

**Überprüfung der Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit einer
neuen
MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme-Technik
für die Skoliosediagnostik**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn**

**vorgelegt von
Markus Erich Schlotter
aus Dernbach**

2005

**Angefertigt mit Genehmigung
der Medizinischen Fakultät
der Universität Bonn**

- 1. Gutachter: Prof. Dr. H. H. Schild**
- 2. Gutachter: PD. Dr. A. Schmitz**

Tag der mündlichen Prüfung: 05.09.2005

**Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
[http:// hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online](http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online) elektronisch publiziert**

**Aus der
Radiologischen Klinik, Universitätsklinikum Bonn
Direktor der Radiologischen Klinik
Prof. Dr. H. H. Schild**

Inhaltsverzeichnis

<u>1. Einleitung</u>	S. 11
1.1 Klinische Grundlagen der Skoliosediagnostik.....	S. 11
1.2 Grundlagen der Skoliosebehandlung.....	S. 12
1.3 Risiken der Röntgendiagnostik.....	S. 13
1.4 Skolioseinzidenz und Methoden zur Strahlendosisreduktion.....	S. 14
1.5 Grundlagen und Ziel dieser Arbeit.....	S. 16
<u>2. Methode und Patienten</u>	S. 18
2.1 Untersuchungsmethode.....	S. 18
2.1.1 Geräte und Sequenzen.....	S. 18
2.1.2 Untersuchungsablauf.....	S. 19
2.1.3 PC-gesteuerte Bildrekonstruktion.....	S. 19
2.1.4 Dokumentation und Winkelbestimmung.....	S. 20
2.2 Anwendung der Methodik.....	S. 21
2.2.1 Patientenaufkommen.....	S. 21
2.2.2 Technische Parameter.....	S. 22
2.2.3 Patientenlagerungsbedingungen.....	S. 22
2.2.4 Nachverarbeitung.....	S. 23
<u>3. Ergebnisse</u>	S. 24
3.1 Epidemiologie und Patienten.....	S. 24
3.2 Normalverteilungsanalyse der Skolioseausprägungsgrade	S. 25
3.3 Vergleich Cobbwinkel Röntgen/Magnetresonanztomographie.....	S. 29
3.3.1 Gesamtübersicht.....	S. 29
3.3.2 Cobbwinkel in Abhängigkeit zum Untersuchungsabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie.....	S. 33
3.3.3 Analyse der Cobbwinkeldifferenz in Relation zum Zeitabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie	S. 35
3.3.4 Relation Cobbwinkel Magnetresonanztomographie/Röntgen.....	S. 41
3.3.5 Korrelation MR-Cobbwinkelgröße zur Winkeldifferenz.....	S. 45
3.3.6 Auflistung der Ergebnisse nach Therapiefenstern geordnet.....	S. 49

3.4	MR-Darstellung korrigierender Effekte des Cheneau-Korsetts.....	S. 52
3.5	Korrektur einfluss im pneumatisierten Korsett.....	S. 57
3.6	Screening / Erwachsenen screening.....	S. 61
3.7	Anomalien und Sonderfälle.....	S. 61
4.	<u>Diskussion</u>	S. 62
4.1	Epidemiologie und Patienten.....	S. 63
4.2	Normalverteilungsanalyse der Skolioseausprägungsgrade.....	S. 64
4.3	Vergleich Cobbwinkel Röntgen/Magnetresonanztomographie.....	S. 65
4.3.1	Gesamtübersicht.....	S.66
4.3.2	Cobbwinkel in Abhängigkeit zum Untersuchungsabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie.....	S. 66
4.3.3	Analyse der Cobbwinkeldifferenz in Relation zum Zeitabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie	S. 67
4.3.4	Relation Cobbwinkel Magnetresonanztomographie/Röntgen.....	S. 67
4.3.5	Korrelation MR-Cobbwinkelgröße zur Winkeldifferenz.....	S. 70
4.3.6	Auflistung der Ergebnisse nach Therapiefenstern geordnet.....	S. 71
4.4	MR-Darstellung korrigierender Effekte des Cheneau-Korsetts.....	S. 72
4.5	Korrektur einfluss im pneumatisierten Korsett.....	S. 73
4.6	Screening/Erwachsenenscreening.....	S. 74
4.7	Anomalien und Sonderfälle.....	S. 74
4.8	Ergänzungen.....	S. 75
5.	<u>Zusammenfassung</u>	S. 77
6.	<u>Literaturverzeichnis</u>	S. 78
7.	<u>Abbildungskatalog</u>	S. 85

Danksagung

Lebenslauf

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Überprüfung der Normalverteilung für das klassierte Merkmal thorakaler Cobbwinkel.....S. 26
Tab. 2:	Überprüfung der Normalverteilung für das klassierte Merkmal thorakolumbalen Cobbwinkel.....S. 27
Tab. 3:	Überprüfung der Normalverteilung für das klassierte Merkmal lumbalen CobbwinkelS. 28
Tab. 4:	Ergebnis-Übersicht des Vergleichs der MR- mit den röntgendiagnostisch bestimmten Cobbwinkeln, thorakal.....S. 30
Tab. 5:	Vergleichende Darstellung generierter Messwerte nach Therapiefenstern geordnet, thorakal.....S. 30
Tab. 6:	Ergebnis-Übersicht des Vergleichs der MR- mit den röntgendiagnostisch bestimmten Cobbwinkeln, thorakolumbal.....S. 31
Tab. 7:	Vergleichende Darstellung generierter Messwerte nach Therapiefenstern geordnet, thorakolumbal.....S. 31
Tab. 8:	Ergebnis-Übersicht des Vergleichs der MR- mit den röntgendiagnostisch bestimmten Cobbwinkeln, lumbal.....S. 32
Tab. 9:	Vergleichende Darstellung generierter Messwerte nach Therapiefenstern geordnet, lumbal.....S. 32
Tab. 10:	Aufgliederung der Cobbwinkeldifferenzen nach Zeitfenstern.....S. 34
Tab. 11:	Kontingenztafel, thorakal.....S. 38
Tab. 12:	Kontingenztafel, thorakolumbal.....S. 39
Tab. 13:	Kontingenztafel, lumbal.....S. 40
Tab. 14:	Parameter der WirbelsäulenabschnitteS. 41
Tab. 15:	Streuung der Punktwolke (SPW) um die entsprechende Regressionsgerade ..S. 42
Tab. 16:	Cobbwinkeldifferenz bei Liegend-Stehend-Aufnahme gegen Cobbwinkel bei Liegendaufnahme, thorakal.....S. 46
Tab. 17:	Cobbwinkeldifferenz bei Liegend-Stehend-Aufnahme gegen Cobbwinkel bei Liegendaufnahme, thorakolumbal.....S. 47
Tab. 18:	Cobbwinkeldifferenz bei Liegend-Stehend-Aufnahme gegen Cobbwinkel bei Liegendaufnahme, lumbal.....S. 48

Tab. 19:	Klassierung der mittleren Cobbwinkeldifferenzen nach Therapiefenstern, thorakal.....	S. 50
Tab. 20:	Klassierung der mittleren Cobbwinkeldifferenzen nach Therapiefenstern, thorakolumbal.....	S. 50
Tab. 21:	Klassierung der mittleren Cobbwinkeldifferenzen nach Therapiefenstern, lumbal.....	S. 51
Tab. 22:	Vergleichende Darstellung der mit und ohne Korsett bestimmten Messwerte, thorakal.....	S. 53
Tab. 23:	Vergleichende Darstellung der mit und ohne Korsett bestimmten Messwerte, thorakolumbal.....	S. 53
Tab. 24:	Vergleichende Darstellung der mit und ohne Korsett bestimmten Messwerte, lumbal.....	S. 54
Tab. 25:	Korrigierender Einfluss des Cheneau-Korsetts, thorakal.....	S. 55
Tab. 26:	Korrigierender Einfluss des Cheneau-Korsetts, thorakolumbal.	S. 55
Tab. 27:	Korrigierender Einfluss des Cheneau-Korsetts, lumbal.....	S. 56
Tab. 28:	Vergleichende Darstellung durchschnittlicher Cobbwinkelwerte in der Nativliegendmessung und im Cheneau-Korsett.....	S. 56
Tab. 29:	Vergleichende Darstellung der Korsettmessung mit und ohne Pneumatisierung, thorakal.....	S. 57
Tab. 30:	Vergleichende Darstellung der Korsettmessung mit und ohne Pneumatisierung, thorakolumbal.....	S.58
Tab. 31:	Vergleichende Darstellung der Korsettmessung mit und ohne Pneumatisierung, lumbal.....	S. 58
Tab. 32:	Zusätzlicher korrigierender Einfluss eines pneumatisierten Korsetts, Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Korsettmessung/Winkel der Korsettmessung pneumatisiert, thorakal.....	S. 59
Tab. 33:	Zusätzlicher korrigierender Einfluss eines pneumatisierten Korsetts, Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Korsettmessung/Winkel der Korsettmessung pneumatisiert, thorakolumbal.....	S. 59
Tab. 34:	Zusätzlicher korrigierender Einfluss eines pneumatisierten Korsetts, Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Korsettmessung/Winkel der Korsettmessung pneumatisiert, lumbal.....	S. 60

Tab. 35:	Vergleichende Darstellung durchschnittlicher Cobbwinkelwerte im Cheneau-Korsett und im pneumatisierten Korsett.....S. 60
Tab. 36:	Anzahl der Fälle mit Möglichkeit einer MR-UntersuchungS. 70

Figurenverzeichnis:

- Figur 1: Punktwolke der MR- und röntgenbestimmten Cobbwinkel, thorakal.....S. 43
- Figur 2: Punktwolke der MR- und röntgenbestimmten Cobbwinkel, thorakolumbal.....S. 43
- Figur 3: Punktwolke der MR- und röntgenbestimmten Cobbwinkel, lumbal.....S. 44
- Figur 4: Für MR-Untersuchung erlaubtes Fenster.....S. 69

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1:	Festlegung eines Pfades, der durch die Bandscheibenzentren läuft.....	S. 85
Abb. 2:	Rekonstruktion einer koronaren Gesamtansicht aus Bildausschnitten der jeweilig zugehörigen koronaren Schichten.....	S. 86
Abb. 3:	Fusion der rekonstruierten Frontalebene zur MR-Ganzwirbelsäulenansicht...	S. 87
Abb. 4:	Beispiele für verschiedene Skoliosegradausprägungen	S. 88
Abb. 5:	Sequenzvergleich FFE/EPI.....	S. 89
Abb. 6:	Beeinflussung der Bildqualität durch Metallartefakte.....	S. 90
Abb. 7:	Zusatzbefunde.....	S. 91
Abb. 8:	Schema der computergestützten Cobbwinkelvermessung.....	S. 92
Abb. 9:	Progredienz einer mittelgradigen lumbalen Skoliose im zeitlichen Verlauf....	S. 93
Abb. 10:	Vergleichende Darstellung der Röntgenganzwirbelsäulenaufnahme im Stand mit der MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme bei geringgradiger Skoliose.....	S. 94
Abb. 11:	Bildbeispiel für ein in der MR-Aufnahme unterschätztes Winkelmaß	S. 95
Abb. 12:	Identisches Cobbwinkelmaß in Röntgen- und vergleichender MR-Aufnahme	S. 96
Abb. 13:	Dokumentation der Wirkung des Cheneau-Korsetts.....	S. 97
Abb. 14:	Dokumentation eines zusätzlichen Korrekturgewinns durch pneumatisierte Druckpelotten im Korsett	S. 98
Abb. 15:	Zusätzliche Möglichkeit der Beurteilung in der sagittalen Ebene.....	S. 99
Abb. 16:	Kontrolluntersuchungen im Rahmen des Erwachsenen Screenings.....	S. 100

Abkürzungsverzeichnis:

BEIR	Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations
BWS	Brustwirbelsäule
cGy	centi Gray
CT	Computertomograph/Computertomographie
DD	Differenz
EPI	Echo planar Imaging
FFE	Fast Field Echo
HWS	Halswirbelsäule
ISIS	Integrated Shape Imaging System
LET	Linear Energy Transfer
LWS	Lendenwirbelsäule
mGy	milli Gray
MHZ	Megahertz
mm	Millimeter
MR	Magnetresonanztomograph/Magnetresonanztomographie
mSv	milli Sievert
PC	Personal Computer
Rö	Röntgen
SPW	Streuparameter der Punktwolke
WS	Wirbelsäule

1. Einleitung

1.1 Klinische Grundlagen der Skoliosediagnostik

Neben den klinischen Untersuchungsbefunden stellen bildgebende Verlaufskontrollen die wichtigste Entscheidungshilfe für die Behandlung juveniler und adoleszenter Skoliosen dar. Frühzeitig erkannt, kann ein Kurvenprogreß entsprechend konservativ oder operativ behandelt werden.

Als bisheriger bildgebender diagnostischer Goldstandard gilt die Ganzwirbelsäulen-Röntgenaufnahme im Stehen (Almén et al., 1996; Giehl und Bernau, 1994)

Wie auch die einschlägige Literatur belegt, ist ein erhöhtes Progredienzrisiko während des Längenwachstums gegeben (Heine und Reher, 1973; Meurer et al., 1994; Stempel et al., 1995). Danach war eine gesteigerte Progredienz zwischen dem 10. und 15. Lebensjahr festzustellen. Mädchen, bei denen der präpubertäre Wachstumsschub 2 Jahre früher einsetzt, zeigen ein Maximum fortschreitender Kurvenkrümmung zwischen dem 10. und 14. Lebensjahr, Jungen zwischen dem 12. und 17. Lebensjahr (Heine und Reher, 1973; Meurer et al., 1994). Eine Zunahme der Skoliose ist nach Abschluß des Wachstums wesentlich geringer.

Der Manifestationszeitpunkt und die Lokalisation der Primärkrümmung ist ein entscheidender Faktor zur Abschätzung des Verlaufes der Erkrankung (Heine und Reher, 1973; Meurer et al., 1994; Stempel et al., 1995). So zeigen thorakale und doppelbogige Skoliosen, sowie ein frühes Auftreten eine ausgeprägte Verschlechterungssymptomatik (Heine und Reher, 1973).

Zum einen ist der absolute Ausprägungsgrad für die zu treffenden Therapieschritte entscheidend, zum anderen die Progredienz der Krümmungszunahme. Entsprechend ist während der Behandlung zu beurteilen, ob konservative Maßnahmen wie Krankengymnastik bei kleingradigen Skoliosen (10° - $20/25^{\circ}$), Korsetttherapie bei mittelgradigen Fällen zwischen 20° - $40/50^{\circ}$ ausreichen (Böni et al., 2002; Hopf et al., 1991; Matussek et al., 2000; Weber et al., 1999) oder Winkelgrad bzw. Progredienz soweit zugenommen haben, dass eine operative Indikation gegeben ist (Krismer et al., 2002).

Eine adäquate Therapie kann dem Patienten nur mit einer engschrittigen Verlaufsbeobachtung zukommen. Um frühzeitig Veränderungen des Habitus erkennen und rechtzeitig entgegensteuern zu können, sind demnach engmaschige Röntgenkontrollen unerlässlich. Zumal das Primärziel konservativer Maßnahmen in der Skoliose-therapie der Erhalt des Krümmungsstandes ist (Matussek et al., 2000), nicht die „restitutio ad integrum“.

In Übereinstimmung mit der Literatur wurden von der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Traumatologie Kindern und Jugendlichen mit einer Skoliose Röntgenkontrollen in 6-monatigen Intervallen empfohlen (Giehl und Bernau, 1994). Ebenso liegt eine Forderung der Deutschen Skoliosegesellschaft vor, die neben 6-monatigen Röntgenkontrollen eine zusätzlich klinische Kontrolle alle 3 Monate fordert (Landauer et al., 1997). Hinzu kommen Zusatz- bzw. Spezialaufnahmen, welche im Rahmen einer Korsettanpassung, der Skelettreifebestimmung oder der Operationsplanung unerlässlich sind (Giehl und Bernau, 1994). Hieraus resultiert je nach Zeitpunkt der Diagnosestellung ein mehrjähriger Beobachtungszeitraum bis zum Abschluß des Längenwachstums. Die Anzahl der dabei strahlenbelastenden Röntgenuntersuchungen wird in der Literatur unterschiedlich mit insgesamt 10-20 Röntgenkontrollen (Hallén et al., 1992; Hellström et al., 1983), mit 22-23 Untersuchungen (Nash et al., 1973), bzw. mit 3- bis 12-monatigen Kontrollintervallen (Hehne, 1989; Levy et al., 1996) angegeben. Berichte über die von einer Skolioseaufnahme ausgehende Strahlenbelastung sind selten und unzureichend. Die Angaben zur effektiven Dosis schwanken zwischen 0,14 mSv für einen im Schnitt 50 kg schweren Patienten (Chamberlain et al., 2000), bzw. 0,12 mSv für Frontal- und Sagittalaufnahmen (Hallén et al., 1992) und 0,05 mSv (Almén et al., 1996) für Frontalaufnahmen.

1.2 Grundlagen der Skoliosebehandlung

Gemäß den Grundlagen der oben genannten Gesellschaften wird für geringgradige Skoliosen die physiotherapeutische, vorwiegend krankengymnastische Behandlung empfohlen.

Für mittelgradige Skoliosen gilt die Orthesentherapie als wichtiges Element der Therapie, auch wenn sie bis heute im Bezug auf ihre Wirksamkeit heftig umstritten ist (Böni et al., 2002). Im Folgenden sollen die wichtigsten Eckpunkte zum Thema Korsetttherapie dargelegt werden. Sie entstammen einem Übersichtsartikel der Zeitschrift „Der Orthopäde“ Jahrgang 2002 (Böni et al., 2002).

Als Indikation zur Korsettbehandlung gelten derzeit:

- idiopathische Skoliose mit einem Cobbwinkel $> 20^\circ$
- Progredienz $> 5^\circ$ zwischen zwei Röntgenkontrollen
- noch vorhandene Wachstumspotenz (Risser $< IV$)

Die Wirkprinzipien der modernen Korsetttherapien kombinieren Extension, Translation, Derotation und Kompression miteinander. Die heute am häufigsten verwendete Orthese ist das Cheneau Korsett. Neben Bauchpresse und dorsalem Abschluss führen einklebbare Druckpelotten zu Derotation und Translation. Den Pelotten gegenüber liegen Freiräume zur aktiven Korrektur.

Das Ziel soll ein Erhalt des anfänglichen Krümmungsmaßes nach Abschluss der Skoliosebehandlung sein. Anfängliche Krümmungsverminderungen gehen nach Behandlungsabschluss meist wieder verloren.

Allerdings führen Anpassung und Kontrolle des Korsetts zu einer oben geschilderten zusätzlichen Strahlenbelastung

Für die seltenen schwergradigen Skoliosen muss die Indikation zur Operation überprüft werden. Diese verlangt gegebenenfalls spezielle weitere Diagnostik auf die im folgenden nicht gesondert eingegangen werden soll, da diese über die Bildaussage der Ganzwirbelsäulenaufnahme hinausgeht.

1.3 Risiken der Röntgendiagnostik

Zur Überlegung, ob ein signifikantes Strahlenrisiko durch die allgemein übliche Untersuchungspraxis bei Skoliosepatienten gegeben ist, findet sich in der Mehrzahl der dazu veröffentlichten Studien eine eindeutig bejahende Tendenz.

Die zahlenmäßige Erfassung des Risikos beruht auf Modellrechnungen und wird aus statistischen Erhebungen berechnet.

Hallén et al. (1992) untersuchten die in 3 Hospitälern an Kindern und jugendlichen Patienten während der Verlaufsbeobachtung verabreichte Strahlendosis und kamen zu einer Differenz bei der im Mittel verabreichten Dosis bis zu einem Faktor 10. Für eine mittlere Dosis pro Untersuchung eines Skoliosepatienten von 0,065 mGy in einem der Hospitäler errechnete sich bei durchschnittlich 20 Expositionen im Verlauf der Skoliosebehandlung eine kumulative Dosis von 1,3 mGy. Das Gesamtrisiko an einer durch Röntgenstrahlung induzierten Tumorerkrankung nach einheitlicher Ganzkörperbestrahlung bei niedriger LET Strahlung zu sterben, wird für ein 15 Jahre altes Mädchen mit 1,6 % pro 0,1 Sv geschätzt (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, 1989; Hallén et al., 1992). Mit den 1,3 mGy errechnet sich daraus eine Todesrate von 2 zu 10000, bei einer 10fach höheren kumulativen Dosis von 2 zu 1000.

Besondere Beachtung fand bei weiblichen Skoliosepatientinnen das in der Folge der wiederholten Röntgenaufnahmen gesteigerte Brustkrebsrisiko. Nach einer Studie von Nash et al. (1979) stieg das Risiko, ein Mammakarzinom in Folge der während einer Langzeitskoliosebehandlung angefertigten Röntgenganzwirbelsäulenaufnahmen in Frontalstellung zu entwickeln, um 110 Prozent. Ein ähnliches Ergebnis zeigt eine im Jahr 2000 veröffentlichte U.S. amerikanische Skoliosekohortenstudie (Doody et al., 2000). Die Studie erfaßte 5573 weibliche Patienten mit Skoliose, die zum Zeitpunkt der Diagnosenstellung jünger als 20 Jahre waren. Die Diagnosen erfolgten in den Jahren zwischen 1912 und 1965. In dieser Zeit war die pro Aufnahme verabreichte Dosis erheblich höher als heute. Durchschnittlich erhielt eine Patientin 24,7 Röntgenuntersuchungen. Dabei betrug die mittlere geschätzte kumulative Strahlendosis für das Brustgewebe 10,8 cGy. Das durchschnittliche Lebensalter bei der Erstdiagnose war 10,6 Jahre. Bis zum Stichtag 1. Januar 1997 waren von den erfaßten Skoliosepatienten 77 an Brustkrebs verstorben. Das ist die 1,7 fache Sterblichkeitsrate, die nach der Statistik bei der weißen weiblichen Bevölkerung der U.S.A. zu erwarten war. Dieses erheblich erhöhte Risiko deckt sich mit der Schätzung der Arbeit von Nash et al. und steht in Einklang mit dem Modell der Risikoabschätzung des BEIR V. Committee (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, 1989).

Ins Gewicht fällt, dass das Alter der Erstmanifestation sowie der Behandlungszeitraum in eine Phase höchster Strahlensensibilität fällt. Kinder und Jugendliche sind gegenüber ionisierender Strahlung viel empfindlicher als Erwachsene und zeigen ihnen gegenüber ein erhöhtes Risiko, eine strahleninduzierte Krebserkrankung zu entwickeln (Almén et al., 1996; Hallén et al., 1992).

1.4 Skolioseinzidenz und Methoden zur Strahlendosisreduktion

Die Skoliose ist eine in der Bevölkerung relativ weit verbreitete Krankheit. Die Inzidenz wird mit 2-12 % schwankend angegeben (Landauer et al., 1997; Mau, 1982; Meurer et al., 1994; Rössler und Rüther, 1997; Schmitt, 1995). Unterschiedliche Einstufungskriterien und unterschiedliche Patientenkollektive führen zu der Diskrepanz der Prozentzahlen, insbesondere dann, wenn die große Gruppe der schwach ausgeprägten Skoliosen mit einem Cobb-Winkel unter 10 Grad eingerechnet wird (Mau, 1982). 2 % - 3 % der Bevölkerung zeigen einen Krümmungswinkel >10 Grad (Meurer et al., 1994). Schwere Verläufe mit Cobbwinkeln von 30-40 Grad finden sich bei 1-3 % der Bevölkerung (Meurer et al., 1994).

Auffällig ist die altersbezogene Häufigkeitsverteilung von juveniler und adoleszenter Skoliose bei männlichem und weiblichem Geschlecht. In der Gruppe der juvenilen Skoliosen, die sich im Zeitraum vom 4. Lebensjahr bis zur Pubertät manifestiert, sind Mädchen 6-fach häufiger betroffen als Jungen. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich für die Gruppe der Adoleszentskoliosen (Rössler und Rüther, 1997).

In Bezug auf den Krümmungswinkel zeigen sich ebenfalls deutliche Differenzen bei den Geschlechtern. Bei den Krümmungswinkeln >10 Grad beträgt das Geschlechtsverhältnis 1,4-2 : 1 von Mädchen zu Jungen, bei den Krümmungswinkeln zwischen 30 und 40 Grad sogar 10 : 1 (Meurer et al., 1994).

Bei der Erstdiagnostik haben einfach durchzuführende Screening-Untersuchungen ein großes Gewicht (Landauer et al., 1997), die allerdings mit einer recht großen Fehlerrate behaftet sind. Etwa 10-40 % aller gefundenen Rumpfabweichungen stellen „echte“ Skoliosen dar. Allerdings wurden 23 % der Skoliosen bei dieser Art Erstdiagnostik nicht gefunden. Zur weiterführenden Diagnostik sind dann strahlenbelastende Röntgen-Ganzwirbelsäulenaufnahmen indiziert. Sowohl das hohe Patientenaufkommen als auch die Kenntnis einer als relevant anzusehenden Röntgenbelastung zeigten die Notwendigkeit, die bildgebende Diagnostik zu optimieren. Die diesbezüglichen Bemühungen zielten auf den vollständigen Ersatz röntgendiagnostischer Verfahren durch alternative Untersuchungstechniken, zum anderen auf die Minimierung der Strahlenbelastung des Patienten bei der bisherigen röntgenologischen Untersuchungsmethode. Der Einsatz alternativer Methoden sollte einmal zur Verbesserung der Fehlerquote bei Screening-Untersuchungen im Vorschul- und Schulalter führen, hauptsächlich aber in der Verlaufsbeobachtung progredienter Skoliosen eingesetzt werden. Verschiedene Verfahren, z.B. die Moirétopographie, ISIS-System, Photogrammetrie/Rasterstereometrie, wurden zur Anwendung gebracht (Asamoah et al., 2000; Berg et al., 2002; Hackenberg et al., 2000). Das Prinzip dieser Verfahren ist es, über die Körperoberfläche Rückschlüsse auf die Wirbelsäule zu ziehen. Ein Nachteil ist der hohe technische Aufwand und die Fehleranfälligkeit.

Aufgrund einer schlechten Korrelation der Ergebnisse zu den wirklichen Skoliose-Cobb-Winkeln erweisen sich die genannten Verfahren für die Skolioseverlaufsbeobachtung als ungeeignet (Asamoah et al., 2000; Landauer et al., 1997). Für ein Screening durch den erfahrenen Schularzt können die Alternativen jedoch eine Unterstützung sein.

Eine Verbesserung im Sinne einer Dosisoptimierung bei konventionellen bildgebenden Verfahren brachte die Umstellung der Aufnahme durch den anterior-posterioren auf den posterior-anterioren

Strahlengang. Damit ist eine deutliche Dosisreduktion für strahlensensible Gewebe wie Schilddrüse und Mamma verbunden. In verschiedenen Studien konnte eine 3-7fache Reduktion der kumulativen Dosis für Schilddrüse und weibliche Brust während des Skoliosebeobachtungszeitraumes bestätigt werden. Das Entartungsrisiko der Organe verminderte sich um den Faktor 3-4. Einher ging allerdings damit eine erhöhte Strahlenbelastung des Knochenmarks (Fearon et al., 1988; Hellström et al., 1983; Levy et al., 1996).

Zusätzliche Verbesserungen bezüglich einer Dosisreduktion konnten mit dem Einsatz empfindlicherer Filmfoliensysteme bei hoher Anodenspannung mit verkürztem Stromzeitprodukt, digitaler Aufnahmetechniken, Gesichtsfeldeinblendung, gonadaler Abschirmung und Verzicht von Streustrahlenrastern erzielt werden. Leider finden diese Schutzmaßnahmen im täglichen klinischen Einsatz selten Anwendung (Bernau et al., 1994; Bernau und Seger, 1996; Drummond et al., 1983; Geijer et al., 2001; Kalmar et al., 1994; Palmer et al., 1998; Stringer et al., 1994).

1.5 Grundlagen und Ziel dieser Arbeit

Vor diesem Hintergrund stellte sich eine Bonner Arbeitsgruppe der Frage, ob ein MR-basiertes Verfahren entwickelt werden kann, das eine Ganzwirbelsäulen-Abbildung zur Messung des Krümmungswinkels erlaubt und ob dadurch einzelne Röntgenverlaufskontrollen ersetzt werden können, um längerfristig eine deutliche Einsparung der Strahlenbelastung für den Patienten zu erreichen. In diesem Zusammenhang galt es zu klären, ob zum einen die Technik trotz methodisch bedingt notwendiger Untersuchung des Patienten im Liegen eine ausreichende Sicherheit für die Verlaufskontrolle der Skoliose bieten kann und zum anderen eine plane Aufsicht auf die nicht plane Wirbelsäule generiert werden kann, ohne die tatsächlichen Krümmungsverhältnisse zu verfälschen. Zu beachten ist, dass dieser Forderung herkömmliche, diagnostische MR-Darstellungen der Wirbelsäule nicht nachkommen können. Hochauflösende spezielle MR-Spulen lassen zwar eine genaue Beurteilung der dargestellten Strukturen zu, sie erfassen aber lediglich nur relativ kleine Bildausschnitte und nicht die gesamte Wirbelsäule. Für eine Gesamtwirbelsäulendarstellung wäre daher der Einsatz mehrerer Spulen notwendig und eine Wirbelsäulenaufnahme ohne Lageveränderung des Patienten ist nicht möglich. Ebenso bedingt es die MR-Technik, dass Strukturen in einem Mehrschicht-/ Schnittbildverfahren erfaßt werden. In der, für die Skoliosebeurteilung angewandten, koronaren Schnitttechnik verlassen die physiologischen Wirbelsäu-

lenkrümmungen die Grenzen der Einzelschicht. Der Betrachter erhält kein, dem Röntgenverfahren vergleichbares, Übersichtsbild.

Grundidee des neuen Bonner MR-Verfahrens ist es, eine Wirbelsäulenübersichtsabbildung zu generieren, welche den kyphotischen und lordotischen Ausbiegungen der Wirbelsäule folgt und ohne Verfälschung der tatsächlichen Krümmungsverhältnisse die Vermessung des Cobb-Winkels bei der Skolioseerkrankung erlaubt.

Dazu wurde ein in Abschnitt 2 näher erläutertes Verfahren entwickelt, welches diesen Forderungen nachkommt, und in ersten Untersuchungsreihen auf seine Praxistauglichkeit getestet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungsstudie sollte der Einsatz im klinischen Alltag überprüft werden und erste Aussagen einer vergleichenden Darstellung mit dem bisher geltenden Röntgenstandard an einem ausreichend großen Kollektiv kontrolliert bzw. abgesichert werden.

Zum einen sollte ein direkter Vergleich der Skoliosewinkel zwischen Röntgenaufnahme im Stehen und MR-Aufnahme im Liegen gezogen werden.

Zum anderen sollte der Einfluss einer Orthesentherapie auf das Krümmungsmaß behandelter Patienten untersucht und dokumentiert werden.

2. Methode und Patienten

2.1 Untersuchungsmethode

Die Untersuchungsmethode beruht auf einem MR-basierten Verfahren, welches 1998 am Radiologischen Institut der Universität Bonn von einer Arbeitsgruppe unter Leitung von Frau Dr. U. Jaeger und Herrn Dr. R. König konzipiert wurde (König et al., 1999).

Es wurde ein Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt, der aus den MR-basierten koronaren Schichtaufnahmen mit Hilfe eines Computers eine koronare Gesamtwirbelsäulendarstellung liefert.

2.1.1 Geräte und Sequenzen

Die Bildgebung erfolgte an einem 1,5 Tesla Magnet (Gyrosan ACS-NT, Powertrak 6000 System der Firma Philips Medizin Systeme, Best, Niederlande).

Es wurden sowohl eine 3D FFE-EPI-Sequenz (TR/TE/Flipwinkel/FOV: 18/9,0/20/450) mit einer Scanzeit von 4 Minuten, inklusive Rekonstruktionszeit: 6 Minuten, als auch eine 3D FFE Sequenz (TR/ TE/Flipwinkel/FOV: 10/4,5/20/450) mit einer Scanzeit von 5 Minuten, inklusive einer Rekonstruktionszeit von 7 Minuten (jeweils Scanmatrix 256 und Rekonstruktionsmatrix 512) getestet.

Unter Verwendung einer Körperspule wurden jeweils 64 koronare 2 mm dicke Schichten akquiriert. Während der MR-Messung wurde die Wirbelsäule in 2 Abschnitten erfaßt, Scan 1 bezog sich auf HWS und obere BWS (kraniale Akquisition) und Scan 2 auf untere BWS, LWS, Becken- und Hüftregion (kaudale Akquisition).

Um Pulsationsartefakte zu vermeiden, wurde anfangs ein fingerpulsoximeter-gesteuertes Herzfrequenz-Gating verwendet.

2.1.2 Untersuchungsablauf

Die Lagerung des Probanden bzw. Patienten erfolgte nach einem definierten und standardisierten Verfahren. Mit Hilfe einer HWS-zentrierten 3D Scout-Orientierungssequenz von ca. 30 Sekun-

den Dauer ließ sich die erste Messung planen. Die Begrenzung des oberen Bildrandes war der kraniozervikale Übergang, so daß die Oberkante des Dens axis die kraniale Bildgrenze ergab.

Die erste Messung erfaßte HWS und obere BWS. Die anschließende kaudale Akquisition erfolgte nach einem Tischvorschub von 320 mm. Alle Messschritte müssen ohne Angulation durchgeführt werden, da sonst eine spätere Fusion der Bilder zur Gesamtwirbelsäulendarstellung nicht möglich wäre.

Beide Messungen wurden mit der gleichen Sequenz durchgeführt. Die Länge des Tischvorschubs war so ausgewählt, daß für eine spätere Fusion beider Akquisitionen wegen der verminderten Bildqualität im äußeren Randbereich eine ausreichend große Überlappungszone vorhanden war.

2.1.3 PC-gesteuerte Bildrekonstruktion

Die Bildrekonstruktion, welche auf einem an der Radiologischen Klinik entwickelten windows-basierenden Programm beruht (König et al., 1999), wurde an einem Pentium MMX-PC, 200 MHZ vorgenommen.

Sie berücksichtigt folgenden Sachverhalt:

Da die skoliotische Deformität nicht in einer Ebene verläuft, musste ein Rekonstruktionsalgorithmus gefunden werden, der diesem Sachverhalt gerecht wird. Der Neigungswinkel einer Bandscheibe zur Horizontalebene läßt sich nur bestimmen, wenn die koronare Schnittebene genau durch das Zentrum der Bandscheibe verläuft. Für eine Gesamtdarstellung der Wirbelsäule müßte somit eine Frontalebene gefunden werden, die den lordotischen und kyphotischen Ausbiegungen folgt. Da ein solches Schnittbildverfahren technisch nicht möglich ist, entwickelte die Arbeitsgruppe einen Bildrekonstruktionsalgorithmus, der für jede Akquisition die Festlegung eines dreidimensionalen Pfades anhand von rekonstruierten sagittalen Schichten erforderte und durch die Zentren aller Bandscheiben bzw. Zwischenwirbelräume verlief. Vergleiche Abbildungskatalog Abbildung 1.

Das Gesamtbild setzte sich somit aus Ausschnitten aller koronaren Schichten, wie in einem Beispiel in Abbildung 2 dargestellt, zusammen.

Solchermaßen generierte Bilder weisen methodisch bedingt deutliche Stufenartefakte auf. Dies zeigte sich besonders in Bereichen stärkerer lordotischer und kyphotischer Wirbelsäulenausbiegungen. Durch Glättung, Filterung und Interpolation konnten diese Artefakte jedoch deutlich

reduziert werden. Gemäß den ursprünglich aus zwei Meßschritten erhaltenen Daten lagen dann jeweils eine Frontalübersicht kranialer und kaudaler Wirbelsäulenabschnitte vor. Den Tischvorschub von 320 mm berücksichtigend, wurden beide Akquisitionen zu einer Gesamtübersicht fusioniert (Abbildung 3).

Analog war die Vorgehensweise für die sagittale Ansicht gewählt.

Ein sogenanntes koronares „Summationsbild“, welches die topographische Beziehung der Wirbelsäule zu Rippen und Beckenskelett wiedergibt, wurde abschließend aus allen dorsal der Bandscheibenzentren gelegenen koronaren Schichten zusammengestellt.

Der Zeitaufwand für den Untersuchungsgang einschließlich korrekter Lagerung des Patienten betrug durchschnittlich etwa 14 Minuten. Die PC-gesteuerte Nachverarbeitung dauerte nochmals etwa 7 Minuten (König et al., 1999).

2.1.4 Dokumentation und Winkelbestimmung

Die Dokumentation aller in dieser Art generierten Übersichtsaufnahmen erfolgte als Papierausdruck im Format DIN A4. Jeweils eine Kopie ging der Orthopädischen Klinik zur weiteren Begutachtung und Aufbewahrung in der Krankenakte zu.

Auch ist eine Dokumentation per Laserkameraablichtung in den in der Radiologie gebräuchlichen Formaten sowie als Ausdruck im Format 35*43 möglich, um die Winkelbestimmung auch manuell durchführen zu können bzw. den Film mit den Röntgenbildern zu archivieren.

Die Winkelvermessung nach der Methode von Cobb (Hehne, 1989) erfolgte direkt am PC. Hierzu wurde ein wiederum an der Radiologischen Klinik entwickeltes Computerprogramm verwendet (König et al., 1999). Es ermöglichte mit Hilfe eines Vergrößerungsmechanismus eine präzise Wirbelabschlußplattenbestimmung und erlaubte eine unkomplizierte, digital gesteuerte Winkelbestimmung. Ohne eine weitere Rechenarbeit wurden die Ergebnisse der Winkelmessungen dem Untersucher direkt ablesbar präsentiert (Abbildung 8).

2.2 Anwendung der Methodik

Nach abgeschlossener Erprobungsphase und ersten klinischen Messungen, wurde das Verfahren seit 1998 erst vergleichend zur herkömmlichen Röntgen-Ganzwirbelsäulenaufnahme, später alternativ zu dieser eingesetzt. Im Rahmen einer klinischen Studie sollte die Anwendbarkeit der Methodik anhand eines größeren Patientenkollektivs im alltäglichen klinischen Einsatz geprüft werden. Dazu wurden vom Doktoranden (Autor dieser Arbeit) selbst, während eines Jahres die Durchführung der Untersuchungen, Auswertungen, sowie Vergleich der Befunde der konkurrierenden Verfahren übernommen. Nach Anleitung war die komplett selbständige Untersuchungsplanung und -durchführung möglich. Die Befundauswertung erfolgte jeweils gemeinsam mit erfahrenen Untersuchern.

2.2.1. Patientenaufkommen

Den Hauptanteil der Untersuchten stellten im Rahmen dieser klinischen Studie Patienten, die aus der Skoliosesprechstunde der Orthopädischen Universitätsklinik Bonn zugewiesen wurden. Das Schema bildgebender Kontrollen sah eine alternierende Abfolge von Röntgenaufnahme und MR-Untersuchung vor. Dies geschah jedoch nur nach eingehender Aufklärung durch Radiologen und Orthopäden. In allen Fällen wurden die Patienten, gegebenenfalls auch die Erziehungsberechtigten, über den Studiencharakter der Untersuchung informiert und ihr Einverständnis zur Teilnahme eingeholt. Es gab Gründe, wie z.B. eine bestehende Klaustrophobie oder ferromagnetische Metallimplantate, die zu einem Ausschluß aus der Studie führten. In diesen Fällen wurde die herkömmliche Röntgenkontrolle im Stehen alleine fortgeführt.

Weitere Untergruppen der hier vorliegenden Gesamtauswertung ergaben sich durch eine initiale Probandengruppe im Rahmen der Methodenentwicklung sowie eine Gruppe erwachsener Patienten, die nach abgeschlossener Skoliosebehandlung eine Nachuntersuchung erhielten.

Zusätzliche MR-Untersuchungen wurden eingeplant, wenn etwa für eine Korsettanpassung weitere Aufnahmen indiziert waren.

Während der Laufzeit der Studie wurden 151 Personen untersucht.

2.2.2 Technische Parameter

Sämtliche vom Doktoranden selbst durchgeführten Untersuchungen wurden gemäß dem im Abschnitt 2.1.1 dargelegten Protokoll angefertigt.

Da sich die oben erläuterte 3D FFE-EPI-Sequenz (TR/TE/Flipwinkel/FOV: 18/9,0/20/450) wegen deutlich reduzierter Aufnahmezeit bei gleichwertiger Bildqualität als günstiger erwies, konnten sowohl das Herzfrequenz-Gating, als auch der Wechsel auf Vergleichssequenzen entfallen. Die verkürzte Scanzeit belief sich auf 122 Sekunden, die Rekonstruktionszeit betrug nach wie vor 5 Minuten.

Anzahl und Schichtdicke der Aufnahmen blieben unverändert.

2.2.3 Patientenlagerungsbedingungen

Patienten ohne Korsettbehandlung wurden in gerader Rückenlagerung und flacher Lagerung des Kopfes mit palpatorisch kontrollierter, waagerechter Position der Beckenkämme gelagert. Wenn die letzte zu vergleichende Röntgenaufnahme mit Schuhausgleich erfolgte, fand ein entsprechender Ausgleich der Beinlängendifferenz statt. Besondere Aufmerksamkeit galt der horizontalen Beckenkammausrichtung sowie einer gestreckten und flachen Kopfhaltung, da somit auch eine Begutachtung zervikaler Deformitäten gegeben war. Eventuelle Beinlängendifferenzen wurden ausgeglichen, um einen direkten Vergleich mit in Schuhausgleich durchgeführten Stehendröntgenaufnahmen zu gewährleisten.

Das gleiche Untersuchungsschema wurde bei Patienten mit individueller Korsettbehandlung angewandt. Allerdings mußte das Korsett vor einer Untersuchung auf ferromagnetische Eigenschaften mittels Magnet untersucht werden. War eine „MR-Tauglichkeit“ gegeben, fand die erste Untersuchung im Korsett statt. Eine zweite Messung ohne Korsett ermöglichte den direkten Vergleich zur Röntgenvoraufnahme. In Einzelfällen konnte ein möglicher zusätzlicher korrigierender Effekt pneumatisch korrigierbarer Druckpolster getestet werden, die den üblicherweise im Korsett angebrachten Pelotten aufgesetzt waren. In Anwesenheit eines Orthopäden konnten die Polster auf ein gewisses Druckniveau eingestellt und ohne zusätzliche Strahlenbelastung des Patienten korrigierende Effekte ausgetestet werden.

Sämtliche Messungen wurden nach in Abschnitt 2.1.2 vorgestelltem Schema generiert und zur Nachverarbeitung weitergeleitet.

2.2.4 Nachverarbeitung

Die Untersuchungsnachverarbeitung durch den Doktoranden folgte der unter 2.1.3 und 2.1.4 geschilderten Verfahrensweise. Die digitale Natur rekonstruierter, koronarer Übersichtsaufnahmen ermöglichte eine direkte Winkelbestimmung am Computer. Dazu wurde die, im klinischen Alltag übliche, Messmethode nach Cobb angewandt (Henne, 1989). Ein Messbeispiel gibt Abbildung 8. Das hohe Auflösungsvermögen der dargestellten Strukturen erlaubte im Vergleich zur Röntgenaufnahme eine sichere und präzise Bestimmung von Wirbeldeck- und -grundplatten (vergleiche Abbildungen 10-12).

Sämtliche am Magnetresonanztomographen generierten Aufnahmen wurden durch einen erfahrenen Radiologen sowie den Doktoranden vermessen. Die Auswertung aktueller zum Vergleich herangezogener Röntgenaufnahmen wurde zeitlich unabhängig von zwei erfahrenen Radiologen, einem erfahrenen Orthopäden und dem Doktoranden durchgeführt. Einem unbewussten Ergebnisabgleich sollte vorgebeugt werden. Die Winkelbestimmung erfolgte für sämtliche Aufnahmen in der koronaren Ebene.

3. Ergebnisse

3.1 Epidemiologie und Patienten

An der Studie nahmen insgesamt 151 Personen teil, dabei wurden insgesamt 357 MR-Ganzwirbelsäulenaufnahmen erstellt.

Es handelte sich um 124 weibliche und 27 männliche Patienten von 6,5 bis 83,5 Jahren. Im Gesamtkollektiv lag das Durchschnittsalter der männlichen Patienten bei 19,5 Jahren, das der weiblichen bei 16,5 Jahren (in diese Zahlenangaben sind die Altersangaben der Screening- bzw. Erwachsenenuntersuchungen miteinbezogen). Bei 65 % aller Untersuchten handelte es sich um Kinder und Jugendliche unter 18 Jahren, deren mittleres Alter bei 14 Jahren lag. Das Verhältnis männlich zu weiblich betrug 27:124. Teilt man das Patientenkollektiv in die Gruppen < 8 Jahre, = 8 Jahre = 18 Jahre, >18 Jahre auf, so erhält man die Verteilung 3%, 61%, 36%. Dabei ist anzumerken, dass die hohe Prozentzahl in der letzten Gruppe auf Erwachsenenscreening-Untersuchungen beruht, die ebenfalls mit ehemaligen Patienten der Skoliosesprechstunde durchgeführt wurden. Diese waren lediglich Einzelmessungen, um die Krümmungsverhältnisse nach Behandlungsabschluss zu dokumentieren. Die Zuweisung dieser Patientengruppe erfolgte ebenfalls seitens der Orthopädischen Klinik. Im Rahmen einer klinischen Nachuntersuchung ehemals wegen Skoliose behandelter Patienten war man an einer nichtinvasiven, beziehungsweise röntgenstrahlenfreien Bildgebung interessiert.

Ein Großteil der Personen wurde in Verlaufskontrollen untersucht, so dass die Anzahl der Untersuchungen pro Patient zwischen 1 und 12 schwankte, der Schnitt lag bei 2 MR-Ganzwirbelsäulenaufnahmen pro Person.

Bei Kindern, die älter als 5 Jahre waren, und bei Jugendlichen zeigten sich nach ausführlicher Information über den Untersuchungshergang keine Complianceeinschränkungen. Sedierungen waren für diese elektive Untersuchung nicht indiziert. Das untersuchte Patientenkollektiv unterlag einer altersgemäßen Größen- und Gewichtsverteilung, anhand derer keine Limitierung für die Untersuchung auch von Erwachsenen erkennbar war. Bedingt durch das maximale Messfeld von 450 mm, wurde eine zweite Akquisition zur Erfassung der ganzen Wirbelsäule ab einer Körpergröße von mehr als einem Meter notwendig. Die Fusion während der Nachverarbeitung ermöglichte die gewohnte Darstellung als Gesamtübersicht (Abbildung 3).

In der Erprobungsphase wurden 12 Probandenuntersuchungen durchgeführt, die vor allem dazu dienten, Grenzen für Größe und Gewicht, sowie den Einfluss der Lagerung auf die Winkelbestimmung auszutesten. Für Größe und Gewicht ergaben sich keinerlei Einschränkungen. Die Re-

produzierbarkeit einer standardisierten Patientenlagerung ergab für die Cobbwinkelbestimmung eine Differenz von $1,7^\circ$ (König et al., 1999).

3.2 Normalverteilungsanalyse der Skolioseausprägungsgrade

Um zu gewährleisten, dass dieses Aufnahmeverfahren eine alternative Technik bietet, die auch dem gesamten Patientenspektrum gerecht werden kann, und dass der Schweregrad einer Skoliose keinen verfälschenden Einfluss auf die Messergebnisse hat, wurden auf eine nicht selektierte Zuweisung durch die Orthopäden geachtet. Anhand der folgenden Datenanalyse sollte eine annähernde Normalverteilung des Patientenaufkommens evaluiert werden, respektive analysiert werden, ob unser Patientenkollektiv als repräsentativ für eine Skolioseambulanz gelten kann.

Dazu wurden zunächst die aus den Röntgenaufnahmen bekannten zugrundeliegenden Skoliosewinkel ausgewertet.

In 113 Fällen lag ein bis 13 Monate altes Röntgenkorrelat vor. 52 MR-Messungen konnte kein Röntgenvergleich gegenübergestellt werden, da entweder das Zeitfenster zwischen beiden Aufnahmen zu groß war, oder das entsprechende, aus der Radiologischen Klinik zur Behandlung der Patienten entliehene Bild nicht vorlag.

Die folgende Übersicht gibt einen Einblick über die Winkelverteilung in den verschiedenen Wirbelsäulensegmenten aufgeteilt in die Abschnitte thorakal, thorakolumbal und lumbal. Diese Einteilung wurde der Übersichtlichkeit wegen so gewählt, insbesondere für einen späteren Vergleich mit den kernspintomographisch generierten Messergebnissen, um möglichst viele Krümmungen methodisch vergleichen zu können. Auf eine Differenzierung zwischen ein- und doppelbogige Skoliosen wurde verzichtet. Die Messwerte entstammen ausschließlich den zum Vergleich herangezogenen Standardröntgenaufnahmen.

Danach ergab sich für die thorakalen Krümmungen die in Tabelle 1 wiedergegebene Verteilung des Merkmals Cobbwinkel.

Zur Darstellung der Verteilung wurde für die Winkel eine Klassierung fortschreitend um 5° gewählt. Spalte 5 der Tabelle 1 enthält die Werte der Verteilungsfunktion F (relative Häufigkeitssumme) für das diskrete Merkmal Cobbwinkel. Die dazu ableitbare Standardnormalverteilung $\Phi\left(\frac{x - \mu}{s}\right)$ mit dem aus den Einzelwerten (vergleiche Urliste, welche als Exceldatei beim Doktoranden einzusehen ist) errechneten Mittelwert $\mu = 26,9^\circ$ der Cobbwinkel und der empiri-

schen Standardabweichung $s = 11,96^\circ$ ist für die jeweiligen Klassengrenzen x in Spalte 6 der Tabelle 1 ausgewertet.

Durch den Vergleich von Spalte 5 und Spalte 6 lässt sich die Annäherung der thorakalen Cobbwinkel-Verteilung an die Normalverteilung erkennen.

Tabelle 1: Überprüfung der Normalverteilung für das klassierte Merkmal thorakaler Cobbwinkel

Cobbwinkel in Grad	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Absolute Häufigkeitssumme ?	Relative Häufigkeitssumme F	Standard-Normalverteilung ? $(x-\mu)/s$
[5,10)	7	8,64%	7	8,64%	7,78%
[10,15)	5	6,17%	12	14,81%	15,87%
[15,20)	7	8,64%	19	23,45%	28,10%
[20,25)	16	19,75%	35	43,20%	43,64%
[25,30)	18	22,22%	53	65,42%	60,26%
[30,35)	12	14,81%	65	80,23%	74,68%
[35,40)	4	4,94%	69	85,17%	86,21%
[40,45)	2	2,5%	71	87,67%	93,45%
[45,50)	7	8,64%	78	96,31%	97,32%
[50,55)	2	2,5%	80	98,81%	99,01%
[55,60)	1	1,23%	81	100,04%	99,71%

$$\mu = 26,9^\circ$$

$$s = 11,96^\circ$$

μ = Mittelwert der Cobbwinkel

s = empirische Standardabweichung der Cobbwinkel

x = Klassengrenze

Aus der Tabelle 1 erkennt man, dass die Differenz der absoluten Häufigkeitssumme (Spalte 4) $?(\mu + s) - ? (\mu - s) = ? (40^\circ) - ? (15^\circ) = 69 - 12 = 57$ thorakale Skoliosen beträgt; d.h. im Winkelbereich von 15° bis 40° liegen 70% der thorakalen Skoliosen der zugrunde liegenden Rönt-

genuntersuchungen. Dazu im Vergleich ergeben sich bei der entsprechenden Normalverteilung (Spalte 6) 70,3%. Bei den thorakalen Krümmungen waren 43% klein-, 54% mittelgradige und 3% schwergradige Skoliosen, die Winkelverteilung reichte von 5° bis 57° Cobbwinkel (Vergleiche Urliste).

Im thorakolumbalen Bereich war die eine Hälfte als leicht, die andere als mittelgradig einzustufen, die Winkel reichten von 5° bis 35° (Vergleiche Urliste).

Entsprechend der Tabelle 1 zeigt Tabelle 2 die Verteilung der Cobbwinkel im thorakolumbalen Bereich. Im Winkelbereich von 10° bis 32,5° liegen 60% der thorakolumbalen Skoliosen. Die zugehörige Normalstandardverteilung liefert den Wert 68% (Siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Überprüfung der Normalverteilung für das klassierte Merkmal thorakolumbalen Cobbwinkel

Cobbwinkel in Grad	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Absolute Häufigkeitssumme ?	Relative Häufigkeitssumme F	Standard-Normalverteilung ? $(x-\mu)/s$
[5,10)	2	20%	2	20%	15,87%
[10,15)	1	10%	3	30%	28,77%
[15,20)	2	20%	5	50%	45,22%
[20,25)	-	-	5	50%	62,93%
[25,30)	2	20%	7	70%	77,94%
[30,35)	1	10%	8	80%	88,69%
[35,40)	2	20%	10	100%	95,05%

$$\mu = 21,3^\circ$$

$$s = 11,31^\circ$$

μ = Mittelwert der Cobbwinkel

s = empirische Standardabweichung der Cobbwinkel

x = Klassengrenze

Der lumbale Abschnitt zeigte dem thorakalen ähnliche Ergebnisse, 45% waren leicht-, 53% mittel- und 2% schwergradig. Die Winkel rangierten von 9° bis 53° (Vergleiche Urliste).

Im Winkelbereich 15° bis 35° liegen 62% der lumbalen Skoliosen. Die Standardnormalverteilung liefert zum Vergleich 70,4%. (Siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Überprüfung der Normalverteilung für das klassierte Merkmal lumbaler Cobbwinkel

Cobbwinkel in Grad	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Absolute Häufigkeitssumme ?	Relative Häufigkeitssumme F	Standard-Normalverteilung ? $(x-\mu)/s$
[5,10)	1	1,15%	7	1,15%	4,75%
[10,15)	13	14,94%	14	16,09%	12,71%
[15,20)	8	9,20%	22	25,29%	29,12%
[20,25)	16	18,39%	38	43,68%	53,59%
[25,30)	14	16,09%	52	59,77%	67,00%
[30,35)	16	18,39%	68	78,16%	83,15%
[35,40)	15	17,24%	83	95,40%	93,19%
[40,45)	2	2,30%	85	97,70%	97,78%
[45,50)	-	-	85	97,70%	99,45%
[50,55)	2	2,3%	87	100%	99,87%

$$\mu = 25,84^\circ$$

$$s = 9,51^\circ$$

μ = Mittelwert der Cobbwinkel

s = empirische Standardabweichung der Cobbwinkel

x = Klassengrenze

Die Zuverlässigkeit der neuen Methodik konnte somit an einem ausreichenden Spektrum an Röntgenkorrelaten getestet werden.

3.3 Vergleich Cobbwinkel Röntgen/Magnetresonanztomographie

Eine Überprüfung der Zuverlässigkeit der MR-Messungen in Rückenlage, verglichen mit den vorangegangenen Röntgenuntersuchungen im Stehen war bei 66 Patienten für 113 MR-Untersuchungen möglich durch direkten Vergleich der Cobbwinkel. Der mittlere Zeitabstand zwischen Röntgen- und MR-Untersuchung lag bei 4,9 Monaten, der maximale Abstand bei 13 Monaten.

Gemäß gängiger Praxis wurde eine Untergliederung in die Wirbelsäulenbereiche thorakal, thorakolumbal und lumbal vorgenommen, entsprechend thorakal (Scheitelwirbel C7-TH12), thorakolumbal (Scheitelwirbel TH12-L1), lumbal (Scheitelwirbel L2-L4).

In 81 von 113 Fällen wurde im MR-Bild der gleiche Neutralwirbel bestimmt wie im Röntgenkorrelat. In den übrigen Fällen kam es für den bestimmten Krümmungsradius zu einer maximalen Abweichung von 2 Wirbelkörpern. Ein direkter Vergleich war somit gegeben.

Im Folgenden sind die Ergebnisse zuerst in einer Gesamtübersicht dargestellt, danach nach Therapiefenstern geordnet, zuletzt nochmals gesondert nach dem Zeitabstand zwischen beiden Untersuchungsmethoden.

3.3.1 Gesamtübersicht

Die in der Ergebnisauswertung zu berechnende mittlere Abweichung wurde durch einfache Differenzbildung zwischen Röntgen- und MR-Meßwerten bestimmt. Die sich daraus ergebenden Werte waren entweder positiv ($MR < R\ddot{o}$), negativ ($MR > R\ddot{o}$) oder null ($MR = R\ddot{o}$). Die mittlere Abweichung errechnete sich aus deren Aufsummierung geteilt durch die Anzahl der jeweils aufgetretenen Fälle.

Im thorakalen Segment wurden insgesamt 81 Cobbwinkel bestimmt. Dabei fand sich für 78% der Fälle ein MR-Befund, der den röntgenologisch bestimmten Cobbwinkel im Mittel um $6,2^\circ$ unterschätzte (Differenz positiv). Die Abweichungen rangierten von $0,5^\circ$ bis 15° . In 7,5% der Fälle stimmten Röntgen- und MR-Befund exakt überein. Für 14,8% der Fälle ergab sich aus dem MR-Befund ein Überschätzen des im Stehen ermittelten Röntgenwertes (Differenz negativ). Die Abweichung lag im Mittel bei $4,7^\circ$ ($0,5^\circ$ - $13,5^\circ$).

Die Ergebnisse sind jeweils tabellarisch dargestellt:

Tabelle 4: Ergebnis-Übersicht des Vergleichs der MR- mit den röntgendiagnostisch bestimmten Cobbwinkeln, thorakal

	Überschätzt	Unterschätzt
Anzahl der Fälle	12	63
Mittlere Abweichung	4,7°	6,2°
Größte Abweichung	13,5°	15°
Kleinste Abweichung	0,5°	0,5°
Anzahl identischer Winkel	6	

Tabelle 5: Vergleichende Darstellung generierter Messwerte nach Therapiefenstern geordnet, thorakal

	Rö	MR mit Rö-Korrelat	MR ohne Rö-Korrelat
Anzahl koronarer thorakaler Cobbwinkel	81	81	58
Anzahl Winkelgrade < 25°	35	48	23
Anzahl Winkelgrade = 25° = 50°	44	33	29
Anzahl Winkelgrade > 50°	2	0	6
Größter bestimmter thorakaler Cobbwinkel	57°	47,5°	89,5°
Kleinster bestimmter thorakaler Cobbwinkel	5°	3°	8°

Für den thorakolumbalen Bereich ergaben sich nur 10 Vergleichsfälle. In 90% der Fälle kam es hier zu einer Unterschätzung des Winkelwertes, die im Schnitt bei 6,1° (0,5° bis 18°) lag und einmalig zu einer Überschätzung von 2°.

Tabelle 6: Ergebnis-Übersicht des Vergleichs der MR- mit den röntgendiagnostisch bestimmten Cobbwinkeln, thorakolumbal

	Überschätzt	Unterschätzt
Anzahl der Fälle	1	9
Mittlere Abweichung	2°	6,1°
Größte Abweichung	2°	18°
Kleinste Abweichung	0,5°	0,5°
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	0	

Tabelle 7: Vergleichende Darstellung generierter Messwerte nach Therapiefenstern geordnet, thorakolumbal

	Rö	MR mit Rö-Korrelat	MR ohne Rö-Korrelat
Anzahl koronarer thorakolumbalen Cobbwinkel	10	10	6
Anzahl Winkelgrade < 25°	5	8	4
Anzahl Winkelgrade = 25° = 50°	5	2	2
Anzahl Winkelgrade > 50°	0	0	0
Größter bestimmter thorakolumbalen Cobbwinkel	35°	29,5°	25,5°
Kleinster bestimmter thorakolumbalen Cobbwinkel	5°	7°	14°

Im lumbalen Abschnitt zeigte sich bei 87 Cobbwinkeln in 92% eine Winkelunterschätzung im Durchschnitt von $6,9^\circ$ ($0,5^\circ$ - 29°). 2,3% zeigten eine exakte Übereinstimmung der Werte. Zu einer Überschätzung des Röntgenwertes kam es bei 5,7% der Fälle. Sie lag im Mittel bei $3,3^\circ$ und rangierte zwischen $0,5^\circ$ und 9° .

Tabelle 8: Ergebnis-Übersicht des Vergleichs der MR- mit den röntgendiagnostisch bestimmten Cobbwinkeln, lumbal

	Überschätzt	Unterschätzt
Anzahl der Fälle	5	80
Mittlere Abweichung	$3,3^\circ$	$6,9^\circ$
Größte Abweichung	9°	29°
Kleinste Abweichung	$0,5^\circ$	$0,5^\circ$
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	2	

Tabelle 9: Vergleichende Darstellung generierter Messwerte nach Therapiefenstern geordnet, lumbal

	Rö	MR mit Rö-Korrelat	MR ohne Rö-Korrelat
Anzahl koronarer lumbaler Cobbwinkel	87	87	63
Anzahl Winkelgrade $< 25^\circ$	39	67	46
Anzahl Winkelgrade $= 25^\circ = 50^\circ$	46	20	15
Anzahl Winkelgrade $> 50^\circ$	2	0	2
Größter bestimmter lumbaler Cobbwinkel	53°	38°	$65,5^\circ$
Kleinster bestimmter lumbaler Cobbwinkel	9°	$5,5^\circ$	$5,5^\circ$

3.3.2 Cobbwinkel in Abhängigkeit zum Untersuchungsabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie

Der Einfluss eines zunehmenden Untersuchungsabstandes auf den Abweichungsgrad zeigt in dem hier untersuchten Spektrum keine signifikante Tendenz.

Sämtliche in der Gesamtübersicht verglichenen Korrelate wurden nach dem Untersuchungsabstand sondiert. Die Einteilung sah vier Gruppen vor, aufgegliedert in die Zeitfenster 0-1 Monat (Gruppe I) 0-Monate: bedeutet noch nicht 1 Monat alt, 1-Monat: bedeutet 1 Monat alt, noch nicht 2 Monate alt usw., 2-4 Monate (Gruppe II), 5-7 Monate (Gruppe III), 8-13 Monate (Gruppe IV), jeweils für die Abschnitte thorakal, thorakolumbal und lumbal. Die Ergebnisse sind im Folgenden tabellarisch aufgeschlüsselt (siehe Tabelle 10).

Im thorakalen Segment lag der im Mittel maximale Wert der unterschätzten Fälle mit 7° mittlerer Abweichung im Zeitfenster 0-1 Monate, gefolgt von $6,3^\circ$ der Gruppe II, während sich der minimale Wert der unterschätzten Fälle mit $4,5^\circ$ mittlerer Abweichung in der Gruppe IV (8-13 Monate) befand.

Thorakolumbal zeigt sich ähnlich in Gruppe I (n = 2 Fälle) ebenfalls die größte Abweichung bei den niedriger liegenden MR-Werten gegenüber den zugehörigen Röntgenwerten.

Im lumbalen Segment fand sich die größte Abweichung der unterschätzten Werte in Gruppe I mit $7,8^\circ$, die kleinste mit $5,3^\circ$ in Gruppe IV.

Tabelle 10: Aufgliederung der Cobbwinkeldifferenzen nach Zeitfenstern

Gruppe I: 0-1 Monat

Gruppe III: 5-7 Monate

Gruppe II: 2-4 Monate

Gruppe IV: 8-13 Monate

Wirbelsäulensegment		Absolute Häufigkeit				Extremwert				Mittelwert jeder Gruppe				Gemeinsamer Mittelwert	Segmentmittelwert
		GR I	GR II	GR III	GR IV	GR I	GR II	GR III	GR IV	GR I	GR II	GR III	GR IV		
thorakal	+	11	18	25	9	12°	15°	11,5°	8°	7°	6,3°	4,8°	4,5°	5,6°	3,7°
	-	4	2	2	4	8,5°	13,5°	10,5°	2,5°	3,4°	8,8°	8,9°	1,75°	4,65°	
	=	0	3	2	1									0°	
thorakolumbal	+	2	3	2	2	18°	7,5°	2°	6°	12,3°	4,8°	1,8°	3,5°	5,5°	4,75°
	-	0	1	0	0		2°				2,0°			2,0°	
	=	0	0	0	0										
lumbal	+	11	28	25	16	13°	25,5°	28,5°	11,5°	7,8°	6,7°	7,1°	5,3°	6,7°	5,98°
	-	2	1	0	2	3°	0,5°		9°	1,75°	0,5°		5,75°	3,1°	
	=	1	0	1	0									0°	

+ unterschätzte Skoliosen (Cobbwinkeldifferenz >0°)

- überschätzte Skoliosen (Cobbwinkeldifferenz < 0°)

= richtig geschätzte Skoliosen (Cobbwinkeldifferenz = 0)

Relative Häufigkeit der Gruppen I-IV:thorakal:

+ 78%

- 14,8%

= 7,4%

thorakolumbal:

+ 90%

- 10%

lumbal:

+ 92%

- 5,7%

= 2,3%

3.3.3 Analyse der Cobbwinkeldifferenz in Relation zum Zeitabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie

Die Kontingenztabelle ist die geeignete Darstellung der gemeinsamen Häufigkeitsverteilung von Winkelmaß und Zeitabstand. Dazu wurde getrennt für den thorakalen, thorakolumbalen und lumbalen Bereich je eine Kontingenztabelle angelegt (siehe Tabelle 11, 12, 13).

So wurden die 81 thorakalen Beobachtungseinheiten nach der Cobbwinkeldifferenz und dem jeweiligen Zeitabstand der MR-Untersuchung zur Röntgenuntersuchung in einem rechteckigen Schema eingetragen.

Die erfassten Cobbwinkeldifferenzen wurden in Spalten aufsteigend um $0,5^\circ$ - Schritte geordnet, die Zeitabstände in Zeilen ansteigend von Monat 0 bis Monat 13. Für eine Beobachtungseinheit des Merkmals Cobbwinkeldifferenz d gemessen in Grad wurde die zugehörige Spalte gesucht, dazu für den Zeitabstand t Monate der MR-Untersuchung die entsprechende Zeile. In das Feld der Überschneidung von Spalte und Zeile wurde ein „+“-Zeichen bzw. ein „-“-Zeichen eingetragen, ein „+“ bei Unterschreitung des Cobbwinkels der MR-Messung gegenüber der Röntgenmessung oder bei gleichem Wert, ein „-“ beim Überschreiten. Am rechten Rand des rechteckigen Schemas ist in der i -ten Monatszeile die absolute Häufigkeit n_i der Ausprägung Zeitabstand t_i eingetragen. Entsprechend ist am unteren Rand in der k -ten Spalte die absolute Häufigkeit m_k^+ bzw. m_k^- der Ausprägung Cobbwinkeldifferenz $+d_k$ bzw. $-d_k$ verzeichnet.

Anhand einer solchen Kontingenztabelle lässt sich zunächst der Durchschnittswert t sämtlicher eingetretenen Zeitabstände berechnen.

Im thorakalen Fall ist

$$t = 1/81 (n_1 \cdot 0 + n_2 \cdot 1 + \dots + n_{14} \cdot 13) \text{ Monat}$$

Mit den der Kontingenztabelle zu entnehmenden n_i -Werten ergibt sich $t = 4,74$ Monate.

Entsprechend errechnet sich der Durchschnittswert d aller 81 Cobbwinkeldifferenzen.

Es ist $d = 1/81 (m_1 \cdot 0^\circ + m_2 \cdot 0,5^\circ + \dots) = 3,66^\circ$, wobei $m_k = m_k^+ - m_k^-$

Zu dem Durchschnittswert d wird die Streuung in der Form der Varianz s_d^2 berechnet. Die Varianz s_d^2 der Winkeldifferenzen errechnet sich z.B. aus der thorakalen Kontingenztabelle bei $d = 3,65^\circ$ zu

$$s_d^2 = 1/81 [m_1^+ (0^\circ - d)^2 + m_1^- (-0^\circ - d)^2 + m_2^+ (0,5^\circ - d)^2 + m_2^- (-0,5^\circ - d)^2 + \dots] = 28,02 \text{ Grad}^2$$

Entsprechend findet man die Varianz s_t^2 der Zeitabstände zu

$$\begin{aligned} s_t^2 &= 1/81 [n_1 \cdot (0 - 4,74)^2 + n_2 \cdot (1 - 4,74)^2 + \dots + n_{14} (13 - 4,74)^2] \\ &= 10,22 \text{ Monate}^2 \end{aligned}$$

Es erhebt sich die Frage, ob die Varianz der thorakalen Winkeldifferenzen durch den zeitlichen Abstand der MR-Messung des Cobbwinkels gegenüber der Messung im Röntgenbild beeinflusst wird.

Zur Klärung der Frage führt man eine Varianzanalyse durch. Im allgemeinen Fall der Varianz $s^2 = 1/n [(y_1 - \mu)^2 + \dots + (y_n - \mu)^2]$ nimmt man an, die Varianz sei zum Teil durch den Untersuchungsabstand t beeinflusst (bei $n = 10$ ist $1/n$ durch $1/(n-1)$ zu ersetzen).

Man bestimmt die Regressionsgrade $g: y = m \cdot t + q$

(wobei y gegen t in einem Koordinatensystem aufgetragen ist)

mit der Eigenschaft:

- g geht durch den Punkt der Durchschnitte μ der y -Werte und t der Zeitabstände t
- die Summe der Quadrate von $y_i - \hat{y}_i$ mit $\hat{y}_i = m \cdot t_i + q$ ist ein Minimum.

Die in diesem Modell sich mit den \hat{y}_i -Werten angegebene Varianz ist

$$s_1^2 = 1/n [(\hat{y}_1 - \mu)^2 + (\hat{y}_2 - \mu)^2 + \dots + (\hat{y}_n - \mu)^2]$$

Sie mag einen Teil der Streuung der y_i -Werte erklären.

Es bleibt ein restlicher, unerklärter Teil.

$$s_2^2 = 1/n [(y_1 - \hat{y}_1)^2 + (y_2 - \hat{y}_2)^2 + \dots + (y_n - \hat{y}_n)^2]$$

Nun gilt

$$s^2 = s_1^2 + s_2^2 \quad \text{oder} \quad 1 = s_1^2/s^2 + s_2^2/s^2$$

Ist $s_1^2/s^2 = 1$, so wird die Varianz allein durch den Zeitfaktor bestimmt, im Falle $s_1^2/s^2 = 0$ spielt der Zeitfaktor keine Rolle.

Man bestimmt den Anteil, den die Varianz s_1^2 an der Gesamtvarianz s^2 hat.

$$\begin{aligned} s_1^2 / s^2 &= \frac{1/n [(y_1 - \mu)^2 + (y_2 - \mu)^2 + \dots + (y_n - \mu)^2]}{[1/n [(y_1 - \mu)^2 + (y_2 - \mu)^2 + \dots + (y_n - \mu)^2]]} \\ &= *) \frac{[1/n [(t_1 - t)(y_1 - \mu) + \dots + (t_n - t)(y_n - \mu)]]^2}{[1/n [(t_1 - t)^2 + \dots + (t_n - t)^2] \cdot 1/n [(y_1 - \mu)^2 + \dots + (y_n - \mu)^2]} \\ &= r^2 \end{aligned}$$

*) für die Gültigkeit des Gleichheitszeichens siehe etwa Heinecke et al., 1992

Die Wurzel aus diesem Ausdruck ist der sogenannte Korrelationskoeffizient r , abgesehen vom Vorzeichen.

Für den thorakalen Fall setzt man für die y die auftretenden Cobbwinkeldifferenzen d_i ein. Zu $y_i = d_i$ gehört der zeitliche Untersuchungsabstand t_i . Die Auswertung der Kontingenztabelle im thorakalen Fall liefert ein $r^2 = 0,0093$.

Der mögliche Anteil des Zeitfaktors an den Cobbwinkeldifferenzen wäre somit 0,93%, also knapp 1%. Man kann damit einen Einfluss eines zunehmenden Untersuchungsabstandes auf den Abweichungsgrad ausschließen.

Das gilt auch für den lumbalen Fall mit $r^2 = 0,0095$, das entspricht 0,95%.

Für den thorakolumbalen Fall errechnet sich ein $r^2 = 0,225$, d.h. 22,5% der Varianz ließen sich durch den Zeitfaktor erklären. Das Ergebnis ist aber durch die geringe Zahl ($n=10$) der Fälle wenig aussagekräftig. Würde man einen Ausreißerwert von 18° weglassen (Koordinate W243 der Urliste), so ergäbe sich $r^2 = 0,0418$ (Vergleiche auch Seite 38).

Eine weitere Möglichkeit für die Untersuchung auf Unabhängigkeit zweier Merkmale (hier Zeit und Winkeldifferenz) bietet der χ^2 -Test.

Auf dem 5% Niveau liefert für den thorakalen, wie für den lumbalen Fall der χ^2 -Test keinen Widerspruch zur Hypothese der Unabhängigkeit von Zeit und Winkeldifferenz. Für den thorakolumbalen Fall lässt sich wegen der geringen Zahl der Messungen der χ^2 -Test nicht durchführen.

Tabelle 11: Kontingenztabelle, thorakal

Grad	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	n_i														
Monat																															
0		-	+				-		+		+		+				12														
1			+		-							+					3														
2							+									+	4														
3		++	++						+								6														
4		+			++	+			+-	+		++					13														
5		+		+	+		++			+		+					10														
6		+	+		+		+			+	+						12														
7			+		+		+	+	+								7														
8			++			--			+		+						6														
9										+							1														
10							-										1														
11																	2														
12		+															2														
13			-			+											2														
																	81														
m_k^+	6	7	2	5	2	5	1	1	4	2	2	3	2	2	4	3	3	1	2	1	3	0	2	2	1	0	1	0	1	0	1
m_k^-	0	2	0	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0

3.3.4 Relation Cobbwinkel Magnetresonanztomographie/Röntgen

Die Krümmungswinkelunterschätzung lässt sich mit statistischen Verfahren genauer darstellen, anhand einer Punktwolke, die um die Regressionsgerade streut.

Für einen linearen Zusammenhang der Wertepaare ($x_{MR}/y_{Rö}$) verteilt sich die Punktwolke um die Regressionsgerade $y - \mu_y = m (x - \mu_x)$.

μ_x ist der Durchschnitt der MR-technisch gemessenen Cobbwinkelwerte x_{MR} und μ_y der Durchschnitt der im Röntgenbild bestimmten Werte $y_{Rö}$. Die Steigung der Regressionsgerade ist der Regressionskoeffizient

$$m = (1/s_x^2) \cdot [(x_1 - \mu_x)(y_1 - \mu_y) + \dots + (x_n - \mu_x)(y_n - \mu_y)] / n$$

s_x^2 ist die Varianz der MR-technisch bestimmten Werte.

m hängt mit dem Korrelationskoeffizienten r (vergleiche 3.3.3) durch $m = r \cdot s_y/s_x$ zusammen, s_x ist die Streuung der MR- und s_y die Streuung der Röntgen-Ergebnisse.

Für die 3 Wirbelsäulenabschnitte ergeben sich die in Tabelle 14 eingetragenen Parameter.

Tabelle 14: Parameter der Wirbelsäulenabschnitte

	n	μ_y Rö	μ_x MR	s_y^2 Rö	s_y Rö	s_x^2 MR	s_x MR	r^2	r	m
thorakal	81	26,94	23,28	141,34	11,9	107,52	10,67	0,8	0,89	1,02
thorakolumbal	10	21,3	16	115,21	10,73	57,8	7,6	0,75	0,86	1,2
lumbal	87	25,84	19,9	89,42	9,45	55,62	7,46	0,66	0,81	1,03

Von ähnlichem Interesse wie die Streuung der Messwerte um den Mittelwert μ ist die Streuung der Punktwolke um die Regressionsgerade. Dazu bestimmt man für jedes Wertepaar ($x_{MR}/y_{Rö}$) einer Beobachtungseinheit die Differenz $y_{Rö} - y^*$. Dabei ist y^* der y -Wert des zu x gehörenden Punktes auf der Regressionsgerade. Die Streuung $SPW = s$ der Punktwolke ist dann durch die Quadratwurzel aus $1/n [(y_1 - y^*_1)^2 + \dots + (y_n - y^*_n)^2]$ bestimmt (vergleiche 3.3.3).

Für die Streuparameter s der Punktwolke (SPW) für die 3 Wirbelsäulenabschnitte sind die Werte der Tabelle 15 zu entnehmen.

Tabelle 15: Streuung der Punktwolke (SPW) um die entsprechende Regressionsgerade

	n	SPW
thorakal	81	5,3°
thorakolumbal	10	5,4°
lumbal	87	5,5°

Zu der Regressionsgeraden $y - \mu_y = m(x - \mu_x)$; oder $y = m \cdot x + q$ mit $q = \mu_y - (m \cdot \mu_x)$ lassen sich die dazu parallelen Geraden $y = m \cdot x + q \pm s$ bestimmen ($s =$ Streuparameter (SPW) der Punktwolke).

Im thorakalen Fall ergeben sich die Regressionsgerade

$$y = 1,02 x + 3,06$$

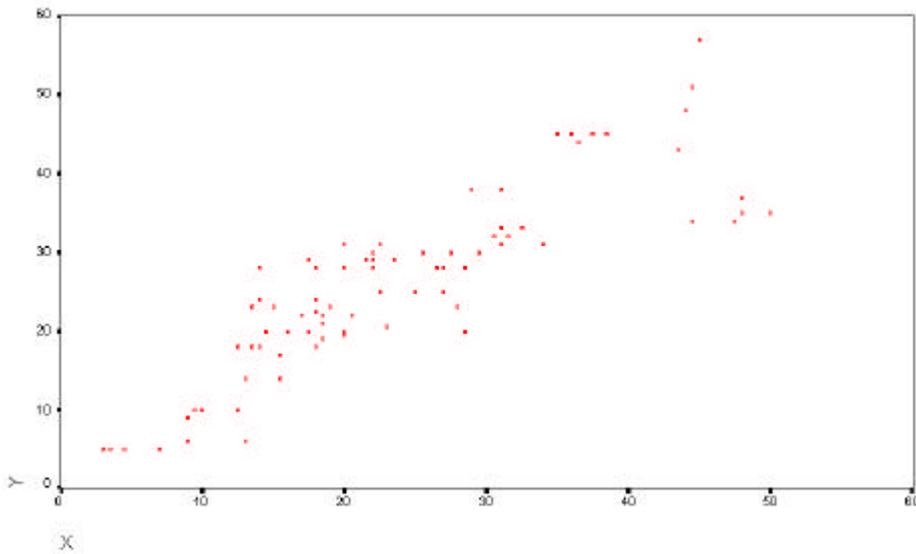
und die dazu parallelen Geraden

$$y = 1,02 x + 3,06 \pm 5,3$$

Von den 81 Punkten der thorakalen Punktwolke liegen 66 Punkte innerhalb des Parallelstreifens, das sind 80% der Punkte.

Die dazugehörige Punktwolke ist in der nachfolgenden Figur dargestellt.

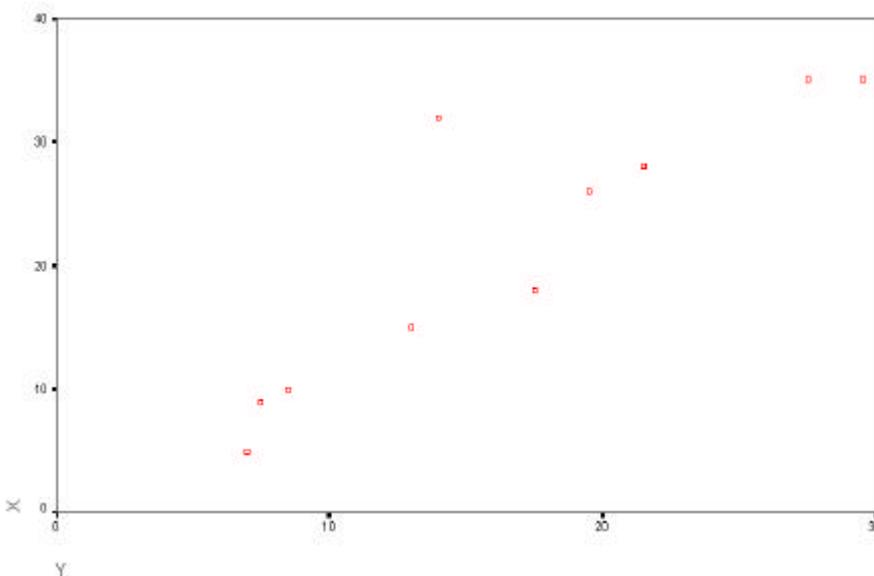
Figur 1: Punktwolke der MR- und röntgenbestimmten Cobbwinkel, thorakal



Punktwolke thorakal: x-Achse: Cobbwinkel der MR-Bestimmung in Grad
y-Achse: Cobbwinkel im Röntgenbild in Grad

Im thorakolumbalen Fall ergibt sich die Regressionsgerade $y = 1,2 x + 1,63$, und dazu die Paralleleraden $y = 1,2 x + 1,63 \pm 5,4$.

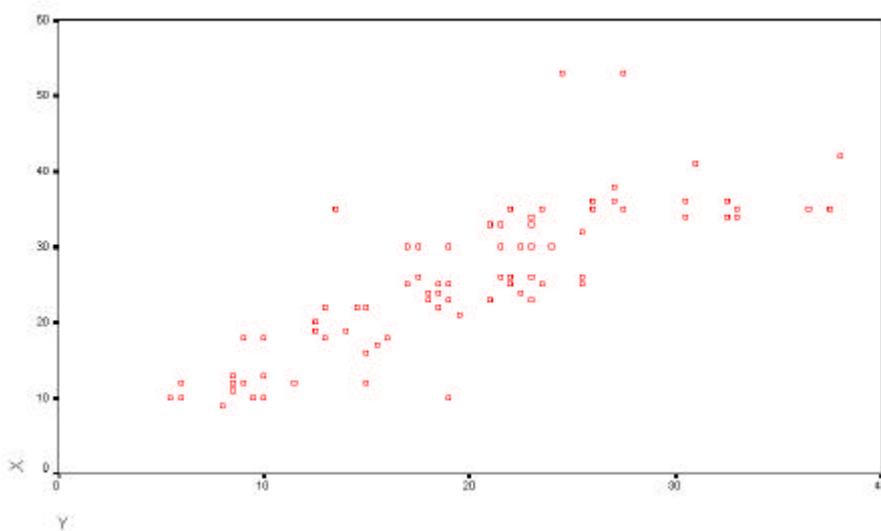
Figur 2: Punktwolke der MR- und röntgenbestimmten Cobbwinkel, thorakolumbal



Punktwolke thorakolumbal: x-Achse: Cobbwinkel der MR-Bestimmung in Grad
y-Achse: Cobbwinkel im Röntgenbild in Grad

Im lumbalen Fall hat man $y = 1,03 x + 5,32$ (Regressionsgerade),
bzw. $y = 1,03 x + 5,32 \pm 5,5$ (Parallelengeraden).

Figur 3 : Punktwolke der MR- und röntgenbestimmten Cobbwinkel, lumbal



Punktwolke lumbal: x-Achse: Cobbwinkel der MR-Bestimmung in Grad
y-Achse: Cobbwinkel im Röntgenbild in Grad

Der Streifen zwischen den beiden zur Regressionsgerade parallelen Geraden $y = m \cdot x + q \pm s$ enthält in den beiden letzten Fällen ebenfalls ca. 80% der Punkte.

Zur Untersuchung der Verteilung im Parallelstreifen unterscheidet man die Punkte mit $0 = (y_i - y_i^*) = SPW$ und die Punkte mit $0 > (y_i - y_i^*) > - SPW$.

Die erste Gruppe beinhaltet diejenigen Punkte, die im Streifen oberhalb oder auf der Regressionsgerade liegen, die zweite Gruppe diejenigen Punkte, die unterhalb der Regressionsgeraden liegen. Es zeigt sich, dass die Punkte in beiden Streifenhälften etwa gleich verteilt sind.

3.3.5 Korrelation MR-Cobbwinkelgröße zur Winkeldifferenz

Um zu klären, ob methodenbezogene Winkeldifferenzen in Abhängigkeit der Krümmungsausprägung auftreten, wurde für jeden der drei Wirbelsäulenabschnitte eine Kontingenztabelle angelegt, wobei die Differenz der Cobbwinkel im Stand und im Liegen (d.h. Röntgenwert – MR-Wert) gegen den der Liegendbestimmung (d.h. MR-bestimmten Wert) aufgetragen wurde.

Im thorakalen Fall (vergleiche Tabelle 16) ergab sich für den Korrelationskoeffizient der Wert $r = 0,09$ (sehr klein gegen 1) und für die Regressionsgerade: $d = 0,045 \cdot a + 2,6$, d.h. die Cobbwinkel-differenz wächst nicht mit der Größe des zugrunde liegenden Cobbwinkels a im Liegen, ist also davon unabhängig.

Für den thorakolumbalen Wirbelsäulenabschnitt (vergleiche Tabelle 17) ergibt sich $r = 0,28$ und für den lumbalen Abschnitt (vergleiche Tabelle 18) ist $r = 0,027$

Die zugehörigen Kontingenztabellen sind im Anschluss beigefügt.

Tabelle 16: Cobbwinkeldifferenz bei Liegend/Stehend-Aufnahme gegen Cobbwinkel bei Liegendaufnahme, Kontingenztabelle zur Häufigkeitsverteilung, thorakal

	Win- kel- diff. in Grad	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cobbwin- kel in Grad a_{MR}																	
[5,10)		+	++	+	+-	-									-		
[10,15)		+		+		-		+	+		+		-				+
[15,20)		+	++		+-		++	+	++		+	+	+		+		
[20,25)		+			+		++			-	+	+	+		+		
[25,30)		+	+-	+	+	-	+		+					-	+		
[30,35)		+	++		+	+		+									
[35,40)										+		++		+	+	+	
[40,45)			-						+		+						
[45,50)															+		-
[50,55)																	

$$r^2 = 0,0081$$

$$r = 0,09$$

Tabelle 17: Cobbwinkeldifferenz bei Liegend/Stehend-Aufnahme gegen Cobbwinkel bei Liegendaufnahme,
Kontingenztafel zur Häufigkeitsverteilung, thorakolumbal

	Winkel- diff. in Grad	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Cobbwinkel in Grad a_{MR}											
[5,10)			++	-							
[10,15)				+							1 · 18° Diff.
[15,20)		+							+		
[20,25)									+		
[25,30)							+			+	
[30,35)											
[35,40)											
[40,45)											
[45,50)											
[50,55)											

$$r^2 = 0,0784$$

$$r = 0,28$$

Tabelle 18: Cobbwinkeldifferenz bei Liegend/Stehend-Aufnahme gegen Cobbwinkel bei Liegendaufnahme, Kontingenztabelle zur Häufigkeitsverteilung, lumbal

	Winkel- diff. in Grad	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Cobbwinkel in Grad a_{MR}																	
[5,10)			+	+			+	+	+	+	++						
[10,15)		+	+					+				++	+				
[15,20)				+	++	+		-	++	++		+	++			+	+
[20,25)		+			++	+		++		+			++		+	+	++
[25,30)			+-										++		+	++	
[30,35)				+	+	+			++							+	
[35,40)					-	-				+							
[40,45)																	
[45,50)																	
[50,55)																	

$$r^2 = 0,000729$$

$$r = 0,027$$

3.3.6 Auflistung der Ergebnisse nach Therapiefenstern geordnet

Als Therapiefenster sind allgemein anerkannt: Skoliosewinkel geringer 20-25° werden konservativ krankengymnastisch behandelt, Skoliosen zwischen 25° und 50° werden mit einem Korsett therapiert und bei Winkelmaßen ab 50° gilt die Operation als indiziert. Ausgehend von den als Goldstandard geltenden Röntgenwerten wird die Klassierung in die Gruppe I (<25°), Gruppe II (=25°=50°), Gruppe III (>50°) vorgenommen. Jedem der Röntgenwerte steht ein MR-Messwert gegenüber, der bei der folgenden Differenzbildung entweder eine positive (MR-Winkel unterschätzt, inklusive Winkel identisch) oder negative (überschätzt) Abweichung ergibt. Diese Differenzen können somit von den Röntgenwerten ausgehend den Gruppen I-III zugeteilt werden. Die einfache Summation der Differenzen geteilt durch die Anzahl der über- bzw. unterschätzten Ereignisse der Gruppe liefert den Mittelwert der Abweichungen, bezogen zu dem als Goldstandard geltenden Röntgenkorrelat.

Das thorakale Segment für Gruppe I zeigt 28 Fälle, in denen der MR-Messwert unterschätzt oder als gleich befunden und 7 Fälle, in denen der MR-Wert überschätzt wird. Der Mittelwert der unterschätzten Differenzen ergab 3,1°, der der überschätzten 4,1°. Auffällige Ausreißerwerte sind in Gruppe I nicht zu verzeichnen.

Gruppe II zeigt eine mittlere Unterschätzung von 6,3° (39 Ereignisse) und eine mittlere Überschätzung von 5,4° (5 Ereignisse). 5 Ausreißerwerte, welche von 2 untersuchten Patienten stammen, fallen hier besonders auf, sie scheinen durch einen systematischen Messfehler in der Auswertung entstanden zu sein. In der Urliste, welche beim Doktoranden als Exeldatei einsehbar ist, sind diese Werte unter folgenden Koordinaten nachlesbar:

R 170-171;

R 338, R 340, R 343

Würde man diese Zahlenwerte eliminieren, ergäbe sich eine mittlere Unterschätzung von 5,4° bei 34 Ereignissen.

Gruppe III weist 2 unterschätzte Fälle auf, mit einer mittleren Abweichung von 9,3°.

Eine tabellarische Aufgliederung der Einzelergebnisse soll die Übersicht verbessern.

Tabelle 19: Klassierung der mittleren Cobbwinkeldifferenzen nach Therapiefenstern, thorakal

thorakal					
GR I (< 25°)		GR II (= 25° = 50°)		GR III (> 50°)	
Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD überschätzt	Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD überschätzt	Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD über- schätzt
3,1° (28 Fälle)	4,1° (7 Fälle)	6,3° (39 Fälle)	5,4° (5 Fälle)	9,3° (2 Fälle)	---
		5,4° (Wert korri- giert)			

Der thorakolumbale Abschnitt zeigt in Gruppe I eine mittlere Unterschätzung von 1,4° (4 Ereignisse) und eine Überschätzung von 2,0° (1 Ereignis).

Gruppe II ergibt eine mittlere Unterschätzung von 8,8° (5 Ereignisse). Hier ist wiederum ein Ausreißerwert in Koordinate W 243 der Urliste enthalten, der eliminiert zu einer mittleren Abweichung von 6,5° führt.

Für Gruppe III werden keine Werte eruiert.

Tabelle 20: Klassierung der mittleren Cobbwinkeldifferenzen nach Therapiefenstern, thorakolumbal

thorakolumbal					
GR I (< 25°)		GR II (= 25° = 50°)		GR III (> 50°)	
Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD überschätzt	Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD überschätzt	Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD über- schätzt
1,4° (4 Fälle)	2° (1 Fall)	8,8° (5 Fälle)	---	---	---
		6,5° (Wert korri- giert)			

Im lumbalen Segment ergeben sich 37 unterschätzte Ereignisse für Gruppe I mit einer mittleren Abweichung von 4,1° und 2 überschätzte Fälle, die Abweichung beträgt hier 6° im Mittel.

In Gruppe II beträgt die mittlere Differenz der unterschätzten Fälle $7,7^\circ$ (43 Ereignisse) und $1,5^\circ$ (3 Ereignisse) der überschätzten Fälle.

In dieser Beobachtungseinheit befindet sich eine Reihe auffälliger Werte, die Koordinaten der Urliste lauten:

AB 18, AB 20, AB 23;

AB 26, AB 28, AB 29;

AB 69, AB 71;

AB 170, AB 171

Eliminiert ergibt dies eine mittlere Unterschätzung von $6,14^\circ$.

Gruppe III enthält 2 unterschätzte Ereignisse mit einer mittleren Abweichung von 27° . Auch hier entstammen die Messwerte von einer Person, so dass sich die Frage nach einem Messfehler aufdrängt.

Tabelle 21: Klassierung der mittleren Cobbwinkeldifferenzen nach Therapiefenstern, lumbal

lumbal					
GR I ($< 25^\circ$)		GR II ($= 25^\circ = 50^\circ$)		GR III ($> 50^\circ$)	
Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD überschätzt	Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD überschätzt	Mittl. DD unterschätzt	Mittl. DD über- schätzt
$4,1^\circ$ (37 Fälle)	6° (2 Fälle)	$7,7^\circ$ (43 Fälle)	$1,5^\circ$ (3 Fälle)	27° (2 Fälle)	---
		$6,1^\circ$ (Wert korri- giert)		(mögl. Mess- fehler)	

3.4 MR-Darstellung korrigierender Effekte des Cheneau-Korsetts

Eine Teilgruppe bildeten Patienten mit mittelgradiger Skoliose, die überwiegend mit einem individuell angepassten Cheneau-Korsett behandelt wurden. Diese wurden vergleichend mit und ohne Korsett untersucht (vergleiche Abbildung 13). Zuerst erfolgte die Messung ohne Korsett, anschließend eine zweite nach Anlage des Korsetts, jeweils gemäß Studienprotokoll. Eine Störung durch Metallartefakte war nicht zu verzeichnen, da bei der Korsettherstellung auf ferromagnetische Bestandteile verzichtet wurde. Somit war nur eine minimale Qualitätseinbuße in der Bildrekonstruktion durch das getragene Korsett hinzunehmen.

Insgesamt wurden 76 Untersuchungen an 47 Patienten durchgeführt. Für einige Patienten konnte in Verlaufskontrollen der Behandlungsverlauf im Korsett dokumentiert werden.

Überwiegend wurden Patienten mit mittelgradigen Skoliosen untersucht. Im thorakalen Segment wiesen 55% der Krümmungen einen mittleren Ausprägungsgrad zwischen 25° und 50° , 42% einen leichten unter 25° und 3% einen schweren über 50° auf. Der durchschnittliche Cobbwinkel betrug $28,5^\circ$. Die nativen, koronar bestimmten Cobbwinkel reichten von $12,5^\circ$ bis 53° .

Die Aufgliederung der einzelnen Ausprägungsgrade in den verschiedenen Segmentbereichen erfolgt im Anschluss tabellarisch.

Tabelle 22: Vergleichende Darstellung der mit und ohne Korsett bestimmten Messwerte, thorakal

	MR nativ	MR im Korsett
Anzahl koronarer thorakaler Cobbwinkel	65	65
Anzahl Winkelgrade < 25°	27	39
Anzahl Winkelgrade = 25° = 50°	36	26
Anzahl Winkelgrade > 50°	2	0
Größter bestimmter thorakaler Cobbwinkel	53°	49°
Kleinster bestimmter thorakaler Cobbwinkel	12,5°	9°

Der thorakolumbale, sowie lumbale Abschnitt zeigte überwiegend Winkelmaße kleiner 25°. Thorakolumbal lagen 80% der Winkelmaße im kleingradigen Bereich, 20% waren mittelgradig (durchschnittlicher Cobbwinkel 21,4°). Das maximal vermessene Winkelmaß lag bei 27,5°, das minimale bei 14°.

Tabelle 23: Vergleichende Darstellung der mit und ohne Korsett bestimmten Messwerte, thorakolumbal

	MR nativ	MR im Korsett
Anzahl koronarer thorakaler Cobbwinkel	5	5
Anzahl Winkelgrade < 25°	4	5
Anzahl Winkelgrade = 25° = 50°	1	0
Anzahl Winkelgrade > 50°	0	0
Größter bestimmter thorakaler Cobbwinkel	27,5°	16°
Kleinster bestimmter thorakaler Cobbwinkel	14°	12,5°

Lumbal ergaben sich die Zahlen 75% ($<25^\circ$), 25% ($=25^\circ=50^\circ$) Der mittlere Cobbwinkel für diesen Abschnitt betrug $24,6^\circ$. Schwergradige Skoliosen kamen in diesen Abschnitten nicht vor, so dass die Extremwerte zwischen 43° und 9° Cobbwinkel schwanken.

Tabelle 24: Vergleichende Darstellung der mit und ohne Korsett bestimmten Messwerte, lumbal

	MR nativ	MR im Korsett
Anzahl koronarer thorakaler Cobbwinkel	69	69
Anzahl Winkelgrade $< 25^\circ$	52	57
Anzahl Winkelgrade $= 25^\circ = 50^\circ$	17	12
Anzahl Winkelgrade $> 50^\circ$	0	0
Größter bestimmter thorakaler Cobbwinkel	43°	38°
Kleinster bestimmter thorakaler Cobbwinkel	9°	7°

Eine Untergliederung in ein- und doppelbogige Skoliosen wurde nicht vorgenommen. Durch einfache Differenzbildung, des in der koronaren Ebene bestimmten Cobbwinkels, sollte der mögliche Einfluss eines getragenen Korsetts auf die einzelnen Wirbelsäulenabschnitte untersucht werden. Die Einteilung der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte ist die oben gewählte.

Für das thorakale Segment konnten 65 Krümmungen auf ihren Ausprägungsgrad unter Korsetteinfluss betrachtet werden. In 82% der Fälle kam es unter Korsettbedingungen zu einer deutlichen Winkelabflachung im Schnitt von $5,2^\circ$. In einem Fall konnte das Krümmungsmaß um sogar 18° abgemildert werden.

4% der verglichenen Fälle zeigten keine Winkelverbesserung, 14% eine Verschlechterung der Winkelmaße. Diese lag im Schnitt bei $1,8^\circ$, der maximale Abweichungswert betrug 5° .

Der mit $28,5^\circ$ bestimmte mittlere Cobbwinkel konnte unter Korsetteinfluss um 13% auf $24,8^\circ$ vermindert werden.

Tabelle 25: Korrigierender Einfluss des Cheneau-Korsetts

Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Nativmessung/ Winkel der Korsettmessung, thorakal

	Negative Winkeldifferenz	Positive Winkeldifferenz
Anzahl der Fälle	9	53
Mittlere Abweichung	1,8°	5,2°
Größte Abweichung	5°	18°
Kleinste Abweichung	0,5°	0,5°
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	3	

Die im thorakolumbalen Abschnitt betrachteten Skoliosen zeigten alle eine Verbesserung der Winkelwerte im Mittel um 5,2°, rangierend von 1,5° bis 14°.

Der durchschnittliche Cobbwinkel von 18,7° wurde um 28% auf 13,5° korrigiert.

Tabelle 26: Korrigierender Einfluss des Cheneau-Korsetts

Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Nativmessung/ Winkel der Korsettmessung, thorakolumbal

	Negative Winkeldifferenz	Positive Winkeldifferenz
Anzahl der Fälle	0	5
Mittlere Abweichung		5,2°
Größte Abweichung		14°
Kleinste Abweichung		1,5°
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	0	

90% der lumbalen Skoliosen wiesen ebenfalls abnehmende Winkelmaße auf. Die Differenz der Cobbwinkel bei Messung im Korsett zeigte im Mittel eine Verbesserung um 4,9°. Die Differen-

zen der verbesserten Fälle reichte von $0,5^\circ$ bis 11° . Zu einer Zunahme des Cobbwinkels kam es in 10° der Fälle, das mittlere Maß lag bei 2° (von 1° - 3° rangierend).

Der bestimmte mittlere Winkel wurde von $21,4^\circ$ auf $17,3^\circ$ um 19% vermindert.

Tabelle 27: Korrigierender Einfluss des Cheneau-Korsetts

Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Nativmessung/ Winkel der Korsettmessung, lumbal

	Negative Winkeldifferenz	Positive Winkeldifferenz
Anzahl der Fälle	7	62
Mittlere Abweichung	$2,1^\circ$	$4,9^\circ$
Größte Abweichung	3°	11°
Kleinste Abweichung	1°	$0,5^\circ$
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	0	

Die Zusammenfassung aller Krümmungen ergibt einen Durchschnittswinkel von $24,6^\circ$ ohne Korsett und $20,6^\circ$ mit Korsett. Der mittlere Korrektoreffekt lag also bei 16%.

Tabelle 28: Vergleichende Darstellung durchschnittlicher Cobbwinkelwerte in der Nativliegendmessung und im Cheneau-Korsett

	mittlerer Cobbwinkel ohne Korsett	mittlerer Cobbwinkel im Korsett	mittlere Korrektur in Prozent
thorakal	$28,5^\circ$	$24,8^\circ$	13 %
thorakolumbal	$18,7^\circ$	$13,5^\circ$	28 %
lumbal	$21,4^\circ$	$17,3^\circ$	19 %
Gesamtbetrachtung	$24,6^\circ$	$20,7^\circ$	16 %

Eine deutliche Reduktion der gemessenen Cobbwinkel durch das Tragen des Cheneau-Korsetts konnte somit in allen Wirbelsäulenabschnitten gezeigt werden.

3.5 Korsetteinfluss im pneumatisierten Korsett

Ausgehend von der Korsettstudie sollte eine mögliche weitere Korrektur der skoliotischen Deformität durch das Einbringen pneumatisch kontrollierter Pelotten im Korsett getestet werden. Dabei konnten 15 Patienten nach folgendem Schema untersucht werden Zuerst erfolgte die Untersuchung im Korsett, nachfolgend wurden die Druckpolster durch einen Orthopäden in das Korsett eingebracht und auf ein bestimmtes Druckniveau eingestellt. Ein zweiter Untersuchungsgang unter pneumatischer Korrektur schloss sich an (Abbildung 14). Es wurden 19 MR-Ganzwirbelsäulenaufnahmen generiert.

Die Aufschlüsselung der Ergebnisse wird in den bekannten Einteilungsschritten vorgenommen.

Tabelle 29: Vergleichende Darstellung der Korsettmessung mit und ohne Pneumatisierung, thorakal

	MR im Korsett	MR im pneum. Korsett
Anzahl koronarer thorakaler Cobbwinkel	17	17
Anzahl Winkelgrade < 25°	10	10
Anzahl Winkelgrade = 25° = 50°	7	7
Anzahl Winkelgrade > 50°	0	0
Größter bestimmter thorakaler Cobbwinkel	49°	49°
Kleinster bestimmter thorakaler Cobbwinkel	11°	10°

Der thorakolumbale Bereich zeigte nur eine Krümmung mit 12,5° Cobbwinkel.

Tabelle 30: Vergleichende Darstellung der Korsettmessung mit und ohne Pneumatisierung, thorakolumbal

	MR im Korsett	MR im pneum. Korsett
Anzahl koronarer thorakolumbaler Cobbwinkel	1	1
Anzahl Winkelgrade < 25°	1	1
Anzahl Winkelgrade = 25° = 50°	0	0
Anzahl Winkelgrade > 50°	0	0
Größter bestimmter thorakolumbaler Cobbwinkel	12,5°	12,5°
Kleinster bestimmter thorakolumbaler Cobbwinkel	12,5°	12,5°

Im lumbalen Abschnitt wurden 12 leichtgradige und 5 mittelgradige Fälle ermittelt. Die Maximalwerte lagen zwischen 7,5° und 27,5°

Tabelle 31: Vergleichende Darstellung der Korsettmessung mit und ohne Pneumatisierung, lumbal

	MR im Korsett	MR im pneum. Korsett
Anzahl koronarer lumbaler Cobbwinkel	17	17
Anzahl Winkelgrade < 25°	15	17
Anzahl Winkelgrade = 25° = 50°	2	0
Anzahl Winkelgrade > 50°	0	0
Größter bestimmter lumbaler Cobbwinkel	27,5°	23,5°
Kleinster bestimmter lumbaler Cobbwinkel	7,5°	4,5°

Die Messungen mit einer verstärkten pneumatischen Korrektur ergaben in 59% der thorakal bestimmten Krümmungen eine weitere Verbesserung gegenüber der Korsettstudie um $1-9,5^\circ$, im Mittel um $3,9^\circ$. In einem Fall (6%) kam es zu keiner Änderung der Krümmungsverhältnisse. 35% der Fälle zeigten eine Verschlechterung im Schnitt um $3,4^\circ$, dabei lag der Extremwert der Abweichungen bei 10° .

Tabelle 32: Zusätzlicher korrigierender Einfluss eines pneumatisierten Korsetts

Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Korsettmessung/ Winkel der Korsettmessung pneumatisiert, thorakal

	Negative Winkeldifferenz	Positive Winkeldifferenz
Anzahl der Fälle	6	10
Mittlere Abweichung	$3,4^\circ$	$3,9^\circ$
Größte Abweichung	10°	$9,5^\circ$
Kleinste Abweichung	$0,5^\circ$	$0,5^\circ$
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	1	

Die im thorakolumbalen Segment betrachtete Krümmung zeigte keine Veränderung.

Tabelle 33: Zusätzlicher korrigierender Einfluss eines pneumatisierten Korsetts

Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Korsettmessung/ Winkel der Korsettmessung pneumatisiert, thorakolumbal

	Negative Winkeldifferenz	Positive Winkeldifferenz
Anzahl der Fälle		
Mittlere Abweichung		
Größte Abweichung		
Kleinste Abweichung		
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	1	

Eine deutliche Verbesserung zeigte der lumbale Abschnitt. In 82% der untersuchten Krümmungen führte die pneumatische Korrektur zu einer Winkelabflachung von $3,2^\circ$ im Mittel ($1-5,5^\circ$). In einem Fall (6%) machte sich die Korrektur nicht bemerkbar. Bei 2 Untersuchungen (12%) ergab sich eine Verschlechterung von im Schnitt 1° ($0,5-1,5^\circ$).

Tabelle 34: Zusätzlicher korrigierender Einfluss eines pneumatisierten Korsetts

Ergebnisse der Differenzbildung Winkel der Korsettmessung/ Winkel der Korsettmessung pneumatisiert, lumbal

	Negative Winkeldifferenz	Positive Winkeldifferenz
Anzahl der Fälle	2	14
Mittlere Abweichung	1°	$3,2^\circ$
Größte Abweichung	$1,5^\circ$	$9,5^\circ$
Kleinste Abweichung	$0,5^\circ$	1°
Anzahl der Fälle in denen Winkel identisch	1	

Ebenso wurde auch hier der durchschnittliche Cobbwinkel für die Messungen im Korsett und pneumatisierten Korsett bestimmt.

Tabelle 35: Vergleichende Darstellung durchschnittlicher Cobbwinkelwerte im Cheneau-Korsett und im pneumatisierten Cheneau-Korsett

	mittlerer Cobbwinkel im Korsett	mittlerer Cobbwinkel im pneum. Korsett	mittlere Korrektur in Prozent
thorakal	$24,8^\circ$	$23,7^\circ$	4,3 %
thorakolumbal	$12,5^\circ$	$12,5^\circ$	0 %
lumbal	$15,2^\circ$	$12,6^\circ$	16,6 %
Gesamtbetrachtung	$19,8^\circ$	$18,0^\circ$	8,8 %

3.6 Screening / Erwachsenenscreening

Bei 33 Patienten, die zum Skoliosescreening vorgestellt wurden, lagen in der MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme Cobbwinkel unter 10° vor.

Zusätzlich wurden 26 erwachsene Patienten nach abgeschlossener Skoliosebehandlung in der Vorgeschichte untersucht (Abbildung 16). Auch für dieses Patientengut zeigte sich keine technische Einschränkung in der Protokollanwendung.

3.7 Anomalien und Sonderfälle

Trotz Adaption der Untersuchung auf die WS-Übersichtsdarstellung wurden in zahlreichen Fällen weitere Nebenfunde wie assoziierte Wirbelkörperfehlbildungen oder Anomalien an Organen und Weichteilveränderungen erkannt (Abbildung 7). Besonders ist hervorzuheben, dass durch das vergrößerte Erfassungsfeld bei einigen der Patienten bei korrekter Lagerung bislang mit dem röntgenologischen Verfahren nicht bekannte Ausgleichskrümmungen an der HWS befundet wurden, die in das weitere Therapiekonzept aufgenommen wurden. Die Zahl der Nebenfunde vergrößerte sich somit erheblich im Vergleich zu den Röntgenkorrelaten.

4. *Diskussion*

Die vorgelegte Arbeit untersuchte die Anwendbarkeit eines neuen Verfahrens zur Skoliose-diagnostik. Anliegen der vorangegangenen Entwicklung einer MR-Ganzwirbelsäulenaufnahmetechnik war es, einzelne Röntgenverlaufskontrollen ersetzen und damit die kumulative Strahlenbelastung reduzieren zu können. Dabei muss es sich am bisherigen Goldstandard, der Röntgen-ganzwirbelsäulenaufnahme im Stehen, messen.

Die Entwicklung der neuen Untersuchungstechnik brachte methodisch bedingt, zahlreiche Problemstellungen mit sich, die es vor Beginn der Studie zu lösen galt. Sie sind aber nicht Inhalt dieser Arbeit, deren Aufgabe es war, den zuverlässigen klinischen Einsatz zu überprüfen. Der Vorgang des Untersuchungsablaufes und die Bildrekonstruktion sind zuvor an Probanden wie auch an Patienten auf ihre Zuverlässigkeit getestet worden. Diese Ergebnisse und Erfahrungen sind in der Literatur veröffentlicht (König et al., 1999). Die einzelnen Verfahrensschritte sind in Einleitung und Methodik aufgeführt, um die durch den Doktoranden durchgeführten Untersuchungsschritte näher zu erläutern.

Die Bedeutung der Skolioseverlaufskontrolle besteht in der Aufgabe, rechtzeitig einen nötigen Therapiewechsel bei Fortschreiten der Erkrankung einzuleiten.

Als Therapiefenster werden angesehen: Winkel geringer als 20° - 25° , sie werden krankengymnastisch therapiert, bei Skoliosen ab $20^{\circ}/25^{\circ}$ wird mit einer Korsettbehandlung begonnen, ebenso wenn eine Progredienz von mehr als 5° in einem halben Jahr nachgewiesen wurde (Böni et al., 2002; Hopf et al., 1991; Matussek et al., 2000; Weber et al., 1999).

Für Cobbwinkel $>40^{\circ}/50^{\circ}$ gilt die operative Therapie als indiziert (Krismer et al., 2002).

Legt man diese Angaben zugrunde, so kann als wesentliches Ziel der Kontrolluntersuchungen definiert werden, dass die Tendenz zum Progress eines Krümmungswinkels auf die Grenze des Therapiefensters hin zuverlässig erkannt werden muss. Es galt somit zu klären, in welchem Ausmaß sich der fehlende Einfluss der Schwerkraft bei Liegenduntersuchung bemerkbar macht und ob die zu erwartenden verminderten Krümmungsmaße bei der Entscheidungsfindung zum Therapiewechsel überhaupt verwertbar sind, oder ob das Verfahren nur für die Verlaufskontrolle innerhalb eines Therapiefensters geeignet ist.

4.1 Epidemiologie und Patienten

Die Verlässlichkeit des Verfahrens (König et al., 1999) führte dazu, dass die neue Untersuchungsmethode im normalen klinischen Einsatz angewandt werden konnte. Parallel zur orthopädischen Skoliosesprechstunde wurde eine MR-Messzeit durch die Radiologische Klinik eingeführt. Somit konnte wöchentlich direkt im Anschluss an die von den Orthopäden durchgeführte klinische Untersuchung eine bestimmte Anzahl an Patienten dem MR-Untersuchungsgang zugeführt werden. Die Zuteilung der Patienten erfolgte durch die Orthopäden. Ausgehend von den individuellen Befunden der Patienten bei Vergleich des MR- und Röntgen-Befundes und der Berücksichtigung der klinischen Situation wurde von den Kollegen der Orthopädischen Universitätsklinik Bonn für einen Großteil der in der Studie Untersuchten empfohlen, die nächste anstehende Röntgenkontrolle durch eine MR-Untersuchung zu ersetzen.

Sowohl das Geschlechterverhältnis, als auch die Altersverteilung der untersuchten Patienten spiegeln die epidemiologisch bestimmten Daten wieder. Mit einem Verhältnis von 1:4,6 werden in etwa die in der Literatur mit 1:6 angegebenen Zahlenwerte (Rössler und Rütter, 1997) erreicht. Ebenso bildete in der Studie die Gruppe der juvenilen Skoliosen den Schwerpunkt der untersuchten Patienten, nimmt man die Gruppe der Screening-/Erwachsenenscreeninguntersuchungen aus. Diese Gruppe von Untersuchten hatte auch nicht an Vergleichen mit Röntgenkorrelaten teilgenommen, da sie unter besonderen klinisch-orthopädischen Gesichtspunkten zur Langzeitbeobachtung nach abgeschlossener Skoliosebehandlung eingeladen worden waren.

Den Großteil der Untersuchten bildeten Mädchen mit einem mittleren Alter von etwa 14 Jahren, das ist zugleich auch diejenige Patientengruppe, welche ein erhöhtes Risiko trägt, strahleninduzierte Karzinome zu entwickeln. Es gilt in der Literatur als belegt, dass die Strahlenbelastung durch Röntgenkontrollen bei Skoliosepatienten als relevant angesehen werden muss (Almén et al., 1996; Levy et al. 1996) und dass vor allem Kinder und Jugendliche eine erhöhte Sensibilität gegenüber ionisierender Strahlung aufweisen (Almén et al., 1996; Hallén et al., 1992). Dies gilt insbesondere für Brustkrebs, maligne Erkrankungen der Gonaden, Lunge, Thyroidea und des Knochenmarkes (Almén et al., 1996; Doody et al., 2000; Hallén et al., 1992; Ron, 2002).

24 nicht auswertbare Untersuchungen, bei insgesamt 357 durchgeführten MR-Messungen, kamen überwiegend in der Erprobungs- und Entwicklungsphase zustande bei zu geringer Aquisitionsüberlappung wurde in der Rekonstruktion keine ausreichende Fusion erreicht. In Einzelfällen kam es zu Bildstörungen durch ferromagnetische Materialien (Abbildung 6).

Für die in der Skoliosesprechstunde behandelten Patienten konnte ein erheblicher Anteil der Röntgenkontrollen durch ein MR-Bild ersetzt werden, ebenso erfolgten die meisten Kontrollen im Rahmen der Korsettbehandlung mit Hilfe der neuen Untersuchungstechnik.

Als Fazit ergibt sich für die behandelten Patienten eine deutliche Minderung der Strahlenbelastung und somit auch des Tumorrisikos, da das MR-Verfahren die bisher einzige alternative Methode darstellt, welche strahlenfrei zu einer bildlichen Darstellung der Wirbelsäule führt. Gesundheitsgefährdende Auswirkungen der Magnetresonanztomographie sind im klinischen Einsatz bei der hier genutzten Feldstärke nicht bekannt.

Ein sinnvoller Einsatz der MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme erbringt im Endeffekt eine in Abhängigkeit von der Anzahl der „eingesparten“ Röntgenaufnahmen reduzierte Strahlenbelastungsdosis für den Patienten, welche sich langfristig ebenso in der Erkrankungsstatistik und strahleninduzierten Sterblichkeit widerspiegeln müsste.

4.2 Normalverteilungsanalyse der Skoliosegrade

Neben Geschlechts- und Altersverteilung war es für die Studie wichtig, ein ausreichendes Spektrum der verschiedensten Skolioseausprägungsgrade zu erhalten, welches dem Normalkollektiv (der aus der Literatur bekannten Skolioseinzidenzen) nahe kommt. Das schon in den vorherigen Abschnitten erläuterte Zuteilungsverfahren der orthopädischen Klinik war dabei von Hilfe, denn somit erhielt man einen Querschnitt durch das alltägliche Patientengut. Bestimmte Patientengruppen mit speziellen Ausprägungsgraden wurden nicht selektiert.

Eine quantitative Aussage ist möglich, wenn man die empirische Häufigkeitsverteilung charakterisiert durch den Mittelwert μ und die Streuung s vergleicht mit der Normalverteilung, die eben diese Parameter μ und s besitzt. Der Vergleich wurde über die zugehörige Verteilungsfunktion $F(x) = F[(x-\mu)/s]$ durchgeführt, deren Werte nach der Standardisierung $x \rightarrow u = (x-\mu)/s$ aus einer Tabelle für die Standardnormalverteilungsfunktion $F(u)$ abgelesen wurden.

Die Auswertung liefert für jeden der drei unterschiedenen Wirbelsäulenabschnitte eine gute Annäherung der Häufigkeitsverteilung der Cobbwinkelwerte an die Normalverteilung.

Man kann also sagen, dass die durch die MR-Messung untersuchten Patienten ganz gut die Gesamtheit der klinisch behandelten Skolioseerkrankungen repräsentieren. Diese Aussage ist wichtig im Hinblick auf die Allgemeingültigkeit der in der Studie erlangten Ergebnisse.

4.3 Vergleich Cobbwinkel Röntgen/Magnetresonanztomographie

Für eine vergleichende Winkeldokumentation zwischen Röntgenbildern und MR-Aufnahmen musste ein geeignetes Einteilungssystem gefunden werden, welches die Vielzahl an unterschiedlichen Einzelwerten in übersichtliche Einheiten ordnete.

Die wichtigsten Ordnungskriterien waren die Lokalisation der Krümmungen, sowie der zeitliche Abstand zwischen vergleichbarer Röntgen- und MR-Untersuchung.

Die zu einem Winkelvergleich herangezogenen Röntgenbilder sollten ein Zeitfenster von mehr als 13 Monaten nicht überschreiten, ebenso wurde der Untersuchungsabstand für jede zu vergleichende Einheit gesondert erfasst. Die Auswirkungen des Faktors Zeit konnten so in Abschnitt 3.3.2 gesondert betrachtet werden.

Eine Untergliederung der Krümmungslokalisation in die Segmente thorakal, thorakolumbal und lumbal erschien als sinnvoll, damit vermengende Effekte zwischen den einzelnen Abschnitten ausgeschlossen werden konnten. Dies war sinnvoll, da im Vorhinein nicht ersichtlich war, ob ein Wegfall der Schwerkraft sich auf einen bestimmten Wirbelsäulenabschnitt in besonderem Maße auswirkt. Sowohl für die Unterteilung auf die genannten Abschnitte, als auch für eine vergleichende Winkeldokumentation war die Lage des Scheitelwirbels von Bedeutung. Ein Vergleich zwischen Röntgen- und MR-Bild konnte nur angestellt werden, wenn Scheitelwirbel und Krümmungsbogen von Röntgen-, wie auch MR-Bild in etwa die gleiche Position und Länge aufwiesen. Diese Bedingungen waren für einen direkten Vergleich Voraussetzung.

113 Untersuchungen an 66 Patienten stellten eine solide Grundlage für eine sich anschließende statistische Auswertung dar. Mit einem mittleren Untersuchungsabstand zwischen Röntgen- und MR-Untersuchung von 4,9 Monaten ist das in der Literatur mit 6 Monaten empfohlene Zeitfenster sogar unterschritten.

4.3.1 Gesamtübersicht

Die nähere Betrachtung der vergleichenden Auswertung zwischen Röntgen- und MR-Messergebnissen zeigt insbesondere zwei Auffälligkeiten:

Erwartungsgemäß, dass das methodisch bedingt im Liegen durchgeführte MR-Verfahren mehrheitlich Krümmungen unterschätzt, und dass die mittlere Unterschätzungstendenz für alle Wirbelsäulenabschnitte im wesentlichen gleich liegt.

Diese Ergebnisse decken sich mit in der Literatur beschriebenen Vergleichsuntersuchungen für Röntgendiagnostik im Liegen und im Stand (Torell et al., 1985).

4.3.2 Cobbwinkel in Abhängigkeit zum Untersuchungsabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie

Wie in Abschnitt 3.3.2 dargelegt, lässt sich keine eindeutige Abhängigkeit der Winkeldifferenz zwischen den Untersuchungsmethoden vom zeitlichen Abstand zwischen beiden Untersuchungen erkennen. Dies ist wahrscheinlich dadurch zu begründen, dass in der Auswertung das Gesamtkollektiv betrachtet wurde und für die festgesetzten Zeitfenster sich ein Kurvenprogress nicht in dem Maße bemerkbar macht, wie es an interindividuellen Messabweichungen in den nach dem Faktor Zeit eingeteilten Gruppen kommt. Das heißt, die interindividuellen Winkelmaßabweichungen der einzelnen Patienten machen sich in einem stärkeren Maße bemerkbar als der natürliche Erkrankungsprogress. Um diese Frage zu klären, müsste eine Fall-Kontrollstudie für mehrere Personen mit einem nachweisbaren Progress im zeitlichen Verlauf durchgeführt werden. Die Abhängigkeit zwischen Zeit und zunehmendem Kurvenprogress müsste somit eindeutiger darstellbar sein. Denn es ist zu erwarten, dass mit zunehmendem Untersuchungsabstand die sich aus dem Röntgen-/MR-Vergleich ergebenden Differenzen vergrößern. Wahrscheinlich ergeben die noch zu niedrigen Fallzahlen kein ausreichendes Kollektiv, um eine sichere Aussage treffen zu können.

4.3.3 Analyse der Cobbwinkeldifferenz in Relation zum Zeitabstand zwischen Röntgen und Magnetresonanztomographie

Bei einem normalverteilten Patientenkollektiv und einem mittleren Untersuchungsabstand von 4,9 Monaten zwischen Röntgen- und MR-Untersuchung ist ein Progress im zeitlichen Verlauf offenbar nicht nachweisbar. Ansonsten müsste eine stärkere Korrelation (als $r^2 = 1\%$) zwischen dem Zeitfaktor und der Cobbwinkeldifferenz bestehen.

Eine Fall-Kontrollstudie an ausgewählten Patienten mit einem bekannten Progress müsste in größeren Fallzahlen durchgeführt werden. Der Zusammenhang eines Progresses im zeitlichen Verlauf wäre dann sicher MR-technisch darstellbar.

4.3.4 Relation Cobbwinkel Magnetresonanztomographie/Röntgen

Die Berechnungen in Abschnitt 3.3.4 wurden durchgeführt um folgende Fragestellungen zu klären:

- 1) In wie weit weicht im Mittel bei einem Patienten der mit dem MR-Verfahren bestimmte Cobbwinkel von dem tatsächlichen in der Röntgenstehendaufnahme vermessenen Cobbwinkel ab und nimmt diese Abweichung bei größeren Cobbwinkeln zu?
- 2) Lässt sich eine verlässliche Beziehung herleiten, um von einem im Röntgenverfahren gewonnenen Cobbwinkelwert einigermaßen zuverlässig auf einen im MR-Verfahren zu erwartenden Wert zu schließen?
- 3) Wie groß ist das Fenster der Cobbwinkelwerte der Röntgenvoruntersuchung festzulegen, indem keine MR-Kontrolluntersuchung nachfolgen sollte, um nicht die Grenze zu einem Therapiewechsel zu überschreiten?
- 4) Wieviel Prozent der Patienten der zugrundeliegenden klinischen Studie profitieren vom Ersatz einer Röntgenkontrolle durch eine MR-Ganzwirbelsäulendarstellung?

Zweck dieser Berechnungen ist es, dem behandelnden Arzt eine Entscheidungshilfe zu geben, ob es sinnvoll und zulässig ist, bei einem Patienten mit vorbestehender Röntgenstehenduntersuchung die folgende Röntgenhalbjahresuntersuchung durch die MR-Bestimmung zu ersetzen.

Zu Frage 1)

Trägt man die in der Röntgenstehendaufnahme gewonnenen Cobbwinkelwerte gegen die im Liegen durch das MR-Verfahren erhaltenen Werte in ein Koordinatensystem auf und betrachtet die Röntgenwerte als y und die MR-Werte als x -Werte, so erhält man zu jedem Wertepaar einer Beobachtungseinheit einen Punkt, insgesamt eine Punktwolke (siehe Figur 1-3). Diese ist zu ca. 80% in einem schmalen Streifen um die Regressionsgerade enthalten. Die Regressionsgerade hat für jeden der beiden Wirbelsäulenabschnitte thorakal und lumbal die Steigung 1 und schneidet die y -Achse bei ca. 5° . Da sich die Punkte der Wolke etwa zur Hälfte ober- und unterhalb der Regressionsgeraden verteilen, gehört zu einem MR-bestimmten Cobbwinkelwert x der über die Regressionsgerade bestimmte y -Wert im Mittel als zugehöriger Röntgenwert. Dieser Wert ist für alle x -Werte um 5° größer.

Wichtig ist, dass wegen der Steigung 1 der Regressionsgerade dieses Ergebnis für alle MR-bestimmten Cobbwinkelwerte gilt, unabhängig von der Größe.

Man kann also feststellen, dass bei der MR-technischen Bestimmung des Cobbwinkels der Wert gegenüber der röntgendiagnostischen Ermittlung im Mittel um 5° unterschätzt wird. Das sagt noch nichts über den tatsächlichen Röntgenwert aus. Dieser ließe sich aber mit 80% Wahrscheinlichkeit in ein Intervall $\pm 5^\circ$ einschließen. Einem MR-Wert von 10° stünde also ein Röntgenwert von $14^\circ \pm 5^\circ$ gegenüber.

Für den thorakolumbalen Fall kann eine entsprechende Aussage wegen der geringen Zahl der Untersuchungen nicht gemacht werden.

Abschnitt 3.3.1, in dem man einfache Mittelwerte bildete, zeigte für die Mehrheit der Fälle eine Unterschätzung des Cobbwinkels von 6° im Mittel. Die Berechnungen über die Regressionsgerade ergeben eine Unterschätzung von 5° .

Zu Frage 2) ergibt sich aus dem Vergleich beider Abschätzungen, dass man bei einem bestehenden Röntgenwert für das MR-bestimmte Winkelmaß von einem 5° - 6° kleineren Cobbwinkel ausgehen muss.

Zu Frage 3)

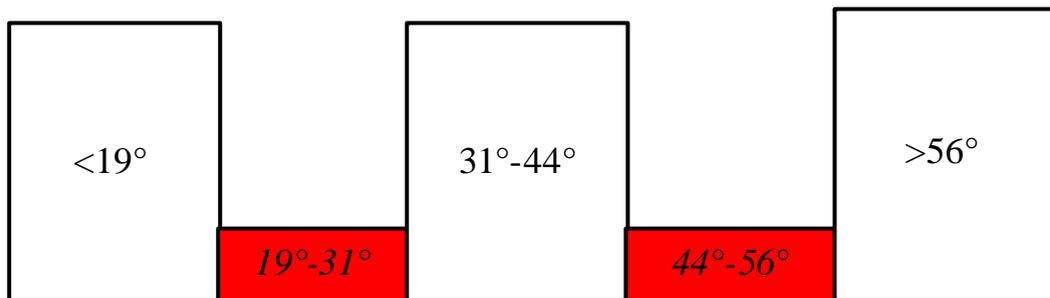
Von der Lehrmeinung ausgehend, sollte bei in der Röntgenstehendaufnahme ermittelten Cobbwinkelwerten von 25° und 50° jeweils ein Therapiewechsel erfolgen (Böni et al, 2002; Hopf et al, 1991; Krismer et al, 2002; Matussek et al, 2000; Weber et al, 1999). Weil die MR-Untersuchung

den reellen Cobbwinkel im Mittel um 5-6° unterschätzt, sollte für die in einen Bereich Therapiegrenze ? 5-6° fallenden Cobbwinkelwerte der letzten Röntgenuntersuchung *nicht* eine eventuelle MR-Kontrolle die anstehende Röntgenverlaufskontrolle ersetzen.

Für eine MR-Untersuchung kommen demnach Patienten mit einem in der Röntgenuntersuchung vorliegenden Cobbwinkel von <19°, von 31°-44° und > 56° in Frage.

Die für eine MR-Kontrolluntersuchung erlaubten und ungeeigneten Bereiche sind in Figur 4 dargestellt.

Figur 4: Zu MR-Untersuchungen geeignete Fenster



Weißer Fläche: Winkelmaße, welche eine MR-Kontrolle erlauben
 Graue Fläche: Winkelmaße, in denen eine Röntgenkontrolle indiziert ist
 (die Therapiegrenze könnte überschritten sein)

Zu Frage 4)

Bezogen auf das Patientenkollektiv der klinischen Studie ergeben sich die in der Tabelle 36 aufgeschlüsselten Zahlen.

Tabelle 36: Anzahl der Fälle mit Möglichkeit einer MR-Untersuchung

	<19°	31°-44°	>56°	Für MR-Untersuchung erlaubtes Fenster
Anzahl der Fälle thorakal n=81	19	16	1	
Anzahl der Fälle thorako- lumbal n=10	5	3	0	
Anzahl der Fälle lumbal n= 87	22	22	0	

Segmentbezogen ließe sich thorakal für 44%, thorakolumbal für 80% und lumbal für 51% der Patienten die nächstfolgende Röntgenuntersuchung einsparen. Bezogen auf die Anzahl aller Untersuchten und die Darstellung der gesamten Wirbelsäule lassen sich 50% der Röntgenkontrollen einsparen.

4.3.5 Korrelation MR-Cobbwinkelgröße zur Winkeldifferenz

In Übereinstimmung mit der Studie von Torell et al. (1985) zeigte sich, dass die Differenz der im Liegen / im Stand ermittelten Cobbwinkel unabhängig von der Kurvenkrümmung ist, die im Liegen (MR-Verfahren) gemessen wurde.

Zwar liegt in der vorliegenden Arbeit ein zeitlicher Abstand im Mittel von 4,9 Monaten zwischen der Standmessung (Röntgenuntersuchung im Stehen) und der Liegendmessung (MR-Bestimmung im Liegen) vor, im Gegensatz zur Studie von Torell u.a., in der die beiden Messungen unmittel-

bar nacheinander erfolgten. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist somit unbeeinflusst von dem durchschnittlichen Zeitabstand von 4,9 Monaten.

In "Standing and Supine Cobb Measures in Girls with Idiopathic Scoliosis" (Torell et al., 1985) wird die Unabhängigkeit der im Liegen / im Stand-Differenz der Cobbwinkel vom Grad der Kurvenkrümmung durch die Flexibilität der Wirbelsäule erklärt und eine leichte Versteifung mit zunehmendem Alter der Patienten festgestellt.

Wenn man dieselben Folgerungen wie die zitierte Studie zieht, müsste dies in der jetzigen Arbeit, in der die Wirbelsäulenabschnitte getrennt untersucht wurden, zu der Aussage führen, dass beim thorakalen und lumbalen Abschnitt die Flexibilität voll vorhanden ist (Korrelationskoeffizient der Regression von Cobbwinkel im Liegen auf Winkeldifferenz $r = 0,09$ thorakal, $r = 0,03$ lumbal).

Für den thorakolumbalen Abschnitt wäre aus dem zugehörigen Korrelationskoeffizienten $r = 0,28$ eine gewisse Versteifung zu schlussfolgern. Allerdings ist diese Aussage nur bedingt beweiskräftig, da nur 10 untersuchte Fälle vorliegen.

4.3.6 Auflistung der Ergebnisse nach Therapiefenstern geordnet

In der in Abschnitt 3.3.6 wiedergegebenen Übersicht wird der Zusammenhang einer zunehmenden Differenz mit steigendem Cobbwinkel gemittelt für die einzelnen Therapiefenster deutlich. Für alle Wirbelsäulenabschnitte war eine Zunahme der mittleren Differenz zwischen Röntgen- und MR-Bestimmung von Behandlungsgruppe I zu Gruppe II von in etwa 3° zu verzeichnen. Der Sprung von Behandlungsfenster II zu Fenster III war nochmals größer, allerdings ist hier auf die geringen Fallzahlen zu verweisen.

Diese Aussage kann allerdings nur für die unterschätzten Fälle getroffen werden. Für die überschätzten Fälle ergaben sich keine ausreichenden Fallzahlen.

Im Gegensatz zu Abschnitt 4.3.5 wurden hier die Winkeldifferenzen auf die Cobbwinkelwerte der Röntgenstehenaufnahme bezogen. In diesem Fall zeigt sich eine Abhängigkeit der Winkeldifferenz von der Zunahme der Cobbwinkelwerte, verursacht durch die Einwirkung der Schwerkraft.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Abschnitt 3.3.5 und 3.3.6 lässt für die Praxis folgende Schlussfolgerung zu:

Unabhängig vom Skolioseschweregrad bleibt der Differenzwert bei einem Vergleich mit einer Cobbwinkelbestimmung in Liegendposition mit zunehmender Cobbwinkelgröße gleich, dies wird durch die Flexibilität der Wirbelsäule erklärt. Bei einem Vergleich mit dem Cobbwinkelmaß der Röntgenstandaufnahme hingegen wird die Differenz mit zunehmendem Cobbwinkel größer. Dieser durch die Schwerkraft bewirkte Effekt entfällt beim Liegendbezug.

Ebenso ist an dieser Stelle nochmals auf die so genannten Ausreißerwerte einzugehen. Die Übersichtstabelle in Abschnitt 3.3.6 macht deutlich, dass eine um wenige Fallzahlen korrigierte Aufschlüsselung sich in starkem Maße auf die mittlere Abweichung der unterschätzten Fälle bemerkbar macht. Für die betroffenen Beobachtungseinheiten konnten die mittleren Abweichungen somit um 1° - 2° korrigiert werden

Die in Abschnitt 3.3.6 aufgeführten Sonderfälle betreffen jeweils einzelne Personen und zeigen im Verlauf eine etwa um denselben Betrag gleich bleibende Abweichung. Der Verdacht liegt also nahe, dass es bei der Auswertung der Röntgenbilder für den einzelnen Fall zu einem systematischen Fehler bei der Bestimmung, der für die Cobbwinkelmessung wichtigen Wirbeldeckplatte gekommen ist. Ansonsten ist eine Abweichung von z.B. 27° zwischen Röntgen- und MR-Bestimmung nicht erklärbar.

4.4 MR-Darstellung korrigierender Effekte des Cheneau-Korsetts

Aufgrund der guten Bildqualität und Beurteilbarkeit im Korsett generierter MR-Wirbelsäulenaufnahmen wurde das Verfahren eingesetzt, um die Zahl zusätzlicher korsettbedingter Kontrollaufnahmen durch die neue Technik zu ersetzen. Der entscheidende Vorteil der MR-Methode liegt darin begründet, dass die Bildrekonstruktion nicht nur eine koronare, sondern auch ein sagittale Ansicht liefert. Eine Aussage über die kyphotischen und lordotischen Ausprägungen sowie eine Beurteilung der Rotation ist somit zusätzlich gegeben. Hierbei handelt es sich um Aussagen, die bei herkömmlichen Routinekontrollen aus Gründen des Strahlenschutzes wegfallen.

Es sei erwähnt, dass gerade die durch das MR-Verfahren sich ergebenden Beurteilungsmöglichkeiten in den verschiedenen Ebenen für den Orthopäden von außerordentlichem Interesse sind. Dies zeigt ein von der Orthopädischen Klinik in Zusammenarbeit mit der Radiologischen Klinik im Journal of Orthopaedic Science veröffentlichter Artikel (Schmitz et al., 2001), indem für 25

Patienten der Orthopädischen und Radiologischen Universitätsklinik Bonn eine vergleichende Cobb-Winkeldarstellung in der koronaren und sagittalen Ebene beschrieben ist. Ein Vergleich zu den damals für das thorakale Segment ermittelten Ergebnissen folgt im Anschluss.

Da der Untersuchungsablauf zuerst eine Aufnahme ohne Korsett vorsah, bevor die Korsettkontrolle folgte, war ein direkter Vergleich der Krümmungsmaße gegeben, da beide Aufnahmen im Liegen erstellt wurden und eine Veränderung der Krümmungsverhältnisse nur durch den Einfluss der Orthese hervorgerufen werden konnte. Der Faktor Schwerkraft blieb für beide zu vergleichende Wertepaare ausgeschaltet.

Der Ergebnisteil zeigt eine deutliche Änderung der Krümmungsmaße hin zu kleineren Winkelwerten. Am stärksten machte sich ein durchschnittlicher Korrekturgewinn thorakolumbal Krümmungen bemerkbar, aber auch thorakale und lumbale Segmente profitierten vom Orthesenausgleich.

Ein Vergleich mit dem oben erwähnten Bericht bestätigt die dort erhobenen Aussagen, auch wenn die mittlere Primärkorrektur der jetzigen Studie mit 13% für den thorakalen Abschnitt niedriger ausfällt als die damalige. Sie lag bei 24% für die betrachteten thorakalen, koronaren Kurven. Die thorakolumbalen und lumbalen Kurven wurden hier nicht untersucht, dafür aber das Verhalten in der sagittalen Ebene.

Vor allem die komplexen Auswirkungen einer Orthese auf alle 3 Ebenen der Wirbelsäule machen eine bildliche Darstellung dieser nötig, um die Wirkungsweise eines Korsetts auch richtig nachvollziehen zu können. Der Einfluss des Korsetts auf den bei idiopathischen Skoliosen auftretenden Flachrücken und auf die in Folge verstärkte Lendenlordose kann somit z.B. in der sagittalen Ebene beurteilt werden.

Die MR-gestützte Untersuchungstechnik erlaubt also eine exakte Beurteilung des Korsetteffektes sowohl in der koronaren, als auch in der sagittalen Ebene (Abbildung 15) ohne zusätzliche Strahlenbelastung für den Patienten. Der Korsetteffekt wird auch im Liegen deutlich.

4.5 Korrektur einfluss im pneumatisierten Korsett

Da mit dem MR-Verfahren eine verlässliche Beurteilungsmethode für die Korsettuntersuchung bestand, konnten weitere Optimierungsmöglichkeiten für die Orthesentherapie „strahlenfrei“ getestet und dokumentiert werden. Sinn der luftdruckgesteuerten Pelotten war es, die passive Kor-

rekturkomponente an den jeweiligen Konvexitäten der Krümmungen manuell zu verstärken, und somit einen zusätzlichen Korrekturgewinn zu erzielen. In der Auswertung wurde auch in diesem Fall nur die koronare Ebene beurteilt.

Wenn auch in der Mehrzahl der Fälle eine weitere Krümmungsverbesserung gesehen wird, bleibt eine individuelle Begutachtung der einzelnen Fälle notwendig. Dies insbesondere, um eine unter der Einwirkung von Druckpelotten zunehmende Ausgleichskrümmung in einem anderen Segment nicht zu übersehen.

4.6 Screening / Erwachsenenscreening

Die Untersuchungsmethode kam ebenfalls zur Begutachtung von skoliotischen Verdachtsfällen bei Jugendlichen zum Einsatz. Diese Screeninguntersuchungen dienten zur Klärung, ob eine weitere röntgenologische Abklärung erfolgen sollte. Die hier aufgeführten Patienten wiesen Cobbwinkel kleiner 10° auf, und wurden statistisch unter der Bezeichnung Screening aufgeführt.

Die Screeninguntersuchung mit der MR-Methode kann als eine „strahlenfreie“ Alternative“ neben der klinischen Untersuchung angesehen werden. Sie führt im Gegensatz zu den bisher entwickelten ergänzenden Verfahren zur Wirbelsäulendiagnostik, wie Moirétopographie, Rasterstereometrie, ISIS-System etc. (siehe Einleitung), deren Grundprinzip in der Darstellung der Rückenoberfläche liegt (Asamoah et al., 2000), zu einer direkten bildlichen Darstellung der Wirbelsäule. Dies bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber den genannten Verfahren.

Hinsichtlich Untersuchungsaufwand und Schnelligkeit ist das Verfahren mindestens ebenbürtig.

Somit konnte das Verfahren auch als Screeningmethode zum Skolioseausschluss, wie auch zum Zweck einer Abschlusskontrolle ehemaliger Skoliosepatienten erfolgreich eingesetzt werden.

Eine vergleichende Gegenüberstellung zu Ergebnissen anderer Screeningverfahren wurde in der jetzigen Studie nicht durchgeführt, eine Kosten-Nutzen-Analyse ist derzeit noch nicht möglich.

4.7 Anomalien und Sonderfälle

Aufgrund einer methodisch bedingt höheren bildlichen Auflösung und besseren Darstellbarkeit von Weichgewebe, sowie eines größeren bildlichen Erfassungsfeldes nahm die Zahl der erkann-

ten Nebenbefunde im Vergleich zu den Röntgenkorrelaten in deutlichem Maße zu. Vor allem Weichteil- und Organveränderungen sind für die betrachtete Ebene deutlich besser erkennbar.

Ebenso lassen sich komplexe Missbildungssyndrome bei kongenitalen Störungen mit dem MR-Verfahren in der koronaren, sowie in der sagittalen Ebene beurteilen, ein umfassenderer Eindruck für den Betrachter ist somit möglich. Bisher waren dafür zusätzliche Ziel- oder Schichtaufnahmen indiziert (Hehne, 1989).

Im Anhang sind einige Bildbeispiele unserer Patienten beigefügt (Abbildung 7).

In der Literatur wird gefordert, die Halswirbelsäule stets in das Aufnahmegebiet bei Röntgenaufnahmen mit einzubeziehen, da es häufig eine 3. Hauptkrümmung im Bereich der Halswirbelsäule gibt (Hehne, 1989). Dem wird in der Praxis aus Strahlenschutzgründen, insbesondere um die Schilddrüse vor Expositionen zu schützen, nur selten nachgekommen. Das MR-Verfahren dagegen erlaubt routinemäßig eine Beurteilung dieses Wirbelsäulenabschnittes (Abbildung 7).

4.8 Ergänzungen

Aktuelle Veröffentlichungen zeigen, dass eine dreidimensionale Abbildung der Wirbelsäule für das Verständnis von Anomalien und daraus resultierenden konservativen wie chirurgischen Maßnahmen ein immer größer werdendes Gewicht bekommt (Newton et al., 2002).

Konventionelle Röntgenaufnahmen lassen oft keine eindeutigen Aussagen über das Ausmaß und die Form von Wirbelsäulenanomalien zu, daher versuchte man mit Hilfe von am CT generierten Bildern ein dreidimensionales Wirbelsäulenprofil zu erstellen (Newton et al., 2002). Zusätzliche Malformationen konnten somit identifiziert werden und das Verständnis bekannter Fehlbildungen verbessert werden.

Ebenso konkurrieren digitale Verfahren mit der herkömmlichen WS-Ganzaufnahme. Sie versprechen eine einfachere, schnellere und genauere computerisierte Auswertung (Berliner et al., 2002). Abweichungen in der Untersuchervariabilität konnten so auf 1-2° Cobbwinkel beschränkt werden. Bisherige Veröffentlichungen geben die Abweichungen in der Untersuchervariabilität mit 1,8-10° an (Carman et al., 1990; Facanha-Filho et al., 2001, Shea et al., 1998).

All diese Vorteile vereint das MR-Verfahren, ohne den Nachteil einer Strahlenbelastung.

Sagittale Cobbwinkelbestimmungen und die Analyse von Wirbelkörper-Rotationsfehlern sind zum Beispiel Gegenstand aktueller Veröffentlichungen (Gassel et al., 2002; Schmitz et al., 2001).

Inwieweit sich durch den Einsatz des MR-Verfahrens das Tumorentstehungsrisiko für den Skoliosepatienten vermindert, ist für den Einzelfall nicht bestimmbar. Doch vermindert jede ersatzweise durchgeführte MR-Untersuchung die Strahlenbelastung für den jungen Patienten und somit auch das strahleninduzierte Tumorentstehungsrisiko.

5. Zusammenfassung

Ziel der klinischen Studie war es, das entwickelte Verfahren der MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme auf den sinnvollen Einsatz in der Verlaufskontrolle juveniler Skoliosen zu überprüfen und so dem Patienten eine möglichst geringe kumulative Strahlenbelastung zuzumuten.

Die Studie zeigt, dass es in der überwiegenden Zahl der Fälle erwartungsgemäß bei der MR-Untersuchung im Liegen zu einer Unterschätzung des Cobbwinkels im Vergleich zur Röntgenstehendaufnahme kommt. Der unterschätzte Wert liegt im Mittel zwischen 5° - 6° . Daraus lässt sich ein Fenster für die Anwendung der MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme ableiten, innerhalb dessen unwahrscheinlich die Grenze eines Therapiewechsels übersehen wird.

Einschränkungen für die MR-Untersuchung ergeben sich bei zugrundeliegenden Skoliosewinkeln von 19° - 31° und 44° - 56° . Daraus ergab sich, dass für 50% unserer Patienten ein geeignetes MR-Untersuchungsintervall empfohlen werden konnte.

Aus Sicht der jetzigen Erfahrung kann für jugendliche Patienten mit einem bekannten oder vermuteten Skoliosewinkel über 10° folgendes diagnostische Konzept vorgeschlagen werden. Die MR-Basisuntersuchung muss mit einer Röntgen-Standarduntersuchung korreliert werden. Bei minimaler Differenz der Befunde oder ausreichendem Abstand des Skoliosegrades zur Therapiegrenze von mindestens 6° in der Röntgenaufnahme, kann die nächste anstehende Röntgenkontrolle durch eine MR-Kontrolle ersetzt werden. Die Kontrolle nach einem Jahr sollte dann wieder eine Röntgenkontrolle miteinschließen, um bei der noch kurzen Erfahrung mit der neuen Modalität einen unerwarteten Erkrankungsprozess ausschließen zu können.

Selbst bei diesem intermittierenden Einsatz der MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme ist mit einer relevanten Reduktion der kumulativen Strahlenbelastung für Skoliosepatienten im Wachstumsalter zu rechnen.

Daraus ergaben sich bereits weitere klinische Anwendungsinteressen, vor allem zur Überprüfung und Dokumentation einer Korsettbehandlung.

Unerwünschte Wirkungen der hier vorgestellten Methode sind nicht bekannt, so dass unter Beachtung der dargelegten Empfehlungen ein breiterer Einsatz angeraten werden kann.

6. Literaturverzeichnis

1. Almén A. J., Mattsson S.
Dose Distribution at Radiographic Examination of the Spine in
in Pediatric Radiology.
Spine, 1996; Volume 21, Number 6: 750 – 756
2. Asamoah V., Mellerowicz H., Venus J., Klöckner C.
Oberflächenvermessung des Rückens, Wertigkeit in der Diagnostik der Wirbelsäulener-
krankungen
Orthopäde, 2000; 29: 480 – 489
3. BEIR V., Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations
Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionising Radiation
Washington, DC: National Research Council, 1989
4. Berg D.C., Hill D.L., Raso V.J., Lou E., Church T.
Using three-dimensional difference maps to assess changes in scoliotic deformities
Medical & Biological Engineering & Computing, 2002; Volume40: 290 – 295
5. Berliner L., Kreang – Arekul S., Kaufmann L.
Scoliosis Evaluation by Direct Digital Radiography and Computerized Post – Processing
Journal of Digital Imaging, 2002; Volume 15, Suppl. 1: 270 – 274
6. Bernau A., Graule A., Seeger W., Sell S.
Zur Frage der Strahlenexposition bei Ganzaufnahmen der Wirbelsäule
Fortschr. Röntgenstr., 1994; 161, 4: 349 – 353

7. Bernau A., Seeger W.
Reduzierung der Strahlenexposition bei Wirbelsäulenganzaufnahmen von Jugendlichen
Z. Orthop., 1996; 134: 302 – 304
8. Böni T., Min K., Hefti F.
Idiopathische Skoliose und Scheuermann – Kyphose, Historische und aktuelle Aspekte
der konservativen Behandlung
Orthopäde, 2002; 31: 11-25
9. Carman D. L., Browne R.H., Birch J.G.
Measurement of Scoliosis and Kyphosis Radiographs, Intraobserver and Interobserver
Variation
The Journal of Bone And Joint Surgery, 1990; Volume 72–A: 328 – 333
10. Chamberlain C. C., Huda W., Hojnowski L.S., Perkins A., Scaramuzzino
Radiation doses to patients undergoing scoliosis radiography
The British Journal of Radiology, 2000; 73: 847 - 853
11. Doody M. M., Lonstein J.E., Stovall M., Hacker D.G.
Breast Cancer Mortality After Diagnostic Radiography, Findings From the U.S. Scoliosis
Cohort Study
Spine, 2000; Volume 25: 2052 – 2063
12. Drummond D., Ranallo F., Lonstein J., Brooks H.L., Cameron J.
Radiation Hazards in Scoliosis Management
Spine, 1983; Volume 8: 741- 748
13. Facanha–Filho F., Winter R.B., Lonstein J.E., Koop S., Novacheck T., L`Heureux E.A.,
Noren C.A.
Measurement Accuracy In Congenital Scoliosis
The Journal of Bone And Joint Surgery, 2001; Volume 83-A: 42 – 45

14. Fearon T., Vucich J., Butler P., McSweeney W., Taylor G.A., Markle B.M., Hoe J.,
Scoliosis Examinations: Organ Dose and Image Quality with Rare-Earth Screen-Film Systems
American Roentgen Ray Society, 1988: 359 – 362
15. Gassel F., Schmitz A., Koenig R., Heinemann C., Schmitt O.
Bestimmung des reellen Skoliosewinkels anhand von kernspintomographischen Wirbelsäulenganzaufnahmen im rekonstruierten Coronar- und Sagittalprofil
Z Orthop, 2002; 140: 165 – 170
16. Geijer H., Beckman K.W., Jonsson B., Andersson T., Persliden J.
Digital Radiography of Scoliosis with a Scanning Method: Initial Evaluation
Radiology, 2001; Volume 218: 402 – 410
17. Giehl J.P., Bernau A.
Radiologische Diagnostik bei Skoliosen – Indikation und Befundinterpretation
Orthop. Praxis, 1994; 5: 267 - 278
18. Hackenberg L., Liljenqvist U., Hierholzer E., Halm H.
Rasterstereografische Oberflächenvermessung idiopathischer Skoliosen nach VDS
Z. Orthop., 2000; 138: 353 – 359
19. Hallén S., Mattsson M. and S.
Dosimetry At X Ray Examinations Of Scoliosis
Radiation Protection Dosimetry, 1992; Volume 43: 49 – 54
20. Hehne H.J.
Die Bedeutung radiologischer Untersuchungen für die differenzierte Behandlung von Skoliosen
Radiologe, 1989; 29: 159 – 163

21. Heine J., Reher H.
Die Progredienz der unbehandelten idiopathischen Skoliose bis Wachstumsabschluss
Z. Orthop., 1973; 113: 87 – 96
22. Heinecke A., Hultsch E., Repges R.
Medizinische Biometrie
Springer Verlag, Heidelberg, 1992; 1. Auflage: 31-35
23. Hellström G., Irstam L., Nachemson A.
Reduction of Radiation Dose in Radiologic Examination of Patients with Scoliosis
Spine, 1983; Volume 8: 28 - 30
24. Hopf Ch., Felske-Adler C., Heine J.
Empfehlungen zur sportlichen Betätigung von Patienten mit idiopathischen Skoliosen
Z. Orthop., 1991; 129: 204 – 207
25. Kalmar J.A., Jones J., Merritt C.
Low – Dose Radiography of Scoliosis in Children, A Comparison of Methods
Spine, 1994; Volume 19: 818 – 823
26. König R., Jaeger U., Ostertun B., Kandyba J., Wagner U., Gieseke J., Schild H.H.
MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme: Computergestützte Simulation der konventionell-
röntgenologischen Technik
Fortschr. Röntgenstr., 1999; 170: 258 – 261
27. Krismer M., Behensky H., Frischhut B., Wimmer C., Ogon M.
Operative Therapie von idiopathischen Skoliosen und juvenilen Kyphosen
Orthopäde, 2002; 31: 26 – 33
28. Landauer F., Krismer M., Bauer R.
Konservative Behandlung der idiopathischen Skoliose
Orthopäde, 1997; 26: 808 – 817

29. Levy A. R., Goldberg M.S., Mayo N.E., Hanley J. A., Poitras B.
Reducing the Lifetime Risk of Cancer From Spinal Radiographs Among People With Adolescent Idiopathic Scoliosis
Spine, 1996; Volume 21: 1540-1548
30. Matussek J., Mellerowicz H., Klöckner C., Sauerlandt B., Nahr K., Neff G.
Zwei – und dreidimensionale Korrektur von Skoliosen durch Korsettbehandlung, Optimierte konservative Therapie der idiopathischen Skoliose durch ein weiterentwickeltes Cheneau – Korsett
Orthopäde, 2000; 29: 490 – 499
31. Mau, Hans
Die Ätiopathogenese der Skoliose
Bücherei des Orthopäden, 1982; Band 33
32. Meurer A., Hopf Ch., Heine J.
Spontanverlauf der idiopathischen Skoliose
Orthopäde, 1994; 23: 28 – 235
33. Nash C.J., Gregg E.C., Brown R. H., Pillai K.
Risks of Exposure to X-Rays in Patients Undergoing Long-Term Treatment for Scoliosis
The Journal of Bone And Joint Surgery, 1979; Volume 61-A: 371 – 374
34. Newton P.O., Hahn G.W., Fricka K.B., Wenger D.R.
Utility of Three-Dimensional and Multiplanar Reformatted Computed Tomography for Evaluation of Pediatric Congenital Spine Abnormalities
Spine, 2002; Volume 27: 844 – 850
35. Palmer S.H., Starritt H.C., Paterson M.
Radiation protection of the ovaries in young scoliosis patients
Eur. Spine J., 1998; 7: 278 – 281

36. Ron E.
Ionizing radiation and cancer risk: evidence from epidemiology
Pediatr. Radiol., 2002; 32: 232 – 237
37. Rössler H., Rütter W.
Orthopädie
Urban Schwarzenberg – München, Wien, Baltimore, 1997; 17. Auflage: 347 – 353
38. Schmitt O.
Skoliosefrühbehandlung durch Elektrostimulation
Bücherei des Orthopäden, 1995; Band 45
39. Schmitz A., Kandyba J., König R., Gieseke J., Schmitt O.
A new method of MR total spine imaging for showing the brace effect in scoliosis
J. Orthop. Sci., 2001; 6: 316 – 319
40. Schmitz A., Jaeger U., König R., Kandyba J., Gieseke J., Schmitt O.
Sagittale Cobb - Winkel - Messungen bei Skoliose mittels MR – Ganzwirbelsäulen-
aufnahme
Z. Orthop., 2001; 139: 304 – 307
41. Shea K.G., Stevens P.M., Nelson M., Smith J.T., Masters K.S., Yandow S.
A Comparison of Manual Versus Computer – Assisted Radiographic Measurement, In-
traobserver Measurement Variability for Cobb Angles
Spine, 1998; Volume 23: 551 – 555
42. Stempel A., Scholz M., Diedrich O.
Langzeitverläufe bei Patienten mit idiopathischer Skoliose
Z. Orthop., 1995; 133: 256 – 269

43. Stringer D.A., Cairns R.A., Poskitt K.J., Bray H., Milner R., Kennedy B.
Comparison of stimuable phosphor technology and conventional screen – film technology in pediatric scoliosis
Pediatr. Radiol., 1994; 24: 1 – 5

44. Torell G., Nachemson A., Haderspeck – Grib K., Schultz A.
Standing and Supine Cobb Measures in Girls with Idiopathic Scoliosis
Spine, 1985; Volume 10: 425 – 427

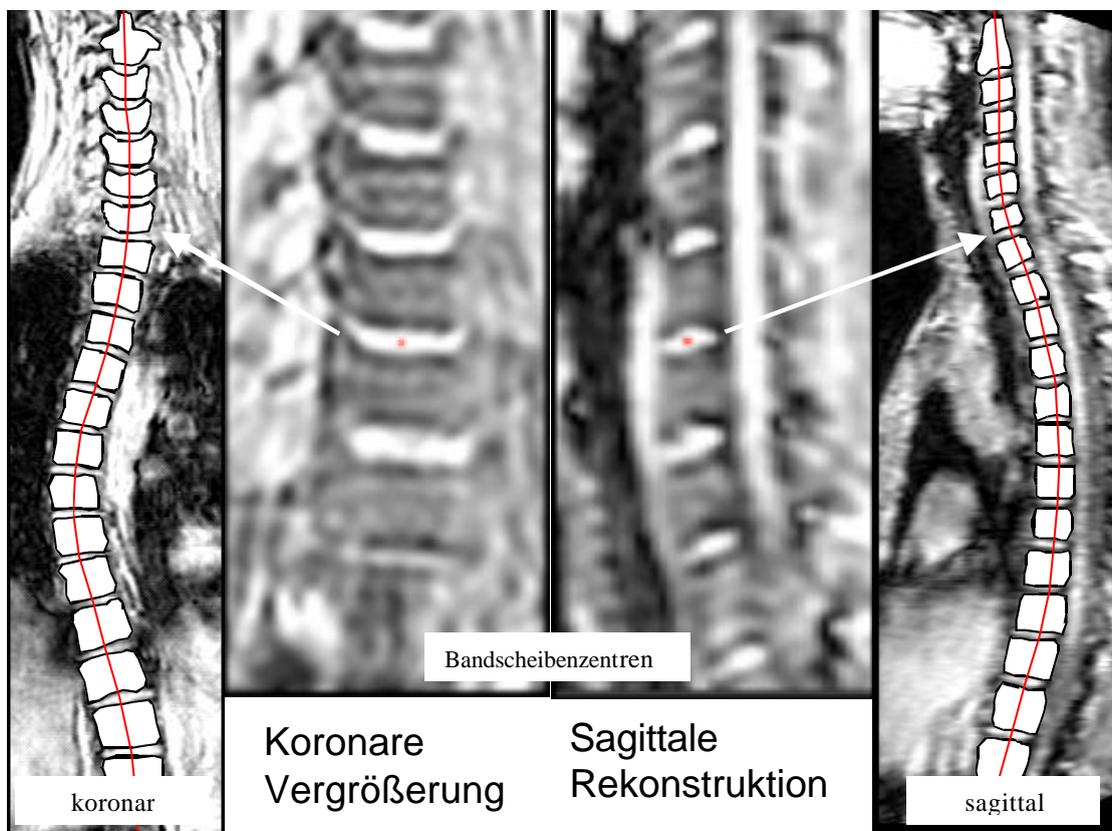
45. Wagner U.A., Jaeger U., Schmitt O.
MRT – Wirbelsäulenganzaufnahmen – eine Alternative zur Röntgendiagnostik bei der Verlaufskontrolle der Skoliose
Z. Orthop., 1999; 137: I – 5

46. Weber M., Birnbaum K., Weber M., Niethard F.–U.
Primärkorrektur der Skoliose mit dem Wilmington – Korsett
Z. Orthop., 1999; 137: 173 – 180

7. Abbildungskatalog

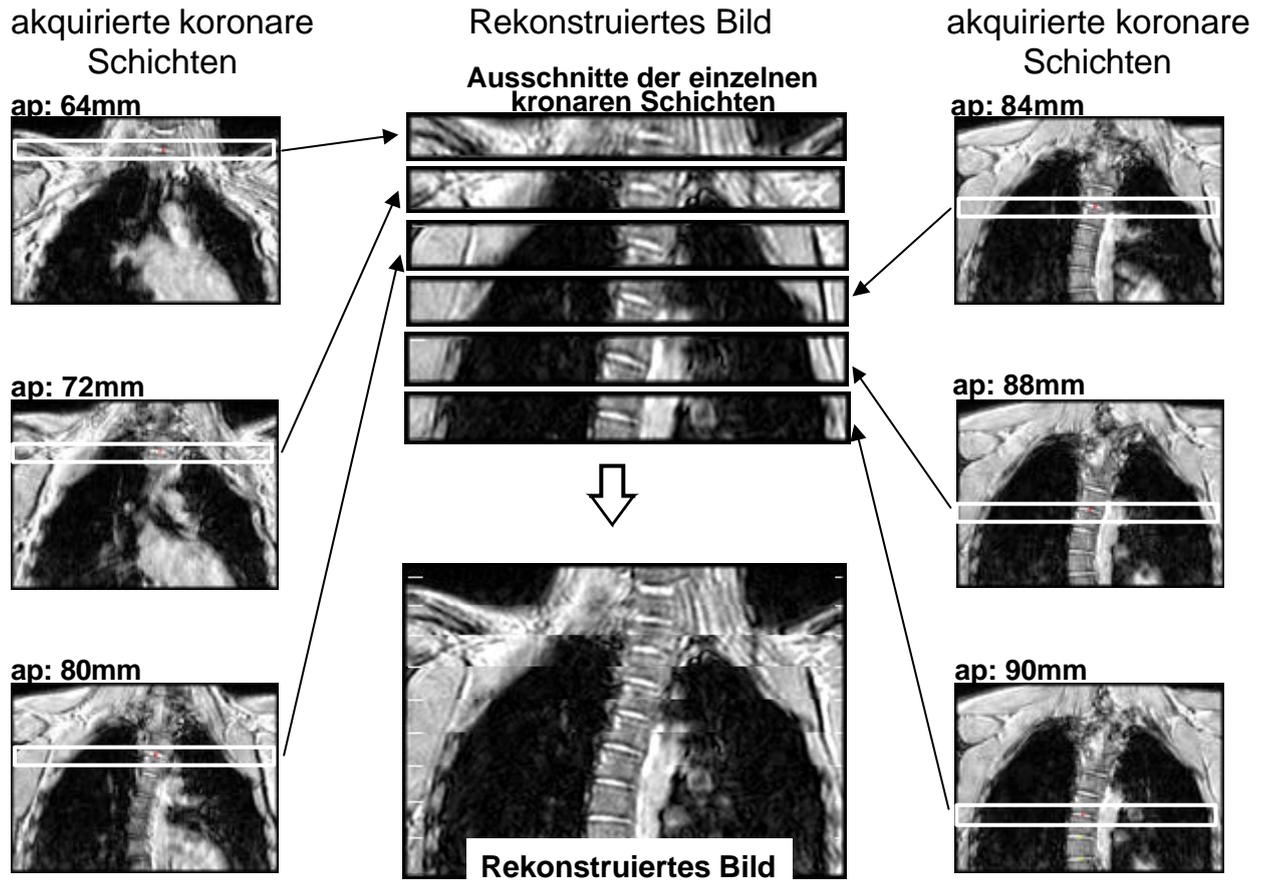
Abbildung 1:

Festlegung eines Pfades, der durch die Bandscheibenzentren läuft



Quelle: König (persönliche Mitteilung)

Abbildung 2:
Rekonstruktion einer koronaren Gesamtansicht aus Bildausschnitten der
jeweilig zugehörigen koronaren Schichten



Quelle: König et al., 1999

Abbildung 3:

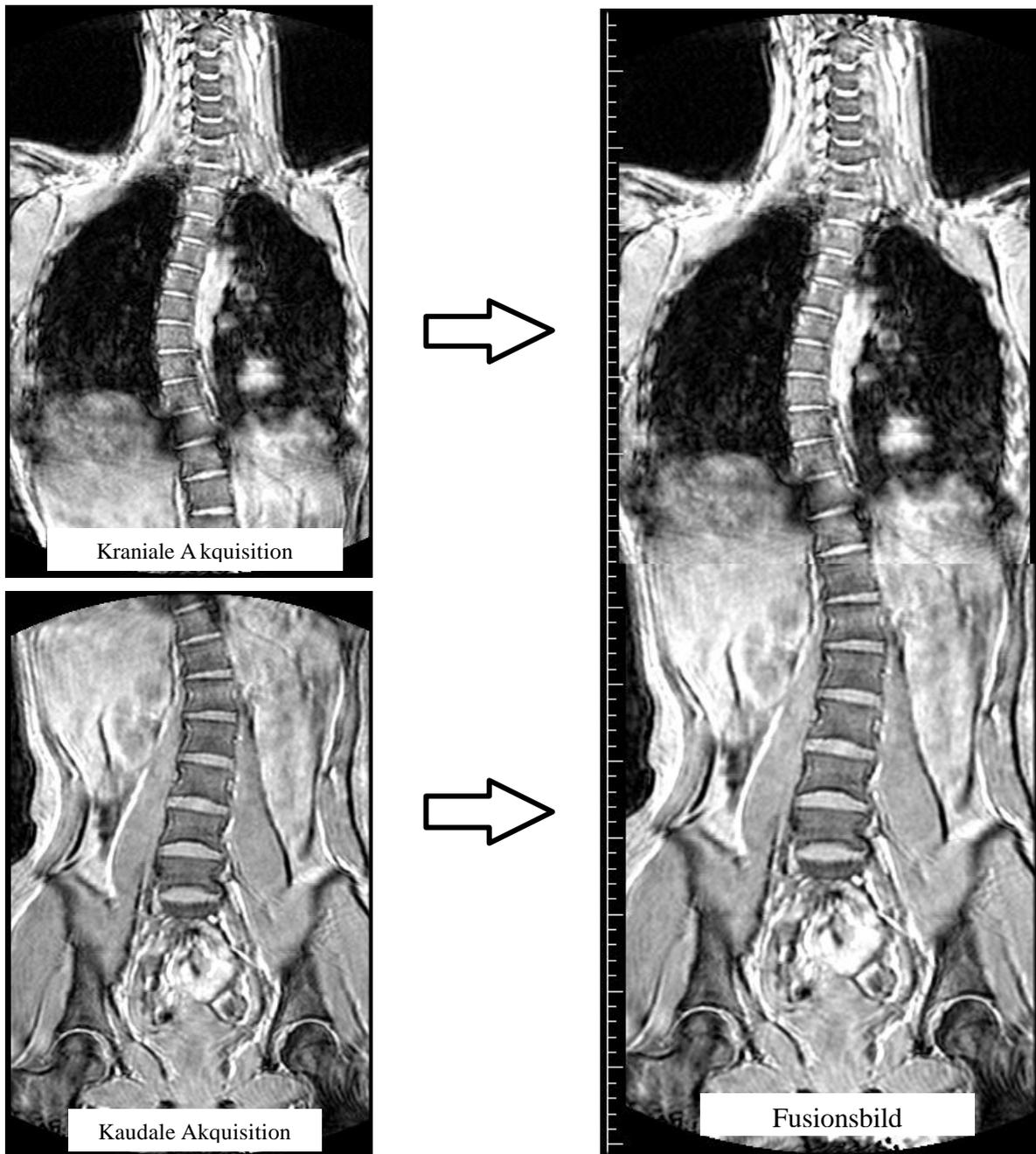
Fusion der rekonstruierten Frontalebene zur MR-Ganzwirbelsäulenansicht

Abbildung 4:

Beispiele für verschiedene Skoliosegradausprägungen

Geringgradige Skoliose
(Definition: $10^\circ - 20/25^\circ$)



Mittelgradige Skoliose
(Definition: $20/25^\circ - 40/50^\circ$)



Hochgradige Skoliose
(Definition: $>40/50^\circ$)

Abbildung 5:
Sequenzvergleich FFE/FFE-EPI



3D-FFE-Sequenz



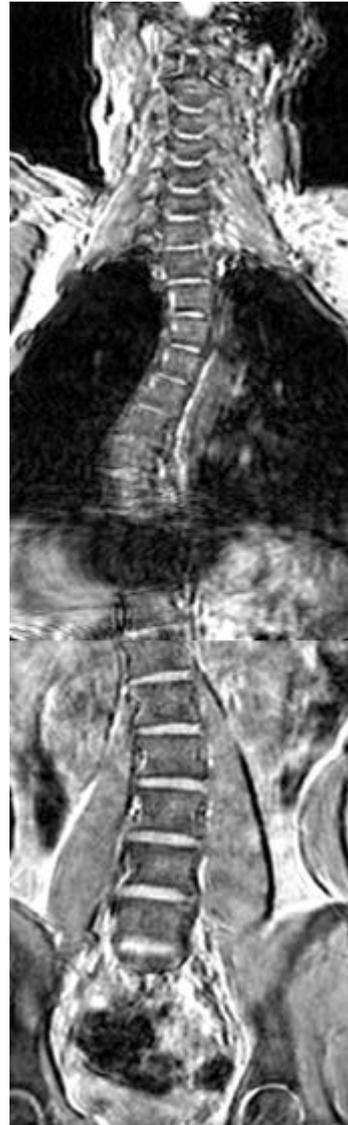
3D-FFE-EPI-Sequenz

Abbildung 6:

Beeinflussung der Bildqualität durch Metallartefakte



Artefaktbildung durch
Metallhäkchen an der Kleidung



Korsettaufnahme,
die Metallnieten dieses Korsetts
enthalten ferromagnetische
Bestandteile

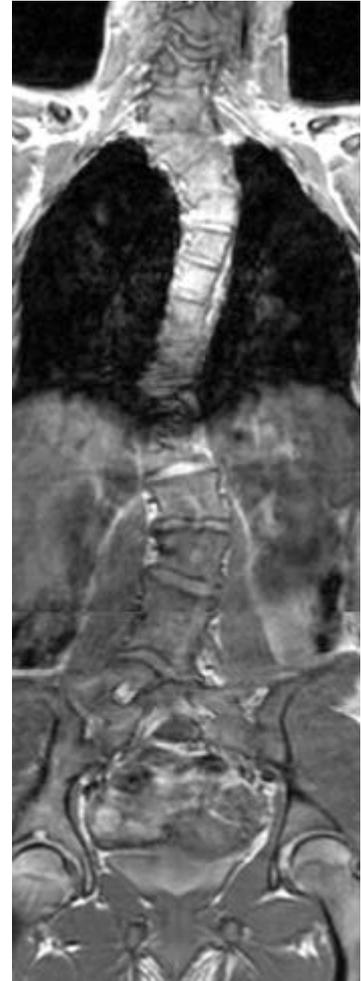
Abbildung 7:
Zusatzbefunde



Missbildungsskoliose bei
Alagille-Syndrom,
Z.n. Lebertransplantation
und Einzelniere

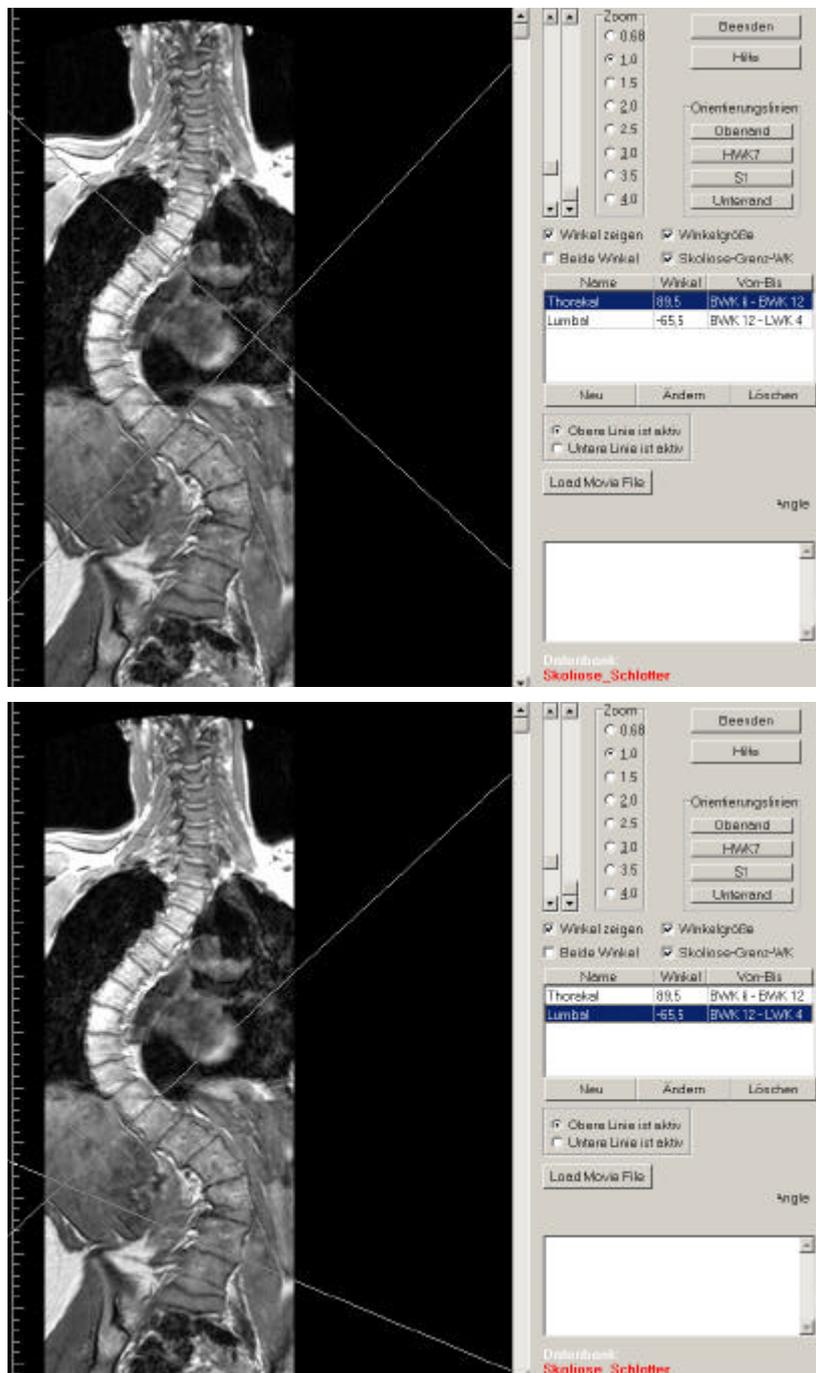


Skoliose der
Halswirbelsäule



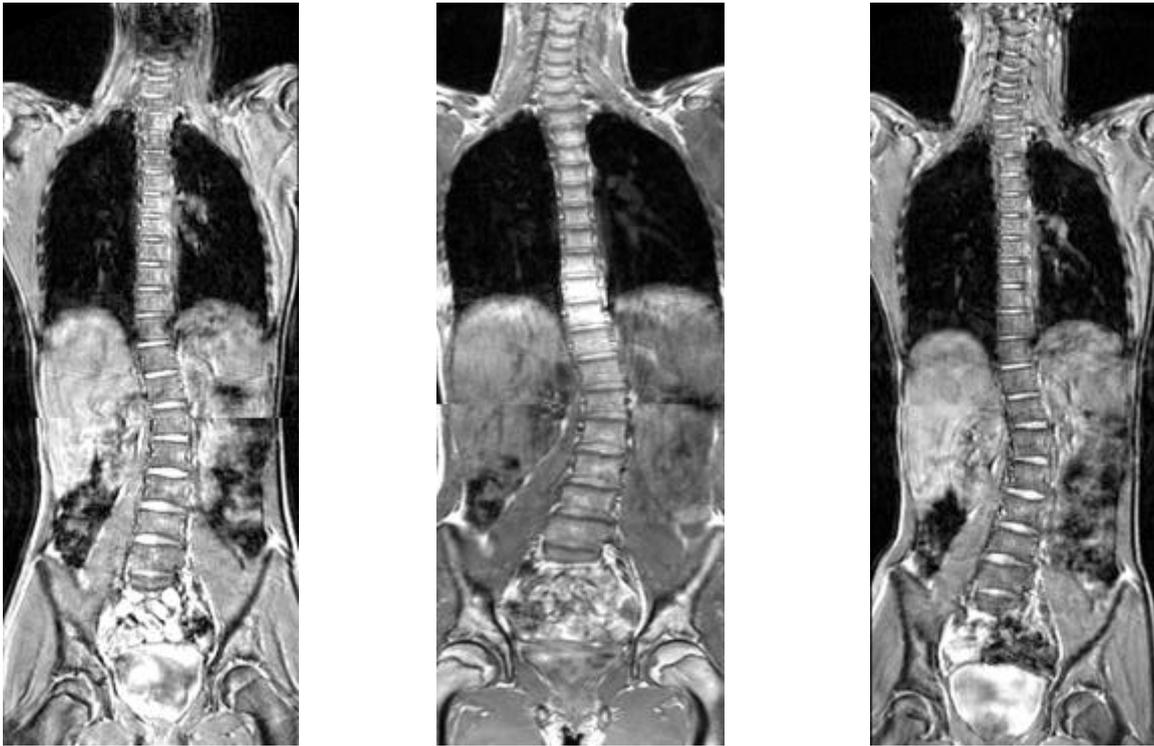
Multiple Wirbelkörper-
anomalien mit Block- u.
Keilwirbelbildung

Abbildung 8:
Schema der computergestützten Cobbwinkelmessung



Die Messlinien werden mausgesteuert den Deckplatten angepasst, der berechnete Cobbwinkel erscheint in der nebenstehenden Wertetabelle.

Abbildung 9:

Progredienz einer mittelgradigen lumbalen Skoliose im zeitlichen Verlauf

12 jähriges Mädchen, der Cobbwinkel nimmt von 18° auf 23° in einem Zeitraum von zwei Jahren zu.

Abbildung 10:

Vergleichende Darstellung der Röntgenganzwirbelsäulenaufnahme im Stand
mit der MR-Ganzwirbelsäulenaufnahme bei geringgradiger Skoliose

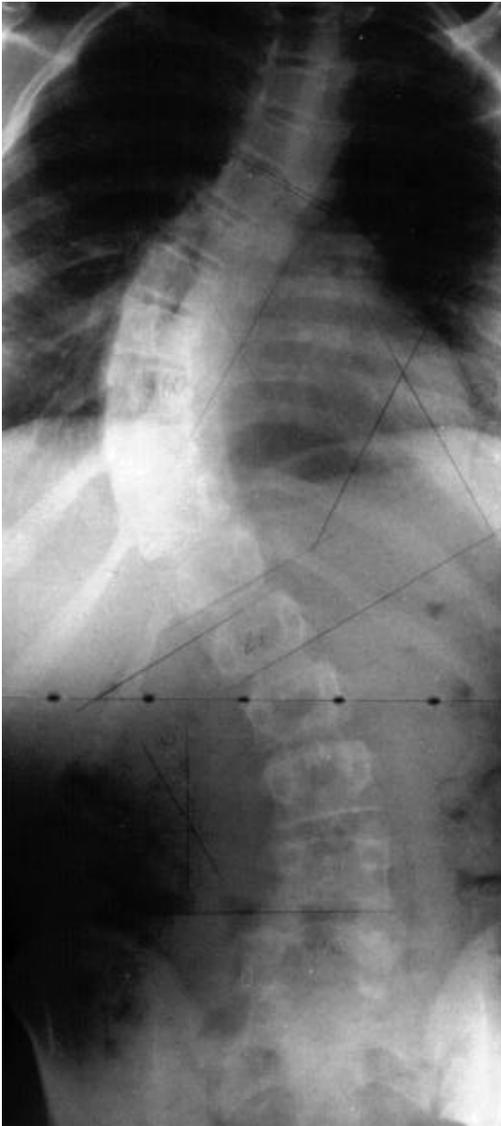


Röntgenaufnahme mit einem Winkelmaß kleiner 10°



In der MRT-Aufnahme ist lagebedingt nur ein minimale Krümmung messbar

Abbildung 11:

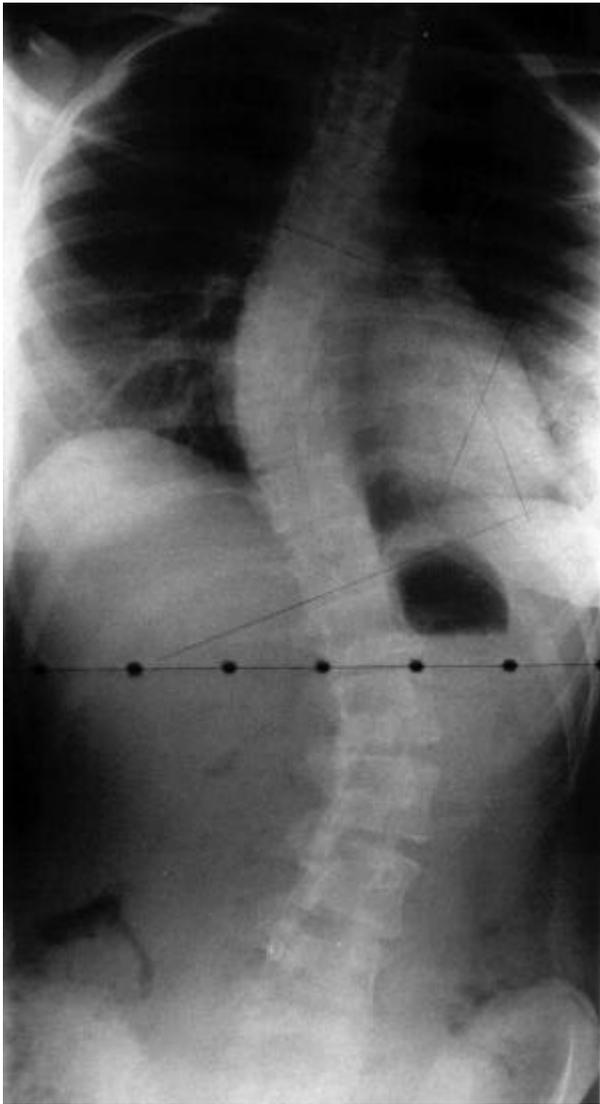
Bildbeispiel für ein in der MR-Aufnahme unterschätztes Winkelmaß

Die Röntgenaufnahme zeigt ein thorakales Krümmungsmaß von 57°



Der thorakal bestimmte Cobbwinkel beträgt 45° in der MR-Aufnahme

Abbildung 12:

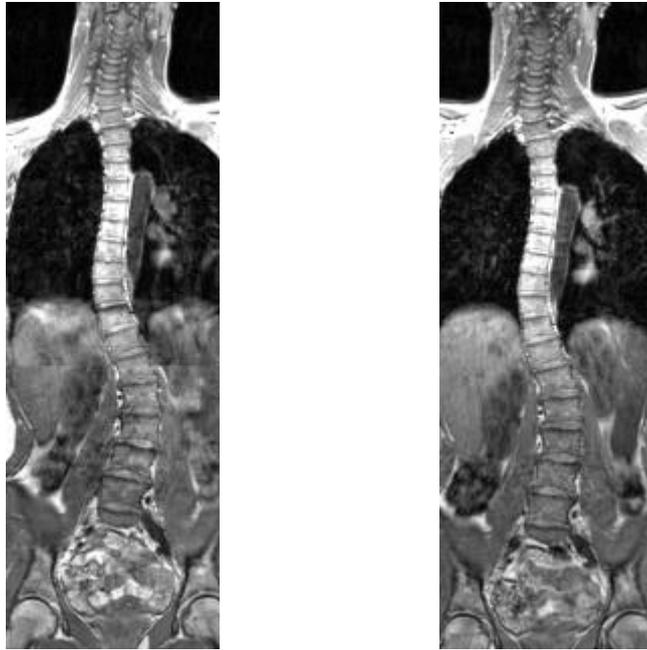
Identisches Cobbwinkelmaß in Röntgen- und vergleichender MR-Aufnahme

Cobbwinkel der Röntgenstehendaufnahme:
thorakal 43°, lumbal 40°

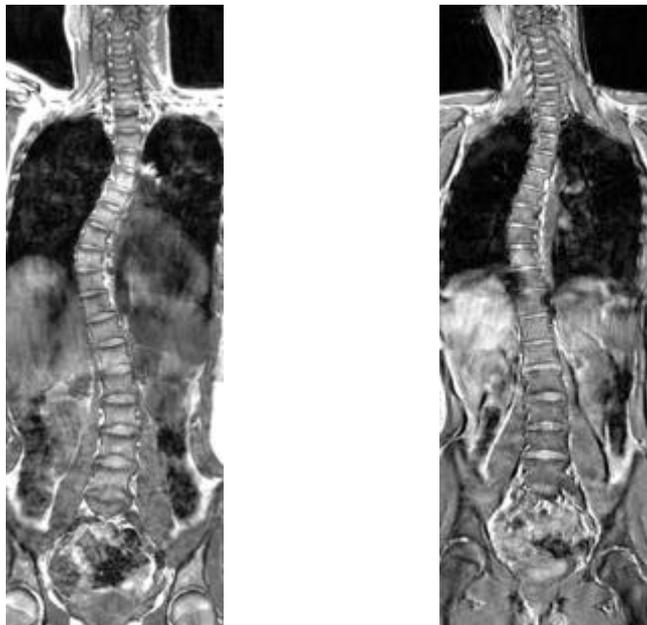


Cobbwinkel der MR-Aufnahme:
thorakal 43,5°, lumbal 39°

Abbildung 13:

Dokumentation der Wirkung des Cheneau-Korsetts

Aufnahmen einer 14,5 Jahre alten Patientin ohne Korsett (links) und mit Korsett (rechts);
Cobbwinkel: thorakal 31° versus 25° , lumbal 30 versus 24°



13 jährige Patientin Korsettstudie
Cobbwinkel: thorakal 29° ohne versus $23,5^\circ$ im Korsett,
lumbal 14° versus 12°

Abbildung 14:

Dokumentation eines zusätzlichen Korrekturgewinns durch pneumatisierte Druckpelotten im Korsett



Aufnahme ohne Korsett,
Cobbwinkel:
thorakal 23°, lumbal 13°



Aufnahme im Korsett,
Cobbwinkel:
thorakal 15°, lumbal 10°



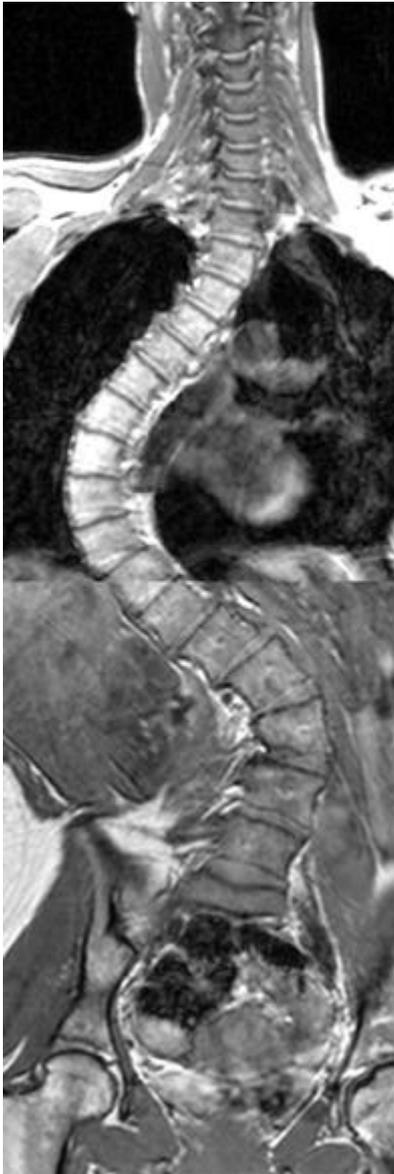
Aufnahme im
pneumatisierten Korsett,
Cobbwinkel: thorakal 10°,
lumbal 10°

Abbildung 15:

Zusätzliche Möglichkeit der Beurteilung in der sagittalen Ebene

Die koronare Ansicht zeigt nur ein minimales Krümmungsmaß, die sagittale Ebene hingegen eine schwere Brustkyphose.

Abbildung 16:

Kontrolluntersuchungen im Rahmen des „Erwachsenenscreenings“

30-jährige Patientin mit
hochgradiger thorakolumbaler
Skoliose
(Cobbwinkel: thorakal 89,5°;
lumbal 65,5°)



35-jährige Patientin mit
hochgradiger thorakolumbaler
Skoliose
(Cobbwinkel: thorakal 54°;
lumbal 44,5°)

Danksagung

Herrn **Prof. Dr. H. H. Schild**, Direktor der Radiologischen Klinik der Universität Bonn, gilt mein Dank für die Vergabe des Themas, sowie die Unterstützung, die er mir von seiner Klinik zukommen ließ.

Mein herzlicher Dank gilt insbesondere Frau **Dr. Ursula Jaeger**, Oberärztin der Radiologischen Klinik der Universität Bonn, welche die Dissertation mit großem Engagement über die ganze Zeit betreut hat. Mit Ratschlägen und in ständiger Diskussionsbereitschaft stand sie auch in ihrer Freizeit stets zur Verfügung und gab entscheidende Hinweise bei der Bearbeitung des Themas.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Herrn **Dr. Roy König** und Herrn **Dr. Jörg Kandyba**, Radiologische Klinik der Universität Bonn, bedanken, welche jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen, sei es bei Einarbeitung am Magnetresonanztomographen, der Mithilfe in der Datenauswertung oder der Zurverfügungstellung von Bildmaterial.

Ebenso gilt mein herzlicher Dank Herrn **Priv. Doz. Dr. Alfred Schmitz** und der Orthopädischen Klinik der Universität Bonn unter der Leitung von Herrn **Prof. Dr. O. Schmitt** für die große, unkomplizierte Kooperationsbereitschaft in der gemeinsamen Patientenbetreuung und den freundlichen, offenen Austausch von „orthopädischen Gesichtspunkten“ in der Betrachtung des Themas.

Allen Mitarbeitern der Radiologischen Universitätsklinik Bonn danke ich für ihre Hilfe und Unterstützung, sowie die immer angenehme Arbeitsatmosphäre im Institut.