation im Langzeitverlauf zu einem neutralen bzw. linksseitigen SHS ändern. Eine wichtige Beobachtung bei den verschiedenen Skoliosentypen ist, dass ein tendenziell überschießender linksseitiger SHS im ersten postoperativen Jahr sich im weiteren langfristigen Verlauf zu Gunsten eines neutralen Schulterstandes bessert (Abb. 43-45).

5.5 Lumbale Krümmung

Die spontane Korrektur der lumbalen Krümmung nach selektiver thorakaler Fusion wurde in mehreren Publikationen bestätigt [64-67]. In einer retrospektiven Kohortenstudie bewerteten Larson et al. das Langzeitverhalten der lumbalen Krümmung und untersuchten 19 Patienten mit selektiver thorakaler Fusion sowie 9 Patienten mit thorakaler und lumbaler Fusion. Bei einer selektiven thorakalen Gruppe wurde nach 20 Jahren eine stabile lumbale Krümmung festgestellt [67]. Jansen et al. bestätigten dieses Ergebnis und empfahlen nach einer retrospektiven Untersuchung von 38 thorakalen Skoliosen die selektive thorakale Fusion. Sie betonten die Rolle der oberen LWS in der koronaren Balance nach Korrekturspondylodese [66].

Diese Arbeit konnte beweisen, dass die Veränderungen des Schulterstandes nach Korrekturspondylodese teilweise durch die kompensatorische Fähigkeit der beweglichen LWS erklärbar sind. Die zusätzliche Subgruppenanalyse der lumbalen Veränderungen bei den verschiedenen strukturellen Skoliosenarten bewies diese Rolle (Abb. 49). Eine Zunahme der lumbalen Krümmung im Langzeitverlauf wurde begleitet von einem neutralen Schulterstand bei den thorakalen strukturellen Skoliosen, aber mit SHS links bei den lumbalen. In Zusammenschau mit der Lotanalyse (Seite 52 und 76) erscheint die LWS als Ort des Geschehens zum Erreichen eines besseren Schulterstandes bei akzeptablem Lot. Insgesamt erreichten 35 der untersuchten Patienten (ca. ein Drittel) einen geraden Schulterstand und waren im Lot (nur 10 Fälle waren vor der Korrektur koronar balanciert).

Cao et al. untersuchten Korrekturspondylodesen bei Lenke 2 und zeigten, dass keine Schulterdysbalance bei den Patienten mit einer Zunahme der lumbalen Krümmung (Adding-on) beobachtet wurde [41]. Die Untersuchung in der vorliegenden Arbeit zeigte ähnliche Ergebnisse. Nach Ausschöpfung der Kompensationsmechanismen an der LWS, weichen die Patienten ab, um den gewünschten optischen geraden Schulterstand zu erreichen, manche aber bleiben im Lot und zeigen einen leichten SHS links (Abb. 40-42). Außerdem zeigte diese Arbeit, dass die geringste erreichte Korrektur der LWS im Langzeitverlauf bei Lenke-Typ 2 vorkam. In dieser Patientengruppe wurde die Instrumentation meistens auf die BWS begrenzt. Die kompensatorische Fähigkeit der mobilen LWS-Segmente führte zu einem leichten Korrekturverlust im Langzeitverlauf und dadurch zum Erhalt einer besseren Schulter- und Rumpfbalance. Auch Matsumoto et al. vermuteten eine Rolle der Zunahme der lumbalen Krümmung im postoperativen Verlauf bei den korrigierten thorakalen Skoliosen (adding-on) [57].

5.6 Kritische Betrachtung der eigenen Untersuchungen

In dieser Studie wurden 103 AIS untersucht. Ein mögliches Bias ist der Umstand, dass alle Patienten mit unvollständiger Bilddokumentation ausgeschlossen werden mussten. Eine Schwäche dieser Arbeit ist, dass nur 4 Fälle mit Lenke-Typ 6 vorlagen (Abb. 23). Diese Art von Skoliose ist kaum in der Literatur ausgewertet. Die größte Zahl der

Publikationen beschäftigt sich bei der Auswertung des SS mit Lenke-Typ 1 und 2. In dieser Arbeit wurden alle Skoliosearten ausgewertet. Zusammenhänge mit dem Schulterstand bei komplexen thorakalen und lumbalen AIS in jeder Form wurden analysiert.

Es wurden drei Parameter zur Beurteilung des SS bei AIS ausgewählt. Es stehen allerdings viele andere Mess-Methoden zur Verfügung. Aufgrund des fehlenden einheitlichen Standards wurden zur Auswertung der Schulterbalance in der vorliegenden Arbeit weit akzeptable Werte gewählt, welche wiederholt in den verschiedenen Literaturstellen erscheinen. Außerdem ist die Messung dieser Parameter relativ unkompliziert und auf den standardisierten Röntgenbildern schnell und effizient reproduzierbar sowie praktikabel für die Anwendung in den ambulanten Sprechstunden. RCIA und CA reflektieren die äußere Schulterhöhe und reflektieren das Spiegelbild des Patienten.

Eine retrospektive Analyse der vorhandenen Bildgebung und Dokumentation wurde durchgeführt. Damit konnten langfristige Abläufe ausgesucht werden. Es erfolgte keine zusätzliche Patientenbefragung im Rahmen dieser Arbeit, z.B. SRS 22 und SRS 24 Forms bzw. Questionnaires [68–70]. Anfangs gestaltete sich die Wiederbestellung der vor 10 Jahren operierten Patienten sehr erschwert. Umzug der mittlerweile gewachsenen berufstätigen Patienten, Schwangerschaft bzw. familiären Gründen sowie Namensänderung waren die Hauptschwierigkeiten. Es ist allerdings auch ein indirekter Hinweis über den Erfolg der Skoliosenchirurgie und Korrekturspondylodesen bei der AIS. Die Verbesserung der Lebensqualität nach der Korrekturspondylodese durch soziale und berufliche Integration ist letztendlich das Ziel der wirbelsäulenchirurgischen Intervention. Einer der operierten Patientinnen arbeitete als Chirurgin und konnte im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit in OP-Saal regelmäßig Strahlenschutzkleidung trotz langstreckiger Instrumentation der Wirbelsäule problemlos tragen.

6 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wurden sowohl die Schulterbalance als auch der Schulterstand vor und im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese bei AIS ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die operative Versorgung sowohl kurz- als auch langfristig zu einer deutlichen Verbesserung des Schulterstandes und der koronaren Balance führt. Der häufig beobachtete SHS links unmittelbar nach der Korrekturspondylodese bessert sich im Langzeitverlauf bei vielen Patienten spontan, so dass 13 Jahre nach der Korrekturspondylodese ca. zwei Drittel der operierten Patienten einen Schultergeradstand erreichen und nur ein Viertel einen linksseitigen SHS behalten. Bei diesen handelt es sich meist um die thorakalen Skoliosen (Lenke 1 und 2).

Die LWS-Krümmung kann sich in dieser Gruppe dabei geringfügig verschlechtern, um einen ausgeglicheneren Schulterstand zu erreichen. Nach Ausschöpfung der lokalen Kompensationsmechanismen an der LWS verbleibt ein SHS links.

Die rigiden kombinierten thorakalen und lumbalen Skoliosen (Typ 3, 4 und 6) zeigen die größte Verbesserung des Schulterstandes im Langzeitverlauf und gleichzeitig die auffälligste Lotabweichung nach links.

Trotz deutlich stärkerer Rigidität erreichten die AIS mit ventrodorsaler Korrektur einen ähnlich balancierten Schulterstand im Langzeitverlauf wie die allein dorsale Korrekturspondylodese. Damit bietet das ventrale MIC-Release in der Bauchlage eine gute intraoperative Lösung für die extremen Skoliosen, welche nach der dorsalen Release-Operation noch immer ungenügend korrigierbar sind.

7 Zusammenfassung

Trotz einer guten koronaren Korrektur kann die Schulterdysbalance nach Korrekturspondylodese bei adoleszenter idiopathischer Skoliose (AIS) eine Patientenunzufriedenheit verursachen. In der Literatur gibt es nur wenige Langzeitstudien zur Beurteilung des Schulterstandes. Das Ziel dieser Arbeit war die Veränderung des Schulterstands bei den verschiedenen Skoliosearten im Langzeitverlauf zu analysieren und den Zusammenhang mit den verschiedenen Variablen, wie beispielsweise Lenke-Klassifikation, Lotabweichung, Instrumentationsstrecke und Korrekturverfahren zu analysieren.

In dieser Arbeit wurden Langzeitverläufe von 103 AIS retrospektiv ausgewertet. Die ventralen, dorsalen oder ventrodorsalen Korrekturspondylodesen erfolgten zwischen Januar 1994 und Mai 2008. Anhand der Wirbelsäulenganzaufnahmen erfolgte die Messung von der Krümmung vor und nach der Operation, die Bestimmung von dem Rib-clavicle-intersection-Angle (RCIA) und T1-Winkel sowie die Einteilung nach Lenke. Mittels der klinischen fotografischen Dokumentation konnte der Clavicle Angle gemessen werden. Dadurch war es möglich, die Schulterbalance- und Schulterstandveränderungen zu analysieren.

Der häufig beobachtete Schulterhochstand (SHS) links unmittelbar nach der Korrekturspondylodese bessert sich im Langzeitverlauf bei vielen Patienten spontan, so dass 13 Jahre nach der Korrekturspondylodese ca. zwei Drittel der operierten Patienten einen Schultergeradstand erreichen und nur ein Viertel einen linksseitigen SHS behalten. Die LWS-Krümmung kann sich in dieser Gruppe dabei geringfügig verschlechtern, um einen ausgeglicheneren Schulterstand zu erreichen. Nach Ausschöpfung der lokalen Kompensationsmechanismen an der LWS verbleibt ein SHS links. Die rigiden kombinierten thorakalen und lumbalen Skoliosen (Typ 3, 4 und 6) zeigen die größte Verbesserung des Schulterstandes im Langzeitverlauf und gleichzeitig die auffälligste Lotabweichung nach links. Trotz deutlich stärkerer Rigidität erreichten die AIS mit ventrodorsaler Korrektur einen ähnlich balancierten Schulterstand im Langzeitverlauf wie die allein dorsale Korrekturspondylodese. Damit bietet das ventrale thorakoskopische Release in der Bauchlage eine gute intraoperative Lösung für die extremen Skoliosen.

8 Summary

The aesthetic aspect is an important motivating factor for patients and parents to undergo scoliosis surgery. Persisting or even newly appearing shoulder disbalance may cause severe dissatisfaction. Literature studying this issue is scanty and long-term follow up is a rarity. This study analyses the changes of shoulder balance at least 10 years after spinal fusion for the different Lenke types and scoliosis patterns as well as the correlation with the operation techniques and changes in the coronal profile.

In this study, 103 AIS patients, who underwent a ventral, dorsal or combined ventrodorsal corrective spinal fusion in Zentralklinik, Bad Berka between 1994 and 2008 were enrolled. The outer Shoulder level was measured using Clavicle Angle (CA) on standardized clinical photographs. The radiological evaluation included measurement of the scoliosis in the proximal thoracic, main thoracic and lumbar regions, measuring the Rib-clavicle-intersection-Angle (RCIA) and T1-angle. The measurements were taken preoperatively, and on follow up examinations postoperatively as well as 1 and 13 years after the operation. The shoulder balance and level were evaluated and compared with the different variables.

The commonly observed elevated left shoulder after surgery resolved on the long-term in almost two thirds of the cases. Only the quarter of the examined population showed a persisting elevation of the shoulder. The lumbar spine plays a compensatory role in these patients allowing a better shoulder balance. After consuming the adaptive capability of the lumbar spine, left shoulder elevation seems to be the way to maintain an acceptable coronal profile. Patients with combined thoracic and lumbar scoliosis showed the best improvement of shoulder balance after surgery. However, these patients had an abnormal coronal profile.

Despite the high rigidity of the scoliosis curves, patients undergoing ventrodorsal corrective surgery in the prone position showed an improvement of shoulder balance as much as the patients with dorsal corrective surgeries. The thoracoscopic minimally invasive ventral release (MIC) seems to be a good intraoperative solution for the complicated scoliosis cases.

9 Literaturverzeichnis

1. Srs.org. Adolescent idiopathic scoliosis | Scoliosis Research Society. [online]: <https://www.srs.org/professionals/online-education-and-resources/conditions-and-treatments/adolescent-idiopathic-scoliosis> [aufgerufen am 9 Jun. 2018].
2. Tang X, Luo X, Liu C, Fu J, Yao Z, Du J, Wang Y, Zhang Y, Zheng G. The spontaneous development of cosmetic shoulder balance and shorter segment fusion in adolescent idiopathic scoliosis with Lenke I curve. *Spine*. 2016; 41(12):1028-1035.
3. Azar F, Beaty J, Canale S, Campbell W, Warner W, Sawyer J. *Campbell's operative orthopaedics. Scoliosis and Kyphosis*. 2017; 13th ed. Elsevier, 1691-1895.
4. Akel I, Pekmezci M, Hayran M, Genc Y, Kocak O, Derm O. (2007). Evaluation of shoulder balance in the normal adolescent population and its correlation with radiological parameters. *European Spine Journal*. 2007;17(3):348-354.
5. Qiu X, Ma W, Li W, Wang B, Yu Y, Zhu Z, Qian B, Zhu F, Sun X, Cheng J, Qiu Y. Discrepancy between radiographic shoulder balance and cosmetic shoulder balance in adolescent idiopathic scoliosis patients with double thoracic curve. *European Spine Journal*. 2008;18(1):45-51.
6. Smyrnis P, Sekouris N, Papadopoulos G. Surgical assessment of the proximal thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*. 2009;18(4):522-530.
7. Namikawa T, Matsumura A, Kato M, Hayashi K, Nakamura H. Radiological assessment of shoulder balance following posterior spinal fusion for thoracic adolescent idiopathic scoliosis. *Scoliosis*. 2015;10(S2).
8. Han X, Liu Z, Qiu Y, Sha S, Yan H, Jin M. Clavicle chest cage angle difference. Is it a radiographic and clinical predictor of postoperative shoulder imbalance in Lenke I. adolescent idiopathic scoliosis? *Spine*. 2016;41(17):1346-1354.
9. Stagnara P, Claude De Mauroy J, Dran G, Gonon G, Costanzo G, Dimnet J. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine*. 1982;7(4):335-342.
10. Errico T, Kostuik J. *Surgical management of spinal deformities. Adult idiopathic Scoliosis and degenerative Scoliosis*. Saunders Elsevier; 2009.
11. Lenke L, Betz R, Harms J, Bridwell K, Clements D, Lowe T. Adolescent idiopathic scoliosis. A new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*. 2001;83(8):1169-1181.
12. Rogala E, Drummond D, Gurr J. Scoliosis incidence and natural history. A prospective epidemiological study. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*. 1978;60(2):173-176.

13. Lowe T, Edgar M, Margulies J, Miller N, Raso V, Reinker K. Etiology of idiopathic scoliosis: current trends in research. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*. 2000;82(8):1157-1168.
14. Shen N, Chen N, Zhou X, Zhao B, Huang R, Liang J, Yang X, Chen M, Song Y, Du Q. Alterations of the gut microbiome and plasma proteome in Chinese patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Bone*. 2018;120:364-370.
15. Sheng F, Xia C, Xu L, Qin X, Tang N, Qiu Y, Cheng J, Zhu Z. New Evidence Supporting the Role of FBN1 in the Development of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine*. 2019;44(4):225-232.
16. Greulich W, Pyle S. Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist. *The American Journal of The Medical Sciences*. 1959;238(3):393.
17. Karol L, Virostek D, Felton K, Jo C, Butler L. The effect of the Risser stage on bracing outcome in adolescent idiopathic scoliosis. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2016;98(15):1253-1259.
18. Risser J, Norquist D. A follow-up study of the treatment of scoliosis. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1958;40(3):555-569.
19. Newton P. Idiopathic scoliosis : Harms Study Group treatment guide. New York: Thieme; 2011.
20. Agabegi S, Kazemi N, Sturm P, Mehlman C. Natural history of adolescent idiopathic scoliosis in skeletally mature patients. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2015;23(12):714-723.
21. Danielsson A. Natural history of adolescent idiopathic scoliosis: a tool for guidance in decision of surgery of curves above 50°. *Journal of Children's Orthopaedics*. 2013;7(1):37-41.
22. Weinstein SL. Natural history. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1999;24(24):2592-600.
23. Hresko M, Talwalkar V, Schwend R. Early detection of idiopathic scoliosis in adolescents. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2016;98(16):e67.
24. Maurice B, Jean-Marie G, Jean-Michel T. Taking the shoulders and pelvis into account in the preoperative classification of idiopathic scoliosis in adolescents and young adults. *European Spine Journal*. 2011;20(10):1780-1787.
25. Lenke L, Edwards C, Bridwell K. The Lenke classification of adolescent idiopathic scoliosis: how it organizes curve patterns as a template to perform selective fusions of the spine. *Spine*. 2003;28(Supplement):S199-S207.
26. Ponseti I, Friedman B. Changes in the scoliotic spine after fusion. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1950;32(4):751-766.
27. King H, Moe J, Bradford D, Winter R. The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1983;65(9):1302-1313.

28. Lenke L, Betz R, Bridwell K, Clements D, Harms J, Lowe T, Shuffelbarger H. Intraobserver and interobserver reliability of the classification of thoracic adolescent idiopathic scoliosis. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1998;80(8):1097-1106.
29. Richards B, Sucato D, Konigsberg D, Ouellet J. Comparison of reliability between the Lenke and King classification systems for adolescent idiopathic scoliosis using radiographs that were not premeasured. *Spine*. 2003;28(11):1148-1156.
30. Niemeyer T, Wolf A, Kluba S, Halm H, Dietz K, Kluba T. Interobserver and intraobserver agreement of Lenke and King classifications for idiopathic scoliosis and the influence of level of professional training. *Spine*. 2006;31(18):2103-2107.
31. Böhm H, El Saghir H. Minimal-invasives ventrales Release und endoskopische ventrale Instrumentation bei Skoliosen. *Orthopäde*. 2000;29(6):535–42.
32. Kim Y, Lenke L, Bridwell K, Cho Y, Riew K. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? *Spine*. 2004;29(3):333-342.
33. Betz R, Harms J, Clements D, Lenke L, Lowe T, Shufflebarger H, Jeszenszky D, Beele B. Comparison of anterior and posterior instrumentation for correction of adolescent thoracic idiopathic scoliosis. *Spine*. 1999;24(3):225-239.
34. Böhm H, El Ghait H, Shousha M. Thorakoskopisches ventrales Release in Bauchlage simultan zur dorsalen Korrekturspondylodese. *Orthopäde*. 2015;44(11):885-895.
35. Raso V, Lou E, Hill D, Mahood J, Moreau M, Durdle N. Trunk distortion in adolescent idiopathic scoliosis. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 1998;18(2):222-226.
36. Ashton-Miller J, McGlashen K, Schultz A. Trunk positioning accuracy in children 7-18 years old. *Journal of Orthopaedic Research*. 1992;10(2):217-225.
37. Ono T, Bastrom T, Newton P. Defining 2 components of shoulder imbalance. *Spine*. 2012;37(24):E1511-E1516.
38. Amir D, Yaszay B, Bartley C, Bastrom T, Newton P. Does leveling the upper thoracic spine have any impact on postoperative clinical shoulder balance in Lenke 1 and 2 patients? *Spine*. 2016;41(14):1122-1127.
39. Hong J, Suh S, Modi H, Yang J, Park S. Analysis of factors that affect shoulder balance after correction surgery in scoliosis: a global analysis of all the curvature types. *European Spine Journal*. 2013;22(6):1273-1285.
40. Yagi M, Takemitsu M, Machida M. Clavicle chest cage angle difference (CCAD). A novel predictor of postoperative shoulder imbalance in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. 2013;38(12):E705-E712.
41. Cao K, Watanabe K, Hosogane N, Toyama Y, Yonezawa I, Machida M, Yagi M, Kaneko S, Kawakami N, Tsuji T, Matsumoto M. Association of postoperative shoulder balance with adding-on in Lenke type II adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2014;39(12):E705–12.

42. Yagi M, Takemitsu M, Machida M. Chest cage angle difference and rotation of main thoracic curve are independent risk factors of postoperative shoulder imbalance in surgically treated patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. 2013;38(19):E1209-E1215.
43. Kwan MK, Chan CYW. Is there an optimal upper instrumented vertebra (UIV) tilt angle to prevent post-operative shoulder imbalance and neck tilt in Lenke 1 and 2 adolescent idiopathic scoliosis (AIS) patients? *Eur Spine J*. 2016. 25(10):3065–74.
44. Terheyden JH, Wetterkamp M, Gosheger G, Bullmann V, Liljenqvist U, Lange T, Schulze A, Schulte T. Predictors of shoulder level after spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*. 2018;27(2):370–80.
45. Du Q, Zhou X, Negrini S, Chen N, Yang X, Liang J. Scoliosis epidemiology is not similar all over the world: a study from a scoliosis school screening on Chongming Island (China). *BMC Musculoskelet Disord*. 2016;17:303.
46. Kamtsiuris P, Atzpodien K, Ellert U, Schlack R, Schlaud M. Prävalenz von somatischen Erkrankungen bei Kindern und Jugendlichen in Deutschland. *Bundesgesundheitsblatt*. 2007;50(5–6):686–700.
47. Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop*. 2013;7(1):3.
48. Lenke L, Betz R, Bridwell K, Harms J, Clements D, Lowe T. Spontaneous lumbar curve coronal correction after selective anterior or posterior thoracic fusion in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. 1999;24(16):1663-72.
49. Rose P, Lenke L. Classification of operative adolescent idiopathic scoliosis: Treatment guidelines. *Orthopedic Clinics of North America*. 2007;38(4):521-529.
50. Bjerke B, Cheung Z, Shifflett G, Iyer S, Derman P, Cunningham M. Do current recommendations for upper instrumented vertebra predict shoulder imbalance? an attempted validation of level selection for adolescent idiopathic scoliosis. *HSS Journal*. 2015;11(3):216-222.
51. Anand N, Baron EM, Kahwaty S. Evidence basis/outcomes in minimally invasive spinal scoliosis surgery. *Neurosurg Clin N Am*. 2014;25(2):361–75.
52. Lonner BS, Auerbach JD, Levin R, Matusz D, Scharf CL, Panagopoulos G, Sharan A. Thoracoscopic anterior instrumented fusion for adolescent idiopathic scoliosis with emphasis on the sagittal plane. *Spine* 2009;9(7):523–9.
53. Longis P-M, Odri G, Passuti N, Brossard D, Delécrin J. Does thoracoscopic anterior release of rigid idiopathic scoliosis associated with correction by posterior instrumentation result in better long-term frontal and sagittal balance? *Orthop Traumatol Surg Res*. 2011;97(7):734–40.
54. Yong MRNO, Izatt MT, Adam CJ, Labrom RD, Askin GN. Secondary curve behavior in Lenke type 1c adolescent idiopathic scoliosis after thoracoscopic selective anterior thoracic fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(23):1965–74.

55. Zang L, Fan N, Hai Y, Lu S, Su Q, Yang J, Guan L, Kang N, Meng X, Liu Y. Evaluation of the predictors of postoperative aggravation of shoulder imbalance in severe and rigid thoracic or thoracolumbar scoliosis. *European Spine Journal*. 2015;25(10):3353-65.
56. Saifi C, Laratta J, Petridis P, Shillingford J, Lehman R, Lenke L. Vertebral column resection for rigid spinal deformity. *Global Spine Journal*. 2017;7(3):280-290.
57. Matsumoto M, Watanabe K, Kawakami N, Tsuji T, Uno K, Suzuki T, Ito M, Yanagida H, Minami S, Akazawa T. Postoperative shoulder imbalance in Lenke type 1A adolescent idiopathic scoliosis and related factors. *BMC Musculoskelet Disord*. 2014;15(1):366.
58. Frez R, Cheng JC, Wong EM. Longitudinal changes in trunkal balance after selective fusion of King II curves in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000;25(11):1352-9.
59. Karami M, Maleki A, Mazda K. Assessment of coronal radiographic parameters of the spine in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *Arch Bone Jt Surg*. 2016;4(4):376-380.
60. Kwan MK, Wong KA, Lee CK, Chan CYW. Is neck tilt and shoulder imbalance the same phenomenon? A prospective analysis of 89 adolescent idiopathic scoliosis patients (Lenke type 1 and 2). *Eur Spine J*. 2016;25(2):401-8.
61. Kuklo TR, Lenke LG, Graham EJ, Won DS, Sweet FA, Blanke KM, Bridwell K. Correlation of radiographic, clinical, and patient assessment of shoulder balance following fusion versus nonfusion of the proximal thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002;27(18):2013-20.
62. Matamalas A, Bagó J, D'Agata E, Pellisé F. Reliability and validity study of measurements on digital photography to evaluate shoulder balance in idiopathic scoliosis. *Scoliosis*. 2014;9(1):23.
63. Kuklo T, Lenke L, Won D, Graham E, Sweet F, Betz R, Bridwell K, Blanke K. Spontaneous proximal thoracic curve correction after isolated fusion of the main thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. 2001;26(18):1966-1975.
64. McCall RE, Bronson W. Criteria for selective fusion in idiopathic scoliosis using Cotrel-Dubousset instrumentation. *J Pediatr Ortho*. 1992;12(4):475-9.
65. Bridwell KH. Surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis: the basics and the controversies. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1994;19(9):1095-100.
66. Jansen R, van Rhijn L, Duinkerke E, van Ooij A. Predictability of the spontaneous lumbar curve correction after selective thoracic fusion in idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*. 2007;16(9):1335-1342.
67. Larson AN, Fletcher ND, Daniel C, Richards BS. Lumbar curve is stable after selective thoracic fusion for adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(10):833-9.

68. Cheung K, Cheng E, Chan S, Yeung K, Luk K. Outcome assessment of bracing in adolescent idiopathic scoliosis by the use of the SRS-22 questionnaire. *International Orthopaedics*. 2006;31(4):507-511.
69. Bokshan S, Godzik J, Dalton J, Jaffe J, Lenke L, Kelly M. Reliability of the revised Scoliosis Research Society-22 and Oswestry Disability Index (ODI) questionnaires in adult spinal deformity when administered by telephone. *The Spine Journal*. 2016;16(9):1042-1046.
70. Li N, Xu C, Shen M, Luo M, Wang J, Xia L. Clinical outcomes of posterior pedicle screw instrumentation without osteotomy in the management of adolescent idiopathic scoliosis. *Medicine*. 2018;97(36):e12122.
71. Chang D, Kim J, Kim S, Lim D, Ha K, Suk S. How to improve shoulder balance in the surgical correction of double thoracic adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. 2014;39(23):E1359-E1367.

10 Anhang

Tabelle I. Der obere instrumentierte Wirbel für die verschiedenen Lenke-Typen.

| Lenke | Häufigkeit | Prozent | | Kumulierte Prozente |
|----------|------------|---------|-------|---------------------|
| 1 | 9 | 1 | 4,0 | 4,0 |
| | 11 | 9 | 36,0 | 40,0 |
| | 12 | 6 | 24,0 | 64,0 |
| | 13 | 6 | 24,0 | 88,0 |
| | 14 | 2 | 8,0 | 96,0 |
| | 15 | 1 | 4,0 | 100,0 |
| | Gesamt | 25 | 100,0 | |
| 2 | 8 | 6 | 20,0 | 20,0 |
| | 9 | 12 | 40,0 | 60,0 |
| | 10 | 7 | 23,3 | 83,3 |
| | 11 | 1 | 3,3 | 86,7 |
| | 12 | 3 | 10,0 | 96,7 |
| | 13 | 1 | 3,3 | 100,0 |
| | Gesamt | 30 | 100,0 | |
| 3 | 9 | 1 | 10,0 | 10,0 |
| | 10 | 4 | 40,0 | 50,0 |
| | 11 | 3 | 30,0 | 80,0 |
| | 12 | 1 | 10,0 | 90,0 |
| | 13 | 1 | 10,0 | 100,0 |
| | Gesamt | 10 | 100,0 | |
| 4 | 9 | 7 | 53,8 | 53,8 |
| | 10 | 3 | 23,1 | 76,9 |
| | 11 | 2 | 15,4 | 92,3 |
| | 13 | 1 | 7,7 | 100,0 |
| | Gesamt | 13 | 100,0 | |
| 5 | 15 | 1 | 4,8 | 4,8 |
| | 16 | 1 | 4,8 | 9,5 |
| | 17 | 3 | 14,3 | 23,8 |
| | 18 | 10 | 47,6 | 71,4 |
| | 19 | 4 | 19,0 | 90,5 |
| | 20 | 2 | 9,5 | 100,0 |
| | Gesamt | 21 | 100,0 | |
| 6 | 11 | 1 | 25,0 | 25,0 |
| | 12 | 1 | 25,0 | 50,0 |
| | 13 | 2 | 50,0 | 100,0 |
| | Gesamt | 4 | 100,0 | 100,0 |

Tabelle II. Der untere instrumentierte Wirbel für die verschiedenen Lenke-Typen.

| Lenke | Häufigkeit | Prozent | Kumulierte Prozente | |
|----------|------------|---------|---------------------|-------|
| 1 | 17 | 2 | 8,0 | 8,0 |
| | 18 | 3 | 12,0 | 20,0 |
| | 19 | 11 | 44,0 | 64,0 |
| | 20 | 6 | 24,0 | 88,0 |
| | 21 | 3 | 12,0 | 100,0 |
| | Gesamt | 25 | 100,0 | |
| 2 | 12 | 1 | 3,3 | 3,3 |
| | 16 | 1 | 3,3 | 6,7 |
| | 17 | 1 | 3,3 | 10,0 |
| | 18 | 2 | 6,7 | 16,7 |
| | 19 | 16 | 53,3 | 70,0 |
| | 20 | 5 | 16,7 | 86,7 |
| | 21 | 3 | 10,0 | 96,7 |
| | 22 | 1 | 3,3 | 100,0 |
| | Gesamt | 30 | 100,0 | |
| 3 | 20 | 1 | 10,0 | 10,0 |
| | 22 | 6 | 60,0 | 70,0 |
| | 23 | 3 | 30,0 | 100,0 |
| | Gesamt | 10 | 100,0 | |
| 4 | 18 | 1 | 7,7 | 7,7 |
| | 19 | 1 | 7,7 | 15,4 |
| | 20 | 2 | 15,4 | 30,8 |
| | 21 | 1 | 7,7 | 38,5 |
| | 22 | 4 | 30,8 | 69,2 |
| | 23 | 4 | 30,8 | 100,0 |
| | Gesamt | 13 | 100,0 | |
| 5 | 21 | 1 | 4,8 | 4,8 |
| | 22 | 8 | 38,1 | 42,9 |
| | 23 | 12 | 57,1 | 100,0 |
| | Gesamt | 21 | 100,0 | |
| 6 | 22 | 2 | 50,0 | 50,0 |
| | 23 | 2 | 50,0 | 100,0 |
| | Gesamt | 4 | 100,0 | |

Tabelle III. Die Instrumentationsstrecke für die verschiedenen Lenke-Typen.

| Lenke | Häufigkeit | Prozent | Kumulierte Prozente |
|----------|------------|---------|---------------------|
| 1 | 3 | 1 | 4,0 |
| | 4 | 2 | 8,0 |
| | 5 | 1 | 4,0 |
| | 6 | 5 | 20,0 |
| | 7 | 4 | 16,0 |
| | 8 | 7 | 28,0 |
| | 9 | 2 | 8,0 |
| | 10 | 2 | 8,0 |
| | 11 | 1 | 4,0 |
| | Gesamt | 25 | 100,0 |
| 2 | 4 | 1 | 3,3 |
| | 6 | 1 | 3,3 |
| | 7 | 2 | 6,7 |
| | 8 | 3 | 10,0 |
| | 9 | 7 | 23,3 |
| | 10 | 8 | 26,7 |
| | 11 | 4 | 13,3 |
| | 12 | 3 | 10,0 |
| | 13 | 1 | 3,3 |
| | Gesamt | 30 | 100,0 |
| 3 | 9 | 1 | 10,0 |
| | 10 | 1 | 10,0 |
| | 11 | 3 | 30,0 |
| | 12 | 4 | 40,0 |
| | 14 | 1 | 10,0 |
| | Gesamt | 10 | 100,0 |
| 4 | 5 | 1 | 7,7 |
| | 9 | 1 | 7,7 |
| | 10 | 1 | 7,7 |
| | 11 | 2 | 15,4 |
| | 12 | 2 | 15,4 |
| | 13 | 4 | 30,8 |
| | 14 | 2 | 15,4 |
| | Gesamt | 13 | 100,0 |

| | | | | |
|----------|--------|----|-------|-------|
| 5 | 2 | 2 | 9,5 | 9,5 |
| | 3 | 2 | 9,5 | 19,0 |
| | 4 | 6 | 28,6 | 47,6 |
| | 5 | 8 | 38,1 | 85,7 |
| | 6 | 1 | 4,8 | 90,5 |
| | 7 | 1 | 4,8 | 95,2 |
| | 8 | 1 | 4,8 | 100,0 |
| | Gesamt | 21 | 100,0 | |
| 6 | 9 | 2 | 50,0 | 50,0 |
| | 11 | 1 | 25,0 | 75,0 |
| | 12 | 1 | 25,0 | 100,0 |
| | Gesamt | 4 | 100,0 | |

I. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|--|
| AIS | adoleszente idiopathische Skoliose |
| a.p. | anteroposterior |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CA | Clavicle-Angle, Klavikulawinkel |
| CCAD | Ribcage-Clavicle angle difference |
| CSVL | central sacral vertical line |
| CT | Computertomographie |
| d.h. | das heißt |
| etc. | et cetera |
| ggf. | gegebenenfalls |
| Illust. | Illustration |
| J | Jahr |
| L | lumbar, lumbale |
| LIV | lower instrumented vertebra |
| L prä | präoperative lumbale Skoliose |
| L po | postoperative lumbale Skoliose |
| L x | lumbale Skoliose ein Jahr postoperativ |
| L y | lumbale Skoliose im Langzeitverlauf |
| m | männlich |
| MEP | motorisch evozierte Potenziale |
| MIC | minimal invasive Chirurgie |
| MT | main thoracic, hauptthorakale Skoliose |
| MT prä | präoperative thorakale Skoliose |
| MT po | postoperative thorakale Skoliose |
| MT x | thorakale Skoliose ein Jahr postoperativ |
| MT y | thorakale Skoliose im Langzeitverlauf |

| | |
|---------|---|
| n | Anzahl der Fälle |
| OP | Operation |
| p Wert | Signifikanzniveau |
| p.o. | postoperativ |
| Präop. | präoperativ |
| PT | proximal thoracic, proximal thorakale Skoliose |
| PT prä | proximal thorakale Skoliose präoperativ |
| PT po | proximal thorakale Skoliose postoperativ |
| PT x | proximal thorakale Skoliose ein Jahr postoperativ |
| PT y | proximal thorakale Skoliose im Langzeitverlauf |
| RCIA | Rib-Clavicle Intersection Angle |
| RCID | Rib-Clavicle Intersection Difference |
| SB | Schulterbalance |
| s.g. | so genannt |
| SHS | Schulterhochstand |
| SRS | Scoliosis Research Society |
| SS | Schulterstand |
| SEP | sensorisch evozierte Potenziale |
| Sig. | Signifikanz |
| St.abw. | Standardabweichung |
| T1 | T1 Winkel |
| Th | thorakal |
| TL/L | thoracolumbar/ lumbar, thorakolumbale bzw. lumbale Skoliose |
| UIV | upper instrumented vertebra |
| vs. | versus |
| w | weiblich |

II. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1. Schematische Darstellung der Risser-Klassifikation | 4 |
| Abbildung 2. Spontanverlauf einer adoleszenten idiopathischen Skoliose mit einer beginnenden thorakalen Krümmung | 5 |
| Abbildung 3. Beispiele für Krümmungstypen 1-5 nach der King-Klassifikation für adoleszente Skoliose | 7 |
| Abbildung 4. Die Komponenten der Lenke Klassifikation..... | 9 |
| Abbildung 5. Lenke Klassifikation für die idiopathische Skoliose..... | 10 |
| Abbildung 6. Dorsale Korrekturspondylodese..... | 12 |
| Abbildung 7. Ventrodorsale Korrekturspondylodese bei einer rigiden thorakalen Skoliose..... | 14 |
| Abbildung 8. Thorakoskopisch ventrales Release in Bauchlage..... | 15 |
| Abbildung 9. Wirbelsäulenganzaufnahmen vor und im Langzeitverlauf nach ventrodorsaler Korrekturspondylodese bei einer rigiden Skoliose..... | 16 |
| Abbildung 10. Korrekturspondylodese bei doppelthorakal rigider Skoliose mit Schulterdysbalance..... | 17 |
| Abbildung 11. Adams-Vorbeuge-Test | 21 |
| Abbildung 12. Gesamtwirbelsäulenübersicht in 2 Ebenen und Bending-Aufnahmen bei einer adoleszenten idiopathischen Skoliose | 22 |
| Abbildung 13. Schematische Darstellung des Rib-Clavicle-Intersection-Angles | 24 |
| Abbildung 14. Schematische Darstellung des T1-Winkels..... | 24 |
| Abbildung 15. S-förmige adoleszente idiopathische Skoliose vor und 10 Jahre nach der Korrekturspondylodese..... | 26 |
| Abbildung 16. Verteilung der hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Krümmungen in 3 Gruppen in Abhängigkeit der Lokalisation unabhängig vom Lenke-Typ | 27 |
| Abbildung 17. Fotografische Dokumentation der Schulterbalance bei Verlaufskontrolle..... | 28 |
| Abbildung 18. Schematische Darstellung des Clavicle Angles | 29 |
| Abbildung 19. Messung des Clavicle-Angles (CA) vor Korrekturspondylodese und im Langzeitverlauf danach..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 20. Veränderung der Schulterbalance im Langzeitverlauf, nach Geschlecht getrennt..... | 34 |
| Abbildung 21. Skoliosetypen nach Lenke und deren Verteilung bei Mädchen und Jungen..... | 34 |
| Abbildung 22. Schulterbalance nach Geschlecht getrennt vor der Korrektur und im Langzeitverlauf postoperativ..... | 35 |
| Abbildung 23. Die Verteilung des Krümmungstyps der AIS in der Einteilung nach Lenke..... | 36 |
| Abbildung 24. Änderung der Schulterbalance vor und nach der Skoliosenkorrektur in Abhängigkeit vom Lenke-Typ..... | 37 |
| Abbildung 25. Grafische Darstellung der Schulterbalanceveränderung im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese bei den verschiedenen Lenke-Typen. | 38 |
| Abbildung 26. Schulterbalancedynamik im Langzeitverlauf bezogen auf den Lumbar Modifier..... | 40 |
| Abbildung 27. Effekt der strukturellen thorakalen und lumbalen Skoliosen auf den Schulterstand im Langzeitverlauf..... | 40 |
| Abbildung 28. Schulterbalance vor und nach der Korrekturspondylodese bezogen auf das Korrekturverfahren..... | 41 |
| Abbildung 29. Veränderungen der Schulterbalance im Langzeitverlauf bezogen auf den operativen Zugangsweg..... | 42 |
| Abbildung 30. Prozentuale Korrektur der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Krümmungen bezogen auf das Korrekturverfahren..... | 43 |
| Abbildung 31. Ausgangswerte der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Skoliosen bei den verschiedenen operativen Verfahren..... | 44 |
| Abbildung 32. Präoperativer Skoliosewinkel und langfristige Korrektur der hauptthorakalen Krümmung (MT) bei den verschiedenen operativen Verfahren..... | 45 |
| Abbildung 33. Durchschnittliche Instrumentationsstrecke bei den verschiedenen Korrekturverfahren..... | 47 |
| Abbildung 34 a-d. Schulterstand der untersuchten Skoliosen vor und im Langzeitverlauf nach der Skoliosenkorrektur..... | 50 |
| Abbildung 35. Veränderung des Schulterstandes vor und im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese bezogen auf den Lenke-Typ..... | 51 |
| Abbildung 36. Schulterstand im Langzeitverlauf nach operativer Versorgung bezogen auf das Korrekturverfahren..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 37. Schulterstand im Langzeitverlauf bezogen auf die Lokalisation der strukturellen Krümmung. | 52 |
| Abbildung 38. Die Veränderungen des Lots bei den verschiedenen Skoliosentypen..... | 53 |
| Abbildung 39 a-d. Die Veränderung des Lots vor und nach der Korrekturspondylodese. | 54 |
| Abbildung 40 a-b. Veränderungen bezüglich Lot und Schulterstand bei der Subgruppe der präoperativ balancierten Patienten nach durchschnittlich 13 Jahren. | 55 |
| Abbildung 41 a-b. Lotabweichung bei den balancierten Schultern im Langzeitverlauf nach der Korrekturspondylodese..... | 55 |
| Abbildung 42 a-b. Lotveränderung bei Schulterhochstand links unmittelbar postoperativ. | 56 |
| Abbildung 43. Grafische Darstellung der Veränderungen des Clavicle-Angles (CA) nach der Korrekturspondylodese..... | 58 |
| Abbildung 44. Grafische Darstellung der Veränderungen des Rib-Clavicle-Intersection Angles (RCIA) nach der Korrekturspondylodese. | 58 |
| Abbildung 45. Grafische Darstellung der Veränderungen des T1-Winkels nach der Korrekturspondylodese. | 59 |
| Abbildung 46. Grafische Darstellung des Langzeitverlaufs der Skoliose im Bereich der proximal thorakalen (PT) Krümmung..... | 61 |
| Abbildung 47. Grafische Darstellung des Langzeitverlaufs der Skoliose im Bereich der hauptthorakalen (MT) Krümmung. | 62 |
| Abbildung 48. Grafische Darstellung des Langzeitverlaufs der Skoliose im Bereich der lumbalen/thorakolumbalen Krümmung. | 62 |
| Abbildung 49. Korrelation zwischen dem lumbalen Skoliosenausmaß und dem Clavicle-Angle (CA) im Langzeitverlauf bei den hauptthorakalen (MT) Skoliosen..... | 64 |

III. Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1. King-Klassifikation für adoleszente idiopathische Skoliose (AIS)..... | 8 |
| Tabelle 2: Rib-Clavicle-Intersection-Angle Skala (RCIA-Skala) bzw. Clavicle-Angle Skala (CA-Skala)..... | 30 |
| Tabelle 3. Lot-Skala. | 31 |
| Tabelle 4. Schulterbalance vor der Korrekturspondylodese und 13 Jahre danach, gemessen mit der Schulterkala. | 33 |
| Tabelle 5. Mittelwerte der Schulterbalance und des Lots für Männer und Frauen. | 34 |
| Tabelle 6. Mittelwerte der Schulterbalance in Abhängigkeit vom Lenke-Typ..... | 37 |
| Tabelle 7. Mittelwerte der verschiedenen Variablen in Bezug auf den Lenke-Typ. | 39 |
| Tabelle 8. Verteilung der Patienten bezogen auf das operative Verfahren. | 41 |
| Tabelle 9. Lokalisation des jeweiligen oberen (UIV) und unteren (LIV) instrumentierten Wirbels. | 46 |
| Tabelle 10. Korrelationen zwischen der Instrumentationsstrecke und der Krümmung vor und nach der Korrektur. | 48 |
| Tabelle 11. Schulterstand der untersuchten AIS vor und im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese. | 49 |
| Tabelle 12. Lotskala im Langzeitverlauf nach Korrekturspondylodese. | 53 |
| Tabelle 13. Die klinischen und radiologischen Parameter vor der Korrekturspondylodese und deren Dynamik danach. | 57 |
| Tabelle 14. Schulterbalance und Lot vor der Korrekturspondylodese und im Langzeitverlauf..... | 59 |
| Tabelle 15. Prozentuale Korrektur der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Skoliosen im Langzeitverlauf..... | 63 |
| Tabelle 16. Veränderungen der proximalthorakalen (PT), hauptthorakalen (MT) und lumbalen (L) Krümmungen im Langzeitverlauf. | 63 |
| Tabelle 17. Korrelation zwischen dem lumbalen Skoliosenausmaß und dem Schulterstand im Langzeitverlauf..... | 65 |
| Tabelle 18. Metaanalyse der Arbeiten bezüglich des Schulterstandes bei AIS. | 67 |

IV. Erklärung

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbstständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Ort, Datum

Unterschrift

V. Danksagung

Zuvorderst gilt mein Dank Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Heinrich Böhm. Die vorliegende Dissertation und die mit ihr verbundenen, gemeinsamen Publikationen wurden mir vor allem durch ihn ermöglicht. Unter meinen zahlreichen akademischen Lehrerinnen und Lehrern, sowie als Oberarzt der Wirbelsäulenchirurgie, hat er als Mentor meinen beruflichen Weg geprägt und mich stets gefordert und gefördert.

Weiterhin möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Dr. h.c. Christian Heiß ganz herzlich für die zahlreichen präzisen Bemerkungen sowie die hilfreichen Korrekturen meiner Promotion unter seiner Leitung danken.

Insbesondere der Einstieg in dem wirbelsäulenchirurgischen Fachgebiet wurde mir dadurch erleichtert, dass Ass.-Prof. Dr. med. Mootaz Shousha, Ph.D. (Univ. Alexandria) mir mit viel Geduld die unterschiedlichen Zugangswege der verschiedenen Wirbelsäulenabschnitte näher brachte. Er ist für mich ein großes Vorbild. Auch ihm möchte ich herzlich danken.

Ich möchte Herrn Helge Hudel, Medizinische Informatik, Justus-Liebig-Universität Gießen für seine Unterstützung und die statistische Beratung danken.

Ebenfalls danke ich meinen akademischen und beruflichen Lehrer in Ägypten und Deutschland, die mich während meiner Karriere unterstützten und mir vieles beibrachten.

Ein ganz besonderes Dankeschön möchte ich an meine Eltern, meine Frau und meine Kinder aussprechen. Ihre ständige liebevolle Unterstützung hat mich stets motiviert und angespornt, auch meine beruflichen und akademischen Ziele weiter zu verfolgen.