

Aus dem Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie (ZOU)  
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

„Einfluss einer standardisierten Korrekturhaltung auf die Symmetrie der Wirbelsäule  
bei Personen mit adoleszenter idiopathischer Skoliose“

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der  
Medizin  
der Universitätsmedizin  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Janina Anneliese Schubkegel  
aus Worms

Mainz, 2024

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Hansjörg Schild

Tag der Promotion: 11. März 2025

Für Anneliese Höll,  
die ich leider nie kennenlernen durfte.

# Inhalt

Abkürzungsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung .....	1
2 Literaturdiskussion der adoleszenten idiopathischen Skoliose .....	3
2.1 Krankheitsbild der adoleszenten idiopathischen Skoliose.....	3
2.1.1 Ätiopathogenese.....	4
2.1.2 Verlauf und Prognose.....	6
2.1.3 Komplikationen .....	9
2.2 Diagnostische Verfahren der adoleszenten idiopathischen Skoliose.....	11
2.2.1 Anamnese und klinische Untersuchung.....	11
2.2.2 Röntgen .....	15
2.2.3 Videorasterstereographie .....	18
2.2.3.1 Entwicklung der Videorasterstereographie .....	18
2.2.3.2 Technische Grundlagen der Videorasterstereographie.....	20
2.2.3.3 Möglichkeiten und Grenzen der Videorasterstereographie .....	25
2.2.3.4 Rolle der Videorasterstereographie in der Haltungsanalyse .....	28
2.2.4 Klassifikation.....	30
2.3 Therapie der adoleszenten idiopathischen Skoliose .....	31
2.3.1 Dreidimensionale Skoliosebehandlung nach Katharina Schroth .....	32
2.3.2 Korsett-Therapie.....	35
2.3.3 Operative Verfahren .....	37
2.4 Erkenntnisleitende Fragestellung.....	39
3 Material und Methoden.....	43
3.1 Auswahl der Studienteilnehmenden.....	43
3.2 Analyse der videorasterstereographischen Aufnahmen.....	45
3.2.1 Aufbau und Ablauf der videorasterstereographischen Vermessung.....	46
3.2.2 Erläuterung zum Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS).....	49
3.2.3 Erläuterung zum Parameter Seitabweichung Symmetrielinie VPDM (RMS) ..	51
3.2.4 Erläuterung zum Parameter Oberflächenrotation (RMS) .....	53
3.3 Statistische Methoden .....	55
3.4 Ethikvotum .....	57
4 Ergebnisse.....	57
4.1 Kollektiv der Studienteilnehmenden.....	57
4.2 Deskriptive Daten .....	60
4.2.1 Demographische Daten der Studienteilnehmenden.....	60

4.2.2	Schweregrad der Hauptkrümmung .....	62
4.2.3	Anzahl der Klinikaufenthalte.....	63
4.2.4	Einteilung der Skoliose nach Lokalisation der Hauptkrümmung .....	63
4.3	Statistische Auswertung .....	64
4.3.1	Vergleich der Seitabweichung VP-DM (RMS) zwischen habitueller Haltung und standardisierter Korrekturhaltung.....	65
4.3.2	Vergleich der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zwischen habitueller Haltung und standardisierter Korrekturhaltung .....	66
4.3.3	Vergleich der Oberflächenrotation (RMS) zwischen habitueller Haltung und standardisierter Korrekturhaltung.....	68
4.3.4	Veränderungen zwischen habitueller Haltung und standardisierter Haltung nach Schweregrad der Skoliose .....	69
4.3.5	Veränderungen zwischen habitueller Haltung und standardisierter Haltung nach Anzahl der Klinikaufenthalte.....	71
4.3.6	Veränderungen zwischen habitueller Haltung und standardisierter Haltung nach Lokalisation der Hauptkrümmung .....	74
4.3.7	Betrachtung der Haltungskorrekturfähigkeit anhand der Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS) und Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) .....	77
5	Diskussion .....	81
5.1	Einteilung der Subgruppen und demographische Grundlagen .....	82
5.2	Einfluss der habituellen und standardisierten Korrekturhaltung auf die untersuchten VRS-Parameter .....	82
5.3	Einfluss des Schweregrades der Skoliose auf die Haltungsveränderbarkeit.....	90
5.4	Einfluss der Vorerfahrungen in der konservativen Therapie nach Katharina Schroth auf die Haltungsveränderbarkeit .....	95
5.5	Einfluss der Lokalisation der Skoliose auf die Haltungsveränderbarkeit .....	96
5.6	Analyse der Haltungskorrekturfähigkeit anhand der Parameter der Seitabweichung in der Frontalebene .....	99
5.7	Limitationen der Studie.....	101
5.8	Klinische Relevanz der habituellen Haltung .....	105
5.9	Ausblick.....	107
6	Schlussfolgerung .....	110
7	Zusammenfassung .....	113
8	Literaturverzeichnis .....	115
9	Anhang.....	V

## **Abkürzungsverzeichnis**

3D: dreidimensional

4D: vierdimensional

AIS: Adoleszente idiopathische Skoliose

AKSK: Asklepios Katharina-Schroth-Klinik

a.-p.: anterior-posterior

BMI: Body-Mass-Index

C7: siebter Halswirbel

COP: Center of pressure

DL: dimple left (linkes Lumbalgrübchen)

DM: dimple middle (Mitte der Verbindungslinie DL-DR)

DR: dimple right (rechtes Lumbalgrübchen)

FAMUS: Funktionsanalyse des muskuloskelettalen Systems

H<sub>1</sub>: habituelle Haltung am ersten Messtermin

H<sub>2</sub>: habituelle Haltung am zweiten Messtermin

HRQoL: Health-Related Quality of Life

IMBEI: Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik

M: Mittelwert

MRT: Magnetresonanztomographie

NNT: Number needed to treat

PSSE: physiotherapeutic scoliosis-specific exercises

RMS: Root Mean Square

SK<sub>1</sub>: standardisierte Korrekturhaltung am ersten Messtermin

SK<sub>2</sub>: standardisierte Korrekturhaltung am zweiten Messtermin

SD: standard deviation (Standardabweichung)

SIPS: Spina iliaca posterior superior

SP: Sakrumpunkt

T1: erster Brustwirbel

T12: zwölfter Brustwirbel

USA: United States of America

VP: Vertebra prominens

VRS: Videorasterstereographie

WHO: World Health Organization

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Biomechanisches Entwicklungskonzept der Skoliose .....	5
Abb. 2 Rechtskonvexe Thorakalskoliose von dorsal .....	7
Abb. 3 Progredienz der idiopathischen adoleszenten Skoliose im Wachstumsalter .....	9
Abb. 4 Deformität des Oberkörpers bei ausgeprägter rechtskonvexer Thorakalskoliose .....	13
Abb. 5 Schweregrad der Skoliosen im Adam's-Vorbeugetest .....	14
Abb. 6 Krümmungswinkel nach Cobb.....	16
Abb. 7 Risser-Zeichen.....	17
Abb. 8 Videorasterstereographisches System der Firma Diers GmbH .....	19
Abb. 9 Verfahren der Triangulation.....	20
Abb. 10 Prinzip der Rasterstereographie mit Projektor und Kamera .....	21
Abb. 11 Projiziertes Linienmuster aus der Kameraperspektive .....	22
Abb. 12 Formen in der Oberflächenanalyse .....	23
Abb. 13 Gaußsche Krümmungskarte .....	23
Abb. 14 Erstellung eines dreidimensionalen Wirbelsäulenmodells.....	25
Abb. 15 Körperblöcke in der Therapie nach Katharina Schroth.....	33
Abb. 16 Chêneau-Korsett.....	36
Abb. 17 VRS-Messungen einer 14-jährigen Patientin mit AIS .....	41
Abb. 18 Anatomische Fixpunkte am 3D-Modell der Rückenoberfläche .....	47
Abb. 19 Manuelle Fixpunkt Korrektur in der Software DICAM III .....	48
Abb. 20 Einsatzmöglichkeiten von reflektierenden Oberflächenmarkern .....	49
Abb. 21 Darstellung des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ .....	50
Abb. 22 Rekonstruierte Rückenoberfläche mit Symmetrielinie .....	52
Abb. 23 Skoliotischer Rücken mit eingezeichneter Symmetrielinie S.....	53
Abb. 24 Konstruktion des Wirbelmittelpunkts M im Rumpfquerschnitt .....	54
Abb. 25 Flussdiagramm .....	59
Abb. 26 Histogramm der Altersverteilung mit Normalverteilungskurve .....	61
Abb. 27 Kreisdiagramm zur Verteilung der Schweregrade .....	62
Abb. 28 Histogramm zur Anzahl der Klinikaufenthalte .....	63
Abb. 29 Kreisdiagramm zur Verteilung der Skoliosemuster.....	64
Abb. 30 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimetern .....	65
Abb. 31 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Millimetern.....	66
Abb. 32 Vergleich der Parameter "Seitabweichung VP-DM (RMS)" und "Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)" .....	67
Abb. 33 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Millimetern .....	68
Abb. 34 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimetern unterteilt nach Schweregraden .....	69
Abb. 35 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Millimetern unterteilt nach Schweregraden.....	70
Abb. 36 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Grad unterteilt nach Schweregraden .....	71
Abb. 37 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimeter unterteilt nach Anzahl der Klinikaufenthalte.....	72
Abb. 38 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Millimeter unterteilt nach Anzahl der Klinikaufenthalte .....	73

Abb. 39 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Grad unterteilt nach Anzahl der Klinikaufenthalte .....	74
Abb. 40 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimetern unterteilt nach Lokalisation der Hauptkrümmung .....	75
Abb. 41 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Grad unterteilt nach Lokalisation der Hauptkrümmung .....	76
Abb. 42 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Grad unterteilt nach Lokalisation der Hauptkrümmung .....	77
Abb. 43 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ zwischen SK <sub>1</sub> und H <sub>1</sub> in Millimetern .....	78
Abb. 44 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ zwischen SK <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> in Millimetern .....	79
Abb. 45 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ zwischen SK <sub>1</sub> und H <sub>1</sub> in Millimetern .....	79
Abb. 46 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ zwischen SK <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> in Millimetern .....	80

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1 Klassifikation nach Lokalisation der Hauptkrümmungen .....	31
Tab. 2 Deskriptive Daten zu Körpergröße, Gewicht und BMI .....	61
Tab. 3 Ausmaß der Cobb-Winkel nach Lokalisation im Verlauf der Wirbelsäule .....	63

## 1 Einleitung

Die adoleszente idiopathische Skoliose (AIS) zählt mit einer Prävalenz von 0,47 bis 5,2 % (1) zu den häufigsten Wirbelsäulendeformitäten bei Personen im Alter von 10 bis 18 Jahren. Als Skoliose (altgriechisch: σκολίωσις skolíōsis, deutsch: Krümmung) wird eine dreidimensionale Achsabweichung der Wirbelsäule (2) bezeichnet, welche in der koronaren bzw. frontalen Ebene für die Diagnosestellung mindestens einen Krümmungswinkel in Höhe von 10 Grad nach Cobb aufweisen muss und darüber hinaus eine Rotations- und Torsionskomponente der einzelnen Wirbelkörper besitzt (3). Dieser sogenannte Cobb-Winkel wird üblicherweise anhand von Wirbelsäulenganzaufnahmen im anterior-posterioren Strahlengang ermittelt und spielt eine wichtige Rolle in der Entscheidungsfindung bezüglich der einzuleitenden Therapie.

Neben der etablierten nativradiologischen Untersuchung wurde in den 1990er Jahren die Videorasterstereographie (VRS) als ergänzende Möglichkeit zur Verlaufskontrolle ohne ionisierende Strahlung entwickelt (4). Diese basiert auf der Technik der Triangulation (5). Dabei wird der zu untersuchenden Person ein System aus parallelen Lichtstreifen auf den Rücken projiziert und anhand dessen die Oberflächendeformation rasterstereographisch analysiert. Die Messung erfolgt über das sogenannte 4D-Average-Verfahren. Basierend auf der Erfassung anatomischer Fixpunkte (zum Beispiel Vertebra prominens, Lumbalgrübchen, Sakrumpunkt) und der Oberflächenrotation der Wirbelsäule wird mit Hilfe eines Algorithmus die dreidimensionale Position der Wirbelkörper vom siebten Halswirbel bis zum vierten Lendenwirbel wiedergegeben (6).

Die Anwendung dieses bildgebenden Verfahrens im Klinikalltag hat gezeigt, dass unterschiedliche Instruktionen zur Positionierung der zu untersuchenden Personen die Messergebnisse maßgeblich beeinflussen können (7), obwohl dieser Methode insbesondere bei AIS-Betroffenen eine hohe Reliabilität und Validität zugeschrieben wird (8). Eine ähnliche Problematik wurde auch in mehreren Studien bezüglich des Cobb-Winkels in der Röntgenuntersuchung der Wirbelsäule festgestellt (9, 10). Da die Haltung sowohl während der videorasterstereographischen Messung als auch bei der Röntgenuntersuchung bisher noch nicht ausreichend standardisiert wurde, kommt es im klinischen Alltag insbesondere bei AIS-Betroffenen durch eine erhöhte Variabilität der einnehmbaren Körperhaltungen im Stand (7, 10) zu diskrepanten Ergebnissen in den Kontrolluntersuchungen. Diese lassen demzufolge nur eine geringe Vergleichbarkeit der Messungen im Verlauf zu, was die Entscheidungsfindung zur weiteren Therapie erheblich erschwert.

Zu den konservativen Behandlungsmöglichkeiten der AIS zählt in Kombination mit einer frühzeitigen Korsettversorgung (ab einem Cobb-Winkel von über 20° bis 25° (11)) die

dreidimensionale Skoliose-Therapie nach Katharina Schroth. Die Ziele der Behandlung bestehen unter anderem in der „Stabilisierung der Korrekturhaltung durch Verbesserung der Haltungsleistungsfähigkeit“ sowie der „Beibehaltung der Korrektur auch während der Alltagsverrichtungen über die Anbahnung eines korrigierten Haltungsgefühls“. In Folge der Wiederherstellung der Wirbelsäulensymmetrie stellen sowohl die Schmerzreduktion als auch die Erweiterung der Vitalkapazität der Lunge einen sekundären Behandlungseffekt dar. (12) Bei höhergradigen thorakalen Skoliosen ab 50° nach Cobb sowie lumbalen Krümmungen ab 40° mit starker Rotationskomponente ist eine operative Korrektur der Wirbelsäulenkrümmung in Betracht zu ziehen (3, 13).

Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojektes ist es, den Einfluss einer standardisierten Korrekturhaltung auf die Wirbelsäulensymmetrie zu analysieren und langfristig zur Entwicklung eines standardisierten Untersuchungsablaufes zu verwenden. Dazu sollen zunächst einheitliche Anweisungen zur Positionierung während der VRS-Messung festgelegt werden. Anschließend erfolgt die praktische Anwendung der standardisierten Korrekturhaltung sowie die Datenerhebung mit dem DIERS formetric III 4D an einer definierten Kohorte von AIS-Betroffenen zu verschiedenen Messzeitpunkten. Die Datenanalyse erfolgt hinsichtlich der Seitabweichung und der Oberflächenrotation für die erfassten Segmente der Wirbelsäule. Diese Parameter erklären den größten Teil der Variabilität des Parameters „Skoliose-Winkel“ (14), welcher in hohem Maße mit dem nativradiologisch gemessenen Cobb-Winkel korreliert (8).

Die entwickelte standardisierte Korrekturhaltung könnte perspektivisch in den radiologischen Untersuchungen angewandt werden, um vergleichbare Ergebnisse sowohl zwischen den im Verlauf angefertigten Röntgenbildern als auch zu den VRS-Untersuchungen zu erhalten.

## **2 Literaturdiskussion der adoleszenten idiopathischen Skoliose**

Die Literaturdiskussion gliedert sich in drei große Abschnitte. Dazu gehört zunächst die Erläuterung des Krankheitsbildes der adoleszenten idiopathischen Skoliose. Darauf folgt eine genauere Betrachtung der aktuell eingesetzten diagnostischen Verfahren. Zum Ende hin liegt der Fokus auf den unterschiedlichen Therapiemöglichkeiten, welche je nach Ausprägung und Lokalisation der Skoliose individuell eingesetzt werden.

### **2.1 Krankheitsbild der adoleszenten idiopathischen Skoliose**

Eine physiologische Wirbelsäule gliedert sich in vier Abschnitte und weist eine doppelbogige Krümmung in der Sagittalebene auf. Dabei besteht in der Regel eine Zervikal- und Lumballordose sowie eine Thorakal- und Sakralkyphose. Die Frontalebene zeigt im Idealfall keine Krümmungen, axial liegen keine Wirbelkörperrotationen vor. (15)

Die adoleszente idiopathische Skoliose ist definiert als dreidimensionale Deformität der Wirbelsäule mit strukturellen Veränderungen der Wirbelkörper bei einem Krümmungswinkel nach Cobb im a.-p. Röntgenbild von mindestens 10°. Dabei kommt es sowohl zur Seitabweichung in der Frontalebene als auch zur Rotation der Wirbelkörper in der Transversalebene. Zusätzlich verändert sich in den meisten Fällen je nach Lokalisation der Hauptkrümmung auch das sagittale Profil der Wirbelsäule. Die häufigste Form der AIS stellt die rechtskonvexe Thorakalskoliose dar. Diese neigt häufig zur Ausbildung eines Flachrückens mit einem Kyphosewinkel in der Brustwirbelsäule von unter 20°. Bei Thorakolumbalskoliosen im Übergangsbereich zwischen Brust- und Lendenwirbelsäule kommt es vermehrt zur Ausbildung eines Rundrückens mit einer Kyphose von über 40°. (16)

Bei ungefähr 80 bis 90 % der Skoliosen ist der Auslöser der Erkrankung unbekannt, weshalb diese als „idiopathisch“ bezeichnet werden. Der verbleibende Anteil wird nach ihrer jeweiligen Ätiologie klassifiziert. Dazu gehören beispielsweise kongenitale, neuromuskuläre oder sekundäre Skoliosen. Die mit Abstand häufigste Form der idiopathischen Skoliosen ist die adoleszente Skoliose. Dabei liegt der Zeitpunkt der Erstdiagnose je nach Literatur definitionsgemäß zwischen dem 10. bzw. 11. und dem 18. Lebensjahr in der Adoleszenz (2, 16, 17). Betroffen sind vor allem ansonsten weitestgehend gesunde Jugendliche im präpubertären Wachstumsschub (17). Das weibliche Geschlecht ist bei der adoleszenten idiopathischen Skoliose durchweg häufiger betroffen. Bei Krümmungen zwischen 10° und 20° nach Cobb unterscheidet sich die Geschlechterverteilung mit 1,4 : 1 (weiblich : männlich) zunächst nur marginal. Ab einem Cobb-Winkel über 20° steigt dieses Verhältnis zu Lasten des weiblichen Geschlechts auf 4 : 1 an. Beträgt der Winkel über 40° nach Cobb, sind Mädchen siebenmal häufiger betroffen als Jungen. Die Prävalenz liegt je nach Geschlecht, Ethnie und zugrundeliegender Definition der Skoliose zwischen 0,47 % und 5,2 %. (1)

Vor Beginn der jeweiligen Therapie sollten strukturelle von nichtstrukturellen bzw. funktionellen Skoliosen unterschieden werden. Letztere entstehen in der Regel als biomechanische Reaktion auf eine bereits bestehende strukturelle Verkrümmung (13), eine Beinlängendifferenz mit Beckenschiefstand oder durch schmerzbedingte Schonhaltung. Sie zeigen eine seitliche Verkrümmung der Wirbelsäule ohne Rotation der Wirbelkörper und sind bei Behandlung der auslösenden Pathologie in den meisten Fällen rückläufig. Im Gegensatz dazu sind strukturelle Skoliosen weder aktiv noch passiv vollständig korrigierbar und werden auch „Primärkrümmungen“ genannt, da sie sich zeitlich vor den nichtstrukturellen Krümmungen entwickeln (3, 18). Die reaktiv entstehenden funktionellen Ausgleichskrümmungen tragen auch die Bezeichnung „Sekundärkrümmung“.

### **2.1.1 Ätiopathogenese**

Die Ätiologie der adoleszenten idiopathischen Skoliose ist trotz der Fülle an Forschungsarbeiten zu dieser Thematik bislang nicht vollständig erforscht. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Ansätze in zwei großen Bereichen der Ätiopathogenese wissenschaftlich untersucht. Hierzu gehören zum einen Entstehungs-Hypothesen mit biomechanischem Hintergrund, zum anderen die Betrachtung von genetischen oder epigenetischen Einflussfaktoren.

Die ersten dokumentierten Informationen über das Auftreten einer Skoliose stammen aus den Aufzeichnungen des griechischen Arztes Hippokrates von Kos (um 460-377 v. Chr.), worüber Moen et. al. in ihrer Publikation aus dem Jahr 1999 berichteten. Hippokrates postulierte, dass möglicherweise muskuläre Dysbalancen in Kombination mit einer inkorrekten Haltung die Ursachen für die Wirbelsäulendeformität seien. (19) Später konnte festgestellt werden, dass sich die elektromyographische Aktivität der einzelnen Muskelfasern sowohl auf der konvexen als auch auf der konkaven Seite der deformierten Wirbelsäule nicht signifikant unterscheidet (20). In der Literatur wurde daraufhin ein disproportioniertes Wirbelkörperwachstum im Verhältnis zum Rückenmark als biomechanische Grundlage der Skoliose-Ätiologie diskutiert (21). Dieser Mechanismus ist in Abb. 1 dargestellt. Rote Bereiche der Wirbelsäule markieren ein verstärktes Längenwachstum, blaue Bereiche ein normales oder vermindertes Wachstum.

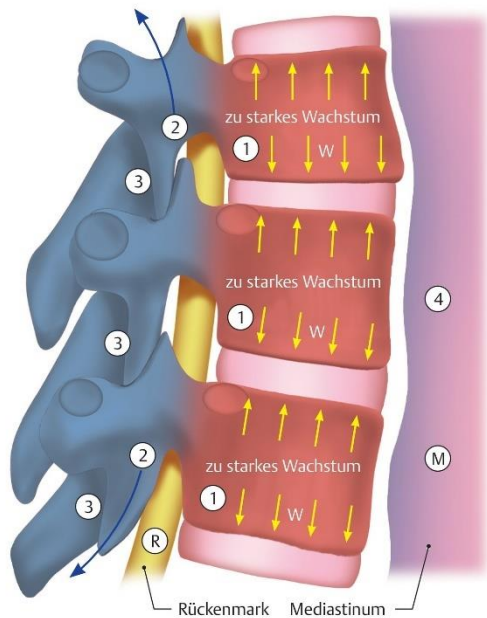


Abb. 1 Biomechanisches Entwicklungskonzept der Skoliose. 1) ausgeprägtes ventrales Wachstum des Wirbelkörpers (W) führt zur Lordosierung. 2) Lordosierung des gezeigten Wirbelsäulenabschnitts, Rückenmark (R) und dorsaler Anteil der Wirbelkörper können nicht folgen. 3) Abnahme der rotatorischen Stellungskontrolle durch die Facettengelenke aufgrund der Lordosierung. 4) Asymmetrisches Mediastinum (M) verursacht Rotation der Wirbelkörper durch mangelnde Kontrolle der Facettengelenke. (Quelle: Simons et. al, 2019, S. 285, (3))

Die ventralen Anteile der Wirbel zeigen bei AIS-Betroffenen ein signifikant stärkeres Wachstum mit enchondraler Ossifikation im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe (22, 23). Sowohl das Rückenmark im Wirbelkanal als auch die dorsal gelegenen Dornfortsätze und Facettengelenke können, aufgrund der langsamer ablaufenden perimembranösen Ossifikation, nicht der beschleunigten Wachstumsgeschwindigkeit der Wirbelkörper folgen. Dabei entsteht die für eine idiopathische Skoliose typische Lordosierung. Durch diese unphysiologische Veränderung des sagittalen Profils können die Facettengelenke die Rotationsstabilität der Wirbelsäule nicht mehr gewährleisten und auch den wachstumsbedingten dorsalen Scherkräften nicht mehr entgegenwirken. Die dabei entstehenden Kräfte können aufgrund des Hueter-Volkman-Gesetzes zu einer fortschreitenden sekundären Verformung einzelner Wirbel und schließlich zu einer Progredienz der Skoliose führen (24). Das Gesetz nach Hueter und Volkman besagt, dass ein dauerhafter Druck im pathologischen Bereich das Längenwachstum eines Knochens hemmt, wodurch eine Änderung der Wachstumsrichtung initiiert wird (25). Ein asymmetrisches Mediastinum unterstützt bei verringertem Rotationsschutz durch die Facettengelenke zusätzlich die Ausbildung einer pathologisch ausgeprägten Wirbelkörperrotation (3).

Ein wichtiges Indiz für genetische Einflussfaktoren als Ursache der idiopathischen Skoliose ist der hohe Anteil an Patientinnen und Patienten mit positiver Familienanamnese. Dieser

liegt ca. bei 97 % (26). Die aktuelle Forschung beschäftigt sich daher mit Genen aus den unterschiedlichsten Bereichen des menschlichen Genoms, welche beispielsweise einen Einfluss auf die Struktur des Bindegewebes, die Knochenbildung, den Knochenstoffwechsel, den Melatonin-Signalweg, die Pubertät oder das Wachstum haben könnten (27). Eine Meta-Analyse aus 2019 konnte anhand von drei genomweiten Assoziationsstudien (28-30) 20 Genloci identifizieren, welche einen signifikanten Zusammenhang mit der AIS zeigen. Diese erklären dennoch nur 4,6 % der phänotypischen Varianz einer idiopathischen Skoliose (31). Obwohl die Rolle genetischer Faktoren bei Entstehung der AIS intensiv untersucht und allgemein anerkannt wurde, konnten die bisher durchgeführten Studien keine ursächliche Mutation eines bestimmten Gens oder einer bestimmten Genkombination benennen (27). Jedoch liegt es nahe, dass mehrere Gene mit unvollständiger Penetranz einen Anteil an der Ätiologie einer idiopathischen Skoliose haben (13). Seit kurzem werden auch epigenetische Faktoren in Betracht gezogen und genauer untersucht (32). Auf Basis dieser Erkenntnisse entwickelten Zaydman et al. 2021 eine Hypothese, nach welcher die veränderte Migration von Neuralleistenzellen in der frühen Embryogenese ein Faktor für das Entstehen einer AIS sein könnte. Demnach sollten Zellen von der konvexen Seite der Krümmung eine normale chondrogene/osteogene Differenzierung durchlaufen, während Zellen von der konkaven Seite möglicherweise einen neuronalen Phänotyp annehmen würden. In einem experimentellen Setting entwickelten Hühnerembryonen nach einer Behandlung ihres Neuralrohres mit „Pax3 siRNA“ während der Reifung skoliotischen Deformitäten. Diese Ergebnisse weisen auf einen epigenetischen Hintergrund der Erkrankung hin (27).

Weitere Ansätze umfassen die Erforschung von muskulären Dysbalancen, neurologischen Faktoren, intraspinalen Anomalien, Bindegewebsveränderungen, Osteoporosen oder endokrinen Störungen im Hinblick auf einen Beitrag zur Entstehung von Skoliosen (3, 16). Zusammenfassend liegt bei Betrachtung des aktuellen Forschungsstandes die Annahme einer multifaktoriellen Genese am nächsten.

### **2.1.2 Verlauf und Prognose**

Die Diagnose einer adoleszenten idiopathischen Skoliose erfolgt meist zufällig im Alter von zehn bis zwölf Jahren. Die Wirbelsäulendeformität führt nur in seltenen Fällen zu Schmerzen oder neurologischen Defiziten im Kindes- bzw. Jugendalter. Sie fällt meist aufgrund des veränderten kosmetischen Erscheinungsbildes in Form eines Rippenbuckels oder Lendenwulstes erstmals im Sportunterricht oder bei Schwimmbadbesuchen auf. (33) Zu weiteren möglichen Veränderungen des Oberkörpers zählen Schulter-/ Brustkorbasymmetrien, unterschiedlich geformte Taillendreiecke oder eine Fehlstellung des Beckens (2). Das typische Erscheinungsbild einer rechtskonvexen Thorakalskoliose als häufigste Form der AIS, ist in der folgenden Abb. 2 illustriert.

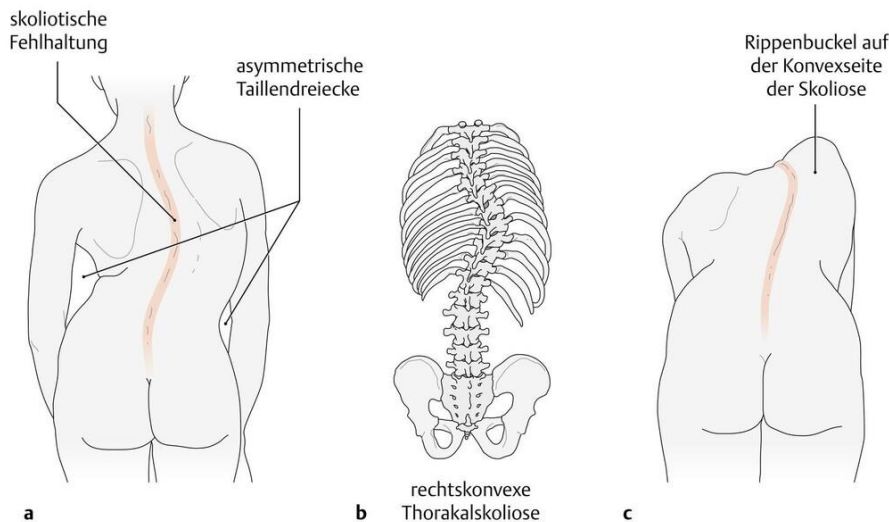


Abb. 2 Rechtskonvexe Thorakalskoliose von dorsal a) im aufrechten Stand b) Skelett einer rechtskonvexen Thorakalskoliose c) im Vorbeugeetest nach Adams. (Quelle: Schünke et al., 2018, S. 135 (34))

Entsprechen dem aktuellen Stand der Literatur liegen bisher nur sehr wenige Informationen darüber vor, welche wirtschaftlichen Auswirkungen die AIS auf das Gesundheitssystem und damit auch auf die Gesellschaft hat. Daher befasst sich eine niederländische Studie seit 2023 mit dieser Problematik und entwickelte in diesem Rahmen einen Ansatz zur Untersuchung dieser Fragestellung anhand von validierten und standardisierten Fragebögen. (35) Die wenigen bereits vorhandenen Studien befassen sich entweder ausschließlich mit den Kosten bei AIS-spezifischen chirurgischen Eingriffen (36, 37) oder evaluieren die nicht-operativen Behandlungskosten bei Erwachsenen mit AIS (38). Die Altersgruppe der AIS-Betroffenen wurde bei der letztgenannten Studie nicht miteinbezogen, weshalb hierfür keine Daten vorliegen.

Im mittleren Lebensalter besteht sowohl bei konservativ als auch bei operativ behandelten AIS-Betroffenen eine erhöhte Inzidenz von Bandscheibendegeneration und leichten Rückenschmerzen im Vergleich zu einer alters- und geschlechtergleichen Kontrollgruppe. Dies wirkt sich jedoch nur in geringem Maße auf die gesundheitsbezogene Lebensqualität der Patientinnen und Patienten aus. (39-41) Die rückenschmerzbedingte Einnahme von Analgetika ist in der Regel nicht notwendig (3). Bezüglich Heirat, Schwangerschaft und Sexualität kommt es bei erwachsenen AIS-Betroffenen im Vergleich zur Kontrollgruppe nur im Bereich der sexuellen Funktion zu leichten schmerzbedingten Einschränkungen (42).

Des Weiteren zeigt eine Metanalyse aus dem Jahr 2023 ein vermehrtes Auftreten von Rückenschmerzen während der Schwangerschaft bei AIS-Patientinnen. Bei operativ behandelten AIS-Patientinnen kam es außerdem häufiger zu geringfügigen Komplikationen im Zusammenhang mit einer Epidural- und Spinalanästhesie im Vergleich zu konservativ

behandelten Personen und der gesunden Kontrollgruppe. Insgesamt unterschied sich die Anzahl der Patientinnen, die mittels Kaiserschnittes entbunden haben, nicht von den Kontrollpersonen ohne Skoliose. Bei einigen Patientinnen kam es allerdings während der Schwangerschaft unabhängig von der zuvor durchgeführten Therapie zu einem Fortschreiten der Wirbelsäulenkrümmung. (43)

Abhängig von Lokalisation und Ausmaß der Skoliose kann es ohne Therapie trotz der Benignität der Erkrankung zu relevanten Komplikationen kommen (44), welche in Kapitel 2.1.3 näher erläutert werden. Auf Grundlage älterer Studien zum natürlichen Verlauf unbehandelter idiopathischer Skoliosen (45-47) konnte das Progredienzverhalten unterschiedlicher Krümmungen genauer untersucht werden. Als Faustregel ergab sich dabei laut Weinstein und Ponseti, dass Krümmungen, deren Cobb-Winkel nach Abschluss des Skelettwachstums unter  $30^\circ$  betrug, nicht zu einer weiteren Verschlechterung der Gradzahl neigten (45). Stärker ausgeprägte Krümmungen zwischen 50 und 75 Grad, insbesondere mit thorakaler Lokalisation, verschlechterten sich bei ausgewachsenen Patientinnen und Patienten stetig (47) mit einer jährlichen Zunahme von  $0,4^\circ$  bis  $1^\circ$  (13). Zur Abschätzung des verbleibenden Skelettwachstums wird häufig das Einsetzen der Menarche (erste Menstruationsblutung eines Mädchens) oder des Stimmbruchs herangezogen. Das Wirbelsäulenwachstum ist schätzungsweise ca. zwei Jahre nach diesem Zeitpunkt beendet (2).

Im folgenden Diagramm (Abb. 3) ist das Progredienzverhalten von unterschiedlich starken Krümmungen in verschiedenen Altersklassen auf Basis der Studienergebnisse aus 1982 von Nachemson et al. dargestellt (48). Generell gilt, dass das Risiko für eine Verschlechterung der Skoliose mit der Ausprägung der Krümmung steigt. Entsprechend umgekehrt dazu verhält sich das Alter, da die Skelettreife und somit das Ende der Wachstumsphase ca. um das 16. Lebensjahr herum liegt. Im skelettal unreifen Alter von zehn bis zwölf Jahren erfolgt regelhaft der präpubertäre Wachstumsschub, was vorwiegend bei ausbleibender oder nicht-adäquater Behandlung zusätzlich zu einer Progression führen kann (33).

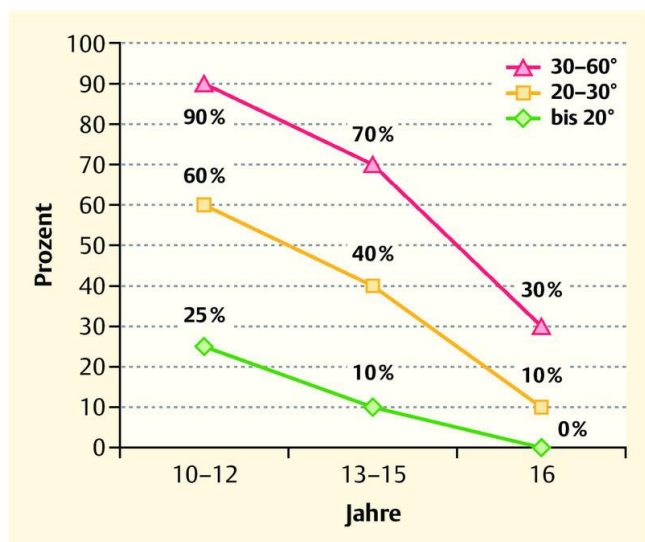


Abb. 3 Progredienz der idiopathischen adoleszenten Skoliose im Wachstumsalter nach Nachemson et al. (48).  
(Quelle: Bernstein und Seifert, 2015, S. 266 (13))

Ein systematisches Review aus dem Jahr 2021 von Lenz et al. benennt unterschiedliche Einflussfaktoren auf deren Grundlage perspektivisch mit individuellen Algorithmen eine Risikoberechnung der Krümmungsprogredienz durchgeführt werden könnte. Dabei stellte sich das Ausmaß der Krümmung zum Zeitpunkt der Erstdiagnose als wichtigster prädiktiver Faktor heraus. Über 25° nach Cobb sprechen dabei für eine hohe Wahrscheinlichkeit einer Krümmungsprogredienz im Verlauf. Als weitere Faktoren mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für eine spätere Progredienz wurde die Skelettreife nach Risser (Risser < 1, s. Kapitel 2.2.2) sowie die Lokalisation der Krümmung (thorakale Einzelkrümmung oder double-major, s. Kapitel 2.2.4) benannt. (49) Ungeachtet dessen bleibt die Progredienzbeurteilung weiterhin ein schwieriges Feld, da jeder Krankheitsverlauf sehr individuell ist und ein komplexes Zusammenspiel verschiedenster, gegebenenfalls noch unbekannter Faktoren vorherrscht.

Nach aktuellem Forschungsstand ist die Entstehung einer Skoliose nicht abwendbar. Daher erscheint es besonders wichtig, diese Erkrankung frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig eine adäquate Therapie einzuleiten. Einer Meta-Analyse von Fong et al. aus 2010 zufolge sind Skoliose-Schulscreenings unter alleiniger Anwendung des Vorbeugetests nach Adams (s. Kapitel 2.2.1) aufgrund seines geringen positiv prädiktiven Wertes nicht zur Früherkennung einer adoleszenten idiopathischen Skoliose geeignet (50). Daher wird zurzeit weiterhin an aussagekräftigeren Früherkennungsmaßnahmen im Rahmen von Schul-Screenings geforscht (51).

### 2.1.3 Komplikationen

Komplikationen in Verbindung mit einer adoleszenten idiopathischen Skoliose lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Dabei geht es zum einen um Symptome, die durch die Erkrankung

selbst verursacht werden und zum anderen um operationsbedingte Risiken im Rahmen der weiterführenden Behandlung der Skoliose.

Unbehandelte Skoliosen im Erwachsenenalter können besonders bei lumbalen Krümmungen zu verstärkten Rückenschmerzen aufgrund von degenerativen Veränderungen durch Fehlbelastung einzelner Wirbelsäulenabschnitte führen (13). Im Zuge dessen verursachen Gefügestörungen (Störung des anatomisch-funktionellen Gefüges im Bewegungssegment durch Degeneration) beispielsweise ein Wirbelgleiten oder eine Spinalkanalstenose (33). Bei ausgeprägten Thorakalskoliosen mit einem Cobb-Winkel von über 80° beobachteten Weinstein et. al in einer Follow-Up-Studie über 50 Jahre ein gehäuftes Auftreten von Kurzatmigkeit im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe (52). Darüber hinaus sind durch die Deformierung des Brustkorbes Einschränkungen der Herz- und Lungenfunktion möglich (17). Als weitere Komplikationen können Pneumonien und chronische Bronchitiden auftreten (16). Insgesamt liegt bei der adoleszenten idiopathischen Skoliose jedoch keine erhöhte Mortalität im Verhältnis zur Gesamtbevölkerung vor (52). Starke kosmetische Deformitäten sowie eine schmerzbedingte Einschränkung der Lebensqualität verursachen gegebenenfalls psychosoziale Probleme. Insbesondere bei Jugendlichen kann die Erkrankung mangelndes Selbstbewusstsein, verstärkte Neigung zu depressiven Episoden (53) oder suizidale Gedanken zur Folge haben (54).

Abhängig von der Wahl des Zugangsweges im Rahmen einer Operation ergeben sich unterschiedliche Komplikationen. Wichtige Faktoren, die das Risiko für das Auftreten von Komplikationen beeinflussen, sind möglicherweise vorhandene Nebenpathologien, das Alter zum Operationszeitpunkt sowie Ausmaß und Lokalisation der Krümmung (3).

Bei der ventralen Operationstechnik besteht vorwiegend das Risiko der Verletzung von inneren Organen wie z. B. Lunge, Darm, Milz und Niere sowie der Verletzung von großen Gefäßen nahe der Wirbelsäule. Mögliche Folgen sind z. B. die Ausbildung eines Pneumo-, Hämato- oder Chylothorax. Eine Fehlplatzierung von Pedikelschrauben kann zur Läsion der Nervenwurzeln führen. Hinzu kommt das Risiko eines vaskulären Querschnitts durch die Ligatur der Arteria radicularis magna während der Operation. (13)

Der dorsale Zugang weist mit 0,32 % ein leicht erhöhtes Risiko für neurologische Komplikationen auf, wobei es sich dabei mehrheitlich um temporäre Ausfälle handelt (55). Diese entstehen in der Regel durch Schraubenfehlplatzierung oder eine zu starke intraoperative Distraction der Wirbelsäule. Dabei werden die Neuroforamina verlegt und die darin verlaufenden Nervenwurzeln komprimiert. Die Distraction kann außerdem eine Verletzung des Rückenmarks oder ein A.-spinalis-anterior-Syndrom mit Querschnittssymptomatik zur Folge haben. (3) Bei der Verwendung von sehr starren

Implantaten können die erhöhten Kräfte in der Korrekturwirkung zum Ausriss der eingesetzten Pedikelschrauben führen (13).

Eine Spätkomplikation stellt das sogenannte Crankshaft-Phänomen dar. Dieses wurde erstmals 1989 von Debousset et al. beschrieben (56) und tritt bei jungen Patientinnen und Patienten auf, die vor Ende ihres Wachstums eine ausschließlich dorsale Korrekturspondylodese erhalten. Dabei wächst der ventrale Teil der Wirbelsäule weiter, während der fixierte dorsale Anteil nicht folgen kann. Dies hat eine postoperative Krümmungsprogredienz zur Folge. Um dieser Komplikation vorzubeugen, sollte bei Kindern, die vor Erscheinen der Beckenkammappophyse (Sekundäres Ossifikationszentrum im Bereich beider Beckenkämme) in einem niedrigen Risser-Stadium operiert werden müssen, ein kombinierter Zugang gewählt werden (16). Zu weiteren möglichen Spätfolgen zählen unter anderem Pseudarthrosen, Spätinfektionen, Schmerzen oder Materialversagen der Implantate (3).

## **2.2 Diagnostische Verfahren der adoleszenten idiopathischen Skoliose**

Im Bereich der adoleszenten idiopathischen Skoliose gibt es eine Vielzahl an diagnostischen Verfahren, welche im Laufe der Jahre stetig weiterentwickelt wurden. Vor dem Einsatz apparativer Diagnostik steht jedoch zunächst eine ausführliche Anamnese mit darauffolgender klinischer Untersuchung. Liegt die Indikation für eine weiterführende Diagnostik vor, erfolgt zunächst eine nativ-radiologische Wirbelsäulenganzaufnahme in der Frontalebene sowie eine Aufnahme des sagittalen Wirbelsäulenprofils. Anhand dieser Röntgenbilder kann eine Klassifikation nach Lenke (57) stattfinden und das weitere therapeutische Vorgehen geplant werden. Im Rahmen von Verlaufsuntersuchungen kommen zusätzlich zur Röntgenuntersuchung alternativ auch strahlungsfreie Methoden wie z. B. die Videorasterstereographie, Magnetresonanztomographie (MRT) oder der 3D-Ultraschall zum Einsatz (58). Beim Verdacht auf neurogene oder kongenitale Skoliosen sollte eine weiterführende Diagnostik in den Bereichen der Kardiologie, Pulmologie sowie der Urologie in Betracht gezogen werden. (2, 3)

### **2.2.1 Anamnese und klinische Untersuchung**

Für eine korrekte Diagnose der adoleszenten idiopathischen Skoliose ist die ausführliche Anamneseerhebung essenziell. Dabei sollte insbesondere die Familienanamnese im Fokus stehen. Idiopathische Skoliosen treten bei Verwandten ersten Grades mit 7 % bis 11 % im Vergleich zur Normalbevölkerung (1,8 %) signifikant häufiger auf (59, 60). Eine möglicherweise vorhandene genetische Prädisposition kann dabei wichtige Hinweise auf den zu erwartenden Krankheitsverlauf geben. Weitere elementare Bestandteile der Anamnese sind die zeitliche Eingrenzung der Erstmanifestation, die bisherige Entwicklung der Skoliose,

der Zeitpunkt der Menarche bzw. des Stimmbruchs zur Evaluation des verbleibenden Wachstums sowie Angaben zu bereits erfolgter Therapie. Ab diesem Zeitpunkt liegen noch ca. zwei Jahre stärkeren Wachstums vor den Jugendlichen (16). Anschließend werden noch Alter, Körpergröße, Gewicht und Pubertätsstadium mit bereits abgelaufenen Wachstumsschüben dokumentiert (3). Da es sich bei der AIS um eine Ausschlussdiagnose handelt, sollten auch vorhandene Grunderkrankungen, Unfälle und Operationen in der Vorgeschichte sowie schmerzbedingte Beeinträchtigungen erfragt werden. Dies ist insbesondere für die Diagnose nicht-idiopathischer Skoliosen relevant. Beim Auftreten von belastungsunabhängigen Schmerzen im Kindesalter muss eine sekundäre Skoliose mittels MRT ausgeschlossen werden (13). Des Weiteren darf die Eruiierung der aktuellen psychischen Belastungen, beispielsweise durch funktionelle Einschränkungen im Alltag oder kosmetisch-relevante Deformationen des Oberkörpers, nicht fehlen.

Die klinische Untersuchung der Patientinnen und Patienten beginnt mit der Inspektion des bis auf die Unterwäsche entkleideten Körpers. Im Zuge dessen beurteilt die untersuchende Person Kopfhaltung, Schulterstand, Brust-/ Taillensymmetrie und die Position des Beckens unter Berücksichtigung einer möglichen Beinlängendifferenz. Darauf folgt die Begutachtung des sagittalen Profils anhand der Kyphosierung und Lordosierung der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte, der Beckenkipfung sowie eines eventuell vorhandenen dorsalen Überhangs. Kutane Hinweise auf Rückenmarkspathologien, wie z. B. eine pathologische Behaarung im Bereich der unteren Lendenwirbelsäule („Hairy-Patch“) oder ausgeprägte Nävi (Muttermale), sollten nicht übersehen werden (3). Das Vorhandensein von Café-au-Lait-Flecken kann auf eine Neurofibromatose hinweisen (13).

Die Abb. 4 zeigt eine Patientin mit ausgeprägter rechtskonvexer Thorakalskoliose. Hier ist ein Rippenbuckel (Prominenz der Rippen im Bereich der Hauptkrümmung) bereits im aufrechten Stand erkennbar.

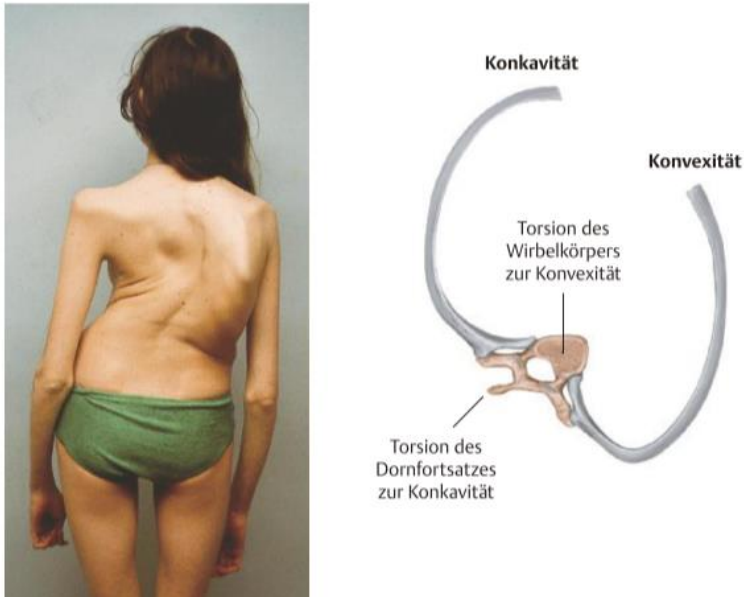


Abb. 4 Deformität des Oberkörpers bei ausgeprägter rechtskonvexer Thorakalskoliose (Quelle: Niethard et al., 2017, S. 407 (33))

Er entsteht durch die anatomische Verbindung der Rippen mit den rotations- und torsionsbedingt veränderten Wirbeln über die costovertebralen und costotransversalen Gelenke. Die Wirbeltorsion ist dabei als „Wuchsdeformität des Einzelwirbels“ definiert (33) und richtet sich im Falle des Dornfortsatzes zur Konkavität der jeweiligen Krümmung. Um auch leichtere Skoliosen nicht zu übersehen, folgt auf die Inspektion der sogenannte „Adam’s-Vorbeugetest“. Dieser wurde zum ersten Mal im Jahr 1882 durch William Adams beschrieben (61). Dabei beugt sich die zu untersuchende Person bei zusammenstehenden Füßen und durchgestreckten Beinen mit dem gesamten Oberkörper nach vorne und lässt die Arme hängen. Die dabei sichtbaren Veränderungen der Rückenoberfläche sind in Abb. 5 schematisch dargestellt.

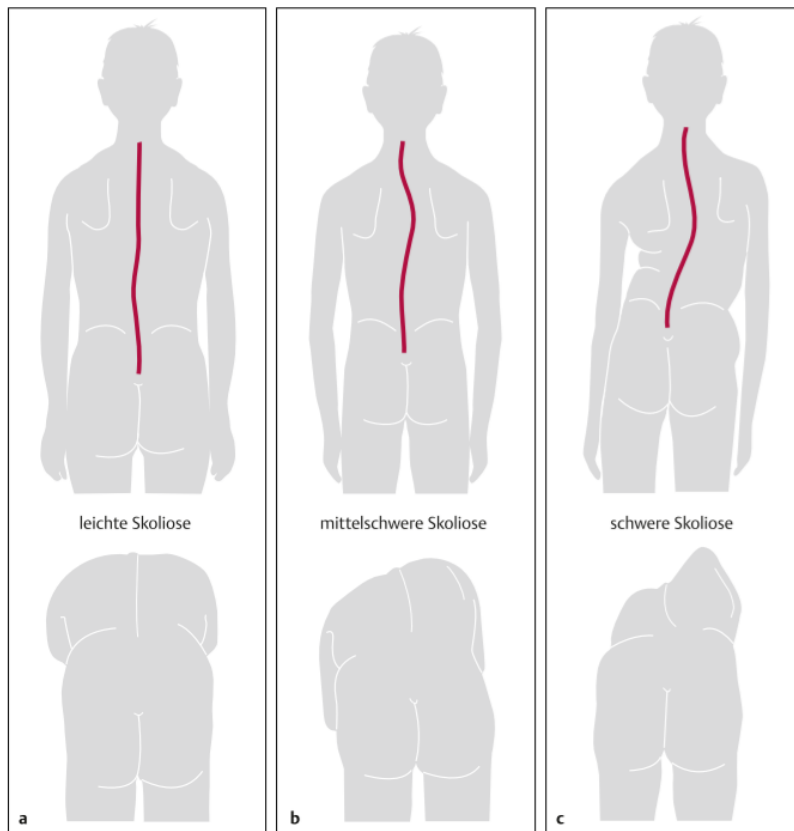


Abb. 5 Schweregrad der Skoliosen im Adam's-Vorbeugetest a) leichte Skoliose bis 20°. b) mittelschwere Skoliose bis 50°. c) schwere Skoliose bis 90°. (Quelle: Bruns et al., 2019, S. 207 (62))

Bei doppelbogigen oder lumbalen Skoliosen ist in dieser Position gegebenenfalls ein Lendenwulst im lumbalen Bereich der Wirbelsäule sichtbar. Zur Objektivierung des Adam's-Vorbeugetests kann eine Messung mit dem Skoliometer nach Bunnell (63) angeschlossen werden. Dabei wird die durch den Rippen- oder Lendenbuckel ausgelöste Rotation an den Scheitelwirbeln der Krümmungen gemessen und in der Einheit „Grad“ angegeben. Ab einer Rotation von 5° sollte eine radiologische Abklärung erfolgen (18). Der Adam's-Vorbeugetest kann auch zur Differenzierung zwischen struktureller und funktioneller Skoliose verwendet werden. Beim Vorbeugen des Rumpfes im Sitzen ist bei funktionellen Skoliosen ein im Stand sichtbarer Rippen- oder Lendenbuckel nicht mehr erkennbar. Strukturelle Skoliosen zeigen in der Rückensymmetrie keinen Unterschied zwischen dem Adam's Vorbeugetest im Sitzen oder im Stand (62).

Im nächsten Schritt der klinischen Untersuchung schließen sich weitere funktionelle Tests an. Dabei wird der Finger-Boden-Abstand, die manuelle Redressierbarkeit der Krümmung und die Länge der ischiocruralen Muskulatur evaluiert. Die Beurteilung der Rigidität (Korrigierbarkeit) der Skoliose erfolgt mittels Seitneigung in beide Richtungen und axiale Traktion am Kopf (33). Unabhängig vom bestehenden Verdacht auf eine neuromuskuläre Skoliose ist grundsätzlich eine orientierende neurologische Untersuchung durchzuführen.

Dabei liegt der Fokus auf der Anamnese von Kopf- und Nackenschmerzen, Überprüfung von Kraft und Sensibilität der wichtigsten Kennmuskeln mit anschließendem Reflexstatus sowie der Testung auf Nervenwurzelkompressionssymptome (z. B. Lasègue-Zeichen, Bragard-Zeichen oder Kernig-Brudzinski-Test (64)). Zu den Befunden, bei welchen eine weitere diagnostische Abklärung erfolgen sollte, gehören atypische Krümmungsmuster (z. B. linkskonvexe thorakale Skoliosen), ausgeprägte Rigidität der Krümmung, neurologische Auffälligkeiten, neurokutane Zeichen oder belastungsunabhängige Schmerzen (18).

### **2.2.2 Röntgen**

Ergibt sich aus Anamnese und klinischer Untersuchung ein Verdacht auf eine strukturelle Skoliose, ist initial eine Wirbelsäulenganzaufnahme im Stand in anterior-posteriorer Projektion sowie eine Röntgenaufnahme des sagittalen Profils indiziert. Je nach Literatur werden auch posterior-anteriore Aufnahmen empfohlen, um die Strahlenexposition der Schilddrüse und der Brust während des Röntgens zu senken (3, 58). Bereits bekannte Beinlängendifferenzen sollten während der Röntgenuntersuchung durch die Unterlage eines Brettchens in der entsprechenden Höhe auf der Seite des verkürzten Beines ausgeglichen werden (33). Anhand der Aufnahme in frontaler Ebene wird zunächst der in Abb. 6 dargestellte Cobb-Winkel (65) bestimmt. Er gibt die Winkel der skoliotischen Seitverbiegungen in der Einheit „Grad“ an. Zu diesem Zweck werden zuerst die beiden Neutralwirbel der jeweiligen Krümmung identifiziert. Zu den Neutralwirbeln zählen die Wirbelkörper, die zwischen zwei Krümmungen am stärksten geneigt sind, parallele Abschlussplatten besitzen und am wenigsten rotieren. Diese sind in Abb. 6 blau eingefärbt. Anschließend legt die untersuchende Person Tangenten an die Oberkante des oberen und an die Unterkante des unteren Neutralwirbels. Ausgehend von diesen Tangenten kann je eine Senkrechte gezogen werden, sodass ein Schnittpunkt dieser beiden Linien entsteht. Der Winkel der sich schneidenden Senkrechten kann mit einem Goniometer bestimmt werden und ergibt den Cobb-Winkel für die gemessene Krümmung (3). Cobb-Winkel über 10° sind als pathologischer Befund zu bewerten (2).

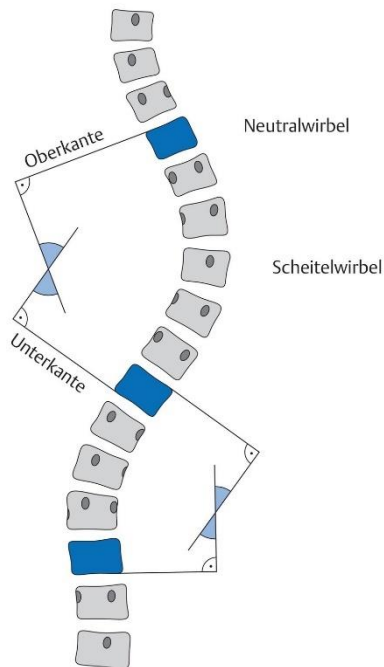


Abb. 6 Krümmungswinkel nach Cobb (Quelle: Schönagel, 2019, S. 59 (66))

Zur sicheren Diagnose der dreidimensionalen Wirbelsäulendeformität ist eine Rotationskomponente im Bereich der Hauptkrümmung obligat. Die axiale Verdrehung der Wirbelkörper kann mit Hilfe der Pedikelprojektion im posterior-anterioren Strahlengang gemessen werden. Die gängigste Methode zur Abschätzung des Rotationsausmaßes wurde von Nash und Moe entwickelt (67). Dazu erfolgt die Einteilung der Pedikelstellung in Relation zum Rand des jeweiligen Wirbelkörpers in fünf Grade, die eine ungefähre Abschätzung der Rotationsausprägung zulässt (3).

Zur Evaluation des verbleibenden Restwachstums sollte anschließend die Skelettreife radiologisch anhand der Wirbelsäulenganzaufnahme bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird in der Regel die Verknöcherung der Beckenkammaphyse herangezogen. Risser teilte diese in sechs verschiedene Stadien ein (68), welche in Abb. 7 schematisch dargestellt sind.

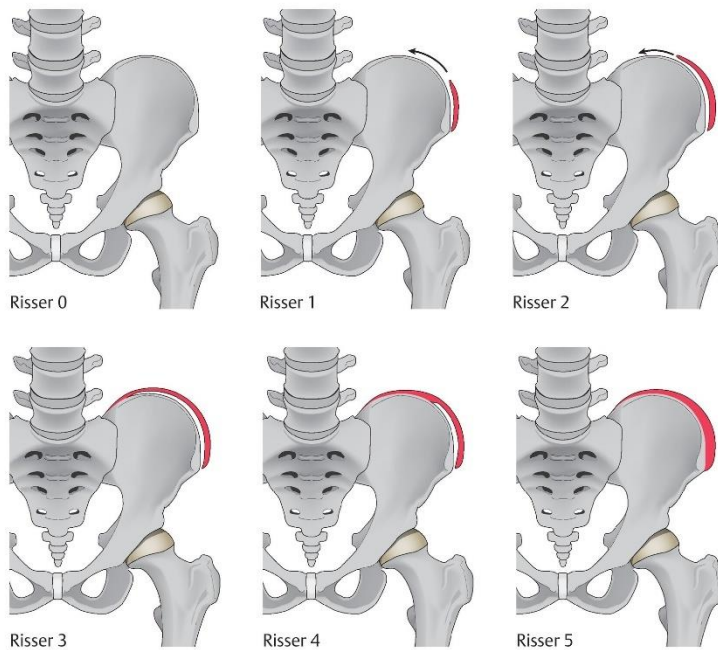


Abb. 7 Risser-Zeichen. (Quelle: Simons et al., 2019, S. 287, (3))

Im Risser-Stadium 0 ist noch keine Ossifikation sichtbar. Diese erfolgt erst mit Beginn des pubertären Wachstumsschubes von lateral nach medial. Ab einem Risser-Stadium von 4 ist das Ende dieses Wachstumsschubes erreicht. Nach weiteren zwei Jahren fusioniert die Beckenkammappophyse komplett mit dem Ilium (Darmbein) und erreicht das letzte Risser-Stadium. Das Wachstum ist nun vollständig abgeschlossen. Das verbleibende Wachstum kann darüber hinaus mit Hilfe der Faustregel „Risser-Stadium + Restwachstum in cm = 5“ grob geschätzt werden (18). Weitere Möglichkeiten zur Feststellung der knöchernen Skelettreife bieten beispielsweise die Beurteilung des Verschlusses der Y-Fuge des Acetabulums sowie der Epiphysenverknöcherungszonen der Hand nach Greulich und Pyle (69, 70).

Im Verlauf der Skoliosebehandlung sollte gemäß des Konsenspapers der SOSORT (International Society On Scoliosis Orthopaedic and Rehabilitation Treatment) zur Reduktion der Strahlenbelastung bei Kindern und Jugendlichen mit AIS in Abhängigkeit des Progredienzrisikos alle sechs bis zwölf 12 Monate eine Wirbelsäulenganzaufnahme durchgeführt werden. Bei fortgeschrittenem Skelettwachstum (Risser 4 oder 5) verlängert sich der Abstand auf einen Zeitraum von 18 Monaten. Zusätzlich ist bei einer Korsett-Neuversorgung nach einer Eingewöhnungsphase von sechs Wochen eine Röntgenaufnahme im Korsett indiziert (58).

Bei Betrachtung der seitlichen Röntgenaufnahme der Wirbelsäule ist auf die sagittale Balance mit physiologischer Kyphose der Brustwirbelsäule und Lordose der Lendenwirbelsäule, das Ausmaß der Beckenkipfung sowie auf Nebenpathologien zu achten.

Dazu gehören beispielsweise Spondylolisthesis (Wirbelgleiten), Morbus Scheuermann und Wirbelkörperdeformierungen. Falls das sagittale Wirbelsäulenprofil keine pathologischen Auffälligkeiten zeigt, sind hier zunächst keine weiteren Aufnahmen im Verlauf notwendig (58). Während der Anfertigung der seitlichen Röntgenaufnahme sind beide Arme gestreckt nach vorne anzuheben, um den Strahlengang der Wirbelsäule nicht zu verdecken. Dies kann sowohl die thorakale Kyphose als auch die lumbale Lordose beeinflussen (71, 72), weshalb dies bei der Beurteilung des sagittalen Profils zu berücksichtigen ist.

Die Röntgenuntersuchung der AIS wird nach wie vor als Goldstandard in der Skoliose-Diagnostik bezeichnet. Aus diesem Grund fokussierte sich die wissenschaftliche Forschung in den letzten Jahren besonders auf die signifikante Strahlenreduktion dieser Untersuchungsmethode. Daraus entstand das EOS<sup>®</sup>-System (EOS-Imaging, Paris, Frankreich), ein Röntgengerät mit um 26- bis 45-fach verringerter Strahlenbelastung bei Nutzung des Microdose-Protokolls im Vergleich zum konventionellen Röntgen (73, 74). Es ist in der Lage, gleichzeitig Röntgenbilder im Stand in anterior-posteriorer sowie lateraler Projektion aufzunehmen und die Wirbelsäule aus diesen Daten dreidimensional zu rekonstruieren. Dabei liegt die effektive Strahlendosis bei gleichbleibender Bildqualität im Bereich von  $2,6 \pm 0,5$  ( $\mu\text{Sv}$ ), während bei einer konventionellen digitalen Röntgenuntersuchung  $67,5 \pm 23,3$  ( $\mu\text{Sv}$ ) an den Körper der untersuchten Person abgegeben wird (73). Das EOS<sup>®</sup>-System eignet sich daher sehr gut, um die Strahlenbelastung, insbesondere bei pädiatrischen Patientinnen und Patienten mit AIS, signifikant zu reduzieren (74).

### **2.2.3 Videorasterstereographie**

Patientinnen und Patienten mit AIS müssen sich im Verlauf ihrer mehrjährigen Therapie zahlreichen Röntgenuntersuchungen unterziehen. Diese wiederholte Exposition gegenüber ionisierender Strahlung erhöht das onkogene Risiko im Vergleich zur Normalbevölkerung signifikant (75). Daher wurden in den letzten Jahrzehnten neben Röntgensystemen mit verringerter Strahlendosis auch eine Reihe von strahlungsfreien Alternativen entwickelt.

#### **2.2.3.1 Entwicklung der Videorasterstereographie**

Zunächst begann dieser Prozess 1970 mit der Moiré-Topographie von Takasaki (76), einer analogen fotografischen Technik, die anhand von auf den Rücken projizierten Interferenzmustern eine tiefenkartenähnliche Einschätzung der Rumpfoberfläche zuließ. Die technischen Grundlagen zu dieser Diagnostikmöglichkeit stammen allerdings aus einer zuvor publizierten Arbeit von Meadows et al. (77). Die Moiré-Topographie setzte sich jedoch nicht durch, da die entstehenden Konturlinienmuster stark positionsabhängig und schwierig zu interpretieren waren (78).

Im Zuge dessen entstand in den 1980er Jahren die Videorasterstereographie (VRS) aus einer Idee von Frobin und Hierholzer als ergänzende Möglichkeit zur Verlaufskontrolle von idiopathischen Skoliosen (79). Das vorrangige Ziel der VRS besteht dabei nicht darin, die Röntgenuntersuchungen zu ersetzen, sondern deren Anzahl während der Therapieüberwachung im Verlauf zu verringern (80). Die VRS basiert auf dem Prinzip der Triangulation (5). Dabei wird, wie auf der Abb. 8 erkennbar, der zu untersuchenden Person ein System aus parallelen Lichtstreifen auf den Rücken projiziert und anhand dessen die Rumpfoberfläche rasterstereographisch analysiert.



*Abb. 8 Videorasterstereographisches System der Firma Diers GmbH (DIERS formetric III 4D), mit freundlicher Genehmigung der Firma DIERS GmbH, Schlangenbad, Deutschland (81)*

Die detaillierte Erläuterung der technischen Hintergründe folgt im nächsten Abschnitt. Ein großer Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sie im Vergleich zu den vorherigen Forschungsansätzen in diesem Themengebiet nahezu unabhängig von der Positionierung im Raum der zu untersuchenden Person ist (82). Nach der Erfassung definierter anatomischer Fixpunkte (Vertebra prominens, Lumbalgrübchen, Sakrumpunkt) wird mit Hilfe eines daraus errechneten körpereigenen Koordinatensystems die dreidimensionale Stellung aller Wirbelkörper vom siebten Halswirbel bis zum vierten Lendenwirbel wiedergegeben (5). Die VRS kann einer Studie von de Korvin et al. zur Folge anhand dieser Rekonstruktion eine Progression des Cobb-Winkels um fünf Grad mit einer Sensitivität von 86 % und einer Spezifität von 50 % detektieren (83).

### 2.2.3.2 Technische Grundlagen der Videorasterstereographie

Die Grundlage der rasterstereographischen Vermessung bildet, wie bereits im vorherigen Abschnitt kurz erwähnt, das mathematische Verfahren der Triangulation, welches anhand der Abb. 9 illustriert wird. Dabei erfolgt die Messung eines zweidimensionalen Punktes P mit Hilfe der Punkte  $Q_1$  und  $Q_2$ . Die Strecke B zwischen diesen beiden Punkten ist als sogenannte Stereobasis bekannt. Diese muss vor der technischen Anwendung in einem Kalibrierungsprozess genau bestimmt werden, wobei die Positionsbestimmung des videorasterstereographischen Systems im Raum den zentralen Bestandteil darstellt (84). Die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  werden im Gegensatz zu früheren Techniken nicht mehr fotografisch, sondern über die Aufnahmen einer Videokamera bestimmt (5).

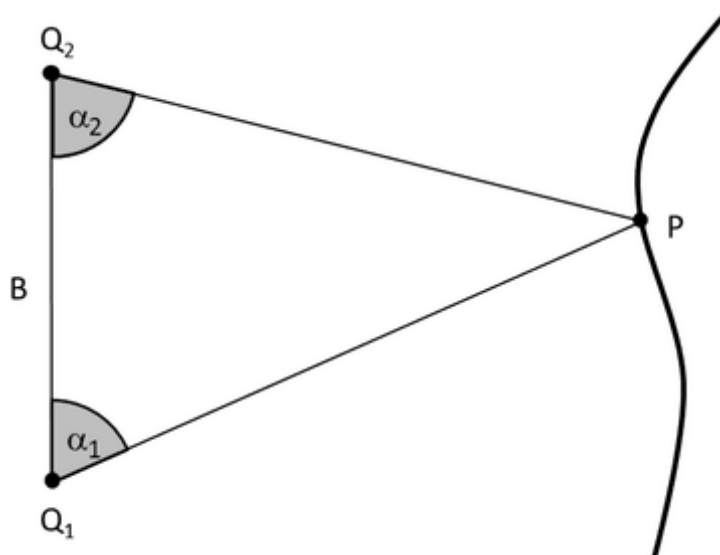


Abb. 9 Verfahren der Triangulation Messung des zweidimensionalen Punktes P auf einer stilisierten Rückenoberfläche mit Hilfe zuvor kalibrierter Strecke B (Stereobasis) und den an ihren Endpunkten ( $Q_1$  und  $Q_2$ ) gemessenen Winkeln  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ , Quelle: Drerup 2014, S.4

Bei den aktuell verwendeten Geräten im medizinischen Bereich kommt ein Projektor zum Einsatz, welcher das zu vermessende Objekt sequenziell mit parallelen hellen und dunklen Streifen unter einem bestimmten Winkel beleuchtet. Eine Matrixkamera erfasst zeitgleich das entstandene Linienmuster (sog. Lichtschnittverfahren) auf der entsprechenden Oberfläche unter einem vorgegebenen Blickwinkel zur Projektion und berechnet bei bekannter Strecke (Stereobasis B) zwischen Kamera und Lichtquelle den Abstand zu Punkt P. Die Bezeichnung „Triangulation“ folgt somit dem entstandenen Dreieck zwischen Kamera, Lichtquelle und der jeweiligen Verbindung zum angepeilten Objekt, dargestellt in Abb. 10. Um aus den gewonnenen zweidimensionalen Daten dreidimensionale Koordinaten zu erhalten, ist bei gleicher Stereobasis zusätzlich ein zweiter Winkel (Höhenwinkel) in einer senkrechten Ebene zur Ebene für die Messung von P notwendig. Im Anschluss daran erfolgt die genauere Positionsbestimmung innerhalb des Linienmusters. (85)

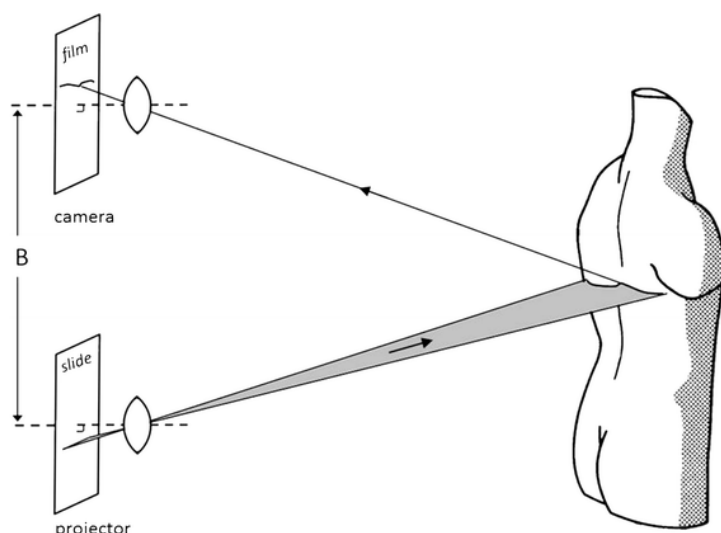


Abb. 10 Prinzip der Rasterstereographie mit Projektor und Kamera , Quelle: Drerup 2014, S. 5

Beim sogenannten „Multilight-Sectioning“ werden 81 Lichtstreifen über den gesamten Rücken der zu untersuchenden Person projiziert, sodass dieser vollständig mit Linien bedeckt ist (5). Durch die Aufnahme von zwei Bildern pro Sekunde (insgesamt zwölf Bilder innerhalb von sechs Sekunden pro Messung) wird eine Unschärfe aufgrund von minimalen Haltungsänderungen, beispielsweise durch Atemexkursionen während der Untersuchung, minimiert (6). Bei der Bildauswertung wird die Folge von unterschiedlichen Helligkeitswerten für jeden Bildpunkt einzeln analysiert und basierend darauf die Nummer der jeweiligen Linie über einen Binärcode als diskrete Koordinate beschrieben (86). Es ist allerdings zu beachten, dass nur jene Punkte vom System erfasst werden, über welchen eine der projizierten Linien verläuft. Die Abstände zwischen zwei Linien betragen in der Regel elf Millimeter, dazwischenliegende Abschnitte können nicht gemessen werden. Trotz allem hat sich eine Erhöhung der Liniendichte im Laufe der Zeit nicht als sinnvoll erwiesen, da die verstärkte Lichtstreuung an der Hautoberfläche zu einer Unschärfe mit verringerter Auflösung führte. Darüber hinaus werden wichtige anatomische Strukturen wie z. B. die Vertebra prominens oder die Lumbalgrübchen, erkennbar in Abb. 11, auch bei der ursprünglichen Liniendichte von mehreren Linien zuverlässig erfasst. Bei der Messung mit dem DIERS formetric III 4D werden pro Bild primär ca. 50.000 Messpunkte aufgenommen (6) und mit Hilfe der dazugehörigen Software DICAM III (DIERS GmbH, Schlangenbad, Deutschland) durch Interpolation auf ungefähr 8.000 Punkte in regelmäßigen Abständen reduziert. Dies dient der Datenreduktion und dem Erreichen einer homogenen Verteilung der Messwerte über den gesamten Rücken (5). Die Auflösung beträgt 10 Punkte pro  $\text{cm}^2$  bei einem Rekonstruktionsfehler von 0,2 mm bis 0,5 mm (87).

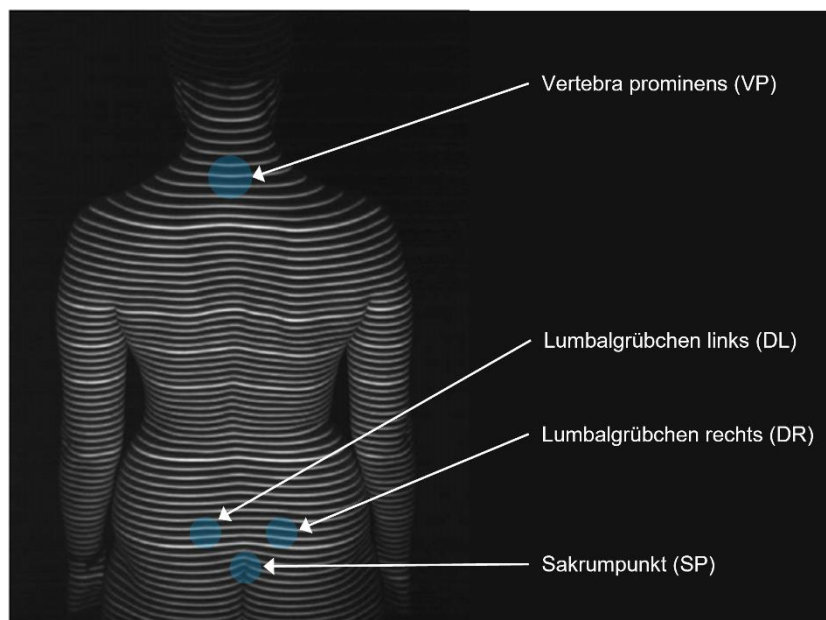


Abb. 11 Projiziertes Linienmuster aus der Kameraperspektive mit automatisch detektierten Landmarken VP, DL/DR und SP, modifiziert nach: Drerup 2014, S. 6

Nach Analyse des durch Unebenheiten der Rückenoberfläche verzerrten Linienmusters sind zwar alle vermessenen Punkte in Form von dreidimensionalen Koordinaten ( $x$ ,  $y$  und  $z$ ) vorhanden, können jedoch noch nicht ohne Weiteres zur Interpretation der Messungen verwendet werden. Zu diesem Zeitpunkt sind die Koordinatenwerte noch abhängig von der Position der zu untersuchenden Person im Raum zum DIERS formetric III 4D, was in früheren Oberflächenanalysetechniken ein Problem darstellte. Als Lösungsansatz wird bei neueren Aufnahmesystemen daher ein körpereigenes Koordinatensystem mit Hilfe von anatomischen Landmarken erstellt. Diese besitzen jeweils eine charakteristische Form, die bei vorheriger grober Eingrenzung der möglichen Position automatisch erkannt und entsprechend zugeordnet wird. (86) Die Genauigkeit für die Erkennung der anatomischen Landmarken beträgt laut einer Studie von Drerup und Hierholzer 1,3 mm (88).

Zur vollständigen Beschreibung von zweidimensionalen Flächen müssen in jedem aufgezeichneten Punkt zwei Krümmungswerte mit dazugehörigem Vorzeichen in senkrechter Richtung zueinander gemessen werden. Die Grundlage für die folgende Krümmungsanalyse bilden die in Abb. 12 dargestellten vier Krümmungshaupttypen aus dem Bereich der Differentialgeometrie. Man unterscheidet parabolische (weiß), konvexe (rot), konkave (blau) und sattelförmige (grün) Oberflächen, welche nachfolgend in der Gaußschen Krümmungskarte (Abb. 13) visualisiert werden. Konkave Flächen bestehen aus zwei orthogonal zueinanderstehenden konkaven Krümmungen, äquivalent dazu beinhalten konvexe Flächen zwei gleichsinnig konvexe Krümmungen (86). Sattelförmige Objekte zeigen entgegengesetzte Krümmungen (konvex und konkav), wohingegen sich parabolische

Flächen dadurch auszeichnen, dass sie ohne Verzerrung eben abgeflacht werden können (5).

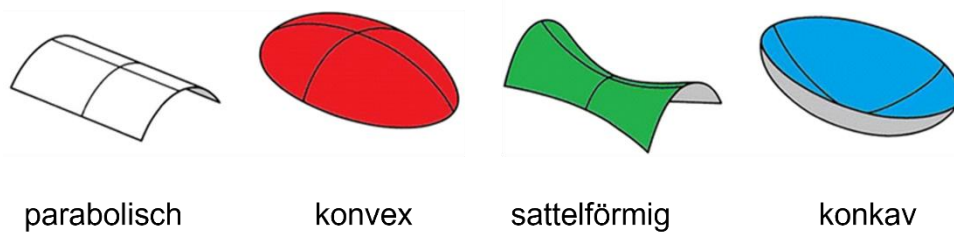


Abb. 12 Formen in der Oberflächenanalyse , modifiziert nach Drerup 2014, S. 7

Je ausgeprägter die Krümmung, desto intensiver sind die einzelnen Areale innerhalb der Krümmungskarte in der entsprechenden Farbe eingefärbt. Die Vertebra prominens (VP) beispielsweise ist durch ein isoliertes konvexes (rotes) Areal innerhalb einer großen sattelförmigen (grünen) Fläche auf Höhe des siebten Halswirbels gekennzeichnet (5).

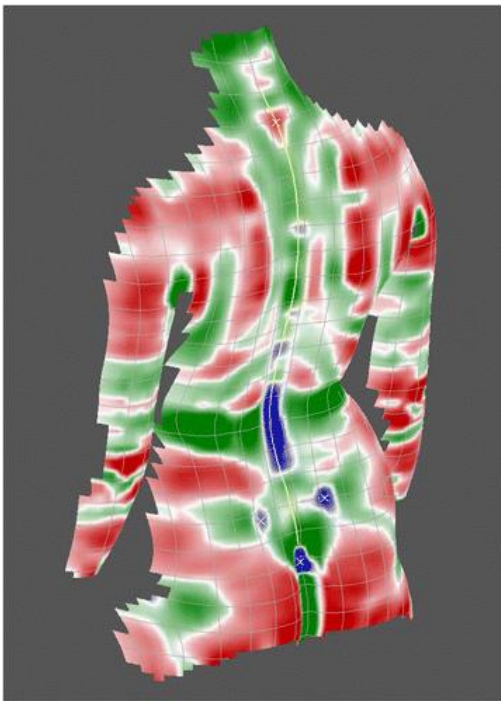


Abb. 13 Gaußsche Krümmungskarte , Quelle: Drerup 2014, S. 7

Das exakte anatomische Korrelat kann allerdings nur durch eine Röntgenuntersuchung oder manuelle Palpation festgestellt werden, da zwar in den meisten Fällen der Fixpunkt VP mit dem Processus spinosus des siebten Halswirbels (C7) übereinstimmt, jedoch geschlechtsspezifisch ggf. der Dornfortsatz des ersten Brustwirbels (T1) länger ist (Männer: 27,1 %, Frauen 57,3 % (89)) und somit als VP imponiert. Der für die Berechnung des körpereigenen und somit nahezu positionsunabhängigen Koordinatensystems notwendige Fixpunkt VP wird durch die Analyse des Punktes der maximalen konvexen Krümmung im

entsprechenden Bereich festgelegt (gelbes Kreuz im roten Bereich am Übergang zwischen Halswirbelsäule und Brustwirbelsäule in Abb. 13). Analog dazu funktioniert die Bestimmung der beiden Lumbalgrübchen links (Dimple left, DL) und rechts (Dimple right, DR) sowie des Sakrumpunktes (oberer Bereich der Rima ani, SP) mit dem Unterschied, dass hier konkave (blaue) Areale umgeben von sattelförmigen (grünen) Bereichen charakteristisch sind (5). Die knöchernen Orientierungspunkte für das anatomische Korrelat der Spinae iliacae posterior superior (hintere, obere Darmbeinstacheln) liegen im Falle der Lumbalgrübchen allerdings nicht im Punkt der maximalen Konkavität, sondern etwa fünf bis zehn Millimeter lateral und kaudal davon entfernt (88). Die in diesem Schritt erfassten Flächenkrümmungen werden als sogenannte Invarianten bezeichnet, da sie zwar aus den gegebenen Koordinaten berechnet werden, jedoch selbst koordinatenunabhängig sind (79).

Dies lässt sich mit Hilfe des folgenden Szenarios veranschaulichen: Wenn eine Person mit verbundenen Augen beispielsweise die Vertebra prominens palpiert, lässt sich diese Struktur unabhängig von der liegenden, stehenden oder sitzenden Position der zu untersuchenden Person leicht ertasten, da hier nur die Form, nicht jedoch die Lage des Körpers eine Rolle spielt. Zusammenfassend erlauben die anatomischen Bezugspunkte positionsunabhängig eine eindeutige Zuordnung von Fixpunkten der Rückenoberfläche und der zugrundeliegenden Skelettstruktur. Das entstandene körpereigene Koordinatensystem bewegt sich mit der zu untersuchenden Person, wodurch das frühere Problem der Objektpositionierung bei Verlaufsmessungen gelöst werden konnte.

Darüber hinaus berechnet der DIERS formetric III 4D die sogenannte Symmetrielinie (gelbe Linie entlang der Wirbelsäule in Abb. 13, auf welche in Kapitel 3.2.3 nochmals näher eingegangen wird. Diese Linie teilt den Rücken in zwei Hälften mit möglichst minimaler Links-Rechts-Asymmetrie. Bei einer symmetrischen Wirbelsäule deckt sich die Symmetrielinie vollständig mit der Sagittalebene, entsprechend einer gedachten Linie zwischen den einzelnen Dornfortsätzen. Im Falle von AIS-Betroffenen trifft dies jedoch nicht zu, da eine Wirbelsäule bei AIS seitliche Auslenkungen mit Rotationskomponente im Bereich der Wirbelsäulenkrümmungen aufweist (90).

Um aus den bisher gesammelten Daten die einzelnen Formparameter zu bestimmen, erfolgt zunächst die Berechnung der Durchschnittswerte aus allen 12 Bildern pro Serie nach dem 4D Average-Verfahren mit Hilfe der Software DICAM III (DIERS GmbH, Schlangenbad, Deutschland). Aus Gründen der Datenreduktion wird anschließend durch einen Algorithmus die Aufnahme aus der vorliegenden Serie herausgesucht, deren Werte am nächsten bei den Durchschnittswerten liegen. Die ausgegebenen Wirbelsäulenparameter nach der Analyse der Daten beziehen sich demzufolge auf dieses einzelne, ausgewählte Bild. (6)

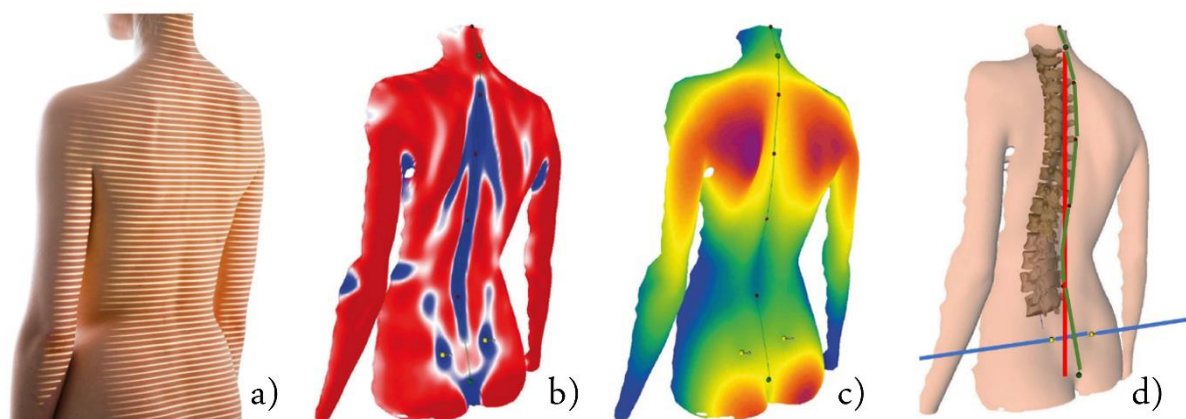


Abb. 14 Erstellung eines dreidimensionalen Wirbelsäulenmodells a) Projektion des Linienmusters b) Berechnung der Hauptkrümmungen c) topographische Auswertung nach Moiré d) dreidimensionale Rekonstruktion der Wirbelsäule, mit freundlicher Genehmigung der Firma DIERS GmbH, Schlangenbad, Deutschland (81)

Auf Basis aller vorliegenden Daten kann abschließend ein digitales, dreidimensionales Modell der Wirbelsäule (Abb. 14) konstruiert und in Kombination mit dem Export von ca. 40 verfügbaren Parametern (8) durch geschultes medizinisches Personal interpretiert oder zu Forschungszwecken eingesetzt werden.

### 2.2.3.3 Möglichkeiten und Grenzen der Videorasterstereographie

Im Bereich der Videorasterstereographie gibt es zahlreiche Anbieter, welche in mehreren Studien näher untersucht wurden (78, 91, 92). Zu den ersten Geräten gehören das Integrated Shape Imaging System (ISIS, Oxford Metrics Ltd., Oxford, UK) und das Quantec®-System (Quantec Image Processing Ltd., Liverpool, UK). Das ISIS-System tastet die Rückenoberfläche automatisch mittels eines horizontalen Lichtstrahls ab und zeichnet dies gleichzeitig durch eine Kamera auf. Aus diesen Aufnahmen folgte eine dreidimensionale Rekonstruktion des Rückens (93). Das Quantec®-System konnte im Gegensatz zum ISIS-System Aufnahmen in wenigen Millisekunden abzuschließen, wodurch sich atembedingte Einflüsse auf die Haltung minimieren ließen (91). Beide Geräte haben sich aufgrund der hohen Kosten und eingeschränkter Reliabilität langfristig nicht durchgesetzt.

Ein alternatives System, das BIOMOD™-3S (AXS MEDICAL, Merignac, Frankreich), nutzt optische Techniken zur Messung topografischer 3D-Oberflächenparameter. Trotz ihrer vergleichbaren Reliabilität zu konventionellen Röntgenaufnahmen konnte eine tendenzielle Unterschätzung bestimmter Wirbelsäulenparameter festgestellt werden (94, 95). In die Kategorie der optischen Techniken zur Vermessung der Rückenoberfläche fällt der lichtsichtoptische Scanner ABW-BodyMapper (ABW GmbH, Frickenhausen, Deutschland)(96). Diese Methode zeigt eine hohe Reliabilität, insbesondere in Bezug auf die sagittalen VRS-Parameter wie die Kyphose- oder Lordosewinkel (97).

Zu den etablierten Anbietern im Bereich der VRS-Systeme gehört auch die Firma Diers GmbH (Schlangenbad, Deutschland), welche das DIERS formetric III 4D entwickelte. Eine Vielzahl von rasterstereographischen Studien wurden in den letzten beiden Jahrzehnten mit diesem System durchgeführt. Eine aktuelle Studie von Tabard-Fougère et al. aus dem Jahr 2023 beschäftigte sich mit der Vergleichbarkeit zwischen dem Goldstandard, der zweidimensionalen Röntgenuntersuchung und der VRS-Untersuchung der Wirbelsäule von Patientinnen und Patienten mit AIS. Die vorliegenden Ergebnisse zeigten eine starke Korrelation zwischen Skoliose-Winkel und Cobb-Winkel mit einer mittleren Differenz von  $6,4^\circ$ . (98). Diese Werte liegen im Bereich der üblichen Messtoleranz von  $5^\circ$  für Cobb-Winkelmessungen mittels Röntgenaufnahmen (99, 100).

Krott et al. schätzten die Reliabilität des DIERS formetric III 4D in einer Metaanalyse als „hoch“ ein (101). Im Vergleich zu klassischen radiologischen Bildgebungsverfahren erwies sich das Verfahren sowohl im konservativen Bereich als auch nach einer ventralen Derotationsspondylodese als valides Maß für die Beurteilung der Wirbelsäule (87, 102, 103). Neben der konventionellen Anwendung im aufrechten Stand sind auch funktionelle Untersuchungen in unterschiedlichen Haltungen möglich. Für Patientinnen und Patienten mit adoleszenter idiopathischer Skoliose erwiesen sich in unterschiedlichen Studien einige Parameter der VRS als besonders relevant, um Veränderungen der Wirbelsäulenkrümmung bzw. Körperhaltung zu erfassen. Diese werden nachfolgend in den Kapiteln 3.2.2, 3.2.3 und 3.2.4 behandelt.

In einer Studie mit 66 AIS-Betroffenen mit leichter Skoliose extrahierten Manca et. al. auf Basis eines mehrstufigen statistischen Ansatzes zwei Parameter, deren Veränderung deutlich mit der Variabilität des Krümmungswinkels der Wirbelsäule korreliert. Dieser wird in der VRS über den sogenannten Skoliosewinkel abgebildet. Die „Seitabweichung Symmetrieline VPDM (RMS)“ mit einem Betakoeffizienten von 0,689 erklärt den größten Teil der Variabilität des Skoliosewinkels. Daraus lässt sich ableiten, dass die Veränderung dieses Parameters um eine Standardabweichung zu einer Änderung des Skoliosewinkels um 0,689 Standardabweichungen führt. Wie bereits oben erwähnt, korreliert der Skoliosewinkel mit dem Cobb-Winkel in hohem Maße.

Für die „Oberflächenrotation (RMS)“ beschrieben Schulte et al. eine mittlere Abweichung von  $2,3^\circ$  im Vergleich zur röntgenologisch bestimmten Wirbelkörperrotation (104). Bei AIS-Betroffenen mit Cobb-Winkeln ab  $48^\circ$  lag die Genauigkeit der Messung dieses Wertes im Vergleich zu vorliegenden Röntgenaufnahmen bei einer Abweichung von  $4,8^\circ$  bis  $5,5^\circ$  (103). Diese Abweichung kommt laut Drerup und Hierholzer unter anderem dadurch zustande, dass die zu untersuchenden Personen während der Röntgenaufnahme sehr dicht an der Röntgenplatte stehen, was im Unterschied zu einer freistehenden Haltung zur manuellen

Derotation des Rumpfes führen könnte und tendenziell höhere Rotationswerte bei rasterstereographischen Aufnahmen zur Folge hätte (87). Die Variable „Oberflächenrotation (RMS)“ zeigte in der oben genannten Studie von Manca et. al. einen schwächeren Betakoeffizienten von 0,252, der Einfluss auf den Skoliosewinkel war jedoch trotzdem signifikant. (105) Harzmann errechnete für die Oberflächenrotation (RMS) im Rahmen eines Schulscreenings aus der untersuchten Grundgesamtheit einen Referenzwert von 2° bis 5° (106). Für die Altersgruppe der 19- bis 40-jährigen gaben Schröder et al. Werte von  $3,6^\circ \pm 1,8^\circ$  bei Frauen und  $3,1^\circ \pm 1,5^\circ$  bei Männern an (107).

Der größte Vorteil der VRS als alternative Methode der Therapieverlaufsbeurteilung ist die Möglichkeit der strahlenfreien und berührungslosen Vermessung der Rückenoberfläche. Dementsprechend eignet sich das Verfahren auch als zuverlässige Verlaufsuntersuchung während einer Schwangerschaft (93, 108). Die VRS ist außerdem dazu in der Lage, skoliotische Fehlhaltungen und strukturelle Skoliosen zuverlässig voneinander zu differenzieren (18). Darüber hinaus zählt sie zu den kostengünstigsten bildgebenden Verfahren mit einer sehr kurzen Untersuchungsdauer und geringem Platzbedarf. Daraus ergibt sich eine bessere Verfügbarkeit im ambulanten Bereich im Vergleich zu anderen strahlungsfreien Verfahren (z. B. MRT, 3D-Ultraschall). Ein weiterer Vorteil besteht in der Analyse des sagittalen Wirbelsäulenprofils ohne Notwendigkeit einer Veränderung der Armposition für die Zeit während der Messung (109). Dies ist bei einer Röntgenaufnahme in lateraler Projektion nicht möglich, da die herabhängenden Arme in diesem Fall die Wirbelsäule verdecken würden.

Da sich die VRS ausschließlich auf die Analyse der Rückenoberfläche stützt, ist eine Erfassung des Cobb-Winkels nicht möglich. Daraus ergibt sich ein Nachteil hinsichtlich der Therapieplanung, da sich diese größtenteils auf die Angabe des Cobb-Winkels stützt (3). Stattdessen kann jedoch der Skoliosewinkel ausgegeben werden, welcher einen Korrelationskoeffizienten von 0,758 bzw. 0,872 für Krümmungen im Bereich der Lenden- oder Brustwirbelsäule zeigt. Die durchschnittliche Abweichung des Skoliosewinkels vom radiologisch erfassten Cobb-Winkel beträgt in einer weiteren Studie zur Validität im lumbalen Bereich  $9,42^\circ$  und in den thorakalen Abschnitten der Wirbelsäule  $6,98^\circ$  (95). Damit liegen leichte Diskrepanzen zu den zuvor angeführten Ergebnissen aus der Literatur vor. Eine dennoch starke Korrelation ergab sich beim Vergleich der Krümmungswinkel zwischen dem bereits in Kapitel 2.2.2 vorgestellten EOS®-Röntgen und dem DIERS formetric III 4D (8). Eine Limitation besteht in dem Ausschluss von Messungen im Korsett, da diese Form der Aufnahmen aufgrund der verdeckten Rückenoberfläche nicht rasterstereographisch ausgewertet werden kann. Darüber hinaus ist die Erfassung morphologischer Veränderungen der einzelnen Wirbelkörper im Sinne einer Fehlbildung - insbesondere relevant bei kongenitalen Skoliosen - oder einer Fraktur bei osteoporotisch bedingten

sekundären Skoliosen mit Hilfe der VRS nicht möglich. In diesen Fällen ist es notwendig, auf andere bildgebende Verfahren (z. B. Röntgen, Magnetresonanztomographie) zurückzugreifen. Das gemeinsame Ziel der unterschiedlichen Methoden zur VRS-Messung ist daher, die Anzahl der notwendigen Röntgenuntersuchungen zur Überwachung der Kurvenprogression bei AIS-Betroffenen mit Hilfe von validen Verlaufsmessungen zu reduzieren und damit die Menge der ionisierenden Strahlung so gering wie möglich zu halten (58).

### **2.2.3.4 Rolle der Videorasterstereographie in der Haltungsanalyse**

In den vorliegenden Studien zur Reliabilität und Validität der oberflächentopographischen Untersuchungen von AIS-Betroffenen kommen zahlreiche unterschiedliche Körperhaltungen zum Einsatz, beispielsweise eine habituelle Haltung (95, 110), das Überkreuzen der Arme vor der Brust mit Flexion der Ellenbogen (8, 111) oder eine aufrechte Haltung des Oberkörpers (94). In einem Review von Su et al. fällt auf, dass in einigen Studien keine oder nur unzureichende Informationen bezüglich der Haltung während des Messvorganges vorliegen, was die Vergleichbarkeit mit anderen Studien und die Interpretation der Ergebnisse einschränkt (92).

Zahlreiche Studien beschäftigten sich bereits damit, welche rasterstereographischen Parameter eine mögliche Progression des Cobb-Winkels am besten abbilden können. Hierzu gehören beispielsweise die Oberflächenrotation, der Lordosewinkel sowie die Ausprägung der Rippenprominenzen der Rückenoberfläche. Diese Studien wurden jedoch größtenteils mit einem alternativen System, dem BIOMOD™-3S (AXS MEDICAL, Merignac, Frankreich) durchgeführt, welches auf einer optischen Technik zur Messung der Oberflächentopografie basiert und sich daher hinsichtlich der erfassten Parameter von den Messgrößen des DIERS formetric III 4D unterscheidet (83, 112, 113). Bezüglich der in dieser Forschungsarbeit verwendeten Messmethode konnte – wie bereits in Kapitel 2.2.3.3 erläutert – eine gute Reliabilität und Validität des DIERS formetric III 4D für die Untersuchung von Personen mit AIS mehrfach bestätigt werden (8, 95). In einer Studie von Knott et al. betrug der durchschnittliche Unterschied zwischen radiologisch gemessenem Cobb-Winkel und dem VRS-Parameter „Skoliosewinkel“ für thorakale Krümmungen  $5,8^\circ$  und lumbale Krümmungen  $8,8^\circ$  (94). Manca et al. kamen zu dem Schluss, dass die Seitabweichung in der Frontalebene sowie die Oberflächenrotation der Wirbelsäule die höchste Assoziation zur Veränderung des Skoliosewinkels zeigen (105), weshalb diese Parameter zur Evaluation der Haltungsvervariabilität in diesem Forschungsprojekt herangezogen wurden.

Bevor die Studien zur Haltungsvervariabilität bei Patientinnen und Patienten mit AIS im Kontext mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes genauer betrachtet werden, gilt es näher zu beleuchten, wie gut ein gesundes Kollektiv an Probandinnen und Probanden

selbstständig Einfluss auf seine Körperhaltung im Sinne der Symmetrie nehmen kann. Dazu untersuchten D'Amico et al. hunderteinundzwanzig gesunde junge Erwachsene mithilfe einer lichtoptischen Methode in Kombination mit einer Druckmessplatte, auf welcher die Teilnehmenden während der Vermessung mit beiden Füßen standen (114). Die Probandinnen und Probanden wurden dazu aufgefordert, ihre Körperhaltung durch ein instinktives Selbstkorrekturmanöver bestmöglich zu verändern. Dabei konnte in 87 % der Fälle keine signifikante Veränderung der Haltung in der Frontalebene festgestellt werden. Die Sagittalebene hingegen zeigte eine signifikant stärkere Aufrichtung der Brustwirbelsäule bei Männern als bei Frauen. (115) Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass gesunde Personen zwar zu einer instinktiven Haltungskorrektur im Stande sind, jedoch die Auswirkungen auf die Frontalebene im marginalen Bereich liegen. Eine gute Reliabilität der VRS-Messungen ist bei gesunden Personen anzunehmen. (116)

AIS-Betroffene zeigen ohne vorherige Schulung zur Selbstkorrektur der Haltung ein ähnlich geringes Maß an instinktiver Selbstkorrekturfähigkeit wie gleichaltrige, gesunde Personen. Bemerkenswerterweise konnten in einer Studie von Kinel et al. nur 7 % der Männer und 4 % der Frauen mit AIS eine zeitgleiche Verbesserung ihrer Körperhaltung in mehreren Ebenen erzielen. Tendenziell zeigten sich hier zwar leichte Verbesserungen bei skoliosespezifischen Parametern, jedoch ohne klinische Relevanz. (117)

Ein wesentlicher Bestandteil in der konservativen Behandlung der AIS ist das Erlernen einer aktiven Selbstkorrektur, die bestenfalls auch in den Alltag der betreffenden Personen integriert wird (109, 118). Die Autokorrektur der Wirbelsäule basiert auf einer dreidimensionalen Haltungsänderung des Oberkörpers in allen Ebenen. In der Frontalebene werden die konvexen Krümmungen in Richtung der konkaven Abschnitte der Wirbelsäule korrigiert. Ziel der Korrektur in der Sagittalebene ist die Wiederherstellung einer physiologischen thorakalen Kyphose von 20° bis 45° (16) und einer lumbalen Lordose von maximal 60° (119). Hinzu kommt eine Derotation der betreffenden Wirbelsäulenabschnitte mit Verringerung der Rotation (120).

Die Gefahr der Veränderung der Ergebnisse einer VRS-Messung in Form einer bewussten oder unbewussten Beeinflussung der Haltung verstärkt sich insbesondere bei AIS-Betroffenen, die bereits dazu in der Lage sind, durch eine Schulung der eigenen Propriozeption besser zwischen verschiedenen Körperhaltungen zu differenzieren sowie diese bewusst oder unbewusst einzusetzen. Die erlernte Fähigkeit zur Autokorrektur als Voraussetzungen dieser Problematik untersuchten Skaggs et al. genauer. Dabei wurden zehn Studienteilnehmende am gleichen Tag jeweils in habitueller Haltung und in einer erlernten Korrekturhaltung basierend auf der Therapie nach Katharina Schroth geröntgt. Die posterior-anterioren Aufnahmen in korrigierter Haltung zeigten eine mittlere Verringerung des

Cobb-Winkels der Hauptkrümmung um 6° sowie der Nebenkrümmung um 5° im Vergleich zur Röntgenaufnahme in habitueller Haltung. Das jeweilige Ausmaß an Erfahrung im Bereich der Schroth-Therapie beeinflusste die Ergebnisse dabei unerwarteterweise nicht. Demnach wäre es bei den Studienteilnehmenden in einem Drittel der Fälle je nach eingenommener Haltung in der Röntgenuntersuchung zur Aussprache von abweichenden Behandlungsempfehlungen gekommen. Dies ist besonders in Grenzfällen bei Entscheidungen für oder gegen eine Indikation zur operativen Behandlung von erheblicher Relevanz. (10)

Es gibt bereits einige Publikationen, welche diese Ergebnisse auch unter Verwendung der Rasterstereographie oder vergleichbaren Verfahren zur Haltungsanalyse widerspiegeln. Allerdings untersuchen diese entweder ausschließlich gesunde Probandinnen und Probanden oder die Wiederholungsmessungen beschränkten sich – sofern vorhanden – auf Abstände von Minuten, Stunden oder mehreren Monaten. Letztere Variante erhöht die Gefahr, eine Progredienz der Skoliose fälschlicherweise als Haltungsvarianz zu interpretieren, da besonders während der Wachstumsschübe mit einer deutlichen Veränderung der Wirbelsäulendeformität zu rechnen ist (33). Des Weiteren sind Studien, die auf oberflächentopographischen Techniken basieren zwar grundsätzlich miteinander vergleichbar, allerdings gibt es je nach Verfahren starke Unterschiede bezüglich der ausgegebenen Parameter und Messgenauigkeit, weshalb auch hier eine differenzierte Interpretation vor dem Hintergrund der Studienbedingungen erfolgen sollte.

### **2.2.4 Klassifikation**

Die im Jahr 2001 eingeführte Klassifikation von Lenke et al. (57) stellt zurzeit den Goldstandard in der Einteilung von adoleszenten idiopathischen Skoliosen dar. Die Grundlage hierfür bilden Wirbelsäulenganzaufnahmen in zwei Ebenen sowie sogenannte Bending-Aufnahmen in aktiver Seitneigung der Wirbelsäule zur Beurteilung der Rigidität einzelner Krümmungen. Die aktuell gültige Lenke-Klassifikation umfasst sechs verschiedene Krümmungstypen und bewertet darüber hinaus sowohl das lumbale Lotverhalten als auch das sagittale Profil.

Eine weitere Möglichkeit zur Klassifikation einer adoleszenten idiopathischen Skoliose bietet die Einteilung nach Lokalisation der Hauptkrümmung (17, 18). Diese orientiert sich an den jeweiligen Scheitelwirbeln im anterior-posterioren Röntgenbild aus Tab. 1. In Zusammenspiel mit der klinischen Ausprägung der Krümmung kann das sogenannte „Skoliosemuster“ ermittelt werden, welches in diesem Forschungsprojekt im Rahmen der Einteilung der Subgruppen zugrunde liegt und in Kapitel 2.3.1 näher erläutert wird.

Tab. 1 Klassifikation nach Lokalisation der Hauptkrümmungen in Anlehnung an Stücker, 2010 (18)

Lokalisation der Hauptkrümmung	Scheitelwirbel
zervikal	2. bis 6. Halswirbel
zervicothorakal	7. Halswirbel und 1. Brustwirbel
thorakal	2. bis 11. Brustwirbel
thorakolumbal	12. Brustwirbel und 1. Lendenwirbel
lumbal	2. bis 4. Lendenwirbel
lumbosakral	5. Lendenwirbel und unterhalb

Darüber hinaus erfolgt die übergeordnete Einteilung der idiopathischen Skoliosen nach dem Alter bei der Diagnosestellung. Sie orientiert sich an der Theorie von drei Wachstumsschüben, in welchen ein erhöhtes Progredienzrisiko besteht (33). Infantile Skoliosen werden vor dem dritten Lebensjahr festgestellt. Darauf folgen die juvenilen Skoliosen mit einem Diagnosezeitraum vom dritten bis zum neunten Lebensjahr und die adoleszenten Skoliosen, welche im Alter von 10 bis 18 Jahren diagnostiziert werden (2). Da gemäß einer Veröffentlichung von Sanders aus dem Jahr 2007 im Zeitraum der juvenilen Phase eher ein gleichmäßiges Wachstum vorherrscht, entwickelt sich die Einteilung hin zur Unterscheidung zwischen Early- und Late-Onset-Skoliosen. Die zugehörige Altersgrenze wurde entsprechend nach dem fünften Lebensjahr festgelegt (121). Für Skoliosen mit einem Diagnosezeitpunkt ab dem 18. Lebensjahr gilt die Bezeichnung „adulte Skoliose“. Die vorliegende Forschungsarbeit befasst sich allerdings ausschließlich mit Patientinnen und Patienten zwischen 10 und 18 Jahren, die an einer AIS leiden.

### 2.3 Therapie der adoleszenten idiopathischen Skoliose

Bei der Behandlung von adoleszenten idiopathischen Skoliosen hat die Verhinderung einer Krümmungsprogredienz sowie eine daraus resultierende Verbesserung des kosmetischen Erscheinungsbildes die höchste Priorität. Weitere Ziele der Therapie bestehen in der Vorbeugung oder Behandlung von pulmonalen Einschränkungen und Schmerzsyndromen der Wirbelsäule. Gemäß den SOSORT-Leitlinien werden die Therapieziele den Kategorien „morphologische Aspekte“ und „funktionelle Aspekte“ zugeordnet (109). Je nach Alter, verbleibender Wachstumsreserve und Schweregrad kann im Rahmen eines dreistufigen Behandlungskonzeptes zwischen konservativen und operativen Therapieverfahren entschieden werden. Der zugrundeliegende Parameter für die Entscheidung zur entsprechenden Therapie ist gemäß der SOSORT der Cobb-Winkel (109). Das vorrangige Ziel einer konservativen Behandlung ist das Erreichen eines Cobb-Winkels von unter 40° vor Abschluss des Wachstums. Skoliosen mit geringem Ausgangswinkel von bis zu 20° nach

Cobb erhalten zunächst eine physiotherapeutische Behandlung aus den (z. B. nach Katharina Schroth (122, 123)) sowie engmaschige Verlaufskontrollen. Bei mittelschweren Skoliosen ab ca. 20° bis zu 50° nach Cobb ist eine Korsettbehandlung mit parallel durchgeführter physiotherapeutischer Therapie erforderlich. Hochgradige Skoliosen mit Cobb-Winkeln über 50° (bei lumbalen Skoliosen bereits ab 40° (3, 13)) stellen eine Operationsindikation dar. Eine frühzeitige Diagnose der Erkrankung ist daher essenziell, um die Invasivität der Maßnahmen so gering wie möglich zu halten und über das Verhindern einer Progredienz hinaus eine Verbesserung der Krümmung zu erzielen.

### **2.3.1 Dreidimensionale Skoliosebehandlung nach Katharina Schroth**

Bei Skoliosen zwischen 10° und 20° ist zunächst eine alleinige Behandlung in Form von physiotherapeutischen skoliosespezifischen Übungen (PSSE) indiziert (109). Mit steigenden Cobb-Winkeln rückt die Korsetttherapie zwar in den Vordergrund, jedoch sollten auch in dieser Zeit die PSSE fortgeführt werden. Zu den PSSE gehören sieben ambulante Physiotherapiemethoden, welche einen nachgewiesenen Einfluss auf skoliotische Krümmungen besitzen. Dazu gehören folgende Therapieansätze: Lyon (Frankreich), Katharina Schroth (Deutschland), Scientific Exercise Approach to Scoliosis (Italien), Barcelona Scoliosis Physical Therapy School (Spanien), Dobomed (Polen), Side Shift (Vereinigtes Königreich) und Functional Individual Therapy of Scoliosis approach (Polen) (124). In Deutschland kommt vorwiegend die in den späten 1910er Jahren entwickelte dreidimensionale Skoliosebehandlung nach Katharina Schroth zur Anwendung. Wie alle anderen PSSE-Ansätze umfasst auch diese Therapieform gemäß der aktuellen SOSORT-Leitlinie die folgenden essenziellen Teilaspekte: dreidimensionale Korrektur der zugrundeliegenden Wirbelsäulendeformität, Training von Aktivitäten des täglichen Lebens, Stabilisierung der korrigierten Haltung und Patientenedukation zur AIS (109).

Die Schroth-Methode bedient sich bei der Korrektur von skoliotischen Krümmungen sensomotorischen und kinästhetischen Konzepten. Nach König ist die Körperhaltung als eine Momentaufnahme aus vielen Bewegungsabläufen mit dynamischer Komponente definiert (125). Sie entsteht dabei durch ein koordiniertes Zusammenspiel von agonistischer sowie antagonistischer Muskulatur (126). Mit Hilfe eines Spiegels nimmt die zu behandelnde Person unter physiotherapeutischer Anleitung zunächst eine (über-)korrigierte Körperhaltung ein, welche sich für diese zu Beginn unnatürlich anfühlt. Somit entwickelt sich das Bewusstsein für eine Korrekturhaltung im Sinne der Symmetrie, was durch die veränderte Körperwahrnehmung eine aktive selbstständige Haltungskorrektur im Alltag ermöglicht (127). Diese Fähigkeit zur selbstständigen Korrektur ist insofern wichtig, da AIS-Betroffene häufig eine fehlerhafte Wahrnehmung der Gravitationsvertikalen aufweisen und entsprechend ihre Körperlängsachse nicht korrekt an dieser ausrichten können (128). Eine weitere wichtige

Komponente in der Schroth-Therapie ist die sogenannte Drehwinkelatmung. Sie dient der Mobilisation der Rippen-Wirbelgelenke in den konkaven Rippenarealen und bahnt mit jedem Atemzug die zuvor erlernte Korrekturhaltung. Gleichzeitig verbessert sie die Flexibilität der Interkostalmuskulatur sowie die Vitalkapazität der Lunge und erleichtert die Ausführung der dreidimensionalen Korrekturbewegungen in den jeweiligen Rumpfabschnitten (12, 127). Des Weiteren trainiert die Schroth-Methode in speziellen Übungen die gezielte Aktivierung von bestimmten Muskeln, wie z. B. dem Musculus quadratus lumborum, dem M. iliopsoas sowie die paraspinal liegenden Musculi erector trunci, um die Korrekturwirkung der Drehwinkelatmung zusätzlich zu unterstützen (12).

Zur Einteilung der unterschiedlichen Skolioseformen nutzt die Schrothmethode ein eigenes Klassifizierungssystem. Dieses basiert auf der Unterteilung des Rumpfes in einzelne Blöcke. Je nach Krümmungsrichtung und -ausprägung verändern sich, wie in Abb. 15 dargestellt, diese rechteckig geformten Körperblöcke zu Trapezen.

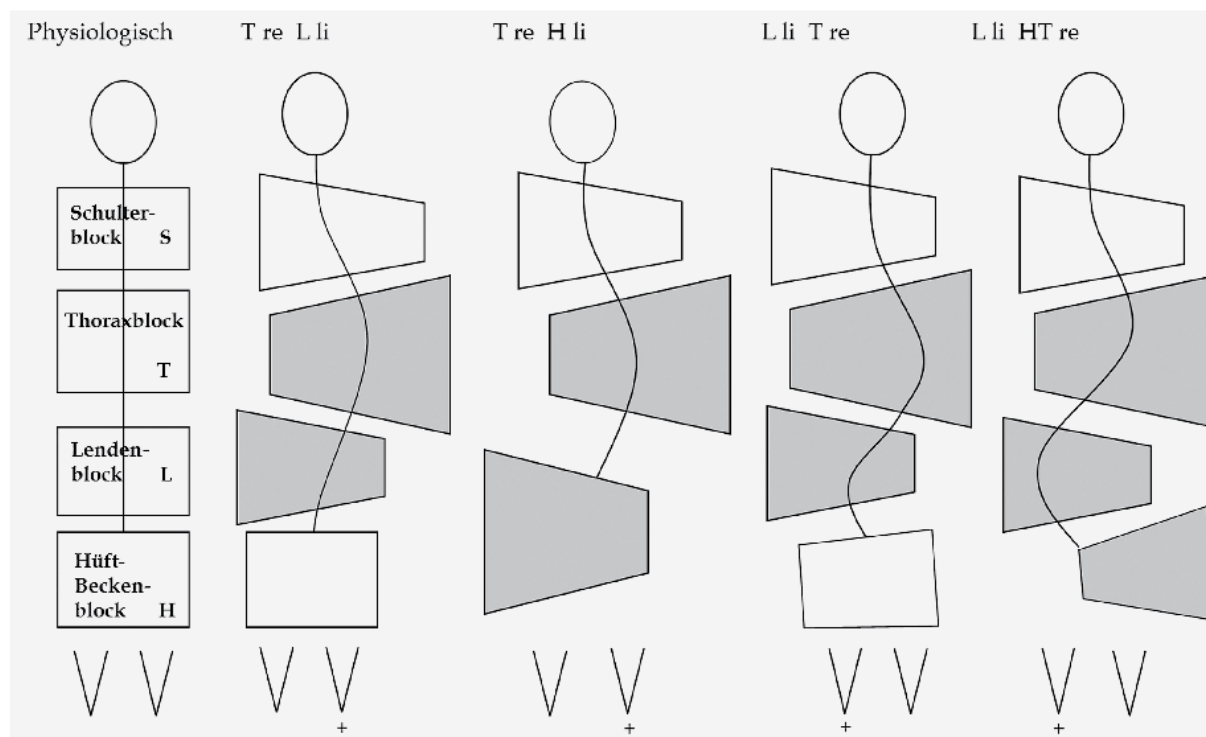


Abb. 15 Körperblöcke in der Therapie nach Katharina Schroth. (Quelle: Roevenich, 2018, S. 13 (129))

Zu den Körperblöcken gehören der Hüft-Beckenblock (H), der Lendenwirbelblock (L), der Thoraxblock (T) und der Schulterblock (S). Die Bezeichnung der Skolioseformen beginnt immer mit der Lage der Hauptkrümmung als Abkürzung des jeweiligen Körperblocks in Großbuchstaben. Daran schließen sich therapierelevante Nebenkrümmungen an. Die Krümmungsrichtung wird mit „li“ = links und „re“ = rechts abgekürzt und dem jeweiligen Großbuchstaben nachgestellt. Das Muster „LliHTre“ bedeutet beispielsweise, dass die Hauptkrümmung linkskonvex in der Lendenwirbelsäule verläuft und zwei rechtskonvexe

Nebenkrümmungen im Bereich des Hüft-Becken- und Thoraxblocks liegen. Sagittale Normabweichungen im thorakalen Abschnitt der Wirbelsäule werden mit KT = Kyphose thorakal abgekürzt und an das Ende der jeweiligen Musterbezeichnung gesetzt. Liegt eine thorakale Hyperkyphose vor, folgt auf das KT ein Plus, bei einer verminderten Kyphose in der Brustwirbelsäule entsprechend ein Minus. (124, 129)

Je nach vorliegendem Skoliosemuster erhalten die Patientinnen und Patienten individuell angepasste Übungen, die nach dem Erlernen selbstständig mehrmals pro Woche zu Hause weitergeführt werden sollten. Zusätzlich dazu ist eine wöchentliche ambulante Physiotherapiebehandlung nach Katharina Schroth indiziert, um die richtige Durchführung der Übungen langfristig zu evaluieren und zu unterstützen (109).

Eine randomisierte kontrollierte Studie von Kuru et al. aus dem Jahr 2016 verglich den Einfluss von ambulanter Schroth-Therapie unter physiotherapeutischer Supervision mit einem häuslichen Schroth-Übungsprogramm sowie einer Kontrollgruppe ohne Schroth-Therapie auf den Cobb-Winkel über einen Zeitraum von sechs Monaten. Dabei verbesserte sich der Krümmungswinkel in der ambulant betreuten Gruppe um 2,5°. Sowohl in der Heimübungsgruppe als auch in der Kontrollgruppe kam es jedoch zu einer Verschlechterung des Cobb-Winkels um 3,3° bzw. 3,1°. (130) Diese Ergebnisse verdeutlichen die Relevanz einer professionellen physiotherapeutischen Betreuung im Verlauf der Skoliosebehandlung, da diese insbesondere im konservativen Bereich sehr stark von der Therapieadhärenz der zu behandelnden Person abhängt. Neben der Verhinderung einer Progression des Cobb-Winkels gehört unter anderem die Behandlung von muskulären Dysbalancen, die Stärkung der Rückenmuskulatur, eine Verbesserung der Vitalkapazität sowie das Erlernen und Aufrechterhalten einer verbesserten Körperhaltung zu den Zielen der Schroth-Therapie (3, 12).

Die parallele Fortführung der Schroth-Therapie ist auch während einer Korsettbehandlung oder auch nach einer operativen Skoliosekorrektur möglich. Eine aktuelle Studie von Fang et al. untersuchte den Unterschied zwischen einer Gruppe, die neben ihrer Korsetttherapie eine Behandlung nach Katharina Schroth erhielt und einer Kontrollgruppe mit alleiniger Korsett-Behandlung. In dem Kollektiv, in welchem beide Behandlungsformen parallel durchgeführt wurden, kam es unter anderem zu einer signifikanten Reduktion des Cobb-Winkels um 3,55° und einer signifikant höheren Zufriedenheit bezüglich des Selbstbildes und der eigenen mentalen Gesundheit (131). Eine signifikante Steigerung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität bei Patientinnen und Patienten unter Schroth-Therapie konnte von Gao et al. anhand der visuellen Analogskala zur Objektivierung von Rückenschmerzen und des Patientenfragebogens der Scoliosis Research Society-22 (SRS-22) zeigen (132). Insgesamt

gilt die Schroth-Methode unter allem PSSE-Ansätzen als die am besten untersuchte und am häufigsten eingesetzte physiotherapeutische Behandlung bei idiopathischen Skoliosen (124).

### **2.3.2 Korsett-Therapie**

Eine Korsettindikation kann für thorakale Skoliosen ab 25° bis 50° bzw. lumbale Skoliosen ab 20° bis 40° nach Cobb sowie Skoliosen mit einer Krümmungsprogredienz von über 5° innerhalb von sechs Monaten gestellt werden. Diese Therapiemöglichkeit kommt in der Regel nur bei ausreichend verbleibendem Restwachstum (mindestens ein Jahr, Risser-Stadium < III) in Frage (133). Neueren Erkenntnissen zur Folge können allerdings auch Skoliosen mit einem Risser-Zeichen  $\geq$  III mit einem Korsett behandelt werden, sofern die Menarche erst kürzlich eingesetzt hat (134). Parallel zur Korsettversorgung wird die Weiterführung einer physiotherapeutische Behandlung nach Katharina Schroth empfohlen (16, 17).

Vorrangiges Ziel der Korsettversorgung ist eine Korrektur des Ausgangswinkels der Skoliose um mindestens 50 % (18). Dies ist, neben dem Vorhandensein einer ausreichenden Wachstumsreserve, die wichtigste Voraussetzung für eine adäquate Wachstumslenkung der Wirbelsäulendeformität. Die Evaluation der Korrekturwirkung erfolgt über ein Röntgenbild der Wirbelsäule im Korsett nach einer sechswöchigen Eingewöhnungsphase. In Abb. 16 ist in der linken Aufnahme ein Chêneau-Korsett dargestellt. Es repräsentiert die am häufigsten angewandte Form der Korsetttherapie in Mitteleuropa bei adoleszenten idiopathischen Skoliosen. Zur Korrektur der Wirbelsäulendeformität ist es essenziell, den jeweiligen Druckzonen gegenüberliegende Freiräume zuzuordnen, sodass ein aktives Ausweichen und somit eine Aufrichtung der Krümmungen möglich ist (135). Dabei unterstützen eingesetzte Schaumstoffpelotten zusätzlich die aktive Derotation der skoliotischen Wirbelsäule. Die a.-p.-Wirbelsäulenganzaufnahmen b und c aus Abb. 16 zeigen eine deutliche Korrektur der Krümmung im Vergleich zueinander. In der Aufnahme mit Korsett wurden die Hauptdruckzonen mit Hilfe eines auf dem Korsett aufgeklebten Drahtes auf Höhe der eingesetzten Pelotten im Röntgenbild sichtbar gemacht. Die weißen Pfeile zeigen die Korrekturrichtung der jeweiligen Druckzone an.



Abb. 16 Chêneau-Korsett a) Ansicht einer Patientin mit AIS im Korsett von dorsal. b) Wirbelsäulenganzaufnahme im Stand ohne Korsett. c) Wirbelsäulenganzaufnahme im Stand mit Korsett. (Quelle: Scheyerer et. al, 2019, S. 424 (135))

Zur individuellen Herstellung einer Orthese erfolgte standardmäßig das Anfertigen eines Gipsabdruckes des Oberkörpers im Stand, gegebenenfalls auch unter Traktion der Wirbelsäule. In den letzten Jahren etablierten sich jedoch computergestützte Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung der Rumpfform.

Ein Chêneau-Korsett sollte täglich ungefähr 23 Stunden getragen werden. Ein Ablegen der Orthese sollte grundsätzlich nur zur Einhaltung der Körperhygiene oder während der Physiotherapie erfolgen. Um die Verletzungsgefahr beim Sport zu verringern, darf das Korsett auch zu diesem Zweck abgelegt werden. Hier gilt die Besonderheit, dass die Zeit der sportlichen Betätigung üblicherweise zur „Korsetttragezeit“ hinzuaddiert wird (17). Der Therapieerfolg hängt maßgeblich von der Therapieadhärenz seitens der Patientinnen und Patienten ab (136). Dabei kann die psychische Belastung durch Einschränkung der körperlichen Leistungsfähigkeit sowie durch kosmetische Aspekte insbesondere bei Jugendlichen die Lebensqualität erheblich beeinflussen (137). Zu weiteren Einflussfaktoren hinsichtlich des Therapieerfolges zählen die Lokalisation und Rigidität der Krümmung, das Alter mit entsprechend verbleibendem Restwachstum sowie die Qualität des Korsetts (17, 18). Thorakale Skoliosen zeigen aufgrund von verringerter Flexibilität der Brustwirbelsäule ein schlechteres Ansprechen auf Korsettbehandlungen als lumbale Skoliosen (138).

Bei Krümmungen im Bereich von 20° bis 30° nach Cobb kann alternativ ein nächtliches Umkrümmungskorsett (Charleston Bending Brace) eingesetzt werden. Die Anwendung dieser Behandlungsform kann auch additiv zur Therapie mit einem Chêneau-Korsett erfolgen (18). Bezüglich der Effektivität der nächtlichen Korsetttherapie im Vergleich zur Beobachtung der Skoliose ohne Behandlung konnte in der Studie von Wiemann et al. kein signifikanter Unterschied festgestellt werden (139). Hinsichtlich der Vermeidung einer Operationsindikation oder Progredienz der Skoliosen zwischen 25° und 40° Grad zeigte der nächtliche Einsatz des Charleston Bending Brace jedoch positive Auswirkungen (140).

Während einer Korsetttherapie sollten alle drei Monate klinische Verlaufskontrollen stattfinden. Röntgenkontrollen im Korsett erfolgen ca. 6 Wochen nach der Erstversorgung mit einer neuen Rumpforthese sowie im Anschluss daran in halbjährlichen Abständen (16). Darauf basierend wird die Orthese regelmäßig angepasst. Nach einem Wachstumsschub kann eine Reversorgung notwendig sein. Nach Wachstumsabschluss wird das Korsett unter Weiterführung der Physiotherapie langsam stufenweise abgeschult. Der entsprechende Zeitpunkt für den Beginn der Abschulung kann entsprechend der SOSORT-Leitlinien anhand des Skeletalters im Röntgenbild (Risser-Zeichen) bestimmt werden (109). Dieser liegt bei Mädchen in der Regel um das 16. Lebensjahr herum, bei Jungen im Alter von 17 oder 18 Jahren (18). Zwei Jahre nach Ende der Korsetttherapie ist eine abschließende Röntgenkontrolle notwendig (13).

Weinstein et al. zeigten in einer multizentrischen Studie aus 2013, dass ein Voranschreiten von Skoliosen mit Korsettindikation bis zum Einsetzen einer OP-Indikation durch eine Korsettbehandlung signifikant verringert werden konnte. Dieser Effekt verstärkte sich mit zunehmender Tragedauer der Orthese (136). Nach einer Publikation von Sanders et al. liegt die sogenannte Number Needed to Treat (NNT, Zahl an Behandlungen, die nötig ist, um gegenüber einer Alternativmethode das gewünschte Therapieziel zu erreichen) der Korsetttherapie bei therapieadhärenten Patientinnen und Patienten bei drei (141). Im Vergleich dazu erhöhte sich die NNT auf neun, sofern die vorgeschriebene Tragezeit des Korsetts nicht eingehalten wurde (142). In einem ausführlichen systematischen Review sprach sich Karavidas ebenfalls für die Wirksamkeit der Korsetttherapie aus, allerdings sollten in der Zukunft noch qualitativ hochwertigere Studien auf methodischer Ebene durchgeführt werden (143).

### **2.3.3 Operative Verfahren**

Eine operative Behandlung sollte bei progredienten adoleszenten idiopathischen Skoliosen ab einem Cobb-Winkel über 50° im thorakalen Wirbelsäulenbereich und bei lumbalen Krümmungen mit starker Rotationskomponente bereits ab 40° in Betracht gezogen werden (3, 13). Das optimale Alter für eine operative Korrektur der Skoliose liegt kurz vor Ende des

Knochenwachstums nach dem letzten Wachstumsschub (ca. ein Jahr nach der Menarche) ungefähr zwischen dem 13. und 16. Lebensjahr (13, 16). Der Wachstumsfortschritt kann anhand des Grades der Verknöcherung der Beckenkammmapophyse nach Risser radiologisch beurteilt werden (s. Kapitel 2.2.2). Patientinnen und Patienten unter 12 Jahren sollten aufgrund des vorhandenen Restwachstums nur in Ausnahmefällen eine definitive Fusionsoperation erhalten. Für dieses Kollektiv der Early-Onset-Skoliosen eignen sich in erster Linie sogenannte Non-Fusion-Techniken, die ein Mitwachsen erlauben.

Die operativen Verfahren für Late-Onset-Skoliosen werden im Folgenden entsprechend ihrem Zugangsweg in ventrale und dorsale Verfahren eingeteilt. Zu den Zielen dieser Operationsmethoden zählen die dreidimensionale Korrektur der Skoliose unter Berücksichtigung des sagittalen Profils, die Versteifung einer möglichst kurzen Fusionsstrecke mit Erhalt einer möglichst großen Anzahl von lumbalen Bewegungssegmenten sowie die Vermeidung von Schäden des Rückenmarks und der umliegenden neuralen Strukturen (144). Bei besonders ausgeprägter Krümmungsrigidität, hochgradigen Cobb-Winkeln und doppelbogigen Skoliosen sollten beide Operationsmethoden miteinander kombiniert werden.

Indikationen für die Anwendung von dorsal distrahierenden Verfahren stellen sowohl adoleszente idiopathische Skoliosen mit einer strukturellen Krümmung (Lenke Typ 1 und 5) als auch doppelbogige Skoliosen (Lenke Typ 2, 3, 4 und 6) dar.

Im Vergleich zur ventralen Instrumentierung weist der dorsale Zugangsweg eine geringere Morbidität auf und hat dementsprechend keine negativen Einflüsse auf die Lungenfunktion der Patientinnen und Patienten (18). Des Weiteren eignet sich dieses Verfahren auch für längere Fusionsstrecken, welche beispielsweise bei doppelbogigen Skoliosen zum Einsatz kommen. Durch die verstärkte Krafteinwirkung bei langstreckiger Fusion kann jedoch eine erhöhte Zugbelastung auf das Rückenmark in neurologische Komplikationen resultieren. Daher ist ein intraoperatives Neuromonitoring bei dorsaler Instrumentation essenziell. Die Durchführung von Spondylodesen im tiefen Lumbalbereich der Wirbelsäule führt zu einer stärkeren Einschränkung des Bewegungsausmaßes als eine Fusion im thorakalen Bereich. Daher ist die Hüftgelenksbeweglichkeit als Kompensationsmechanismus in der Operationsplanung zu berücksichtigen (33). Spezifische Komplikationen des dorsalen Zugangsweges wurden bereits in Kapitel 2.1.3 aufgeführt.

Die ventrale Derotationsspondylodese nach Halm-Zielke (145) eignet sich besonders zur Korrektur von einbogigen Skoliosen (Lenke Typ 1C und Typ 5). Diese Methode ermöglicht im Vergleich zu dorsalen Verfahren eine effektivere segmentale Derotation der Wirbelsäule sowie eine kürzere Fusionsstrecke. Die Diskektomie im Fusionssektor hat durch die Verkürzung des vorderen Wirbelsäulenbereiches eine Kyphosierung zur Folge, wodurch das

sagittale Profil entsprechend korrigiert werden kann. Des Weiteren konnte die Rate an neurologischen Komplikationen mit diesem Verfahren effektiv gesenkt werden (55). Allerdings ist bei der ventralen Operationsmethode der Bereich der möglichen Fusionsstrecke aus anatomischen Gründen auf die mittlere Brustwirbelsäule bis zur oberen Lendenwirbelsäule limitiert. Zudem liegt eine erhöhte Schwierigkeit hinsichtlich der Operationstechnik in Kombination mit höherer Morbidität des ventralen Zugangsweges vor (17). Dies kann insbesondere zur postoperativen Einschränkung der Lungenfunktion führen, welche bis zu 24 Monate anhalten kann (146). Bei der Verwendung eines dorsalen Zugangsweges beträgt die Dauer bis zur Wiedererlangung der präoperativ gemessenen Lungenfunktion im direkten Vergleich dazu nur sechs Monate (146). Weitere Risiken der ventralen Derotationsspondylodese sind in Kapitel 2.1.3 beschrieben.

Die in diesem Abschnitt erläuterten Verfahren bedingen ein hohes Maß an Invasivität, weshalb insbesondere bei initial leichten und mittelschweren Skoliosen der Fokus auf der Vermeidung einer Indikation zur operativen Behandlung der AIS liegt. Aus diesem Grund ist eine engmaschige Überwachung des Therapieerfolges unabdingbar. Im Folgenden geht es um die Verdeutlichung der zugrundeliegenden Problematik bezüglich der korrekten Auswahl des Therapieregimes und der dazu notwendigen diagnostischen Maßnahmen. Da die Verlaufskontrollen mittels regelmäßiger Röntgenaufnahmen der gesamten Wirbelsäule die Strahlenbelastung der betroffenen Kinder und Jugendlichen erheblich erhöht (147), rücken strahlenfreie Alternativen in den Vordergrund. Zur Optimierung der Validität von VRS-Messungen im Verlauf ist jedoch eine genauere Untersuchung der zur Verfügung stehenden Parameter hinsichtlich ihrer Beeinflussung durch eine Standardisierung der Haltung während der Messung notwendig.

### **2.4 Erkenntnisleitende Fragestellung**

Um den Therapieerfolg der AIS-Erkrankung im Verlauf zu objektivieren, gilt das Röntgen der Wirbelsäule und die darauffolgende Messung des Cobb-Winkels gemäß den aktuell gültigen SOSORT-Leitlinien als Goldstandard (109). Hierauf stützen sich die Entscheidungen über den Beginn einer Behandlung oder alternativ über eine Eskalation bzw. Anpassung der aktuell bestehenden Therapieform. Der Cobb-Winkel selbst besitzt inzwischen eine mittlere Inter- und Intraobserver-Variabilität von 3° bei manueller Messung am digitalen Röntgenbild (148). Ältere Studien beschreiben einen mittleren Messfehler von zwischen 2,8° bis 4,9° bei manueller Messung durch die gleiche Person in verschiedenen Zeitabständen (99). Modernere Systeme können diesen Messfehler mithilfe von Deep-Learning inzwischen auf bis zu 2,45° verringern (149).

Es scheint so, als wäre es auf dieser Grundlage möglich, Therapieentscheidungen anhand der in Kapitel 2.3 bereits vorgestellten Cobb-Winkel-Grenzen exakt und verlässlich zu treffen. Allerdings zeigen AIS-Betroffene mitunter eine ausgeprägte Haltungsvervariabilität, die in der Vergangenheit zwar bereits häufiger beobachtet, jedoch in der klinischen Anwendung bisher noch nicht konsequent berücksichtigt wurde. Eine Studie von Skaggs et al. aus dem Jahre 2020 untersuchte den Einfluss einer im Rahmen der Therapie nach Katharina Schroth erlernten Korrekturhaltung auf den Cobb-Winkel im Röntgen im Vergleich zur konventionellen Stehposition am selben Tag. Dabei ergab sich eine signifikante mittlere Reduktion des Cobb-Winkels der Hauptkrümmung von durchschnittlich  $6^\circ$  bei den Messungen in der schrothbasierten Korrekturhaltung, welche damit außerhalb des oben genannten Messfehlerbereiches liegt. Bei haltungsbedingten Veränderungen dieses elementaren Parameters kam es im Rahmen der Studie in 33 % der Fälle zu abweichenden Behandlungsempfehlungen auf Basis der jeweiligen Röntgenaufnahmen in den verschiedenen Haltungen, obwohl die entsprechenden Aufnahmen am gleichen Tag erfolgten. (10)

Insbesondere die Indikationsstellung einer Korsettbehandlung sowie die einer chirurgischen Korrektur der Skoliose kann einen deutlichen Einschnitt der Lebensqualität bedeuten. Eine Studie von Torén et al. aus dem Jahre 2022 wertete die Daten zur gesundheitsbezogenen Lebensqualität von 307 Teilnehmenden mit AIS mit unterschiedlichen Therapieformen und einer Kontrollgruppe von 80 gesunden Personen aus (150). Dabei wurde der SRS-22r-Fragebogen der Scoliosis Research Society genutzt, um die gesundheitsbezogene Lebensqualität (Health-Related Quality of Life, HRQoL) von AIS-Betroffenen zu objektivieren. Eine signifikante Einschränkung der Lebensqualität zeigte sich dabei unter anderem in der chirurgisch behandelten im Vergleich zur unbehandelten Subgruppe der AIS-Patientinnen und Patienten. Dies galt insbesondere für den Bereich der Funktionalität und Schmerzintensität. Eine größere Studie von Cheung et. al (n = 652) zeigte ebenfalls niedrigere HRQoL-Werte bei Jugendlichen mit bestehender oder bereits beendeter Korsettbehandlung im Vergleich zu unbehandelten Jugendlichen mit AIS (151). Daher ist es umso relevanter, eine Beeinflussung der Ergebnisse des jeweils eingesetzten bildgebenden Verfahrens durch bestmögliche Standardisierung des Untersuchungsablaufes zu verhindern oder auf ein Minimum zu begrenzen.

AIS-Betroffene zwischen 13 und 18 Jahren und einem Risserstadium von 0 bis 3 sollen alle 12 Monate eine Wirbelsäulenganzaufnahme zur Detektion einer möglichen Progredienz oder Regredienz der Skoliose erhalten (58). Um gerade in dieser vulnerablen Phase insbesondere im Rahmen von Wachstumsschüben größere Veränderungen der Wirbelsäulenform frühzeitig zu objektivieren (33), spielten regelmäßige VRS-Kontrolluntersuchungen eine bedeutende Rolle. Auch gemäß den aktuell gültigen SOSORT-

Empfehlungen sollten oberflächentopographische Methoden wie die VRS, Skoliometer-Messungen und die klinische Untersuchung verstärkt eingesetzt werden, um die Strahlenbelastung der AIS-Betroffenen so gering wie möglich zu halten. (58) Allerdings besteht analog zu den Röntgenuntersuchungen auch bei videorasterstereographischen Messungen das Risiko der Verfälschung von Messergebnissen durch Haltungsveränderlichkeit. Eine beispielhafte Gegenüberstellung von zwei VRS-Messungen im Abstand von wenigen Minuten am gleichen Messtag Abb. 17 verdeutlicht die ausgeprägte Haltungsveränderlichkeit und Einflussmöglichkeit von unterschiedlichen Anweisungen zur Positionierung während der Messung. Bisher gibt es keine einheitliche Standardisierung der Haltung während des Röntgens bzw. während der VRS-Untersuchung. Dies erschwert die Durchführung von validen und reliablen Messungen bei AIS-Betroffenen erheblich.



Abb. 17 VRS-Messungen einer 14-jährigen Patientin mit AIS in habitueller Haltung ohne Instruktionen (links, Messung vom 18.06.2021; 11:05 Uhr) und in standardisierter Korrekturhaltung (rechts: 18.06.2021; 11:07 Uhr), zeigen im Vergleich deutliche Unterschiede bezüglich der skoliotischen Deformität.

Vor der Aufnahme im linken Bild erhielt eine 14-jährige Patientin mit einer mittelschweren Thorakolumbalskoliose keine Anweisungen bezüglich ihrer Haltung während der rasterstereographischen Vermessung. Die Wirbelsäulenverkrümmung ist dabei am Übergang zwischen Brust- und Lendenwirbelsäule deutlich sichtbar. Die Aufnahme auf der rechten Seite entstand kurz darauf nach der Aufforderung zum Einnehmen der standardisierten Korrekturhaltung (s. Kapitel 3.2.1), welche in erster Linie auf einer selbstständig durchgeführten Elongation der Wirbelsäule basiert. Der Vergleich beider Wirbelsäulenrekonstruktionen zeigt eine hohe Haltungsveränderlichkeit, welche je nach Alter, Schweregrad der Krümmung und Rigidität der Skoliose stark variieren kann (7).

Ein ähnlicher Sachverhalt wurde bereits in einer klinischen Studie von Schumann et al. mit 100 AIS-Betroffenen zwischen 7 und 64 Jahren untersucht. Dabei erfolgten zum Ende eines drei- bis vierwöchigen stationären Rehabilitationsaufenthaltes an einem Tag rasterstereographische Vermessungen von drei unterschiedlichen Haltungsverarianten. Diese orientierten sich an den im Rahmen der Therapie nach Katharina Schroth erlernten

Körperhaltungen (Haltung ohne Anweisung, bewusste Alltagshaltung und Korrekturhaltung). Es bestätigte sich die Vermutung, dass Oberflächenmessungen durch bewusst herbeigeführte Korrekturhaltungen beeinflusst werden können. (7) Da sich die Messungen auf nur einen einzigen Tag konzentrierten, konnte in dieser Studie keine verlässliche Aussage zur Reproduzierbarkeit der Haltungsveränderungen im Verlauf getroffen werden.

In der klinischen Praxis erfolgen die Messungen in definierten zeitlichen Abständen zur Evaluation möglicher Veränderungen der Wirbelsäulenverkrümmung, sodass eine Reihe von Confoundern zu einer bewussten oder unbewussten Haltungsveränderung führen und damit das Risiko einer fehlerhaften Therapieentscheidung zusätzlich erhöhen könnten. Hierzu gehören beispielsweise die Kombination von unterschiedlichen Therapieformen, das Tragen einer Rumpforthese direkt vor einer VRS-Messung (152) sowie der Einfluss durch muskuläre, anatomische und psychologische Faktoren (153, 154). Des Weiteren ist zu beachten, dass es sich bei der VRS-Messung analog zu Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule um eine Momentaufnahme handelt, die Körperhaltung selbst jedoch einen dynamischen Prozess mit dem Zusammenspiel von agonistischer sowie antagonistischer Muskulatur darstellt (126). Kommt hierbei noch die Problematik einer ungenauen Instruktionen der zu untersuchenden Person während des Messvorganges bei fehlender Standardisierung hinzu, ist eine Verzerrung der natürlichen Haltung wahrscheinlich (155). Umso relevanter ist es, langfristig eine standardisierte Haltung zu konzipieren, die sowohl während einer Röntgenuntersuchung als auch bei oberflächentopographischen Messungen angewandt werden kann. Diese würde auch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Verfahren ermöglichen. Zuvor sollte jedoch evaluiert werden, inwieweit sich verschiedene Parameter durch eine entsprechende Körperhaltung verändern.

Bezüglich der in dieser Forschungsarbeit verwendeten Messmethode konnte – wie bereits in Kapitel 2.2.3.3 erläutert – eine gute Reliabilität und Validität des DIERS formetric III 4D für die Untersuchung von Personen mit AIS mehrfach bestätigt werden (8, 95). In einer Studie von Knott et al. betrug der durchschnittliche Unterschied zwischen radiologisch gemessenem Cobb-Winkel und dem VRS-Parameter „Skoliosewinkel“ für thorakale Krümmungen  $5,8^\circ$  und lumbale Krümmungen  $8,8^\circ$  (94). Die Schwierigkeit besteht also inzwischen nicht mehr darin, eine mögliche Progredienz zu detektieren, sondern haltungsbedingte Veränderungen des Cobb-Winkels von den strukturell bedingten Veränderungen zu differenzieren, um falsche Therapieentscheidungen zu vermeiden und, im Falle der VRS, die vorzeitige Anfertigung von Röntgenaufnahmen außerhalb der Kontrollintervalle aufgrund eines falsch-positiven Progredienzverdacht zu verhindern.

Da die Skoliosetherapie das Leben der AIS-Betroffenen über eine lange Zeit begleitet und häufig mehrere Therapieformen ergänzend durchgeführt werden, wurde das Setting dieses

Forschungsprojektes in Form von aufeinanderfolgenden Messungen im Abstand von ca. zwei Wochen während eines Rehabilitationsaufenthaltes bewusst gewählt. Es geht dabei explizit nicht um eine Evaluation der dort durchgeführten Therapie, sondern um eine möglichst realitätsgetreue Abbildung der Problematik von parallelen Einflüssen auf die Haltung der Patientinnen und Patienten in Form von unterschiedlichen Behandlungen. Eine klinisch relevante Progredienz der Skoliose innerhalb von wenigen Wochen wurde bei der AIS bisher nicht beschrieben. Daher ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Änderungen der Haltung in diesem kurzen Zeitraum nicht auf eine strukturelle Ursache zurückzuführen sind, sondern funktionelle Gründe haben. In den vorliegenden Studien zur Reliabilität der VRS beläuft sich der Abstand der Messungen oft im Bereich von wenigen Minuten bis zu einer Woche (8, 105), geht es zusätzlich um die Evaluation einer möglichen Progredienz, werden die Messintervalle denen der radiologischen Untersuchungen angepasst und umfassen in der Regel mehrere Monate (112).

Der diesem Forschungsprojekt zugrundeliegende Versuchsaufbau wird in den folgenden Kapiteln gemeinsam mit den statistischen Methoden sowie den dabei verwendeten Parametern der VRS-Messung vorgestellt.

### **3 Material und Methoden**

Die folgenden Kapitel umfassen zunächst die Erläuterung des Vorgehens bei der Auswahl der Studienteilnehmenden. Anschließend erfolgt eine genauere Betrachtung des Untersuchungsablaufes sowie einzelner Messparameter, welchen in der Verlaufsbeurteilung der AIS eine hohe Aussagekraft zugesprochen wird. Abschließend werden die angewandten statistischen Methoden aufgeführt und die notwendigen Informationen zum Ethikvotum im Rahmen dieser Forschungsarbeit dokumentiert.

#### **3.1 Auswahl der Studienteilnehmenden**

Die Datenerfassung im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte in der Asklepios Katharina-Schroth-Klinik Bad Sobernheim, einer orthopädischen Rehabilitationseinrichtung für Menschen mit adoleszenter idiopathischer Skoliose und anderen Wirbelsäulendeformitäten. Der Epidemiologie der AIS entsprechend liegt der Schwerpunkt dort auf der stationären Behandlung von Kindern und Jugendlichen. Patientinnen und Patienten zwischen 10 und 18 Jahren erhielten vor ihrer Anreise postalisch eine Information über die Möglichkeit zur freiwilligen Teilnahme an der Studie und konnten sich bei Interesse vor Ort in der Klinik zum persönlichen Aufklärungsgespräch melden. Im Rekrutierungszeitraum von April bis Juli 2021 sollten gemäß der statistischen Fallzahlplanung 89 Probandinnen und Probanden mit adoleszenter idiopathischer Skoliose in die Studie eingeschlossen werden. Ein weiteres Kriterium für die Aufnahme neben der

Erkrankung und des Alters war eine Mindestdauer von drei Wochen des geplanten stationären Klinikaufenthaltes in der AKSK Bad Sobernheim, um den Abstand von ca. 14 Tagen zwischen den Messzeitpunkten einzuhalten. Das Geschlecht sowie die ethnische Zugehörigkeit hatten keinen Einfluss auf die Auswahl der Teilnehmenden.

Da sich die Studie ausschließlich an Patientinnen und Patienten mit AIS richtete, wurden folgende Wirbelsäulendeformitäten ausgeschlossen:

- Neuromuskuläre Skoliosen
- Kongenitale Skoliosen
- Infantile und juvenile Skoliosen
- Sekundäre Skoliosen

Um zu gewährleisten, dass Anweisungen zur Einnahme einer bestimmten Haltung im Rahmen der Forschungsarbeit korrekt umgesetzt werden konnten, war eine Teilnahme für Personen mit folgenden Merkmalen ebenfalls nicht möglich:

- geistige Retardierung
- operative Versteifung der Wirbelsäule
- Angabe von Schmerzen in Ruhe über einem Wert von drei auf der numerischen Analogskala von 0 (kein Schmerz) bis 10 (stärkster vorstellbarer Schmerz)
- akute Krankheitsgeschehen, wie zum Beispiel Fieber, noch nicht ausgeheilte Verletzungen, Schwindel, Übelkeit oder Gleichgewichtsprobleme
- chronische Erkrankungen, die Einfluss auf das Bewegungsverhalten oder den Gleichgewichtssinn haben
- Einnahme von Medikamenten mit Wirkung auf Vigilanz, Muskeltonus oder das zentrale Nervensystem
- Rückenkonturveränderungen durch große Narben, Tattoos auf dem Rücken
- Body-Mass-Index (BMI)  $\geq 30 \text{ kg/m}^2$
- Schwangerschaft

Personen, die zum Zeitpunkt der Beurteilung der Eignung nicht voll einwilligungsfähig oder einsichtsfähig waren, sofern dieser Zustand nicht auf deren Alter beruht und kein Einverständnis der Erziehungsberechtigten bzw. Inhaber des Sorgerechts nach vorheriger Aufklärung vorlag, konnten ebenfalls nicht an der Studie teilnehmen.

Am Anreisetag wurden die stationär aufgenommenen Personen bei bestehendem Interesse an einer Studienteilnahme bezüglich der Ein- und Ausschlusskriterien von der Studienärztin befragt und über den zeitlichen Ablauf der Studie aufgeklärt. Die dazugehörigen Unterlagen mit den entsprechenden Probandinnen-/Probanden- bzw. Elterninformationen wurden bereits

vier Wochen vor Beginn der Rehabilitationsmaßnahme an alle 10- bis 18-jährigen Patientinnen und Patienten, die während des Rekrutierungszeitraumes voraussichtlich stationär in der AKSK Bad Sobernheim anwesend sein sollten, postalisch versendet. Somit blieb ausreichend Zeit, sich vor dem mündlichen Aufklärungsgespräch, welches bei allen unter 18-jährigen im Beisein einer erziehungs- oder sorgeberechtigten Person stattfand, über die Studie zu informieren. Mit dem Erhalt der Studienunterlagen bestand von diesem Zeitpunkt an die Möglichkeit, offene Fragen vor der Unterzeichnung der Einverständniserklärung per Telefon, E-Mail oder am Anreisetag persönlich zu klären. Bei Erfüllen aller Einschlusskriterien sowie dem Einverständnis seitens der potenziellen Teilnehmenden und ggf. eines Elternteils konnte die Unterzeichnung der Einverständniserklärung zur Studienteilnahme erfolgen. Im Anschluss daran erhielten die Probandinnen und Probanden den Termin zu ihrer ersten VRS-Messung.

Die Ausgangswerte der rasterstereographischen Untersuchung wurden dort in der Regel am zweiten Tag nach der Anreise erfasst, der zweite Messtermin erfolgte im Normalfall 14 Tage später. Im Verlauf des ersten Messtermins kam noch die pseudonymisierte Erfassung der für die Studie erforderlichen Daten hinzu.

Des Weiteren erfolgte bei der videorasterstereographischen Vermessung mit dem DIERS formetric III 4D die Analyse der Seitabweichung (im Folgenden auch als laterale Deviation bezeichnet) in zwei unterschiedlichen Varianten sowie der Oberflächenrotation in Bezug auf den RMS, worauf in den Kapiteln 3.2.2, 3.2.3 und 3.2.4 näher eingegangen wird.

## **3.2 Analyse der videorasterstereographischen Aufnahmen**

Die Vermessung der Rückenoberfläche aller Studienteilnehmenden erfolgte mit dem DIERS formetric III 4D unter Verwendung der Videorasterstereographie. Diese Methode gewährleistet eine schnelle, strahlungsfreie und berührungslose Analyse des menschlichen Rückens und der Wirbelsäule mit Hilfe von Lichtstreifen. Dabei bildet der Projektor des Gerätes ein Linienraster auf den Rücken der zu untersuchenden Person ab, welches simultan von einer Kameraeinheit aufgezeichnet wird. Mit Hilfe einer Computersoftware werden die Linienkrümmungen analysiert. Daraus entsteht im Folgenden ein dreidimensionales Abbild der Rückenoberfläche. Aus diesen Daten wird darüber hinaus ein digitales, dreidimensionales Wirbelsäulenmodell konstruiert.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst der genaue Aufbau und Ablauf der Vermessung detailliert beschrieben. Vor diesem Hintergrund erfolgt im Anschluss eine nähere Betrachtung der Parameter „Seitabweichung VP-DM (RMS)“, „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ sowie „Oberflächenrotation (RMS)“. Das Fundament für die Auswahl dieser Variablen bildet eine Studie von Manca et al. aus dem Jahr 2018, in welcher den

beiden Parametern ein hohes Maß an Reliabilität sowie eine signifikante Assoziation mit dem Skoliosewinkel zugeschrieben wurde. Dadurch wird ihnen insbesondere in der Verlaufsdagnostik von AIS-Betroffenen eine tragende Rolle zuteil (105).

#### **3.2.1 Aufbau und Ablauf der videorasterstereographischen Vermessung**

Die Messungen mit dem DIERS formetric III 4D (Bestandteil des DIERS FAMUS (Funktionsanalyse des Muskuloskeletalen Systems)) fanden in den Räumlichkeiten der Klinik zu Beginn und nach ca. 14 Tagen während des stationären Aufenthaltes statt. Insgesamt wurden vier Messungen durchgeführt, welche jeweils sechs Sekunden reine Messdauer in Anspruch nahmen. Dabei zeichnete die Kamera zwölf Bilder mit einer Frequenz von 2 Hz auf (86). Unter Berücksichtigung der Möglichkeit, vor und nach der Untersuchung ggf. aufkommende Fragen zu beantworten und Ergebnisse zu besprechen, wurden für die Messtermine jeweils 15 Minuten eingeplant.

Vor Beginn der Messungen füllte die Studiendurchführende beide Seiten eines Dokumentationsprüfbogens aus und beantwortete bei Bedarf letzte Fragen der Teilnehmenden. Im Anschluss wurden die Probandinnen und Probanden gebeten, sich in der Umkleidekabine des Diagnostikraumes bis auf die Unterwäsche zu entkleiden. Die vollständige Entkleidung des Oberkörpers fand erst statt, sobald die zu untersuchenden Personen mit dem Rücken zur Studiendurchführenden auf einer 3D-Simulationsplattform der Firma DIERS standen. Diese Plattform befand sich dauerhaft in Neutralposition, wurde während der gesamten Untersuchung zu keiner Zeit bewegt und diente hauptsächlich als Positionierungshilfe während der Messung in standardisierter Korrekturhaltung, welche im Anschluss an die Messung in habitueller Haltung erfolgte. Auf Wunsch war eine Bedeckung der Vorderseite des Oberkörpers mit Hilfe eines Tuchs möglich. Um eine optimale Analyse der Rückenoberfläche zu ermöglichen, mussten lange Haare nach oben gebunden und Halsketten entfernt werden, sodass der Nacken bis zum Haaransatz gut sichtbar war und die anatomischen Landmarken der Halswirbelsäule durch den DIERS formetric III 4D erfasst werden konnten.

Die erste Messung erfolgte im Stehen in der habituellen Haltung (H, Haltungstereotyp, Gewohnheitshaltung) und entsprach der topographischen Analyse der Eingangsuntersuchung in der Klinik, welche auch ohne Studienteilnahme bei allen neuangereisten Patientinnen und Patienten durchgeführt wird. Bei der darauffolgenden zweiten Messung erhielten die Teilnehmenden Anweisungen zur Positionierung in einer standardisierten Korrekturhaltung (SK). Dies umfasste folgende Instruktionen in der aufgeführten Reihenfolge, welche sowohl aus Experteninterviews mit erfahrenen Physiotherapeutinnen und -therapeuten als auch aus den allgemeinen Empfehlungen der Firma DIERS entstanden (81, 86):

1. „Beide Fersen müssen den hinteren Rand der Simulationsplattform berühren.“
2. „Beide Füße hüftbreit aufstellen.“
3. „Die Kniegelenke leicht entriegeln und nicht überstrecken.“
4. „Beide Arme seitlich neben dem Körper locker hängen lassen.“
5. „Stelle dir vor, du wirst an einem unsichtbaren Faden an deinem Kopf bis ganz nach oben in Richtung Decke gezogen.“

Während die Ansagen eins bis vier die Standardisierung der Haltung gewährleisten sollten, diente die fünfte Anweisung hauptsächlich der aktiven Aufrichtung der Wirbelsäule ohne jegliche Vorkenntnisse der physiotherapeutischen skoliosespezifischen Übungen im Rahmen des Therapieansatzes nach Katharina Schroth. Dies hat den Hintergrund, dass einige der teilnehmenden Personen in der Vergangenheit bereits stationär in der AKSK Bad Sobernheim behandelt wurden und somit unterschiedliche Kenntnisstände hinsichtlich möglicher Korrekturhaltungen vorliegen könnten. Die Korrekturhaltung nach Katharina Schroth entsteht aus einer komplexen dreidimensionalen Bewegung heraus und erfordert eine gezielte Schulung der Propriozeption (12). Sie ist daher nicht mit der standardisierten Korrekturhaltung in dieser Studie gleichzusetzen sollte im Rahmen dieser Studie bei einer Vielzahl von physiotherapeutischen Ansätzen in der konservativen Skoliotherapie nicht vorausgesetzt werden. Nach jeder Messung wurden die Ergebnisse der Analyse auf Plausibilität geprüft. Dabei musste auf eine korrekte Positionierung der anatomischen Fixpunkte geachtet werden, welche die Voraussetzung für die Erstellung eines körpereigenen Koordinatensystems bilden und in Abb. 18 dargestellt sind.

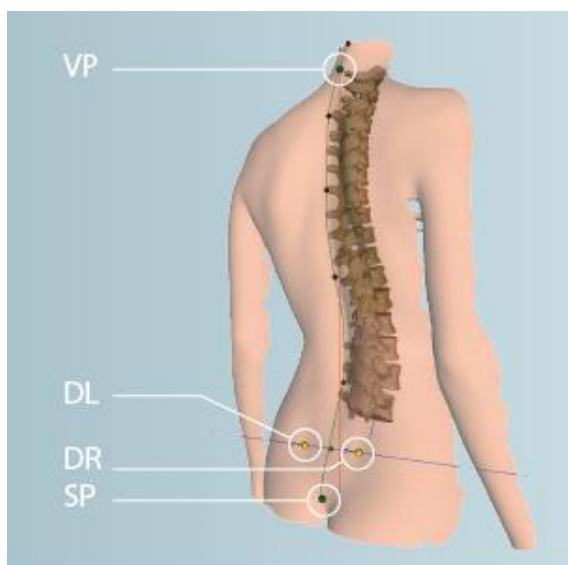


Abb. 18 Anatomische Fixpunkte am 3D-Modell der Rückenoberfläche , mit freundlicher Genehmigung der Firma DIERS GmbH, Schlangenbad, Deutschland (86)

Dazu gehören

- die Vertebra prominens (VP, meistens äquivalent zum siebten Halswirbel, insbesondere bei Frauen alternativ der erste Brustwirbel (89)),
- das linke Lumbalgrübchen (DL, nicht äquivalent mit der Spina iliaca posterior superior),
- das rechte Lumbalgrübchen (DR, ebenfalls nicht äquivalent mit der Spina iliaca posterior superior),
- der Sakrumpunkt (SP, Beginn der Rima Ani) sowie
- vier bis sechs Punkte mit gleichem Abstand, die den Verlauf der Dornfortsatzlinie nachzeichnen (s. schwarze Punkte über der Wirbelsäule in Abb. 18) (86).

In 23 Fällen war eine automatische Bestimmung dieser Punkte aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich. Die Ursachen hierfür sind in Kapitel 3.3 aufgeführt. Zur Minimierung von Messfehlern durch das möglicherweise fehlerbehaftete manuelle Anbringen von Oberflächenmarkern (156) wurden zunächst die verfügbaren Korrekturoptionen ausgeschöpft. Dazu gehört im ersten Schritt die Bildbescheidung des zu analysierenden Areals der Rückenoberfläche. Anschließend kann eine manuelle Fixpunktkorrektur (siehe Abb. 19) in Betracht gezogen werden.

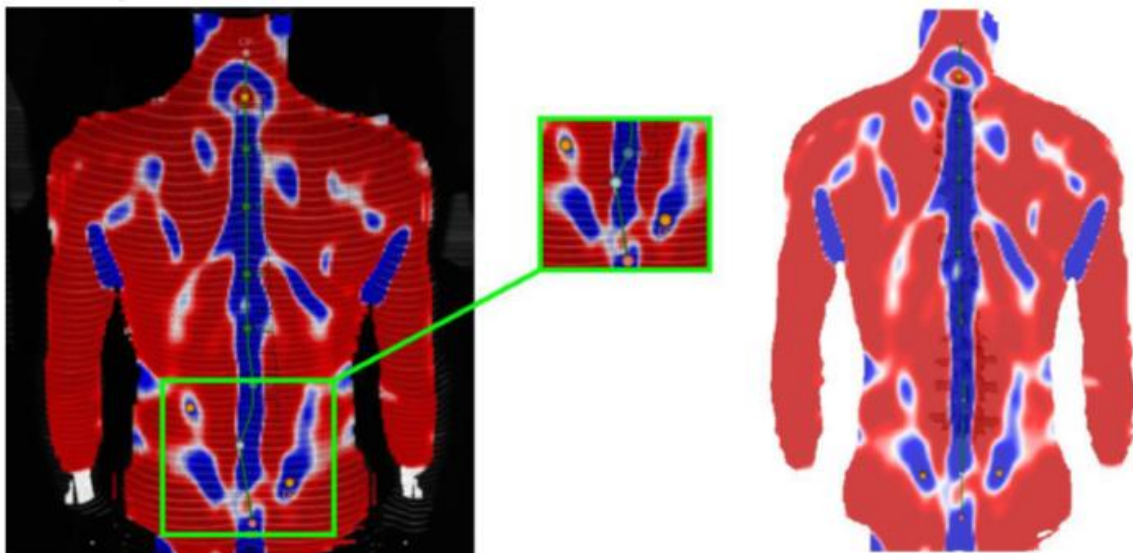


Abb. 19 Manuelle Fixpunktkorrektur in der Software DICAM III , mit freundlicher Genehmigung der Firma DIERS GmbH, Schlagenbad, Deutschland (86)

Dabei wird der fehlerhafte Punkt in der Ansicht der mittleren Krümmung durch die untersuchende Person an den Rand des entsprechenden konkaven oder konvexen Areals gezogen und mit Hilfe der Software DICAM III automatisch an den tiefsten bzw. höchsten Punkt in diesem Bereich gesetzt. Im letzten Schritt besteht noch die Möglichkeit, einzelne Bilder der jeweiligen Messung aus der Analyse herauszunehmen, beispielsweise wenn sich

die untersuchte Person während des Messprozesses übermäßig stark bewegt hat. Nach der Anwendung dieser Maßnahmen konnten die fehlerhaften Messungen auf neun Datensätze reduziert werden. In diesen Fällen war die Verwendung von Oberflächenmarkern unabdingbar.

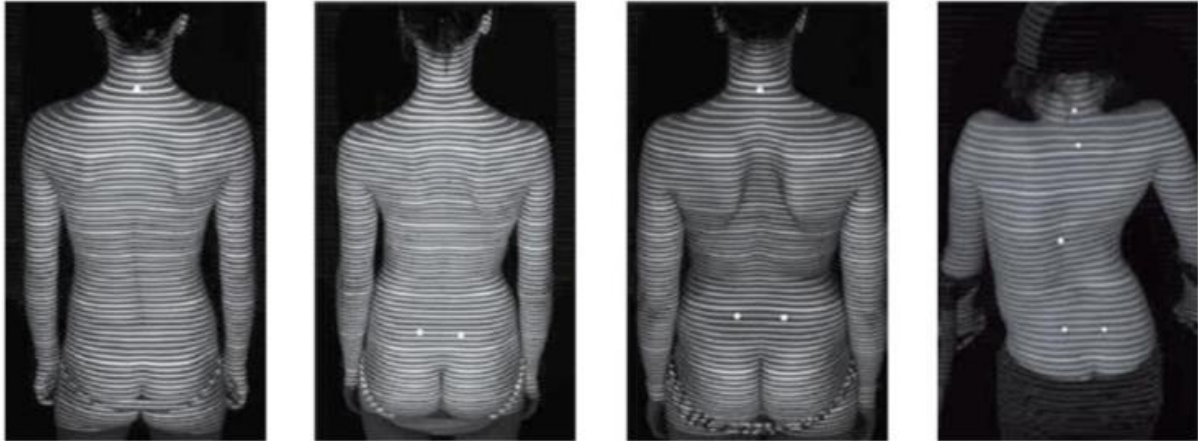


Abb. 20 Einsatzmöglichkeiten von reflektierenden Oberflächenmarkern , von links nach rechts: Marker VP, Marker DL/DR, Marker VP und DL/DR, Marker VP, DL/DR und Dornfortsätze, mit freundlicher Genehmigung der Firma DIERS GmbH, Schlangenbad, Deutschland (86)

Der Einsatz von reflektierenden Markern ist in Abb. 20 dargestellt, erfolgte nach sorgfältiger Palpation der entsprechenden fehlerhaft analysierten anatomischen Landmarken und wurde auf der Rückseite des Dokumentationsprüfbogens mit Angabe des jeweiligen Grundes erfasst.

Der zweite Messtermin fand in der Regel 14 Tage später während des stationären Aufenthaltes in der AKSK Bad Sobernheim statt und umfasste ebenfalls eine Analyse der Rückenoberfläche in habitueller Haltung und direkt im Anschluss daran in standardisierter Korrekturhaltung. Weitere Bestandteile dieses Termins waren die Erläuterung der Messergebnisse sowie die Vervollständigung des Dokumentationsprüfbogens, sofern beispielsweise noch Angaben zum Cobb-Winkel aufgrund einer später terminierten Röntgenuntersuchung der Wirbelsäule fehlten. Darüber hinaus bekamen alle Probandinnen und Probanden auf Wunsch ihre eigenen Messergebnisse in Form zweier Vergleichs-Ergebnisblätter ausgehändigt.

#### **3.2.2 Erläuterung zum Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS)**

Der Wirbelsäulenparameter „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ zeigt die mittlere quadratische Abweichung (root mean square, RMS) nach lateral entlang der Mittellinie der rekonstruierten Wirbelsäule von der direkten Verbindung zwischen den Punkten VP und DM in der Frontalebene und wird in der Einheit Millimeter angegeben (21, 27). Beide genannten Punkte

sind in Abb. 21 eingezeichnet und über eine durchgezogene blaue Linie miteinander verbunden.

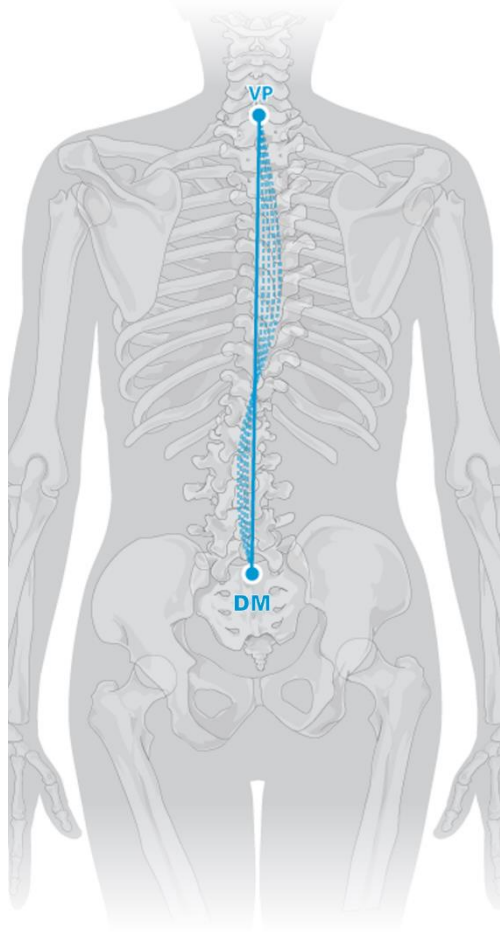


Abb. 21 Darstellung des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ mit freundlicher Genehmigung der Firma DIERS GmbH (Schlangenbad, Deutschland)

Die Seitabweichung der Wirbelsäulenmittellinie von der Strecke VP-DM wurde in Form von gestrichelten blauen Linien visualisiert. Die Mittellinie definierten Drerup et al. als „die Kurve, die die Zentren der Wirbelkörper im frontalen Röntgenbild verbindet“ (90). Sie bleibt von einer möglichen Rotationskomponente unbeeinflusst und ist dementsprechend nicht äquivalent zur Symmetrielinie, welche im nachfolgenden Kapitel erklärt wird. Üblicherweise entspricht ein positiver Wert der Seitabweichung einer Rechtskonvexität in der Frontalebene und ein Wert mit negativem Vorzeichen folglich einer Linkskonvexität. Da bei dem vorliegenden Parameter der RMS-Wert ausgegeben wird, können hier keine Rückschlüsse auf die Richtung der Auslenkung gezogen werden. Dies hat jedoch den Vorteil, dass sich die positiven und negativen Werte nicht durch unterschiedlich gerichtete Seitabweichungen im gesamten Verlauf der Wirbelsäule gegenseitig aufheben. Somit können mehrere Krümmungen mit unterschiedlichen Auslenkungen berücksichtigt werden. Die Berechnung des RMS wird in Kapitel 3.3 beschrieben. Bei Personen ohne Wirbelsäulendeformität ist die

Verbindung VP-DM nahezu identisch mit der Sagittalebene und der Symmetrielinie der Wirbelsäule. Für AIS-Betroffene ergibt sich an dieser Stelle allerdings eine Besonderheit. Durch einen möglichen Beckenschiefstand oder eine vorhandene Rotation im Bereich des Beckens befinden sich die Lumbalgrübchen häufig nicht auf einer Höhe, weshalb die Verbindungslinie VP-DM nicht mehr mit der Sagittalebene übereinstimmt.

Schulte et al. beschrieben für den Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS) eine mittlere Differenz von 3,2 mm zwischen den radiologischen und VRS Werten nach einem Vergleich von 96 Röntgenbildern mit den entsprechenden rasterstereographischen Aufnahmen (104). Die Genauigkeit der Messung dieses Wertes konnte auch bei AIS-Betroffenen mit sehr ausgeprägten Cobb-Winkeln zwischen 48° und 78° im Vergleich zu vorliegenden Röntgenaufnahmen mit einer Differenz von 5,8 mm beziffert werden (103). Dadurch etablierte sich die Seitabweichung VP-DM (RMS) im Laufe der Jahre als zuverlässiger Standardparameter in der Verlaufskontrolle von Patientinnen und Patienten mit Wirbelsäulendeformitäten. Für die Altersgruppe der beschwerdefreien 19- bis 40-jährigen erarbeiteten Schröder et al. einen Mittelwert von 5,5 mm mit einer Standardabweichung von  $\pm 2,3$  mm bei Frauen und  $5,8 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$  bei Männern aus einer Stichprobe von 177 Personen (107). Bei Schülerinnen und Schülern zwischen zehn und zwölf Jahren liegt die durchschnittliche Seitabweichung VP-DM (RMS) bei 5 mm (106). Eine weitere Studie von Furian et al. ergab eine durchschnittliche laterale Deviation von 4,8 mm mit einer Standardabweichung von  $\pm 0,6$  mm für gesunde Probandinnen und Probanden zwischen sechs und elf Jahren (157). In einer aktuellen Studie zu dreidimensionalen Referenzdaten der Videorasterstereographie von Huthwelker et al. mit 44 Teilnehmenden in der Altersgruppe zwischen 18 und 30 Jahren lag der Durchschnitt bei  $3,5 \text{ mm} \pm 1,6 \text{ mm}$  für den Wert Seitabweichung VP-DM (RMS) (158).

Grundsätzlich sollte jedoch die Seitabweichung der Wirbelsäule im Sinne der bestmöglichen Symmetrie so nah wie möglich am Wert „null“ liegen.

#### **3.2.3 Erläuterung zum Parameter Seitabweichung Symmetrielinie VPDM (RMS)**

Ein weiterer Parameter zur Quantifizierung von Haltungsänderungen wird durch die „Seitabweichung Symmetrielinie VPDM (RMS)“, im Folgenden vereinfacht „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ genannt, repräsentiert. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen Messwert mit der Einheit „Millimeter“, der laut Herstellerangaben jedoch kein regelhafter Bestandteil in der Auswertung von rasterstereographischen Oberflächenvermessungen ist (86). Dennoch untersuchten Manca et al. die Seitabweichung der Symmetrielinie in ihrer Studie aus dem Jahr 2018 und fanden heraus, dass dieser Messwert den größten Teil der Variabilität des Parameters „Skoliose-Winkel“ erklärt (105). Gemeinsam mit der Oberflächenrotation (RMS) zählt die Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) demnach zu den

Schlüsselparametern in der Verlaufsuntersuchung von adoleszenten idiopathischen Skoliosen.

Zur Unterscheidung der beiden Variablen Seitabweichung VP-DM (RMS) und Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) eignet sich die Definition der Symmetrielinie nach Drerup und Hierholzer: „The line of the spinous processes is estimated by the so-called symmetry line of the back. The symmetry line [...] is composed of the symmetry points of the horizontal profiles. A symmetry point, in turn, is defined by that point which divides the profile into two halves with minimum lateral asymmetry (with respect to surface curvature).“ (87). Veranschaulicht wird dies in Abb. 22 mit der Darstellung der Symmetrielinie in Form der Aneinanderreihung von sogenannten Oberflächennormalen (eine Linie senkrecht zur (Haut-) Oberfläche in dem jeweils betrachteten Punkt (155)) der einzelnen übereinanderliegenden Symmetriepunkte. Dabei ist erkennbar, dass die Symmetrielinie die Rotation der einzelnen Wirbelkörper mitabbildet. Daraus folgt, dass der Abstand zwischen der bereits eingeführten Verbindungslinie VP-DM und der errechneten Symmetrielinie in der Nähe der Hauptkrümmungen, d. h. dort, wo die axiale Auslenkung am größten ist, höher geschätzt wird als bei der Seitabweichung VP-DM (RMS). Diese wiederum nutzt, wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, den Abstand der Wirbelsäulenmittellinie zur Referenzstrecke VP-DM als Berechnungsgrundlage.

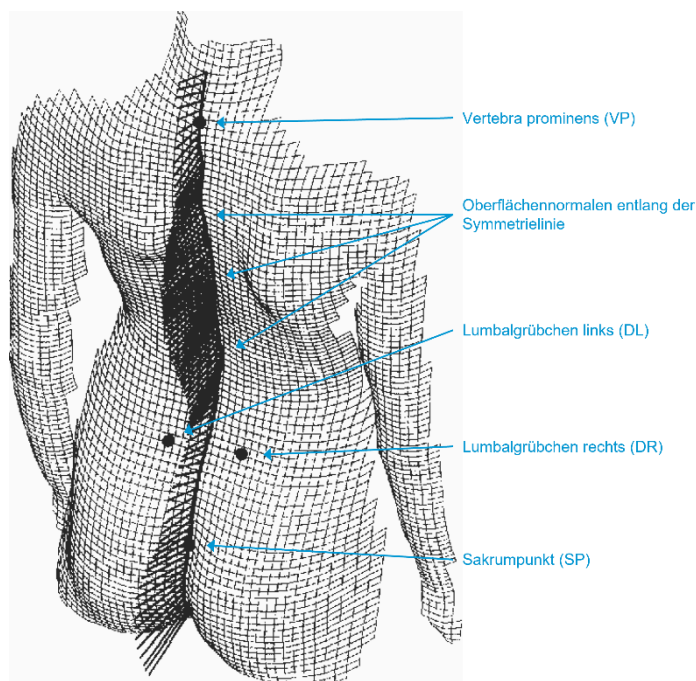


Abb. 22 Rekonstruierte Rückenoberfläche mit Symmetrielinie Modifiziert nach: Drerup, Hierholzer 1994

Bei Personen ohne Wirbelsäulendeformation würde beim Vergleich beider Parameter keine Differenz in den Messwerten auftreten, da sich Symmetrielinie, Mittellinie und die Verbindungslinie VP-DM in der Theorie nicht voneinander unterscheiden. Handelt es sich

jedoch um einen skoliotischen Rücken, entspricht die Symmetrielinie als geschätzte Dornfortsatzlinie aufgrund der definitionsgemäßen axialen Abweichung der Wirbelkörper in der Transversalebene nicht mehr der Wirbelsäulenmittellinie.

Auch wenn dem Parameter Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) bisher ein mittleres bis hohes Maß an Reliabilität und diagnostischer Relevanz zugesprochen wurde (105, 159), gibt es für diesen bisher noch keine publizierten Referenzwerte. In Anlehnung an die Seitabweichung VP-DM (RMS) erscheint es jedoch auch hier sinnvoll, zum Erreichen der bestmöglichen Symmetrie Werte nahe Null als Zielwerte anzusetzen.

#### 3.2.4 Erläuterung zum Parameter Oberflächenrotation (RMS)

Bei dem dritten Parameter, der in diesem Forschungsprojekt näher betrachtet wird, handelt es sich um das quadratische Mittel, der durch den DIERS formetric III 4D errechneten Oberflächenrotation der Wirbelsäule. Dieser Wert wird in der Einheit „Grad“ angegeben. Drerup definiert die Oberflächenrotation (RMS) wie folgt: „In the intersecting points, an arrow indicates the direction of the surface normal. The deviation of its direction from the sagittal plane is denoted as the angle  $\rho$  of surface rotation.“ (5). Dieser Sachverhalt ist in Abb. 23 anhand eines schematisierten skoliotischen Rückens dargestellt.

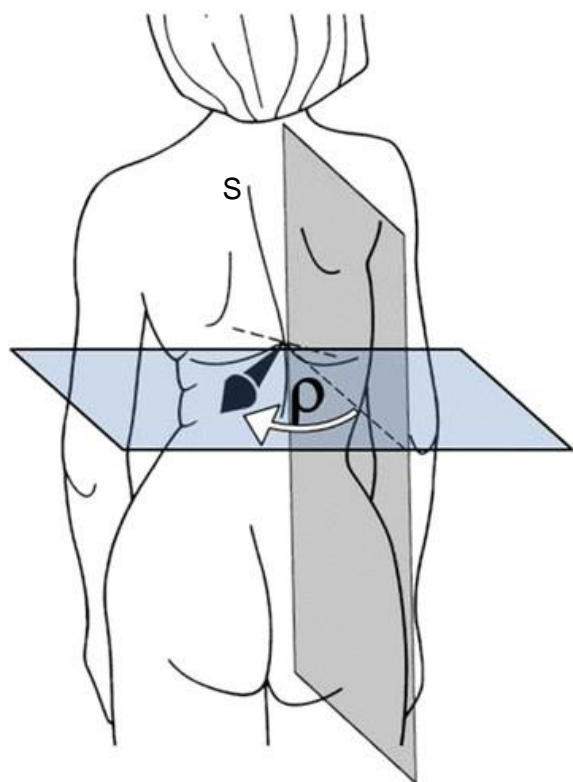
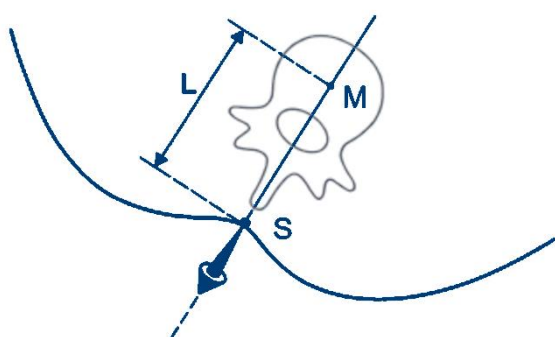


Abb. 23 Skoliotischer Rücken mit eingezeichneter Symmetrielinie S und einer horizontalen Fläche orthogonal zur Symmetrielinie (blaue Fläche). Der Winkel  $\rho$  der Oberflächenrotation beschreibt die Abweichung (weißer Pfeil) zwischen der Sagittalebene (graue Fläche) und der Oberflächennormalen (dicker schwarzer Pfeil) in der Horizontalebene. (5) Quelle: Drerup 2014, S. 9

Die graue Fläche repräsentiert die Sagittalebene, welche die Horizontal- bzw. Transversalebene (blau) an der Flächennormalen (schwarzer Pfeil) im Verlauf der Symmetrielinie (schwarze Linie) schneidet. Der weiße Pfeil markiert den Winkel  $\rho$  der Oberflächenrotation in der Transversalebene. Die Bedeutung der Symmetrielinie wurde bereits in Abschnitt 3.2.3 erläutert.

Zum besseren Verständnis zeigt die Abb. 24 einen Querschnitt durch den Oberkörper. Ausgehend von dem in dieser Ebene angeschnittenen Symmetrielinienpunkt S kann eine Strecke der Länge L in entgegengesetzter Richtung zur Oberflächennormalen (blauer Pfeil analog zum schwarzen Pfeil zur vorherigen Abbildung) zurückverfolgt werden, um daraufhin den Mittelpunkt M des jeweiligen Wirbelkörpers zu erhalten (5).



*Abb. 24 Konstruktion des Wirbelmittelpunkts M im Rumpfquerschnitt mit Hilfe des Symmetrielinienpunktes S und dem aus der Rumpflänge errechneten Abstand L in entgegengesetzter Richtung zur Oberflächennormalen (Pfeil), in Anlehnung an Drerup et al, 2014, S. 9*

Hier wird insbesondere nochmals der Unterschied zwischen der rotationsunabhängigen Wirbelsäulenmittellinie (Linie, die durch die Wirbelkörpermitte M verläuft (90)) und der Symmetrielinie, welche aufgrund der Hebelwirkung der Strecke L in Verlängerung der Flächennormalen durch die axiale Wirbelkörperrotation beeinflusst wird, deutlich (160). Eine Annäherung an die wahre Länge von L wird dabei über eine lineare Funktion unter Zuhilfenahme der Länge des Oberkörpers (Strecke VP-DM) berechnet (90). Auch bei dem Parameter Oberflächenrotation (RMS) sollte sich der Wert bei Einnahme einer Haltung im Sinne der bestmöglichen Symmetrie der Zahl „Null“ annähern.

Gemäß der Referenzwerte für zehn- bis zwölfjährige Personen sollte die maximale Oberflächenrotation zwischen  $2^\circ$  und  $5^\circ$  betragen (106). Ähnliche Werte wurden auch in der

bereits o.g. Studie von Schröder et al. ermittelt, hier lag die mittlere Oberflächenrotation bei gesunden Menschen im Alter von 19 bis 40 Jahren bei  $3^\circ \pm 2^\circ$  (107). In der Forschungsarbeit von Huthwelker et al. zeigte sich bei einem ebenfalls beschwerdefreien Studienkollektiv auch eine systematische Asymmetrie in Transversalebene. Für die „Oberflächenrotation (RMS)“ betrug der Mittelwert in dieser Kohorte  $2,3^\circ \pm 0,9^\circ$ . (158) Hinsichtlich der Vergleichbarkeit zur radiologischen Bildgebung kamen Schulte et al. zu einer mittleren Differenz zwischen VRS und Röntgenbildern von  $2,5^\circ$  (104).

### 3.3 Statistische Methoden

Die Daten der Teilnehmenden dieser prospektiven Längsschnittstudie wurden zunächst in Microsoft Excel (Microsoft 365 Apps for Enterprise, Version 2309) tabellarisch erfasst. Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe des Statistikprogrammes SPSS (IBM SPSS Statistics für Windows, Version 27.0.1.0). Die Lizenzen für alle verwendeten Programme stellte die Johannes Gutenberg-Universität Mainz zur Verfügung. Für die Erstellung der Diagramme wurden die Anwendungen SPSS und Microsoft Excel verwendet. Eine statistische Beratung fand durch Herrn Westphal, angestellt am Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI) der Universitätsmedizin Mainz, statt. Die Fallzahlplanung wurde im Vorfeld für einen einseitigen t-Test bei verbundenen Stichproben durchgeführt. Unter der Annahme eines mittleren Effekts der standardisierten Korrekturhaltung auf den RMS-Wert der zu untersuchenden Parameter (Effektstärke 0,3), für ein Signifikanzniveau von 5 % und mit einer angestrebten Power von 80 % ergab sich eine benötigte Fallzahl von 71 Studienteilnehmenden. Zur Abschätzung der Effektstärke wurden das Ergebnis aus einem Pilotversuch sowie eine Einschätzung der minimalen, klinisch relevanten Differenz verwendet. Bei einem anzunehmenden Anteil von 80 % verwertbarer Datensätze am Ende der Studie, ergab sich daraus eine zu rekrutierende Fallzahl von 87 Personen.

Der primäre Endpunkt der prospektiven Längsschnittstudie ist die Veränderung der mit dem DIERS formetric III 4D gemessenen Seitabweichung der Wirbelsäulenmittellinie oder Symmetrielinie von der Verbindung zwischen VP und DM in Millimetern sowie der Oberflächenrotation in Grad. Alle drei Parameter wurden vom System als RMS bestimmt. Die Berechnung erfolgt über die Erzeugung eines sogenannten vorzeichenneutralen quadratischen Mittels, welches bei Merkmalsausprägungen, die in beide Richtungen von Null abweichen können, in der Regel aussagekräftiger ist. Bei der Berechnung eines arithmetischen Mittels würde es durch die unterschiedlichen Auslenkungen im Verlauf der Wirbelsäule nach links (negatives Vorzeichen) und rechts (positives Vorzeichen) zur gegenseitigen Aufhebung der Werte kommen. Das Vorgehen zur Errechnung der RMS-Werte besteht zunächst darin, die vorhandenen Werte über das Quadrieren mit einem

einheitlichen Vorzeichen zu versehen und angelehnt an die Berechnung des arithmetischen Mittels durch die Anzahl der Stichproben zu teilen. Im Anschluss daran wird aus dem resultierenden Bruch die Wurzel gezogen, sodass wieder die jeweiligen Ausgangswerte zugrunde liegen, jedoch ohne positive bzw. negative Vorzeichen (161).

Zum Vergleich der Mittelwertberechnung sind hier beispielhaft die Formeln der unterschiedlichen Verfahren für fiktive Werte von  $x_1$  bis  $x_3$  angegeben:

Arithmetisches Mittel:  $\bar{x} = \frac{x_1+x_2+x_3}{n}$

Root Mean Square (quadratisches Mittel):  $RMS = \sqrt{\frac{x_1^2+x_2^2+x_3^2}{n}}$

Für den primären Endpunkt soll getestet werden, ob die Einnahme einer standardisierten Korrekturhaltung im Vergleich zu einer habituellen Haltung zur signifikanten Verbesserung der Wirbelsäulensymmetrie führt. Die Differenz ergibt sich jeweils durch die Subtraktion der Messwerte in standardisierter Korrekturhaltung von den zugehörigen Messwerten in habitueller Haltung.

- **Alternativhypothese  $H_1$ :** Die Differenz zwischen den Messwerten der Haltungen SK und H ist signifikant kleiner als Null, d. h. ergibt eine signifikante Verbesserung der Symmetrie.
- **Nullhypothese  $H_0$ :** Die Differenz zwischen den Messwerten der Haltungen SK und H ist nicht signifikant kleiner als Null, d. h. ergibt keine signifikante Verbesserung der Symmetrie.

Um die Alternativhypothese zu testen, sollte zunächst ein einseitiger t-Test bei verbundenen Stichproben für den Mittelwert der RMS-Differenzen durchgeführt werden. Einen einseitigen Test zu verwenden, erscheint gerechtfertigt, da unterschiedliche Formen der Korrekturhaltung mit Elongationskomponente sowohl radiologisch als auch rasterstereographisch in unterschiedlichen Studien zur Reduktion von skoliotischen Krümmungen führten (7, 10).

Folgende Voraussetzungen müssen für die Anwendung eines t-Tests erfüllt werden:

- Die abhängige Variable muss intervallskaliert sein.
- Die Werte der abhängigen Variable sollten eine Normalverteilung aufweisen.
- Die Varianzen der beiden zu vergleichenden Gruppen sollten möglichst gleich groß sein.

Die Normalverteilung und Varianzhomogenität werden in der Regel bei einer Stichprobengröße  $n > 30$  nicht überprüft, da der t-Test zu den sogenannten robusten Verfahren zählt und der zentrale Grenzwertsatz für die Normalverteilung gilt (162). Dies bedeutet, dass er trotz moderater Abweichung von einer Normalverteilung bei einer ausreichend großen Stichprobe noch eine zuverlässige Einschätzung der Mittelwertunterschiede ermöglicht. Sind jedoch mehrere Voraussetzungen deutlich verletzt, sollte man ein nicht-parametrisches Verfahren (z. B. Wilcoxon-Test) verwenden (163).

Nach Testung auf Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests zeigte sich, dass es sich bei den Parametern Seitabweichung VP-DM (RMS), Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) und Oberflächenrotation (RMS) um verteilungsfreie Variablen handelte. Da allerdings eine Stichprobengröße von  $n > 30$  vorliegt, ist der Umstieg auf einen nicht-parametrischen Test nicht notwendig. Die statistische Signifikanz für die Durchführung des einseitigen t-Tests wurde für ein Signifikanzniveau bei p-Werten  $\leq 0,05$  (signifikant) festgelegt. Da es sich hier um einen einseitigen t-Test handelt, SPSS jedoch nur Ergebnisse für zweiseitige Hypothesentests ausgibt, dürfen die ausgegebenen p-Werte im Anschluss halbiert werden (164).

### **3.4 Ethikvotum**

Der Antrag zur vorliegenden prospektive Längsschnittstudie (2020-15019\_1-andere Forschung erstvotierend) wurde am 17.04.2020 der Ethik-Kommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz vorgelegt. Am 20.07.2020 wurde er mit einem zustimmenden Votum versehen (siehe Anhang 1, Seite V bis IV).

## **4 Ergebnisse**

Die folgenden Kapitel charakterisieren zunächst die der Studie zugrundeliegenden Stichprobe von 76 Probandinnen und Probanden bezüglich ihrer demographischen Gegebenheiten sowie weiteren relevanten Faktoren. Anschließend werden die Veränderungen der eingenommenen Haltungen zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten dargelegt und unter Einbeziehung der Daten zu Geschlecht, Lokalisation der Hauptkrümmung, Schweregrad sowie der Anzahl der Klinikaufenthalte genauer betrachtet.

### **4.1 Kollektiv der Studienteilnehmenden**

Während der Rekrutierungsphase dieses Forschungsprojektes wurden insgesamt 596 Patientinnen und Patienten in der AKSK Bad Sobernheim behandelt. Bei 198 stationär aufgenommenen Personen erfolgte am Anreisetag eine Beurteilung der Eignung für die Studienteilnahme. Davon konnten 61 potenzielle Probandinnen und Probanden die

Einschlusskriterien nicht erfüllen, beispielsweise aufgrund eines zu geringen Cobb-Winkels von unter  $10^\circ$  oder einer abweichenden Diagnose. 18 Personen lehnten die Teilnahme nach der Aufklärung ab. Grund hierfür waren in den meisten Fällen der Wunsch nach einer möglichst geringen Anzahl zusätzlicher Termine während des stationären Aufenthaltes. Weitere 32 Personen gaben trotz mündlichem Einverständnis die unterschriebene Einverständniserklärung nicht rechtzeitig ab. Dies lag häufig daran, dass einige Erziehungs- bzw. Sorgeberechtigte bereits frühzeitig nach den Aufnahmetermeninen abreisten und das Nachreichen der fehlenden Unterschriften im Anschluss an das Aufklärungsgespräch nicht innerhalb des vorgegebenen Zeitraumes erfolgte.

Daraufhin wurden insgesamt 87 Teilnehmende in die Studie eingeschlossen. Aus dieser angenommenen Grundgesamtheit erschienen alle Probandinnen und Probanden zum ersten Messtermin. Aus dem zweiten Messtermin resultierten 81 vollständige Datensätze. Die aus diesem Termin entstandene Messung erfolgte mit einem durchschnittlichen Abstand von 14 Tagen (Mittelwert  $M = 14,08$  Tage, Standardabweichung  $SD = 1,39$  Tage) zum ersten Messtermin. Die Variation des zeitlichen Messabstandes resultierte aus einem Feiertag während der Datenerfassungsperiode. Aufgrund dessen war die Benutzung des DIERS formetric III 4D am regelhaften Messtag (freitags) aus organisatorischen Gründen seitens der Klinik nicht möglich und wurde einmalig auf den darauffolgenden Montag verschoben. Durch eine technische Störung der Festplatte des angeschlossenen Computers kam es an einem Messtag zum Verlust von vier Datensätzen der untersuchten Personen. Darüber hinaus erschienen zwei Teilnehmende nicht zum zweiten Messtermin. Dies lässt sich, neben zusätzlichen Angaben zu Besonderheiten an den jeweiligen Messterminen, aus dem Flussdiagramm in Abb. 25 entnehmen. Die dort angeführten fehlerhaften Messungen konnten in der überwiegenden Zahl der Fälle mit Hilfe einer erneuten Analyse der rasterstereographischen Vermessung oder der Verwendung von Markern korrigiert werden.

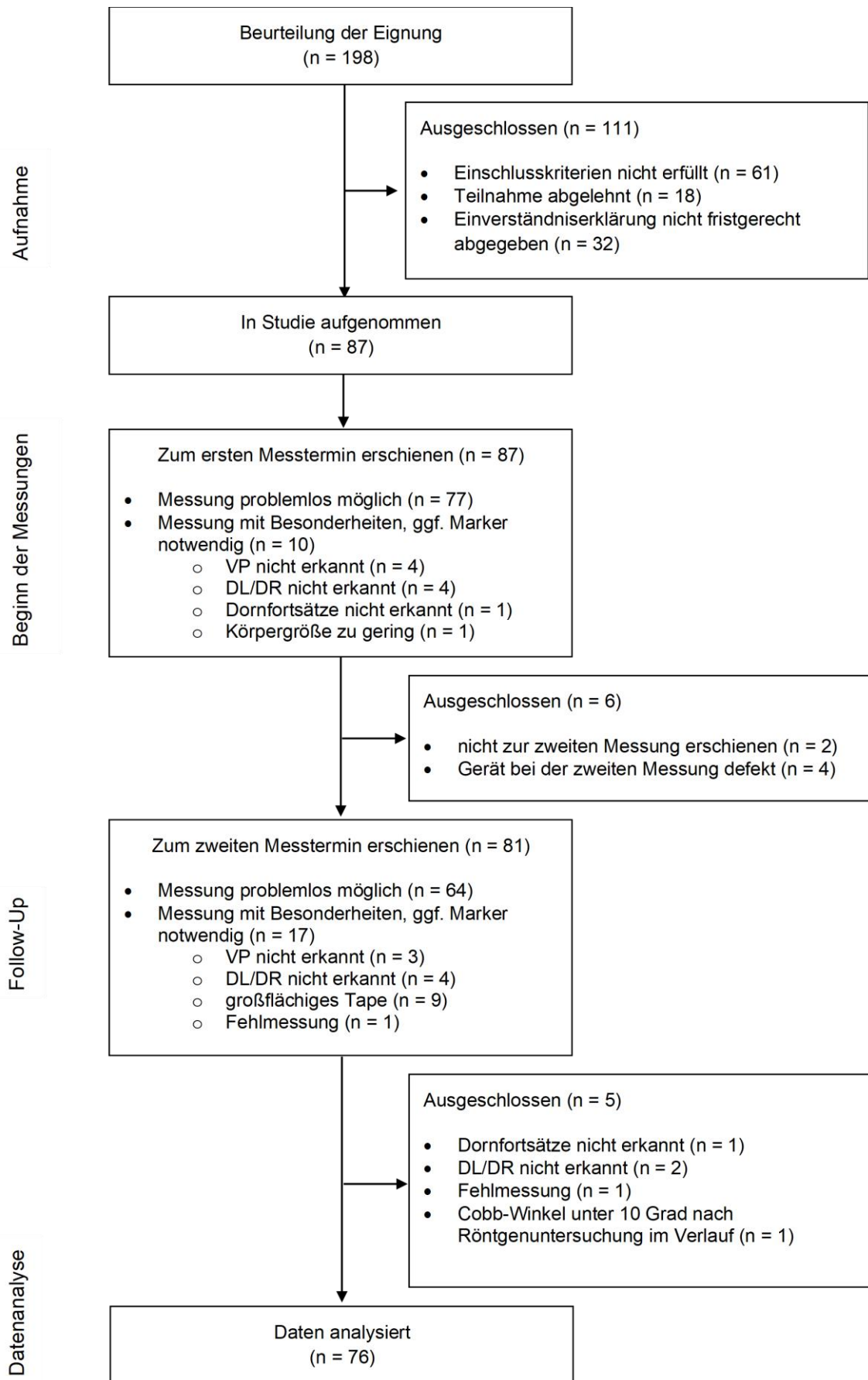


Abb. 25 Flussdiagramm der einarmigen prospektiven Längsschnittstudie mit Angabe der Drop-Outs

Eine häufige Ursache für die fehlerhafte Erkennung des Messpunktes Vertebra prominens (VP) waren großflächige Kinesiotapes im Bereich des Musculus trapezius sowie der paravertebralen Muskulatur der Halswirbelsäule, welche bei auftretenden Muskelverspannungen im Rahmen der Rehabilitationsbehandlung zur Anwendung kamen. Fehlerhafte Messungen der Fixpunkte DL und DR waren in der Regel anatomisch durch schwach ausgeprägte Lumbalgrübchen bedingt.

Vor der statistischen Auswertung der Daten erfolgte nochmals ein Ausschluss von fünf Datensätzen. Gründe hierfür waren beispielsweise eine auch durch die Verwendung von Markern nicht korrigierbare Fehlmessung der Dornfortsätze der Wirbelsäule oder der Fixpunkte DL und DR. Bei einem Probanden erfolgte erst nach dem ersten Messtermin eine Verlaufsrontgenuntersuchung der Wirbelsäule. Diese zeigte einen Cobb-Winkel unter 10 Grad, weshalb die Einschlusskriterien in diesem Fall nicht mehr gegeben waren. Nach Ausschluss der o. g. Fälle auf Grundlage des Per-Protocol-Prinzips, konnten abschließend 76 Datensätze im Rahmen der statistischen Auswertung analysiert werden.

### **4.2 Deskriptive Daten**

In diesem Teil der Ergebnisdarstellung erfolgt eine differenzierte quantitative Beschreibung der Grundgesamtheit. Dieser Schritt ist elementar für eine fundierte Interpretation der Ergebnisse in der später anschließenden Diskussion.

#### **4.2.1 Demographische Daten der Studienteilnehmenden**

Im Zeitraum zwischen April bis Juli 2021 wurden insgesamt 87 Patientinnen und Patienten mit der Diagnose „adoleszente idiopathische Skoliose“ im Verlauf ihres stationären Aufenthaltes in der AKSK Bad Sobernheim rasterstereographisch vermessen. Nach Ausschluss gemäß dem Per-Protocol-Prinzip erfolgte die Analyse von 76 Datensätzen mit jeweils vier Messungen. Die Geschlechterverteilung zeigte mit 65 (85,5 %) weiblichen und 11 (14,5 %) männlichen Teilnehmenden ein Verhältnis von 5,9 : 1. Das mittlere Alter des untersuchten Kollektivs zum Zeitpunkt der ersten Messung lag bei 14,29 Jahren mit einer Standardabweichung (standard deviation, SD) von 1,9 Jahren und umfasste eine Altersspanne von 10 bis 18 Jahren. Die Altersverteilung ist in Abb. 26 als Histogramm mit Normalverteilungskurve dargestellt und zeigt einen Altersmedian von 14 Jahren.

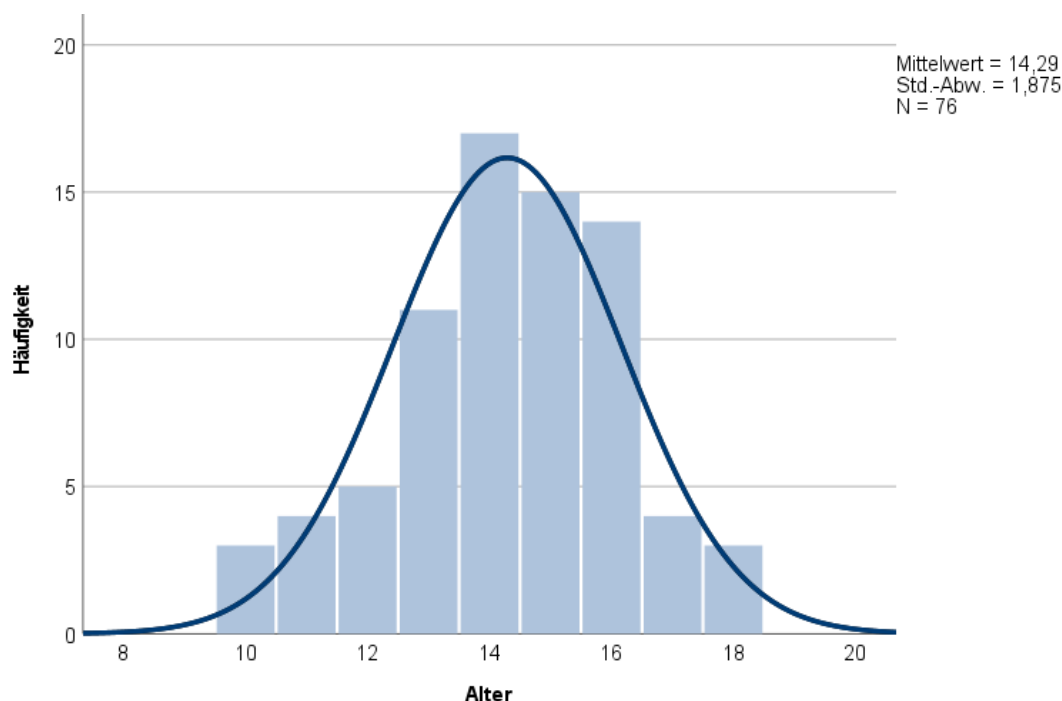


Abb. 26 Histogramm der Altersverteilung mit Normalverteilungskurve

Der durchschnittliche BMI der Teilnehmenden bei 19,39 kg/m<sup>2</sup>. Mit einer Spannweite von 14,84 bis 26,93 befanden sich die Teilnehmenden zum größten Teil im Bereich des Normal- (18 - 25 kg/m<sup>2</sup>) oder Untergewichtes (< 18 kg/m<sup>2</sup>). Weiterführende Daten zu Körpergröße und Gewicht sind in Tab. 2 ersichtlich.

Tab. 2 Deskriptive Daten zu Körpergröße, Gewicht und BMI

	Körpergröße	Gewicht	BMI
<b>N</b>	76	76	76
<b>Mittelwert</b>	166,17	53,81	19,39
<b>Median</b>	166,00	54,60	19,38
<b>Standardabweichung</b>	8,564	8,69	2,75
<b>Minimum</b>	145	32,70	14,84
<b>Maximum</b>	183	76,00	26,93

Annähernd die Hälfte der analysierten Grundgesamtheit (39 von 76 Teilnehmenden) erhielten im Untersuchungszeitraum zusätzlich zur stationären Rehabilitationsmaßnahme eine Korsett-Therapie, welche ab einem Cobb-Winkel von 20° empfohlen wird. Patientinnen und Patienten nach operativer Korrekturspondylodese wurden aufgrund des eingeschränkten Bewegungsumfangs der Wirbelsäule nicht in die Studie miteingeschlossen.

#### 4.2.2 Schweregrad der Hauptkrümmung

Die Einteilung der quantitativen Hauptkrümmung erfolgte in drei Kategorien und orientierte sich an den Indikationsbereichen der jeweiligen Therapiestufen aus Kapitel 2.3. Zusammengefasst liegt bei einem Cobb-Winkel von unter 20° der Fokus auf der konservativen Physiotherapie nach Katharina Schroth, hier als Schweregrad „leicht“ bezeichnet. Von einer mittelschweren Skoliose wird im Bereich von 20° bis 50° gesprochen. Bei dieser Ausprägung steht die Korsett-Therapie im Vordergrund. Ab Gradzahlen über 50° wird in der Regel eine operative Therapie angestrebt, weshalb die AIS-Betroffenen dieser Gruppe der Kategorie „schwer“ zugeteilt werden. Die Verteilung der untersuchten Grundgesamtheit ist in Abb. 27 gezeigt.

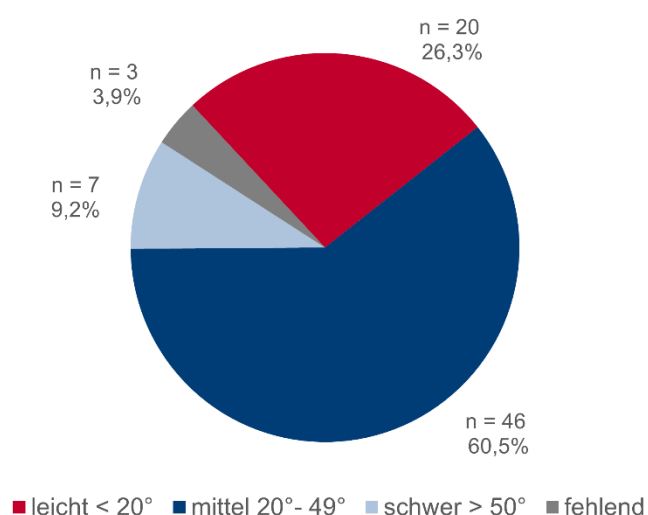


Abb. 27 Kreisdiagramm zur Verteilung der Schweregrade

Die als „fehlend“ markierten Werte (3,9 %) kommen durch die Teilnehmenden zustande, deren aktuelles Röntgenbild bis zum Ende der Studie noch nicht vorlag. Die Diagnose der adoleszenten idiopathischen Skoliose konnte in diesen Fällen jedoch durch ältere Befunde bestätigt werden, sodass die Einschlusskriterien gegeben waren. Die größte Gruppe der Probandinnen und Probanden (60,5 %) zeigten Cobb-Winkel zwischen 20° und 49°. Die zweitgrößte Gruppe bildeten mit 26,3 % die leichten Skoliosen. Schwere Skoliosen mit über 50° nach Cobb kamen mit 9,2 % am seltensten vor. Die Spannweite der Cobb-Winkel in den einzelnen Wirbelsäulenbereichen wird gemeinsam mit den Durchschnittswerten in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3 Ausmaß der Cobb-Winkel nach Lokalisation im Verlauf der Wirbelsäule

	Häufigkeit	Minimum	Maximum	Mittelwert
<b>Cobb-Winkel thorakal 1</b>	59	5°	85°	27,81°
<b>Cobb-Winkel thorakal 2</b>	16	10°	66°	34,00°
<b>Cobb-Winkel thorakolumbal</b>	35	10°	56°	26,97°
<b>Cobb-Winkel lumbal</b>	34	8°	60°	25,59°

#### 4.2.3 Anzahl der Klinikaufenthalte

Im Rahmen einer Skoliose-Intensivrehabilitation kommen Patientinnen und Patienten bis zu ihrem 18. Lebensjahr jährlich für einen Zeitraum von drei bis sechs Wochen stationär in die AKSK Bad Sobernheim. Wie in Abb. 28 erkennbar, nutzte mit 64,5 % der überwiegende Teil der Studienteilnehmenden diese Behandlungsform zum ersten Mal. Der Mittelwert liegt bei 1,55 Klinikaufhalten (Median: ein Aufenthalt) mit einer Spannweite von einem bis fünf begonnenen Aufenthalten zum Zeitpunkt der Studie.

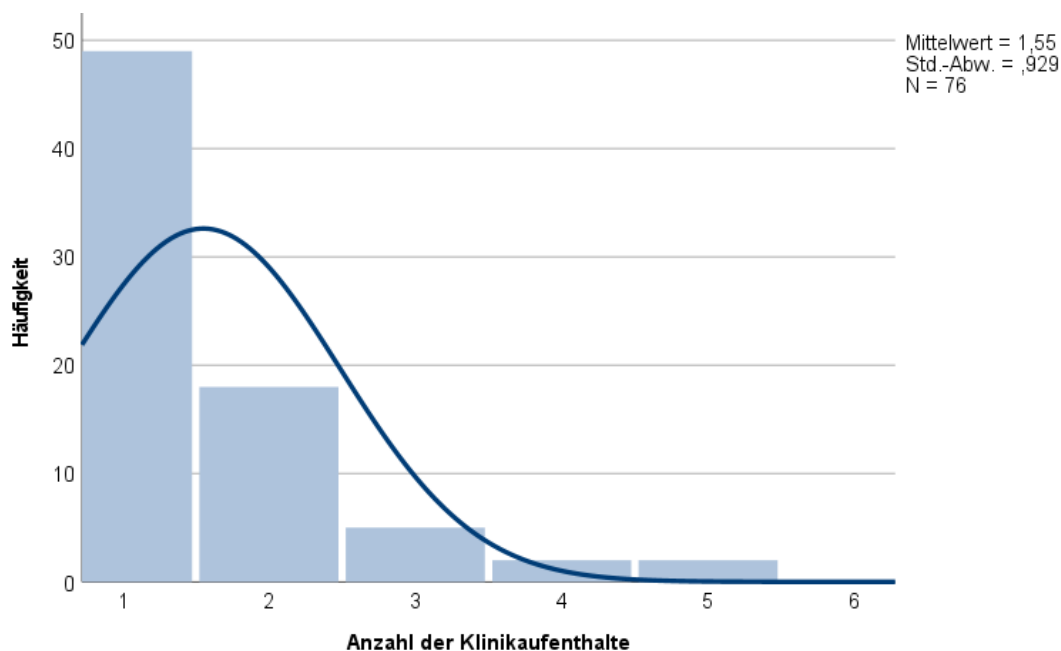


Abb. 28 Histogramm zur Anzahl der Klinikaufenthalte

#### 4.2.4 Einteilung der Skoliose nach Lokalisation der Hauptkrümmung

Die bereits in Kapitel 2.3.1 vorgestellte Einteilung der Teilnehmenden nach ihrem Skoliosemuster findet auch in der hier vorliegenden deskriptiven Statistik Anwendung. Zu diesem Zweck wurden die unterschiedlichen Ausprägungen der Muster entsprechend ihrer

klinischen Lage der Hauptkrümmung in drei große Gruppen eingeteilt, welche im folgenden Kreisdiagramm (Abb. 29) dargestellt sind.

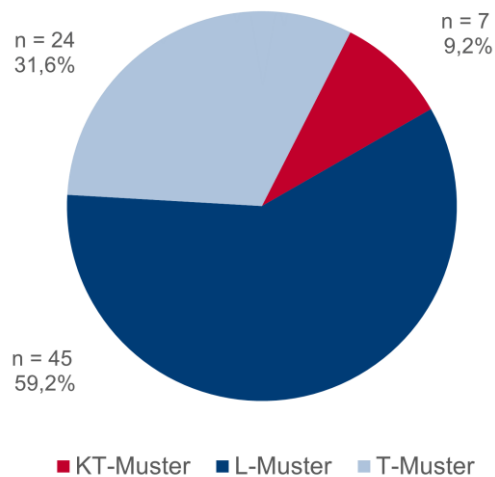


Abb. 29 Kreisdiagramm zur Verteilung der Skoliosemuster

Die Bezeichnungen L- und T-Muster repräsentieren die Position der Hauptkrümmung im lumbalen oder thorakalen Bereich der Wirbelsäule. Bei einer Zuteilung in die Gruppe KT-Muster (Kyphose thorakal) steht die Problematik einer ausgeprägten Kyphose trotz diagnostizierter AIS im Vordergrund. Dies trifft im Rahmen der vorliegenden Studie ausschließlich auf Teilnehmende mit einem Cobb-Winkel von unter 25° zu. Mit einem Anteil von 59,2 % ist die Skoliose vom lumbalen Typ am häufigsten vertreten. Der thorakale Typ folgt mit 31,6 %. Der geringste Teil von 9,2 % ist der Gruppe mit thorakaler Kyphose vom klinischen Erscheinungsbild zuzuordnen.

### 4.3 Statistische Auswertung

Im Folgenden werden die Mittelwerte der bereits vorgestellten Parameter für die analysierten Haltungen mit Hilfe eines t-Tests auf signifikante Unterschiede geprüft. Die zugrundeliegenden gerichteten Hypothesen sind in Kapitel 3.3 aufgeführt. Neben der Gesamtbetrachtung der Studienpopulation werden im Anschluss auch Analysen für einzelne Untergruppen durchgeführt und erläutert. Signifikante p-Werte sind nachfolgend in den Abbildungen fettgedruckt dargestellt und im Text mit einem „\*“ versehen. Die Verbindungslinien zwischen den jeweiligen Werten der unterschiedlichen Messungen dienen der besseren Visualisierung der möglicherweise auftretenden Veränderungen und stellen keine Zwischenwerte dar. Eine Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie ist bei Reduktion der Parameterwerte anzunehmen.

#### 4.3.1 Vergleich der Seitabweichung VP-DM (RMS) zwischen habitueller Haltung und standardisierter Korrekturhaltung

In der nachfolgenden Abb. 30 sind die Unterschiede zwischen habitueller Haltung ( $H_1$  am ersten Messtermin,  $H_2$  in der Regel nach 14 Tagen ( $M = 14,08$  Tage,  $SD = 1,39$  Tage)) und standardisierter Korrekturhaltung ( $SK_1$  am ersten Messtermin,  $SK_2$  in der Regel nach 14 Tagen ( $M = 14,08$  Tage,  $SD = 1,39$  Tage)) in einem Liniendiagramm dargestellt. Wichtig für die Testung der Alternativhypothese mittels einseitigem t-Test ist jeweils die Signifikanz der Differenzen zwischen den Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  sowie den Haltungen  $H_2$  und  $SK_2$ . An der Y-Achse sind die Mittelwerte und Konfidenzintervalle des Parameters Seitabweichung VP-DM (RMS) in der Einheit Millimeter für alle Stichproben aufgetragen. Die X-Achse zeigt die einzelnen Haltungen in chronologischer Reihenfolge.

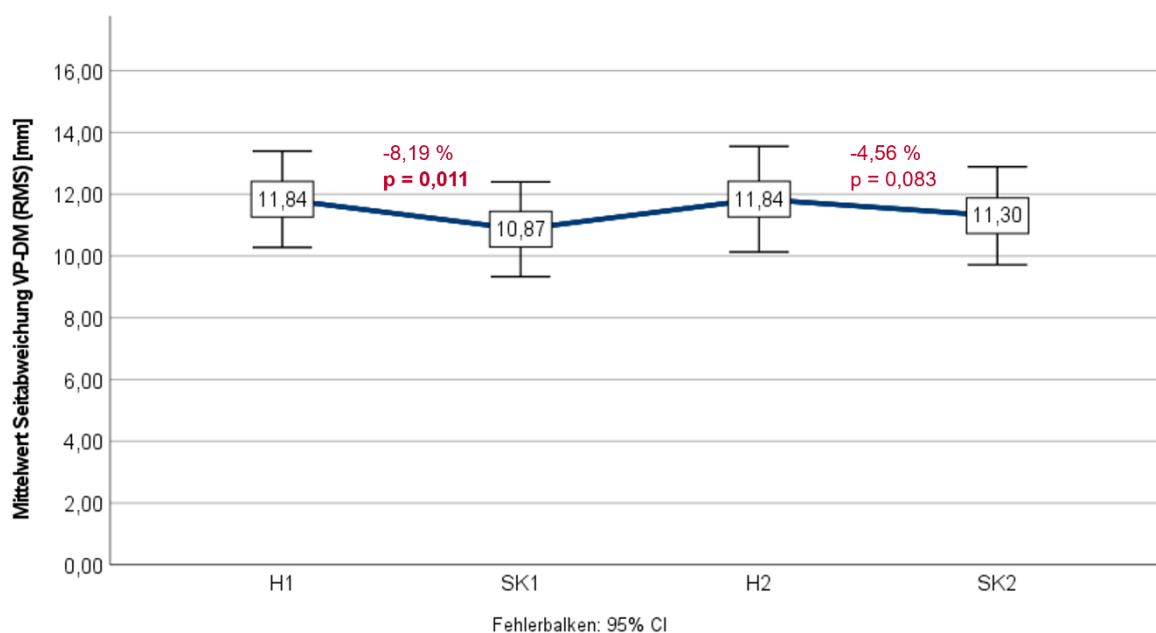


Abb. 30 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimetern

Bei Betrachtung der Seitabweichung VP-DM (RMS) als Standardparameter in videorasterstereographischen Messungen zeigt sich eine signifikante Reduktion der Seitabweichung um 8,19 % ( $p = 0,011^*$ ) bzw. 0,97 mm ( $SD = 3,63$  mm) zwischen der habituelleren Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung am ersten Messtermin. Die Haltungen  $H_2$  zu  $SK_2$  am zweiten Messtermin weisen eine prozentuale Verbesserung im Sinne der Symmetrie von 4,56 % bzw. 0,54 mm auf ( $SD = 3,78$  mm). Dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant ( $p = 0,110$ ). Beim Vergleich der beiden habituelleren Haltungen  $H_1$  und  $H_2$  ( $p = 0,498$ ) und der standardisierten Haltungen  $SK_1$  und  $SK_2$  ( $p = 0,083$ ) konnte ebenfalls keine signifikante Veränderung der Haltung nachgewiesen werden. Die Verbindung zwischen den Messungen  $SK_1$  und  $H_2$  in Abb. 30 und den Abbildungen in nachfolgenden

Kapiteln hat keinen statistischen Hintergrund. Diese dient lediglich der besseren Darstellbarkeit der Haltungsunterschiede.

#### 4.3.2 Vergleich der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zwischen habitueller Haltung und standardisierter Korrekturhaltung

Der Vergleich des Parameters Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zwischen den einzelnen Haltungen zeigt in der Abb. 31 einen ähnlichen Trend, wie bereits im vorherigen Abschnitt zur Seitabweichung VP-DM (RMS). Auch hier wurden die Unterschiede zwischen habitueller Haltung ( $H_1$  am ersten Messtermin,  $H_2$  in der Regel nach 14 Tagen ( $M = 14,08$  Tage,  $SD = 1,39$  Tage)) und standardisierter Korrekturhaltung ( $SK_1$  am ersten Messtermin,  $SK_2$  in der Regel nach 14 Tagen ( $M = 14,08$  Tage,  $SD = 1,39$  Tage)) in einem Liniendiagramm visualisiert. An der Y-Achse sind die Mittelwerte des Parameters Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) für alle Teilnehmenden in Millimetern dargestellt. Die X-Achse zeigt entsprechend der vorherigen Abbildung die einzelnen Haltungen in chronologischer Reihenfolge.

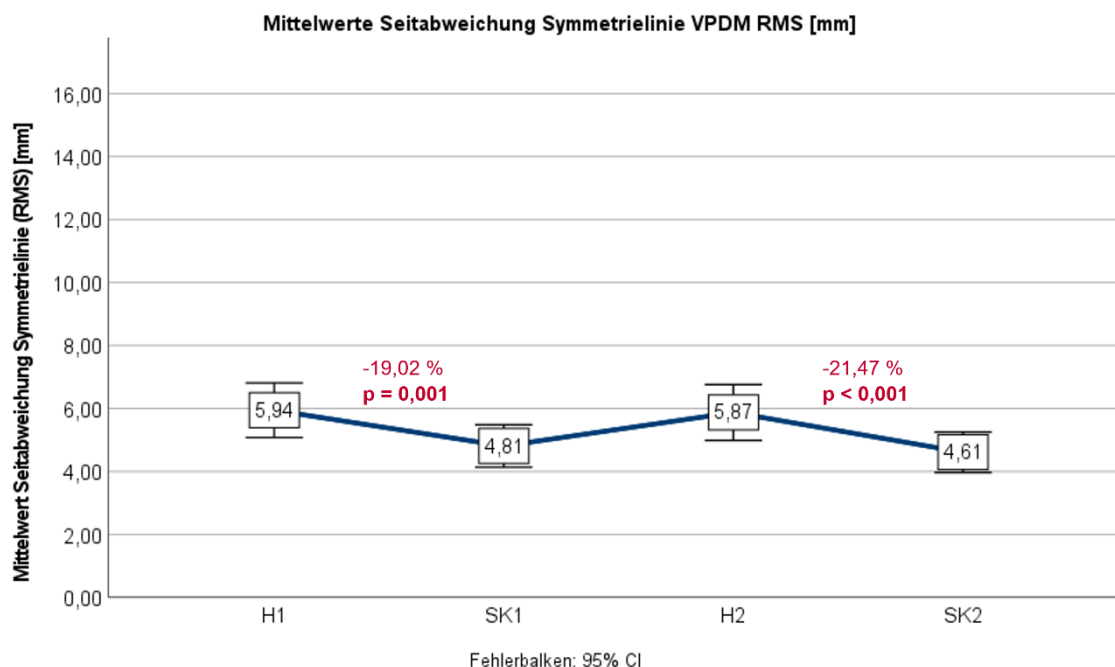


Abb. 31 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Millimetern

Auch bei diesem Parameter liegt eine signifikante Verbesserung der Symmetrie um -19,02 % (-1,13 mm,  $SD = 3,10$  mm,  $p = 0,001^*$ ) zwischen der habitueller Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung am ersten Messtermin vor. Die Haltungen  $H_2$  zu  $SK_2$  am zweiten Messtermin weisen eine prozentuale Verbesserung von -21,47 % (-1,26 mm,  $SD = 2,60$  mm) auf, dieser Unterschied ist mit einem p-Wert von  $< 0,001^*$  ebenfalls signifikant. Beim Vergleich der beiden habitueller Haltungen  $H_1$  und  $H_2$  ( $p = 0,4265$ ) und der

standardisierten Haltungen  $SK_1$  und  $SK_2$  ( $p = 0,214$ ) konnte keine signifikante Veränderung der Haltung nachgewiesen werden.

Nach Betrachtung der Variablen Seitabweichung VP-DM (RMS) und Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) im direkten Vergleich (Abb. 32) zeigt sich ein parameterspezifischer Wertebereich mit unterschiedlich starker Streuung. Von links nach rechts aus gesehen repräsentieren immer zwei nebeneinanderliegende Boxplots die gleiche Haltung. Kleine Kreise außerhalb der Whisker (größte Beobachtung ohne Ausreißer) kennzeichnen milde Ausreißer, Sternchen stehen in diesem Fall für extreme Ausreißer. Die blau gefärbte Box der einzelnen Boxplots umfassen die mittleren 50 % der Werte.

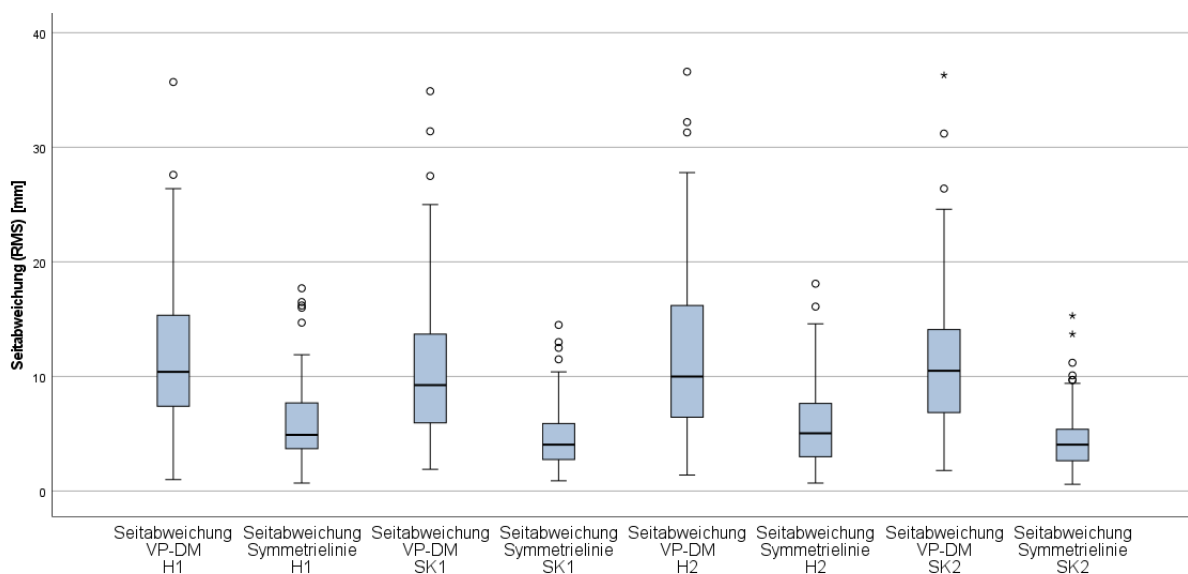


Abb. 32 Vergleich der Parameter "Seitabweichung VP-DM (RMS)" und "Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)"

Die absoluten Werte der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) bewegen sich in einer maximalen Spannweite von 17,5 mm (0,6 mm bis 18,1 mm) Die maximale Spannweite der Seitabweichung VP-DM (RMS) liegt bei 35,6 mm (1,0 mm bis 36,6 mm) und deckt ungefähr einen doppelt so großen Wertebereich ab. Im Vergleich der Mittelwerte beider Parameter einer gemeinsam analysierten Haltung unter Verwendung eines zweiseitigen t-Tests ergaben sich für alle Messungen ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $SK_1$  und  $SK_2$ ) durchweg signifikante Unterschiede mit einem p-Wert kleiner als  $0,001^*$ . Des Weiteren zeigen die Boxplots der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) bei den standardisierten Korrekturhaltungen eine geringere Breite zwischen oberem (75 %) und unterem (25 %) Quartil als bei Betrachtung der habituellen Haltungen.

### 4.3.3 Vergleich der Oberflächenrotation (RMS) zwischen habitueller Haltung und standardisierter Korrekturhaltung

Die Betrachtung der Unterschiede zwischen habitueller Haltung und standardisierter Korrekturhaltung der Variable „Oberflächenrotation (RMS)“ im Liniendiagramm aus Abb. 33 zeigt gänzlich andere Ergebnisse im Vergleich zu den beiden vorherigen Parametern. An der Y-Achse sind die Mittelwerte der „Oberflächenrotation (RMS)“ in der Einheit Grad für alle Stichproben aufgetragen. Die X-Achse bildet auch in dieser Abbildung die einzelnen Haltungen in chronologischer Reihenfolge ab.

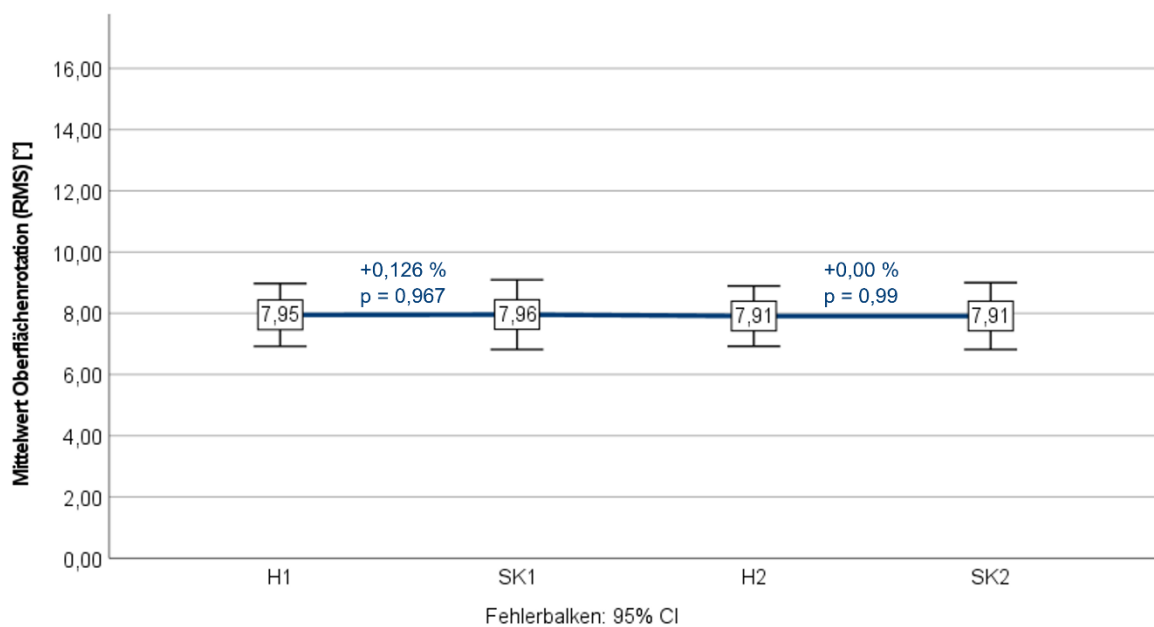


Abb. 33 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Millimetern

Wie bereits an der geraden Linienführung erkennbar, gibt es hier keine signifikanten Differenzen der Mittelwerte. Zwischen der habitueller Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung am ersten Messtermin zeigt sich eine dezente Verschlechterung der Symmetrie um +0,126 % (+0,01°, SD = 2,21°), jedoch ist diese Differenz bei einem p-Wertes von 0,967 als nicht-signifikant zu bewerten. Die Mittelwerte der „Oberflächenrotation (RMS)“ weisen bei den Haltungen H<sub>2</sub> und SK<sub>2</sub> am zweiten Messtermin keine Unterschiede auf, was durch eine nicht vorhandene Signifikanz (0,999) zusätzlich untermauert wird. Beim Vergleich der beiden habitueller Haltungen H<sub>1</sub> und H<sub>2</sub> (p = 0,889) und der standardisierten Haltungen SK<sub>1</sub> und SK<sub>2</sub> (p = 0,851) konnte ebenfalls keine signifikante Verbesserung der Haltung nachgewiesen werden.

#### 4.3.4 Veränderungen zwischen habitueller Haltung und standardisierter Haltung nach Schweregrad der Skoliose

Zur genaueren Untersuchung der Haltungsveränderungen aus den vorherigen Kapiteln erfolgt nun eine Subgruppenanalyse der einzelnen Skoliose-Schweregrade des Studienkollektivs. In der folgenden Abb. 34 sind zunächst analog zur Abb. 30 die jeweiligen Mittelwerte der Haltungen  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $SK_1$  und  $SK_2$  des Parameters Seitabweichung VP-DM (RMS) dargestellt. Dabei sind die einzelnen Schweregrade mit unterschiedlich gefärbten Linien gekennzeichnet.

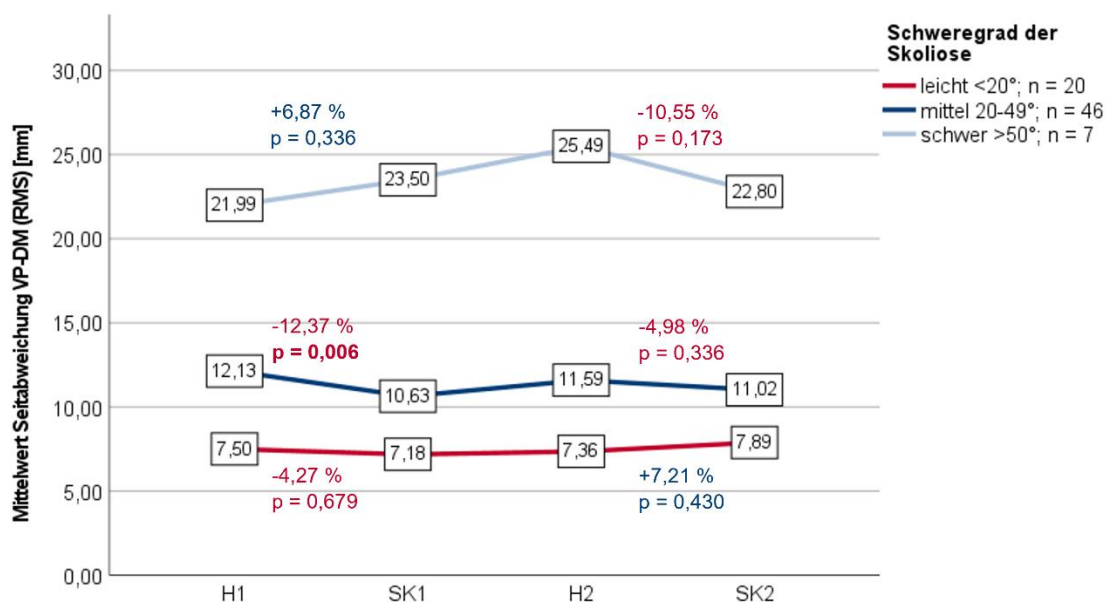


Abb. 34 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimetern unterteilt nach Schweregraden

Auch hier dienen negative prozentuale Veränderungen (rot) als Indikator für eine Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie. Prozentuale Veränderungen mit positivem Vorzeichen (blau) deuten auf eine Verschlechterung der Haltung hin. Der einzige signifikante Unterschied der Mittelwerte liegt in der größten Subgruppe der mittelschweren Skoliosen zwischen den Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  am ersten Messtermin. Diese Gruppe weist allerdings tendenziell eine Verbesserung der Haltung an beiden Messterminen auf. Die Stichproben aus der Untergruppe der leichten Skoliosen schwanken im Vergleich der unterschiedlichen Haltungen leicht, jedoch gab es hier keine signifikanten Unterschiede in der Betrachtung der Mittelwerte. Bei den schweren Skoliosen ergeben sich zwar größere Differenzen in der Betrachtung der absoluten Werte (+1,15 mm am ersten Messtermin, -2,69 mm am zweiten Messtermin), jedoch liegt auch hier keine statistische Signifikanz vor.

Anders verhält es sich bei der Betrachtung des Parameters Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) in der Abb. 35. Auch in diesem Diagramm erfolgte eine Unterteilung in die

Subgruppen der Schweregrade. Die mittelschweren Skoliosen zeigen zu beiden Messterminen eine signifikante Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie mit einer prozentualen Reduktion von -25,88 % (-1,61 mm, SD = 2,95 mm,  $p < 0,001^*$ ) zwischen den Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  sowie von -30,10 % (-1,86 mm, SD = 2,63 mm,  $p < 0,001^*$ ) im Vergleich von  $H_2$  und  $SK_2$ . Bei der Gruppe der leichten Skoliose liegen keine signifikanten Unterschiede vor, die Tendenzen orientieren sich hierbei an den Werten der Seitabweichung VP-DM (RMS) aus der vorherigen Abbildung.

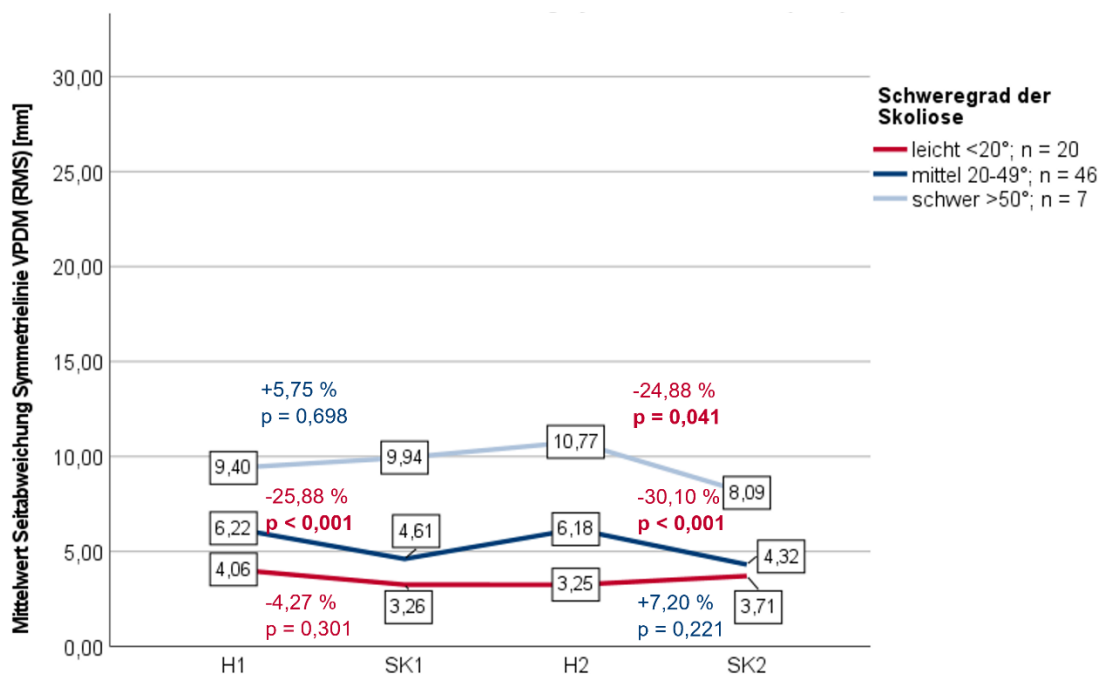


Abb. 35 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Millimetern unterteilt nach Schweregraden

Die Subgruppe der schweren Skoliosen zeigt ähnlich zur Seitabweichung VP-DM (RMS) zunächst eine leichte Verschlechterung der Haltung um +5,75 % (+0,54 mm, SD = 3,52 mm,  $p = 0,698$ ), welche jedoch nicht als signifikant zu bewerten ist. Am zweiten Messtermin zeigt sich jedoch ein deutlicher Unterschied der Mittelwerte zwischen  $H_2$  und  $SK_2$  in Form einer signifikanten Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie von -24,88 % (-2,68 mm, SD = 2,73 mm) bei einem p-Wert von 0,041\*.

Die „Oberflächenrotation (RMS)“ bietet auch bei der Aufschlüsselung der Subgruppen in Abb. 36 ein anderes Bild. Während die Rotation der leichten und mittelschweren Skoliosen nur leicht zwischen den verschiedenen Haltungen differiert, ist bei den schweren Skoliosen eine Tendenz zur Verschlechterung der Rotation bei Einnahme der standardisierten Korrekturhaltungen  $SK_1$  und  $SK_2$  zu beiden Messterminen ersichtlich. Trotz der höheren prozentualen Veränderungen in der Subgruppe der schweren Skoliosen liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Haltungen vor.

Bei der „Oberflächenrotation (RMS)“ darf kein einseitiger t-Test zum Einsatz kommen, da hier die gerichtete Hypothese einer Verbesserung der Rotationswerte nichtzutreffend ist. Somit ist es nicht erlaubt, den p-Wert im Anschluss an die Berechnungen mit SPSS zu halbieren. Außerdem ist zu beachten, dass es durch multiples Testen innerhalb einer Stichprobe zur sogenannten Alpha-Fehler-Kumulierung kommen kann (165). Auf eine entsprechende Korrektur wurde im Rahmen dieser Studie verzichtet.

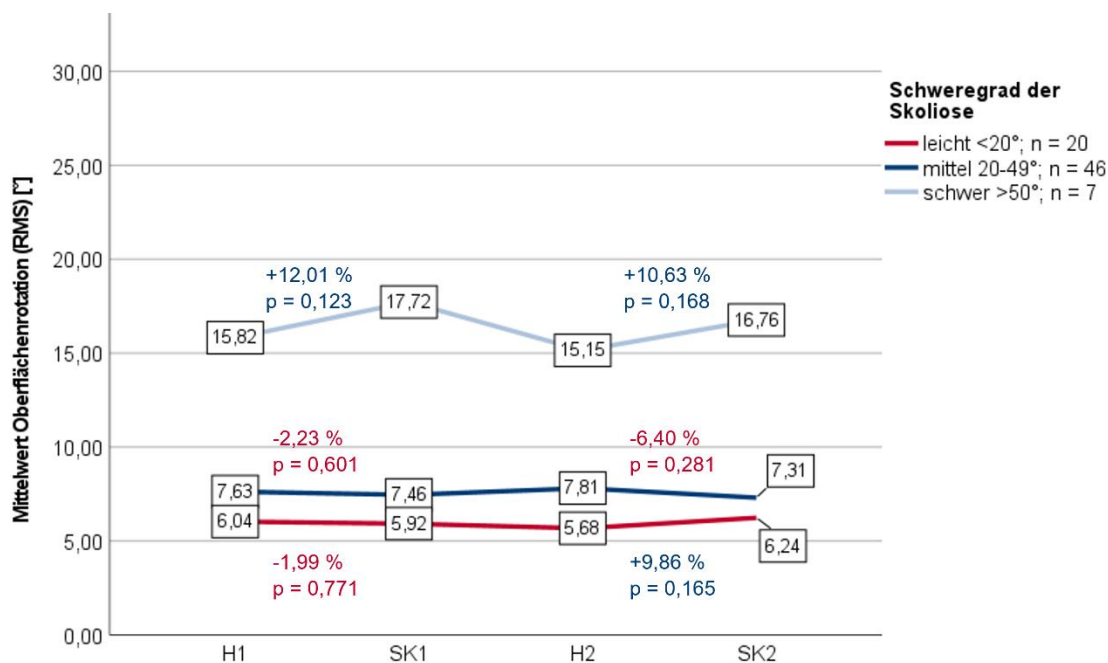


Abb. 36 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Grad unterteilt nach Schweregraden

#### 4.3.5 Veränderungen zwischen habitueller Haltung und standardisierter Haltung nach Anzahl der Klinikaufenthalte

Die Subgruppenanalyse nach Kategorisierung der Anzahl der Klinikaufenthalte in „Erstaufenthalt“ (rote Linie) und „mehrere Aufenthalte“ (Teilnehmende beginnen die zweite, dritte, vierte oder fünfte stationäre Behandlung während der Studie, blaue Linie) erfolgt ebenfalls anhand der drei zuvor vorgestellten Parameter.

Die Seitabweichung VP-DM (RMS) ist bei beiden Untergruppen am ersten Messtermin in der habituelleren Haltung identisch (siehe Abb. 37). Eine signifikante Verbesserung der Haltung zwischen H<sub>1</sub> und SK<sub>1</sub> um -9,54 % (-1,12 mm, SD = 3,31 mm, p = 0,045\*) zeigt sich jedoch nur bei den Teilnehmenden mit mehrfachen stationären Aufenthalten in der AKSK Bad Sobernheim. Bei Vergleich von H<sub>2</sub> und SK<sub>2</sub> zeigen beide Gruppen keinen signifikanten Unterschied, tendenziell ist der absolute Mittelwert der Seitabweichung VP-DM (RMS) bei Patientinnen und Patienten mit mehreren Aufenthalten um ca. 10 % in H<sub>2</sub> bzw. 12 % in SK<sub>2</sub>

geringer als bei Teilnehmenden mit stationärem Erstaufenthalt. Die Spannweite der Mittelwerte reicht von 10,37 mm bis 12,31 mm.

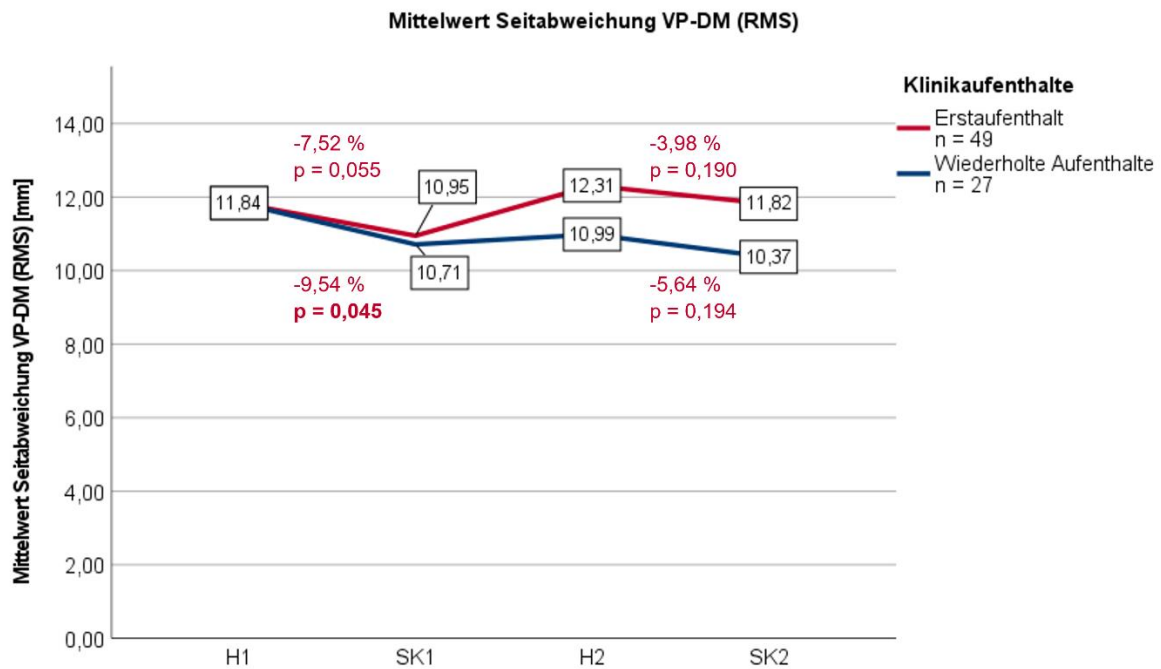


Abb. 37 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimeter unterteilt nach Anzahl der Klinikaufenthalte

Dies stellt sich in der folgenden Abb. 38 bei Betrachtung der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) anders dar.

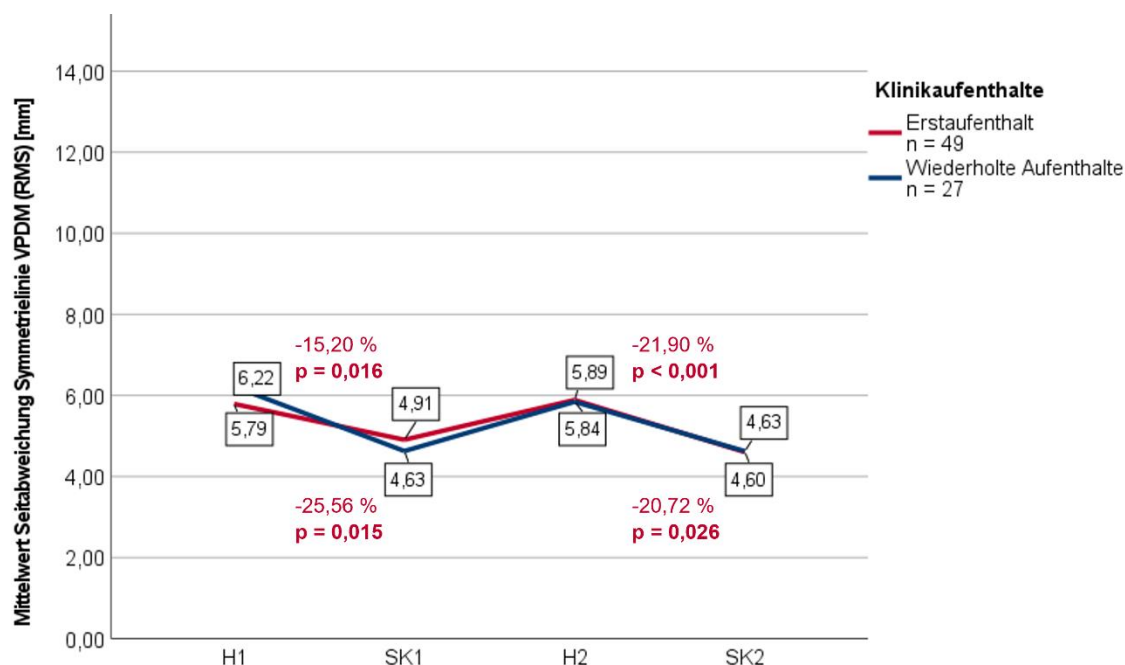


Abb. 38 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Millimeter unterteilt nach Anzahl der Klinikaufenthalte

In diesem Fall zeigen sich sowohl für Probandinnen und Probanden mit Erstaufenthalt als auch bei mehreren Aufenthalten signifikante Verbesserungen der Haltung zum ersten und zweiten Messtermin. Die Spannweite der Mittelwerte beträgt 4,60 mm bis 6,22 mm und ist damit nur geringfügig kleiner als der zuvor betrachtete Wertebereich der Seitabweichung VPDM (RMS). Die prozentual größte Veränderung wird durch die Gruppe „mehrere Aufenthalte“ zwischen H<sub>1</sub> und SK<sub>1</sub> mit -25,56 % (-1,59 mm, SD = 3,60 mm, p = 0,015\*) erreicht. Dabei ist in der Gruppe der Mehrfachaufenthalte ein um ca. 7 % höherer Ausgangswert in der Haltung H<sub>1</sub> im Vergleich zu den Teilnehmenden mit Erstaufenthalt in der AKSK Bad Sobernheim erkennbar. Zum zweiten Messtermin zeigen beide Subgruppen jedoch nahezu identische Mittelwerte bei ähnlich ausgeprägter signifikanter Verbesserung der Haltung um -21,90 % (-1,60 mm, SD = 3,60 mm, p < 0,001\*; Erstaufenthalt) und -20,72 % (-1,22 mm, SD = 3,10 mm, p = 0,026\*; mehrfache Aufenthalte). Auch in diesem Diagramm war kein signifikanter Unterschied zwischen den vorliegenden Subgruppen vorhanden.

In der folgenden Abb. 39 ist die „Oberflächenrotation (RMS)“ in der Einheit „Grad“ mit den Subgruppen „Erstaufenthalt“ und „mehrere Aufenthalte“ dargestellt.

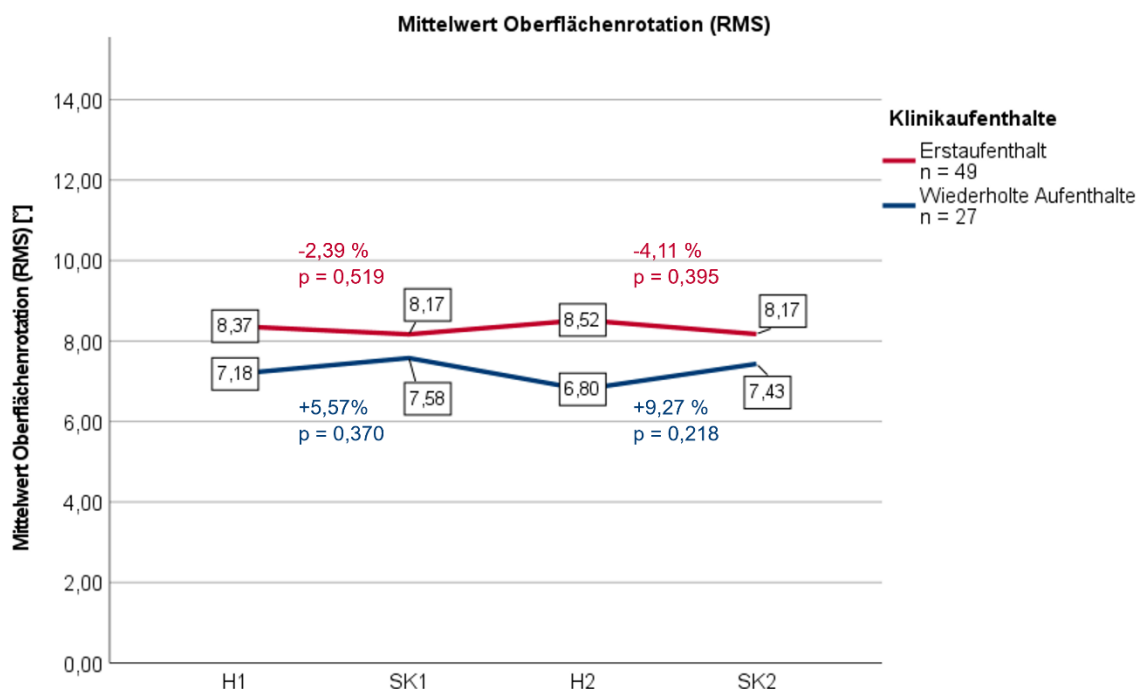


Abb. 39 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Grad unterteilt nach Anzahl der Klinikaufenthalte

Da auch in dieser Auswertung der Ergebnisse kein einseitiger t-Test verwendet werden darf, ist es nicht notwendig, den p-Wert im Nachgang zu halbieren. Es wird an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen, dass eine Alphafehler-Kumulierung durch multiples Testen innerhalb einer Stichprobe möglich ist (165), eine diesbezügliche Korrektur jedoch nicht erfolgte. Bei der Betrachtung der p-Werte innerhalb der einzelnen Subgruppen gibt es keine Hinweise auf signifikante Unterschiede zwischen den Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  sowie  $H_2$  und  $SK_2$ . In der Gruppe „Erstaufenthalte“ ist ein Trend zur leichten Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie ersichtlich, für die Teilnehmenden mit mehreren Aufenthalten liegt jedoch eine gegenläufige Tendenz vor.

#### 4.3.6 Veränderungen zwischen habitueller Haltung und standardisierter Haltung nach Lokalisation der Hauptkrümmung

Für eine detailliertere Analyse der Haltungsveränderungen aus den vorangegangenen Kapiteln wird zuletzt noch eine Subgruppenanalyse basierend auf der Lokalisation der Hauptkrümmung und der daraus folgenden klinischen Einteilung nach Skoliosemuster durchgeführt. In Abb. 40 sind die Mittelwerte der Haltungen  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $SK_1$  und  $SK_2$  des Parameters Seitabweichung VP-DM (RMS) dargestellt. Die Linien sind dabei entsprechend dem jeweils vorliegenden Skoliosemuster unterschiedlich gefärbt.

Der einzige signifikante Unterschied der Mittelwerte zeigt sich in der größten Subgruppe mit  $n = 45$  der Skoliosen mit ihrer klinisch stärksten Ausprägung im lumbalen Abschnitt zwischen

den Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  am ersten Messtag. Hier kam es zu einer Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) um -10,48 % (-1,14 mm, SD = 2,94 mm,  $p = 0,007^*$ ). Diese Gruppe zeigt auch tendenziell eine Verbesserung der Haltung zwischen  $H_2$  und  $SK_2$ , jedoch ist hier der Unterschied nicht signifikant. Ein ähnlicher Verlauf, jedoch mit höheren Ausgangswerten von 16,15 mm im Mittel bei  $H_1$  im Gegensatz zu 10,8 mm bei den lumbalen Skoliosen, kann auch in der Gruppe der thorakalen Skoliosen festgestellt werden. Es besteht allerdings keine statistische Signifikanz zwischen  $H_1$  und  $SK_1$  (-1,34 mm, SD = 4,79 mm,  $p = 0,087$ ) und  $H_2$  und  $SK_2$  (-0,80 mm, SD = 4,23 mm,  $p = 0,176$ ). Die Stichproben aus der Untergruppe der Skoliosen, bei denen eine Kyphose klinisch führend ist, zeigt eine gegenläufige Tendenz der Werte ohne statistische Signifikanz. Es kommt zu hohen prozentualen Veränderungen nach Einnahme der  $SK_1$  von +36,76 %, d.h. tendenziell erhöht sich im Zuge dessen die Seitabweichung VP-DM (RMS) und es kommt zur Verschlechterung der Wirbelsäulensymmetrie bei Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung. Hierbei ist allerdings die geringe Stichprobengröße von  $n = 7$  sowie die verhältnismäßig hohe Standardabweichung (SD = 2,54 mm bei  $H_1$  und  $SK_1$ ) bei niedrigen mittleren Absolutwerten zu beachten.

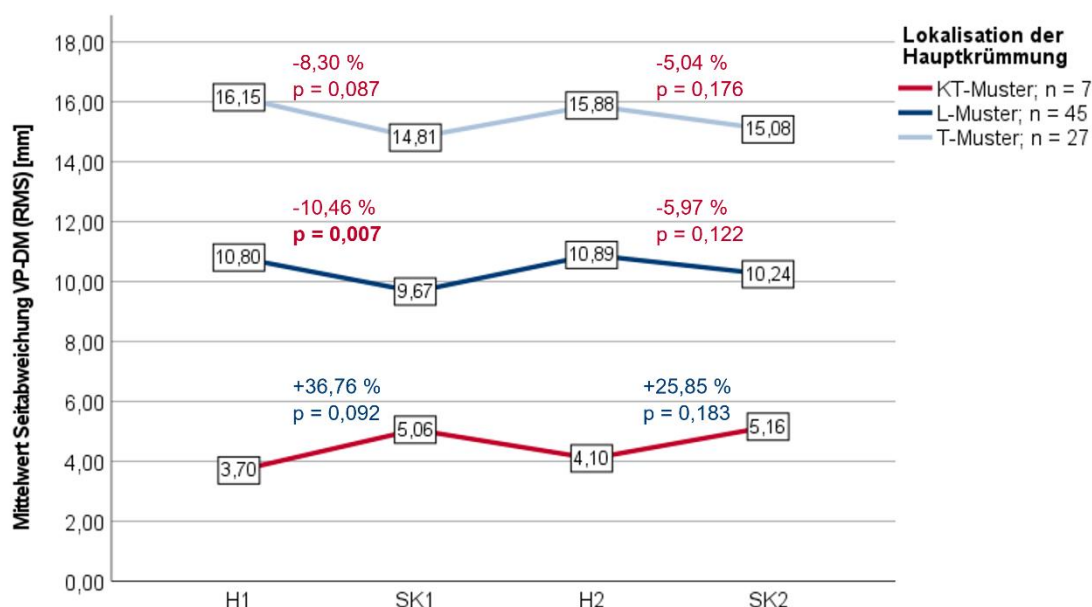


Abb. 40 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ in Millimetern unterteilt nach Lokalisation der Hauptkrümmung

Die Analyse des Parameters Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) in Abb. 41 zeigt eine ähnliche Tendenz, jedoch verfügt der Kurvenverlauf bei diesem Messwert in zwei von drei Gruppen über statistisch signifikante Veränderungen an beiden Messterminen. Die L-Muster-Skoliosen zeigen eine signifikante Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie zu beiden Messzeitpunkten, mit einer prozentualen Reduktion von -17,63 % (-0,94 mm,

SD = 1,92 mm,  $p = 0,015^*$ ) zwischen den Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  sowie von -23,56 % (-1,27 mm, SD = 2,37 mm,  $p < 0,001^*$ ) zwischen  $H_2$  und  $SK_2$ . Bei thorakalen Skoliosen kommt es zu ähnlich ausgeprägter Reduktion der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) mit -25,85 % (-1,85 mm, SD = 3,79 mm,  $p = 0,013^*$ ) bei  $H_1$  und  $SK_1$  sowie von -23,55 % (-1,74 mm, SD = 3,10 mm,  $p = 0,005^*$ ) zwischen  $H_2$  und  $SK_2$ . Bei Skoliosen mit KT-Muster gibt es auch hier keine signifikanten Unterschiede, und die Tendenzen orientieren sich an den Werten der Seitabweichung VP-DM (RMS) aus der vorherigen Abbildung.

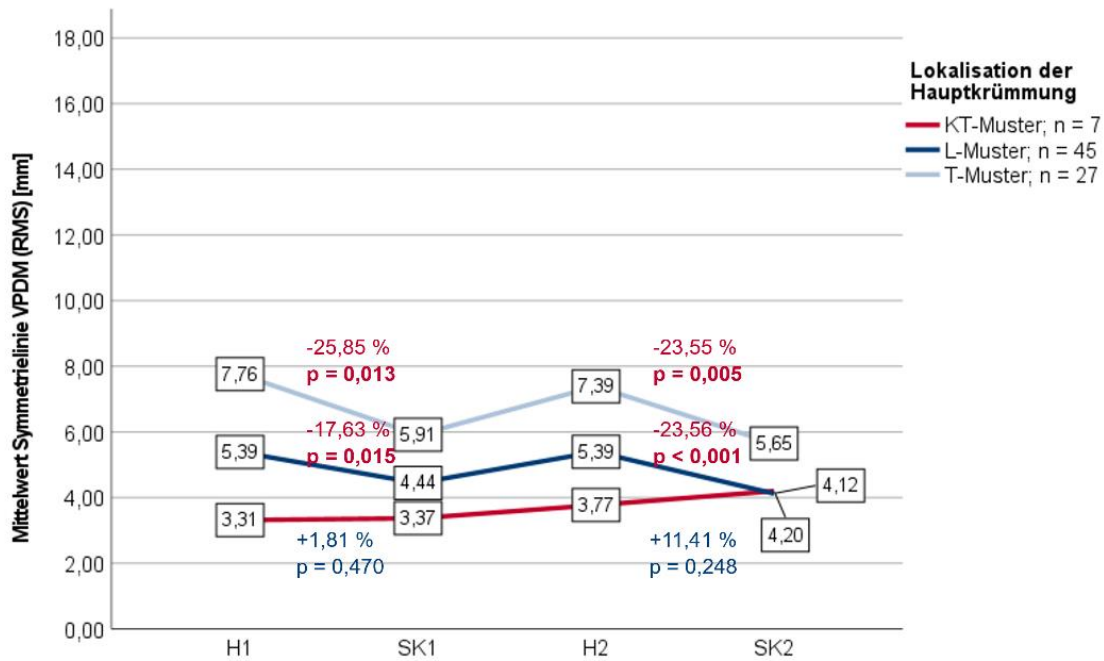


Abb. 41 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ in Grad unterteilt nach Lokalisation der Hauptkrümmung

Die Oberflächenrotation (RMS) in Abb. 42 zeigt ein gänzlich unterschiedliches Bild bei der Aufschlüsselung der Subgruppen.

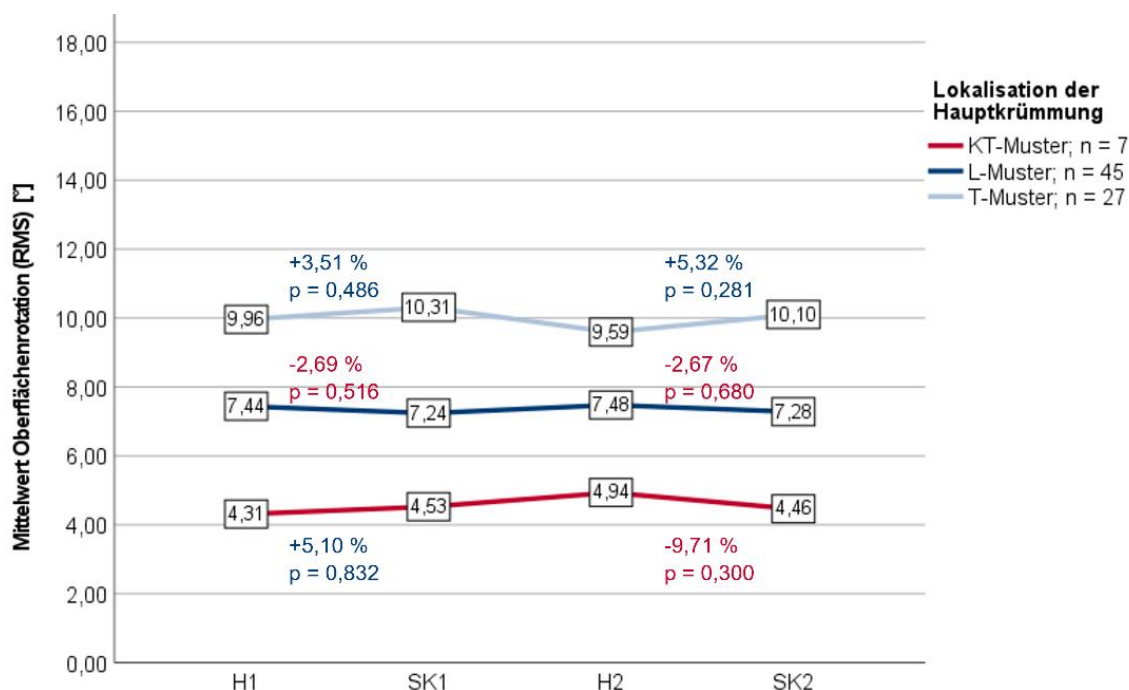


Abb. 42 Liniendiagramm der Mittelwerte des Parameters „Oberflächenrotation (RMS)“ in Grad unterteilt nach Lokalisation der Hauptkrümmung

Es gibt trotz einer prozentualen Veränderung von -9,71 % (-0,47°, SD = 1,10°, p = 0,300) in der Gruppe der KT-Muster zwischen H<sub>2</sub> und SK<sub>2</sub> in keiner der untersuchten Gruppen signifikante Veränderungen zwischen den jeweiligen Körperhaltungen. Außerdem ist zu beachten, dass bei der "Oberflächenrotation (RMS)" kein einseitiger t-Test angewendet werden kann, da die gerichtete Hypothese einer Verbesserung der Rotationswerte nicht zutrifft. Daher ist es hier statistisch nicht korrekt, den p-Wert nach den Berechnungen mit SPSS zu halbieren.

#### 4.3.7 Betrachtung der Haltungskorrekturfähigkeit anhand der Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS) und Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)

Die zuvor festgelegte Alternativhypothese aus Kapitel 3.3 lautet: „Die Differenz zwischen SK und H ist signifikant kleiner als Null, d. h. ergibt eine signifikante Verbesserung der Symmetrie.“ Je nach zu Grunde liegendem Parameter und berechnetem p-Wert kann diese Hypothese zwar in einigen Fällen angenommen werden, jedoch gibt der t-Test keine Auskunft über Ausmaß und Verteilung der Differenzen zwischen standardisierter Korrekturhaltung und habitueller Haltung. Aus diesem Grund erfolgt nun eine genauere Untersuchung dieser Unterschiede unter Verwendung eines Histogramms in Abb. 43. Die Haltungskorrekturfähigkeit ergibt sich aus der oben genannten Differenz der einzelnen Haltungen zu den jeweiligen Messterminen.

An der X-Achse des Histogramms sind die Differenzen der Seitabweichung VP-DM (RMS) zwischen  $SK_1$  und  $H_1$  in Millimetern aufgetragen. Die Y-Achse zeigt die absolute Häufigkeit des jeweiligen Wertes. In diesem Diagramm und den folgenden Abbildungen markiert eine rote Linie die Grenze zwischen positiven und negativen Werten am Nullpunkt der X-Achse. Die Normalverteilungskurve wurde als blaue Linie eingezeichnet. Der Bereich links der roten Senkrechten umfasst den Bereich der Probandinnen und Probanden mit Verbesserung der Seitabweichung VP-DM (RMS).

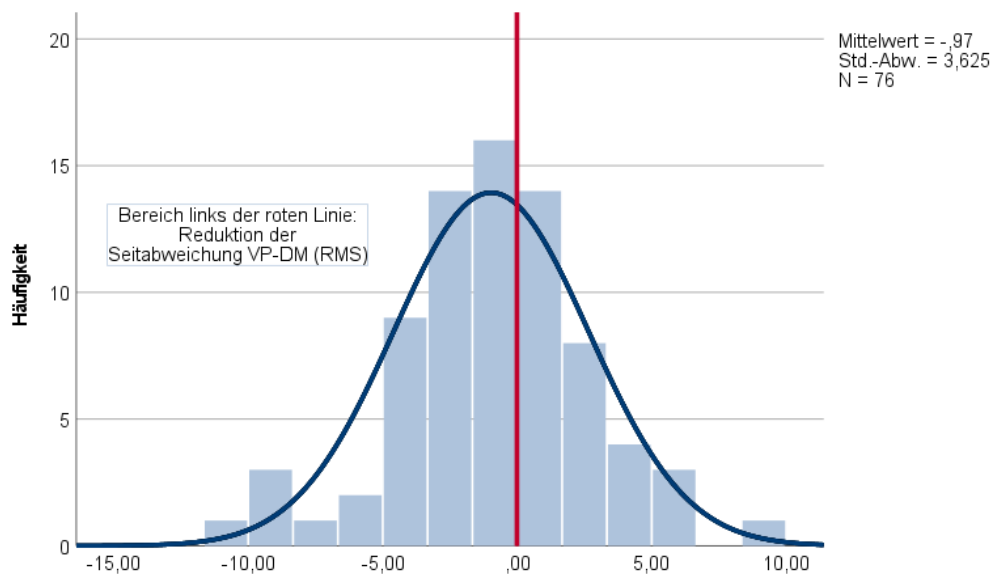


Abb. 43 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ zwischen  $SK_1$  und  $H_1$  in Millimetern

Der Mittelwert aller aufgetragenen Differenzen liegt bei  $-0,97$  mm ( $SD = 3,63$  mm), d. h. die Verteilung ist insgesamt leicht in den negativen Bereich verschoben. Daraus folgt, dass es tendenziell mehr Teilnehmende gibt, die durch das Einnehmen einer standardisierten Korrekturhaltung den Wert der Seitabweichung VP-DM (RMS) verringern konnten, als Personen, bei welchen sich das Ausmaß der Seitabweichung VP-DM (RMS) erhöht hat. Demzufolge zeigen 60,52 % aller Probandinnen und Probanden eine Haltungskorrektur im Sinne der Symmetrie von  $-10,2$  mm bis  $-0,2$  mm beim ersten Messtermin.

Im Histogramm aus Abb. 44 liegt der Mittelwert aller aufgetragenen Differenzen zum zweiten Messtermin nach ca. 14 Tagen ( $M = 14,08$  Tage,  $SD = 1,39$  Tage) in stationärer Behandlung bei  $-0,54$  mm ( $SD = 3,78$  mm). Auch hier verschiebt sich die Verteilung in Richtung des negativen Bereiches. Daraus folgt, dass es zum zweiten Messtermin ebenfalls tendenziell mehr Personen gibt, die durch das Einnehmen einer standardisierten Korrekturhaltung den Wert der Seitabweichung VP-DM (RMS) verringern konnten. Dabei zeigten 57,90 % aller Teilnehmenden eine Haltungskorrektur im Sinne der Symmetrie von  $-10,1$  mm bis  $-0,1$  mm.

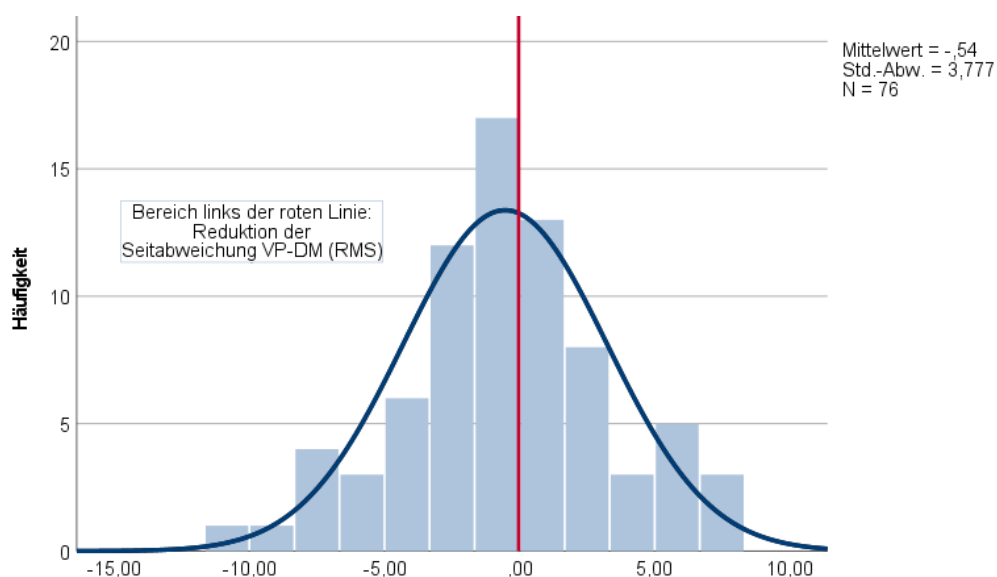


Abb. 44 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung VP-DM (RMS)“ zwischen  $SK_2$  und  $H_2$  in Millimetern

Noch deutlicher wird die Verlagerung in den Bereich der negativen Werte bei Betrachtung der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) in Abb. 45. Dort beträgt der Mittelwert -1,14 mm bei einer geringeren Standardabweichung von 3,10 mm im Vergleich zu den vorherigen Histogrammen. Auch in diesem Fall gibt es demzufolge mehr Personen, die durch das Einnehmen einer standardisierten Korrekturhaltung eine Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie erreichen konnten. Der Anteil an Patientinnen und Patienten mit quantifizierbarer Haltungskorrektur liegt bei 64,5 %. Die Verringerung der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) liegt im Bereich zwischen -13,8 mm und -0,1 mm.

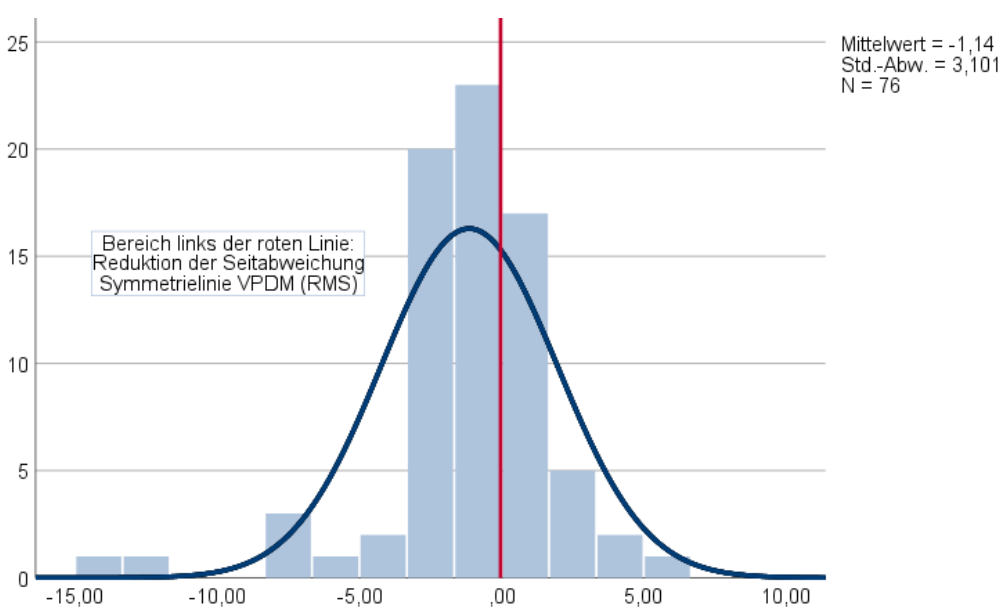


Abb. 45 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ zwischen  $SK_1$  und  $H_1$  in Millimetern

Das Histogramm in Abb. 46 bezieht sich auf die Differenzen der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zwischen SK<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zum zweiten Messtermin nach ca. 14 Tagen (M = 14,08 Tage, SD = 1,39 Tage). Der Mittelwert liegt bei -1,26 mm mit einer nochmals verringerten Standardabweichung von 2,60 mm. Der Gipfel der Verteilung rückt entsprechend noch näher in den Bereich der Werte mit negativem Vorzeichen. Ein Anteil von 68,42 % aller Teilnehmenden können hier eine Haltungskorrektur zwischen -10,6 mm und 0,1 mm vorweisen.

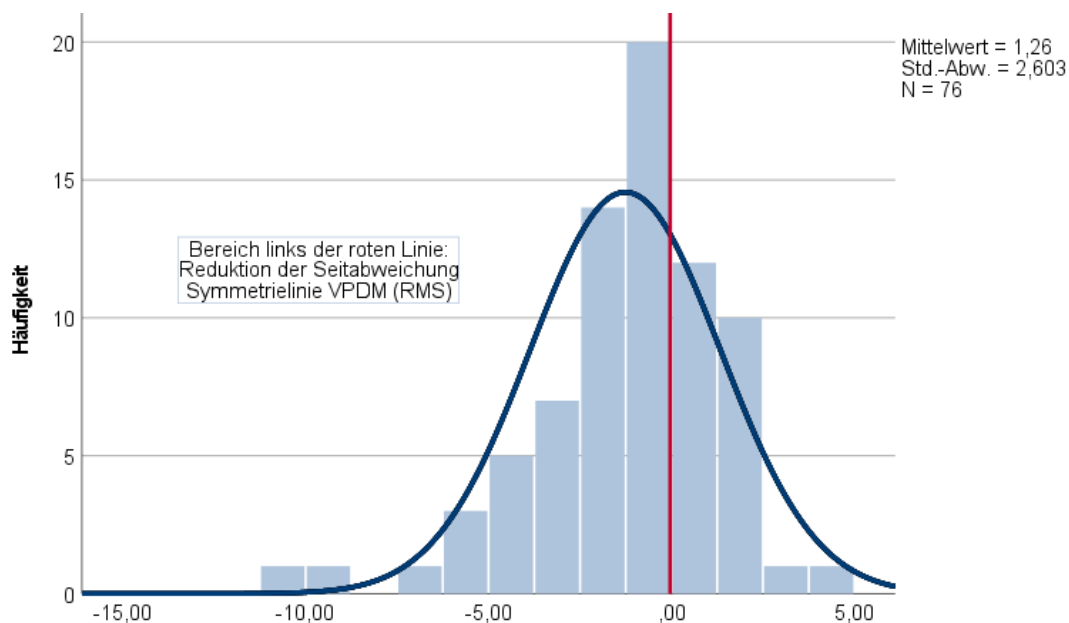


Abb. 46 Histogramm der Differenzen der „Seitabweichung Symmetrielinie (RMS)“ zwischen SK<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> in Millimetern

Die „Oberflächenrotation (RMS)“ zeigt einen kleineren Anteil an Teilnehmenden mit einer Verringerung der Rotationswerte zwischen den Haltungen SK und H. Dieser liegt zum ersten Messtermin bei 52,63 %. Die Spannweite reicht dabei von -6,67° bis -0,04° bei einem Mittelwert von 0,01° (SD 2,21°). Daraus folgt, dass sich Ausprägung und Häufigkeit der Rotationsveränderungen bei Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung zum größten Teil ausgleichen. Es erfolgt keine Verschiebung des Gipfels der Normalverteilungskurve in den negativen oder positiven Bereich. Zum zweiten Messtermin ergibt sich beim Vergleich der Haltungen SK<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> ein noch geringerer Anteil von erfassten Haltungskorrekturen im Sinne der Symmetrie. Dieser liegt bei 51,32 % über einen Bereich von -9,00° bis -0,01°. Der Mittelwert der Differenzen aus SK<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> beträgt 0,000132° (SD = 2,78°), d. h. es gibt auch hier keine Verschiebung des Kurvengipfels in Richtung der negativen oder positiven Bereiche. Zusammenfassend bildet die Oberflächenrotation (RMS) zu nahezu gleichen

Teilen eine Verbesserung und Verschlechterung der Haltung im Vergleich von SK zu H ab. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus dem t-Test zu diesem Parameter in Kapitel 4.3.3.

## 5 Diskussion

Zur adäquaten Einordnung der im vorherigen Kapitel aufgeführten Ergebnisse ist es notwendig, sich die übergeordnete Problematik bezüglich der Haltungsevaluation bei AIS-Patientinnen und Patienten in Erinnerung zu rufen.

Die VRS wird von der SOSORT als supportive Bildgebung zur frühzeitigen Erkennung von Veränderungen der Wirbelsäulenverkrümmung empfohlen, um die Anzahl der Röntgenuntersuchungen im Verlauf zu reduzieren (58). In der Praxis zeigte sich jedoch, dass unklare oder unterschiedliche Anweisungen zur Körperhaltung während des bildgebenden Verfahrens die gemessenen Parameter maßgeblich beeinflussen können (7). Dies kann zu zusätzlichen Röntgenkontrollen bei falsch-positivem Progredienzverdacht führen und im weiteren Verlauf auch Auswirkungen auf die Therapieentscheidungen haben.

Frühere Studien zeigen, dass unterschiedliche Haltungen bei Personen mit AIS die Reliabilität der VRS beeinträchtigen (7). Dies gilt auch für nativradiologische Wirbelsäulenganzaufnahmen, wodurch die Gefahr einer Fehlinterpretation hinsichtlich der Auswahl des korrekten Therapieregimes anhand des gemessenen Cobb-Winkels besteht (10). Die videorasterstereographische Untersuchung von gesunden Personen in unterschiedlichen Körperhaltungen hingegen ergibt keine signifikanten Unterschiede, insbesondere hinsichtlich der Messwerte in der Frontal- und Transversalebene (115).

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Analyse des Einflusses einer standardisierten Korrekturhaltung auf VRS-Messungen bei AIS-Betroffenen, um langfristig einen standardisierten Untersuchungsablauf zu entwickeln, der auch in anderen bildgebenden Verfahren angewendet werden kann. Dazu wurden spezifische Parameter zur Detektion von Haltungsveränderungen untersucht. Hierbei ist zu beachten, dass statische Bildgebungsverfahren lediglich Momentaufnahmen der Körperhaltung liefern können. Die Haltung kann dabei durch diverse Faktoren beeinflusst werden.

Um genauere Einblicke in die Interpretation der Ergebnisse zu gewinnen, ist zunächst eine nähere Betrachtung der demographischen Daten des Studienkollektivs notwendig. Anschließend erfolgt die Diskussion der Ergebnisse in den jeweiligen Subgruppen anhand der untersuchten Messparameter.

## **5.1 Einteilung der Subgruppen und demographische Grundlagen**

Die Geschlechterverteilung in dieser Studie entspricht mit 5,9:1 (weiblich:männlich) dem Durchschnitt des aus der Literatur bekannten Verhältnisses von weiblichen zu männlichen Patienten bei der AIS. Bei Krümmungen zwischen 10° bis 20° liegt das Verhältnis zwischen Mädchen und Jungen bei 1,4:1 und steigt bei Cobb-Winkeln über 40° auf 7,2:1 an (1). Die Altersspanne der eingeschlossenen Studienteilnehmenden erfüllt mit 10 bis 18 Jahren die Definition der AIS (2). 39 von 76 Teilnehmenden absolvierten neben den physiotherapeutischen Maßnahmen in der AKSK eine aktive Korsetttherapie entsprechend der Bauweise nach Chêneau (s. Kapitel 2.3.2). Dabei wurde darauf geachtet, dass die Teilnehmenden das Korsett mindestens 30 Minuten vor der VRS-Messung ablegen, um mögliche Einflüsse auf die Haltung zu minimieren (152).

Die Einteilung der Skoliose nach klinischer Lage ihrer Hauptkrümmung wurde bereits in Kapitel 2.2.4 eingeführt und zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen wissenschaftlichen Studien auch in der statistischen Auswertung angewandt. Die Schweregrade orientieren sich an den Therapieempfehlungen gemäß den SOSORT-Leitlinien (109) und stehen damit im Einklang zur gängigen Einteilung der Skoliosen in den meisten anderen Studien. Die Anzahl der Klinikaufenthalte wurde ermittelt, um bei auffälligen Veränderungen der Körperhaltung Rückschlüsse auf mögliche Beeinflussung durch Vorkenntnisse der Therapie nach Katharina Schroth zu ziehen, da sich in diesem Punkt die Ergebnisse der vorhandenen Literatur voneinander unterscheiden (10, 166).

## **5.2 Einfluss der habituellen und standardisierten Korrekturhaltung auf die untersuchten VRS-Parameter**

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass es signifikante Änderungen im Sinne einer Verbesserung der Wirbelsäulensymmetrie zwischen der habituellen Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung bei der Betrachtung der durchschnittlichen Seitabweichung VP-DM (RMS) am ersten Messtermin gibt. Dies bestätigt zunächst die zugrundeliegende Hypothese dieser Studie und weist auf die empirische Problematik hin, dass eine fehlende Standardisierung der Körperhaltung zu signifikanten Veränderungen der VRS-Messungen führen kann, ohne dass eine neu aufgetretene strukturelle Änderung der Wirbelsäulendeformität zugrunde liegt. Das Ausmaß der Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) im Vergleich zwischen den eingenommenen Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  liegt durchschnittlich bei 0,97 mm (SD = 3,63 mm). Die Mittelwerte der beiden Haltungen bewegen sich im Bereich von 10,87 mm und 11,84 mm. Im Vergleich zu den vorliegenden Referenzwerten liegt das Studienkollektiv damit deutlich oberhalb des Normwertes für die Seitabweichung VP-DM (RMS) von 5 mm bei beschwerdefreien Personen (106). Die Genauigkeit für die Erkennung von anatomischen

Landmarken bei der VRS mit dem DIERS formetric III 4D liegt laut einer Studie von Drerup et al. bei 1,3 mm (88). Diese anatomischen Referenzpunkte dienen als Grundlage für ein individuelles körpereigenes Koordinatensystem während der VRS-Messung und haben demzufolge Einfluss auf die Messergebnisse. Dies ist bei der Interpretation der gemessenen Differenzen zwischen den Messwerten der jeweils unterschiedlichen Haltungen hinsichtlich ihrer klinischen Relevanz zu berücksichtigen. Auch wenn in diesem Fall das durchschnittliche Ausmaß der Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) unterhalb von 1,3 mm liegt, lässt sich dennoch eine Tendenz zur Aufrichtung der Wirbelsäule erkennen. Dies stützt auch die Annahme von Skaggs et al., deren Forschungsprojekt zeigte, dass die bewusste Einnahme einer Korrekturhaltung zur signifikanten Verbesserung des radiologisch gemessenen Cobb-Winkels führt und damit in einem Drittel der Fälle eine abweichende Therapieentscheidung zur Folge hätte (10). Die Stichprobe in dieser Studie umfasst mit  $n = 10$  Röntgenpaaren deutlich weniger Datensätze als die vorliegende Forschungsarbeit mit 76 Teilnehmenden und jeweils vier Messzeitpunkten. Bei unterschiedlichen Messmethoden (Röntgen im Vergleich zur VRS) mit verschiedenen Messtoleranzen und Parametern ist ein quantitativer Vergleich jedoch schwierig.

Eine Hürde bei der Auswertung der VRS-Ergebnisse besteht dahingehend, dass bisher hauptsächlich Normwerte für gesunde erwachsene Personen in der VRS-Messung mit dem DIERS formetric III 4D als Referenz vorliegen (158, 167). Die bislang für Kinder und Jugendliche verwendeten Referenzwerte stammen aus einer Veröffentlichung von Harzmann aus dem Jahr 2000 und basieren auf schulmedizinischen Untersuchungen eines Kollektivs von 10- bis 12-jährigen Probandinnen und Probanden (106). Weitere Referenzwerte für die Altersgruppe der 6- bis 11-jährigen resultieren aus einer aktuelleren Studie von Furian et al., diese unterscheiden sich mit einer durchschnittlichen lateralen Deviation von 4,8 mm ( $SD = \pm 0,6$  mm) nur marginal von den bereits bestehenden Referenzwerten für Kinder (157). Damit liegen nach jetzigem Stand nur Referenzwerte für einen kleinen Teil der hier untersuchten Studienpopulation vor. Obwohl eine Annäherung der Seitabweichung Richtung Null naheliegend erscheint, um eine Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie zu objektivieren, zeigte sich in der Studie von Huthwelker et al. bei der VRS-Untersuchung von 201 gesunden Teilnehmenden im Alter von 18 bis 70 Jahren eine systematische Asymmetrie in der frontalen und transversalen Ebene (158). Eine ähnliche Beobachtung geht aus der Publikation von Wolf et al. hervor. Hier konnte beispielsweise eine vermehrte Lateralflexion nach rechts im Bereich der oberen thorakalen Wirbelsäule bei asymptomatischen Probandinnen zwischen 20 und 64 Jahren festgestellt werden (167). Dies lässt die Vermutung zu, dass eine funktionale Asymmetrie der Wirbelsäule bis zu einem bestimmten Grad als physiologisch betrachtet werden kann. Es bedarf weiterführender Studien, um genauer zu klären, ab welchem Punkt tatsächlich eine pathologische Abweichung der

Position der Wirbelkörper bei Jugendlichen im Alter von 13 bis 17 Jahren vorliegt. Bis dahin ist eine präzise Unterscheidung zwischen physiologischen und pathologischen Messwerten in der VRS nur eingeschränkt möglich. Es erscheint unter diesen Gesichtspunkten daher nicht als zielführend, eine möglichst symmetrische Haltung für Patientinnen und Patienten mit AIS zu konzipieren, vielmehr geht es um die objektive und reliable Abbildung von Veränderungen nicht-funktioneller Genese im Verlauf durch entsprechende Standardisierung der untersuchten Körperhaltungen. Daher spielen die vorliegenden Referenzwerte in dieser Studie in der Interpretation der Messergebnisse eine eher untergeordnete Rolle.

Die Relevanz zur Evaluation der lateralen Deviation im Rahmen der Analyse von unterschiedlichen Körperhaltungen ergibt sich u.a. aus der Studie von D'Amico et al., welche zeigt, dass gezielte Haltungsänderungen besonders in der Frontalebene schwierig umzusetzen sind (115). Dies bestätigt sich auch bei der folgenden Diskussion der Ergebnisse des zweiten Messtages der durchgeführten Studie im nächsten Abschnitt. Die Veränderungen der Haltung haben im Zusammenspiel mit der Rotationskomponente der einzelnen Wirbelkörper einen entscheidenden Einfluss auf den Cobb-Winkel, welcher wiederum zu wichtigen Therapieentscheidungen herangezogen wird.

Im Rahmen des zweiten Messtermins in der vorliegenden Studie ergibt sich keine signifikante Differenz zwischen den beiden untersuchten Körperhaltungen H<sub>2</sub> und SK<sub>2</sub>, die durchschnittliche Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) liegt bei 0,54 mm (SD = 3,78 mm). Diese Beobachtung spricht gegen die Hypothese, dass die Einnahme einer standardisierten Korrekturhaltung zu einer signifikanten Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie führt, sodass hier die in Kapitel 3.3 vorgestellte Alternativhypothese verworfen und die Nullhypothese angenommen werden muss. Die Studie von Alzyoud et al. stützt diese Aussage, da sich dort im direkten Vergleich von acht unterschiedlichen Standpositionen keine signifikanten Veränderungen der VRS-Messwerte zeigten (168). Gegen eine Vergleichbarkeit der beiden Forschungsprojekte spricht, dass in der Studie von Alzyoud et al. nur die Position der Arme und Beine verändert wurde, eine aktive Aufrichtung der Wirbelsäule – wie in der hier vorliegenden Studie – gehörte nicht zu den untersuchten Haltungen. Ein Grund für eine fehlende signifikante Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) könnte möglicherweise in der fehlenden visuellen oder akustischen Rückmeldung während der aktiven Haltungskorrektur liegen. Für die Einnahme einer standardisierten Korrekturhaltung ist ein komplexes Zusammenspiel von unterschiedlichen Muskelgruppen notwendig (12). In einer Studie von D'Amico et al. mit 105 gesunden Teilnehmenden waren 87 % nicht dazu in der Lage, ihre Körperhaltung in der Frontalebene hinsichtlich einer Verbesserung der Symmetrie zu korrigieren, obwohl es ein mündliches Feedback zur eingenommenen Körperhaltung gab (115). Ob diese Ergebnisse auf das geringe Ausmaß

der vorhandenen Wirbelsäulenasymmetrie zurückzuführen sind oder tatsächlich eine erhöhte Schwierigkeit bei der Autokorrektur besteht, lässt sich dabei nicht mit Sicherheit sagen.

Die Propriozeption sowie der Gleichgewichtssinn spielen bei der Einnahme von unterschiedlichen Körperhaltungen eine wichtige Rolle, wie bereits in zahlreichen Studien belegt werden konnte. Catanzariti et al. fanden 2022 heraus, dass Jugendliche mit ausgeprägter AIS dazu neigen, ihre eigene Rumpfdeformität in der Propriozeption zu unterschätzen (169). Patientinnen und Patienten mit AIS verfügen wahrscheinlich über eine fehlerhafte Wahrnehmung der Gravitationsvertikalen (vertikale Körperachse) im Vergleich zu gesunden Personen (128). Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer Schulung des Gleichgewichtssinnes und der Propriozeption im Rahmen der konservativen Skoliosebehandlung. Gemäß einer Forschungsarbeit von Kinel et al. waren 87,7 % der männlichen und 93,3 % der weiblichen untersuchten AIS-Betroffenen nicht im Stande, ihre Körperhaltung in den unterschiedlichen Körperebenen im Sinne der Symmetrie zu verändern (117). Daraus ergibt sich erneut die Notwendigkeit eines gezielten Trainings der körpereigenen Wahrnehmung.

Die Studienteilnehmenden der vorliegenden Studie verfügen möglicherweise über unterschiedliche Assoziationen zu den Instruktionen zur Einnahme einer standardisierten Korrekturhaltung. Die entsprechenden Anweisungen wurden dabei absichtlich allgemein gehalten, damit es nicht zur Verwechslung mit der im Rahmen der Schroth-Therapie erlernten Korrekturhaltung (12) kommt und Personen mit Vorerfahrung in dieser Therapieform die gleichen Ausgangsbedingungen wie andere AIS-Betroffene haben. Um diesen Punkt genauer zu untersuchen, folgt in Kapitel 5.4 eine genauere Betrachtung der einzelnen Subgruppen mit unterschiedlicher Vorerfahrung hinsichtlich der Therapie nach Katharina Schroth.

Die durchschnittliche Seitabweichung VP-DM (RMS) in der habituellen Haltung bleibt nach der erneuten Messung nach ca. 14 Tagen ( $M = 14,08$  Tage,  $SD = 1,39$  Tage) wider Erwarten unverändert, was den anfänglichen Eindruck, die fehlende Standardisierung führe zu klinisch relevanten Veränderungen der Haltung, hier nicht widerspiegelt. Die habituelle Haltung wurde unter Berücksichtigung der realen Bedingungen nicht standardisiert und ohne weitere Anweisungen durch die Studienteilnehmenden eingenommen. Es besteht jedoch beim zweiten Messtermin die Möglichkeit, dass eine Beeinflussung durch den bereits bekannten Untersuchungsablauf vorliegt. Der Einsatz der standardisierten Korrekturhaltung gemäß den bekannten Anweisungen direkt nach der habituellen Haltung am ersten Messzeitpunkt impliziert, dass eine bewusste Aufrichtung der Wirbelsäule während der habituellen Haltung nicht erwünscht ist. Dies könnte zu einer Verringerung der Haltungsvervariabilität während der habituellen Haltung führen. In der klinischen Praxis wurden in der Vergangenheit vermehrt

bewusste und unbewusste aktive Korrekturen während der habituellen Haltung beobachtet, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf uneinheitliche und unklare Instruktionen zurückzuführen ist.

Die standardisierte Korrekturhaltung zeigt im Verlauf ebenfalls keine signifikanten Veränderungen, tendenziell ist jedoch im Gegensatz zu den habituellen Haltungen im Vergleich eine erhöhte Asymmetrie bei der Messung der Seitabweichung VP-DM (RMS) zu verzeichnen. Die aktuelle Studienlage hinsichtlich der radiologisch objektivierbaren Veränderung des Cobb-Winkels bei Autokorrektur von AIS-Betroffenen stellt sich ambivalent dar. Es gibt Erkenntnisse über durchschnittliche Cobb-Winkel-Anstiege von bis zu 6° in der Studie von Cheung et al. (9) im Vergleich zu mittleren Cobb-Winkel-Reduktionen von 6° bei selbstständiger Einnahme einer Korrekturhaltung während nativradiologischen Untersuchungen (10). Veränderungen des Cobb-Winkels in dieser Größenordnung können Therapieentscheidungen weitreichend beeinflussen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass in der Studie von Skaggs et al. Korrekturlemente aus PSSE zum Einsatz kamen, die sich hinsichtlich der Instruktionen und der Ausführung von der standardisierten Korrekturhaltung aus dem vorliegenden Forschungsprojekt unterscheiden.

Die Tendenz zur erhöhten Asymmetrie bei der standardisierten Korrekturhaltung am zweiten Messtermin in der vorliegenden Studie erscheint an dieser Stelle überraschend, da sich dies nicht mit der Intention zur Entwicklung einer Standardisierung des Messvorganges in Verlaufsuntersuchungen deckt. Ursächlich hierfür könnte die zwischen den Messterminen durchgeführte intensive physiotherapeutische Therapie nach Katharina-Schroth sein, welche dadurch eine Rolle als Confounder einnehmen kann. Möglicherweise wird dadurch am zweiten Messtermin nicht mehr unspezifisch auf das Kommando zur Aufrichtung der Wirbelsäule reagiert. Es könnten Elemente aus der Korrekturhaltung nach Katharina Schroth miteinbezogen werden, welche eine dreidimensionale Veränderung der Körperhaltung beinhaltet und die Konstanz der Haltung beeinflusst (12). Ein weiterer Grund für die beobachtete Tendenz könnte die Schwierigkeit zur selbstständigen Autokorrektur sein. Verschiedene Studien postulieren, dass in der Regel besonders bei Personen ohne explizite Schulung der Propriozeption nicht alle Körperebenen gleichzeitig korrigiert werden können, bei ungeübten Personen konzentrieren sich die Korrekturen am ehesten auf die Sagittalebene (115, 117). Diese wurde in der vorliegenden Studie nicht näher untersucht. Daher stellt sich hier die Frage, inwieweit eine standardisierte Haltung mit aktiver Korrekturkomponente für alle Patientengruppen geeignet ist. Auch wenn in der Analyse der Seitabweichung VP-DM (RMS) die habituelle Haltung im Verlauf überraschenderweise nicht weniger stabiler erscheint als die standardisierte Korrekturhaltung, bestätigt sich die klinische Erfahrung dennoch dahingehend, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den

Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  besteht, der bei unzureichender Dokumentation möglicherweise zur Fehlentscheidung hinsichtlich der weiteren Diagnostik und ggf. auch Therapie führen kann.

Etwas eindeutiger stellen sich die Haltungsunterschiede bei der Untersuchung des Parameters Seitabweichung Symmetrieline (RMS) dar. Am ersten Messtermin unterscheidet sich die habituelle Haltung von der standardisierten Korrekturhaltung signifikant mit einer mittleren Reduktion der Seitabweichung um 1,13 mm (SD = 3,1 mm) nach Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung. Auch hier stellt sich wieder die Frage nach der klinischen Relevanz der Haltungsveränderung. Diese ist aufgrund der fehlenden Referenzwerte für einen Großteil der in der vorliegenden Studie untersuchten Altersgruppe schwer einzuschätzen. Auch die Messungen am zweiten Messtermin zeigten eine signifikante Verbesserung der Wirbelsäulensymmetrie in einer ähnlichen Größenordnung. Ursächlich für die höhere Signifikanz dieses Parameters könnte im Unterschied der zugrundeliegenden Referenzpunkte des Messwertes Seitabweichung Symmetrieline (RMS) zur Seitabweichung VP-DM (RMS) liegen. Die sogenannte Symmetrieline bildet die Rotation der einzelnen Wirbelkörper mit ab. Daraus folgt, dass der Abstand zwischen der in Kapitel 3.2.2 eingeführten Verbindungslinie VP-DM und der errechneten Symmetrieline in der Nähe der Hauptkrümmungen, d. h. dort, wo die axiale Auslenkung am größten ist, höher geschätzt wird als bei der Seitabweichung VP-DM (RMS). Bei Personen mit AIS entspricht die Symmetrieline als geschätzte Dornfortsatzlinie aufgrund der Rotation der Wirbelkörper in der Transversalebene nicht mehr der Wirbelsäulenmittellinie. Die Eignung des Parameters Seitabweichung Symmetrieline (RMS) in der Verlaufsdiagnostik der AIS wird durch die bereits erwähnte Forschungsarbeit von Manca et al. betont. Diese Studie zeigt, dass die Parameter Seitabweichung Symmetrieline (RMS) und Oberflächenrotation (RMS) den größten Teil der Variabilität des Parameters „Skoliosewinkel“ erklären (105), welcher wiederum stark mit dem radiologischen Cobb-Winkel korreliert (8, 105).

Im zeitlichen Verlauf der vorliegenden Studie gibt es bei der Seitabweichung Symmetrieline (RMS) sowohl im Vergleich der Messergebnisse in habitueller Haltung als auch in der standardisierten Korrekturhaltung keine signifikanten Unterschiede. Hier erscheint im Gegensatz zu den Messergebnissen der Seitabweichung VP-DM (RMS) die standardisierte Korrekturhaltung stabiler als die habituelle Haltung. Dies zeigt sich auch in der vergleichsweise geringen Standardabweichung von 2,16 mm im Vergleich der Messungen  $SK_1$  und  $SK_2$ . Prinzipiell dient eine Standardisierung in der Forschung dazu, die Qualität und Zuverlässigkeit von wissenschaftlichen Untersuchungen zu gewährleisten. Sie schafft außerdem Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Studien bei unterschiedlichen Messverfahren. Zu den vorrangigen Zielen einer Standardisierung gehört außerdem die Sicherstellung von Objektivität in der Durchführung, Auswertung und Interpretation der gewonnenen Ergebnisse (170). Darauf basiert die Entscheidung, dass in der vorliegenden

Studie eine sogenannte supportive Autokorrektur, wie sie in anderen Studien zum Einsatz kommt (115), nicht in Betracht gezogen wurde. In solchen Fällen erhalten die Patientinnen und Patienten während der Messung einen verbalen Hinweis, falls ihre Haltung noch weiter im Sinne der Symmetrie optimiert werden könnte. Hierbei besteht jedoch das Risiko einer eingeschränkten Reproduzierbarkeit und des Verlustes von Objektivität aufgrund unterschiedlicher Einschätzungen der zu untersuchenden Personen hinsichtlich einer symmetrischen Standposition sowie interindividueller Unterschiede bei der Umsetzung entsprechender Instruktionen.

Im direkten Vergleich der beiden Seitabweichungs-Parameter gibt es bei der Seitabweichung VP-DM (RMS) eine größere Spannweite der Werte von 35,6 mm (1,0 mm bis 36,6 mm). Die Streuung der Werte stellt sich im Vergleich dazu bei der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) mit einer um die Hälfte geringeren Spannweite von 17,5 mm (0,6 mm bis 18,1 mm) und signifikanten Unterschieden hinsichtlich der absoluten Differenzen zwischen den Haltungen  $H_{1/2}$  und  $SK_{1/2}$  dar. Daraus lässt sich ableiten, dass Veränderungen der Messwerte mit gleichen Absolutwerten bei Parametern mit geringerer Spannweite mit größerer Wahrscheinlichkeit eine statistische Signifikanz zeigen.

Die Berechnung des RMS der Oberflächenrotation in Grad ergibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den eingenommenen Haltungen zu den verschiedenen Zeitpunkten. Marginale Differenzen zwischen  $H_{1/2}$  und  $SK_{1/2}$  basieren daher höchstwahrscheinlich auf zufälligen Variationen und nicht auf tatsächlichen Unterschieden zwischen beiden Körperhaltungen. Dies wird durch eine Studie von Degenhardt et al. unterstützt, die zu dem Schluss kam, dass sich der Parameter nicht für die Erfassung haltungsbezogener Veränderungen eignet, da die verschiedenen Teilnehmenden bei ausbleibender Variabilität der Oberflächenrotation nicht voneinander unterschieden werden konnten (116). Hinsichtlich der Relevanz der Oberflächenrotation in der VRS-Messung ist die Studienlage jedoch nicht eindeutig. Die bereits vorgestellte Studie von Manca et al. ergab, dass die Oberflächenrotation (RMS) als zweitbesten Deskriptor des „Skoliosewinkels“ dient (105). Mit einem Betakoeffizienten von 0,252 zeigte sich zwar ein schwacher, jedoch signifikanter Zusammenhang der beiden Parameter. Daraus ergibt sich, dass eine Standardabweichung der Veränderung der Oberflächenrotation (RMS) zu einer Veränderung des Skoliose-Winkels um 0,252 Standardabweichungen führt.

Eine mögliche Erklärung für die dennoch nahezu konstanten Werte der Oberflächenrotation (RMS) in der vorliegenden Studie könnte darin liegen, dass eine gezielte Korrektur in der axialen Ebene nicht explizit in den Instruktionen zur Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung integriert war. In der Studienvorbereitung wurde sich bewusst gegen eine Anweisung hinsichtlich einer axialen Korrektur der Wirbelsäule entschieden, um die

standardisierte Korrekturhaltung nicht von einer vorherige Schulung der Propriozeption (115) oder Vorkenntnissen in der PSSE (12) abhängig zu machen. In weiteren Studien zur Autokorrektur hat die Oberflächenrotation bisher noch einen niedrigen Stellenwert, da diese mit radiologischen Verfahren als Referenz nur unter Zuhilfenahme der Methoden nach Nash and Moe (67) oder nach Raimondi (171) geschätzt werden kann. Oft kommt auch die Messung des Körperschwerpunktes (Center of pressure, COP) in der Objektivierung von Haltungsveränderungen zum Einsatz (172), hierbei ist jedoch die Differenzierung der axialen Korrekturbewegung von den restlichen Korrekturmechanismen in anderen Körperebenen nicht möglich (120, 173, 174). Abschließend sollte auch eine Beeinflussung der Oberflächenrotation durch das veränderte Muskelrelief bei Anspannung der Rückenmuskulatur während der Aufrichtung in standardisierter Korrekturhaltung in Betracht gezogen werden, wodurch möglicherweise vorliegende Änderungen der Oberflächenrotation im Vergleich zur habituellen Haltung nicht korrekt erfasst werden können (85).

Zusammenfassend deutet die signifikante Verbesserung der Symmetrie hinsichtlich der Reduktion der lateralen Deviation der Wirbelsäule zwischen der habituellen Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung darauf hin, dass die Anwendung der standardisierten Korrekturhaltung tendenziell eine positive Auswirkung auf die Symmetrie der Körperhaltung hat und sich unterschiedliche Haltungen in der VRS-Messung besonders bei Betrachtung der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) signifikant voneinander unterscheiden. Ziel der Standardisierung ist es jedoch nicht, eine Verbesserung der Haltung zu erreichen, sondern eine reliable und objektive Methode zu finden, um valide Verlaufsuntersuchungen durchzuführen. Obwohl eine genauere Einschätzung des Cobb-Winkels basierend auf der VRS-Messung der Rückenoberfläche aktuell noch keine vollwertige Alternative zu konventionellen Röntgenaufnahmen darstellt, zeigt sich, dass Veränderungen des „Skoliosewinkels“ stark mit Veränderungen des Cobb-Winkels korrelieren (95). Die Durchführung von Röntgenuntersuchungen außerhalb der regulären Kontrollintervalle wird dementsprechend seitens der SOSORT nur dann empfohlen, wenn eine erkennbare Veränderung in der Oberflächentopografie vorliegt (58). Um dieser Empfehlung nachgehen zu können und die Strahlenbelastung für Kinder und Jugendliche zu minimieren, ist die Standardisierung der Haltung während der VRS-Messungen unabdingbar.

Zudem sollte weiterhin die Messgenauigkeit der verwendeten Methode berücksichtigt werden. Die Lücke zwischen benachbarten auf den Rücken projizierten Linien beträgt in einer typischen Messsituation etwa 11 mm, eine höhere Liniendichte erwies sich aufgrund der Lichtstreuung der Haut nicht als praktikabel (5). Es besteht daher die Möglichkeit, dass feinere Nuancen der Haltungsvariabilität nicht vollumfänglich verarbeitet werden können. Es ist ebenso wichtig, mögliche Einflussfaktoren, die nicht direkt untersucht wurden, in Betracht zu ziehen. Veränderungen der Propriozeption, der Rückenmuskulatur oder des

Gleichgewichtsinnes über die Zeit sowie die psychische Verfassung der Teilnehmenden könnten unberücksichtigte Variablen darstellen, die die jeweiligen VRS-Parameter beeinflussen.

Im nächsten Kapitel erfolgt die differenzierte Bewertung der Ergebnisse innerhalb der einzelnen Subgruppen.

### **5.3 Einfluss des Schweregrades der Skoliose auf die Haltungsvervariabilität**

Zunächst sollte einer der vermutlich stärksten Einflussfaktoren auf die Haltungsvervariabilität in der Subgruppenanalyse genauer untersucht werden. Erwartungsgemäß würden Patientinnen und Patienten mit schwerer AIS größere Unterschiede zwischen habitueller und standardisierter Korrekturhaltung aufweisen, da bei größerem Ausgangswert der Wirbelsäulenkrümmung und erhaltener Flexibilität der Wirbelsäule eine größere Reduktion der lateralen Deviation bzw. der Oberflächenrotation möglich sein könnte. Dies bestätigt sich allerdings nur bedingt.

Bei den Probandinnen und Probanden mit leichter Skoliose unter  $20^\circ$  nach Cobb gibt es keine signifikanten Unterschiede, weder zwischen den Messtagen noch zwischen den verschiedenen Haltungen. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da die Möglichkeiten zur Aufrichtung anatomisch bedingt bei leichter Deformität nur geringe Veränderungen in der Frontalebene zulassen. Die Ergebnisse ähneln denen der Vergleiche zwischen habitueller Haltung und Haltung in Autokorrektur einer gesunden Population aus der Studie von D'amico et al. (115).

Bei Betrachtung der Seitabweichung VP-DM (RMS) zeigt sich nur in der Gruppe der mittelschweren Skoliosen ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden eingenommenen Haltungen H und SK. Hierbei handelt es sich um die größte Gruppe innerhalb dieser Subgruppenanalyse mit 47 Teilnehmenden. Es kommt zur Veränderung der Haltung in Form von einer durchschnittlichen Reduktion der gemessenen Seitabweichung um 1,50 mm (SD = 3,51 mm), d. h. es erfolgte eine signifikante Aufrichtung der Wirbelsäule durch das Umsetzen der Instruktionen am ersten Messtermin. Dieses Ergebnis unterstreicht die Feststellung der Studie von Schumann et al. (7), dass VRS-Messungen signifikant durch die Annahme verschiedener Körperhaltungen beeinflusst werden können. Demnach besteht insbesondere in dieser Subgruppe das Risiko einer Verfälschung der Verlaufsuntersuchungen, sofern nicht auf einheitliche Anweisungen zur Haltung während der VRS-Messung geachtet wird. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich am zweiten Messtermin in dieser Gruppe mit einer geringeren mittleren Reduktion der lateralen Deviation von 0,57 mm (SD = 3,99 mm), allerdings ohne statistische Signifikanz. Zum einen könnte dies daran

liegen, dass die parallel durchgeführte konservative Skoliotherapie zu einer unterbewussten Veränderung der eigenen Wahrnehmung der Körperhaltung führt (175), weshalb die Ausgangsposition in habitueller Haltung zum zweiten Messtermin tendenziell symmetrischer ausfällt ( $M = 11,60$  mm) als zu Beginn der Studie ( $M = 12,13$  mm). Dagegen spräche jedoch, dass die durchschnittlichen Absolutwerte der Seitabweichung VP-DM (RMS) der standardisierten Korrekturhaltung mit  $11,02$  mm höher sind als am ersten Messtag mit  $10,63$  mm. Bei optimierter Propriozeption sollte es den Probandinnen und Probanden leichter fallen, eine Korrekturhaltung im Sinne der Symmetrie einzunehmen. Allerdings unterscheiden sich die Werte dieses Parameters zwischen den Messtagen nicht signifikant voneinander, weshalb hier eher von einer zufälligen Variabilität auszugehen ist. Außerdem wäre es auch möglich, dass die Teilnehmenden zwar über eine gute Eigenwahrnehmung der Körperhaltung verfügen, eine gezielte Haltungskorrektur jedoch aus strukturellen Gründen bei erhöhter Rigidität der Skoliose nicht möglich ist.

Anders sieht es bei der Gruppe der schweren Skoliosen aus. Hier zeigen sich wider Erwarten keine signifikanten Unterschiede, jedoch unterscheiden sich die absoluten Werte zwischen H und SK stärker voneinander als in den anderen Gruppen. Ein Grund hierfür ist wahrscheinlich die geringe Gruppengröße der Teilnehmenden mit schwerer Skoliose ( $n = 7$ ). Dadurch ist eine statistische Signifikanz nur sehr schwer zu erreichen, was aber nicht bedeutet, dass keine realen Unterschiede bestehen können. Mehrere Studien haben festgestellt, dass die Validität von VRS-Messungen bei Personen mit Cobb-Winkeln unter  $50^\circ$  hoch ist. Jedoch neigen Messungen von Cobb-Winkeln bis zu  $88^\circ$  zu Ungenauigkeiten, obwohl sie immer noch zu akzeptabel genauen Ergebnissen führen können. (176, 177) Der maximale Cobb-Winkel in der Gruppe der schweren Skoliosen über  $50^\circ$  liegt in der vorliegenden Studie bei  $85^\circ$ , was die Verlässlichkeit der Messmethode in diesem Kollektiv entsprechend der zuvor genannten Erkenntnisse gegebenenfalls einschränkt. In der Subgruppe der schweren Skoliosen zeigen sich erhöhte Schwankungen der Messwerte, was zum einen auf die abnehmende Messgenauigkeit zurückzuführen sein könnte, zum anderen jedoch die Problematik der Verlaufsuntersuchungen bei AIS-Betroffenen unterstreicht. Aufgrund der stärkeren Ausprägung der Wirbelsäulenverkrümmung ist bei erhaltener Flexibilität der Wirbelsäule von einer größeren Variabilität der Haltung auszugehen. Bei schweren Skoliosen mit einem Cobb-Winkel von über  $65^\circ$  stellten Hamzaoglu et al. jedoch fest, dass die Beweglichkeit der einzelnen Krümmungen im Vergleich zu geringeren Cobb-Winkeln abnimmt (178).

Die habituelle Haltung in der vorliegenden Studie zeigt beispielsweise eine Verschlechterung der Symmetrie in der Frontalebene von  $21,99$  mm auf  $25,49$  mm (Seitabweichung VP-DM (RMS)), die sich nicht durch strukturelle Veränderungen der Wirbelsäule zwischen den Messterminen erklären lässt. Die Standardabweichungen der Mittelwerte sind für  $H_1$

(SD = 7,67 mm) und H<sub>2</sub> (SD = 8,51 mm) entsprechend hoch, sodass es sich hierbei am ehesten um zufällige Schwankungen der Werte ohne statistische Signifikanz handelt. Da gerade bei Patientinnen und Patienten mit schwerer Skoliose häufig eine Operationsindikation im Raum steht, die sorgfältig gestellt werden muss, ist es umso wichtiger, dass hier eine Standardisierung erfolgt. Die standardisierte Korrekturhaltung zeigt im Verlauf geringere Schwankungen mit einer durchschnittlichen Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) um 0,7 mm (SD = 2,80 mm) im Gegensatz zu H<sub>1</sub> und H<sub>2</sub> im Vergleich mit einer Erhöhung der Seitabweichung VP-DM (RMS) um 3,5 mm (SD = 6,76 mm). Die Verwendung einer standardisierten Korrekturhaltung bei Verlaufsuntersuchungen von schweren Skoliosen könnte dazu führen, dass vorzeitige Röntgenuntersuchungen vermieden werden, da die Gefahr von falsch-positiver oder falsch-negativer Einschätzung einer Progredienz bei geringerer Haltungsvervariabilität sinkt. Dies könnte langfristig die Exposition von AIS-Betroffenen mit ionisierender Strahlung senken.

Der Parameter Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zeigte bereits in der Betrachtung des Gesamtergebnisses signifikante Unterschiede zwischen den Haltungen bei geringerer Spannweite der Messwerte, weshalb sich dieser besonders zur Beurteilung von Haltungsveränderungen bei AIS-Patientinnen und Patienten zu eignen scheint. Bei genauerer Betrachtung der Subgruppen gilt dies jedoch nicht für alle Schweregrade.

Leichte Skoliosen zeigen auch hier keine signifikanten Veränderungen zwischen den Haltungen H und SK an unterschiedlichen Messterminen entsprechend den Ergebnissen beim Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS). Dies könnte damit zusammenhängen, dass der Unterschied zwischen den beiden Seitabweichungsparametern durch die Nutzung der Symmetrielinie als Referenz nicht in dem Maße zum Tragen kommt, wie bei den mittelschweren und schweren Skoliosen. Da leichte Skoliosen in der Regel geringere axiale Abweichungen im Sinne einer Rotation der Wirbelkörper aufweisen (179), unterscheiden sich Symmetrielinie und die Verbindungslinie zwischen VP und DM bei leichten Skoliosen nur gering voneinander.

Die Gruppe der mittelschweren Skoliosen zeigt jeweils signifikante Unterschiede zwischen den eingenommenen Haltungen H und SK an beiden Messtagen. Am ersten Messtermin verringert sich die Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zwischen H<sub>1</sub> und SK<sub>1</sub> im Durchschnitt um 1,61 mm (SD = 2,94 mm). Am zweiten Messtermin kommt es ebenfalls zu einer mittleren Reduktion zwischen H<sub>2</sub> und SK<sub>2</sub> in Höhe von 1,86 mm bei einer geringeren SD von 2,63 mm. Hierbei kommt die Frage auf, welche der beiden Haltungen am ehesten den „wahren“ Skoliose-Winkel repräsentiert und somit auch Hinweise auf den Verlauf des aktuellen Cobb-Winkel gibt. Für die habituelle Haltung spricht die Annahme, dass die Teilnehmenden in einer entspannten Neutralposition ohne aktive Korrektur vermessen

werden und diese Haltung bezüglich der Werte im Verlauf nur marginale Unterschiede zeigt. Es ist anzunehmen, dass der Anteil der ungerichteten Gewohnheitshaltung im Laufe eines Tages größer ist, als die Zeit in aktiver Korrekturhaltung. Die ungerichtete Haltung spiegelt daher vermutlich die Wirbelsäulendeformität im Alltag realistischer wider. Andererseits hat die standardisierte Korrekturhaltung den Vorteil, dass eine indirekte Einschätzung der Rigidität und dem damit verbundenen Korrekturpotenzial der Wirbelsäulendeformität möglich ist. Voraussetzung für eine sichere Messung einer vorhandenen Haltungskorrekturfähigkeit als Verlaufsparemeter ist allerdings die Standardisierung der habituellen Körperhaltung, welche langfristig ebenfalls erforscht werden sollte. Die Probandinnen und Probanden mit mittelschwerer Skoliose sind in der vorliegenden Studie dazu in der Lage, sich eigenständig ohne visuelles Feedback im Sinne der Symmetrie aufzurichten. Dieses Wissen könnte auch in die weitere Therapieplanung miteinbezogen werden, wenn es um die Einschätzung geht, welche Korrekturen aus eigener Kraft möglich sind und konservativ unterstützt werden können. Tendenziell würde die Skoliose in der elongierten Körperhaltung allerdings je nach Schweregrad gegebenenfalls unterschätzt werden. Dies könnte zur falsch-negativen Einschätzung einer möglichen Progression führen und damit den Beginn eines eskalierenden Therapieregimes verzögern, sofern sich die Patientinnen und Patienten noch außerhalb des radiologischen Kontrollintervalls befinden. Eine durch die konservative Skoliogetherapie veränderte Propriozeption könnte die VRS-Messungen zusätzlich beeinflussen (175). Um diesen Punkt genauer zu untersuchen, erfolgt die genauere Betrachtung des Studienkollektivs hinsichtlich der Vorerfahrung im Bereich einer skoliosespezifischen Physiotherapiebehandlung in Kapitel 5.4.

Bei den schweren Skoliosen zeigt sich die gleiche Tendenz in der Veränderung der Körperhaltung hinsichtlich der lateralen Deviation wie bei der Seitabweichung VP-DM (RMS), mit dem Unterschied, dass es zwischen der habituellen Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung am zweiten Messtag eine signifikante Veränderung gibt. Am ersten Messtermin verringert sich die Seitabweichung Symmetrieline (RMS) zwischen  $H_1$  und  $SK_1$  im Durchschnitt um 0,54 mm (SD = 3,52 mm). Am zweiten Messtermin kommt es ebenfalls zu einer mittleren Reduktion zwischen  $H_2$  und  $SK_2$ , allerdings in Höhe von 2,68 mm bei einer geringeren SD von 2,73 mm. Hier wird erneut der Unterschied der Parameter der lateralen Deviation besonders deutlich, da die verstärkte Wirbelkörperrotation bei höheren Cobb-Winkeln zur Veränderung der Symmetrielinie führt. Hier stellt sich die Frage nach der Ursache für die signifikante Veränderung zwischen  $H_2$  und  $SK_2$  nach 14 Tagen. Zum Beispiel könnte sich durch die intensive konservative Therapie in der Zwischenzeit die Propriozeption und damit die Fähigkeit zur Autokorrektur verbessert haben. Einen weiteren interessanten Punkt bilden die Unterschiede der Haltungen  $H_1$  und  $H_2$  (Anstieg der Seitabweichung Symmetrieline (RMS) um 1,37 mm, SD = 4,69 mm) sowie  $SK_1$  und  $SK_2$  (Reduktion der

Seitabweichung Symmetrieline (RMS) um 1,86 mm, SD = 4,68) im Vergleich zueinander. Bei alleiniger Betrachtung der Durchschnittswerte der habituellen Haltungen wäre eine Verschlechterung der Seitabweichung Symmetrieline ersichtlich und es müsste ggf. von einer Progredienz der Erkrankung im Verlauf ausgegangen werden, obwohl die Teilnehmenden aus dieser Gruppe die Fähigkeit zur Autokorrektur besitzen und die fragliche Verschlechterung der Haltung bei erhaltener Korrekturfähigkeit am ehesten funktioneller Natur gewertet werden sollte. Die fehlende Signifikanz bei geringer Gruppengröße von  $n = 7$  darf bei dieser Argumentation jedoch nicht außer Acht gelassen werden.

Hinsichtlich der Oberflächenrotation zeigt sich zunächst eine erwartete Aufteilung der Gruppen nach unterschiedlichen Schweregraden, da die Rotation der Wirbelkörper nachweislich mit der Ausprägung der Skoliose korreliert (179). Die mit Abstand höchsten Werte erreichen die Teilnehmenden mit schwerer Skoliose (im Mittel zwischen  $15^\circ$  und  $18^\circ$  Grad je nach Haltung), die anderen beiden Gruppen liegen etwas dichter beieinander, die leichten Skoliose zeigen dabei die geringsten Gradzahlen (im Mittel zwischen  $5^\circ$  und  $7^\circ$  je nach Haltung). Damit liegen alle Subgruppen im Durchschnitt über den Referenzwerten für die Oberflächenrotation bei beschwerdefreien Personen (106, 107). Insgesamt gibt es in keiner der Gruppen signifikante Unterschiede zwischen der habituellen Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung zu den verschiedenen Messterminen hinsichtlich der Oberflächenrotation. In der Beurteilung der Validität dieses Parameters gibt es bei den vorliegenden Studien ambivalente Ergebnisse. Manca et al. fanden wie bereits oben erwähnt heraus, dass die Oberflächenrotation einen Teil der Veränderungen des Skoliosewinkels erklärt (105). Degenhardt et al. zeigten hingegen, dass vier VRS-Parameter bei Verlaufsuntersuchungen sich nicht für die Erfassung haltungsbezogener Veränderungen eignen, darunter auch die Oberflächenrotation (116).

Zusammenfassend legt die Interpretation dieser Ergebnisse nahe, dass eine standardisierte Korrekturhaltung bei mittelschweren Skoliosen positive Auswirkungen auf die Symmetrie haben könnte, während die Reaktionen bei leichten und schweren Skoliosen weniger eindeutig abzusehen sind. Es scheint, als würden die AIS-Betroffenen mit leichter Skoliose am wenigsten vom Einsatz einer standardisierten Korrekturhaltung profitieren, da hier keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Haltungen H und SK zum Tragen kommen und sich die habituelle Haltung im Verlauf ausreichend stabil zeigt. Insgesamt ist es besonders in den Gruppen der mittelschweren und schweren Skoliosen unabdingbar, die jeweilige Körperhaltung zu dokumentieren und einheitlich im Rahmen der Verlaufsuntersuchungen zu nutzen.

#### **5.4 Einfluss der Vorerfahrungen in der konservativen Therapie nach Katharina Schroth auf die Haltungsvervariabilität**

Bei dieser Subgruppenanalyse erfolgt die Einteilung des Studienkollektivs in Personen, die während der Studie zum ersten Mal in der Asklepios Katharina-Schroth-Klinik Bad Sobernheim waren ( $n = 49$ ) und diejenigen, welche die Klinik bereits mehrfach im Rahmen von Rehabilitationsaufenthalten besucht haben ( $n = 27$ ). Mithilfe dieser Angaben soll der Einfluss einer möglichen Veränderung der Propriozeption und des Gleichgewichtsinnes durch PSSE wie z.B. durch die Therapie nach Katharina Schroth auf die Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung genauer untersucht werden.

Es zeigt sich, dass die Seitabweichung VP-DM (RMS) in beiden Untergruppen zum ersten Messzeitpunkt bei der habituellen Haltung im Schnitt identisch ist ( $M = 11,84$  mm), die Standardabweichung bei Probandinnen und Probanden mit erstmaligem Aufenthalt jedoch größer erscheint ( $SD = 7,20$  mm), als bei Teilnehmenden mit mehreren erfolgten Aufenthalten ( $SD = 6,25$  mm) trotz geringerer Stichprobengröße. Dies könnte darauf hindeuten, dass Personen mit mehreren Klinikaufenthalten eine geringere Streuung hinsichtlich der Ausprägung ihrer Skoliose aufweisen. In der Regel werden wiederholte Klinikaufenthalte seitens der Krankenkassen eher bei Personen genehmigt, die eine entsprechend ausgeprägte Skoliose vorweisen, was hier als Confounder miteinbezogen werden sollte.

Die einzige statistisch signifikante Veränderung zwischen zwei Haltungen zeigt sich bei Personen mit mehreren Klinikaufenthalten. Es offenbart sich dabei eine signifikante Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) zwischen  $H_1$  und  $SK_1$  um  $-1,12$  mm ( $SD = 3,31$  mm). Beim Vergleich von  $H_2$  und  $SK_2$  weist keine der Gruppen einen signifikanten Unterschied auf. Allerdings spalten sich die am ersten Messtermin noch nah beieinanderliegenden Werte zum zweiten Messtermin hin auf. Der absolute Mittelwert der Seitabweichung VP-DM (RMS) liegt bei Patientinnen und Patienten mit mehreren Aufenthalten tendenziell um etwa 10 % bei  $H_2$  ( $M = 10,99$  mm) bzw. 12 % bei  $SK_2$  ( $M = 10,37$  mm) unterhalb dem der Teilnehmenden mit erstmaligem Klinikaufenthalt. Dies legt nahe, dass wiederholte stationäre Behandlungen trotz tendenziell stärkerer Ausprägung der Skoliosen einen positiven Einfluss auf die Haltungskorrektur haben könnten. Möglicherweise lassen sich auch die Instruktionen mit entsprechenden Vorkenntnissen und geschulter Propriozeption, wie auch bereits in der Studie von Skaggs et al. postuliert, besser umsetzen (10).

Im Kontext der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zeigen sowohl Probandinnen und Probanden mit Erstaufenthalt als auch Teilnehmende nach mehrfachen Klinikaufenthalten

signifikante Verbesserungen der Haltung zum ersten und zweiten Messtermin. Auffällig ist hierbei die fehlende „Scherenbildung“ zwischen den Gruppen mit erstmaligem Aufenthalt und mehrfachen Klinikaufhalten im Vergleich zur Seitabweichung VP-DM (RMS) im Verlauf. Grund hierfür könnte wieder das Miteinbeziehen der Symmetrieline sein, wodurch sich auch feinere Unterschiede zwischen den jeweiligen Haltungen abbilden lassen, welche von der Seitabweichung VP-DM (RMS) nicht erfasst werden. Bei der Betrachtung von Abb. 32 im Ergebnisteil in Kapitel 4.3.2 wird der Unterschied beider Parameter nochmals deutlich.

Die Untersuchung des Parameters Oberflächenrotation (RMS) in den Subgruppen mit unterschiedlicher Anzahl an Klinikaufhalten zeigt auch hier keine Hinweise auf signifikante Unterschiede zwischen den Haltungen  $H_1$  und  $SK_1$  sowie  $H_2$  und  $SK_2$  zu den jeweiligen Messzeitpunkten. Innerhalb der Gruppe "Erstaufenthalt" deutet sich ein Trend zu einer leichten Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie bei Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung an, während bei den Teilnehmenden mit mehreren Aufenthalten eine gegenläufige Tendenz festzustellen ist. Wider Erwarten zeigt sich bei den Personen der Gruppe „Wiederholte Aufenthalte“ bereits initial eine geringere Oberflächenrotation (RMS), was sich auch im Verlauf nicht ändert. Da die Rotation mit dem Schweregrad der Skoliose korreliert (179), würde dies gegen eine Häufung von mittelschweren und schweren Skoliosen in der Gruppe der Personen mit mehrfachen Klinikaufhalten sprechen. Die nicht-signifikante, gegenläufige Tendenz dieser Gruppe hinsichtlich der Rotation im Vergleich zwischen H und SK könnte auf zusätzliche Korrekturversuche in der axialen Ebene zurückzuführen sein, die Veränderungen des Muskelreliefs zu Folge haben, was wiederum die valide Messung der Oberflächenrotation erschwert (85).

Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Anzahl der Klinikaufhalte möglicherweise einen Einfluss auf die Haltung haben könnte. Gleichzeitig ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede in der jeweiligen Stabilität der Messwerte im Verlauf zwischen  $H_1/H_2$  und  $SK_1/SK_2$ . Die standardisierte Korrekturhaltung bietet daher gegenüber der habituellen Haltung in diesen Subgruppen hinsichtlich der zugrundeliegenden Problematik der Haltungsvervariabilität funktioneller Genese keinen Vorteil. Der Einfluss der Körperhaltung scheint bei der Verwendung des Parameters Seitabweichung Symmetrieline (RMS) am geringsten ausgeprägt zu sein, weshalb eine standardmäßige Implementierung dieses Messwertes im Rahmen von Verlaufsuntersuchungen zu erwägen wäre.

### **5.5 Einfluss der Lokalisation der Skoliose auf die Haltungsvervariabilität**

Die Ergebnisse der letzten Subgruppenanalysen, basierend auf der Lokalisation der Hauptkrümmung und der klinischen Einteilung nach Skoliosemuster, liefern wichtige

Hinweise darauf, welches Kollektiv vom Einsatz einer standardisierten Korrekturhaltung profitieren könnte.

Bei der Seitabweichung VP-DM (RMS) zeigt sich nur ein statistisch signifikanter Unterschied bei der größten Subgruppe ( $n = 45$ ) der lumbalen Skoliosen zwischen  $H_1$  und  $SK_1$  in Form einer signifikanten Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) um 1,14 mm ( $SD = 2,94$  mm). Eine tendenzielle Verbesserung der Haltung zwischen  $H_2$  und  $SK_2$  ist ebenfalls erkennbar, aber nicht statistisch signifikant. Die signifikanten Veränderungen lassen sich vermutlich darauf zurückführen, dass ein Großteil der Personen in dieser Gruppe zum Kollektiv der mittelschweren Skoliosen gehören. Wie bereits in Kapitel 5.3 erwähnt, werden diese Personen üblicherweise frühzeitig einer konservativen Skoliotherapie zugeführt, welche eine unterbewusste Veränderung der eigenen Wahrnehmung der Körperhaltung zur Folge haben kann (175). Im Gegensatz zu den mittelschweren Skoliosen fällt die durchschnittliche Seitabweichung VP-DM (RMS) der habituellen Haltung jedoch zum zweiten Messtermin mit 10,89 mm tendenziell höher aus als zu Beginn der Studie mit 10,80 mm. Insgesamt zeigt sich hier die habituelle Haltung im Verlauf ähnlich stabil, wie die standardisierte Korrekturhaltung. Ähnliche Trends, jedoch mit höheren Ausgangswerten von durchschnittlich 16,5 mm bei  $H_1$  und 15,88 mm bei  $H_2$ , sind bei thorakalen Skoliosen zu beobachten. Statistisch signifikante Unterschiede zeigen sich hier jedoch nicht. Diese Gruppe besteht insgesamt aus mehr Personen mit höheren Cobb-Winkeln, woraus die höheren Werte der Seitabweichung VP-DM (RMS) resultieren. Außerdem zeigen Hamzaoglu in ihrer Studie zur Flexibilität von unterschiedlichen Wirbelsäulenabschnitten, dass die Rigidität bei thorakalen Krümmungen im Vergleich zu lumbalen Krümmungen erhöht ist (178).

In der Gruppe der Skoliosen mit führender Kyphose ist eine gegenläufige Tendenz zu beobachten. Nach Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung am ersten Messtermin kommt es zu einer tendenziellen Verschlechterung der Wirbelsäulensymmetrie um +36,76 % ( $M = 0,21$  mm,  $SD = 2,54$  mm). Trotz der hohen prozentualen Unterschiede zeigt sich aufgrund der geringen Stichprobengröße von  $n = 7$  keine statistische Signifikanz, weshalb die Veränderungen am ehesten auf zufällige Schwankungen zurückzuführen sind. Dies lässt sich erklären, da bei Personen mit KT-Muster das Hauptaugenmerk nicht auf der seitlichen Krümmung der Wirbelsäule, sondern auf der Veränderung in der sagittalen Ebene liegt. Daher sind die Cobb-Winkel, und demzufolge auch die Werte der Seitabweichung VP-DM (RMS), in dieser Gruppe geringer, vergleichbar mit der Situation bei leichten Skoliosen. Diese Ergebnisse stehen im Einklang zu den anatomischen Gegebenheiten, da bei geringer Deformität in der Frontalebene nur begrenzte Möglichkeiten zur Aufrichtung in dieser Ebene vorhanden sind. Gleichzeitig steigt das Risiko einer Beeinflussung der Ergebnisse durch Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Instruktionen zur Autokorrektur. Die Wirkung der

Aufrichtung konzentriert sich bei dieser Gruppe größtenteils auf die sagittale Ebene, ähnlich zu gesunden Personen ohne AIS (115).

Die Analyse des Parameters Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zeigt sowohl bei der Gruppe der lumbalen als auch der thorakalen Skoliosen Verbesserungen der Haltung im Sinne der Symmetrie an beiden Messtagen. Wie bereits in den zuvor besprochenen Subgruppen, liegen die gemessenen Korrekturen im Sinne der Symmetrie bei wenigen Millimetern. Daher besteht trotz der statistischen Signifikanz der Ergebnisse weiterhin die Unsicherheit bezüglich der klinischen Relevanz. Insgesamt liegen die absoluten Werte näher beieinander, als bei der Seitabweichung VP-DM (RMS), was auf die geringere Spannweite des Parameters Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) zurückzuführen ist. Bei Skoliosen mit KT-Muster zeigen sich auch hier keine signifikanten Unterschiede, da die Berechnung der Messergebnisse auf Grundlage der Symmetrielinie ähnlich wie bei leichten Skoliosen keinen Unterschied zur regulären Berechnung der Seitabweichung zeigt. Hinsichtlich der Haltungsvervariabilität zeigte sich die habituelle Haltung überraschenderweise tendenziell stabiler als die standardisierte Korrekturhaltung, insbesondere bei Teilnehmenden mit L-Muster.

Hinsichtlich der Oberflächenrotation (RMS) ergibt sich wieder eine eindeutige Aufteilung ähnlich zu den Schweregraden in Kapitel 5.3. Dabei zeigt die Gruppe der T-Muster die höchsten durchschnittlichen Werte zwischen  $9,59^\circ$  und  $10,31^\circ$ . Die L-Muster-Gruppe liegt dazwischen mit Mittelwerten von  $7,24^\circ$  bis  $7,48^\circ$  und das Kollektiv der Personen mit führender Kyphose präsentiert Durchschnittswerte zwischen  $4,31^\circ$  und  $4,94^\circ$ . Damit liegt die letztgenannte Gruppe noch im Referenzbereich für gesunde Personen von unter  $5^\circ$  Rotation (86, 106). Dieser Referenzbereich ist jedoch nur bedingt zu verwenden, da er auf einer Stichprobe aus 10- bis 12-jährigen Schulkindern basiert. Für die Probandinnen und Probanden zwischen 13 und 17 Jahren liegen nach aktuellem Stand der Wissenschaft noch keine Referenzwerte für VRS-Messungen vor.

Schlussendlich ist bei Betrachtung dieser Subgruppen zu bedenken, dass es sich hierbei nicht um eine radiologische, sondern um eine klinische Einteilung der Skoliose handelt. Dies kann insbesondere bei doppelbogigen Skoliosen zu Ungenauigkeiten in der Beurteilung führen, da jeweils nur die führende Lokalisation der AIS angegeben wird. Es zeigt sich jedoch eindeutig, dass Personen mit KT-Muster am wenigsten von der Einführung einer standardisierten Korrekturhaltung profitieren würden, da diese Gruppe keine signifikante Haltungsvervariabilität besitzt und damit das Risiko einer fehlerhaften Progredienzeinschätzung eher gering erscheint. Entgegen den Erwartungen zeigt auch die Gruppe mit L-Muster eine bemerkenswerte Stabilität in ihrer habituellen Haltung. Somit ergibt sich in diesem Versuchsaufbau kein offensichtlicher Vorteil für den Einsatz der standardisierten

Korrekturhaltung. Dennoch bleibt es von Bedeutung, die spezifischen Anweisungen vor der Einnahme der jeweiligen Haltung zu dokumentieren und einheitlich zu nutzen. Insbesondere in dieser Gruppe kann eine Abweichung in Form einer bewussten oder unterbewussten Autokorrektur in der Körperhaltung signifikante Auswirkungen auf die Messergebnisse haben.

## **5.6 Analyse der Haltungskorrekturfähigkeit anhand der Parameter der Seitabweichung in der Frontalebene**

In den letzten Abschnitten wurde vermehrt deutlich, dass die erwartete erhöhte Variabilität der habituellen Haltung in einigen Subgruppen nicht nachweisbar war. Darüber hinaus war die standardisierte Korrekturhaltung bezüglich der Stabilität der Messergebnisse der habituellen Haltung nicht überlegen. Die Unterschiede zwischen der standardisierten Korrekturhaltung und der habituellen Haltung im Kontext der Haltungsanalyse bei AIS-Patienten konnte in dieser Studie allerdings zur Bewertung von Haltungsunterschieden herangezogen werden. Daraus folgt die Überlegung, die sogenannte „Haltungskorrekturfähigkeit“ aus der Verteilung der Differenzen zwischen SK und H abzuleiten. Diese könnte als eigenständiger Parameter dienen, um die verbleibende Flexibilität einer Wirbelsäulendeformität zu beurteilen und zusätzliche Hinweise auf ein adäquates Therapieregime zu erhalten.

Zu diesem Zweck ist in Kapitel 4.3.7 ein Histogramm dargestellt (Abb. 43), das die Differenzen der Seitabweichung VP-DM (RMS) zwischen  $SK_1$  und  $H_1$  für alle Teilnehmenden in Millimetern zeigt. Die Analyse ergibt einen Mittelwert der Differenzen von -0,97 mm (SD = 3,63 mm), was darauf hindeutet, dass 60,52 % der Probandinnen und Probanden eine Reduktion der Seitabweichung VP-DM (RMS) zwischen 10,2 mm und 0,2 mm durch das Einnehmen einer standardisierten Korrekturhaltung erreichen konnten.

Beim zweiten Messtermin nach etwa 14 Tagen zeigt sich ein ähnliches Muster mit einem Mittelwert der Differenzen zwischen  $SK_2$  und  $H_2$  von -0,54 mm (SD = 3,78 mm). Auch hier deutet die verschobene Verteilung darauf hin, dass der überwiegende Teil der Personen (57,9 %) durch die standardisierte Korrekturhaltung eine Verbesserung der Seitabweichung VP-DM (RMS) erzielt. Da die Teilnehmenden der Studie in der Zwischenzeit ein breites Spektrum der konservativen Skoliotherapie in unterschiedlicher Intensität erfahren, stellt sich diese Entwicklung zunächst anders dar als erwartet. Die Problematik liegt hier in der fehlenden Standardisierung der habituellen Haltung. Angesichts fehlender spezifischer Anweisungen wird erwartet, dass die Probandinnen und Probanden eine habituelle Haltung einnehmen. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass bereits während der ersten Messung bewusste oder unbewusste Korrekturmechanismen angewendet werden, was bedeutet, dass

keine habituelle Haltung im eigentlichen Sinne vorliegt. Dies könnte den geringeren Anteil an Teilnehmenden mit einer entsprechenden Haltungskorrekturfähigkeit zum zweiten Messtermin erklären. Daher sollte vor Einführung einer solchen Messgröße wie der Haltungskorrekturfähigkeit an einer Standardisierung der habituellen Haltung geforscht werden.

Das Histogramm der Haltungsdifferenzen des Parameters Standardabweichung Symmetrielinie (RMS) in Abb. 45 aus Kapitel 4.3.7 zeigt einen deutlichen Peak zwischen 0 mm und -3,50 mm. Eine Verbesserung der Symmetrie durch eine vorhandene Haltungskorrekturfähigkeit liegt zwischen  $SK_1$  und  $H_1$  bei 64,5 % der Teilnehmenden vor. Es kommt daher zu einer mittleren Differenz von 1,14 mm mit einer SD von 3,10 mm. Am zweiten Messtag ist eine Verbesserung der Symmetrie durch die standardisierte Korrektur in 68,42 % der Fälle zu beobachten. Die mittlere Differenz beträgt -1,26 mm (SD = 2,60 mm). Daraus folgt die Annahme, dass dieser Parameter die Korrekturfähigkeit der Probandinnen und Probanden differenzierter abbilden kann als der Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS). Dies könnte auf der Anwendung der Symmetrielinie basieren, welche die axiale Rotationskomponente bei AIS-Betroffenen mitberücksichtigt. Möglicherweise ist die Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) auch weniger anfällig für bisher nicht berücksichtigte Störgrößen und sollte daher in die weitere Forschung der Haltungsanalyse bei AIS-Betroffenen verstärkt miteinbezogen werden.

Die Analyse der Haltungskorrekturfähigkeit im Sinne einer Reduktion der Oberflächenrotation erwies sich ähnlich zu den vorherigen Ergebnissen in den Subgruppen nicht als wegweisend. Der Mittelwert der Differenzen von  $0,01^\circ$  (SD =  $2,10^\circ$ ) am ersten Messtag und  $0,00^\circ$  (SD =  $2,78^\circ$ ) am zweiten Messtag deutet darauf hin, dass sich die Oberflächenrotation weitestgehend ausgleicht. Es ist daher davon auszugehen, dass bei den Differenzen der Oberflächenrotation (RMS) eine statistische Normalverteilung vorliegt und die bestehenden Schwankungen auf zufällige Variabilität zurückzuführen sind.

Insgesamt gibt die Analyse der Haltungskorrekturfähigkeit Hinweise darauf, dass sich die Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) am besten zur Untersuchung von Haltungsdifferenzen bei Personen mit AIS eignet. Die weitaus häufiger angewandte Seitabweichung VP-DM (RMS) kann Unterschiede ebenfalls objektivieren, allerdings mit geringerer statistischer Signifikanz. Die Oberflächenrotation eignet sich nur bedingt zur Evaluation der Haltungskorrektur, was sich mit den Erkenntnissen aus der Studie von Degenhardt et al. deckt (116).

## 5.7 Limitationen der Studie

In diesem Abschnitt erfolgt eine differenzierte, kritische Betrachtung der methodischen Aspekte, die bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit beachtet werden sollten.

Dazu gehört zunächst der Rekrutierungsprozess vor Beginn der Messungen im Rahmen dieser Studie. Das Screening zur Teilnahme sowie die mündliche Aufklärung der potenziellen Studienteilnehmenden konnten aus organisatorischen Gründen nur mittwochs im Rahmen der pflegerischen Aufnahme am Anreisetag stattfinden. Patientinnen und Patienten, bei denen die pflegerische Aufnahme für den Donnerstag nach ihrer Anreise terminiert wurden, konnten unabhängig von vorhandenem Interesse an der Studie nicht mehr rechtzeitig vor dem ersten Messtag (Freitag) aufgeklärt werden. Aufgrund des Besuchsverbotes im Rahmen der Covid-19-Pandemie war darüber hinaus ein Betreten der Klinik durch die Eltern nur am Anreisetag gestattet. Dies erschwerte zusätzlich das fristgerechte Einholen der Unterschrift mindestens eines Elternteils bei minderjährigen Studieninteressierten. Da die Vergabe der pflegerischen Aufnahmetermine auf dem Zufallsprinzip basierte und die Studiendurchführende keinen Einfluss auf diesen Prozess hatte, ist eine daraus resultierende Stichprobenverzerrung in Form eines Selection-Bias unwahrscheinlich.

Im Rahmen der Durchführung der rasterstereographischen Untersuchungen stellte die Gewährleistung eines adäquaten korsettfreien Intervalls vor den Messungen eine Herausforderung dar. Um mögliche Einflüsse auf die Haltung zu minimieren, wird in der Regel empfohlen, das Korsett mindestens zwei Stunden vor einer bildgebenden Untersuchung der Wirbelsäule nicht mehr zu tragen, da die Wirbelsäule verzögert auf das Ablegen des Korsetts reagiert (152, 180). Vor einer Röntgenuntersuchung wird aktuell in den zahlreichen Kliniken und Praxen empfohlen, das Korsett 24 Stunden vorher nicht mehr zu tragen. Aus ethischen Gesichtspunkten erwies sich eine solche Regelung jedoch nicht als zielführend, da sich die Korsetttragedauer durch die mehrstündige Therapie nach Katharina Schroth im Rahmen des Rehabilitationsaufenthaltes ohnehin deutlich verkürzt. Dies erscheint besonders in der Eingewöhnungsphase problematisch, auch im Hinblick drauf, dass bereits nach ca. zwei Stunden der größte Korrekturverlust nach Ablegen des Korsetts eintritt (180). Da die Termine zur Vermessung in der Regel direkt im Anschluss einer meist mehrstündigen Therapieeinheit stattfanden, gab es nur zwei Teilnehmende, die unmittelbar vor der Untersuchung noch ihr Korsett trugen, wodurch dieser Punkt in der Auswertung von geringer Relevanz ist.

Ein weiterer Teil des Untersuchungsverfahrens, der bewusst nicht standardisiert wurde, betrifft das Einnehmen der habituellen Haltung während der rasterstereographischen Messungen. Dieser Ansatz wurde gewählt, um das Setting in der klinischen Praxis so realitätsnah wie möglich abzubilden und damit die zugrundeliegende Problematik bestmöglich zu simulieren. Für das Einnehmen der habituellen Haltung gab es bis auf die korrekte Positionierung auf der Simulationsplattform, um einen gleichbleibenden Abstand zwischen dem Messgerät und der untersuchten Person sicherzustellen, keine weiteren spezifischen Anweisungen. Dadurch kann jedoch nicht gewährleistet werden, dass diese sogenannte „Gewohnheitshaltung“ tatsächlich das entspannte Stehen im Alltag ohne jeglichen Einfluss von bewussten oder unbewussten Korrekturmaßnahmen widerspiegelt. Es besteht die Möglichkeit, dass bereits hier unbeabsichtigte oder spontane Anpassungen der Körperhaltung vorgenommen wurden, da den Teilnehmenden zu Beginn der Studie nur der grundsätzliche Ablauf, nicht jedoch die dezidierten Instruktionen zur Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung bekannt waren.

Auch die standardisierte Korrekturhaltung birgt eine Limitation. Im Rahmen der rasterstereographischen Messung wird die Oberflächenrotation erfasst, diese ist jedoch störanfällig, insbesondere bei ausgeprägtem Muskelrelief oder Adipositas (85). Bei der Einnahme der standardisierten Korrekturhaltung veränderte sich bei nahezu allen Probandinnen und Probanden die Rückenoberfläche durch Anspannung der Muskulatur. Die außergewöhnlich stabilen Messergebnisse dieses Parameters im Vergleich der beiden Haltungen zueinander spricht allerdings nicht für einen relevanten Einfluss des veränderten Muskelreliefs auf die Oberflächenrotation und damit auch auf die restlichen Messgrößen. Eine Möglichkeit zur Beurteilung der Validität der Rotationsmessungen wäre die zusätzliche Messung der Rotation mittels eines Skoliometers nach Bunnell (63). Diese Methode wird auch von der SRS empfohlen und könnte in einer weiterführenden Studie zur Haltungsvervariabilität vor jedem Messtermin zum Einsatz kommen (58).

Zwischen beiden Messterminen im Verlauf der Studie liegen im Durchschnitt 14 Tage ( $M = 14,08$  Tage,  $SD = 1,39$  Tage). Neben einer gegebenenfalls bereits bestehenden Korsett-Therapie wird in dieser Zeit auch eine skoliosespezifische Intensivrehabilitation in der AKSK Bad Sobernheim durchgeführt. Die Intensität der Therapie unterscheidet sich in den ersten sieben Tagen je nachdem, ob es sich um einen Erstaufenthalt handelt oder bereits mehrere Aufenthalte erfolgten. Sie wird individuell an die Patientinnen und Patienten angepasst. Um mögliche Einflüsse dieser unterschiedlichen Gegebenheiten herauszufiltern, erfolgte die Einteilung in unterschiedliche Subgruppen nach Häufigkeit der bisherigen Klinikaufenthalte. Welchen Anteil die physiotherapeutischen Maßnahmen an einer möglichen Haltungskorrektur haben, ist nicht quantifizierbar, da zusätzlich bei ca. der Hälfte aller untersuchten Probandinnen und Probanden ein Behandlungskomplex aus PSSE und

Korsett-Therapie vorliegt. Dennoch entspricht dies dem klinischen Alltag, da häufig mehrere Therapien zur gleichen Zeit parallel durchgeführt werden und Verlaufsuntersuchungen einer ähnlichen Problematik unterliegen. In dieser Studie wurden die VRS-Messungen entsprechend dem bereits bestehenden Therapieplan terminiert, ohne jedoch Ruhephasen nach den oft mehrstündigen Physiotherapieeinheiten einzuplanen. Dies könnte einerseits körperliche Ermüdung vor den jeweiligen Messungen zur Folge haben. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass eine bereits korrigierte Haltung nach der Therapie noch für kurze Zeit fortbesteht, was zu einer Verfälschung der analysierten Haltungen führen kann.

Die videorasterstereographischen Aufnahmen wurden an den beiden Messterminen zu unterschiedlichen Uhrzeiten durchgeführt. Im Hinblick auf mögliche zirkadiane Einflüsse auf die Körperhaltung der Teilnehmenden muss dies als Limitation aufgeführt werden. Eine Studie von Gribble et al. ergab jedoch nur geringe Auswirkungen auf die Fähigkeit zur Haltungskontrolle durch die Uhrzeit der Messung, insbesondere bei statischen Körperhaltungen wie im vorliegenden Forschungsprojekt. Bei dynamischen Aufgaben zur Haltungskontrolle zeigten sich bessere Ergebnisse in der Umsetzung am Morgen im Vergleich zu abendlichen Messungen (181). Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Fähigkeit zur Haltungskontrolle stellt ein bestehender Schlafmangel dar (182). Eine amerikanische Studie ergab, dass 72,2 % der Schülerinnen und Schüler in den USA pro Nacht weniger als die empfohlenen acht bis zehn Stunden schlafen (183). Schlafmangel wird trotz seiner Relevanz in der Adoleszenz bisher in keiner Studie zur Untersuchung der Körperhaltung bei Patientinnen und Patienten mit AIS berücksichtigt. Dieser Faktor sollte in zukünftigen Studien perspektivisch stärker miteinbezogen werden.

Im Rahmen der statistischen Analyse der Daten nach Beendigung der Datenerhebung erfolgte eine Einteilung der Studienpopulation in Subgruppen, z. B. entsprechend nach Lokalisation der Hauptkrümmung, Krümmungsausmaß und der Anzahl der bisherigen Klinikaufenthalte. Die Anzahl der Personen in den jeweiligen Untergruppen variiert von  $n = 7$  bis  $n = 49$  und muss bei der korrekten Einordnung der Ergebnisse beachtet werden. Der t-Test berücksichtigt diese starken Unterschiede in der Gruppengröße allerdings in der Berechnung des p-Wertes. Dieser fällt bei einer geringen Stichprobenanzahl ohne gewährleistete Normalverteilung höher aus und erreicht demzufolge trotz möglicherweise tatsächlich vorhandener Differenzen zwischen den Mittelwerten nicht das erforderliche Signifikanzniveau von 5 %. Dies betrifft unter anderem die Gruppe der Teilnehmenden, bei welchen die sagittale Krümmung der Brustwirbelsäule im Vordergrund steht sowie die Gruppe der schweren Skoliosen. Da trotz allem relevante Ergebnisse und Tendenzen in diesen Gruppen vorliegen können, sollten diese in weiteren Studien mit einer größeren Anzahl an Teilnehmenden erneut untersucht werden.

Die in der Software des DIERS formetric III 4D implementierten Referenzwerte für die Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS) und Oberflächenrotation (RMS) wurden durch Untersuchungen an 497 Schulkindern der 5. Jahrgangsstufe zwischen 10 und 12 Jahren ermittelt (86, 106). Weitere Referenzwerte liegen für gesunde Erwachsene zwischen 18 und 70 Jahren vor (158). Allerdings decken diese Werte einen begrenzten Altersbereich ab, der nur einen kleinen Teil des Studienkollektivs repräsentiert. Für die Altersgruppe der 13- bis 17-jährigen liegen nach aktuellem Stand der Literatur noch keine umfassenden Referenzdaten vor. Stattdessen orientiert sich die Bewertung der Messwerte an der bestmöglichen Symmetrie, was bedeutet, dass eine Seitabweichung von Null Millimetern und eine Oberflächenrotation von Null Grad als bestmögliches Ergebnis angenommen wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass selbst bei asymptomatischen Personen ohne bekannte Wirbelsäulendeformitäten die Rückenoberfläche nicht zwangsläufig symmetrisch ist, weshalb diese Annahme nach Ermittlung entsprechender Referenzwerte überdacht werden sollte. Tatsächlich haben kürzlich veröffentlichte Forschungsarbeiten teilweise systematische asymmetrische Abweichungen der Körperhaltung bei gesunden Studienteilnehmenden in unterschiedlichen Messverfahren gezeigt. (114, 158). Es ist daher wichtig zu betonen, dass das Fehlen von Rückenbeschwerden kein Prädiktor für das Vorhandensein einer symmetrischen Wirbelsäule darstellt.

Bei der Diskussion der Ergebnisse finden sich zahlreiche Studien im Bereich der AIS-Forschung. Viele nutzen die international weit verbreitete Klassifikation nach Lenke (57, 184) zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Im Rahmen dieser Studie erfolgte dies jedoch nicht, da die klinische Klassifikation der Skoliose nach Skoliosemuster (s. Kapitel 2.2.4) auch im internationalen Raum besonders im Bereich der konservativen Skoliose-Therapie verstärkt Anwendung findet. Die Lenke-Klassifikation kann außerdem nur anhand von aktuellen, vorliegenden Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule erfolgen. Bei drei Teilnehmenden fehlte ein aktuelles Röntgenbild, der empfohlene Abstand zwischen zwei radiologischen Kontrolluntersuchungen entsprechend den Empfehlungen der SRS (58) war jedoch noch nicht überschritten. Daher wäre es ethisch nicht vertretbar, die Röntgenuntersuchungen zur Vervollständigung der Studiendaten vorzeitig durchzuführen.

Eine weitere Limitation der Studie besteht in der Erfassung der Vorerfahrung bezüglich einer skoliosespezifischen Physiotherapie außerhalb der bisherigen Klinikaufenthalte. Über zwei Drittel der Teilnehmenden gaben an, zum ersten Mal an einer Rehabilitationsmaßnahme im Rahmen der AIS teilgenommen zu haben. Ein wichtiger Bestandteil der konservativen Skoliosetherapie ist die tägliche Durchführung von Heimübungen sowie wöchentliche Physiotherapie nach Katharina Schroth unter professioneller Anleitung (122). Die Intensität und Art der bereits zuvor durchgeführten physiotherapeutischen Behandlung wurden jedoch bei den Studienteilnehmenden nicht erfragt. Eine gezielte Schulung der Propriozeption kann

laut D'Amico et al. einen Einfluss auf die Fähigkeit zur selbstständigen Haltungskorrektur haben (115). Dies kann bewusst oder unbewusst erfolgen und damit insbesondere auch die Messung der habituellen Haltung beeinflussen.

In dieser Studie wurden nur drei Parameter der Videorasterstereographie näher betrachtet. Es gibt jedoch laut Herstellerangaben zahlreiche unterschiedliche Variablen, die auf Wunsch bei einer rasterstereographischen Vermessung ausgegeben werden können (86). Degenhardt et al. untersuchte in seiner Studie 40 verschiedene VRS-Parameter, von denen er mit Hilfe von 36 verschiedenen Parametern die Studienteilnehmenden sicher voneinander differenzieren konnte (116). Darüber hinaus könnte die Erweiterung der erfassten Parameter, beispielsweise um Messgrößen der sagittalen Ebene, bei der Vermessung helfen, weitere Veränderungen der Haltung während einer aktiven Haltungskorrektur aufzudecken.

Im Folgenden wird die klinische Relevanz der Erkenntnisse der vorliegenden Studie näher betrachtet.

### **5.8 Klinische Relevanz der habituellen Haltung**

Das primäre Ziel dieses Forschungsprojektes besteht darin, den Effekt einer standardisierten Korrekturhaltung auf die Symmetrie der Wirbelsäule bei AIS-Betroffenen zu untersuchen und die gewonnenen Informationen für die Entwicklung eines standardisierten Untersuchungsablaufs zu nutzen. Die Intention hinter der Standardisierung liegt dabei nicht in der Verbesserung der Haltung im Sinne der Symmetrie, sondern vielmehr darin, eine zuverlässige und objektive Methode zu entwickeln, um zukünftig valide Verlaufsuntersuchungen durchführen zu können.

Eine hohe klinische Relevanz der Thematik dieser Studie ergibt sich aus der Beobachtung, dass uneinheitliche Anweisungen während der VRS-Messungen bei Personen mit AIS die Zuverlässigkeit der Videorasterstereographie beeinträchtigen können (7), obwohl sich diese bereits in mehreren Studien hinsichtlich Reliabilität und Validität bewährt hat (8, 95). Dies trifft auch auf die nativradiologische Bildgebung zu, was das Risiko einer fehlerhaften Interpretation hinsichtlich der Auswahl des angemessenen Therapieregimes anhand des gemessenen Cobb-Winkels erhöht (10).

Initial wurde angenommen, dass eine habituelle Haltung, welche im Rahmen von Verlaufsuntersuchungen bei AIS-Betroffenen regelhaft eingesetzt wird, mangels Standardisierung keine sichere Detektion von Veränderungen der Wirbelsäulendeformität ermöglicht. Um die Haltungsvervariabilität zwischen aufeinanderfolgenden Messungen zu reduzieren und valide Ergebnisse zu erhalten, wurde die standardisierte Korrekturhaltung in der vorliegenden Studie untersucht. Interessanterweise zeigt sich jedoch bei Betrachtung der Ergebnisse im Gesamtkollektiv, dass die habituelle Haltung entgegen den Erwartungen im

Verlauf eine höhere Konstanz der Werte aufweist als die standardisierte Korrekturhaltung. Diese Beobachtung legt nahe, dass möglicherweise nicht die habituelle Haltung selbst die Ursache der inkonsistenten Werte in Verlaufsuntersuchungen und damit nicht der alleinige Grund für eine erschwerte Beurteilung einer möglichen Progredienz der Skoliose im Rahmen von VRS-Messungen ist.

Stattdessen deutet vieles darauf hin, dass das eigentliche Problem in der fehlenden Standardisierung der Instruktionen zur Einnahme der habituellen Haltung liegt. Ein Grund, warum sich die Haltungsstabilität innerhalb der Studie so deutlich von dem empirischen Eindruck unterscheidet, könnte darin bestehen, dass in diesem experimentellen Setting die habituelle Haltung von den meisten Probandinnen und Probanden auch als eine solche Haltung ausgeführt wird, da der Untersuchungsablauf im Vorfeld bekannt war. In der klinischen Praxis wird häufig nicht eindeutig kommuniziert, ob eine Autokorrektur erwünscht ist. Da eine Progredienz abhängig vom jeweiligen Schweregrad der Skoliose weitreichende Folgen hinsichtlich einer Therapieeskalation haben kann, besteht möglicherweise die Gefahr, dass die untersuchten Personen durch eine angepasste Haltung versuchen, einer gegebenenfalls vorliegenden Verschlechterung der Wirbelsäulensymmetrie entgegenwirken, um ein besseres Ergebnis zu erreichen. Hierzu gibt es bisher allerdings keine wissenschaftlichen Studien. Unklarheiten bezüglich der Haltung während der VRS-Messungen führen in Folge dessen gegebenenfalls dazu, dass Patientinnen und Patienten bewusste oder unbewusste Korrekturen vornehmen und somit eine Autokorrekturkomponente mit in die Haltung einfließt, welche die Stabilität der Messwerte beeinflusst und somit signifikante Veränderungen entstehen, die möglicherweise auch therapeutische Konsequenzen haben können.

Die Problematik besteht hierbei darin, dass der bewusste oder unbewusste Versuch einer Autokorrektur der Körperhaltung möglicherweise entgegen den Erwartungen nicht zu der gewünschten symmetrischen Ausrichtung führt. Eine Studie von Kinel et al. ergab, dass 87,7 % der männlichen und 93,3 % der weiblichen untersuchten Personen mit AIS ohne PSSE-Erfahrung nicht in der Lage waren, ihre Körperhaltung gezielt in den verschiedenen Körperebenen im Sinne der Symmetrie zu verändern (117) . Folglich kann, abhängig von den bei der Autokorrektur beeinflussten Körperebenen, ein fälschlicher Verdacht auf eine Progredienz der Skoliose entstehen.

Eine weitere Besonderheit zeigt sich insbesondere auch bei Personen mit leichter Skoliose unter 20° nach Cobb. Aufgrund der anatomischen Gegebenheiten ermöglicht die Aufrichtung bei leichter Deformität ohnehin nur minimale Veränderungen in der Frontalebene im Sinne der Symmetrie, wodurch die Ergebnisse denen der Vergleiche zwischen habitueller Haltung und Haltung in Autokorrektur einer gesunden Population ähneln, wie in der Studie

von D'Amico et al. beschrieben wurde (115). Deshalb scheint die grundlegende Problematik der Haltungsvervariabilität in den Verlaufsmessungen für dieses Kollektiv eher von nachrangiger Bedeutung zu sein.

Bei Personen mit mittelschwerer Skoliose im Bereich von 20° bis 49° nach Cobb zeigen sich hingegen deutliche Differenzen zwischen den Durchschnittswerten der Haltungen H und SK. Dies legt nahe, dass diese spezifische Gruppe ein erhöhtes Risiko für eine gesteigerte Haltungsvervariabilität für Messungen in habitueller Haltung aufweist. In der Gruppe der schweren Skoliosen sind erhöhte Schwankungen in den Messwerten der verschiedenen Haltungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu beobachten. Dies könnte einerseits auf eine verringerte Genauigkeit der Messungen mit steigendem Cobb-Winkel zurückzuführen sein (176, 177), andererseits unterstreicht diese Beobachtung die Schwierigkeiten bei Verlaufsuntersuchungen von AIS-Patienten, da hier genaue Instruktionen die Basis für valide Messungen bilden. Angesichts der Tatsache, dass Patienten mit schwerer Skoliose oft an der Grenze zur Operationsindikation stehen, wird die Bedeutung einer Standardisierung in diesem Bereich umso deutlicher. Die Einnahme einer standardisierten Korrekturhaltung sollte hierbei jedoch am ehesten zur Visualisierung einer verbleibenden Korrekturfähigkeit genutzt werden, da bei alleiniger Betrachtung das Risiko einer Unterschätzung des Schweregrades der Skoliose besteht.

Als langfristige Lösung sollte daher die Standardisierung der Instruktionen zur habituellen Haltung in Betracht gezogen werden. Es sollte dabei deutlich gemacht werden, dass bei dieser Haltung keine autokorrektiven Anpassungen der Wirbelsäule erwünscht sind. Durch eine klare und einheitliche Anweisung könnte die Konsistenz und Zuverlässigkeit der Messungen bei Verlaufsuntersuchungen von Personen mit AIS verbessert werden. Bis dahin wird empfohlen, die jeweilige Körperhaltung während der Untersuchung ausführlich zu dokumentieren und einheitlich zu nutzen.

### **5.9 Ausblick**

Der folgende Ausblick zeigt verschiedene Bereiche auf, die in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter vertieft und verbessert werden können.

Es ist perspektivisch wichtig, den Rekrutierungsprozess so zu gestalten, dass eine umfassende und zeitgerechte Aufklärung der potenziellen Studienteilnehmenden ermöglicht wird. Sofern die Probandinnen und Probanden nicht zeitlich an einen Klinikaufenthalt gebunden sind, sollten flexiblere Termine für die Aufklärung in Betracht gezogen werden, um mehr Personen eine Studienteilnahme zu ermöglichen. Vor Beginn der Messungen im Rahmen einer weiterführenden Studie sollten auch klare und detaillierte Anweisungen für die habituelle Haltung entwickelt werden, um sicherzustellen, dass die erfassten Daten die

tatsächliche Alltagshaltung widerspiegeln. Es könnte außerdem von Vorteil sein, das Spektrum der untersuchten VRS-Parameter zu erweitern, um auch die Auswirkungen einer standardisierten Korrekturhaltung auf die sagittale Körperebene genauer zu untersuchen. In der Vorbereitung der VRS-Messungen ist außerdem darauf zu achten, dass alle Verlaufsuntersuchungen mit der gleichen Softwareversion des DIERS formetric III 4D durchgeführt werden.

Bei höherem Anteil an Probandinnen und Probanden mit Korsett-Therapie sollte ein korsettfreies Intervall vor den Messungen sichergestellt werden, um mögliche Einflüsse auf die habituelle Haltung oder darauffolgende Korrekturmaßnahmen zu verhindern. Des Weiteren sollte in zukünftigen Studien der Faktor „Schlafmangel“ berücksichtigt werden. Zur Vermeidung von Einflüssen durch zirkadiane Rhythmen wäre ein festes Zeitfenster für die jeweiligen Messungen im Verlauf zu empfehlen.

Bei zukünftigen Studien zur Haltungsvervariabilität sollte der Fokus außerdem verstärkt auf Probandinnen und Probanden mit schwerer AIS liegen, da diese Gruppe den Ergebnissen zu Folge deutlich von einer Standardisierung der VRS-Messung profitieren könnte. Bei Personen mit schwerer Wirbelsäulendeformität und bestehender Restflexibilität ist die Gefahr einer funktionellen Haltungsvervariabilität im Rahmen der Verlaufsuntersuchungen erhöht. Hier könnte auch das Maß der Haltungskorrekturfähigkeit als Indikator für eine noch vorhandene Flexibilität der Wirbelsäule sowie eine Veränderung der Propriozeption bzw. des Gleichgewichtsinnes dienen, sobald eine Standardisierung der habituellen Haltung entwickelt und etabliert wurde.

Die Unterschiede zwischen der habituellen Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung liegt in der vorliegenden Studie im Bereich von wenigen Millimetern. Die SOSORT spricht sich für die frühzeitige Anordnung von Röntgenaufnahmen außerhalb der üblichen Kontrollintervalle aus, falls relevante Veränderungen in den VRS-Ergebnissen im Verlauf auftreten (58). Bisher existieren jedoch keine genauen, einheitlichen Grenzwerte, ab welchen eine solche relevante Progression vorliegt. Dies erschwert die Auswahl des korrekten Zeitpunktes zur Durchführung einer vorzeitigen Röntgenaufnahme erheblich. Eine weiterführende Forschung in diesem Feld ist daher für die feste Verankerung der VRS in der Verlaufsdiagnostik der AIS unabdingbar.

Die Weiterentwicklung und Berücksichtigung dieser Aspekte in zukünftigen Studien könnten dazu beitragen, das Verständnis für die Haltungsvervariabilität bei Patientinnen und Patienten mit AIS zu verbessern und entsprechende Strategien zu entwickeln, um valide Verlaufsuntersuchungen mittels VRS-Messungen zu ermöglichen und somit additive Röntgenaufnahmen zu vermeiden. Bei weiterhin ausstehender Standardisierung im Rahmen der radiologischen Diagnostik könnten die entwickelten Haltungsformen auch hier

Anwendung finden, sodass eine korrekte Zuweisung zu einer adäquaten Therapieform garantiert werden kann.

## 6 Schlussfolgerung

Die SOSORT empfiehlt bereits seit zehn Jahren die Verwendung der VRS als unterstützende bildgebende Methode zur frühzeitigen Erkennung von Veränderungen der Wirbelsäulenverkrümmung bei AIS-Betroffenen, um die Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen zu reduzieren (58). In der praktischen Anwendung zeigte sich jedoch, dass unklare oder unterschiedliche Anweisungen zur Körperhaltung während der VRS-Messungen die Ergebnisse erheblich beeinflussen können. Dies kann unter anderem zu vorzeitigen Röntgenkontrollen bei falsch-positivem Progredienzverdacht führen.

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Untersuchung des Einflusses einer standardisierten Korrekturhaltung auf VRS-Messungen bei AIS-Betroffenen. Hierbei geht es in erster Linie darum, eine reliable und objektive Methode zu finden, um zukünftig valide Verlaufsuntersuchungen durchführen zu können. Die Studie kam zu dem Schluss, dass sich der Einsatz einer standardisierten Korrekturhaltung nicht für alle Patientinnen und Patienten gleichermaßen bewährte. So bleibt es unklar, ob Patientinnen und Patienten mit leichter Skoliose unter  $20^\circ$  nach Cobb von einer Standardisierung profitieren, da in dieser Gruppe keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Haltungen festgestellt werden konnten und nur ein geringes Maß an Haltungsvariabilität bestand. Hinsichtlich der Konstanz der Messwerte ergab sich gegenüber der habituellen Haltung kein Vorteil durch die Anwendung einer standardisierten Korrekturhaltung. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die gering ausgeprägte Deformität – ähnlich wie in einem gesunden Kollektiv – Veränderungen in der Frontalebene nur eingeschränkt zulässt (115).

AIS-Betroffene mit mittelschweren Skoliosen zeigten hingegen eine signifikante Reduktion der lateralen Wirbelsäulendeviation von der habituellen Haltung zur standardisierten Korrekturhaltung. Damit kann für diese Subgruppe die zugrundeliegende Alternativhypothese „Die Differenz zwischen den Messwerten der Haltungen SK und H ist signifikant kleiner als Null, d. h. ergibt eine signifikante Verbesserung der Symmetrie“ bei Betrachtung von bestimmten VRS-Parametern angenommen werden. Die Seitabweichung Symmetrieline (RMS) erwies sich dabei als besonders sensibler Parameter für Haltungsveränderungen im Vergleich zur routinemäßig verwendeten Seitabweichung VP-DM (RMS). Die Untersuchung des Parameters Seitabweichung Symmetrieline (RMS) zeigte konsistent signifikante Verbesserungen der Wirbelsäulensymmetrie zwischen beiden Haltungen zu den jeweiligen Messterminen, wobei die standardisierte Korrekturhaltung im zeitlichen Verlauf stabiler erschien als die habituelle Haltung. Die Betrachtung der Oberflächenrotation (RMS) zeigte insgesamt keine signifikanten Unterschiede und ermöglichte keine Unterscheidung der eingenommenen Haltungen. Bezüglich der diagnostischen Wertigkeit des Parameters stellt sich die aktuelle Studienlage ambivalent dar (105, 116).

In der Gruppe der schweren Skoliosen gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede, obwohl sich bei den absoluten Werten zwischen den Haltungen ausgeprägte Differenzen zeigten. Die habituelle Haltung in der Gruppe der schweren Skoliosen wies im Verlauf tendenziell eine Verschlechterung der Wirbelsäulensymmetrie auf, die nicht durch strukturelle Veränderungen zu erklären war. Die standardisierte Korrekturhaltung zeigte hingegen ein geringeres Ausmaß an Schwankungen der Messwerte zwischen den einzelnen Messterminen. Bei der statistischen Bewertung dieser Ergebnisse muss allerdings die geringe Gruppengröße von  $n = 7$  berücksichtigt werden.

Insgesamt gibt die Analyse der Daten Hinweise darauf, dass sich die Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) am besten zur Untersuchung von Haltungsunterschieden bei Personen mit AIS eignet. Die weitaus häufiger angewandte Seitabweichung VP-DM (RMS) kann Unterschiede zwischen zwei Haltungen ebenfalls objektivieren, allerdings mit geringerer statistischer Signifikanz. Bei der Beurteilung der Ergebnisse erscheint es außerdem wichtig, die individuelle Vorerfahrung im Bereich der konservativen Skoliotherapie zu berücksichtigen, da diese Einflüsse auf die Körperhaltung der Probandinnen und Probanden zeigten, welche in weiterführenden Studien genauer untersucht werden sollten.

Es stellt sich abschließend die Frage, welche der beiden untersuchten Haltungen am verlässlichsten den tatsächlichen Cobb-Winkel repräsentiert, welcher wiederum die Basis der weiteren Therapieentscheidungen bildet. Entgegen den ursprünglichen Erwartungen zeigt die habituelle Haltung bei Betrachtung des Gesamtkollektivs ein höheres Maß an Konstanz als die neu eingeführte standardisierte Korrekturhaltung, sofern keine Autokorrekturkomponente miteinfließt. Die habituelle Haltung entspricht im Idealfall der alltäglichen Körperhaltung, die den größten Anteil des Tages einnimmt und somit ein realistisches Bild der vorliegenden Krümmung zeigt. Eine solche Haltung lässt sich jedoch aufgrund der hohen Individualität nur schwer standardisieren. Auf der anderen Seite bietet die standardisierte Korrekturhaltung den Vorteil, indirekt Rückschlüsse auf die verbleibende Flexibilität und das damit verbundene Korrekturpotenzial der Wirbelsäulendeformität zu ermöglichen, sofern eine valide Referenz zum Vergleich vorliegt. Tendenzuell könnte es durch die aktive Aufrichtung der Wirbelsäule auch zum Unterschätzen des Cobb-Winkels kommen (10). Insgesamt ist es daher besonders in den Gruppen der mittelschweren und schweren Skoliosen entscheidend, die während der Bildgebung zugrundeliegende Körperhaltung zu dokumentieren und einheitlich im Rahmen der Verlaufsuntersuchungen zu verwenden, da hier signifikante Unterschiede zwischen beiden Haltungen vorliegen.

In zukünftigen Studien zur Haltungsvariabilität sollte der Fokus verstärkt auf Teilnehmende mit schwerer AIS liegen, da diese Gruppe besonders von einer Standardisierung der VRS-

Messung profitieren könnte. Bei Personen mit schwerer Wirbelsäulendeformität und geringem Maß an Rigidität besteht ein erhöhtes Risiko für eine ausgeprägtere Haltungsveränderbarkeit während der Verlaufsuntersuchungen. Die Haltungskorrekturfähigkeit könnte als Indikator für die vorhandene Restflexibilität der Wirbelsäule und Veränderungen in der Propriozeption und dem Gleichgewichtssinn dienen. Die Berücksichtigung dieser Aspekte in zukünftigen Studien könnte das Verständnis für die Haltungsveränderbarkeit bei AIS-Patienten verbessern und Strategien entwickeln, um valide Verlaufsuntersuchungen mittels VRS-Messungen zu ermöglichen und damit zusätzliche Röntgenaufnahmen zu vermeiden.

Perspektivisch sollte das Ziel in erster Linie darin liegen, die habituelle Haltung derart zu standardisieren, dass eine bewusste oder unbewusste Autokorrekturkomponente bei den Verlaufsuntersuchungen sicher vermieden wird. Dies könnte längerfristig auch in der radiologischen Diagnostik Anwendung finden, um eine korrekte Zuweisung zu geeigneten Therapieformen zu gewährleisten.

## 7 Zusammenfassung

Die adoleszente idiopathische Skoliose (AIS) zählt mit einer Prävalenz von 0,47 bis 5,2 % zu den häufigsten Wirbelsäulendeformitäten in der Adoleszenz. Als Skoliose wird eine dreidimensionale Achsabweichung der Wirbelsäule mit strukturellen Veränderungen der Wirbelkörper bei einem Krümmungswinkel nach Cobb von mindestens 10° bezeichnet. Die Videorasterstereographie (VRS) wurde als ergänzende, strahlungsfreie Alternative zur Röntgenuntersuchung, welche derzeit den Goldstandard der Diagnostik darstellt, entwickelt. Die Anwendung dieses bildgebenden Verfahrens im Klinikalltag hat gezeigt, dass uneinheitliche Instruktionen zur Positionierung es bisher trotz guter Reliabilität und Validität der Methode nicht erlauben, zuverlässige Rückschlüsse auf Handlungsveränderungen bei Patientinnen und Patienten mit AIS zu ziehen. Vorrangiges Ziel des Forschungsprojektes ist es daher, den Effekt einer standardisierten Korrekturhaltung auf die Symmetrie der Wirbelsäule zu untersuchen und langfristig einen standardisierten Untersuchungsablauf zu entwickeln.

Im Rekrutierungszeitraum von April bis Juli 2021 konnten 89 Studienteilnehmende zwischen 10 und 18 Jahren mit AIS sowie geplantem stationären Rehabilitationsaufenthalt über mindestens drei Wochen in der Asklepios Katharina-Schroth-Klinik Bad Sobernheim eingeschlossen werden. Insgesamt absolvierten alle Teilnehmenden vier videorasterstereographische Messungen mit dem DIERS formetric III 4D (DIERS GmbH, Schlangenbad, Deutschland) an zwei Terminen im Abstand von ca. 14 Tagen während ihres Klinikaufenthaltes. Dabei erfolgte die erste Messung des jeweiligen Termins in habitueller Haltung (H) ohne genormte Anweisung zur Positionierung. Bei der darauffolgenden zweiten Messung erhielten die Teilnehmenden Instruktionen zur Einnahme einer standardisierten Korrekturhaltung (SK). Die statistische Auswertung erfolgte mittels eines einseitigen verbundenen t-Tests. Der primäre Endpunkt dieser prospektiven Längsschnittstudie war die Reduktion der mit dem DIERS formetric III 4D gemessenen Seitabweichung der Wirbelsäulenmittellinie oder Symmetrielinie von der Verbindung zwischen zwei definierten anatomischen Fixpunkten in Millimetern sowie der Oberflächenrotation in Grad. Alle drei Messvariablen wurden vom System als quadratisches Mittel (RMS) ausgegeben. Bei Betrachtung der Seitabweichung VP-DM (RMS) als Standardparameter in videorasterstereographischen Messungen zeigte sich eine signifikante Verbesserung der Symmetrie um -8,19 % ( $p = 0,011$ ) bzw. -0,97 mm ( $SD = 3,63$  mm) zwischen der habituellen Haltung ( $H_1$ ) und der standardisierten Korrekturhaltung ( $SK_1$ ) am ersten Messtermin. Die Haltungen  $H_2$  zu  $SK_2$  am zweiten Messtermin wiesen eine prozentuale Verbesserung von -4,56 % (-0,54 mm,  $SD = 3,78$  mm) auf, dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant ( $p = 0,110$ ). Auch bei der Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) lag eine signifikante

Verbesserung der Symmetrie um -19,02 % (-1,13 mm, SD = 3,10 mm,  $p = 0,001$ ) zwischen der habituellen Haltung und der standardisierten Korrekturhaltung am ersten Messtermin vor. Der Unterschied der Haltungen  $H_2$  zu  $SK_2$  am zweiten Messtermin wies eine prozentuale Verbesserung von -21,47 % (-1,26 mm, SD = 2,60 mm) auf, dieser war mit einem p-Wert von  $<0,001$  ebenfalls signifikant. Der Parameter „Oberflächenrotation (RMS)“ zeigte keine signifikanten Differenzen der Mittelwerte aus den unterschiedlichen Haltungen.

Die überwiegend signifikanten Unterschiede der Mittelwerte zwischen den Haltungen H und SK zeigten, dass eine aktiv durchgeführte Haltungskorrektur auf Grundlage von zwei der drei verwendeten Parameter objektiviert werden konnte. Die beiden Parameter Seitabweichung VP-DM (RMS) sowie Seitabweichung Symmetrielinie (RMS) eigneten sich besonders zur Differenzierung der eingenommenen Haltungen, wobei Letztere bei insgesamt geringerer Streuung sensitiver auf Haltungsveränderungen reagierte.

Leichte Skoliosen unter  $20^\circ$  nach Cobb zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen Haltungen und hatten nur eine geringe Haltungsvariabilität, vergleichbar mit einem gesunden Kollektiv. Bei mittelschweren Skoliosen gab es eine signifikante Reduktion der lateralen Wirbelsäulendeviation zwischen habitueller und standardisierter Korrekturhaltung, insbesondere bei der Anwendung des Parameters Seitabweichung Symmetrielinie (RMS). Schwere Skoliosen zeigten trotz ausgeprägter Unterschiede in den Werten keine statistisch signifikanten Veränderungen zwischen den Haltungen, möglicherweise aufgrund ihrer geringen Gruppengröße. Die individuelle Vorerfahrung in der konservativen Skoliotherapie könnte die Körperhaltung beeinflussen und sollte in weiteren Studien genauer untersucht werden.

In zukünftigen Studien zur Haltungsvariabilität sollte der Fokus verstärkt auf Teilnehmende mit schwerer AIS liegen, da diese Personen von einer Standardisierung der VRS-Messung besonders profitieren könnten. AIS-Betroffene mit schwerer Wirbelsäulendeformität und geringer Rigidität zeigen erfahrungsgemäß eine erhöhte Haltungsvariabilität. Die weitere Untersuchung dieser Thematik könnte das Verständnis für die Haltungsvariabilität verbessern, valide Verlaufsuntersuchungen ermöglichen und dabei helfen, zusätzliche Röntgenaufnahmen zu vermeiden. Langfristig sollte das Hauptziel darin liegen, die habituelle Haltung so zu standardisieren, dass eine unbeabsichtigte Autokorrektur während der Verlaufsuntersuchungen zuverlässig vermieden wird. Dieser Ansatz könnte auch in der radiologischen Diagnostik implementiert werden, um eine korrekte Zuweisung zu geeigneten Therapieformen sicherzustellen. Die bereits entwickelte standardisierte Korrekturhaltung könnte darüber hinaus in der Erfassung der verbleibenden Haltungskorrekturfähigkeit Anwendung finden.

## 8 Literaturverzeichnis

1. Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *Journal of Children's Orthopaedics*. 2013;7(1):3-9.
2. Trobisch P, Suess O, Schwab F. Idiopathic scoliosis. *Dtsch Arztebl Int*. 2010;107(49):875-83; quiz 84.
3. Simons MR, Siewe J, Scheyerer MJ. Skoliosen. In: Stein GM, Eysel P, Scheyerer MJ, editors. *Expertise Orthopädie und Unfallchirurgie Wirbelsäule*. 1. Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2019. p. 284-97.
4. Liljenqvist U, Halm H, Hierholzer E, Drerup B, Weiland M. Die dreidimensionale Oberflächenvermessung von Wirbelsäulendeformitäten anhand der Videorasterstereographie\*. *Z Orthop Unfall*. 1998;136(01):57-64.
5. Drerup B. Rasterstereographic measurement of scoliotic deformity. *Scoliosis*. 2014;9(1):22.
6. Degenhardt B, Starks Z, Bhatia S, Franklin GA. Appraisal of the DIERS method for calculating postural measurements: an observational study. *Scoliosis Spinal Disord*. 2017;12:28.
7. Schumann K, Püschel I, Maier-Hennes A, Weiss HR. Postural changes in patients with scoliosis in different postural positions revealed by surface topography. *Stud Health Technol Inform*. 2008;140:140-3.
8. Tabard-Fougère A, Bonnefoy-Mazure A, Hanquinet S, Lascombes P, Armand S, Dayer R. Validity and Reliability of Spine Rasterstereography in Patients With Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42(2):98-105.
9. Cheung PWH, Wong HL, Lau DSL, Cheung JPY. Directed Versus non-directed Standing Postures in Adolescent Idiopathic Scoliosis: Its Impact on Curve Magnitude, Alignment and Clinical Decision Making. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2023.
10. Skaggs K, Lin AJ, Andras LM, Illingworth KD, Skaggs DL. Standing in Schroth trained position significantly changes Cobb angle and leg length discrepancy: a pilot study. *Spine Deformity*. 2020;8(6):1185-92.
11. Stücker R. Die idiopathische Skoliose. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*. 2010;5(01):39–56.
12. Lehnert-Schroth C, Gröbl P, Käfer S, Schlegel KF. Dreidimensionale Skoliosebehandlung: Atmungs-Orthopädie System Schroth ; ein physiotherapeutisches Konzept zur Verbesserung von Wirbelsäulenverkrümmungen. 8., grundlegend überarb. und erw. Aufl. ed. München: Elsevier Urban & Fischer; 2014. 226 p.
13. Bernstein P, Seifert J. Die Skoliose im Wachstumsalter. *ortho-unfall-u2d*. 2015;10(04):259-76.
14. Manca A, Monticone M, Cugusi L, Doria C, Tranquilli-Leali P, Deriu F. Back surface measurements by rasterstereography for adolescent idiopathic scoliosis: from reproducibility to data reduction analyses. *European spine journal : official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society*. 2018.
15. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH. 1.2 Knöcherne Wirbelsäule. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH, editors. *Prometheus LernAtlas - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. 6., vollständig überarbeitete Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2022.
16. Pflugmacher R. Skoliose und Kyphose. In: Ruchholtz S, Wirtz DC, editors. *Orthopädie und Unfallchirurgie essentials*. 4., unveränderte Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2021.
17. Bullmann V, Liljenqvist U. Die idiopathische Skoliose. *ortho-unfall-u2d*. 2019;14(06):571-85.
18. Stücker R. Die idiopathische Skoliose. *ortho-unfall-u2d*. 2010;5(01):39-56.
19. Moen KY, Nachemson AL. Treatment of Scoliosis: An Historical Perspective. *Spine*. 1999;24(24):2570.
20. Reuber M, Schultz A, Mcneill T, Spencer D. Trunk Muscle Myoelectric Activities in Idiopathic Scoliosis. *Spine*. 1983;8(5):447-56.

21. W. SE. ROTATIONAL LORDOSIS: THE DEVELOPMENT OF THE SINGLE CURVE. *The Journal of Bone and Joint Surgery British* volume. 1952;34-B(3):421-7.
22. Guo X, Chau WW, Chan YL, Cheng JC. Relative anterior spinal overgrowth in adolescent idiopathic scoliosis. Results of disproportionate endochondral-membranous bone growth. *J Bone Joint Surg Br.* 2003;85(7):1026-31.
23. Guo X, Chau WW, Chan YL, Cheng JCY, Burwell RG, Dangerfield PH. Relative anterior spinal overgrowth in adolescent idiopathic scoliosis—result of disproportionate endochondral-membranous bone growth? *European Spine Journal.* 2005;14(9):862-73.
24. Hefti F. Pathogenesis and biomechanics of adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *Journal of Children's Orthopaedics.* 2013;7(1):17-24.
25. Mau H. Spezifizierung der korrespondierenden Wachstums-Gesetze von Hueter-Volkman und Pauwels (Wachstumsdeformitäten) und ihre Beziehung zu den Belastungsdeformitäten. *Z Orthop Unfall.* 1984;122(03):293-8.
26. Dayer R, Haumont T, Belaieff W, Lascombes P. Idiopathic scoliosis: etiological concepts and hypotheses. *Journal of Children's Orthopaedics.* 2013;7(1):11-6.
27. Zaydman AM, Strokova EL, Pahomova NY, Gusev AF, Mikhaylovskiy MV, Shevchenko AI, et al. Etiopathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis: Review of the literature and new epigenetic hypothesis on altered neural crest cells migration in early embryogenesis as the key event. *Med Hypotheses.* 2021;151:110585.
28. Takahashi Y, Kou I, Takahashi A, Johnson TA, Kono K, Kawakami N, et al. A genome-wide association study identifies common variants near *LBX1* associated with adolescent idiopathic scoliosis. *Nature Genetics.* 2011;43(12):1237-40.
29. Zhu Z, Tang NL-S, Xu L, Qin X, Mao S, Song Y, et al. Genome-wide association study identifies new susceptibility loci for adolescent idiopathic scoliosis in Chinese girls. *Nature Communications.* 2015;6(1):8355.
30. Zhu Z, Xu L, Leung-Sang Tang N, Qin X, Feng Z, Sun W, et al. Genome-wide association study identifies novel susceptible loci and highlights *Wnt/beta-catenin* pathway in the development of adolescent idiopathic scoliosis. *Human Molecular Genetics.* 2017;26(8):1577-83.
31. Kou I, Otomo N, Takeda K, Momozawa Y, Lu H-F, Kubo M, et al. Genome-wide association study identifies 14 previously unreported susceptibility loci for adolescent idiopathic scoliosis in Japanese. *Nature Communications.* 2019;10(1).
32. Pérez-Machado G, Berenguer-Pascual E, Bovea-Marco M, Rubio-Belmar PA, García-López E, Garzón MJ, et al. From genetics to epigenetics to unravel the etiology of adolescent idiopathic scoliosis. *Bone.* 2020;140:115563.
33. Niethard FU, Pfeil J, Biberthaler P. Idiopathische Skoliose. In: Niethard FU, Pfeil J, Biberthaler P, editors. *Duale Reihe Orthopädie und Unfallchirurgie.* 8., unveränderte Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2017.
34. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH. 1.17 Knöcherner Brustkorb. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH, editors. *Prometheus LernAtlas - Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem.* 5., vollständig überarbeitete Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2018.
35. Hoelen TA, Willems PC, Arts JJ, Van Mastrigt G, Evers S. The economic and societal burden associated with adolescent idiopathic scoliosis: A burden-of-disease study protocol. *N Am Spine Soc J.* 2023;14:100231.
36. Malik AT, Yu E, Kim J, Khan SN. Understanding costs in a 90-day episode of care following posterior spinal fusions for adolescent idiopathic scoliosis. *World Neurosurgery.* 2019;130:e535-e41.
37. Martin CT, Pugely AJ, Gao Y, Mendoza-Lattes SA, Ilgenfritz RM, Callaghan JJ, et al. Increasing hospital charges for adolescent idiopathic scoliosis in the United States. *Spine (Phila Pa 1976).* 2014;39(20):1676-82.
38. Glassman SD, Carreon LY, Shaffrey CI, Polly DW, Ondra SL, Berven SH, et al. The costs and benefits of nonoperative management for adult scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976).* 2010;35(5):578-82.

39. Danielsson AJ, Nachemson AL. Back Pain and Function 23 Years After Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Case-Control Study—Part II. *Spine*. 2003;28(18):E373-E83.
40. J. Danielsson A, L. Nachemson A. Back Pain and Function 22 Years After Brace Treatment for Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Case-Control Study—Part I. *Spine*. 2003;28(18):2078-85.
41. Danielsson AJ, Wiklund I, Pehrsson K, Nachemson AL. Health-related quality of life in patients with adolescent idiopathic scoliosis: a matched follow-up at least 20 years after treatment with brace or surgery. *European Spine Journal*. 2001;10(4):278-88.
42. Danielsson AJ, Nachemson AL. Childbearing, Curve Progression, and Sexual Function in Women 22 Years After Treatment for Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Case–Control Study. *Spine*. 2001;26(13):1449-56.
43. Theroux J, Brown BT, Marchese R, Selby M, Cope V, Mcaviney J, et al. The impact of pregnancy on women with adolescent idiopathic scoliosis: a scoping review. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2023;59(4):505-21.
44. Weiss H-R, Karavidas N, Moramarco M, Moramarco K. Long-Term Effects of Untreated Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Review of the Literature. *Asian Spine Journal*. 2016;10(6):1163.
45. Weinstein SL, Ponseti IV. Curve progression in idiopathic scoliosis. *JBJS*. 1983;65(4):447-55.
46. Weinstein SL. The Natural History of Scoliosis in the Skeletally Mature Patient. *Iowa Orthop J*. 1986;6:44-52.
47. Weinstein SL. The Natural History of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *J Pediatr Orthop*. 2019;39(Issue 6, Supplement 1 Suppl 1):S44-s6.
48. Nachemson A, Lonstein J, Weinstein S. Report of the prevalence and natural history committee. Park Ridge, Ill: Natural Committee of Scoliosis Research Society. 1982.
49. Lenz M, Oikonomidis S, Harland A, Fürnstahl P, Farshad M, Bredow J, et al. Scoliosis and Prognosis—a systematic review regarding patient-specific and radiological predictive factors for curve progression. *European Spine Journal*. 2021;30(7):1813-22.
50. Fong DY, Lee CF, Cheung KM, Cheng JC, Ng BK, Lam TP, et al. A meta-analysis of the clinical effectiveness of school scoliosis screening. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35(10):1061-71.
51. Oetgen ME, Heyer JH, Kelly SM. Scoliosis Screening. *JAAOS - Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2021;29(9):370-9.
52. Weinstein SL, Dolan LA, Spratt KF, Peterson KK, Spoonamore MJ, Ponseti IV. Health and Function of Patients With Untreated Idiopathic Scoliosis. *JAMA*. 2003;289(5):559.
53. Freidel K, Petermann F, Reichel D, Steiner A, Warschburger P, Weiss HR. Quality of Life in Women With Idiopathic Scoliosis. *Spine*. 2002;27(4):E87-E91.
54. Payne WKI, Ogilvie JW, Resnick MD, Kane RL, Transfeldt EE, Blum RW. Does Scoliosis Have a Psychological Impact and Does Gender Make a Difference? *Spine*. 1997;22(12):1380-4.
55. Coe JD, Arlet V, Donaldson W, Berven S, Hanson DS, Mudiya R, et al. Complications in Spinal Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis in the New Millennium. A Report of the Scoliosis Research Society Morbidity and Mortality Committee. *Spine*. 2006;31(3):345-9.
56. Dubousset J, Herring JA, Shufflebarger H. The crankshaft phenomenon. *J Pediatr Orthop*. 1989;9(5):541-50.
57. Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, et al. Adolescent Idiopathic Scoliosis : A New Classification to Determine Extent of Spinal Arthrodesis. *JBJS*. 2001;83(8):1169-81.
58. Knott P, Pappo E, Cameron M, Demauroy J, Rivard C, Kotwicki T, et al. SOSORT 2012 consensus paper: reducing x-ray exposure in pediatric patients with scoliosis. *Scoliosis*. 2014;9(1):4.
59. Justice CM, Miller NH, Marosy B, Zhang J, Wilson AF. Familial Idiopathic Scoliosis: Evidence of an X-Linked Susceptibility Locus. *Spine*. 2003;28(6):589-94.

60. Riseborough EJ, Wynne-Davies R. A genetic survey of idiopathic scoliosis in Boston, Massachusetts. *J Bone Joint Surg Am.* 1973;55(5):974-82.
61. Adams W. Lectures on the Pathology and Treatment of Lateral and Other Forms of Curvature of the Spine. *Glasgow Med J.* 1882;18(6):462-3.
62. Bruns J, Bruns AJS. Wirbelsäule. In: Bruns J, Bruns AJS, editors. *Klinische Untersuchung der Halte- und Bewegungsorgane.* 1. Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2019.
63. Bunnell WP. An objective criterion for scoliosis screening. *J Bone Joint Surg Am.* 1984;66(9):1381-7.
64. Malzkorn R. Nervenwurzelkompressionssyndrome. In: Buckup J, Hoffmann R, editors. *Klinische Tests an Knochen, Gelenken und Muskeln.* 6., überarbeitete und erweiterte Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2018.
65. Cobb J. Outline for the study of scoliosis. *Instr Course Lect AAOS.* 1948;5:261-75.
66. Schönagel B. Beurteilungskriterien. In: Stein GM, Eysel P, Scheyerer MJ, editors. *Expertise Orthopädie und Unfallchirurgie Wirbelsäule.* 1. Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2019.
67. Nash CL, Jr., Moe JH. A study of vertebral rotation. *J Bone Joint Surg Am.* 1969;51(2):223-9.
68. Risser JC. The classic: The iliac apophysis: an invaluable sign in the management of scoliosis. 1958. *Clin Orthop Relat Res.* 2010;468(3):643-53.
69. Sanders JO, Khoury JG, Kishan S, Browne RH, Mooney JF, 3rd, Arnold KD, et al. Predicting scoliosis progression from skeletal maturity: a simplified classification during adolescence. *J Bone Joint Surg Am.* 2008;90(3):540-53.
70. Greulich WW, Pyle SI. *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist.* Stanford: Stanford University Press; 1959. 272 p.
71. Marks MC, Stanford CF, Mahar AT, Newton PO. Standing lateral radiographic positioning does not represent customary standing balance. *Spine (Phila Pa 1976).* 2003;28(11):1176-82.
72. Marks M, Stanford C, Newton P. Which lateral radiographic positioning technique provides the most reliable and functional representation of a patient's sagittal balance? *Spine (Phila Pa 1976).* 2009;34(9):949-54.
73. Hui SCN, Pialasse J-P, Wong JYH, Lam T-P, Ng BKW, Cheng JCY, et al. Radiation dose of digital radiography (DR) versus micro-dose x-ray (EOS) on patients with adolescent idiopathic scoliosis: 2016 SOSORT- IRSSD "John Sevastic Award" Winner in Imaging Research. *Scoliosis and Spinal Disorders.* 2016;11(1).
74. Ilharreborde B, Ferrero E, Alison M, Mazda K. EOS microdose protocol for the radiological follow-up of adolescent idiopathic scoliosis. *European Spine Journal.* 2016;25(2):526-31.
75. Farivar D, Skaggs DL, Gabriel K, Illingworth KD. Breast Cancer Incidence, Mortality, and Cost in Adolescent Idiopathic Scoliosis Patients and the Role of Low Dose Biplanar Radiography. *J Am Acad Orthop Surg.* 2023.
76. Takasaki H. Moiré Topography. *Appl Opt.* 1970;9(6):1467-72.
77. Meadows DM, Johnson WO, Allen JB. Generation of Surface Contours by Moiré Patterns. *Appl Opt.* 1970;9(4):942-7.
78. Betsch M, Wild M, Rath B, Tingart M, Schulze A, Quack V. Strahlenfreie Diagnostik bei Skoliosen. *Der Orthopäde.* 2015;44(11):845-51.
79. Frobin W, Hierholzer E. Analysis of human back shape using surface curvatures. *Journal of Biomechanics.* 1982;15(5):379-90.
80. Ng S-Y, Bettany-Saltikov J. Imaging in the Diagnosis and Monitoring of Children with Idiopathic Scoliosis. *Open Orthop J.* 2017;11(1):1500-20.
81. Gerlach KK, M. DIERS formetric 3D / 4D Wirbelsäulen- und Haltungsvermessung - Therapeutische Konsequenzen - Fallbeispiele aus der Praxis. 2014.
82. Rompe J-D, Betz U, Heine J. Evaluation der Wirbelsäulenform. In: Krämer J, editor. *Orthopädie und Orthopädische Chirurgie – Wirbelsäule, Thorax.* 1. Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2003.

83. De Korvin G, Randriaminahisoa T, Cugy E, Cheze L, De Sèze M. Detection of progressive idiopathic scoliosis during growth using back surface topography: A prospective study of 100 patients. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2014;57(9-10):629-39.
84. Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Adv Opt Photon*. 2011;3(2):128-60.
85. Asamoah V, Mellerowicz H, Venus J, Klöckner C. Oberflächenvermessung des Rückens. *Der Orthopäde*. 2000;29(6):480-9.
86. Sowa M, Gerlach, K. Handbuch DIERS formetric III 4D. Schlangenbad, Germany; 2018.
87. Drerup B, Hierholzer E. Back shape measurement using video rasterstereography and three-dimensional reconstruction of spinal shape. *Clinical Biomechanics*. 1994;9(1):28-36.
88. Drerup B, Hierholzer E. Automatic localization of anatomical landmarks on the back surface and construction of a body-fixed coordinate system. *Journal of Biomechanics*. 1987;20(10):961-70.
89. Grivas T, Tsilimidos G, Verras C, Botsios K, Chatzisaroglou M. Which is the most prominent spinous process in the cervico-thoracic spinal junction? A radiological study in a Mediterranean population sample. *Scoliosis*. 2013;8(S2):O40.
90. Drerup B, Hierholzer E. Assessment of scoliotic deformity from back shape asymmetry using an improved mathematical model. *Clinical Biomechanics*. 1996;11(7):376-83.
91. Mehta B, Chockalingam N, Shannon T, Jevtic N, Lazic F, Jasani V, et al. Non-Invasive Assessment of Back Surface Topography: Technologies, Techniques and Clinical Utility. *Sensors*. 2023;23(20):8485.
92. Su X, Dong R, Wen Z, Liu Y. Reliability and Validity of Scoliosis Measurements Obtained with Surface Topography Techniques: A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*. 2022;11(23):6998.
93. Betsch M, Wehrle R, Dor L, Rapp W, Jungbluth P, Hakimi M, et al. Spinal posture and pelvic position during pregnancy: a prospective rasterstereographic pilot study. *European Spine Journal*. 2015;24(6):1282-8.
94. Knott P, Sturm P, Lonner B, Cahill P, Betsch M, Mccarthy R, et al. Multicenter Comparison of 3D Spinal Measurements Using Surface Topography With Those From Conventional Radiography. *Spine Deform*. 2016;4(2):98-103.
95. Frerich JM, Hertzler K, Knott P, Mardjetko S. Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *Open Orthop J*. 2012;6(1):261-5.
96. Ohlendorf D, Avaniadi I, Adjami F, Christian W, Doerry C, Fay V, et al. Standard values of the upper body posture in healthy adults with special regard to age, sex and BMI. *Scientific Reports*. 2023;13(1).
97. Mohokum M, Mendoza S, Udo W, Sitter H, Paletta JR, Skwara A. Reproducibility of rasterstereography for kyphotic and lordotic angles, trunk length, and trunk inclination: a reliability study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35(14):1353-8.
98. Tabard-Fougère A, De Bodman C, Dhoub A, Bonnefoy-Mazure A, Armand S, Dayer R. Three-Dimensional Spinal Evaluation Using Rasterstereography in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis: Is It Closer to Three-Dimensional or Two-Dimensional Radiography? *Diagnostics*. 2023;13(14):2431.
99. Morrissy RT, Goldsmith GS, Hall EC, Kehl D, Cowie GH. Measurement of the Cobb angle on radiographs of patients who have scoliosis. Evaluation of intrinsic error. *J Bone Joint Surg Am*. 1990;72(3):320-7.
100. He J-W, Yan Z-H, Liu J, Yu Z-K, Wang X-Y, Bai G-H, et al. Accuracy and Repeatability of a New Method for Measuring Scoliosis Curvature. *Spine*. 2009;34(9):E323-E9.
101. Krott NL, Wild M, Betsch M. Meta-analysis of the validity and reliability of rasterstereographic measurements of spinal posture. *European Spine Journal*. 2020:1-10.
102. Mangone M, Raimondi P, Paoloni M, Pellanera S, Di Michele A, Di Renzo S, et al. Vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis calculated by radiograph and back

- surface analysis-based methods: correlation between the Raimondi method and rasterstereography. *Eur Spine J.* 2013;22(2):367-71.
103. Hackenberg L, Hierholzer E, Pötzl W, Götze C, Liljenqvist U. Rasterstereographic back shape analysis in idiopathic scoliosis after posterior correction and fusion. *Clinical Biomechanics.* 2003;18(10):883-9.
104. Schulte TL, Hierholzer E, Boerke A, Lerner T, Liljenqvist U, Bullmann V, et al. Raster stereography versus radiography in the long-term follow-up of idiopathic scoliosis. *Clinical Spine Surgery.* 2008;21(1):23-8.
105. Manca A, Monticone M, Cugusi L, Doria C, Tranquilli-Leali P, Deriu F. Back surface measurements by rasterstereography for adolescent idiopathic scoliosis: from reproducibility to data reduction analyses. *Eur Spine J.* 2018;27(9):2130-8.
106. Harzmann HC. Stellenwert der Videorasterstereographie als schulärztliche Screeningmethode von skoliotischen Fehlhaltungen und strukturellen Skoliosen 2000. 100 S. P.
107. Schröder J, Stiller T, Mattes K. Referenzdaten in der Wirbelsäulenformanalyse. *Manuelle Medizin.* 2011;49(3):161-6.
108. Michoński J, Walesiak K, Pakuła A, Glinkowski W, Sitnik R. Monitoring of spine curvatures and posture during pregnancy using surface topography – case study and suggestion of method. *Scoliosis and Spinal Disorders.* 2016;11(S2).
109. Negrini S, Donzelli S, Aulisa AG, Czaprowski D, Schreiber S, De Mauroy JC, et al. 2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis Spinal Disord.* 2018;13:3.
110. Pino-Almero L, Mínguez-Rey MF, Sentamans-Segarra S, Salvador-Palmer MR, Anda RM, La OJ. Quantification of topographic changes in the surface of back of young patients monitored for idiopathic scoliosis: correlation with radiographic variables. *J Biomed Opt.* 2016;21(11):116001.
111. Tabard-Fougère A, Bonnefoy-Mazure A, Dhouib A, Valaikaite R, Armand S, Dayer R. Radiation-free measurement tools to evaluate sagittal parameters in AIS patients: a reliability and validity study. *Eur Spine J.* 2019;28(3):536-43.
112. Bolzinger M, Bernardini I, Thevenin Lemoine C, Gallini A, Accadbled F, Sales De Gauzy J. Monitoring adolescent idiopathic scoliosis by measuring ribs prominence using surface topography device. *Spine Deform.* 2021;9(5):1349-54.
113. Parent EC, Damaraju S, Hill DL, Lou E, Smetaniuk D. Identifying the best surface topography parameters for detecting idiopathic scoliosis curve progression. *Stud Health Technol Inform.* 2010;158:78-82.
114. D'amico M, Kinel E, Roncoletta P. Normative 3D opto-electronic stereophotogrammetric posture and spine morphology data in young healthy adult population. *PLOS ONE.* 2017;12(6):e0179619.
115. D'amico M, Kinel E, Roncoletta P. 3D quantitative evaluation of spine proprioceptive perception/motor control through instinctive self-correction maneuver in healthy young subjects' posture: an observational study. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2018;54(3):428-39.
116. Degenhardt B, Starks Z, Shalini B. Reliability of the DIERS Formetric 4D Spine Shape Parameters in Adults without Postural Deformities. *BioMed Research International.* 2020;2020.
117. Kinel E, D'amico M, Roncoletta P. 3D Quantitative Evaluation of Posture and Spine Proprioceptive Perception Through Instinctive Self-Correction Maneuver in Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Front Bioeng Biotechnol.* 2021;9:663394.
118. Monticone M, Ambrosini E, Cazzaniga D, Rocca B, Ferrante S. Active self-correction and task-oriented exercises reduce spinal deformity and improve quality of life in subjects with mild adolescent idiopathic scoliosis. Results of a randomised controlled trial. *European Spine Journal.* 2014;23(6):1204-14.
119. Vialle R, Levassor N, Rillardon L, Templier A, Skalli W, Guigui P. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *J Bone Joint Surg Am.* 2005;87(2):260-7.

120. Marin L, Lovecchio N, Pedrotti L, Manzoni F, Febbi M, Albanese I, et al. Acute Effects of Self-Correction on Spine Deviation and Balance in Adolescent Girls with Idiopathic Scoliosis. *Sensors (Basel)*. 2022;22(5).
121. Sanders JO. Maturity Indicators in Spinal Deformity. *JBJS*. 2007;89(suppl\_1):14-20.
122. Schreiber S, Parent EC, Hill DL, Hedden DM, Moreau MJ, Southon SC. Patients with adolescent idiopathic scoliosis perceive positive improvements regardless of change in the Cobb angle – Results from a randomized controlled trial comparing a 6-month Schroth intervention added to standard care and standard care alone. *SOSOR. BMC Musculoskeletal Disorders*. 2019;20(1).
123. Dimitrijević V, Šćepanović T, Jevtić N, Rašković B, Milankov V, Milosević Z, et al. Application of the Schroth Method in the Treatment of Idiopathic Scoliosis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(24):16730.
124. Berdishevsky H, Lebel VA, Bettany-Saltikov J, Rigo M, Lebel A, Hennes A, et al. Physiotherapy scoliosis-specific exercises – a comprehensive review of seven major schools. *Scoliosis and Spinal Disorders*. 2016;11(1).
125. König E. Was halten Sie von der "Haltung"? *Monatsschrift Kinderheilkunde*. 1999;147(4):369-72.
126. Rizzi M. Die menschliche Haltung Klinische und biomechanische Betrachtungen. *Zeitschrift für Präventivmedizin - Revue de Médecine Préventive*. 1972;17(1):341-8.
127. Nisser J, Smolenski UC, Śliwiński GE, Krüger P, Heinke A, Malberg H, et al. Skoliosespezifische Physiotherapie bei Patienten mit idiopathischer Adoleszentskoliose (AIS) – ein narratives Review. *Phys Med*. 2018;28(02):88-102.
128. Le Berre M, Pradeau C, Brouillard A, Coget M, Massot C, Catanzariti JF. Do Adolescents With Idiopathic Scoliosis Have an Erroneous Perception of the Gravitational Vertical? *Spine Deform*. 2019;7(1):71-9.
129. Roevenich U. Dreidimensionale Skoliotherapie nach Katharina Schroth - Schulungsskript zur Fortbildung Schroth-Therapeut. Bad Sobernheim: Asklepios Katharina-Schroth-Klinik; 2018.
130. Kuru T, Yeldan İ, Dereli EE, Özdiñçler AR, Dikici F, Çolak İ. The efficacy of three-dimensional Schroth exercises in adolescent idiopathic scoliosis: a randomised controlled clinical trial. *Clinical Rehabilitation*. 2016;30(2):181-90.
131. Fang M-Q, Huang X-L, Wang W, Li Y-A, Xiang G-H, Yan G-K, et al. The efficacy of Schroth exercises combined with the Chêneau brace for the treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a retrospective controlled study. *Disability and Rehabilitation*. 2021:1-9.
132. Gao A, Li JY, Shao R, Wu TX, Wang YQ, Liu XG, et al. Improvement of health-related quality of life and radiographic parameters in adolescent idiopathic scoliosis patients after Schroth exercises. *Chin Med J (Engl)*. 2021.
133. Richards BS, Bernstein RM, D'amato CR, Thompson GH. Standardization of criteria for adolescent idiopathic scoliosis brace studies: SRS Committee on Bracing and Nonoperative Management. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30(18):2068-75; discussion 76-7.
134. Kawasaki S, Shigematsu H, Tanaka M, Suga Y, Yamamoto Y, Tanaka Y. Is brace treatment unnecessary for cases of adolescent idiopathic scoliosis above Risser sign 3? *J Orthop Sci*. 2020;25(6):975-9.
135. Scheyerer MJ, Kemper M, Bredow J, Zarghooni K. Orthesenversorgung. In: Stein GM, Eysel P, Scheyerer MJ, editors. *Expertise Orthopädie und Unfallchirurgie Wirbelsäule*. 1. Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2019.
136. Weinstein SL, Dolan LA, Wright JG, Dobbs MB. Effects of Bracing in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *New England Journal of Medicine*. 2013;369(16):1512-21.
137. Wang H, Tetteroo D, Arts JJC, Markopoulos P, Ito K. Quality of life of adolescent idiopathic scoliosis patients under brace treatment: a brief communication of literature review. *Quality of Life Research*. 2021;30(3):703-11.
138. Thompson RM, Hubbard EW, Jo C-H, Virostek D, Karol LA. Brace Success Is Related to Curve Type in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis. *JBJS*. 2017;99(11):923-8.

139. Wiemann JM, Shah SA, Price CT. Nighttime Bracing Versus Observation for Early Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2014;34(6):603-6.
140. Lee CS, Hwang CJ, Kim D-J, Kim JH, Kim Y-T, Lee MY, et al. Effectiveness of the Charleston Night-time Bending Brace in the Treatment of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2012;32(4):368-72.
141. Sanders JO, Newton PO, Browne RH, Katz DE, Birch JG, Herring JA. Bracing for Idiopathic Scoliosis: How Many Patients Require Treatment to Prevent One Surgery? *JBJS*. 2014;96(8):649-53.
142. Sanders JO, Newton PO, Browne RH, Herring AJ. Bracing in Adolescent Idiopathic Scoliosis, Surrogate Outcomes, and the Number Needed to Treat. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2012;32:S153-S7.
143. Karavidas N. Bracing In The Treatment Of Adolescent Idiopathic Scoliosis: Evidence To Date. *Adolescent Health, Medicine and Therapeutics*. 2019;Volume 10:153-72.
144. Bach C. Kindliche Skoliosen. *Wirbelsäule*. 2019;03(03):198-208.
145. Bullmann V, Halm HF, Niemeyer T, Hackenberg L, Liljenqvist U. Dual-rod correction and instrumentation of idiopathic scoliosis with the Halm-Zielke instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2003;28(12):1306-13.
146. Bullmann V, Schulte TL, Schmidt C, Gosheger G, Osada N, Liljenqvist UR. Pulmonary function after anterior double thoracotomy approach versus posterior surgery with costectomies in idiopathic thoracic scoliosis. *European Spine Journal*. 2013;22(S2):164-71.
147. Cool J, Streekstra GJ, Van Schuppen J, Stadhouder A, Van Den Noort JC, Van Royen BJ. Estimated cumulative radiation exposure in patients treated for adolescent idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*. 2023;32(5):1777-86.
148. Prestigiaco FG, Hulsbosch MHHM, Bruls VEJ, Nieuwenhuis JJ. Intra- and inter-observer reliability of Cobb angle measurements in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deformity*. 2022;10(1):79-86.
149. Zhao Y, Zhang J, Li H, Gu X, Li Z, Zhang S. Automatic Cobb angle measurement method based on vertebra segmentation by deep learning. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2022;60(8):2257-69.
150. Torén S, Diarbakerli E. Health-related quality of life in adolescents with idiopathic scoliosis: a cross-sectional study including healthy controls. *European Spine Journal*. 2022;31(12):3512-8.
151. Cheung PWH, Wong CKH, Cheung JPY. An Insight Into the Health-Related Quality of Life of Adolescent Idiopathic Scoliosis Patients Who Are Braced, Observed, and Previously Braced. *Spine*. 2019;44(10):E596-E605.
152. Li M, Wong MS, Luk KD, Wong KW, Cheung KM. Time-dependent response of scoliotic curvature to orthotic intervention: when should a radiograph be obtained after putting on or taking off a spinal orthosis? *Spine (Phila Pa 1976)*. 2014;39(17):1408-16.
153. Betsch M, Wild M, Jungbluth P, Hakimi M, Windolf J, Haex B, et al. Reliability and validity of 4D rasterstereography under dynamic conditions. *Computers in Biology and Medicine*. 2011;41(6):308-12.
154. Canales JZ, Cordás TA, Fiquer JT, Cavalcante AF, Moreno RA. Posture and body image in individuals with major depressive disorder: a controlled study. *Braz J Psychiatry*. 2010;32(4):375-80.
155. Drerup B, Ellger B, Meyer Zu Bentrup F, Hierholzer E. Rasterstereographische Funktionsaufnahmen. *Der Orthopäde*. 2001;30(4):242-50.
156. Zhang X, Xiong J. Model-guided derivation of lumbar vertebral kinematics in vivo reveals the difference between external marker-defined and internal segmental rotations. *Journal of Biomechanics*. 2003;36(1):9-17.
157. Furian TC, Rapp W, Eckert S, Wild M, Betsch M. Spinal posture and pelvic position in three hundred forty-five elementary school children: a rasterstereographic pilot study. *Orthopedic Review*. 2013;5(1):7.
158. Huthwelker J, Konradi J, Wolf C, Westphal R, Schmidtman I, Drees P, et al. Reference Values for 3D Spinal Posture Based on Videorasterstereographic Analyses of Healthy Adults. *Bioengineering (Basel)*. 2022;9(12).

159. Schroeder J, Reer R, Braumann KM. Video raster stereography back shape reconstruction: a reliability study for sagittal, frontal, and transversal plane parameters. *European Spine Journal*. 2015;24(2):262-9.
160. Hierholzer E, Drerup B, Alberti A, Drerup B, Hierholzer E. Validation of scoliosis parameters determined from back shape measurements. *Surface Topography and Spinal Deformity VI*. 1992;177:179.
161. Freedman D. *Statistics*. 4. ed. ed. New York u.a.2007.
162. Kuhlmei E. *t-Tests. Lerne mit uns Statistik!*: Springer Berlin Heidelberg; 2018. p. 135-66.
163. Schäfer T. *Methodenlehre und Statistik : Einführung in Datenerhebung, deskriptive Statistik und Inferenzstatistik. Basiswissen Psychologie*. 1st ed. 2016 ed. Wiesbaden2016.
164. Dieckmann B. *Hypothesentests*. VS Verlag für Sozialwissenschaften; 2011. p. 246-75.
165. Bender R, Lange S, Ziegler A. Multiples testen. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*. 2007;132(S 01):e26-e9.
166. Chan RYH, Ma ACF, Cheung TSK, Chan JCL, Kwok RWY, Fu ACL, et al. Effect of muscle fatigue of the thoracic erector spinae on neuromuscular control when performing the upper extremity functional tasks in people with adolescent idiopathic scoliosis. *PLOS ONE*. 2023;18(1):e0281001.
167. Wolf C, Betz U, Huthwelker J, Konradi J, Westphal RS, Cerpa M, et al. Evaluation of 3D vertebral and pelvic position by surface topography in asymptomatic females: presentation of normative reference data. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2021;16(1).
168. Alzyoud K, Hogg P, Snaith B, Preece S, England A. Video rasterstereography of the spine and pelvis in eight erect positions: A reliability study. *Radiography (Lond)*. 2020;26(1):e7-e13.
169. Catanzariti JF, Darchicourt D, Chevutschi A, Le Berre M, Tanche L, Guyot MA. Is self-image, in reference to the gravitational vertical, altered in adolescent idiopathic scoliosis? A multicenter, single-blind, case-control study. *J Pediatr Rehabil Med*. 2022;15(3):477-86.
170. Beller S. *Empirisch forschen lernen: Konzepte, Methoden, Fallbeispiele, Tipps*: Hogrefe AG; 2016.
171. Mangone M, Raimondi P, Paoloni M, Pellanera S, Di Michele A, Di Renzo S, et al. Vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis calculated by radiograph and back surface analysis-based methods: correlation between the Raimondi method and rasterstereography. *European Spine Journal*. 2013;22(2):367-71.
172. Duarte M, Freitas SM. Revision of posturography based on force plate for balance evaluation. *Rev Bras Fisioter*. 2010;14(3):183-92.
173. Piątek-Krzywicka E, Borzucka D, Kuczyński M. Postural control through force plate measurements in female AIS patients compared to their able-bodied peers. *Scientific Reports*. 2022;12(1).
174. Piątek E, Kuczyński M, Ostrowska B. Postural control in girls with adolescent idiopathic scoliosis while wearing a Chêneau brace or performing active self-correction: a pilot study. *PeerJ*. 2019;7:e7513.
175. Larni Y, Mohsenifar H, Ghandhari H, Salehi R. The effectiveness of Schroth exercises added to the brace on the postural control of adolescents with idiopathic scoliosis: Case series. *Ann Med Surg (Lond)*. 2022;84:104893.
176. Hackenberg L, Hierholzer E. 3-D back surface analysis of severe idiopathic scoliosis by rasterstereography: Comparison of rasterstereographic and digitized radiometric data. *Studies in health technology and informatics*. 2002;88:86-9.
177. Hierholzer E, Hackenberg L. Three-dimensional shape analysis of the scoliotic spine using MR tomography and rasterstereography. *Stud Health Technol Inform*. 2002;91:184-9.
178. Hamzaoglu A, Talu U, Tezer M, Mirzani C, Domanic U, Goksan SB. Assessment of Curve Flexibility in Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine*. 2005;30(14):1637-42.
179. Ma H-H, Tai C-L, Chen L-H, Niu C-C, Chen W-J, Lai P-L. Application of two-parameter scoliometer values for predicting scoliotic Cobb angle. *BioMedical Engineering OnLine*. 2017;16(1).

180. Zaborowska-Sapeta K, Gizewski T, Binkiewicz-Glińska A, Kamelska-Sadowska AM, Kowalski IM. The Duration of the correction loss after removing cheneau brace in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Acta Orthop Traumatol Turc.* 2019;53(1):61-7.
181. Gribble PA, Tucker WS, White PA. Time-of-day influences on static and dynamic postural control. *J Athl Train.* 2007;42(1):35-41.
182. Izadi M, Thomas E, Thomas AC, Bellafiore M. The effect of time-of-day and sleep deprivation on postural control: A systematic review. *Gait Posture.* 2022;97:94-103.
183. Wheaton AG, Jones SE, Cooper AC, Croft JB. Short sleep duration among middle school and high school students—United States, 2015. *Morbidity and Mortality Weekly Report.* 2018;67(3):85.
184. Lenke LG, Edwards CCI, Bridwell KH. 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(20S):S199-S207.

## 9 Anhang

### Anhang 1: Positives Votum der Ethik-Kommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz



- Ethik-Kommission -

#### Landesärztekammer Rheinland-Pfalz

Körperschaft des öffentlichen Rechts  
Deutschhausplatz 3 · 55116 Mainz  
Telefon (06131) 28822-63 /-64 /-65 /-67  
Telefax (06131) 28822-66

Landesärztekammer Rhld.-Pf. · Deutschhausplatz 3 · 55116 Mainz

Universitätsmedizin Mainz  
Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie  
Janina Schubkegel



Ansprechpartner:



Telefon:  
-63 (Pie), -64 (Si), -65 (Rd), -67 (Es)

E-Mail: [ethik-kommission@laek-rlp.de](mailto:ethik-kommission@laek-rlp.de)

Bitte bei jedem Schriftwechsel die  
Bearbeitungsnummer angeben!

Mainz, den 20.07.2020 / Es

Antragstitel: "Entwicklung und erste Anwendung eines standardisierten Assessments zur Erfassung der Haltungskorrekturfähigkeit im Sinne der Symmetrie bei Patienten mit adoleszenter idiopathischer Skoliose unter Verwendung der Videorasterstereographie"  
Antragsnummer: 2020-15019-andere Forschung erstvotierend

Sehr geehrte Frau Schubkegel,

die Ethik-Kommission bei der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz hat in ihrer Sitzung am 14.05.2020 über Ihren Antrag beraten.

Auf der Grundlage der vorgelegten Unterlagen bestehen nach dem gegenwärtigen Stand keine berufsethischen und berufsrechtlichen Bedenken gegen die Durchführung der geplanten Studie. Sie erhalten damit ein zustimmendes Votum.

Die Ethik-Kommission geht jedoch davon aus, dass Sie folgende Hinweise berücksichtigen:

1. Auf Seite 2 (dritter Absatz, letzter Satz) der Informationsschrift für Erwachsene, Eltern und Jugendliche heißt es, dass die Analyse des Rückens in Gewohnheitshaltung zu Beginn und Ende des Aufenthaltes studiengedingt und abweichend von der regulären Eingangsuntersuchung erfolge. Dies ist unklar: Im vorherigen Satz wird beschrieben, dass die einmalige Vermessung in Gewohnheitshaltung zu Beginn und Ende des Reha-Aufenthaltes studienunabhängig erfolgt.
2. In den Informationsschriften und Einwilligungserklärungen für Minderjährige sollte in der Überschrift jeweils angegeben werden, an welche Altersgruppe sich diese richtet.

**Die Ethik-Kommission bittet um Vorlage der entsprechend geänderten Dokumente mit aktueller Versionsnummer und Datum.**

Ferner gibt die Ethik-Kommission folgende allgemeine Hinweise:

Deutsche Apotheker- und Ärztebank – IBAN DE07 3006 0601 0001 2997 35 – BIC DAAEDEDXXX  
Mainzer Volksbank eG – IBAN DE96 5519 0000 0654 2750 23 – BIC MVBMD55



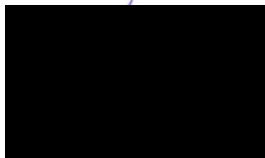
Die Verantwortlichkeit des Studienarztes bleibt in vollem Umfang bestehen und wird durch diese Entscheidung nicht berührt. Die Entscheidung ergeht unter dem Vorbehalt gleichbleibender Gegebenheiten.

Der Ethik-Kommission sind alle schwerwiegenden Komplikationen in beurteilbarer Form unverzüglich mitzuteilen. Die Ethik-Kommission bittet darum, dass ihr das Ergebnis der Studie zur Kenntnis gebracht wird.

Datenschutzrechtliche Aspekte von Forschungsvorhaben werden durch die Ethik-Kommission grundsätzlich nur kursorisch überprüft. Dieses Votum/diese Bewertung ersetzt mithin nicht die Konsultation des zuständigen betrieblichen oder behördlichen Datenschutzbeauftragten.

Sollte das Forschungsvorhaben nicht nach Ablauf von 5 Jahren nach Erteilung des Votums abgeschlossen sein, bittet die Ethik-Kommission schon jetzt um einen Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben, um prüfen zu können, ob es einer weiteren berufsrechtlichen Beratung bedarf. Dieser Zwischenbericht ist ohne weitergehende Aufforderung an die Geschäftsstelle zu schicken.

Mit freundlichen Grüßen



Folgende Unterlagen haben zur Beratung vorgelegen:

Anschreiben/Inhaltsverzeichnis - Begleitschreiben Nachforderung Ethik-Votum.pdf (hinzugefügt 25.06.2020)  
 Studienprotokoll - Studienprotokoll\_v1.1.pdf (hinzugefügt 25.06.2020)  
 Informationsschrift/Einwilligungserklärung - Anhang 3a\_Patienteninformation und Einwilligungserklärung\_Erwachsene\_v1.1.pdf (hinzugefügt 25.06.2020)  
 Informationsschrift/Einw. Eltern - Anhang 3b\_Patienteninformation und Einwilligungserklärung\_Eltern\_v1.1.pdf (hinzugefügt 25.06.2020)  
 Informationsschrift/Einwilligung Mind - Anhang 3c\_Patienteninformation und Einwilligungserklärung\_Jugendliche\_v1.1.pdf (hinzugefügt 25.06.2020)  
 Informationsschrift/Einwilligung Mind - Anhang 3d\_Patienteninformation und Einwilligungserklärung\_Kinder\_v1.1.pdf (hinzugefügt 25.06.2020)  
 Kurzbeschreibung.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
 nicht zutreffend/nicht beurteilbar - nicht verfügbar - Vertragliche Vereinbarungen.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
 Anschreiben/Inhaltsverzeichnis - Anhang 4\_Antrag auf Gültigkeit der Einverständniserklärung\_final.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
 Studienprotokoll - 3\_Studienprotokoll\_final.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)



Gebrauchsanweisung (diverse) - Anhang 2\_Gebrauchsanweisung DIERS formetric III.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
CE-Kennzeichnung - Anhang 2\_Medizinproduktebuch Formetric.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
CRF - Anhang 1\_Dokumentationsprüfbogen.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
Anschreiben/Inhaltsverzeichnis - 1\_Anschreiben mit Unterschrift final.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
Kostenübernahmeerklärung - Kostenübernahmeerklärung.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
Antragsformular - 2\_Antragsformular mit Unterschrift.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)  
Antrag auf Gebührenreduktion - Antrag auf Gebührenreduktion.pdf (hinzugefügt 18.04.2020)  
Informationsschrift/Einwilligungserklärung - Anhang 3\_Patienteninformation und Einwilligungserklärung zur Studie.pdf (hinzugefügt 18.04.2020)  
Universitätsmedizin Mainz, Orthopädie und Rheumaorthopädie  
Janina Schubkegel  
Lebenslauf - Anhang 5\_Lebenslauf Janina Schubkegel\_final.pdf (hinzugefügt 23.04.2020)

Das Votum ist gültig für folgende Studienzentren:

[REDACTED]  
Universitätsmedizin Mainz, Orthopädie und Rheumaorthopädie  
Langenbeckstr. 1  
55131 Mainz

[REDACTED]  
Asklepios Katharina-Schroth-Klinik Bad Sobernheim  
Korczastraße 2  
55566 Bad Sobernheim

---

---