

**Aus dem Universitätsklinikum Münster  
Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. W. Winkelmann**

**Vergleich rasterstereografischer und röntgenologischer  
Parameter im  
Langzeitverlauf idiopathischer Skoliosen**

**INAUGURAL-DISSERTATION**

**zur**

**Erlangung des doctor medicinae**

**der Medizinischen Fakultät**

**der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster**

**vorgelegt von Börke, Andreas**

**aus Nieder-Weisel, jetzt Butzbach**

**2008**

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der  
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. V. Arolt

1. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. L. Hackenberg
2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. C. Götze

Tag der mündlichen Prüfung: 11.02.2008

Aus dem Universitätsklinikum Münster  
Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. W. Winkelmann  
Referent: Priv. Doz. Dr. med. L. Hackenberg  
Koreferent: Priv. Doz. Dr. med. Ch. Götze

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Vergleich rasterstereografischer und röntgenologischer Parameter im  
Langzeitverlauf idiopathischer Skoliosen

Börke, Andreas

Die idiopathische Skoliose ist eine Erkrankung des Kindes- und Jugendalters, welche im Wachstum eine erhebliche Progredienz aufweisen kann. Daher ist eine engmaschige Verlaufskontrolle mit röntgenologischen Wirbelsäulenganzaufnahmen notwendig, verbunden mit dem signifikant erhöhten Risiko eine maligne Tumorerkrankung wie z.B. ein Mamma-Ca zu erleiden. Als Alternative zum Röntgen bietet sich das lichtoptische Verfahren der Rasterstereografie mit hohen Korrelationen zur Radiografie an. In dieser Arbeit wurden 16 Langzeitverläufe von 10 Jahren und mehr anhand von digitalisierten Röntgenbildern und zeitnah aufgenommenen Rasterstereografien anhand der Parameter gemittelte/maximale Wirbeltranslation und Wirbelrotation sowie dem Cobb-Winkel retrospektiv verglichen.

Es kam zu signifikanten Zusammenhängen zwischen den Verläufen der rasterstereografischen und röntgenologischen Parametern, insbesondere der Translationen, welche auch die Progredienz des Cobb-Winkels gut widerspiegeln. Anhand der Ergebnisse dieser Studie ist eine deutliche Reduktion der Strahlenbelastung durch eine rasterstereografische Verlaufsanalyse, unterstützt durch einzelne gezielte Röntgenuntersuchungen sicher möglich.

Tag der mündlichen Prüfung: 11.02.2008

1	Einleitung .....	1
1.1	Idiopathische Skoliose .....	2
1.1.1	Ätiopathogenese .....	2
1.1.2	Diagnostische Verfahren .....	3
1.1.3	Konservative und operative Behandlungsverfahren.....	6
1.2	Rasterstereografie .....	8
1.2.1	Entwicklung der Oberflächenvermessung.....	8
1.2.2	Einsatz der Rasterstereografie in der Klinik.....	11
2	Methodik.....	11
2.1	Auswahl der Untersuchungsgruppe.....	11
2.2	Analyse der Rasterstereografien.....	12
2.3	Digitalisierung der Röntgenbilder .....	16
2.4	Vergleich der Rasterstereografie und Radiografie durch Kurvenüberlagerung .....	18
2.5	Statistische Auswertung .....	20
3	Ergebnisse.....	20
3.1	Einzelfallanalysen.....	20
3.2	Analyse des Gesamtkollektivs.....	69
3.2.1	Vergleich der Wirbelsäulenform durch Kurvenüberlagerung .....	69
3.2.2	Vergleich radiologischer und rasterstereografischer Parameter .....	70
3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	77
4	Diskussion .....	84
5	Zusammenfassung .....	89
6	Literatur .....	91
7	Danksagung .....	98
8	Lebenslauf .....	99

# 1 Einleitung

Die idiopathische Skoliose ist eine Erkrankung des Kindes- und Jugendalters, welche eine deutliche Progredienz insbesondere während des Wachstums aufweist. Um diese zu diagnostizieren, die entsprechende Therapie einzuleiten und den Behandlungserfolg zu dokumentieren, werden regelmäßige Röntgenaufnahmen der ganzen Wirbelsäule alle 3-12 Monate empfohlen (6, 18, 49). Hieraus entsteht eine hohe Strahlenbelastung (4) mit einem signifikant erhöhten Risiko, eine sekundäre, maligne Tumorerkrankung wie das Mamma-Karzinom zu erleiden (17, 39, 47, 59, 62). Daher ist es sinnvoll, alternative, weniger strahlenbelastende Untersuchungsmethoden zu suchen (3, 15, 28, 35, 36, 48). Ziel muss es sein, ein objektives Diagnostikum mit höherer Reliabilität und Validität zu finden als subjektive, klinische Methoden wie der Vorneigetest oder das Skoliosimeter. Kriterium ist eine ähnlich hohe Aussagekraft wie die Röntgenaufnahme bei möglichst geringen Nebenwirkungen.

Hier rücken als objektives Messinstrument insbesondere die Oberflächenvermessungen z.B. mithilfe der Rasterstereografie in den Vordergrund. Die Rasterstereografie wird im Universitätsklinikum Münster bereits seit Ende der achtziger Jahre routinemäßig parallel zur Röntgenkontrolle eingesetzt. Sie ermöglicht eine dreidimensionale Rekonstruktion der Wirbelsäule anhand einer lichtoptischen Vermessung der Rückenoberfläche. Da lediglich ein Diapositiv auf die Rückenoberfläche des Patienten projiziert wird, ist bei dieser Methode mit keinerlei Nebenwirkungen zu rechnen.

In mehreren Studien konnte die hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Rasterstereografie im Sinne einer inneren Konsistenz sowie im Vergleich zu parallel aufgenommenen Röntgenaufnahmen belegt werden (3, 15, 16, 28, 36, 48). Nun ist es von Interesse, den Stellenwert der Rasterstereografie im Langzeitverlauf idiopathischer Skoliosen zu beurteilen.

In dieser Arbeit wurden 16 Patienten mit idiopathischer Skoliose retrospektiv betrachtet, welche zu mindestens drei verschiedenen Zeitpunkten über mindestens drei Jahre parallel sowohl radiologisch als auch rasterstereografisch untersucht worden sind. Voraussetzung war dabei eine deutliche Progredienz der Erkrankung, um die radiologisch diagnostizierten Veränderungen mit Parametern der Rasterstereografie zu vergleichen. Die Fragestellungen, wie exakt mit Hilfe der Rasterstereografie der Verlauf einer Skoli-

ose im Vergleich zu Röntgenaufnahmen eingeschätzt werden und inwieweit sie verlässlich Röntgenkontrollen ersetzen kann, stehen im Mittelpunkt dieser Studie.

## **1.1 Idiopathische Skoliose**

Die idiopathische Skoliose gehört zu den strukturellen Wirbelsäulendeformitäten, welche eine teilfixierte Seitenauslenkung der Wirbelsäule in der Frontalebene und eine Wirbelkörperrotation aufweisen. Im Gegensatz dazu sind die funktionellen Skoliosen u.a. aufgrund von schmerzbedingten Fehlhaltungen nicht fixiert, also zum Beispiel unter Narkose reversibel, haben keine Progressionstendenz und gehen kaum mit einer Wirbelkörperrotation einher. In Spätstadien ist ein Übergang in eine strukturelle Skolioseform aufgrund von morphologischen Folgeerscheinungen möglich (11, 84).

Die Erkrankungshäufigkeit wird in der Literatur unterschiedlich mit einer Prävalenz zwischen 0,1-10% angegeben (5, 11, 24, 52, 70, 83), wobei Mädchen 3-4 mal häufiger betroffen und auch durch einen häufig ungünstigeren Verlauf charakterisiert sind. Entsprechend dem Erkrankungsalter unterscheidet man infantile (1.-3. Lebensjahr), juvenile (3.-10. Lebensjahr) und adoleszente (>13. Lebensjahr) Skoliosen.

### **1.1.1 Ätiopathogenese**

Während bei den myopathischen, neuropathischen, osteopathischen und einigen anderen seltenen strukturellen Skoliosen die Ursachen geklärt sind, sind diese für die mit 80-90% häufigste idiopathische Skoliose weitgehend unbekannt. Vermutet werden zentralgesteuerte, asymmetrische Rückenmuskelinnervationen mit sekundär auftretenden Störungen des Wirbelkörperwachstums (11, 52, 84). Außerdem werden Störungen in der Produktion von Somatotropin und Somatomedinen, der Kollagensynthese, der Funktion des Gleichgewichtsorgans und des Hirnstamms sowie eine multifaktorielle Vererbung diskutiert (11).

Die Progredienz der Erkrankung erklärt sich wahrscheinlich durch die erhöhte Druckbelastung der konkavseitigen Abschlussplatten und Wirbelbogengelenke mit daraus resul-

tierender Wachstumssuppression dieser Areale (53). Sehr häufig kommt es zu einer kompensatorischen Gegenkrümmung der Wirbelsäule. Das Fortschreiten der Deformität findet besonders in Phasen des stärksten Körperwachstums statt, also etwa mit 12-14 Jahren. Eine weitere Verschlechterung von ca.  $0,5^\circ$  pro Jahr nach Abschluß des Wachstums ist aber nicht auszuschließen, insbesondere bei bereits höhergradigen Skoliosen.

Die morphologischen Veränderungen betreffen neben den einzelnen Wirbelkörpern die Wirbelsäule als Gesamtsystem. Die fixierte Seitenauslenkung der Wirbelsäule geht mit einer Keilform der Wirbelkörper und Bandscheiben einher. Zusätzlich sind die einzelnen Wirbelkörper um ihre Längsachse gedreht, was als Wirbelkörperrotation bezeichnet wird. Segmentübergreifend und auf den einzelnen Wirbelkörper bezogen wird von einer Torsion gesprochen, womit eine Verdrehung/Verwringung der einzelnen Abschlussplatten und der hinteren Wirbelkörperanteile in der Horizontalebene gegeneinander gemeint ist (67, 84). Die weitere Einteilung der Skoliosen erfolgt im Kapitel 1.1.2.

### **1.1.2 Diagnostische Verfahren**

Die Diagnostik der Skoliose obliegt zum einen der klinischen Untersuchung insbesondere dem Vorneigetest und zum anderen den Vermessungen. Da neben der Erstdiagnostik die Verlaufskontrolle einer Skoliose und die darauf basierende weitere Therapieplanung unverzichtbar ist, spielen eine hohe Zuverlässigkeit, Genauigkeit, die Kostenintensivität und auch die möglichen Nebenwirkungen eine große Rolle (28).

Die idiopathische Skoliose verursacht während des Wachstums keinerlei Schmerzsymptomatik. Klinisch auffällig werden die Patienten durch Deformitäten, also Asymmetrien des Rückenprofils, welche bei thorakalen Skoliosen als Rippenbuckel und bei lumbalen Krümmungen als Lendenwulst imponieren. Die Erhabenheit liegt dabei immer auf der Konvexseite der Deformität und lässt sich mit dem sogenannten Vorneigetest begutachten. Ein pathologischer Befund wird als positiver Test nach Adams bezeichnet. Dieser Test gehört zum Screeningprogramm bei der Untersuchung Heranwachsender (8), denn er ist schnell durchführbar, wenig kostenintensiv, mit ausreichender Sensitivität im Rahmen der Erstdiagnostik (65). Allerdings unterliegt diese Methode sehr stark der subjektiven Einschätzung des ärztlichen Personals, was die Aussagefähigkeit insbesondere

für eine Verlaufsdokumentation sehr stark einschränkt (2, 8, 60, 68). Außerdem sind Einflussfaktoren wie Beinlängendifferenzen zu berücksichtigen, welche leicht zu falsch positivem Befund führen und dadurch unnötige Röntgenuntersuchungen nach sich ziehen (31) können.

Um den Befund des Vorneigetests zu quantifizieren eignet sich das Skoliometer. Dieses Hilfsmittel ist mit einer Wasserwaage ausgestattet und wird bei dem in Vorneige positionierten Patienten an den Wirbelkörpern höchster Asymmetrie aufgesetzt und so die Fehlrotation abgelesen. Die Skoliometermessung etablierte sich in den achtziger Jahren als Screeningmethode in Schulreihenuntersuchungen und als Verlaufkontrolle (2, 60, 68). Dabei ist die Aussagefähigkeit der Methode durchaus umstritten. In den Untersuchungen von Cote et. al. und Grossmann et. al. (10, 24) konnten beispielsweise nur sehr unzureichende Spezifitäten und Sensibilitäten postuliert werden. Auch in den Studien von Hackenberg waren die Ergebnisse der in vivo Skoliometervermessung aufgrund der großen Abweichungen nicht zur weiteren Analyse verwertbar und mussten durch rasterstereografisch unterstützte, simulierte Messwerte ersetzt werden (31). Zusammenfassend muss gesagt werden, dass die Vermessung der Deformität mittels Skoliometer eine zwar weit verbreitete Methode ist, deren Bedeutung und Genauigkeit jedoch sehr kritisch beurteilt werden sollte.

Der zur Zeit angewendete Goldstandard in der Beurteilung idiopathischer Skoliosen ist die Röntgenaufnahme (19, 28, 50). Für die Aufnahme der Wirbelsäule im Stehen im posterior-anterioren und im seitlichen Strahlengang sind verschiedene Parameter definiert, mit deren Hilfe das Ausmaß der Pathologie bestimmt wird.

Zunächst lässt sich die Form der Skoliose beschreiben. Anhand der Lage des Scheitelwirbels bzw. Skoliose-Apex, definiert als Wirbelkörper mit der stärksten Rotation bzw. Translation, unterteilt man lumbale (L2 bis L5), thorakolumbale (L1 und TH12) und thorakale Skoliosen (TH11 bis TH2). Mit ca. 80% sind die rechtskonvexen Thorakalskoliosen am häufigsten. Die Form kann ein- oder doppelbogig (C-/S-förmig) oder dreibogig sein, sowie nach der Konvexität näher beschrieben werden (65). Eine Einteilung der idiopathischen, rechtskonvexen Thorakalskoliosen definierte King (42, 43): King I S-förmig, lumbal ausgeprägter (13%); King II S-förmig, thorakal betont (33%); King III thorakale Skoliose mit geringer lumbaler Gegenkrümmung (33%); King IV

thorakolumbal, bis einschließlich L4 (9%) und King V thorakal doppelbogig bis Th1 (12%).

Mit der Methode nach Cobb (9, 63) wird das Ausmaß der Krümmung bestimmt. Ausschlaggebend ist der Winkel zwischen der Deckplatte des oberen Neutralwirbels und der Grundplatte des unteren Neutralwinkels. Bei doppelbogigen Deformitäten wird für jede Krümmung der Cobb-Winkel gemessen. Neutralwirbel sind die am stärksten in der Horizontalen geneigten Wirbel, die nicht rotiert sind. Der Cobb-Winkel ist der international wichtigste Parameter zur Beurteilung einer Skoliose und ist Basis für therapeutische Entscheidungen (vgl. Kapitel 1.1.3). Zur Verlaufskontrolle gehört eine regelmäßige Bestimmung desselben.

Der direkt aus der Röntgenaufnahme ermittelte Winkel kann durch zeichnerische, Interpretations- und Ablesefehler untersucherabhängig Differenzen aufweisen, die in ihrer Ausprägung unterschiedlich eingeschätzt werden. Laut Neugebauer et. al (63) ist der Cobb-Winkel zeichnerisch nicht genauer als  $\pm 5^\circ$  bestimmbar.

Alternativ ist der Cobb-Winkel mittels digitalisierter Röntgenaufnahmen nach dem Drerup'schen Verfahren (14) zu berechnen, welches gleichzeitig auch die Ermittlung weiterer Parameter erlaubt. Diese Methode ist deutlich genauer und wird ausführlich in Kapitel 2.3 erläutert.

Zur Einschätzung der Wirbelkörperrotation aus der p.-a. Aufnahme stehen drei Alternativen zur Verfügung. Die genaueste Beurteilung ist mithilfe der bereits oben erwähnten Drerup'schen Digitalisierung möglich (vgl. Kap. 2.3), welche auch die Grundlage der Bestimmung der Rotationen in dieser Studie war.

Die von Nash und Moe publizierte Methode (61) erlaubt eine Einteilung des Schweregrades der Rotation in 4 Grade entsprechend des Verhältnisses von Bogenwurzel zu Wirbelkörpertaille. Die Beschränkung der Quantifizierung der Wirbelrotation in 4 Schweregrade mit den entsprechend fehlenden Abstufungen der „Grauzonen“ zeigt die Begrenztheit dieser Methode auf. Dazu kommen noch die bei der zeichnerischen Bestimmung untersucherabhängig auftretenden Differenzen, so dass diese Methode als ungenau und wenig geeignet erscheint, den Verlauf der Wirbelkörperrotation exakt zu beurteilen.

Perdriolle beschrieb 1979 eine Möglichkeit (66), die Rotation intervallskaliert zu ermitteln. Grundlage ist auch hier das Lageverhältnis der Pedikel zu den Wirbelkörpertailen.

An dem am stärksten rotierten Segment wird nach einem definierten Positionieren einer Schablone auf dem Röntgenbild der Wert direkt ablesbar. Dieses Verfahren kommt zwar ohne Kategorien aus, da die Bezugslinien zu den Gradeinteilungen aber sehr dicht nebeneinander liegen, ist der Intra- und Interobserverfehler mit 5-10° hoch (75).

Als weitere bildgebende Verfahren lassen sich die Computertomografie und die Kernspintomografie aufführen. Der Vorteil liegt in einer genauen Beurteilung der Skoliose, es lassen sich sehr detaillierte dreidimensionale Wirbelsäulenrekonstruktionen berechnen. Da diese Verfahren jedoch entweder eine inakzeptabel hohe Strahlenbelastung bedeuten oder zu kostenintensiv sind, werden sie nur in Ausnahmefällen oder für wissenschaftliche Zwecke herangezogen. Die Interpretation ist zeitintensiv und nicht in der Ambulanz zu realisieren.

### **1.1.3 Konservative und operative Behandlungsverfahren**

Die Behandlung der idiopathischen Skoliose richtet sich nach Schweregrad, zu erwartender Progredienz, dem Alter sowie sonstigen individuellen Voraussetzungen des Patienten (41). Da hierbei das biologische Alter in Zusammenschau mit den zu erwartenden Wachstumsreserven zu beachten ist, wird neben dem kalendarischen auch radiologisch das Knochenalter bestimmt. Dazu eignet sich die Beurteilung der Verknöcherungsstadien der Darmbeinkammaphyse nach Risser (69), der Abschluss des Wachstums der Wirbelkörperapophysen oder des Handskeletts (22, 72, 78).

Ziel der Therapie ist das Aufhalten einer nachgewiesenen Progredienz, die Korrektur der bestehenden Krümmung und Halten des Korrekturergebnisses. Dadurch kann das Eintreten von Spätfolgen vermieden werden. Hierzu zählen insbesondere voraus eilende Degenerationen der Wirbelsäule mit entsprechender Schmerzsymptomatik und Beeinträchtigungen des Herzkreislaufsystems. Durch Einschränkung der Atemexkursionen, Minderventilation und möglicherweise Ausprägung eines pulmonalen Hypertonus mit folgendem Cor pulmonale kann es zu deutlicher Reduktion der Belastbarkeit und einer erhöhten Mortalität kommen. Starke lumbale Skoliosen können auch zu Komprimierungen und Verdrängungen der Bauchorgane führen mit konsekutiven Funktionseinbu-

ßen (38, 44, 52, 56, 83). Auch der kosmetische Defekt spielt eine zunehmend größere Rolle.

Im Folgenden wird kurz auf die verschiedenen Konzepte in Abhängigkeit des Schweregrades eingegangen. Die konservative Therapie mit Physiotherapie, wofür verschiedene spezielle Konzepte entwickelt wurden, ist je nach Autor ab einem Cobb-Winkel von 10°- 20° indiziert (11, 52, 65, 83, 84). Primäre Ziele sind die Korrektur von Fehlhaltungen, Schulung der Körperwahrnehmung und –haltung und Ausgleich muskulärer Dysbalancen. Der Kräftigung der geschwächten und überdehnten konvexseitigen Muskulatur gilt besondere Aufmerksamkeit. Die Erfahrungen zeigen, dass die Effekte der krankengymnastischen Therapie oft nur vorübergehend bestehen und die Progression der Deformität langfristig nicht aufhalten können. Die Studien von Weiss (81) dagegen postulieren einen deutlichen Effekt der krankengymnastischen Behandlung bezüglich eines Aufhaltens der Progredienz und einer Deformitätsverbesserung und sehen sie sogar als Alternative zur operativen Versorgung auch höhergradiger Skoliosen. Insgesamt ist die Physiotherapie essentieller Bestandteil auch von höhergradigen Skoliosen und hat Bedeutung als Begleitmaßnahme zur Korsett- und operativen Therapie (11, 46, 52, 65, 83, 84).

Ab einem Cobb-Winkel von 20° bis 40° wird die Krankengymnastik mit einer Korsetttherapie kombiniert. Für die unterschiedlichen Skolioseformen stehen optimierte Korsettsysteme zur Verfügung, wie Rumpfkorsette (z.B. Boston-Korsett) für Skoliosen mit Scheitelpunkt unterhalb TH5 oder Milwaukee-Korsette für höhere thorakale Krümmungen. Außerdem unterscheidet man Aktiv- und Passivkorsette. Während Passivkorsette die Krümmung durch Pelotten passiv korrigieren, fordern Aktivkorsette die bewusste Rumpfarbeit des Patienten. Mahnpelotten u.a. an Kinn und Hinterhaupt geben dem Patienten dabei die nötigen Informationen über die aktuelle Körperhaltung. Die Tragezeiten des Korsetts werden mit 18-23 Stunden pro Tag empfohlen, wobei die meisten Quellen sich an dem oberen Richtwert orientieren (34, 46, 51, 52, 83, 84). Das in Deutschland verbreitetste Korsett ist die Münster-Chenau-Orthese.

Ziel der Korsett-Therapie ist das Aufhalten einer nachgewiesenen Progredienz. Anzustreben ist eine initiale Korrektur des Krümmungswinkels von ca. 50%. Dadurch werden die konkavseitigen Wachstumszonen entlastet und weitere strukturelle Veränderungen gebremst. Zur Überprüfung des Therapieerfolgs werden 6-monatige Röntgenkon-

trollen empfohlen. Das Abtrainieren des Korsetts erfolgt bei Beendigung des Knochenwachstums (Risser-Stadium IV-V) anhand eines Abschulungsplanes über 6-10 Wochen hinweg.

Die operative Behandlung ist bei Cobb-Winkeln über 45° und bei starker Progredienz indiziert (52, 65, 83, 84). Sie sollte kurz nach Wachstumsabschluß durchgeführt werden. Es existieren verschiedene Operationsverfahren. Der Harrington-Stab (34) als interner, einzelner, an den Wirbelbögen der Konkavseite angebrachter Distraktionsstab, wurde in den achtziger Jahren weitestgehend von dem Verfahren nach Cotrel-Dubouset (CD) abgelöst (33, 45). Vorteile sind eine verbesserte dreidimensionale Rekonstruktion und primäre Übungsstabilität durch das Einbringen einer Rahmenkonstruktion aus zwei Stäben, die mit Haken an mehreren Segmenten der Wirbelsäule unter besonderer Beachtung des sagittalen Profils angebracht werden. Seit ca. 9-10 Jahren werden diese Haken fast vollständig durch Pedikelschrauben verdrängt. Dennoch ist mit dem dorsalen Verfahren eine suffiziente Derotation oft nicht zu erreichen, so dass die Korrekturspondylodese mit einer Rippenbuckelresektionsplastik kombiniert wird. In ausgewählten Fällen empfiehlt sich eine ventrale Derotationsspondylodese (VDS) nach Zielke (7, 32, 57, 85, 86, 87), welche primär eine sehr gute Wirbelderotation ermöglicht. Eine Kombination von VDS und dorsalen Verfahren ist bei höhergradigen Deformitäten notwendig. Die Verfahren ermöglichen eine Korrektur des Cobb-Winkels um mindestens 50 %.

## **1.2 Rasterstereografie**

### **1.2.1 Entwicklung der Oberflächenvermessung**

Die Anfänge der Rückenoberflächenanalyse gehen in die siebziger Jahre zurück. Takasaki und Meadows et. al. (55, 77) beschrieben die Moiré-Topografie, bei der „die Körperoberfläche als System von Höhenlinien in Bezug auf die Frontalebene dargestellt“ wird. Dieses fotografische Konturenzeichnungsverfahren ermöglichte bereits die Beschreibung des Ausmaßes der Rumpfasymmetrie und wurde zur Skoliosefrüherkennung und zur Dokumentation des Behandlungsverlaufes eingesetzt (1, 40, 76). Es gab vielfältige Strategien, aus den einzelnen Höhenlinien Höhen- und Winkeldifferenzen zu be-

rechnen und mit radiologischen Messungen zu korrelieren (13, 58, 64, 73, 82). Am Fortgeschrittensten war schließlich das Verfahren nach Drerup (12), welches auf der Interpolation und Analyse von digitalisierten Topogrammen beruhte. Aufgrund der Komplexität wurde dieses Verfahren von anderen Methoden abgelöst und hat heute keine klinische Bedeutung mehr.

Verfahren, die neben der Rekonstruktion der Rückenoberfläche auch klinisch nutzbare Informationen wie Messwerte für die Oberflächenrotation oder die Seitabweichung angeben sind das „Integrated Shape Imaging System (ISIS)“, das Quantec Imaging System und die Videorasterstereografie. Gemeinsam ist allen drei Methoden, dass sie auf dem Prinzip der Triangulation bzw. Stereofotogrammetrie beruhen. Die Lage eines Punktes P wird berechnet aus der bekannten Wegstrecke  $b$  zwischen zwei Punkten A und A' und den zugehörigen Winkeln  $\alpha$  und  $\alpha'$  (vgl. Abb. 1). Sofern der zu definierende Punkt nicht in einer Horizontalebene mit den Punkten A und A' liegt, müssen auch noch die Höhenwinkel  $\beta$  und  $\beta'$  gemessen werden, um den Ort von Punkt P vollständig zu bestimmen (35).

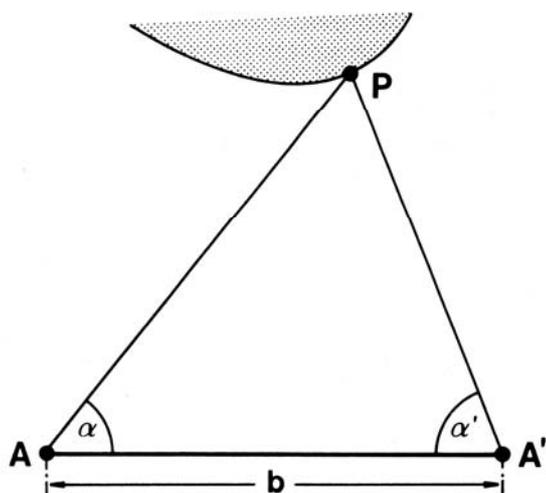


Abbildung 1  
Prinzip der Triangulation

Das erste funktionsfähige System war 1988 der ISIS-Scanner (79, 80), welches als berührungsloses Verfahren jedoch auf die manuelle Markierung der Dornfortsätze als Bezugspunkte angewiesen ist. Am stehenden Patienten werden 10 Querprofile projiziert, mithilfe derer das sagittale Wirbelsäulenprofil, die Oberflächenrotation und die Seitab-

weichung der Dornfortsätze zu berechnen sind. Als Ersatz für den Cobb-Winkel wird der Parameter „laterale Asymmetrie“ empfohlen, welcher auf einer relativ groben Rekonstruktion der Wirbelsäulenform beruht. Die Genauigkeit dieser Methode ist letztlich nicht zu beurteilen, da es zur Zeit keine Studien gibt, die eine vergleichende Evaluation z.B. zu Röntgenbildern beinhalten.

Auch das von Sakka et.al. (71) 1994 beschriebene Quantec Imaging System benötigt die manuelle Markierung bestimmter Fixpunkte, um mit einem relativ hochauflösenden Raster stereofotogrammetrisch die Seitabweichung, die Position des Beckens, die Rumpflänge und das Wirbelsäulenprofil zu berechnen. Es werden keine Daten zur rotatorischen Komponente der Deformität berechnet und auch keine exakte Rekonstruktion der Wirbelsäulenform. Zu diesem System existieren verschiedene Publikationen, welche sich mit der Reproduzierbarkeit und dem Anwendungsspektrum beschäftigen (19, 20, 21, 23, 54).

Das ausgereifteste Oberflächenvermessungssystem ist die Rasterstereografie, im Folgenden mit RSG abgekürzt. Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit dem Einsatz der Methode in der Klinik und der Vergleichbarkeit zur Röntgenaufnahme. In diesen Studien konnte eine hohe Reliabilität und Validität des Systems aufgezeigt werden. Wesentliche Vorteile sind (28):

- der geringe Untersuchungsaufwand und die schnelle Verfügbarkeit des Ergebnisses,
- es sind keinerlei manuelle Markierungen notwendig,
- die automatische Rückenformanalyse liefert eine dreidimensionale Rekonstruktion der Wirbelsäulenform in drei Ebenen,
- eine sehr hohe Auflösung.

Das wichtigste Ergebnis zur klinischen Beurteilung der Deformität einer Wirbelsäule mithilfe der RSG ist die Wirbelsäulenrekonstruktion. Diese ermöglicht eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit Röntgenaufnahmen. Anhand der Rekonstruktion werden die Wirbeltranslationen und Oberflächenrotationen jeweils als Maximalwert sowie als root mean square (RMS) im Sinne eines gemittelten Wertes angegeben.

Neben dem Einsatz in der Vermessung von Wirbelsäulendeformitäten ist die Methode auch geeignet, Funktionsanalysen z.B. der Beckenregion über die Bestimmung von Parametern wie Beckenschiefstand, -torsion etc. durchzuführen. Die Rückenformanalyse ermöglicht zudem Aussagen über den kosmetischen Aspekt einer Deformität.

## **1.2.2 Einsatz der Rasterstereografie in der Klinik**

Die Erfahrungen mit der Videorasterstereografie, die in der Klinik für allgemeine Orthopädie der Universität Münster seit Mitte der neunziger Jahre gemacht wurden, haben zu folgenden Standards in Diagnostik und Behandlung idiopathischer Skoliosen geführt:

1. Bei Erstvorstellung klinische Untersuchung und Rasterstereografie, bei manifester skoliotischer Deformität Röntgenuntersuchung, bei geringen Deformitäten und Fehlhaltungen mit einer Wirbeltranslation unter 50mm und einer Wirbelrotation unter 5° keine Röntgenuntersuchung.
2. Nach 6 Monaten erneute klinische Untersuchung und Rasterstereografie, bei Befundkonstanz im Vergleich zur Erstuntersuchung keine Röntgenuntersuchung, erneute Kontrolle nach 6 Monaten.
3. Unter Korsettherapie Röntgenuntersuchung nur bei rasterstereografischer Befundprogredienz, Röntgenuntersuchung jedoch obligat bei Indikationsstellung zur Korsettherapie und 6 Wochen nach Korsettanpassung.
4. Indikationsstellung und Bemessung eines Beinlängenausgleichs nur durch klinische und rasterstereografische Untersuchung.
5. Postoperativ kann auf 2 von 5 Röntgenaufnahmen verzichtet werden, wenn Rasterstereografisch keine Progredienz nachzuweisen ist.

## **2 Methodik**

### **2.1 Auswahl der Untersuchungsgruppe**

Einschlusskriterien waren ein Verlaufsbeobachtungszeitraum von mindestens drei Jahren und drei Aufnahmepaaren. Dabei sollten die Aufnahmezeitpunkte der röntgenologischen und rasterstereografischen Paare möglichst am selben Tag durchgeführt worden sein. Bis auf einzelne Ausnahmen, die in der Einzelfallanalyse explizit ausgewiesen werden, konnten diese Bedingungen erfüllt werden.

Wissenschaftlich interessant war eine möglichst hohe Progredienz der Deformität von mindestens 10° nach Cobb. Dies war in 14 von 16 Fällen gegeben.

Um eine Vergleichbarkeit der Bildpaare zu gewährleisten war außerdem Voraussetzung, dass die Röntgenbilder ohne Korsett aufgenommen wurden. Es ist einleuchtend, dass Oberflächenvermessungen mit Korsett, oder der Vergleich zu radiologischen Korsettaufnahmen zu nicht aussagefähigen Ergebnissen führen würden. Dies reduzierte die Anzahl der Patienten deutlich, da gerade die progredienten Verläufe mit einem Korsett versorgt worden sind und somit sehr häufig im interessantesten Verlaufszeitraum ausschließlich Röntgenaufnahmen im Korsett existieren.

Die Untersuchungsgruppe besteht aus 16 Patienten (die Versuchspersonen werden im Folgenden mit VP1-VP16 bezeichnet) mit einem durchschnittlichen Beobachtungszeitraum von 8 Jahren, 6 Bildpaaren und einer Progredienz von ca.  $13^\circ$  nach Cobb.

## 2.2 Analyse der Rasterstereografien

Bei der Vermessung der Rückenoberfläche kann der Patient entspannt mit locker neben dem Oberkörper hängenden Armen im Projektionsfeld des Diapositivs stehen. Die Rückenoberfläche sollte quer zum Gerät zeigend ausgerichtet werden. Es sind keine weiteren Positionierungskriterien zu beachten.

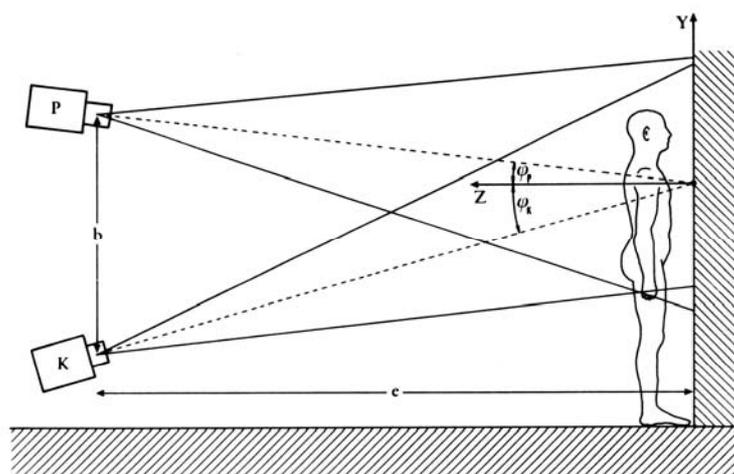


Abbildung 2

Projektor und Kameraposition werden in definiertem Winkel zueinander bei der Rasterstereografie im Sinne der Triangulation angeordnet.

Die horizontalen, parallelen Lichtstrahlen werden von einer weiter oben, an einem definierten Punkt angebrachten Videokamera aufgenommen (vgl. Abbildung 2) und geben so einen lichtoptischen „Abdruck“ der Rückenoberfläche wieder. Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abbildung 3 wiedergegeben.

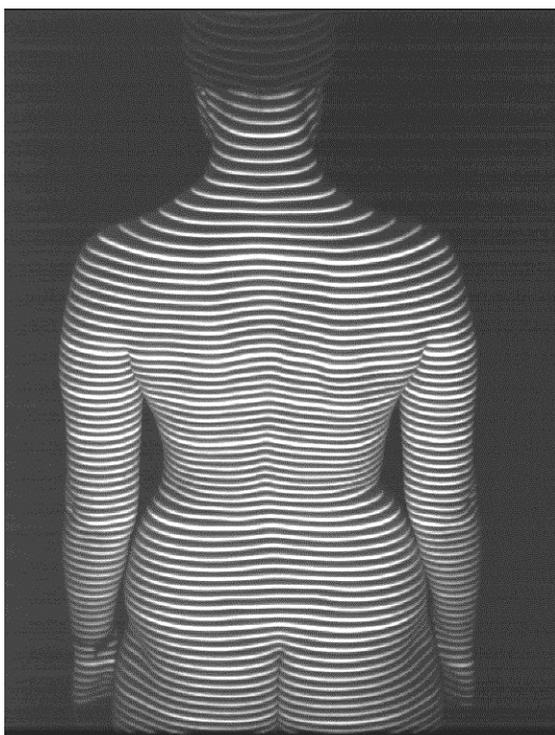


Abbildung 3  
Projiziertes Linienraster auf der Rückenoberfläche

Die daraus gewonnenen Daten sind die Grundlage der Formanalyse der Wirbelsäule mittels des Programms „VRS Formetric“ nach Hierholzer. Die Untersuchung benötigt inklusive der computergestützten Auswertung nur wenige Sekunden und liefert unmittelbar einen Auswertungsbogen (Abbildung 4), welcher die relevanten Messergebnisse enthält.

Neben den Angaben zur Person, Aufnahme-code und Aufnahme-datum sind in der linken, oberen Spalte die wichtigsten berechneten Parameter aufgelistet (Abb. 4). Rechts daneben ist das rasterstereografische Übersichtsbild mit den von der oben angebrachten Kamera aufgenommenen Konturen der Rückenoberfläche und den zugehörigen anatomischen Fixpunkten zu sehen. Anhand dieser Daten errechnet das Programm die eben-

falls im Ausdruck vorhandene Symmetrielinie. Sie teilt die Rückenoberfläche in zwei Hälften größter Ähnlichkeit und ist das Modell der Dornfortsatzlinie. Die anatomischen Fixpunkte VP (Vertebra prominens), DL (linkes Lumbalgrübchen), DR (rechtes Lumbalgrübchen) und DM (Mittelpunkt der Verbindungslinie DL-DR, dient der Berechnung z.B. der Rumpflänge, nicht im Bild markiert), werden durch die automatische Analyse vorgeschlagen und können vom Untersucher im Zweifelsfall interaktiv korrigiert werden. Ebenfalls vor der endgültigen Bestimmung der Symmetrielinie und den weiteren Berechnungen ist es möglich, einen Skoliose-Apex vorzugeben, um die sonst rein programmabhängig erfolgende Analyse zu optimieren. Diese Vorgaben sind auf dem Auswertungsbogen zu sehen, ebenso können Beinlängenausgleiche oder andere Besonderheiten vermerkt werden.

Im unteren Teil des Bogens finden sich links die auf der 3-D-Rekonstruktion basierenden Wirbelsäulenprojektionen in der frontalen und der lateralen Ansicht. Rechts davon ist die Kurve der Oberflächenrotation abgebildet. Die Daten, welche im Vergleich zu den röntgenologisch ermittelten Parametern in dieser Studie von Interesse sind, finden sich in der unteren linken Parameterauflistung. Hier können die gemittelte Wirbelkörperseitabweichung (RMS-LD oder RMS LAT.DEV.) und die Extremwerte zu beiden Seiten und damit das Translationsmaximum (Max.LD oder MAX.LAT.DEV.) der Untersuchung abgelesen bzw. einfach errechnet werden.

Die maximalen Seitabweichungen zu beiden Seiten sind die jeweils größte Entfernung der Wirbelsäulenrekonstruktion in der Frontalebene in Relation zur Verbindungslinie VP-DM und somit nicht unmittelbar aus der Frontalprojektion unten links abzulesen.

Aus der Oberflächenrotationskurve werden die Parameter gemittelte Oberflächenrotation (RMS-Rot.) und die beiden Maximalwerte, aus denen sich das Rotationsmaximum (Max.Rot.) errechnet bestimmt. Neben den übrigen nicht näher erläuterten Parametern auf dem gezeigten Bogen ist es zudem möglich, anhand zweier weiterer Auswertungsbögen Aufschluß über das Sagittalprofil und einzelne Transversalprofile zu erhalten.

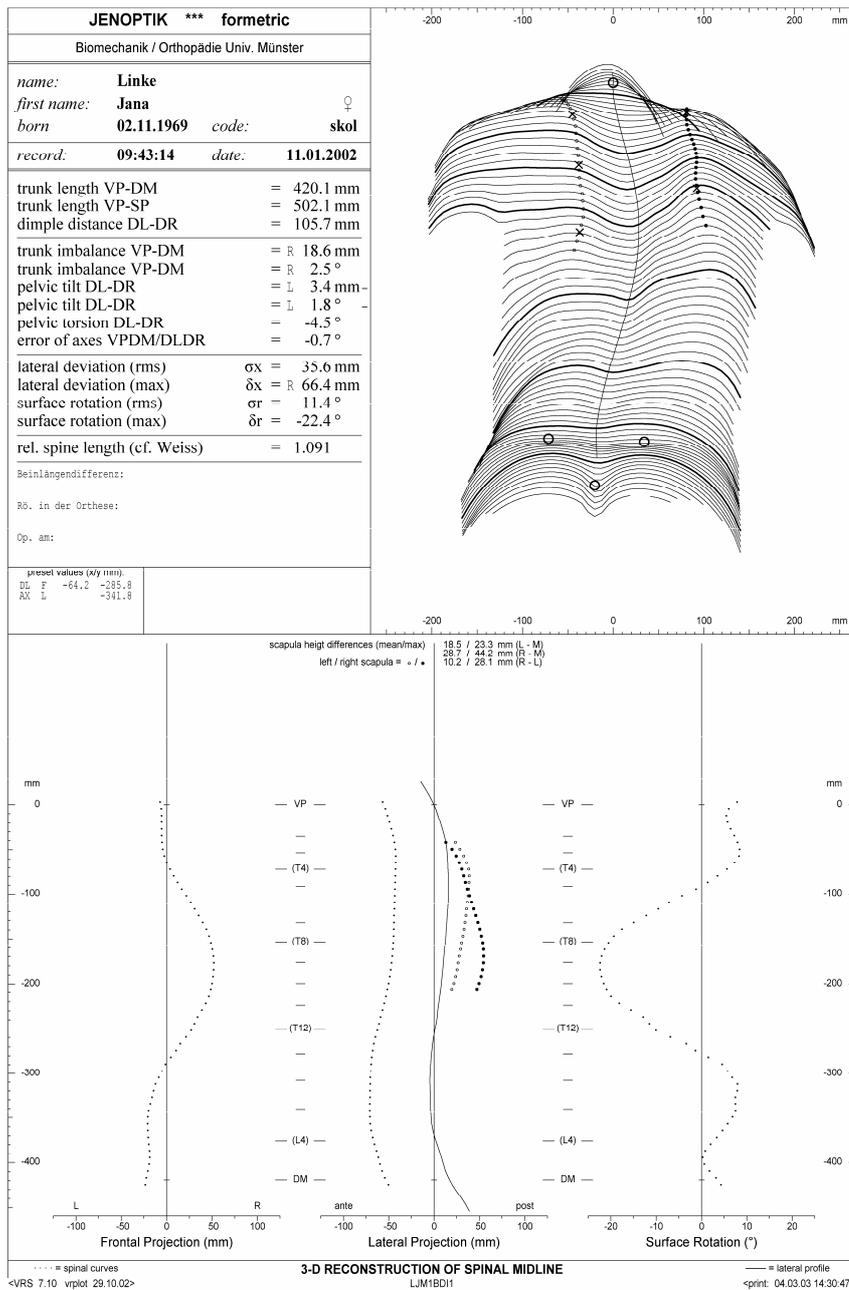


Abbildung 4

Deckblatt der Papierausdrucke einer rasterstereografischen Messung einer rechtskonvexen Thorakalskoliose. In der Übersichtsdarstellung der Querprofile oben rechts zeigt sich bereits eine ausgeprägte Rumpfasymmetrie mit rechtsseitigem Rumpfüberhang. Die grafische Darstellung zeigt eine Wirbelfehlrotation von etwa 25° und eine Translation von etwa 60mm, das sagittale Profil ist unauffällig. Die exakten Meßdaten sind der Datentabelle oben links zu entnehmen.

## 2.3 Digitalisierung der Röntgenbilder

Die Digitalisierung der Röntgenbilder dient der genauen Bestimmung der entscheidenden Parameter, welche für den Vergleich zur Rasterstereografie herangezogen werden, insbesondere der Wirbelkörperrotationen (vgl. Kap. 1.1.2).

Das Prinzip der Digitalisierung beruht auf der zielgerichteten Übertragung der Röntgenaufnahme in ein digitalisiertes Dateiformat, welches dann einer automatisierten Computeranalyse zugänglich ist. Dazu werden definierte Punkte der einzelnen Wirbelkörper auf einer dem Röntgenbild aufliegenden, transparenten Folie manuell eingezeichnet. Dies sind je 2 Punkte für Grund- und Deckplatte, 9 Punkte pro Wirbelkörperpartille und 4 Punkte pro Bogenwurzel. Soweit im Röntgenbild ausreichend genau erkenntlich, werden diese Punkte für die Wirbel L 4 bis TH 1 bestimmt. Abschließend wird der Dornfortsatz von C 7 mit 4 Punkten beschrieben. Diese Punkte werden an einem Digitalisierungstisch von einem Programm abgefragt und manuell anhand der Zeichnung übertragen, in einen Datensatz umgewandelt und können dann ausgewertet werden. Ergebnis ist der in Abbildung 5 gezeigte Auswertungsbogen.

Man sieht oben links die aus dem Datensatz ermittelte Wirbelsäulenform, daneben die Frontalprojektion, wobei jede Markierung dem zugehörigen Wirbelkörpermittelpunkt entspricht.

Die Kurve „Tideström-Angle“ besteht aus Punkten, die den Winkeldifferenzen zwischen den Wirbelkörperplatten und der Horizontalen entsprechen, und ist somit dem Cobb-Winkel nahezu gleichzusetzen.

Die rechte Abbildung „Vertebral Rotation“ enthält die Rotationen der einzelnen Wirbelkörper, errechnet aus der Relation der Bogenwurzeln zu den Wirbelkörperpartillen.

Durch jede dieser drei „Punktmengen“ wird eine Annäherungslinie/Glättungskurve gelegt, die mathematisch geringstmöglich zu den einzelnen Messwerten pro Wirbelkörper abweicht. Aus diesen Annäherungslinien werden dann die Parameter maximale/gemittelte Translation bzw. Rotation berechnet. Diese Werte sind in dem unteren Teil des Auswertungsbogens abzulesen.

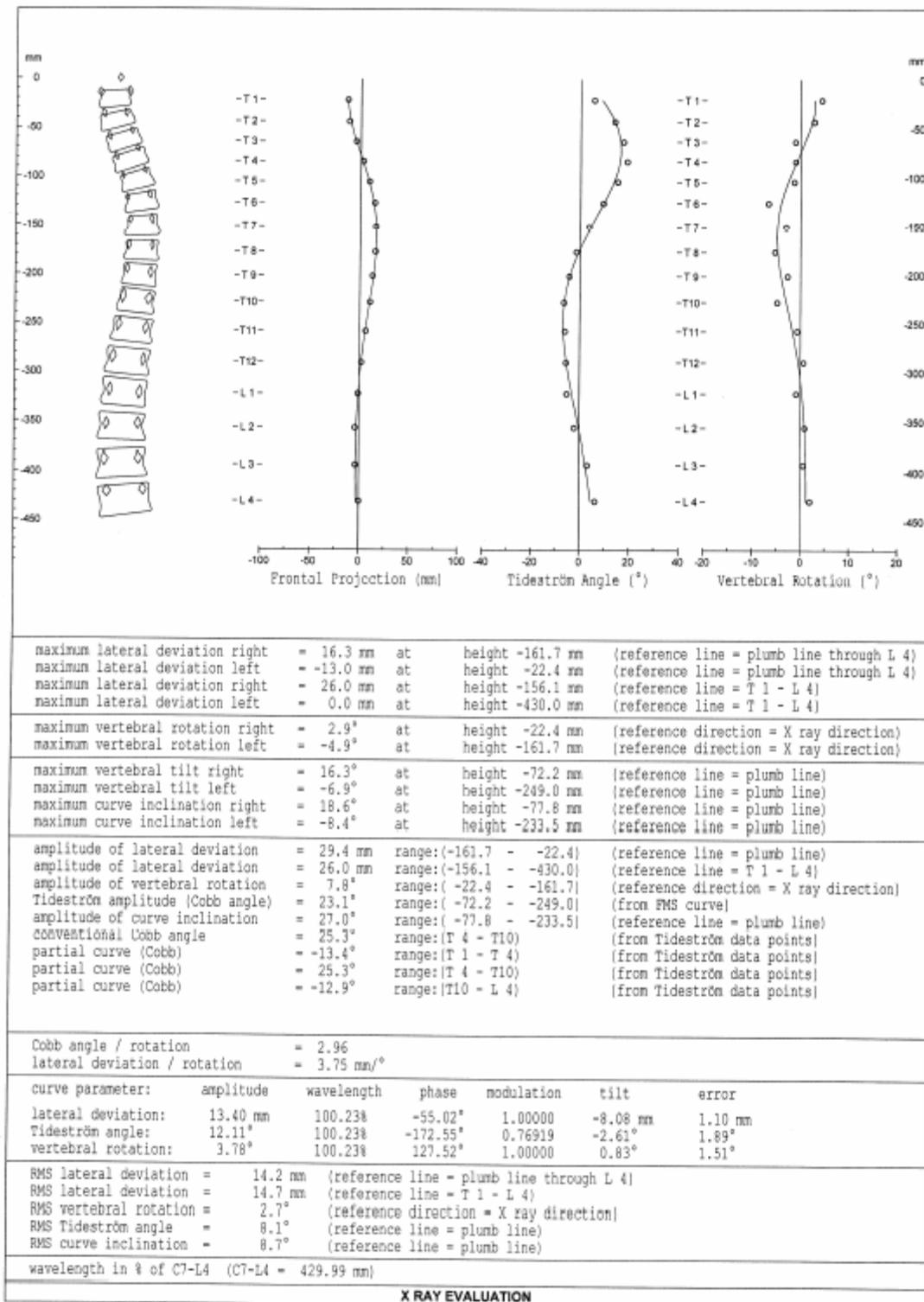


Abbildung 5  
Auswertungsbogen einer digitalisierten Röntgenbildanalyse

## 2.4 Vergleich der Rasterstereografie und Radiografie durch Kurvenüberlagerung

Die beiden aus der Rasterstereografie und der Röntgenaufnahme erzeugten Kurven der Frontalprojektion und der Rotation werden als Aufnahmepeaar direkt miteinander verglichen (vgl. Abbildung 6). Dazu wurde ein spezielles Programm entwickelt, welches ein Ergebnisprotokoll zur Verfügung stellt, in dem das Maß der Übereinstimmung der zwei virtuell übereinandergelegten Kurven angegeben wird.

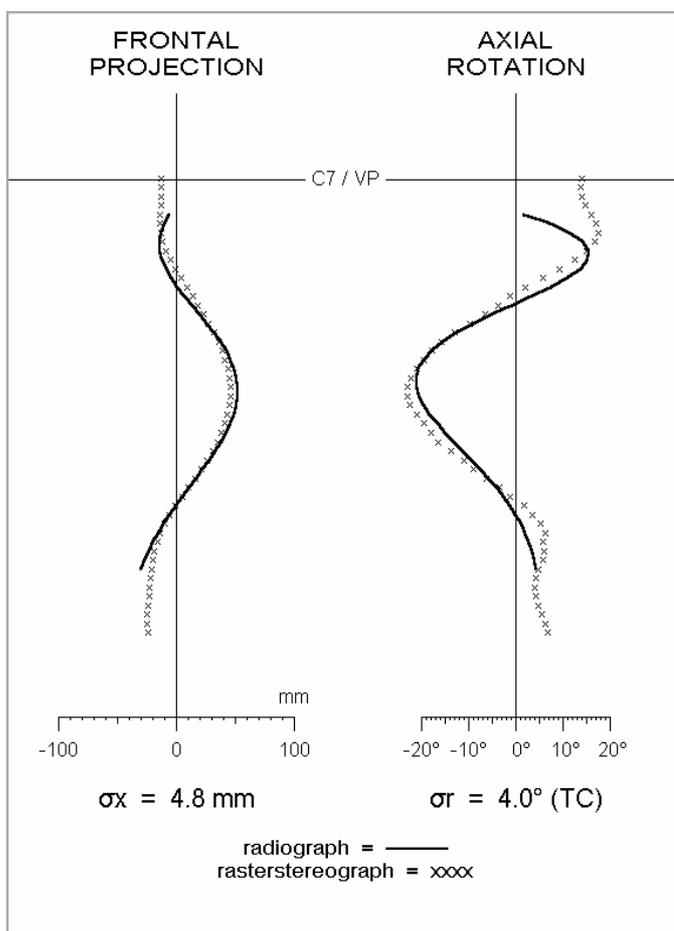


Abbildung 6

Vergleich rasterstereografischer (x) und radiografischer (-) Kurven durch Überlagerung und Berechnung des rms für die Translation (4,8mm) und Wirbelrotation (4°) als Maß für die Genauigkeit der Rasterstereografie im Vergleich zum digitalisierten Röntgenbild.

Die Genauigkeit der Kurvenübereinstimmung wird als RMS-Seitabweichungsdifferenz der Wirbelsäulenmittellinien der Frontalprojektion ( $\sigma_x$  in mm) bzw. als RMS-

Rotationsdifferenz der RSG-Oberflächenrotationskurve und der „vertebral rotation“ Kurve ( $\sigma_{ro}$  in  $^{\circ}$ ) angegeben. Sie ist die mittlere, quadratische Abweichung (root mean square = RMS) der Kurvenpaare. Diese Differenzen sind im Sinne der gemittelten Kurvenabweichung als ein Maß für die Genauigkeit der RSG im Vergleich zur radiometrischen Kurve zu verstehen. Zur optimalen Kurvenüberlagerung ist eine kranio-kaudale Verschiebung der Kurven um maximal 30mm, also einem Bewegungssegment entsprechend, erlaubt (35, 36). Dies dient dem Ausgleich der anatomischen Lagebeziehungen, da die Rasterstereografie als Fixpunkt auf den Dornfortsatz des Vertebra prominens angewiesen ist, der nicht genau mit der Position des Wirbelkörpers übereinstimmt.

In den vorangegangenen Studien ist insbesondere die Untersuchung von Drerup und Hierholzer zu erwähnen, in welcher fast 500 Bildpaare von Skoliosen bis  $50^{\circ}$  nach Cobb verglichen wurden. Es kam hierbei zu einem mittleren Fehler (RMS) von  $\sigma_{ro}=3^{\circ}$  für die Rotationskurven und  $\sigma_x=4$  mm für die Translationen (15, 16). In anderen Studien ergaben sich ähnliche Ergebnisse: Hackenberg beschrieb 2003 (28, 30) etwas größere Differenzen ( $\sigma_{ro}=4,6^{\circ}$  und  $\sigma_x=6,2$ mm), untersuchte allerdings auch höhergradige Skoliosen mit Cobb-Winkeln über  $50^{\circ}$ . In gleicher Studie wurden zusätzlich noch 112 Kurvenvergleiche von 48 Patienten nach vorderer Korrekturoperation durchgeführt. Hier konnten Differenzen von  $\sigma_x=3,4$ mm und  $\sigma_{ro}=3,2^{\circ}$  beschrieben werden. Diese Differenzen sind als sehr gering zu betrachten und belegen die Genauigkeit der Rasterstereografie. Die Unterschiede zwischen röntgenologisch bestimmter Wirbelsäule und rasterstereografischer Rekonstruktion liegen sogar unterhalb der Reproduzierbarkeit der bestimmenden Parameter wie z.B. dem Cobb-Winkel.

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse der Kurvenüberlagerung als Durchschnittswert für jeden untersuchten Patienten in der Einzelfallanalyse sowie für die Gesamtgruppe in Kap. 5 dargestellt. Der Durchschnittswert errechnet sich dabei wie folgt aus den Abweichungen der Einzeluntersuchungen:

$\sigma_x$  ist die Wurzel aus dem Quotienten der Quadratsummen aller Streuungen und der Anzahl der Untersuchungen. Dies gilt für die Rotation und die Translation.

## 2.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit den Programmen Microsoft Excel für Windows und SPSS durchgeführt. Um den Zusammenhang zwischen den zu untersuchenden Parametern zu bestimmen, wurden das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  und der Standardfehler SF im Sinne einer linearen Regression ermittelt. Als Signifikanzniveau galt  $p < 0,05$  bzw.  $p < 0,005$  für einen signifikanten bzw. hochsignifikanten Zusammenhang. Desweiteren werden die jeweiligen Regressionskoeffizienten  $b$  und Standardfehler SD der einzelnen Parameter über der Zeit als Wert für die Progredienz angegeben. Der Koeffizient  $b$  gibt dabei die Steigung der Regressionsgeraden über die Zeit an. Die Darstellung der Ergebnisse anhand von Tabellen und Grafiken erfolgte ebenfalls durch das Programm Excel.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Einzelfallanalysen

Im Folgenden werden für die 16 Versuchspersonen (VP1-VP16) alle relevanten Parameter im zeitlichen Verlauf dargestellt, sowie die entscheidenden radiologischen und rasterstereografischen Veränderungen analysiert.

Anhand von zwei 2 Grafiken pro Patient werden die radiologischen (rot/orange) und rasterstereografischen (schwarz/grau) Werte für die Translation und die Rotation in Relation zum Cobb-Winkel (blau) dargestellt. Nach einer kurzen Beschreibung der Skolioseform, des Verlaufs und etwaiger Besonderheiten, werden die radiologischen und rasterstereografischen Parameter der Translation und der Rotation mit der Veränderung des Cobb-Winkels verglichen. Es wird dargestellt, ob die Parameter aus der Oberflächenvermessung der Entwicklung der gleichnamigen Röntgenparameter qualitativ und quantitativ entsprechen. Die Korrelationen und Standardfehler der untersuchten Parameter sind den zugehörigen Tabellen zu entnehmen (vgl. auch Kap. 2.5). Nach Beschreibung der Progredienzen folgt eine kurze Zusammenfassung im Hinblick auf die Genauigkeit der rasterstereografischen Beurteilung im Vergleich zu den Röntgenaufnahmen. Die

Ergebnisse der Kurvenüberlagerungen werden in einer Tabelle als mittlere quadratische Abweichung pro Patient dargestellt.

VP 1:

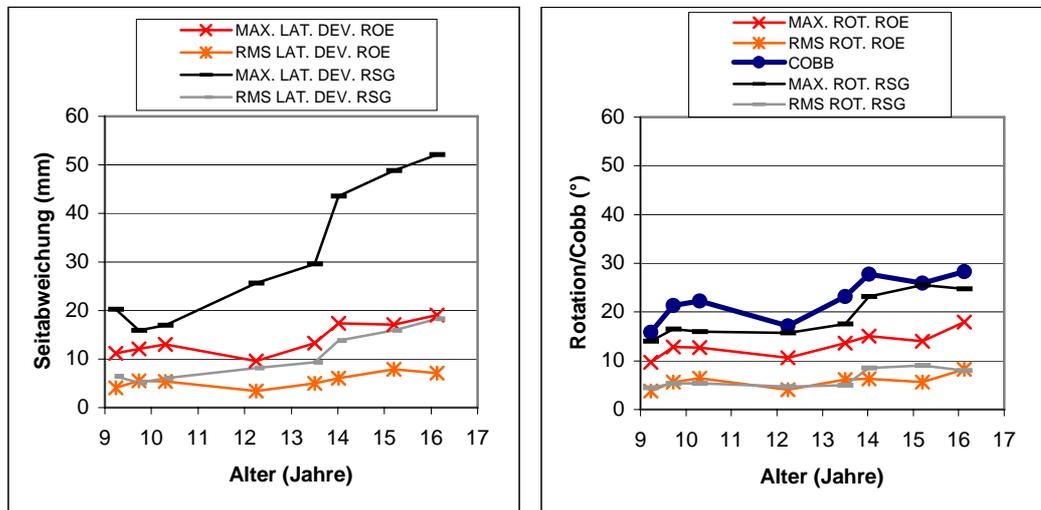


Abbildung 7

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP1

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
r <sup>2</sup>	0,62*	0,64*	0,79**	0,73*	0,89**	0,73*	0,90**	0,75*
SD	9,73	3,24	2,26	1,05	1,21	0,83	0,89	0,76
b	5,35	1,81	1,58	0,56	1,04	0,37	0,78	0,33
SF	0,72	0,25	0,33	0,19	0,32	0,17	0,25	0,18

Tabelle 1

Lineare Regressionen (r<sup>2</sup>, SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm/Jahr bzw. °/Jahr, SF in mm bzw. °) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,4°/Jahr; SF=0,4°) für VP1 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,77*	0,55*	0,68*	0,30
SD	7,60	3,60	2,79	1,70

Tabelle 2

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP1 zueinander.

Die 8 Aufnahmepaare liegen in einem Beobachtungszeitraum von ca. 7 Jahren. Es handelt sich um eine linkskonvexe Lumbalskoliose mit geringer thorakaler Gegenkrüm-

mung (King I), welche eine nahezu kontinuierliche Zunahme des Cobb-Winkels von 15° auf 28° aufweist. Bei der 4. und 7. Röntgenaufnahme wurde jeweils ein Brettgleich von 0,5 cm links verwendet, womit sich die scheinbare Besserung der Röntgenparameter zu diesen Zeitpunkten erklären lässt. Für alle übrigen Messungen wurden keine Ausgleichsmaßnahmen dokumentiert.

Die zum 3. Bildpaar gehörige Röntgenaufnahme fand 5 Monate (28.03.95 gegen 26.08.95) nach der RSG-Analyse statt. Da allerdings bei allen Parametern die Veränderungen vom 2. zum 3. Messpunkt minimal ausfallen, dürfte dieses Problem vernachlässigbar gering sein.

Lineare Regressionen:

Schon auf den ersten Blick fällt der annähernd parallele Verlauf insbesondere der radiologischen, aber auch der rasterstereografischen Parameter zu dem Cobb-Winkel auf. Die Korrelationen zwischen Cobb-Winkel und den anderen radiologischen Merkmalen sind alle signifikant und liegen zwischen  $r^2=0,72$  und  $r^2=0,89$ .

Bedenkt man den Einfluss des Beinlängenausgleichs an den beiden Aufnahmen, so scheinen gerade die rotatorischen RSG-Werte den klinischen Verlauf des Cobb-Winkels gut wiederzugeben. Diese zeigen eine hohe Übereinstimmung zu dem Cobb-Winkel. Die vorübergehenden radiologisch gemessenen Befundverbesserungen zu den Untersuchungszeitpunkten 4 und 7 liegen in der Verwendung des Beinlängenausgleichs begründet und sind deshalb auch nicht rasterstereografisch wiederzufinden. Die RSG-Translationen zeigen ein analoges Verhalten, auch wenn die maximale Seitabweichung übermäßig ansteigt. Dies bestätigt sich auch in der statistischen Auswertung. Hier konnten für alle Korrelationen zwischen Cobb und Translations/Rotationsparameter signifikante Zusammenhänge nachgewiesen werden (Tabelle 1).

Ebenfalls signifikant fiel der Vergleich der rasterstereografischen und röntgenologischen Translations/Rotationswerte (Tabelle 2) untereinander aus, allerdings mit Ausnahme der gemittelten Rotationswerte. Trotz eines geringen Korrelationskoeffizienten von  $r^2=0,3$  ist rein deskriptiv eine gute Übereinstimmung zu erkennen, u. a. im Vergleich der Anfangs- und Endwerte. Die RSG-Parameter liegen, was die absoluten Werte betrifft, etwas höher. Hier wären besser übereinstimmende Ergebnisse zu erwarten gewesen, wenn alle Untersuchungen unter gleichen Bedingungen bezüglich des Beinlän-

genausgleichs durchgeführt worden wären, da sich die Verlaufsunterschiede zwischen rasterstereografischen und radiologischen Werten insbesondere an den Bildpaaren 4 und 7 manifestieren.

**Progredienzen:**

Die Progredienz des Cobb-Winkels liegt mit 1,4° pro Jahr von 15° auf 28° im unteren Durchschnitt der Untersuchungsgruppe.

Auffällig ist bei VP 1 die Entwicklung der RSG-Seitenauslenkung vor allem der Maximalwerte. Mit einer durchschnittlichen Steigerung von 5,3 mm pro Jahr auf insgesamt 52 mm (Ausgangswert ca. 20 mm) ist dieser der höchste der Studiengruppe. Dennoch ist der Zusammenhang zwischen der Translation aus der RSG und der Röntgendiagnostik mit  $r^2=0,77$  ( $p<0,005$ ) für die Maxima und  $r^2=0,55$  ( $p<0,04$ ) für die Mittelwerte gut nachzuweisen. Die Progredienzen der radiologischen Translationen liegen aber deutlich unter denen der Rasterstereografie.

Die Progredienzen der RSG-Rotationen (1,58 bzw. 0,56 mm pro Jahr) sind ca. doppelt so hoch wie die der gleichnamigem Röntgenparameter (0,78 bzw. 0,33 mm pro Jahr).

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
8	2,67	2,2

Tabelle 3

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP1.

Insgesamt fällt im Fall VP 1 der Vergleich zwischen den Bildpaaren im Verlauf sowohl in Bezug auf die Korrelationsanalyse zwischen dem Cobb-Winkel als Goldstandard und den einzelnen Variablen, als auch für die gleichnamigen Parameter untereinander sehr zufriedenstellend aus. Es konnten mit Ausnahme der Korrelation zwischen den gemittelten Rotationsverläufen signifikante, z.T. sehr hohe Zusammenhänge nachgewiesen werden. Die positiven Ergebnisse der Kurvenüberlagerung mit  $\sigma_x=2,67$ mm und  $\sigma_{ro}=2,2^\circ$  unterstreichen dies. Die RSG-Progredienzen liegen allerdings deutlich über den radiologisch ermittelten, vor allem bei den Translationen. Bei diesem Patienten bestand also keine Gefahr einer Unterschätzung der Progredienz, es zeigte sich für die maximale RSG-Translation ein falsch positives RSG Ergebnis, die weiteren RSG-Parameter geben ein klinisch exaktes Bild der Pathologie wieder.

VP 2:

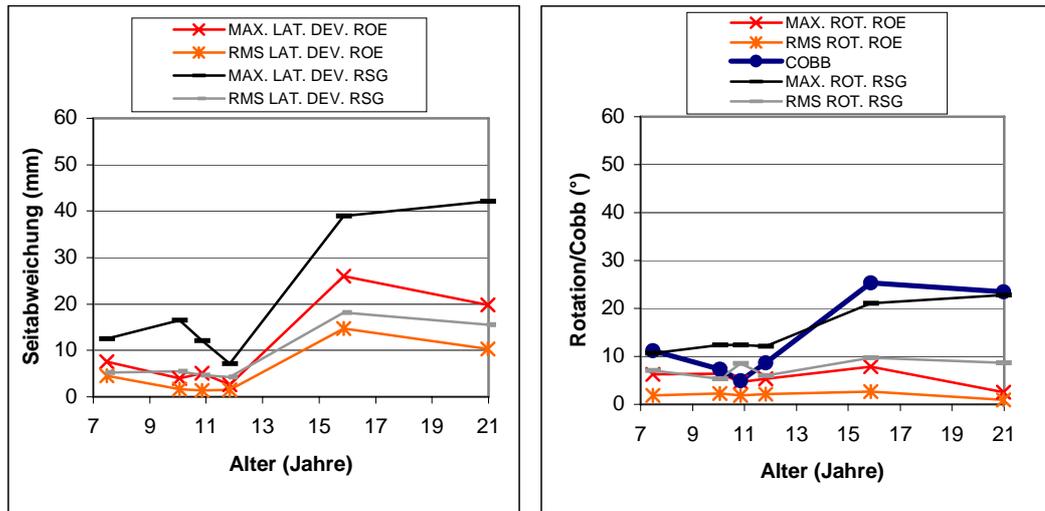


Abbildung 8

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP2.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,88*	0,94**	0,86*	0,45	0,94**	0,95**	0,0	0,03
SD	5,89	1,67	2,22	1,39	2,76	1,36	2,02	0,64
b	2,70	1,06	1,02	0,21	1,50	0,82	-0,19	-0,06
SF	0,77	0,36	0,17	0,14	0,66	0,41	0,16	0,05

Tabelle 4

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,44°/Jahr; SF=0,54°) für VP2 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
$r^2$	0,89*	0,95**	0,06	0,01
SD	5,62	1,54	5,66	1,88

Tabelle 5

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP2 zueinander.

VP 2 weist eine Verlaufskontrolle von fast 15 Jahren mit 6 Bildpaaren auf. Der Cobb-Winkel der rechtskonvexen thorakalen Skoliose (King III) stieg nach einer anfänglichen Besserung von 11° auf 5° auf insgesamt ca. 25° an. Die Röntgenaufnahmen 2 und 4 wurden mit einem Brettausgleich von 0,5cm bzw. 1cm auf der linken Seite durchgeführt. Alle anderen Aufnahmen wurden ohne Korrekturen der Beinlänge vorgenommen.

Lineare Regressionen:

In den Röntgenaufnahmen imponiert die Zunahme des Cobb-Winkels zum 5. Untersuchungszeitpunkt von ca.  $10^\circ$  auf  $25^\circ$ , welcher im anschließenden Verlauf eher konstant bleibt. Die translatorischen Röntgenmerkmale zeigen den gleichen Verlauf, die Korrelationskoeffizienten zu dem Cobb-Winkel sind mit  $r^2=0,94$  (max),  $p<0,002$  und  $r^2=0,95$  (rms),  $p<0,0001$  jeweils hochsignifikant. Die Wirbelrotation bleibt dagegen konstant. Die leichten Veränderungen bleiben im Bereich des Standardfehlers. Demzufolge lassen sich auch keine sinnvollen Zusammenhänge zwischen dem Cobb-Winkel und der Wirbelkörperrotation nachweisen ( $r^2=0,0$  für gemittelte und maximale Rotation). Dieser Befund einer hohen Translation und geringen Rotation ist typisch für einbogige Skoliosen.

Die Ergebnisse der RSG beschreiben für die Translation im Vergleich zum Cobb-Winkel eine nahezu identische Entwicklung. Nach einer anfänglichen Befundverbesserung bis zur 4. Messung kommt es zu einem deutlichen Anstieg von rund 10 auf 40mm (max) bzw. ca. 5mm auf 18mm für die gemittelte Seitenauslenkung. Auch hier bestätigen Koeffizienten von  $r^2=0,88$  (max) und  $r^2=0,94$  (rms) mit p-Werten jeweils kleiner 0,006 den bereits visuell erkennbaren Zusammenhang zu dem Cobb-Winkel auf einem sehr hohen Niveau. Auch der Zusammenhang der RSG/ Röntgen-Translationen untereinander ist mit  $r^2=0,89$ ;  $p<0,005$  für die Maxima, sowie  $r^2=0,95$ ;  $p<0,0001$  für die gemittelten Seitabweichungen hochsignifikant.

Etwas anders sieht die rasterstereografische Einschätzung der Rotation aus. Die maximale RSG-Rotation folgt eher dem Verlauf des Cobb-Winkels als der röntgenologisch erfassbaren Rotation. So gibt es mit  $r^2=0,86$  eine hohe, signifikante ( $p=0,008$ ) Korrelation zu dem Cobb-Winkel und mit  $r^2=0,06$  keinen Zusammenhang zum gleichnamigen radiologischen Wert. Die mittlere Rotation zeigt analog der RMS-Röntgenrotation einen relativ konstanten Verlauf.

Eine mögliche Ursache des Abweichens der radiologischen Rotationen wird in Abbildung 9 anschaulich. Vergleicht man die Kurven „vertebral rotation“ miteinander, so fällt auf, dass die rechts- und linksrotatorischen Extremwerte in den ersten Untersuchungen von der Glättungskurve annähernd erfasst werden. Bei der letzten Untersuchung werden die Extremwerte jedoch durch die Glättungskurve (vgl. Kap. 2.3) aufgehoben, und somit die eigentliche Wirbelkörperrotation unterschätzt. Es ist sehr unwahr-

scheinlich, dass die Fehlrotation im Verlauf abnimmt und gleichzeitig der Cobb-Winkel und die Translation zunehmen.

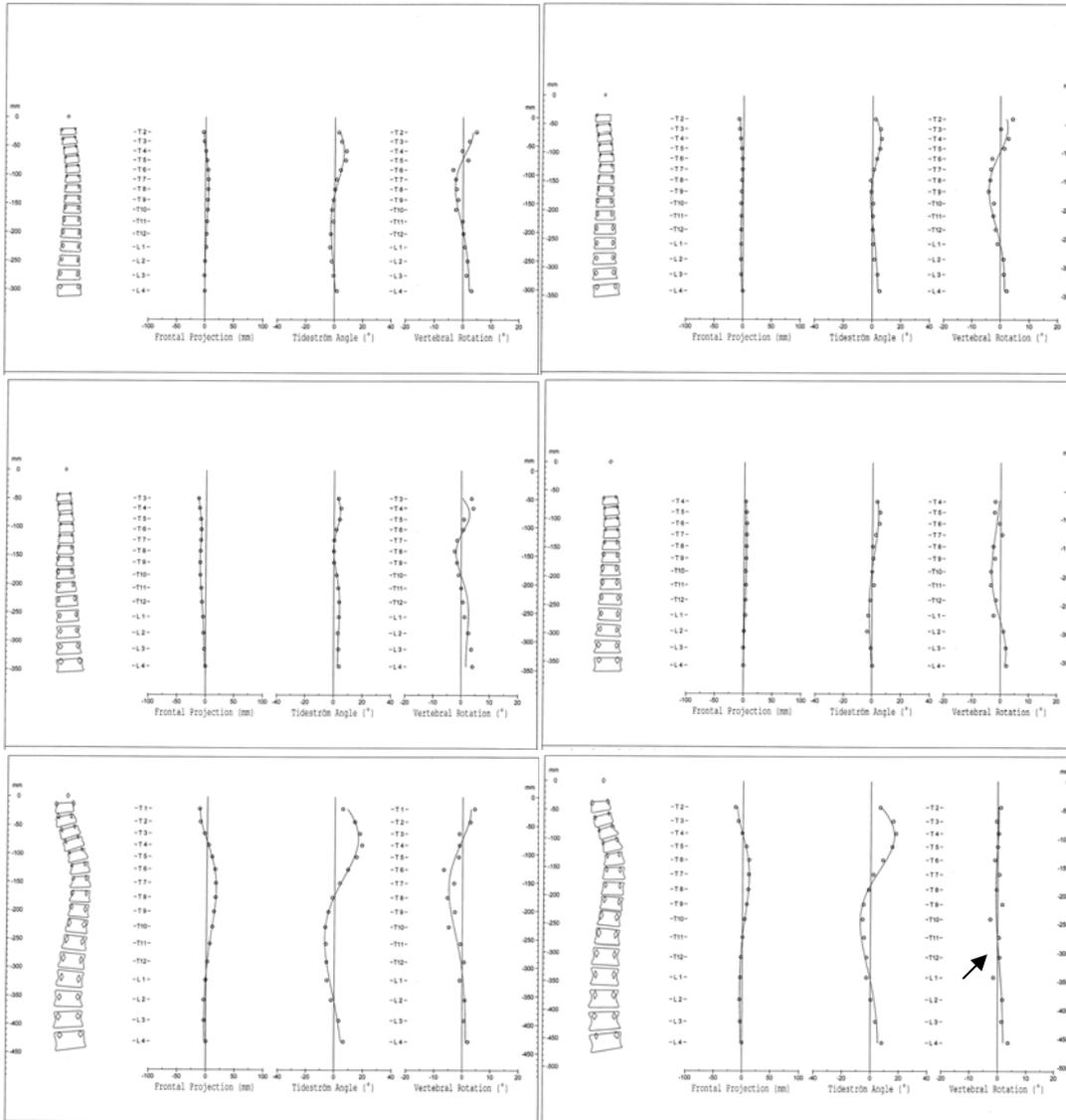


Abbildung 9 a-f

Radiologisch bestimmter Verlauf von VP2. Die Glättungskurve der Vertebral Rotation in der letzten Untersuchung ergibt eine Unterschätzung der Wirbelkörperrotation durch Effekte der Glättungskurve und Meß/Übertragungsfehler.

### Progredienzen:

Der mittlere Zuwachs des Cobb-Winkels liegt mit  $1,44^\circ$  pro Jahr im unteren Durchschnitt. Diesem Trend folgen die Werte der radiologischen Translation (max. Seitabweichung bei  $1,5\text{mm}/\text{Jahr}$ ; gemittelte bei  $0,82\text{mm}/\text{Jahr}$ ). Überproportional hoch liegen

wiederum die Progredienzen der maximalen RSG-Translation (2,7mm/Jahr). Die gemittelte Translation weicht kaum von der radiologischen ab (1,06mm/Jahr).

Die Entwicklung der Rotation fällt im Vergleich der radiologischen und rasterstereografischen Messungen sehr unterschiedlich aus. Während die RSG-Rotationen (1,02°/Jahr und 0,21°/Jahr) eine den übrigen Parametern analoge Zustandsverschlechterung ausweisen, liegen die aus den digitalisierten Röntgenbildern errechneten Verläufe bei -0,19°/Jahr (SF=0,16) für die maximale, und -0,06°/Jahr (SF=0,05) für die gemittelte Rotation. Als Ursache für die fehlende Progredienz ist die oben bereits angeführte Unterschätzung der Rotation in der letzten Untersuchung zu berücksichtigen.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
6	2,31	2,47

Tabelle 6

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP2.

Auch bei VP 2 lassen sich die radiologische und rasterstereografische Vermessung der Skoliose gut miteinander vergleichen. Insbesondere die translatorischen Parameter zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung sowohl im Vergleich Röntgen zu RSG als auch in Bezug auf den Cobb-Winkel. Die rasterstereografischen Progredienzen liegen deutlich höher. Die Rasterstereografie konnte alle entscheidenden Veränderungen der Wirbelsäulenform analog der Röntgenaufnahmen darstellen, die Ergebnisse der Kurvenüberlagerungen zeigen einen sehr geringen Unterschied zwischen den Verfahren.

VP 3:

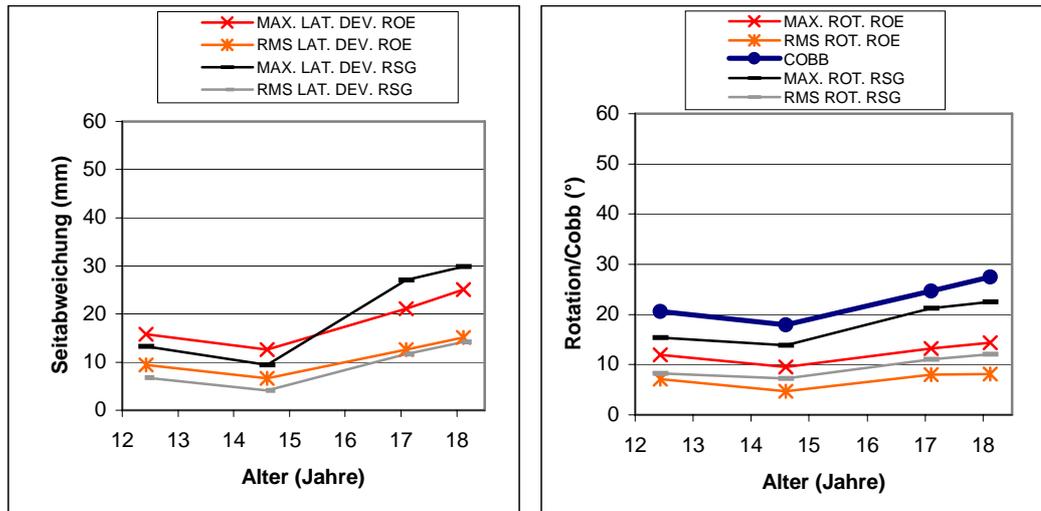


Abbildung 10  
Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP3.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,96*	1,0**	0,96*	0,98*	1,0**	1,0**	0,94*	0,80
SD	2,33	0,29	0,99	0,36	0,23	0,30	0,60	0,86
b	3,44	1,48	1,46	0,76	1,77	1,13	0,54	0,32
SF	1,37	0,71	0,56	0,31	0,87	0,65	0,43	0,37

Tabelle 7

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,35°/Jahr; SF=0,68°) für VP3 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
$r^2$	0,96*	0,99*	0,87*	0,77
SD	2,56	0,6	1,88	1,33

Tabelle 8

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP3 zueinander.

Bei VP 3 wurden über einen Zeitraum von ca. 6 Jahren 4 Bildpaare als Verlaufskontrolle durchgeführt. Nach einem anfänglichen, leichten Rückgang der thorakolumbalen, rechtskonvexen Skoliose (King IV) nahm der Cobb-Winkel stetig um insgesamt 10° auf 27° zu.

Lineare Regression:

In diesem Fall entsprechen alle RSG- und Röntgenparameter dem bereits oben geschilderten Verlauf des Cobb-Winkels. So ließen sich sehr hohe, signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen dem Cobb-Winkel und den einzelnen Parametern errechnen ( $r^2$  zwischen 0,94 und 1,0;  $p < 0,05$ ). Ausnahme ist lediglich die mittlere Rotation aus der Röntgenanalyse. Hier ist trotz eines mit  $r^2=0,8$  sehr hohen Korrelationskoeffizienten keine Signifikanz nachweisbar ( $p=0,10$ ). Die Ursache liegt darin, dass nur 4 Bildpaare vorliegen.

Der Vergleich der gleichnamigen Parameter untereinander fiel ebenfalls sehr eindeutig aus. Mit  $r^2=0,96$  (maximale Translationen),  $r^2=0,99$  (gemittelte Translationen) und  $r^2=0,87$  für die maximalen Rotationen ließen sich signifikante, hohe Zusammenhänge ( $p < 0,05$ ) nachweisen. Die gemittelten Rotationen zeigen zwar ebenfalls mit  $r^2=0,77$  einen hohen Zusammenhang, allerdings kann keine Signifikanz belegt werden ( $p=0,12$ ), wahrscheinlich aus o.g. Grund. Die RSG-Rotationen fallen höher aus.

Progredienz:

Die Zunahme des Cobb-Winkels liegt mit  $1,4^\circ$  pro Jahr im Durchschnittsbereich. Die radiologischen und rasterstereografischen Translationen und Rotationen zeigen übereinstimmend eine eindeutige Progredienz, die rasterstereografisch etwas höher ausfällt.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ ( $^\circ$ )
4	1,81	1,77

Tabelle 9

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP3.

In diesem Fall ließen sich hervorragende Korrelationen nachweisen. Alle berechneten Parameter zeigen einen quantitativ ähnlichen Verlauf. Generell sind auch bei VP 3 die rasterstereografisch ermittelten Werte höher als die korrespondierenden Röntgenparameter. Auch bei Betrachtung der Progredienzen fallen diese höher aus.

Die rasterstereografisch ermittelten Werte sind hier in vollem Umfang zur Einschätzung der Skoliose und der Progredienz geeignet, welches sich in sehr hoher Übereinstimmung der Kurvenüberlagerung ausdrückt.

VP 4:

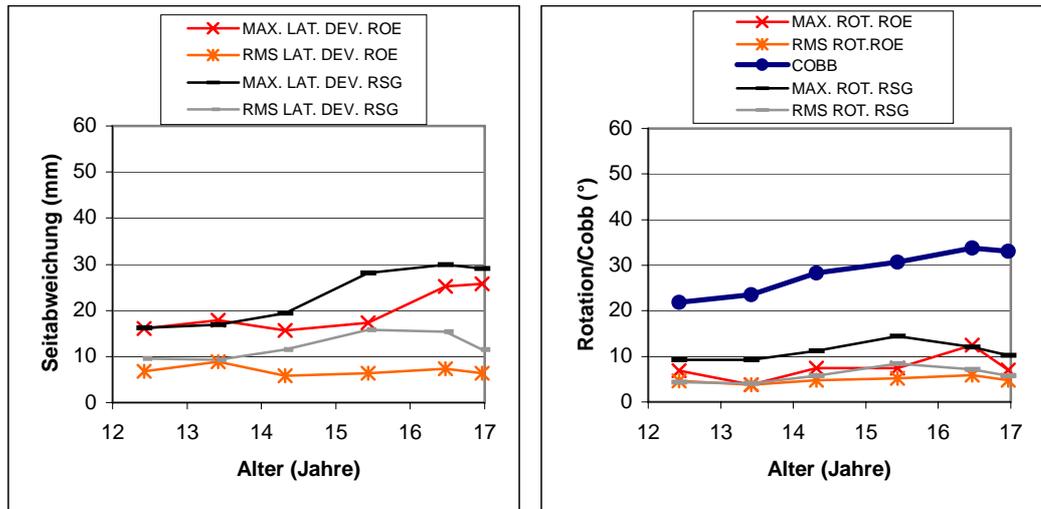


Abbildung 11

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP4.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,91*	0,58	0,37	0,58	0,57*	0,15	0,46	0,59
SD	2,21	2,06	1,80	1,19	3,4	1,10	2,32	0,48
b	3,46	1,07	0,57	0,62	2,2	-0,18	0,91	0,26
SF	0,55	0,60	0,50	0,34	0,39	0,29	0,66	0,14

Tabelle 10

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=2,74°/Jahr; SF=0,28°) für VP4 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
$r^2$	0,59*	0,51	0,24	0,65
SD	4,6	0,84	1,98	1,09

Tabelle 11

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP4 zueinander.

Die doppelbogige, lumbal betonte Skoliose (King I) zeigt bei einer Verlaufsbeobachtung von viereinhalb Jahren ein Ansteigen des Cobb-Winkels um ca. 10°. Bei einer Beinlängendifferenz von 1,5cm ist lediglich ein Beinlängenausgleich bei der ersten Röntgenaufnahme dokumentiert.

Lineare Regression:

Der Cobb-Winkel nimmt im Beobachtungszeitraum stetig von 22° auf 33° zu. Im Vergleich zu den radiologischen Translationen und Rotationen ergeben sich folgende Ergebnisse: ein Anstieg der Werte der maximalen Lateraldeviation von ca. 17mm auf ca. 26mm ist ab der 5. Aufnahme zu erkennen, welche dann anschließend in diesem Bereich verbleibt. Im Vergleich zum Cobb-Winkel konnten keine signifikanten Korrelationen nachgewiesen werden. Die maximale Seitenauslenkung zeigt mit  $r^2=0,57$  ( $p=0,08$ ) einen mittleren, nicht signifikanten Zusammenhang zum Cobb-Winkel. Die RMS-Translation bleibt im Verlauf konstant, die Schwankungen liegen im Bereich des Standardfehlers.

Für die gemittelte Rotation gilt mit  $r^2=0,6$  ( $p=0,07$ ) ähnliches wie für die maximale Translation. Allerdings sind bei der gemittelten Rotation die Werte zu Beginn und zum Ende der Untersuchung fast identisch (4,6° und 4,8°). Die maximale Rotation zeigt nur Schwankungen im Bereich des Standardfehlers.

Die lichteoptische Vermessung zeigt ein analoges Verhalten. Auch hier ist die maximale Translation am ehesten geeignet, die Entwicklung des Cobb-Winkels wiederzuspiegeln. Mit  $r^2=0,9$  ( $p<0,004$ ) lässt sich sogar ein sehr deutlicher, hochsignifikanter Zusammenhang nachweisen.

Die gemittelte Seitenauslenkung und die gemittelte Rotation zeigen mit  $r^2=0,58$  ( $p=0,08$ ) eine Tendenz zum Cobb-Winkel. Bei beiden Parametern kommt es auch bis zur vorletzten Untersuchung zu einer Befundverschlechterung, die sich aber in der letzten Untersuchung nicht mehr bestätigt. Die maximale Rotation steigt zwar bis zum vierten Untersuchungszeitpunkt an, fällt dann aber wieder fast auf den Ausgangswert ab. Statistisch ist kein Zusammenhang zu belegen.

Im direkten Vergleich der RSG/ Röntgenparameter bestätigt sich das oben Beschriebene. Die maximalen Seitabweichungen ( $r^2=0,59$ ;  $p=0,07$ ) und die gemittelten Rotationen ( $r^2=0,65$ ;  $p=0,05$ ) bieten die stärksten Korrelationen, die jeweils nur knapp an der 5% Signifikanzgrenze scheitern, aber sicherlich dennoch einen Zusammenhang andeuten. Der Vergleich der übrigen Parameter zeigt keine Zusammenhänge ( $r^2=0,5$ ;  $p=0,1$  für die gemittelten Translationen und  $r^2=0,2$ ;  $p=0,3$  für die maximalen Rotationen).

Progredienzen:

Eindeutige Progredienzen lassen sich bei den maximalen Seitabweichungen (3,46mm/Jahr, SF=0,55 für RSG und 2,2mm/Jahr, SF=0,7 für Röntgen) und dem Cobb-Winkel (2,74°/Jahr, SF=0,28) ermitteln. Die gemittelten Rotationen deuten eine Progredienz an (0,62°/Jahr, SF=0,34 für RSG und 0,26°/Jahr, SF=14 für Röntgen), die Streuung der Werte ist aber so hoch, dass diese nicht überschätzt werden sollte. Bei den übrigen Parametern liegen die Standardfehler recht hoch bei geringen Steigungen, so dass kaum Progredienzen festgestellt werden können. Für die gemittelten Translationen und die maximalen Rotationen kann einheitlich für RSG und Röntgen ein Verbleib auf einem Niveau konstatiert werden.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
6	2,17	1,56

Tabelle 12

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP4.

Zusammenfassend für VP 4 lässt sich feststellen, dass die Entwicklung des Cobb-Winkels sehr gut von der maximalen Seitabweichung der RSG und annähernd von der Röntgenanalyse erfasst werden konnte. Entsprechend sind auch die Korrelationen zwischen dem Cobb-Winkel und den beiden Parametern, sowie zwischen den gleichnamigen Translationsverläufen gut bis zufrieden stellend und somit für die Beurteilung von VP 4 geeignet. Die übrigen Parameter deuten allenfalls Progredienzen und Korrelationen zum Cobb-Winkel an, da sie aber sehr hohe Streuungen aufweisen, ist hier von einer Befundkonstanz auszugehen. Positiv ist, dass auch hier eine Konsistenz innerhalb der direkt vergleichbaren RSG/Röntgenwerte gewahrt ist, nämlich eindeutige Progredienzen bei den maximalen Seitauselenkungen, angedeutet bei beiden gemittelten Rotationen und übereinstimmend keinerlei Verlaufsveränderung bei den gemittelten Translationen und den maximalen Rotationen. Die Ergebnisse der Kurvenüberlagerungen sind sehr positiv zu bewerten. Mit  $\sigma_x=2,17\text{mm}$  und  $\sigma_{ro}=1,56^\circ$  sind nur sehr geringe Abweichungen zwischen den Wirbelsäulenrekonstruktionen beider Verfahren zu finden.

VP 5:

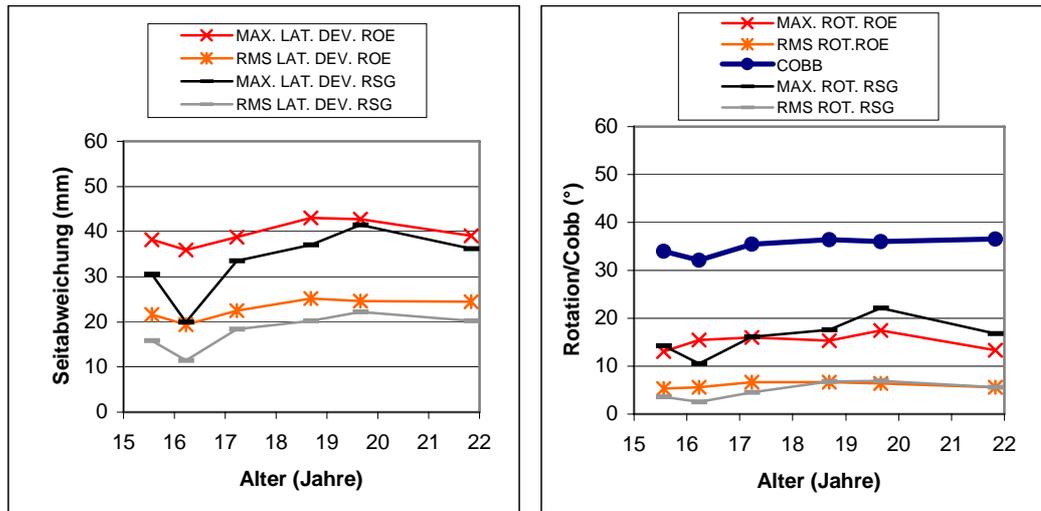


Abbildung 12

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP5.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,86*	0,92**	0,68*	0,81*	0,62	0,93**	0,01	0,28
SD	3,06	1,25	2,41	0,86	1,92	0,66	1,87	0,58
b	2,11	1,22	1,03	0,55	0,6	0,72	0,04	0,05
SF	1,19	0,56	0,64	0,26	0,52	0,31	0,36	0,13

Tabelle 13

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm/Jahr bzw. °/Jahr, SF in mm bzw. °) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=0,58°/Jahr; SF=0,23°) für VP5 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
$r^2$	0,77*	0,91**	0,21	0,40
SD	3,97	1,28	3,80	1,54

Tabelle 14

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP5 zueinander.

VP 5 wurde wegen einer einbogig rechtskonvexen, tiefen Thorakalskoliose mit Apex bei Th 11 auffällig. Bis auf eine Zunahme des Cobb-Winkels von 32° auf 36° von der zweiten zur dritten Aufnahme, zeigt der Verlauf über fast 7 Jahre mit 6 Bildpaaren keine weitere Progredienz.

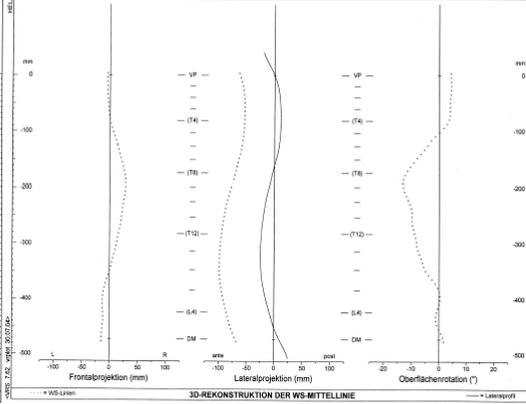
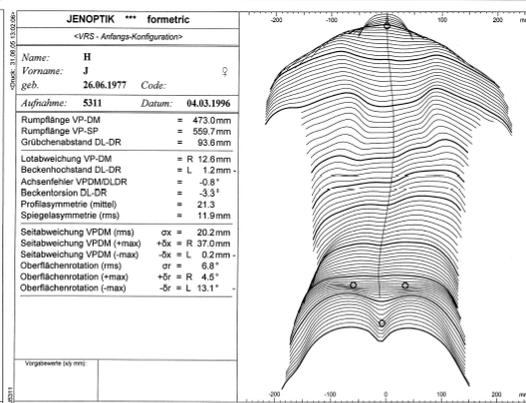
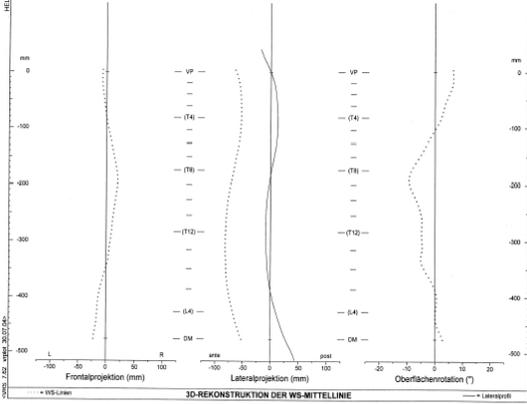
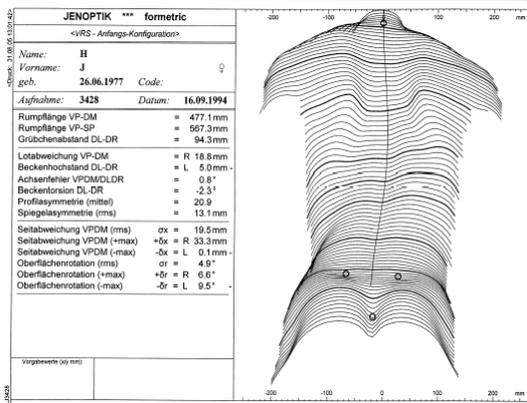
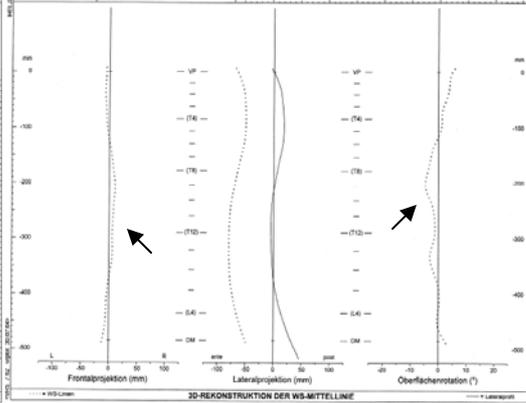
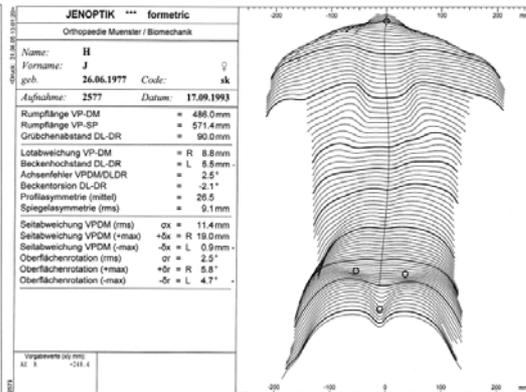
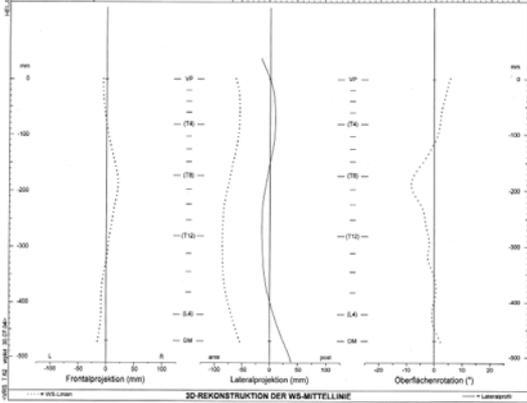
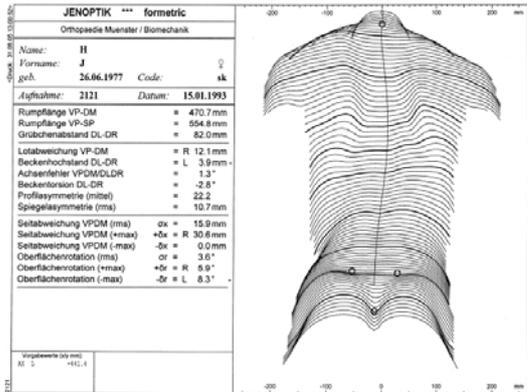
Lineare Regression:

Ähnlich dem Cobb-Winkel spiegeln auch die übrigen radiologisch erhobenen Daten den weitgehend konstanten Verlauf wieder. Während die Translationen parallel zum Cobb-Winkel die kurzzeitige Verbesserung zum 2. Untersuchungszeitpunkt wiedergeben, wird dies in der Rotationskurve nicht deutlich. Dies zeigt sich auch in den Korrelationen zwischen Cobb und den radiologischen Daten ( $r^2=0,0$  bzw.  $0,3$  für die Rotationen und  $r^2=0,62$  bzw.  $0,93$  ( $p<0,05$ ) für die maximale/gemittelte Seitabweichung).

Die rasterstereografischen Daten spiegeln allesamt den vorbeschriebenen „Knick“ zum zweiten Untersuchungszeitpunkt wieder, auch die Korrelationen zum Cobb-Winkel sind in allen Fällen signifikant. Es fällt allerdings auf, dass die Extremwerte (2. und 5. Untersuchung) sehr viel höher ausfallen. Bei Betrachtung der zugehörigen RSG-Aufnahmen (vgl. Abbildung 13) wird deutlich, dass bei der zweiten Untersuchung der Apex der Oberflächenrotationskurve im Vergleich zu den übrigen Befunden divergiert. Die Rotation konnte in dieser Untersuchung vom Computerprogramm nicht optimal analysiert werden. Die Symmetrielinie liegt zu weit medial, was eine Unterschätzung des Befundes zur Folge hat. In dieser Aufnahme wurde eine leichte Verbesserung der Fehlstatik überbewertet.

Ähnlich verhält es sich mit der vorletzten Aufnahme. Die vergleichende Betrachtung der Rotationskurven zeigt einen deutlichen Anstieg der Wirbelkörperrotation von TH 2 bis zum Vertebra prominens, der sich in dieser Form in keiner anderen Untersuchung wiederfinden lässt und dadurch der ermittelte Wert als falsch hoch angesehen werden muss.

Der Vergleich der gleichnamigen Parameter ist für die Translationen sehr zufriedenstellend ( $r^2=0,77$ ;  $p<0,05$  für die maximalen und  $r^2=0,91$ ;  $p<0,05$  für die gemittelten Seitabweichungen) und für die Rotationen entsprechend dem oben dargestellten abweichendem Verlauf der radiologischen Rotationen nicht signifikant ( $r^2=0,2$  bzw.  $0,4$ ). Rein deskriptiv zeigen die Parameter dennoch gute Übereinstimmung. Die Beträge liegen in sehr ähnlichen Bereichen. Es kommt zu geringfügigen Schwankungen bei weitgehender Befundkonstanz.



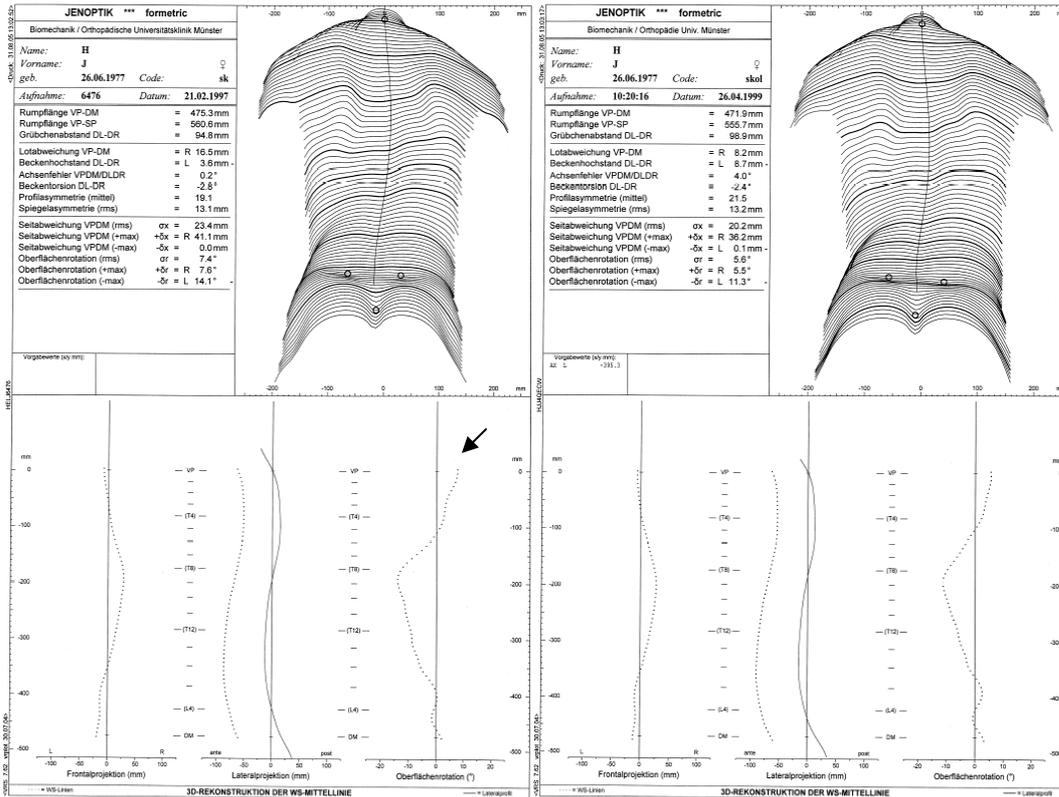


Abbildung 13 a-f

RSG-Verlauf von VP5. Bei der 2. Aufnahme liegt die Symmetrielinie zu weit medial, dadurch sind die Oberflächenrotationskurve und die Seitabweichung abgeflacht (s. Pfeile). Die Rotationskurve der 5. Aufnahme ist durch eine nur bei dieser Analyse auftretende verstärkte Rotation im obersten Segment um ca. 2° höher.

### Progredienzen:

Die Beurteilung der Progredienzen ist in diesem Fall nicht sicher durchzuführen. Radiologisch zeigt sich ab dem 3. Untersuchungstermin ein konstanter Verlauf. Die Schwankungen bis dahin werden in unterschiedlichem Ausmaß von allen Parametern mit Ausnahme der radiologischen Rotation wiedergegeben. Die Progredienz der einzelnen Parameter wird insofern ausschließlich vom Ausmaß des Minimums zur zweiten Aufnahme bestimmt und bezüglich der Seitabweichungen von einer geringen, vorübergehenden Befundverschlechterung bei der 5. Untersuchung. Hierbei sollten aber die oben bereits erwähnten Fehlerquellen berücksichtigt werden. So erklärt sich die deutlich stärkere Progredienz von 2,1mm/Jahr bei der maximalen RSG-Seitabweichung im Vergleich zu 0,6mm/Jahr in den Röntgenaufnahmen. Die Kurvenüberlagerungen der Frontalprojektionen sind mit 4,1mm relativ hoch, welches ebenfalls durch das 2. Bildpaar bedingt ist. Hier liegt die Abweichung der RSG-Analyse zur Röntgenaufnahme bei 7,01mm und ist

damit eine der höchsten der Studie. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, die automatisierten RSG-Computeranalysen durch einen erfahrenen Untersucher kontrollieren zu lassen. Dadurch wäre die Qualität der Befundung leicht zu verbessern gewesen.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
6	4,1	1,96

Tabelle 15

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP5.

Auch bei VP 5 stimmen die radiologischen und rasterstereografischen Verläufe in großen Teilen überein. Nicht nur unter Berücksichtigung der angeführten Verbesserungsmöglichkeiten konnte die RSG eine ausreichend genaue Verlaufsbeschreibung leisten.

### VP 6:

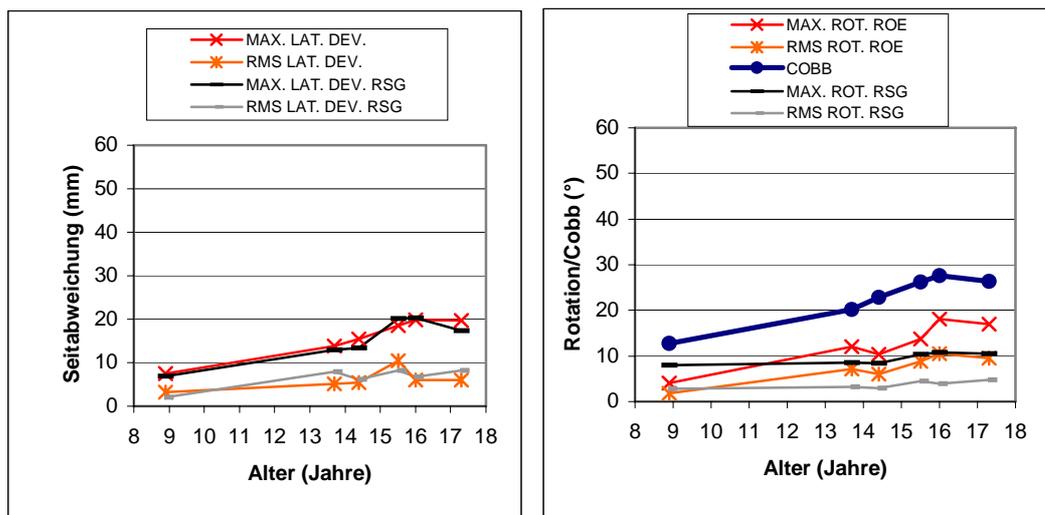


Abbildung 14

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP6.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,93**	0,68*	0,75*	0,60	0,99**	0,99**	0,89**	0,92**
SD	1,54	1,49	0,69	0,59	0,76	0,25	1,89	1,01
b	1,56	0,72	0,35	0,23	2,10	0,78	1,63	1,02
SF	0,4	0,18	0,12	0,09	0,23	0,09	0,29	0,17

Tabelle 16

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,85°/Jahr; SF=0,24°) für VP6 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,90**	0,68*	0,80*	0,62
SD	1,81	1,49	0,61	0,57

Tabelle 17

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP6 zueinander.

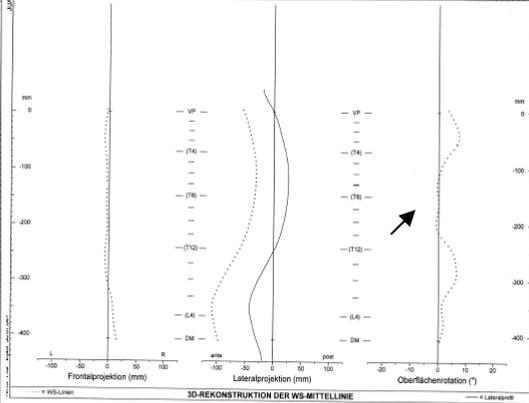
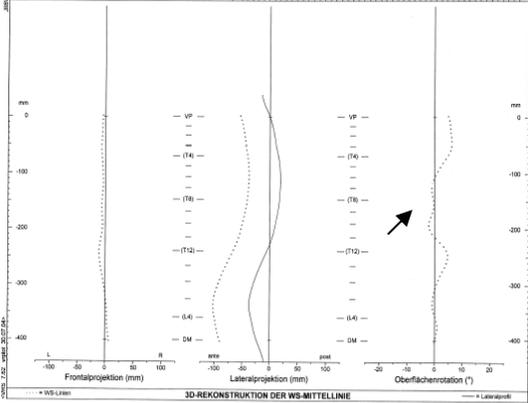
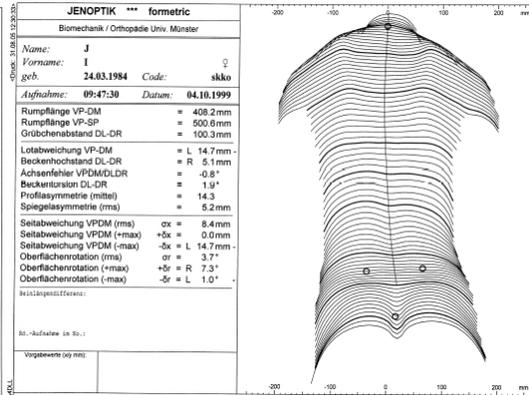
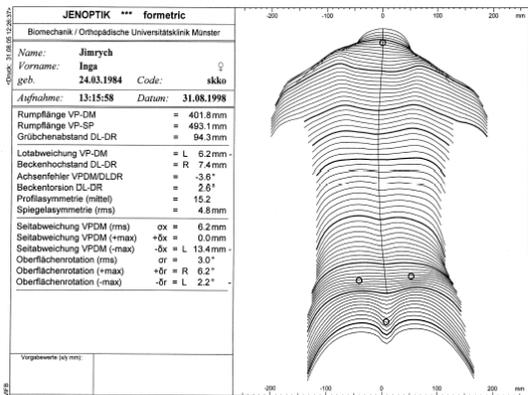
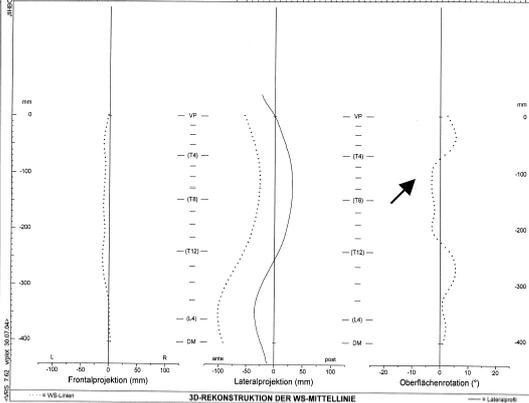
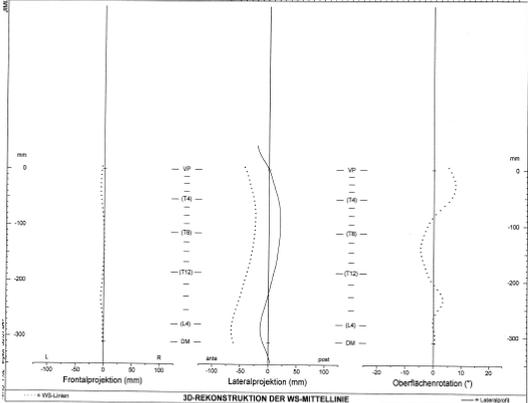
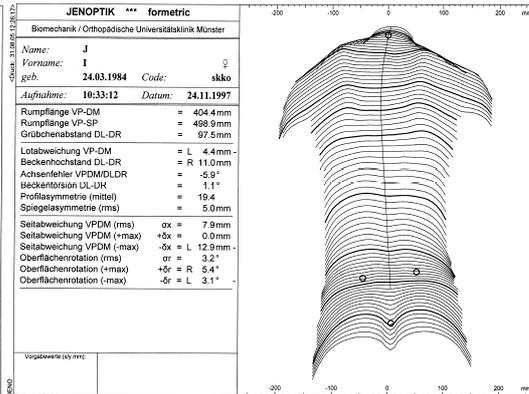
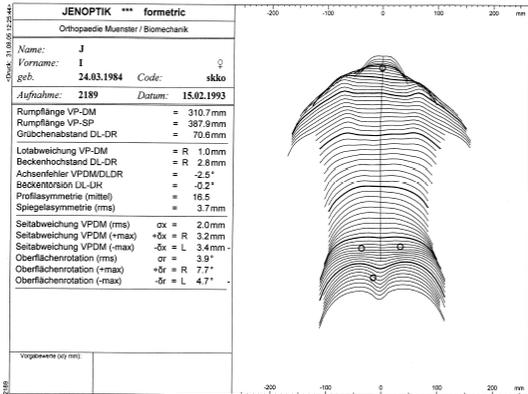
Es handelt sich um eine linkskonvexe thorakolumbale Skoliose (Apex L1) mit einer geringfügigen kompensatorischen Gegenkrümmung der Brustwirbelsäule. Es wurden sechs Bildpaare über einen Verlauf von fast 9 Jahren verglichen. Dabei kam es zu einer Zunahme des Cobb-Winkels von 12° auf 28°. Zur 2. Röntgenaufnahme liegt keine parallele RSG-Aufnahme vor, so dass eine RSG-Aufnahme, die ungefähr 6 Monate später erfolgt ist, als Vergleichspunkt gewählt werden musste.

Lineare Regression:

Beim Cobb-Winkel kommt es bis zur vorletzten Aufnahme mit ca. 16 Jahren zu einer annähernd konstanten Zunahme um insgesamt 16°. Die weiteren radiologischen Merkmale bestätigen diesen Krankheitsverlauf, welches sich in hochsignifikanten Korrelationen niederschlägt (r<sup>2</sup> zwischen 0,89 und 0,99).

Rasterstereografisch kommt es zu einer guten Übereinstimmung der Seitabweichung mit dem Cobb-Winkel sowohl deskriptiv als auch rechnerisch (r<sup>2</sup>=0,93; p<0,002 für die maximale, r<sup>2</sup>=0,68; p<0,05 für die gemittelte Seitabweichung). Die RSG-Rotationen sind deskriptiv zwar weniger progredient, dennoch ist mit r<sup>2</sup>=0,75; p<0,025 ein signifikanter Zusammenhang für die maximale Rotation zum Cobb-Winkel nachzuweisen. Die gemittelten Werte zeigen einen mittelstarken Zusammenhang (r<sup>2</sup>=0,6; p=0,07).

Um die Rotationen richtig zu beurteilen, ist es ähnlich wie bei VP 5 notwendig, die Bilder genauer zu betrachten und die automatische Analyse des Programms zu überprüfen. Man erkennt mit Ausnahme der ersten und der vorletzten Aufnahme (s. Abbildung 15) einen deutlichen „Knick“ im Bereich des zu erwartenden thorakalen linksrotatorischen Maximums. Hier liegt eine Fehleinschätzung der Oberflächenrotationskurve vor, eine interaktive Vorgabe der Kurve würde zu einer Zunahme der Rotation um ca. 2-5° führen und dadurch zur Messung der progredienten Deformität zum Ende des Betrachtungszeitraums.



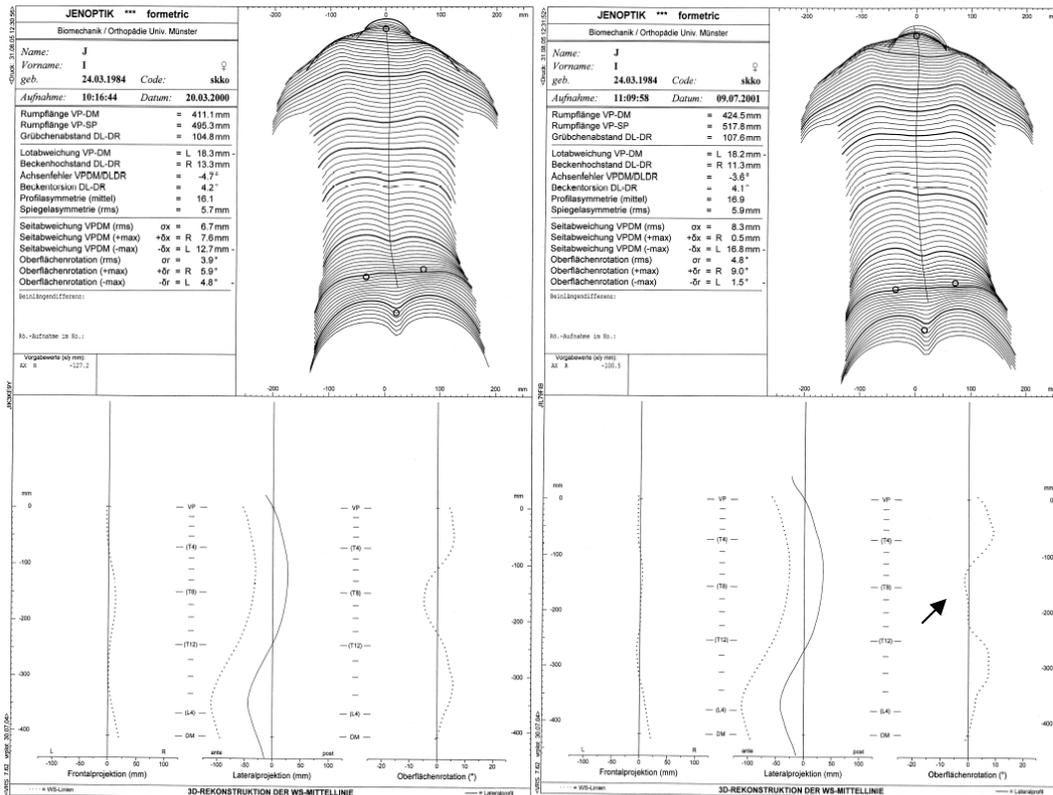


Abbildung 15

RSG-Verlauf von VP6. Bis auf die 1. und die 5. Aufnahme zeigen alle Analysen einen unzureichenden linksrotatorischen Gegenschwung.

Der Vergleich der radiologischen und rasterstereografischen Seitabweichungen zeigt bezüglich der absoluten Werte und in der Korrelationsanalyse eine gute Übereinstimmung ( $r^2=0,9$ ;  $p<0,005$  für die Maxima,  $r^2=0,68$ ;  $p<0,05$  für die gemittelten Werte). Es kommt bei der maximalen Lateraldeviation einheitlich zu einem Anstieg von 6-7mm auf 17-20mm. Für die Rotationen konnte bei den Maximalwerten eine mit  $r=0,8$  ( $p<0,05$ ) signifikante, hohe Korrelation berechnet werden, die gemittelten Werte sind mit  $r^2=0,62$  ( $p=0,06$ ) zwar nicht signifikant, zeigen aber dennoch einen mittleren Zusammenhang.

### Progredienzen:

Entsprechend den oben beschriebenen Korrelationen gibt es auch für die Progredienzen eine hohe Übereinstimmung. Die maximalen Translationen bewegen sich mit

1,56mm/Jahr (RSG) bzw. 2,1mm/Jahr (radiologisch) in vergleichbarem Rahmen. Analog verhalten sich die gemittelten Translationen.

Die Rotationsbeurteilung weicht davon ab. Während die RSG-Rotation mit 0,35°/Jahr (max.) bzw. 0,23°/Jahr (gemittelt) deutlich unterhalb des Gruppenmittels liegt, ist die radiologische Progredienz höher. Hier werden mit 1,6°/Jahr bzw. 1,0°/Jahr wesentlich stärkere Progredienzen ermittelt.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{\alpha}$ (°)
6	2,15	2,39

Tabelle 18

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{\alpha}$ ) VP6.

VP 6 zeigt im Beobachtungszeitraum eine hohe Übereinstimmung der rasterstereografischen und radiologischen Verlaufsbeurteilung. Dies trifft insbesondere für die Vergleiche der Seitabweichungen untereinander und in Bezug auf den Cobb-Winkel zu. Dies spiegelt sich in hohen Korrelationen und in den Progredienzen wieder. In etwas geringem Maße stimmen auch die rotatorischen Werte überein, hier kommt es aber zu unterschiedlichen Progredienzen, wobei die oben beschriebenen Fehler der automatischen Rotationsberechnung zu berücksichtigen sind.

Insgesamt gibt auch hier die RSG eine verlaufsgerechte Beurteilung wieder. Dies ist nicht zuletzt in den geringen Abweichungen der Überlagerung der Frontalprojektionen und der Rotationskurven erkenntlich, welche durch Korrekturen des Anwenders noch leicht optimiert werden könnten.

VP 7:

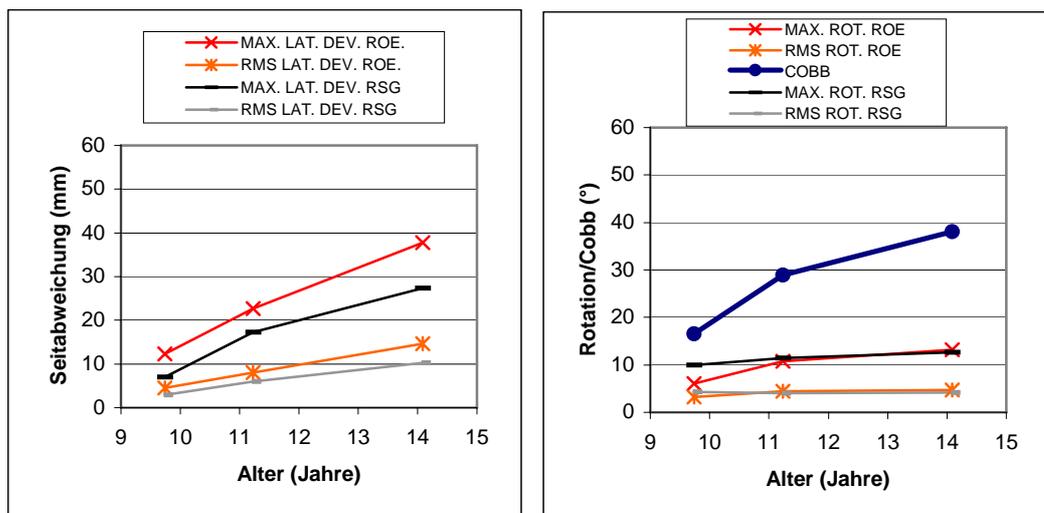


Abbildung 16

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP7.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,99	0,97	1,0**	0,1	0,96	0,93	0,99	0,95
SD	1,18	0,90	0,0	0,2	3,49	1,94	0,44	0,24
b	4,53	1,66	0,6	0,0	5,79	2,32	1,53	0,32
SF	0,84	0,15	0,16	0,07	0,42	0,01	0,56	0,17

Tabelle 19

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm/Jahr bzw. °/Jahr, SF in mm bzw. °) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=4,7°/Jahr; SF=1,28°) für VP7 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
$r^2$	0,99	0,99	0,99	0,27
SD	1,61	0,5	0,17	0,18

Tabelle 20

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP7 zueinander.

Es handelt sich um eine doppelbogige Skoliose mit lumbaler, linkskonvexer Hauptkrümmung und thorakal rechtskonvexer Ausgleichskrümmung (King I), welche über einen Zeitraum von 5 Jahren mit drei Bildpaaren dokumentiert wurde. Bei der ersten Röntgenaufnahme wurde ein 1cm Brettgleich am linken Bein vorgenommen, alle

anderen Aufnahmen wurden ohne Beinlängenkorrektur vorgenommen. Es kommt zu einem kontinuierlichen Anstieg des Cobb-Winkels von 17° auf 38°.

#### Lineare Regression:

Auf deskriptiver Ebene zeigen sich sehr harmonische Verläufe zwischen den einzelnen Parametern untereinander und in Relation zum Cobb-Winkel.

Da in diesem Fall leider nur drei Aufnahmen vorliegen, kam es außer bei dem Vergleich Cobb-Winkel/RSG-Rotationsmaxima ( $r^2=1,0$ ;  $p=0,0002$ ) zu keinen signifikanten Zusammenhängen zum Cobb-Winkel, obwohl sehr hohe Korrelationen von über  $r^2=0,8$  errechnet wurden.

Auch die Analyse der RSG versus Röntgen Translationen und Rotationen untereinander ergibt in drei Fällen trotz eines Korrelationskoeffizienten von 0,99 und niedrigen Standardfehlern keine Signifikanz. Einzig der Vergleich der gemittelten Rotationen zeigt einen mit  $r^2=0,27$  sehr niedrigen Koeffizienten. Die Absolutwerte unterscheiden sich kaum.

#### Progredienzen:

Die Progredienzen liegen bei den RSG- und Röntgenseitabweichungen sowie bei dem Cobb-Winkel im oberen Bereich der Gesamtgruppe und sind untereinander in etwa vergleichbar.

Analog zu den schlechten Korrelationen ist die gemittelte RSG-Rotation auch hier Ausreißer. Mit  $b=0,0$  konnte keinerlei Progredienz nachgewiesen werden. Die Entwicklung der maximalen RSG-Rotation liegt mit 0,6°/Jahr im mittleren Bereich der Gruppe. Die radiologisch ermittelten Rotationen liegen mit 1,5°/Jahr bzw. 0,32°/Jahr im oberen bzw. mittleren Bereich.

Die insgesamt höheren radiologischen Progredienzen lassen sich durch niedrigere Werte bei der Erstuntersuchung infolge des Einflusses des Beinlängenausgleichs erklären.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
3	2,96	1,07

Tabelle 21

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP7.

Manko bei VP 7 ist die geringe Untersuchungszahl, so dass trotz stärkster Korrelationen kaum Signifikanzen errechnet werden konnten. Mit Ausnahme der mittleren, rasterstereografisch bestimmten Rotation zeigen alle Werte eine konstante Zunahme der Pathologie in vergleichbarem Rahmen. Die hohe Übereinstimmung wird von den Ergebnissen der Kurvenüberlagerung bestätigt. Sicherlich ist in diesem Fall die Rasterstereografie in gleichem Ausmaß wie die Röntgenaufnahme in der Lage, aktuelle Situation und Entwicklung des Zustandes exakt einzuschätzen.

VP 8:

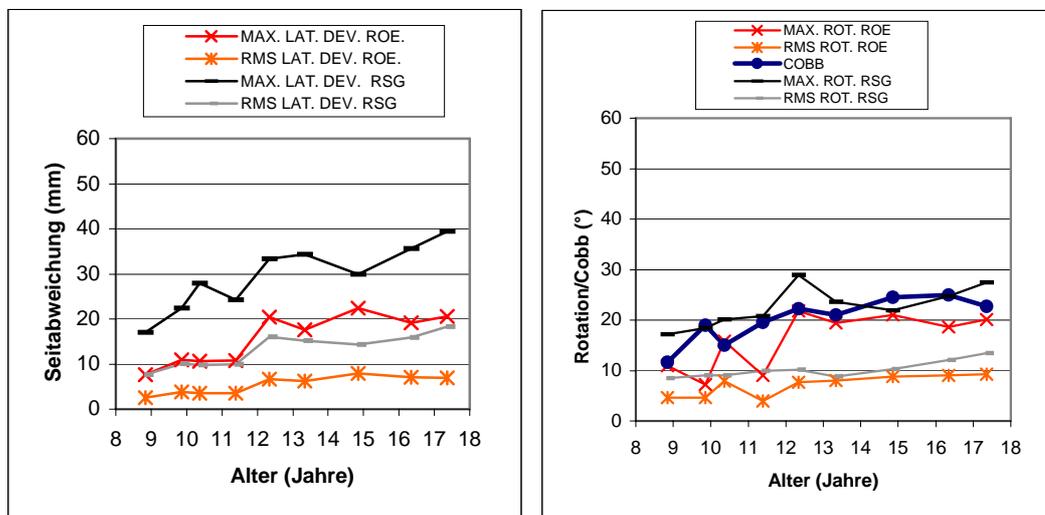


Abbildung 17

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP8.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,60*	0,70**	0,50*	0,45*	0,79**	0,83**	0,37	0,39
SD	4,87	2,14	3,0	1,32	2,68	0,87	4,69	1,77
b	2,14	1,12	0,97	0,5	1,6	0,58	1,33	0,57
SF	0,43	0,2	0,35	0,1	0,36	0,12	0,5	0,16

Tabelle 22

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm/Jahr bzw. °/Jahr, SF in mm bzw. °) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,25°/Jahr; SF=0,3°) für VP8 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,72**	0,84**	0,63*	0,35
SD	4,08	1,55	2,59	1,44

Tabelle 23

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP8 zueinander.

Es konnte eine Verlaufsbeobachtung über annähernd neun Jahre bei neun Bildpaaren analysiert werden. Die rechtskonvexe Thorakalskoliose nahm bezüglich des Cobb-Winkels von ca. 11° auf 23° zu.

Lineare Regression:

Radiologisch und rasterstereografisch zeigt sich ein zweiphasiger Verlauf. Nach einer Progredienz bis zur 5. Untersuchung ergeben sich keine weiteren Veränderungen.

Im Vergleich der radiologischen Parameter zum Cobb-Winkel können für die maximale Translation mit  $r^2=0,79$  ( $p<0,0013$ ) und die gemittelte Translation mit  $r^2=0,83$  ( $p<0,0007$ ) hochsignifikante Zusammenhänge gefunden werden. Für die Rotationen ( $r^2=0,37$  bzw.  $r^2=0,39$ ) sind, obwohl es auch zu einer adäquaten Zunahme kam (ca. 10° für max. und ca. 5° für rms) keine signifikanten Zusammenhänge nachzuweisen. Die Gründe dafür liegen in den großen Schwankungen der Messwerte, welche sich in den höchsten Standardfehlern des Kollektivs widerspiegeln.

In der rasterstereografischen Analyse kommt es zu signifikanten Zusammenhängen der Translationen und der Rotationen zum Cobb-Winkel.

Bis auf die gemittelten RSG/Röntgenrotationen kommt es auch im Vergleich der gleichnamigen Parameter untereinander zu signifikanten, tlws. sogar zu hochsignifikanten Zusammenhängen. Auf deskriptivem Niveau zeigen auch die gemittelten Rotationen ein vergleichbares Fortschreiten der Pathologie.

Progredienzen:

Der Cobb-Winkel liegt mit einem Anstieg von 1,25°/Jahr im unteren Bereich der Gesamtgruppe. Die Progredienzen der rasterstereografischen Translationen liegen mit 2,1mm/Jahr bzw. 1,1mm/Jahr über den röntgenologischen Progredienzen (1,6 bzw. 0,58mm/Jahr).

Die rotatorischen Progredienzen sind recht gut vergleichbar. Hier liegen sie radiologisch gemessen etwas höher.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
9	3,06	2,73

Tabelle 24

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP8.

Obwohl es z.T. zu starken Streuungen der Messwerte kam, insbesondere die RSG-Rotationen sind hiervon betroffen, stimmen die radiologischen und rasterstereografischen Verlaufsanalysen gut überein, welches in den Korrelationen zum Cobb-Winkel und den gleichnamigen Parametern untereinander, sowie in den Differenzen der Kurvenvergleiche deutlich wird. Auch der zweiphasige Verlauf des Cobb-Winkels (Anstieg bis zur 5. Aufnahme, anschließend relativ konstanter Verlauf) wird von allen Parametern aufgezeigt.

VP 9:

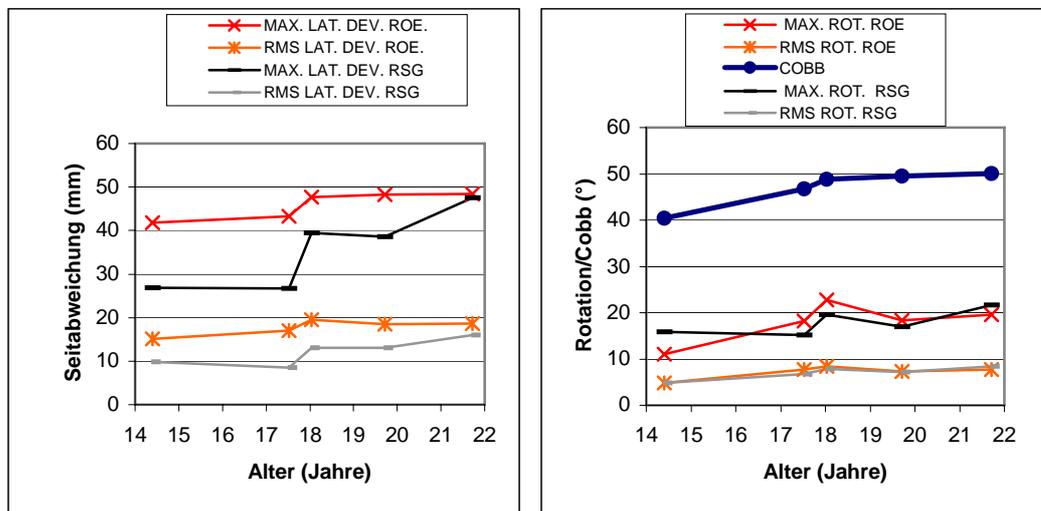


Abbildung 18

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP9.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
r <sup>2</sup>	0,61	0,46	0,39	0,91*	0,82*	0,87*	0,79*	0,81*
SD	6,45	2,55	2,43	0,47	1,51	0,74	2,28	0,71
b	2,87	0,89	0,72	0,46	1,0	0,49	1,07	0,36
SF	0,93	0,38	0,39	0,13	0,32	0,24	0,68	0,21

Tabelle 25

Lineare Regressionen (r<sup>2</sup>, SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm/Jahr bzw. °/Jahr, SF in mm bzw. °) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,32°/Jahr; SF=0,34°) für VP9 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,86*	0,48	0,35	0,83*
SD	3,9	2,51	2,51	0,66

Tabelle 26

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP9 zueinander.

Es liegen 5 Untersuchungen über ca. 7 Jahre vor, bei einer relativ starken rechts-konvexen Thorakalskoliose (King II) mit einer Zunahme des Cobb-Winkels von ca. 40° auf 50° vornehmlich innerhalb der ersten drei Untersuchungsjahre. Ab der dritten RSG-Untersuchung wurde eine Schuherhöhung von 1 cm unter dem linken Bein dokumentiert, für die Röntgenbefunde ist kein Beinlängenausgleich vorgenommen worden.

Lineare Regression:

Die radiologisch ermittelten Translationen und Rotationen weisen allesamt einen hohen, signifikanten Zusammenhang zum Cobb-Winkel auf. Es kommt zu einem Anstieg bis zum dritten Untersuchungszeitpunkt und einer anschließenden Konstanz der Deformität. Die rasterstereografische Beurteilung der gemittelten RSG-Rotation korreliert in hohem Ausmaße (r<sup>2</sup>=0,91; p<0,05) mit dem Cobb-Winkel, die maximale Seitabweichung zeigt einen erkennbaren Zusammenhang (r<sup>2</sup>=0,61), welcher aber nicht signifikant ist (p=0,12). Die übrigen Parameter zeigen statistisch keinen Zusammenhang zum Cobb-Winkel.

Der Vergleich der röntgenologischen und rasterstereografischen Translationen und Rotationen zeigt für die maximalen Translationen und die gemittelten Rotationen ähnliche Verläufe, so dass sich signifikante, hohe Zusammenhänge berechnen lassen. Die Abso-

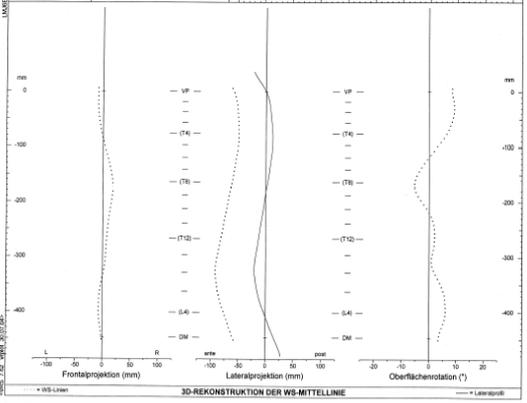
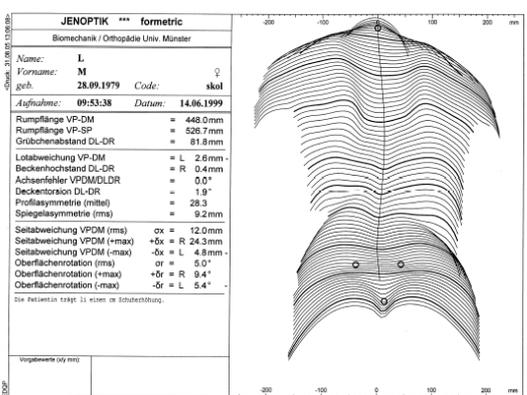
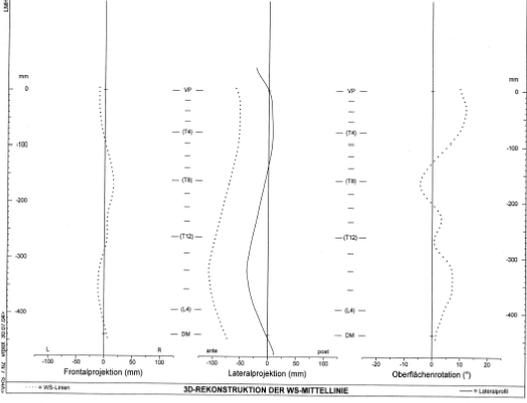
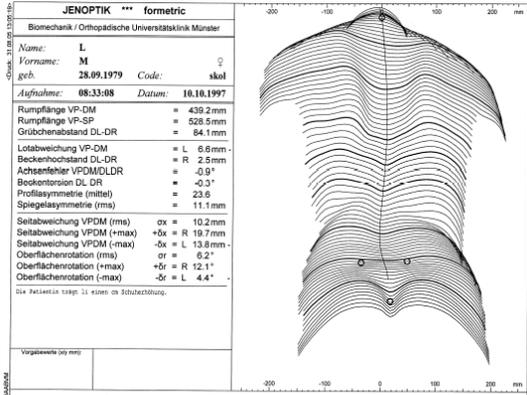
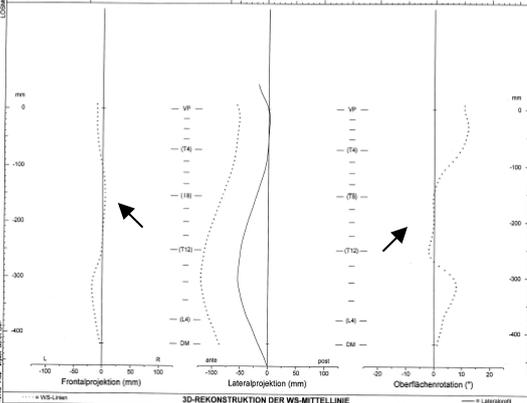
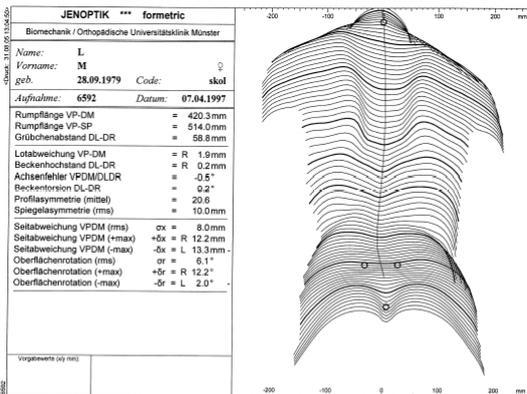
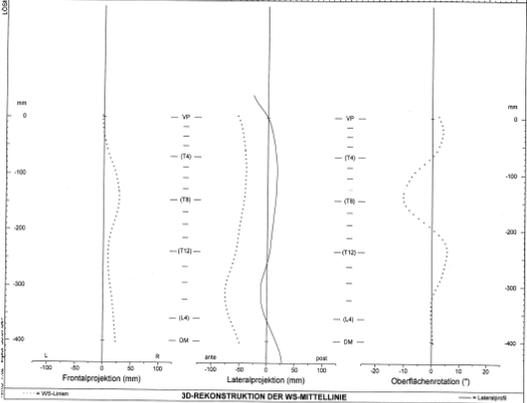
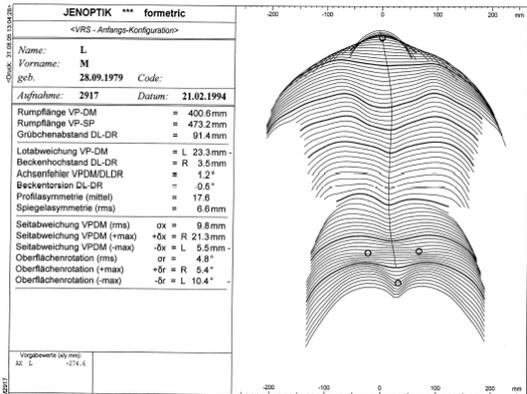
lutwerte sind bezüglich der Rotationen ebenfalls gut vergleichbar. Die absoluten RSG-Translationen sind vor allem in den ersten Untersuchungen deutlich niedriger, gleichen sich aber zum Ende des Untersuchungszeitraums an. Die mittlere Translation und die maximale Rotation aus der RSG-Analyse divergieren im Vergleich zur Röntgenanalyse durch die schwache Progredienz zur 2. Untersuchung und die Konstanz in der Phase der letzten drei Untersuchungen. Die Ursachen dafür werden im Folgenden erörtert.

Die Auswertungsbögen (vgl. Abbildung 19) zeigen vor allem bei der zweiten RSG-Analyse eine klare Unterschätzung der Deformität. Die Symmetrielinie liegt in diesem Fall im Bereich der Brustwirbelsäule nicht weit genug lateral. Die Ungenauigkeit der Lage der Symmetrielinie hat direkte Folgen auf die Frontalprojektion und die Oberflächenrotationskurve. Es resultiert eine Unterschätzung der Translation des thorakalen Abschnitts der Wirbelsäule. Die Frontalprojektion ist von TH12 bis TH6 annähernd gerade. Ebenso verhält es sich mit der Oberflächenrotationskurve, der linksrotatorische Gegenschwung der BWS fehlt.

Progredienzen:

Während die rotatorischen Progredienzen ungefähr übereinstimmen ( $0,7^\circ/\text{Jahr}$  RSG zu  $1,1^\circ/\text{Jahr}$  radiologisch für Maxima, bzw.  $0,46^\circ/\text{Jahr}$  zu  $0,36^\circ/\text{Jahr}$ ), weicht besonders die maximale Seitabweichung deutlich ab. Sie liegt rasterstereografisch fast dreimal höher als radiologisch ( $2,87$  zu  $1,0\text{mm}/\text{Jahr}$ ). Hinzu kommt noch eine Reduzierung der Seitabweichung durch Verwenden eines Beinlängenausgleichs ab der 3. Untersuchung. Der Cobb-Winkel steigt im gesamten beobachteten Verlauf um  $1,3^\circ$  pro Jahr.

Auf qualitativer Ebene zeigen alle Parameter einen vergleichbar ausgeprägten Anstieg der Deformität von der ersten zur letzten Untersuchung. Bei der maximalen RSG-Translation fällt dieser allerdings überproportional deutlich aus.



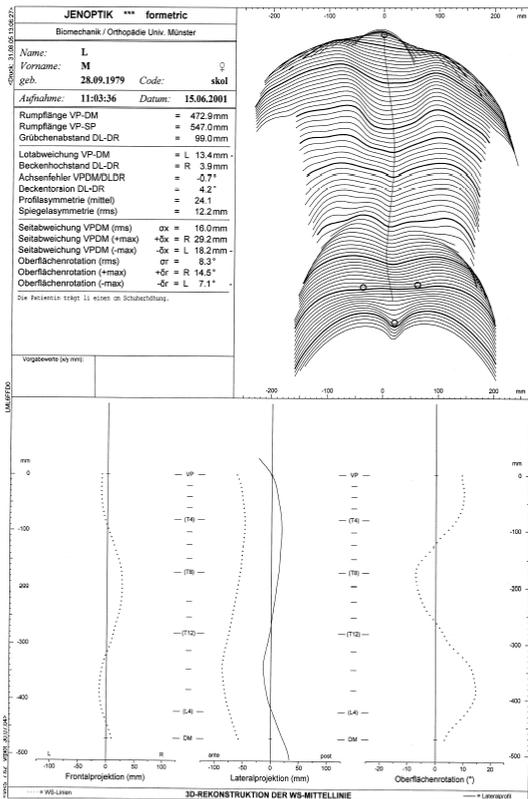


Abbildung 19 a-e

RSG-Verlauf von VP9. Auch hier erkennt man in der 2. Untersuchung eine medialisierte Symmetrielinie mit der Folge einer unterschätzten Rotation und Translation (s. Pfeile).

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{\theta}$ (°)
5	5,23	2,2

Tabelle 27

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{\theta}$ ) VP9.

Die radiologische Progredienz bis zur 3. Untersuchung wird durch die rasterstereografische Rotation nur annähernd erfasst. Diese in der RSG geringere Progredienz zur 2. Untersuchung erklärt sich durch die zu weit medial liegende Symmetrielinie mit den Folgen der Unterschätzung der Rotationen und Translationen. Bedenkt man den Einfluß des Beinlängenausgleichs ab der 3. RSG-Analyse, so würden die Rotationsverläufe rasterstereografisch und radiologisch sehr gut übereinstimmen. Die Ungenauigkeit der 2. RSG-Analyse schlägt sich auch im Kurvenvergleich nieder. Mit  $\sigma_x=7,64\text{mm}$  ist dieser Kurvenvergleich der zweitschlechteste in dieser Studie und maßgeblich an der insgesamt größten RMS-Differenz der Frontalprojektionen eines Patienten ( $\sigma_x=5,23\text{mm}$ ) beteiligt.

Zusammenfassend für VP9 läßt sich festhalten, dass die maximale RSG-Translation und die mittlere RSG-Rotation gut mit den radiologischen Analoga und dem Cobb-Winkel harmonieren. Bedenkt man die beschriebenen Fehlerquellen (unterschätzte 2. RSG-Analyse und Einfluß Beinlängenausgleich ab 3. Untersuchung), so würden auch die mittleren Seitabweichungen und die maximalen Rotationen gut übereinstimmen. Insgesamt liegt eine durchaus zufriedenstellende rasterstereografische Beurteilung vor. Die Gefahr eines falsch negativen Befundes hätte von einem erfahrenen Untersucher durch interaktive Korrektur des Apex oder manuell kompensiert werden können.

VP 10:

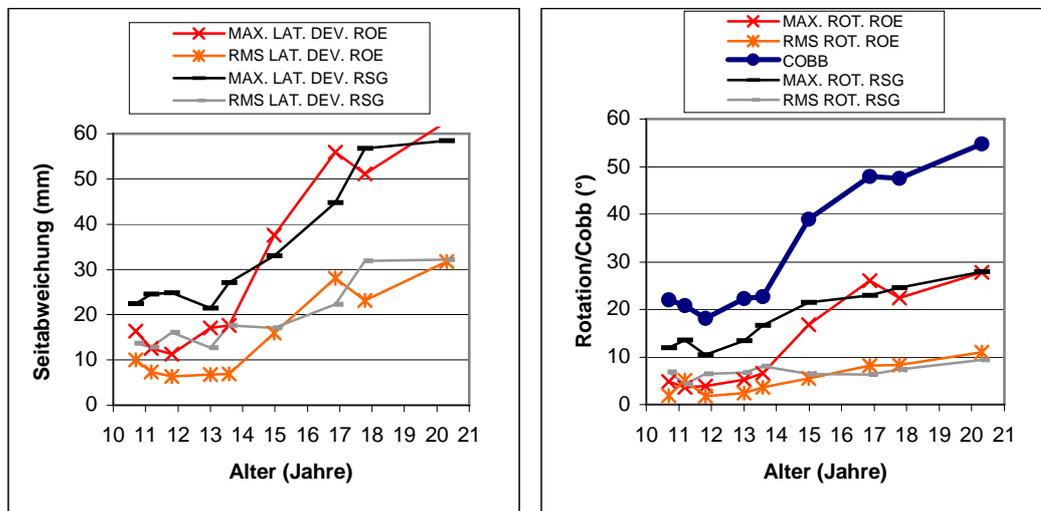


Abbildung 20

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP10.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,89**	0,77**	0,95**	0,24	0,99**	0,96**	0,99**	0,88**
SD	5,13	3,92	1,54	1,28	1,73	2,26	1,22	1,21
b	4,27	2,16	1,85	0,27	5,99	2,83	2,95	0,92
SF	0,54	0,34	0,19	0,12	0,71	0,46	0,37	0,15

Tabelle 28

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=4,18°/Jahr; SF=0,5°) für VP10 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,89**	0,74**	0,92**	0,17
SD	5,33	4,2	1,89	1,34

Tabelle 29

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP10 zueinander.

Ein Untersuchungszeitraum von neuneinhalb Jahren mit 9 Bildpaaren wurde verfolgt. Die rechtskonvexe Thorakalskoliose (King III) zeigt eine Zunahme des Cobb-Winkels von ca. 20° auf 55°.

Lineare Regression:

Bereits auf den ersten Blick ist der annähernd gleiche Verlauf aller Parameter zu erkennen. Nach einer Konstanz innerhalb der ersten 4-5 Messungen kommt es zu einem deutlichen Fortschreiten der Deformität. Im Vergleich des Cobb-Winkels zu den anderen radiologischen Parametern zeigen sich Korrelationskoeffizienten zwischen  $r^2=0,88$  und  $r^2=0,99$  (p jeweils  $<0,0002$ ), die einen hochsignifikanten Zusammenhang belegen.

Die Rasterstereografie kann dies mit Ausnahme der gemittelten Rotationskurve ( $r^2=0,24$ ;  $p=0,18$ ) voll bestätigen. Die Koeffizienten liegen zwischen  $r^2=0,77$  und  $r^2=0,95$  (p jeweils  $<0,002$ ) und sind ebenfalls hochsignifikant.

Die Gegenüberstellungen der RSG-Translationen und -Rotationen mit denen der Radiologie sind ebenfalls eindeutig. Mit Ausnahme der gemittelten Werte der Rotation gibt es eine große Verlaufsübereinstimmung, welche sich in Koeffizienten zwischen  $r^2=0,74$  und  $r^2=0,92$  bei p-Werten unter 0,003 ausdrückt. Die Absolutwerte der zu vergleichenden Parameter liegen in ähnlichen Bereichen.

Progredienzen:

Entsprechend dem drastischen Verlauf dieser Skoliose finden sich für alle Maße Progredienzen im obersten Bereich der in dieser Studie untersuchten Patienten. Insgesamt fallen die Röntgenparameter mit höheren Progredienzen auf.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
9	2,78	2,77

Tabelle 30

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP10.

Bei VP 10 stimmen die radiologisch und rasterstereografisch ermittelten Verläufe in überaus hohem Ausmaß überein und folgen mit Ausnahme der gemittelten RSG-Rotation übereinstimmend dem Cobb-Winkel. Die Kurvenüberlagerung zeigt geringe Differenzen von 2,8mm in der Frontalprojektion und 2,8° im Vergleich der Rotationskurven.

Dieser Fall zeigt, dass die Rasterstereografie insbesondere bei deutlichen Deformitäten über 20-30° Cobb in der Lage ist, die Wirbelsäule anhand der Oberflächenform des Rückens eindeutig einzuschätzen. Bei geringeren und sehr ausgeprägten Deformitäten >50° Cobb ist die Formanalyse fehleranfälliger.

VP 11:

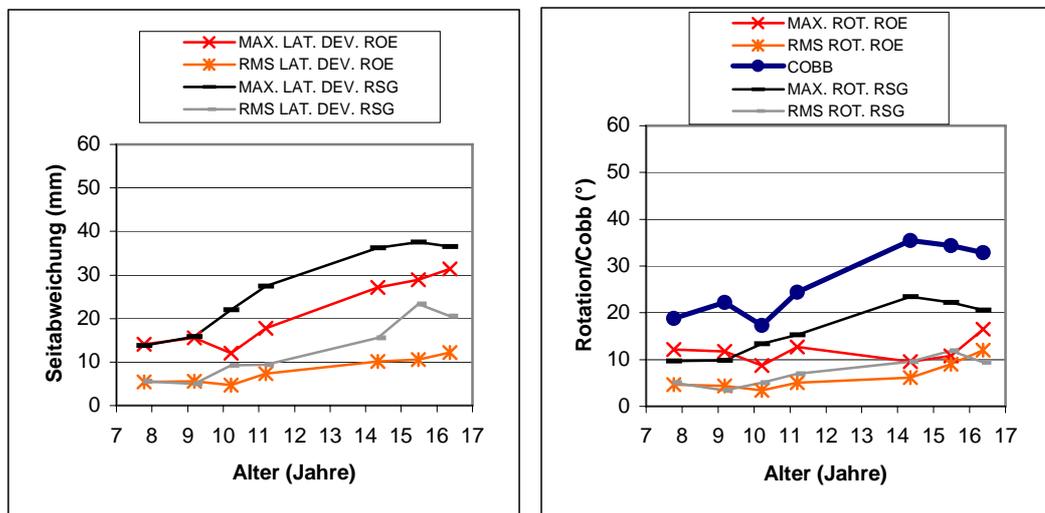


Abbildung 21

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP11.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,83**	0,74*	0,87**	0,81*	0,93**	0,89**	0,05	0,57*
SD	4,54	4,04	2,29	1,47	2,32	1,08	2,72	2,2
b	2,95	2,09	1,64	0,83	2,27	0,85	0,23	0,79
SF	0,32	0,28	0,26	0,17	0,32	0,12	0,33	0,21

Tabelle 31

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=2,1°/Jahr; SF=0,42°) für VP11 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,82**	0,83**	0,0	0,56
SD	4,68	3,3	6,34	2,21

Tabelle 32

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP11 zueinander.

VP 11 konnte mit Hilfe von 7 Bildpaaren über ungefähr 9 Jahre hinweg retrospektiv betrachtet werden. Dabei stieg der Cobb-Winkel von ca. 19° auf ca. 35° an. Der Verlauf dieser Skoliose ist insofern eine Rarität, als dass die zunächst rechtskonvexe Thorakalskoliose eine plötzliche Abknickung im thorakolumbalen Übergang erfährt und so doppelbogig wird.

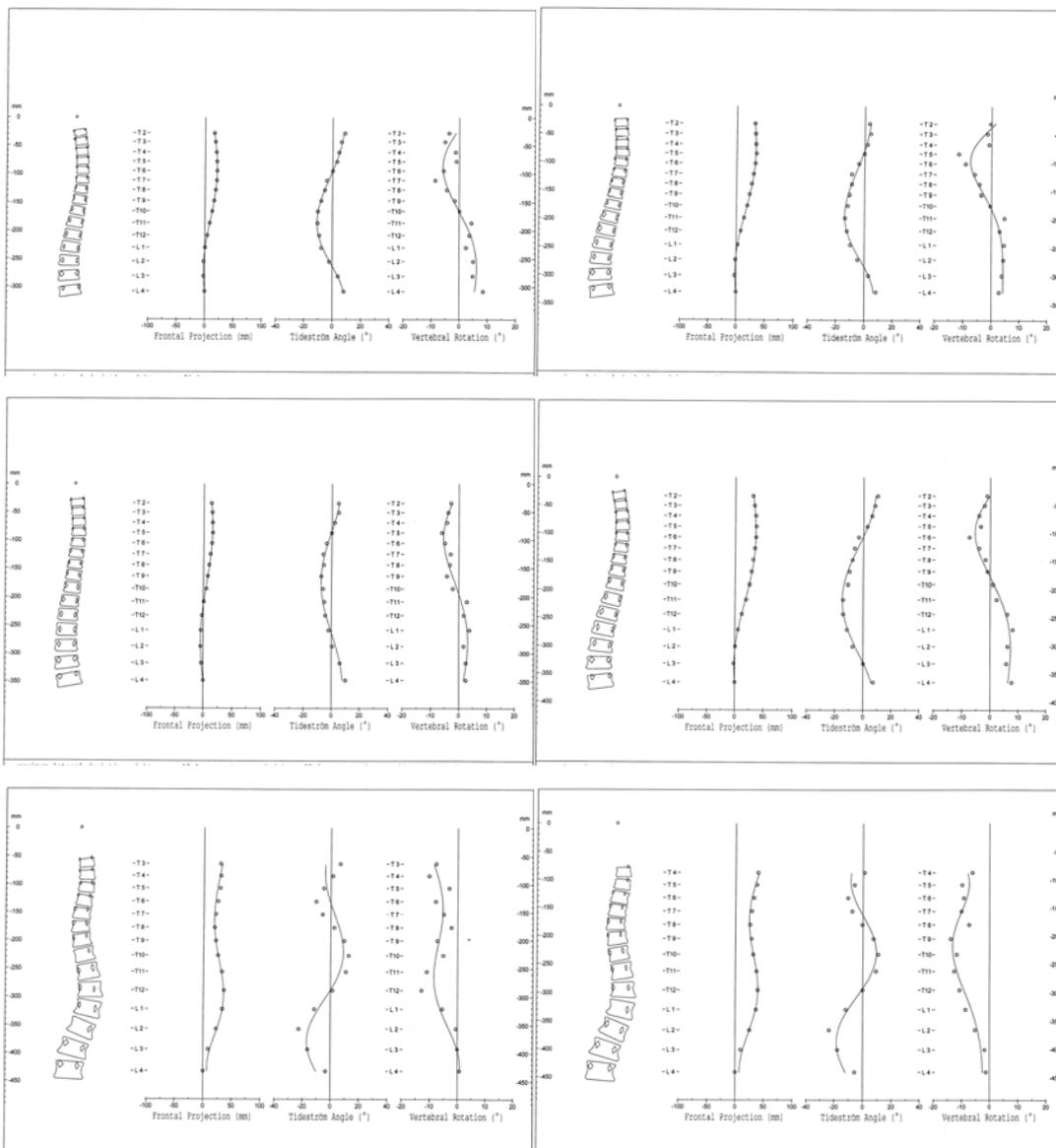
Lineare Regression:

Mit Ausnahme einer Befundverbesserung zur 3. Untersuchung nimmt der Cobb-Winkel konstant bis zum Alter von ca. 14,5 Jahren um 16° zu. Diesem Verlauf entsprechen die Werte der Röntgentranslation in vollem Umfang, was sich auch in der Regressionsanalyse zeigt ( $r^2=0,93$ ;  $p<0,0005$  und  $r^2=0,89$ ;  $p<0,002$ ).

Bei den Röntgen-Rotationen fehlt die Befundverschlechterung, insbesondere in der 4., 5. und 6. Untersuchung. Es kommt bei der maximalen Rotation sogar gegenläufig zu einer Reduktion der Rotationskomponente, so dass kein Zusammenhang zum Cobb-Winkel belegt werden kann. Dies kann entweder darin begründet liegen, dass die rotatorische Komponente bei diesem Patienten tatsächlich geringer ausfällt, oder dass es sich um Zeichen-, Mess- bzw. Berechnungsfehler handelt. Für Zweiteres spricht, dass die RSG-Analyse einen konstanten Rotationsanstieg ermittelt und dass bei den drei letzten Röntgenaufnahmen sehr starke Streuungen um die Glättungskurve durch die berechneten Wirbelkörperrotationen auffallen (s. Abbildung 22). Hier würden einige falsch übertragene Wirbelkörperzonen zu einer Verzerrung führen können. Aufgrund der unzureichende Röntgenbildqualität, auch erkenntlich daran, dass in den betreffenden Messungen T2 und/oder T3 nicht übertragen werden konnten, war auch die Genauigkeit anderer Strukturen, die für die Rotationsbestimmung verantwortlich sind reduziert.

Betrachtet man in der Abb. 22 die Wirbelsäulen und Rotationskurven im Verlauf, so erscheinen diese in den Untersuchungen 5 bis 7 tatsächlich problematisch. Es ist in den Wirbelsäulen dieser Aufnahmen eine deutlich stärkere Rotationskomponente als in den

ersten Untersuchungen zu erwarten, da die Pedikel in den Wirbelkörpern L1 und TH12 wesentlich stärker ausrotiert liegen. Dennoch sind die berechneten Ausmaße der Rotationsfehlstellungen geringer als in den Untersuchungen 1, 2 und 4. Gleichzeitig ist die Streuung der Rotationen der einzelnen Wirbelkörper um die „vertebral rotation curve“ in 5 und 7 sehr hoch. Die in den letzten Aufnahmen errechneten Wirbelkörperrotationen erscheinen insgesamt zu niedrig, besonders im Vergleich zu den ersten Untersuchungen. Die Problematik der letzten drei Untersuchungen zeigt sich auch in der Kurvenüberlagerung, welche für die Rotation mit  $\sigma_{ro}=3,5^\circ$  die größte Differenz der Untersuchungsgruppe aufweist. Die schlechtesten Werte zeigen hier das 5. Aufnahme paar mit  $\sigma_{ro}=5,5^\circ$ , das 4. mit  $4,2^\circ$  und das 6. Paar mit  $3,9^\circ$ .



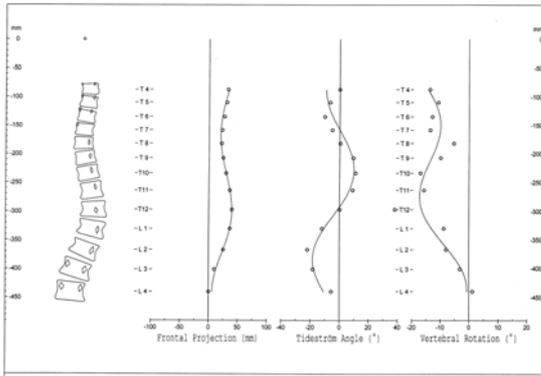


Abbildung 22 a-g

Auszüge aus den Röntgenauswertungen von VP11. Die hohe Streuung der Messpunkte um die Vertebral Rotation und das Fehlen der Wirbelkörper TH2 und /oder TH3 zeigen mögliche Übertragungsfehler bei der Digitalisierung durch eine schlechte Bildqualität an. Bei Betrachtung der a.-p. Röntgenaufnahmen und der Lage der Pedikel ist offensichtlich, dass die berechneten Rotationen in den letzten Untersuchungen nicht der wahren Anatomie entsprechen und zu gering ausfallen.

Die RSG-Analyse geht mit der Entwicklung des Cobb-Winkels und der radiologisch ermittelten Translation einher. Die Korrelationskoeffizienten der 4 Parameter zum Cobb-Winkel belegen einen hohen Zusammenhang:  $r^2$  liegt zwischen 0,74 und 0,87 und  $p$  ist mindestens  $<0,013$ .

Wie aus der Diskussion der radiologisch ermittelten Rotationen bereits zu vermuten, führt der Vergleich der RSG- zu den radiologischen Rotationen zu keinen signifikanten Korrelationen. Die Ursachen wurden bereits angeführt.

Die Translationen beider Methoden ergeben wiederum sehr ausgeprägte Zusammenhänge ( $r^2=0,82$  für die maximalen,  $r^2=0,83$  für die gemittelten Werte), die sich auf einem hohen Signifikanzniveau ( $p<0,005$ ) absichern lassen.

#### Progredienzen:

Die maximalen Translationen liegen mit 2,9mm/Jahr (RSG) und 2,27mm/Jahr (Röntgen) im vergleichbaren Rahmen im oberen Bereich der Gesamtgruppe, analog zum Cobb-Winkel (2,1°/Jahr). Die maximale Lateraldeviation ist rasterstereografisch höher.

Die Progredienz der gemittelten Seitabweichung liegt bei der RSG deutlich höher (2,1mm/Jahr) als beim Röntgen (0,85mm/Jahr). Entsprechend dem Vorbeschriebenen divergieren auch die rotatorischen Progredienzen. Während die Progredienzen der gemittelten Werte sehr gut übereinstimmen (0,83°/Jahr und 0,79°/Jahr), kommt es zu einer Diskrepanz bei den Maximalwerten (1,64°/Jahr gegenüber 0,23°/Jahr).

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{\theta}$ (°)
7	4,65	3,5

Tabelle 33

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{\theta}$ ) VP11.

Insgesamt wird auch hier die Rasterstereografie dem radiologischen Verlauf gerecht. Insbesondere sind sehr hohe Übereinstimmungen aller lichtoptischen Parameter mit dem Verlauf des Cobb-Winkels und im Vergleich der rasterstereografischen zu den röntgenologischen Translationen zu bemerken. Die Abweichungen zu den radiologisch ermittelten Rotationen liegen sehr wahrscheinlich in Problemen der Bildübertragung begründet und nicht in Messfehlern der Rasterstereografie.

### VP 12:

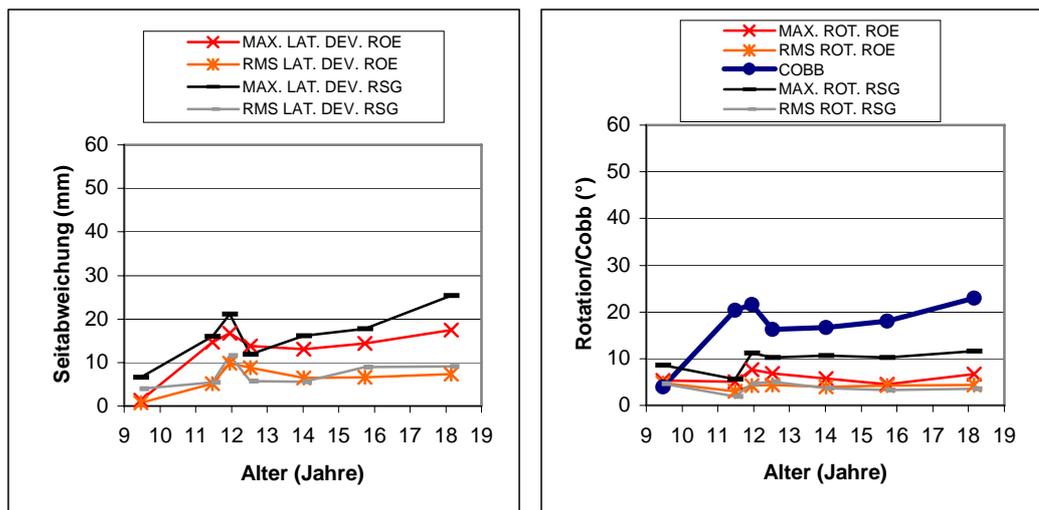


Abbildung 23

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP12

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
R <sup>2</sup>	0,81*	0,46	0,06	0,17	0,97**	0,65*	0,12	0,23
SD	2,92	2,19	2,16	1,08	0,95	1,92	1,14	0,53
B	1,63	0,45	0,4	-0,09	1,22	0,45	0,02	0,01
SF	0,59	0,37	0,26	0,16	0,64	0,41	0,17	0,09

Tabelle 34

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,37°/Jahr; SF=0,75°) für VP12 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,75*	0,49	0,32	0,7**
SD	3,36	2,14	1,84	0,64

Tabelle 35

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP12 zueinander.

Die einbogige, linkskonvexe Thorakolumbalskoliose (Apex L1, King IV) wurde über einen Zeitraum von 9 Jahren mit 7 Bildpaaren beobachtet. Der Cobb-Winkel vergrößerte sich von 4° auf 23°.

Lineare Regression:

Kennzeichnend bei VP 12 ist eine frühzeitige Zunahme des Cobb-Winkels bis zum 12. Lebensjahr auf ca. 23°. Eine vorübergehende Besserung von ungefähr 5° konnte nicht gehalten werden und es kam zu einem erneut Anstieg auf ca. 23°. Diese Verlaufsform ist nur bei den Seitabweichungen erkennbar. So lassen sich auch für die beiden maximalen Seitabweichungen gute Korrelationen zum Cobb-Winkel nachweisen ( $r^2=0,97$  für Röntgen;  $r^2=0,81$  für RSG;  $p$  jeweils  $<0,006$ ). Die radiologische, gemittelte Seitabweichung zeigt mit  $r^2=0,65$  ( $p<0,03$ ) einen signifikanten Zusammenhang zum Cobb-Winkel, der entsprechende RSG-Wert allerdings nicht ( $r^2=0,46$ ;  $p=0,09$ ).

Die Wirbelkörperrotationen sind nur gering ausgeprägt und während der Progression der Deformität auf konstantem Niveau. Es lässt sich weder für die radiologischen noch für die rasterstereografischen Rotationen statistisch oder deskriptiv ein Zusammenhang zum Cobb-Winkel finden.

Die maximalen Seitabweichungen zeigen untereinander eine hohe Übereinstimmung, welche mit einem Regressionskoeffizienten von  $r^2=0,75$  ( $p<0,02$ ) belegt werden kann. Der deskriptiv gut übereinstimmende Verlauf der gemittelten Translationen konnte statistisch nicht bestätigt werden. Die mittleren Rotationen sind ebenfalls signifikant ( $r^2=0,7$ ;  $p<0,02$ ), die maximalen Rotationsverläufe nicht. Die Interpretation der Statistik der Rotationen sollte jedoch nicht überbewertet werden. Rein deskriptiv zeigen alle Rotationen einen von den übrigen Parametern unabhängigen, aber prinzipiell übereinstimmenden Verlauf. Bis auf einen einmaligen Rückgang der Rotationen zur 2. Untersuchung ergeben sich keinerlei Veränderungen. Die Korrelationskoeffizienten sind in hier hohem Ausmaß vom Zufall abhängig.

Progredienzen:

Bei den Rotationsparametern kommt es zu keinerlei Progredienzen, wie auch in der Übersichtsgrafik schon anschaulich wird. Es zeigt sich bei beiden Methoden ein konstanter Verlauf.

Die Progredienzen der Seitabweichungen sind vergleichbar, auch wenn sie rasterstereografisch höher ausfällt: die maximalen Translationen liegen mit 1,63 mm/Jahr (RSG) und 1,2 mm/Jahr im unteren Bereich des Kollektivs. Zu den geringen Progredienzen kommt es trotz der deutlichen absoluten Zunahme der Translationen und des Cobb-Winkels, da ein recht langer, relativ konstanter Verlauf miteingeht. Die Progredienzen der gemittelten Translationen sind mit 0,45mm/Jahr identisch.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
7	1,66	2,19

Tabelle 36

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP12.

Bei VP 12 wird die Pathologie insbesondere durch den Anstieg des Cobb-Winkels bis zur dritten Untersuchung charakterisiert. Den gleichen Verlauf weisen die translatorischen Parameter beider Verfahren, vor allem die Maximalwerte auf, welche auch untereinander einen hochsignifikanten Zusammenhang haben. Unabhängig vom Cobb-Winkel verbleiben sowohl die radiologisch als auch die rasterstereografisch ermittelten Rotationen auf einem eher konstanten Niveau, die gemittelten Rotationen weisen untereinander aber eine hohe, signifikante Korrelation auf. Insbesondere aber die rein deskriptive Betrachtung der Rotationsverläufe ergibt bei VP12 hohe Übereinstimmung. Die Analyse der Kurvenüberlagerungen zeigt minimale Differenzen.

Auch bei VP 12 kann man in der Zusammenschau der Werte eine der radiologischen Verlaufsdokumentation gleichende rasterstereografische Analyse erkennen. Die geringe Wirbelrotation entspricht der tatsächlichen Deformität und wird rasterstereografisch richtig widergespiegelt.

VP 13:

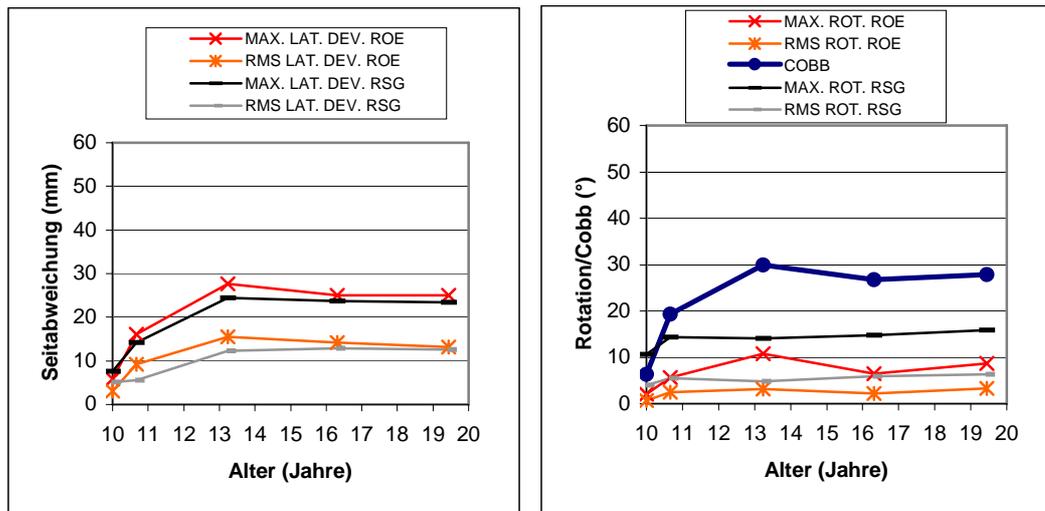


Abbildung 24

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP13.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,96**	0,78*	0,78*	0,54	0,99**	0,98**	0,87*	0,85*
SD	1,74	2,14	1,06	0,75	1,01	0,74	1,39	0,47
b	1,48	0,85	0,38	0,2	1,64	0,86	0,46	0,17
SF	0,68	0,31	0,18	0,08	0,91	0,55	0,4	0,12

Tabelle 37

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,74°/Jahr; SF=0,99°) für VP13 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
$r^2$	0,98**	0,81*	0,53	0,51
SD	1,07	2,01	1,54	0,78

Tabelle 38

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP13 zueinander.

Es handelt sich um eine thorakale, rechtskonvexe Skoliose, welche über einen Zeitraum von 9,5 Jahren mit 5 Aufnahmepaaren kontrolliert wurde. Der Cobb-Winkel steigt um 24°.

Lineare Regression:

Der Cobb-Winkel nahm von 6° mit 10 Jahren auf 30° mit ca. 13 Jahren zu und blieb bis zum 20. Lebensjahr im weiteren Verlauf konstant. Ganz ähnlich verhalten sich die übrigen radiologischen Messwerte. Es resultieren sehr hohe Korrelationen zum Cobb-Winkel mit Koeffizienten von  $r^2=0,85$  bis  $r^2=0,99$  ( $p$  ist maximal 0,027).

Die Korrelationen Cobb-Winkel zu RSG-Seitabweichungen zeigen ähnlich gute Ergebnisse. Für die maximale Translation liegt ein hochsignifikanter Zusammenhang mit  $r^2=0,96$  und  $p=0,003$  vor, die gemittelte Translation erreicht ebenfalls Signifikanz ( $r^2=0,78$ ;  $p<0,05$ ). Die maximale RSG-Rotation konnte ebenfalls signifikant abgesichert werden ( $r^2=0,78$ ;  $p<0,05$ ), die gemittelten Werte ergeben nur einen nicht signifikanten, mittleren Zusammenhang ( $r^2=0,54$ ;  $p=0,16$ ).

Im Vergleich der Translationen untereinander konnten ebenfalls hohe, signifikante Zusammenhänge ermittelt werden, für die Rotationen liegen die Koeffizienten im mittleren Bereich, ohne das 0,5 % Signifikanzniveau zu erfüllen.

Die Absolutwerte der Translationen sind radiologisch und rasterstereografisch gut vergleichbar, die Rotationen liegen rasterstereografisch höher.

Progredienzen:

Der Cobb-Winkel liegt mit 1,74°/Jahr im mittleren Bereich der Gesamtgruppe, blieb allerdings über 6 Jahre hinweg konstant. Es ist also wieder ein zweiphasiger Verlauf zu bedenken. Die Progredienzen der Seitabweichungen zeigen ein analoges Verhalten und stimmen sehr gut überein (ca. 1,5mm/Jahr gegenüber 1,64mm/Jahr bei den Maxima und 0,86mm/Jahr gegenüber 0,85mm/Jahr bei den gemittelten Werten), ebenso die Rotationen mit einem durchschnittlichen Zuwachs von 0,38 gegenüber 0,46°/Jahr für die maximalen und 0,2 zu 0,17°/Jahr bei den gemittelten Rotationen.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
5	1,61	2,36

Tabelle 39

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP13.

Bei VP 13 stimmt die radiologische Entwicklung nahezu perfekt mit den rasterstereografisch gefundenen Ergebnissen überein. Es ließen sich hochsignifikante Korrelationen

zum Verlauf des Cobb-Winkels und zu den RSG-/Röntgenparametern von bis zu  $r^2=0,99$  berechnen. Die wesentlichen Charakteristika des Verlaufs (Progredienz bis zur 3. Untersuchung und anschließende Befundkonstanz) zeigen sich sowohl radiologisch als auch rasterstereografisch. Die Differenzen der Kurvenvergleiche sind minimal. In diesem Fall wäre eine überwiegend rasterstereografische Dokumentation der Deformität möglich gewesen, und zwar über den gesamten Zeitraum.

#### VP 14:

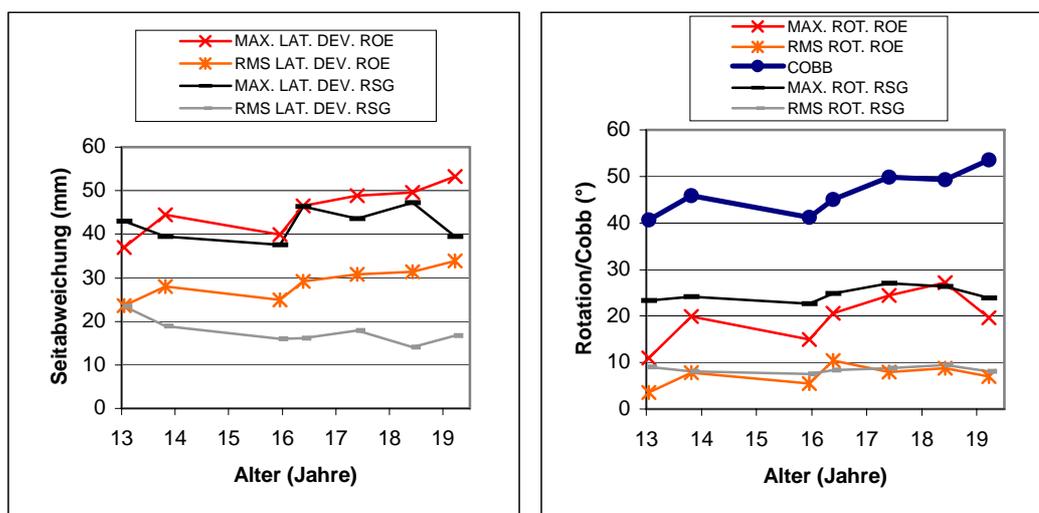


Abbildung 25

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP14.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
$r^2$	0,02	0,2	0,32	0,04	0,94**	0,96**	0,51	0,22
SD	4,0	2,93	1,45	0,73	1,55	0,81	4,18	2,17
b	0,34	-1,01	0,33	0,04	2,18	1,36	1,63	0,47
SF	0,71	0,38	0,28	0,13	0,56	0,36	0,79	0,39

Tabelle 40

Lineare Regressionen ( $r^2$ , SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,68°/Jahr; SF=0,54°) für VP14 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,06	0,34	0,76*	0,01
SD	3,92	2,68	0,86	0,74

Tabelle 41

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP14 zueinander.

Bei VP 14 wurden innerhalb von 6,5 Jahren 7 Bildpaare angefertigt. Der Cobb-Winkel der nahezu einbogigen, rechtskonvexen, thorakalen Skoliose (King IV) nahm von 40° ausgehend um 14° zu. Es handelt sich also um eine relativ starke Skoliose, die sogar eine Operationsindikation darstellt.

Lineare Regression:

Der Cobb-Winkel und die Röntgenseitabweichungen geben einen einheitlichen Verlauf wieder, in welchem sich bis auf eine Befundverbesserung zur dritten Untersuchung eine konstante Zustandsverschlechterung zeigt. Die Korrelationen sind entsprechend hoch ( $r^2=0,94$  und  $r^2=0,95$  mit  $p$  jeweils  $<0,005$ ). Die maximale Rotationskurve entspricht dem ebenfalls, allerdings verbessert sich die Wirbelkörperrotation zum letzten Untersuchungszeitpunkt, so dass es keinen statistisch gesicherten Zusammenhang gibt. Die gemittelten Rotationswerte weichen in den letzten drei Untersuchungen ab; die Rotation nimmt im Gegensatz zum Cobb-Winkel und der Seitabweichung ab.

Die rasterstereografische Verlaufseinschätzung scheint bei VP 14 unabhängig von der radiologischen zu sein. Es lassen sich keine Zusammenhänge erkennen, lediglich die Rotationsmaxima ähneln sich im Verlauf ( $r^2=0,76$ ;  $p=0,01$ ). Positiv im Vergleich der RSG und Röntgenbeurteilung ist, dass es insgesamt vergleichbar hohe Absolutwerte sind, die somit eine schwere Skoliose diagnostizieren, der Verlauf wird durch die Rasterstereografie jedoch nicht exakt genug wiedergegeben.

Progredienzen:

Entsprechend den konträren Verlaufseinschätzungen zwischen den beiden Methoden lassen sich auch keine Gemeinsamkeiten bezüglich der Progredienzen feststellen. Während es in der rasterstereografischen Beurteilung zu keinem Anstieg der Deformität kommt, teilweise sogar zu einer Verbesserung, zeigen die radiologischen Merkmale übereinstimmend mittelstarke Deformitätszunahmen.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
7	4,1	2,55

Tabelle 42

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP14.

Die rasterstereografische Verlaufsbeurteilung divergiert in diesem Fall von der radiologisch gemessenen. Die Translationen zeigen sogar ein gegensätzliches Verhalten, auch wiedergegeben durch eine hohe Differenz von  $\sigma_x=4,1\text{mm}$  in der Kurvenüberlagerung. Die Gründe dafür sind unklar. Die absoluten Werte stimmen im Wesentlichen überein und sind als hoch einzustufen, so dass als Gemeinsamkeit die Diagnose einer starken thorakalen Skoliose bleibt. Die Deformität ist mit über  $50^\circ$  nach Cobb sehr ausgeprägt, was offensichtlich Probleme bei der Oberflächenanalyse aufwirft. Hier zeigt sich, dass bei Deformitäten über  $50^\circ$  eine ein- bis zweimalige Röntgenkontrolle pro Jahr erforderlich bleibt.

#### VP 15:

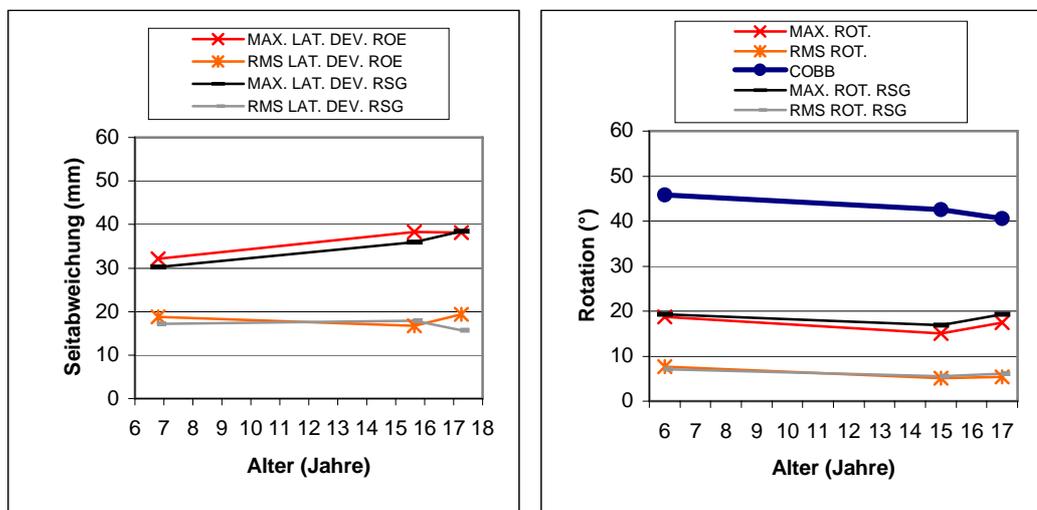


Abbildung 26

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP15.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
r <sup>2</sup>	-0,99	0,27	0,03	0,51	-0,85	0,01	0,21	0,74
SD	0,51	1,35	1,97	0,75	1,91	1,86	2,41	1,01
b	0,73	-0,06	-0,1	-0,12	0,61	-0,04	-0,22	-0,24
SF	0,11	0,19	0,23	0,07	0,1	0,23	0,26	0,07

Tabelle 43

Lineare Regressionen (r<sup>2</sup>, SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=-0,45°/Jahr; SF=0,11°) für VP15 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,91	0,8	0,91	0,94
SD	1,8	0,7	0,6	0,26

Tabelle 44

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP15 zueinander.

Die beobachtete Verlaufszeit von VP 15 beträgt über 10 Jahre bei drei Bildpaaren. Der Cobb-Winkel verbessert sich von 46° auf 41°. Eingang in die Studie erhielt der Fall dadurch, dass neben der thorakalen Hauptkrümmung (Apex TH 10) eine hochthorakale Nebenkrümmung zwischen TH 6 und TH 2 eine Winkelzunahme erfuhr. Die dargestellten Messwerte beziehen sich aber alle auf die Hauptkrümmung. Es handelt sich um eine thorakale Skoliose Typ King V.

Lineare Regression:

Man erkennt den unterschiedlichen Verlauf des Cobb-Winkels im Vergleich zu den anderen Parametern, insbesondere der Translation. Die geringfügige Befundverbesserung des Cobb-Winkels trotz gleichzeitiger Verstärkung der Seitabweichung bleibt unklar. Korrelationen zwischen dem Cobb-Winkel und anderen Parametern lassen sich somit bei diesem Patienten nicht sinnvoll durchführen, zumal auch nur drei Aufnahmen existieren.

Im Vergleich der Seitabweichungen beider Verfahren kommt es zu einem parallelen Verlauf. Die hohen Korrelationskoeffizienten bestätigen den visuellen Eindruck im Diagramm (r<sup>2</sup>=0,91 bei den Maxima und r<sup>2</sup>=0,8 bei den RMS-Werten). Wie schon bei

VP 7 lassen sich aufgrund der wenigen Bildpaare keine Signifikanzniveaus absichern (p-Werte zwischen 0,2 und 0,3).

Die RSG-/Röntgenrotationen zeigen ebenfalls einen gut übereinstimmenden Verlauf mit hohen Koeffizienten ( $r^2=0,91$  und  $r^2=0,94$ ).

Progredienzen:

Die einzelnen Progredienzen der gleichnamigen Werte liegen sehr nah beieinander und im Vergleich zur Gesamtgruppe im unteren Bereich.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
3	2,83	2,25

Tabelle 45

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP15.

Der Verlauf der VP 15 ist insofern besonders, als dass es scheinbar widersprüchlich zu einer Verbesserung des Cobb-Winkels trotz Zunahme der Translation, und zwar sowohl radiologisch als auch rasterstereografisch gemessen, kommt. Die Skoliose wird radiologisch und lichtoptisch sehr gut übereinstimmend als stark ausgeprägt eingestuft. Die RSG wird bei VP 15 in vollem Umfang der radiologischen Einschätzung gerecht.

VP 16:

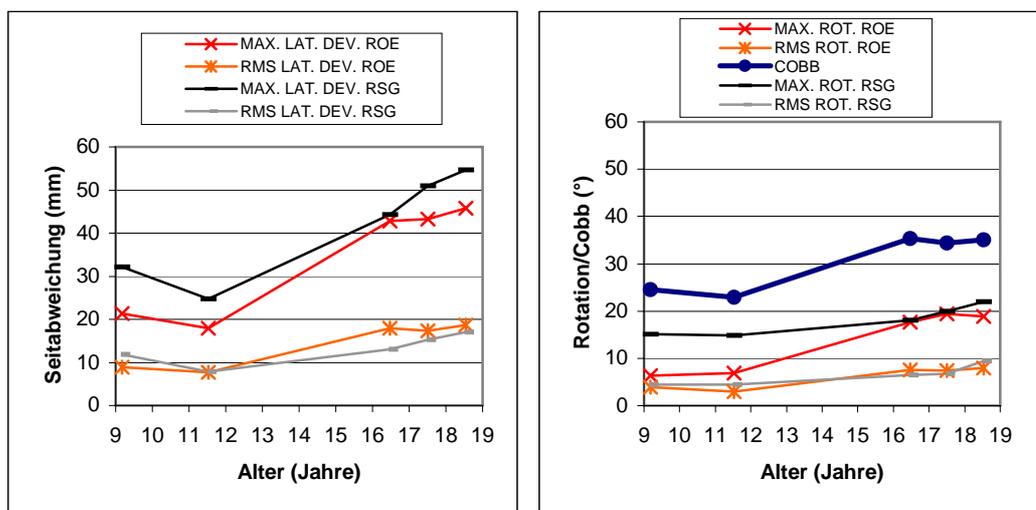


Abbildung 27

Parameter der Translation und Rotation/Cobb-Winkel von VP16.

	RSG-Parameter				Röntgenparameter			
	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
r <sup>2</sup>	0,88*	0,72	0,77	0,66	0,99**	0,99**	0,96**	0,99**
SD	5,06	2,14	1,7	1,37	1,57	0,46	1,47	0,25
b	2,82	0,67	0,7	0,44	3,13	1,24	1,58	0,53
SF	0,75	0,31	0,16	0,14	0,59	0,24	0,21	0,12

Tabelle 46

Lineare Regressionen (r<sup>2</sup>, SD in mm bzw. °) der Röntgen- und RSG-Parameter zum Cobb-Winkel und Progredienzen (b in mm bzw. °/Jahr, SF) inkl. jeweiliger Standardabweichung (b für Cobb=1,42°/Jahr; SF=0,31°) für VP16 (\*=signifikant, \*\*=hochsignifikant).

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
r <sup>2</sup>	0,93*	0,76	0,83*	0,72
SD	3,8	1,99	1,45	1,25

Tabelle 47

Lineare Regressionen der jeweils gleichnamigen Röntgen- und RSG-Parameter von VP16 zueinander.

Die linkskonvexe Lumbalskoliose mit lumbaler Hauptkrümmung (King I) wurde anhand von 5 Aufnahmen über fast 10 Jahre beobachtet. Der Cobb-Winkel steigt bis zum 17. Lebensjahr um 13° auf 36° an, wobei die entscheidende Verschlechterung bei der dritten Untersuchung festgestellt wird.

Lineare Regression:

Alle radiologisch erhobenen Parameter zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf. Nach einer leichten Verbesserung bzw. einer Konstanz bei den ersten beiden Untersuchungen kommt es zum dritten Untersuchungszeitpunkt zu einer deutlichen Verstärkung der Deformität, woraufhin sich wiederum ein eher konstant bleibender Befund einstellt. Alle Korrelationen zwischen dem Cobb-Winkel und den radiologischen Rotationen und Translationen zeigen mit r<sup>2</sup>=0,96 und r<sup>2</sup>=0,99 einen sehr hohen, signifikanten Zusammenhang (p<0,003).

Die RSG-Rotationen unterscheiden sich vom Cobb-Winkel durch einen geringeren Anstieg der Deformität zur dritten Untersuchung. Dennoch zeigen die Koeffizienten mit r<sup>2</sup>=0,77 (p=0,05) für die maximale Rotation und r<sup>2</sup>=0,66 (p=0,09) für die gemittelte Rotation starke Zusammenhänge, welche nur knapp das 5%-Signifikanzniveau verfehlen.

Ähnlich verhalten sich die Translationen, welche aber die entscheidende Verschlechterung zur dritten Untersuchung wiedergeben. Daher liegen die Korrelationskoeffizienten etwas höher, der Zusammenhang der maximalen Seitabweichung zum Cobb-Winkel ist signifikant.

Die Seitabweichungen untereinander zeigen einen parallelen Verlauf, die Progredienz in den letzten beiden Messungen fällt rasterstereografisch allerdings höher aus ( $r^2=0,93$ ;  $p<0,008$  und  $r^2=0,76$ ;  $p=0,056$ ).

Die Rotationsverläufe stimmen gut überein, welches sich in hohen Korrelationen ausdrückt. Mit  $r^2=0,83$  ( $p=0,03$ ) ist dieser bei den Maximalwerten signifikant. Die gemittelten Rotationen verfehlen mit einem p-Wert von 0,07 ( $r^2=0,72$ ) leicht das Signifikanzniveau.

Progredienzen:

Die maximalen Translationen liegen mit 2,82mm/Jahr rasterstereografisch und 3,13mm/Jahr radiologisch gemessen sehr eng beieinander. Die gemittelten Werte sind radiologisch mit 1,24mm/Jahr fast doppelt so hoch als die lichtoptische Progredienz (0,67mm/Jahr). Die gemittelten Translationen verändern sich ebenfalls gleichgerichtet und sind gut vergleichbar.

Der Progredienzvergleich der Rotationen zeigt eine hohe Übereinstimmung der gemittelten (0,44°/Jahr zu 0,53°/Jahr) und eine hohe Differenz der maximalen Werte (0,7°/Jahr gegenüber 1,58°/Jahr), welches sich durch die Unterschiede zum Untersuchungsbeginn erklärt.

Der Cobb-Winkel steigt im Schnitt um ca. 1,4°/Jahr.

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
5	2,61	2,43

Tabelle 48

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) VP16.

Der Vergleich der rasterstereografisch und radiologisch ermittelten Translationen und Rotationen zeigt eine hohe Übereinstimmung und z.T. auch signifikante Zusammenhänge. Auch der Verlauf des Cobb-Winkels lässt sich anhand der radiologischen Rotationen und Translationen, aber auch rasterstereografisch insbesondere durch die maxi-

male Seitabweichung nachvollziehen. Die Progredienzen werden von jeweils einem Rotations- und Translationswert übereinstimmend dargestellt.

Die Entwicklung der Skoliose von VP 16 wird bei Berücksichtigung aller Werte rasterstereografisch und röntgenologisch übereinstimmend dargestellt.

### 3.2 Analyse des Gesamtkollektivs

#### 3.2.1 Vergleich der Wirbelsäulenform durch Kurvenüberlagerung

Die Ergebnisse der vergleichenden Kurvenüberlagerungen der Rotationskurven und der Kurven der Frontalprojektion sind der Tab. 49 zu entnehmen und zeigen die Differenzen im Gesamtdurchschnitt zwischen den beiden Verfahren, oder anders ausgedrückt den Messfehler der Rasterstereografie im Vergleich zur Röntgenaufnahme (vgl. Kap. 2.4). Ein mittlerer Fehler im Sinne eines root mean square (RMS) von etwas über 3mm im Vergleich der Seitabweichungen und ca. 2,5° bei den Rotationen ist als sehr gering einzustufen, insbesondere wenn man bedenkt, dass beispielsweise der Cobb-Winkel zeichnerisch nicht genauer als +/-5° bestimmbar ist (37).

Anzahl Kurvenvergleiche	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_{ro}$ (°)
96	3,21	2,45

Tabelle 49

Mittlere quadratische Abweichungen der Seitabweichung ( $\sigma_x$ ) und Rotation ( $\sigma_{ro}$ ) der Gesamtgruppe.

Die Werte sind vergleichbar mit anderen Studien, in denen mit der gleichen Methodik gearbeitet wurde (vgl. Kap. 2.4). Sie belegen die hohe Genauigkeit der Rasterstereografie im Vergleich zur Röntgenaufnahme.

### 3.2.2 Vergleich radiologischer und rasterstereografischer Parameter

In diesem Kapitel werden die in der Einzelfallanalyse diskutierten Parameter der RSG- und Röntgen-Translation und Rotation und der Cobb-Winkel in Bezug auf die Gesamtgruppe verglichen.

Um die 16 Einzelverläufe als Gesamtheit zu betrachten, wird die Entwicklung der verschiedenen Parameter mit zwei Methoden beschrieben. Zunächst werden alle RSG- und Röntgenanalysen zu Beginn und zum Ende der Verlaufsbeurteilung dargestellt. Die Veränderung der Parameter von der ersten zur letzten Untersuchung wird als prozentuale Progredienz angegeben.

Als weiteres Maß für die Progredienz wird das arithmetische Mittel der jeweils 16 Steigungen (b) der Regressionsgeraden jedes Parameters über der Zeit angegeben.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen werden bezogen auf die Gesamtgruppe abschließend zusammengefasst.

Prozentuale Progredienzen:

Die Erstuntersuchungen der 16 Patienten (Tab. 50) ergeben bei den Werten der Wirbelkörpertranslationen, hier „lateral Deviation“, ähnliche Mittelwerte und Standardabweichungen bei beiden Verfahren. Die maximale laterale Deviation liegt rasterstereografisch geringfügig höher als röntgenologisch, die RMS-Abweichungen geringfügig röntgenologisch höher als rasterstereografisch. Die Rotationen werden rasterstereografisch deutlich höher gemessen als in der Röntgenanalyse.

Parameter	Cobb		Max. lat. Dev.		RMS lat. Dev.		Max. Rot.		RMS Rot.	
	ROE	RSG	ROE	RSG	ROE	RSG	ROE	RSG	ROE	RSG
Mittelwert	21,5	17,5	18,9	8,7	8,1	8,6	13,2	3,9	5,5	
SD	12,5	12,8	11,1	7,2	4,6	4,2	4,2	1,7	1,8	

Tabelle 50

Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Parameter der 16 Patienten zu Beginn des Untersuchungszeitraums (Cobb und Rotationen in °, Translationen in mm).

Parameter	Cobb	Max. lat. Dev.	RMS lat. Dev.	Max. Rot.	RMS Rot.
Verfahren	ROE	ROE	RSG	ROE	RSG
Mittelwert	34,6	32,6	37,4	15,5	15,5
SD	10,5	14,3	11,7	8,6	6,0

Tabelle 51

Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Parameter der 16 Patienten zum Ende des Untersuchungszeitraums (Cobb und Rotationen in °, Translationen in mm).

Am Ende der Untersuchungszeiträume kam es bei allen Parametern zu einem deutlichen Anstieg. Während die RMS-Werte beider Verfahren identisch oder fast identisch sind, liegen die maximalen RSG-Translationen und Rotationen rasterstereografisch höher.

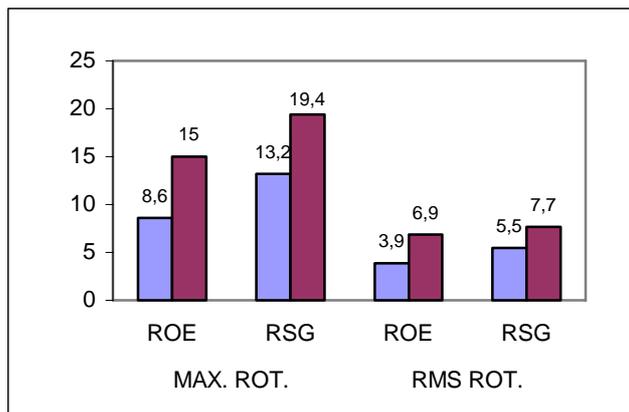


Abbildung 28

Vergleich der RSG- und Röntgenrotationen der Gesamtgruppe zu Beginn (blau) und zum Ende (rot) des Beobachtungszeitraums in °.

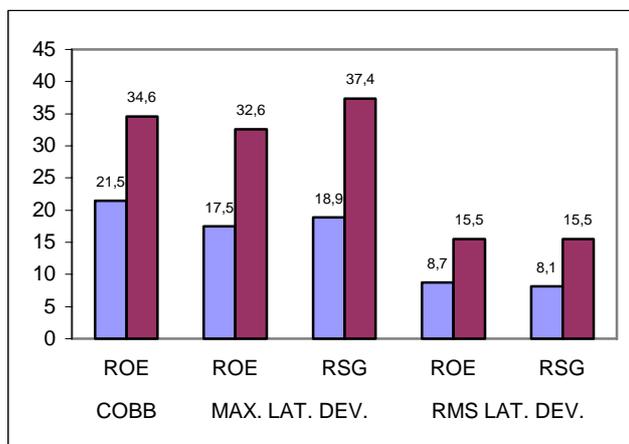


Abbildung 29

Cobb-Winkel in ° und RSG- und Röntgentranslationen in mm zu Beginn (blau) und zum Ende (rot) des Untersuchungszeitraums.

Die prozentualen Zunahmen der Parameter im Untersuchungszeitraum (Tab. 52) liegen homogen im Bereich von 74-87% bei der radiologischen Messung. Rasterstereografisch muss man differenzieren. Die Translationen sind rasterstereografisch stärker progredient (Zunahmen von 97% gegenüber 87% und 90% gegenüber 78%), die Wirbelkörperrotationen weniger progredient (47% gegenüber 74% und 40% gegenüber 77%) als die entsprechenden Röntgenwerte. Das Fortschreiten des Cobb-Winkels liegt mit 61% unterhalb der röntgenologischen Rotations- und Translationszunahme und zwischen der rasterstereografischen Rotations- und Translationszunahme.

Parameter	Cobb	Max. lat. Dev.		RMS lat. Dev.		Max. Rot.		RMS Rot.	
		ROE	ROE	RSG	ROE	RSG	ROE	RSG	ROE
Diff. (%)	61	87	97	78	90	74	47	77	40

Tabelle 52

Prozentuale Zunahme der Parameter vom Beginn zum Ende des Untersuchungszeitraums

Insgesamt sind die RSG- und Röntgentranslationen gut vergleichbar (s. Abbildung 29). Die Mittelwerte und auch die Standardabweichungen der Seitabweichungen divergieren geringfügig, die Zunahme ist rasterstereografisch allerdings stärker ausgeprägt. Dadurch liegt die prozentuale Progression rasterstereografisch ca. 10% höher.

Die RSG-Rotationen (s. Abbildung 28) sind im Durchschnitt höher als die Röntgenrotationen, vor allem zu Untersuchungsbeginn, also bei geringfügigeren Rotationsfehlstellungen. Zum Untersuchungsende fallen die Differenzen niedriger aus, so dass hohe Unterschiede in der prozentualen Progression resultieren. Die rasterstereografische prozentuale Progredienz ist schwächer ausgeprägt als die radiologische Rotationsprogredienz.

Die Veränderungen des Cobb-Winkels werden von den Translationsparametern beider Verfahren gut widerspiegelt. Die prozentuale Veränderung liegt beim Cobb-Winkel mit einem Zuwachs von 61% im Untersuchungszeitraum niedriger. Die prozentuale Progredienz des Cobb-Winkels liegt genau zwischen den prozentualen Progredienzen der rasterstereografischen Translationen und Rotationen.

Allerdings sind diese Aussagen unter der Berücksichtigung, dass nur 16 Verläufe vorliegen, und die prozentualen Veränderungen von Messfehlern abhängig stark schwanken können, zu relativieren. Die höheren Ausgangswerte der rasterstereografischen Ro-

tation bewirken bei gleicher Progredienz in °/Jahr eine geringere Progression in Prozent. Dieses ist möglicherweise auf den oben erwähnten systematischen Fehler in der Positionierung des Patienten beim Röntgen zurückzuführen.

Zu bedenken ist, dass in der Rasterstereografie die Oberflächenrotation und im Röntgen die Wirbelrotation gemessen wird. Die Oberflächenrotation hängt zwar von der Wirbelrotation ab, wird aber auch von anderen Faktoren wie z.B. den Costotransversalgelenken und der Form der Rippen etc. beeinflusst.

Progredienzen in °/Jahr bzw. mm/Jahr:

Die Progredienzen, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind, basieren auf den Steigungen b der einzelnen Parameter aus der Einzelfallanalyse. Diese Steigungen sind weniger anfällig gegenüber Extremwerten oder Messfehlern, da pro individuellem Verlauf alle Bildpaare in die Berechnung miteingehen. Allerdings können diese Progredienzen einen gutartigeren Verlauf als tatsächlich vorhanden dokumentieren, wenn ein längerer Zeitraum der Befundkonstanz z.B. nach Abschluss des Körperwachstums mitverfolgt wurde. Dies gilt dann aber für alle Parameter und schränkt die intraindividuelle Vergleichbarkeit nicht ein, ist aber im interindividuellem Vergleich zu berücksichtigen.

Parameter	Cobb	Max. lat. Dev.		RMS lat. Dev.		Max. Rot.		RMS Rot.	
	ROE	ROE	RSG	ROE	RSG	ROE	RSG	ROE	RSG
Progr.	1,79	2,04	2,65	0,91	1,01	0,89	0,84	0,36	0,34
SD	1,24	1,67	1,37	0,77	0,8	0,86	0,56	0,35	0,29

Tabelle 53

Progredienzen der einzelnen Parametern für die Gesamtgruppe ermittelt als Mittelwert der jeweils 16 Steigungen b der Regressionsgeraden der Einzelverläufe (in °/Jahr bzw. mm/Jahr).

Die Progredienz der maximalen Wirbelseitabweichung wird durch die Rasterstereografie mit 2,65mm/Jahr höher gemessen als röntgenologisch mit 2,04mm/Jahr. Hier gibt es eine Parallelität zu der prozentualen Progredienz. Die gemittelten RSG- und Röntgen-Translationen und auch die Rotationen stimmen untereinander sehr gut überein, mit fast identischen Progredienzen und Standardabweichungen. Die gemittelten Werte liegen ca. 60% unterhalb der maximalen Werte. In der prozentualen Progression sind die Unter-

schiede zwischen den gemittelten und den maximalen Werten wesentlich geringer oder gar nicht vorhanden. Dies ist kein Widerspruch, sondern durch den unterschiedlichen mathematischen Hintergrund erklärbar, da die gemittelten Werte einen entsprechend geringeren Ausgangswert haben.

Ein Vergleich der Translationen und Rotationen mit der Progredienz des Cobb-Winkels muss im Gegensatz zu der prozentualen Progredienz die physikalischen Einheiten berücksichtigen. Deshalb wird im folgenden ausschließlich von Beträgen gesprochen. Die hohen Standardabweichungen der Progredienzen liegen in den teilweise hohen interindividuellen Unterschieden der jeweiligen Parameter begründet. Deswegen sind die folgenden Beziehungen und Abschätzungen der Progredienz des Cobb-Winkels aus den anderen Parametern als grobe Orientierung zu verstehen.

Der Betrag der Progredienz des Cobb-Winkels kann in etwa aus folgenden Beziehungen abgeschätzt werden:

-Er liegt zwischen den Progredienzen der maximalen und gemittelten RSG-Translation.

-Er beträgt in etwa das doppelte der maximalen RSG- oder Röntgen-Rotationsprogredienz.

-Er liegt methodenübergreifend zwischen den Progredienzen der maximalen Translationen und Rotationen.

-Der Betrag der Progredienz der maximalen Röntgentranslation liegt geringfügig über dem des Cobb-Winkels.

Da, wie im nächsten Abschnitt erläutert wird, die radiologischen und rasterstereografischen Translationen bessere Korrelationen und zuverlässigere qualitative Zusammenhänge zum Cobb-Winkel haben als die Rotationen, sollte sich ein Abschätzen des Cobb-Winkels in erster Linie an den Translationen orientieren.

Ergebnisse der linearen Regressionen bezüglich der Gesamtgruppe:

In den folgenden zwei Tabellen sind die arithmetischen Mittelwerte der linearen Regressionen aller 16 Patienten zum Cobb-Winkel und der gleichnamigen Parameter zueinander angeführt.

	Max.LD	RMS-LD	Max.Rot.	RMS-Rot.
MW $r^2$ (RSG)	0,8	0,68	0,63	0,54
MW $r^2$ (ROE)	0,89	0,8	0,57	0,63

Tabelle 54

Mittelwerte der 16 linearen Regressionen der Röntgen- und RSG-Translationen und Rotationen zum Cobb-Winkel.

Im Vergleich der radiologischen und rasterstereografischen Lateraldeviationen und Rotationen zum Cobb-Winkel erkennt man vergleichbare durchschnittliche Korrelationskoeffizienten. Übereinstimmend ergeben sich hohe Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten zwischen dem Cobb-Winkel und den Translationen und mäßig hohe zwischen dem Cobb-Winkel und den Rotationen.

	Max.LD's	RMS-LD's	Max.Rot.'s	RMS-Rot.'s
MW $r^2$	0,8	0,73	0,57	0,49

Tabelle 55

Mittelwerte der 16 linearen Regressionen der Röntgen- und RSG-Translationen und –Rotationen zueinander.

Der Vergleich der jeweils zwei Parameter zueinander zeigt ähnliche Ergebnisse. Auch hier gibt es hohe Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten bei den Translationen und mittlere bei den Rotationen.

Die Tabelle 56 fasst die Ergebnisse der linearen Regressionen der rasterstereografischen Analyse im Vergleich zum röntgenologischen Verlauf der untersuchten Skoliosen zusammen. Die Anzahl der positiven Korrelationen aus den Einzelfallanalysen zwischen dem Cobb-Winkel und den 4 Röntgen- sowie den 4 RSG-Parametern und den 4 RSG/Röntgenparametern zueinander wird hier angegeben.

	Cobb/ROE	Cobb/RSG	RSG/ROE	Bew.
VP1	4	4	3 (Transl)	++
VP2	2 (Transl)	3 (Transl)	2 (Transl)	+
VP3	4	4	4	++
VP4	2 (je 1)	2-3 (je 1)	2 (je 1)	+
VP5	2 (Transl)	4	2 (Transl)	+
VP6	4	4	4	++
VP7	4	3 (Transl)	3 (Transl)	+
VP8	2 (Transl)	4 (Transl)	3 (Transl)	++
VP9	4	2 (je 1)	2 (je 1)	0
VP10	4	3 (Transl)	3 (Transl)	+
VP11	3 (Transl)	4	2 (Transl)	+
VP12	2 (Transl)	1 (Transl)	2 (je 1)	0
VP13	4	3 (Transl)	2 (Transl)	+
VP14	2 (Transl)	0	1 (Rot)	-
VP15	2 (je 1)	1 (Transl)	4	+
VP16	4	4	4	++
Ges.	45 v. 64	47 v. 64	43 v. 64	

Tabelle 56

Anzahl der positiven Korrelationen/Verlaufsübereinstimmungen von VP1-VP16 (jeweils von 4) und gesamt (von 64). Als positiv gilt entweder  $p < 0,05$  oder  $r^2$  ca. 0,6 und höher). In der letzten Spalte die Bewertung der RSG-Analyse (++ für sehr gut, + für gut, 0 für zufriedenstellend, - für schlecht).

Als positive Korrelation wird jede signifikante Korrelation gewertet. Da aufgrund der teilweise geringen Anzahl von Untersuchungen, z.B. bei VP7, oder anderen nachvollziehbaren Gründen sogar Korrelationskoeffizienten von über  $r^2 > 0,9$  nicht signifikant sind, werden auch nicht signifikante, mindestens mittelstarke Korrelationen mit  $r^2$  bei 0,6 als positiv gerechnet, wenn der Zusammenhang auch deskriptiv offensichtlich ist.

In der untersten Zeile ist die Gesamtanzahl positiver Korrelationen angegeben. In der letzten Spalte die jeweils abschließende Bewertung der rasterstereografischen Beurteilung des Patientenverlaufs im Vergleich zur radiologischen in den Kategorien ++, +, 0 oder -.

Einer nahezu vollständige Übereinstimmung der Verlaufsbeschreibung beider Methoden wurde mit ++ bewertet. Ein + wurde vergeben, wenn die Veränderung des Cobb-Winkels von mindestens genauso vielen RSG- wie Röntgen-Parametern erfasst wurde,

oder mindestens ein Teilaspekt der Skoliose (Translation oder Rotation) rasterstereografisch vollständig übereinstimmend (also maximale und gemittelte Translation oder Rotation) zur Röntgenanalyse positive Korrelationen erbrachte. Mit 0 bewertet wurden Verläufe, in denen die RSG mit mindestens 2 gleichnamigen Parametern der Röntgenanalyse gut korrelierte. Mit „Trans“ oder „Rot“ wird zusätzlich angegeben, welches der Merkmale übereinstimmt, bzw. besser übereinstimmt.

In 13 von 16 Fällen besteht eine gute bis sehr gute Vergleichbarkeit der rasterstereografischen zur radiologischen Analyse, 2 Verläufe stimmen zufriedenstellend überein und lediglich bei einem Patienten ist die rasterstereografische Einschätzung unzureichend. Ganz überwiegend folgt radiologisch und rasterstereografisch besonders die Translation der Entwicklung des Cobb-Winkels nach.

Auch im Vergleich der Translationen und Rotationen untereinander kommt es bei den Translationen zu besseren Ergebnissen.

Insgesamt hat die Rasterstereografie mit 47 von 64 möglichen positiven Korrelationen mindestens genauso oft den Cobb-Winkel-Verlauf anhand der Parameter Translation/Rotation erfasst, wie die radiologisch ermittelten Translationen/Rotationen mit 45 positiven Korrelationen. Mehr kann an dieser Stelle nicht erwartet werden. Die Häufigkeit der Übereinstimmung zwischen den direkt vergleichbaren radiologischen und RSG-Parametern zeigt mit 43 von 64 möglichen positiven Korrelationen ein gutes Ergebnis. Auch hier ergibt die Translation eine höhere Übereinstimmung als die Rotation.

### **3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Bei Betrachtung der 16 Einzelverläufe lassen sich folgende Aussagen machen:

1. In 15 von 16 Fällen konnte die Rasterstereografie die Charakteristik des individuellen Verlaufs wiedergeben. Die Differenzen in den Kurvenüberlagerungen der Frontalprojektionen und Rotationskurven waren minimal.

Es stellte sich in der Mehrzahl der Fälle ein mehrphasiger Verlauf sowohl radiologisch als auch rasterstereografisch heraus. Dies trifft für den Cobb-Winkel und auch die rasterstereografischen und röntgenologischen Translationen und Rotationen zu. Dieser war zumeist geprägt von einer Progredienzphase, in der es zu einer maximalen Zunahme der Deformität über einen begrenzten Zeitraum kam. Zum Ende des Untersuchungszeitraums schloss sich eine eher konstante Phase an. Vor dem Schub zeigte sich entweder eine Befundkonstanz oder eine vorübergehende Verbesserung. In wenigen Fällen fand sich eine lineare Entwicklung. Auch in diesen Fällen gab es Übereinstimmung zwischen den beiden Meßmethoden. Die minimalen Differenzen der Kurvenüberlagerungen (s. Kap. 2.4 und 3.2.1) beweisen die Genauigkeit der Rasterstereografie im Vergleich zur Röntgenaufnahme. Sie bewegen sich mit durchschnittlichen Differenzen von 3,2mm und 2,5° sogar unterhalb der Messgenauigkeit des Cobb-Winkels. Dieser ist z.B. laut Neugebauer et. al. (63) zeichnerisch nicht genauer als +/-5° bestimmbar.

Diese Erkenntnis ist sehr wichtig. Bei der Betreuung eines Patienten mit idiopathischer Skoliose sind der individuelle Spontanverlauf, Therapieeffekte sowie insbesondere Phasen der Progredienz oder Konstanz mit Hilfe der Rasterstereografie möglich.

2. Die absoluten Beträge der Translationen und Rotationen können sich in Einzelfällen radiologisch und rasterstereografisch interindividuell deutlich unterscheiden. Die Relationen bleiben intraindividuell im Verlauf konstant.

Translationen:

Eine rasterstereografische maximale Seitabweichung von 25mm kann radiologisch gemessen 40mm betragen, wie z.B. bei VP2. Die Relationen zwischen den beiden Meßmethoden bleiben aber innerhalb eines individuellen Verlaufs gewahrt, so dass diese Unterschiede wahrscheinlich im Phänotyp des Patienten mitbegründet liegen.

In 5 Fällen waren die RSG-Translationen deutlich höher (VP1, 2, 4, 8, 11), in 3 Fällen deutlich niedriger (VP7, 9, 14), 50% der Patienten wiesen vergleichbare Seitabweichungen auf. Hier ist es notwendig, anhand parallel aufgenommener RSG- und Röntgenauswertungen die Höhe der rasterstereografischen Translationen auf die der Röntgenaufnahme zu „eichen“, um dann im Verlauf das Ausmaß der Deformität rasterste-

reografisch korrekt beurteilen zu können. Zur Verlaufsbeurteilung könnte alternativ das mathematische Prinzip einer Z-Transformation angewendet werden.

Eine Unterschätzung der rasterstereografischen Seitabweichung trat vor allem durch eine medialisierte Symmetrielinie auf. Auch durch eine interaktive Apexvorgabe war es bei einigen Untersuchungen nicht möglich (s. VP 5, 6, 9), die Symmetrielinie ausreichend weit zu lateralisieren. Wie in der Einzelfallanalyse erläutert, führt dies zu einer Unterschätzung der Pathologie. Diese ist durch einen erfahrenen Untersucher erkennbar und kann durch eine manuelle Korrektur ausgeglichen werden.

Rotationen:

Bei den Rotationen kommt der bereits angesprochene Aspekt der medialisierten Symmetrielinie ebenfalls zum Tragen, so dass in einigen Analysen (VP 6) die rasterstereografische Rotation deutlich niedriger als die radiologische ausfiel. 50% der untersuchten Patienten zeigten nur geringe Differenzen zwischen den rasterstereografischen und radiologischen Rotationen. Bei 7 Patienten (VP1, 2, 3, 4, 8, 13, 16) fielen höhere Rotationswerte bei der RSG auf, insbesondere zum Untersuchungsbeginn, also bei geringeren Deformitäten. Zum Untersuchungsende glich sich die rasterstereografische Rotation zunehmend der radiologischen an. Dieses Ergebnis wird in dem Kapitel 5.2.2 dargestellt. Für diesen Sachverhalt können folgende mögliche Ursachen angeführt werden:

Hierholzer beschrieb (35) einen systematischen Fehler, der zu einer Reduktion der röntgenologisch gemessenen Rotation führt. Durch das Positionieren des Patienten mit dem Rücken, also auch dem Rippenbuckel/Lendenwulst, an die Filmkassette, kann es zu einer passiven Korrektur der Fehlrotation kommen. Ein entscheidender Grund liegt zudem darin, dass bei der rasterstereografischen Beurteilung der Rotation die gesamte dreidimensionale Thoraxasymmetrie miteingeht. Es wird die Oberflächenrotation gemessen, während bei der digitalisierten Röntgenbildanalyse das Lageverhältnis der Pedikel zu den Wirbelkörpertaillen Grundlage der Berechnung der Wirbelrotation ist. Es werden hier durch die beiden Verfahren nicht exakt die gleichen Substrate gemessen, die rasterstereografische Rotation hängt zwar von der Wirbelrotation ab, ist dieser aber nicht gleichzusetzen, da auch andere Faktoren die Oberflächenrotation mit beeinflussen.

3. Der Cobb-Winkel korreliert in fast allen Fällen in hohem Ausmaß mit den röntgenologischen und rasterstereografischen Translationen und weniger stabil mit den Rotationen.

Da die beiden Methoden in diesem Ergebnis übereinstimmen, kann man folgern, dass die Translation generell gut mit dem Cobb-Winkel harmoniert. Eine Zunahme der Seitabweichung ist auch mit einer Zunahme des Cobb-Winkels verbunden. Ein Rückschluss von der Rotationskomponente auf den Cobb-Winkel ist nicht immer sicher durchzuführen. Auch dies gilt für Röntgen und Rasterstereografie. Letztlich bleibt unklar, wie sich Rotation und Cobb-Winkel zueinander verhalten. Es gibt derzeit keine Studien, die einen direkten Zusammenhang belegen. Dies liegt sicherlich auch daran, dass die Rotation der Wirbelsäule im Klinikalltag nur durch die eher ungenauen Meßmethoden nach Perdriolle oder Nash und Moe durchführbar sind. Mithilfe der Rasterstereografie können hier weitere Erkenntnisse erwartet werden, da diese Methode immer eine Oberflächenrotationsanalyse liefert und so bei routinemäßiger Anwendung automatisch Erfahrungswerte ermöglicht.

4. Die Progredienzen der rasterstereografischen und röntgenologischen Translationen und Rotationen stimmen weitgehend überein. Sie erlauben qualitativ ausreichend genaue Rückschlüsse auf die Progredienz des Cobb-Winkels. Eine quantitative Einschätzung des Cobb-Winkels ist jedoch nicht unproblematisch und am ehesten mit den Translationen möglich.

RSG versus Röntgen:

Um die Progredienzen einzuschätzen wurde für jeden Parameter die prozentuale und die absolute Progredienz in mm/Jahr bzw. °/Jahr berechnet. Es zeigte sich, dass die röntgenologischen Seitabweichungen prozentual und in mm/Jahr ca. 10-20% niedriger liegen als die rasterstereografischen Seitabweichungen. In der Progredienz über der Zeit gab es im Vergleich der Rotationen identische Progressionen (ca. 0,8-0,9°/Jahr). Die prozentualen Progressionen der Rotationen sind rasterstereografisch deutlich geringer als röntgenologisch (ca. 45% zu ca. 75%). Dies liegt in der oben beschriebenen höheren raster-

stereografischen Bewertung der Rotationen vor allem zum Untersuchungsbeginn begründet.

#### Translationen versus Cobb-Winkel:

Ein hoher, signifikanter Zusammenhang zum Cobb-Winkel lässt sich in fast allen Fällen zu den radiologischen und rasterstereografischen Translationen nachweisen. Anhand der Verläufe konnte gezeigt werden, dass mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit ein Ansteigen des Cobb-Winkels auch ein Ansteigen der rasterstereografischen Translationen und umgekehrt zur Folge hat, nämlich bei 14 von 16 Patienten. Lediglich bei VP14 und VP15 war dies nicht der Fall. Bei VP14 konnte die Rasterstereografie keine zufriedenstellende Verlaufsanalyse bieten, denn die Röntgentranslationen zeigten eine dem Cobb-Winkel analoge Progredienz, während die RSG-Parameter geringfügig abnahmen. VP15 zeigte als einziger Patient trotz Abnahme des Cobb-Winkels eine Zunahme der Translationen, und zwar radiologisch und rasterstereografisch. Somit kann hier der Rasterstereografie keine Ungenauigkeit nachgewiesen werden, da die RSG-Translationen und auch Rotationen sich synchron zu den Röntgenparametern verhalten. Dieser Patient ist scheinbar eine Ausnahme, da sich die Hauptkrümmung gegensätzlich zu den anderen pathologischen Aspekten entwickelt hat. Als mögliche Ursachen sind hier das Körperlängenwachstum (verfolgt wurde ein Zeitraum vom 7. bis zum 18. LJ) und die isolierte Progredienz einer thorakalen Nebenkrümmung anzuführen.

#### Rotationen versus Cobb-Winkel:

Die rotatorischen Progredienzen stimmten in 12 Fällen rasterstereografisch und radiologisch weitgehend überein. Bei VP11 kam es durch Übertragungsungenauigkeiten bei schlechter Röntgenbildqualität zu einer deutlich geringeren Röntgenprogredienz. Bei den Verläufen von VP6 und VP14 blieb die rasterstereografische Progredienz deutlich unter der röntgenologischen.

Im Vergleich zum Cobb-Winkel zeigten sich in nur 7 Fällen vergleichbare Progredienzen auf deskriptiver Basis. In 8 Verläufen (VP2, 4, 6, 7, 12, 13, 14, 16) kam es trotz Progredienz des Cobb-Winkels zu keiner signifikanten Veränderung der RSG-Rotationskomponente. Überwiegend gab es dabei Übereinstimmung zu den Röntgenrotationen. Die Ursachen der Unterschiede bei VP14 wurden bereits erläutert. Bei VP6

lagen die Unterschiede in der Problematik der zu weit medial liegenden Symmetrielinie begründet (Unterschätzung der Oberflächenrotation), wären also manuell auszugleichen. Im Fall VP15 kam es bei Verbesserung des Cobb-Winkels zu einem konstanten Rotationsverlauf.

Ein Rückschluss auf den Cobb-Winkel-Verlauf aus den betrachteten rasterstereografischen Parametern ist auf qualitativer Ebene zuverlässig möglich. Konstanz, Verbesserung und Progression ließen sich in der Zusammenschau der rasterstereografischen Analyse gut erkennen, wobei den Translationen eine zentrale Bedeutung zukommt. Die Verläufe der Rotationen waren rasterstereografisch und röntgenologisch zwar meist harmonisch, doch nur in 50% der Fälle stimmten diese auch mit dem Cobb-Winkel überein.

Quantitative Bestimmung des Cobb-Winkels:

Eine quantitative Bestimmung des Betrages des Cobb-Winkels sowie dessen Progredienz aus den untersuchten Parametern ist schwierig, da es zu teilweise sehr hohen Streuungen der einzelnen Parameter zwischen den einzelnen Patienten kam. Der Parameter „Maximale Seitabweichung“ hat sich in der Korrelationsanalyse als signifikanter und stabiler Wert gezeigt, sowohl untereinander als auch zum Cobb-Winkel. Aus diesem Grund sollte dieser Parameter Grundlage für die Abschätzung des Cobb-Winkels sein.

Die prozentualen Progredienzen der RSG-Seitabweichungen liegen über der prozentualen Progredienz des Cobb-Winkels. Einer gemittelten oder maximalen RSG-Translationsprogredienz von durchschnittlich ca. 90% entspricht in dieser Studie eine ungefähr 60-prozentige Zunahme des Cobb-Winkels. Der Betrag der Progredienz des Cobb-Winkels über die Zeit (ca.  $1,8^\circ/\text{Jahr}$ ) liegt durchschnittlich im mittleren Bereich der Beträge der RSG-Translationen (2,65mm/Jahr für die maximalen und 1mm/Jahr für die gemittelten Translationen).

Eine ähnliche Vergleichsanalyse des Cobb-Winkels zu den Rotationen ist zwar prinzipiell möglich, da sich aber radiologisch und rasterstereografisch nur mittlere Zusammenhänge zum Cobb-Winkel belegen ließen, wären die Ergebnisse nur mit Einschränkungen auf die Analyse eines Patienten anzuwenden. Die bereits angesprochene Streuung zwischen den einzelnen Patienten ist bei den Rotationen höher als bei den Transla-

tionen. Eine quantitative Bestimmung des Cobb-Winkels bzw. dessen Verlauf aus den Rotationen ist nicht genau genug. In nur 50% der Verläufe kam es zu einer Übereinstimmung zwischen dem Cobb-Winkel und den Rotationen. In fast der Hälfte der Fälle blieben die Rotationen deutlich hinter der Progredienz des Cobb-Winkels zurück.

Bei der Bewertung der Progredienzen sollte Folgendes beachtet werden. Die prozentuale Progression beruht auf den jeweils 16 Werten zu Beginn und zum Ende des Untersuchungszeitraums. Sie berücksichtigt nicht den Faktor „Zeit“ sondern gibt die gesamte Progredienz während des Beobachtungszeitraums wieder. Sie ist sehr anfällig gegenüber Messfehlern, da jeder Messfehler direkt das Ergebnis beeinflusst.

Die Progression über die Zeit ist unabhängiger von einzelnen Messfehlern und Extremwerten, da alle Messungen des Verlaufs berücksichtigt werden. Eine längeren Phase der Konstanz oder eine vorübergehende Verbesserung kann jedoch einen drastischen, sehr progredienten Verlauf maskieren, da der Wert entsprechend kleiner wird. Es ist also sinnvoll, prozentuale und absolute Progredienzen bei der Analyse einer idiopathischen Skoliose zu berücksichtigen.

Ergebnis dieses Kapitels ist, dass auf qualitativer Ebene die Rasterstereografie vollständig geeignet ist, den radiologischen Verlauf einer idiopathischen Skoliose wiederzugeben. Wichtigste Belege sind:

- Geringe Differenzen in der Kurvenüberlagerung,
- hohe Übereinstimmung der radiologischen und rasterstereografischen Translationen und Rotationen,
- hohe Übereinstimmung der radiologischen und rasterstereografischen Translationen zum Cobb-Winkel.

Folgende potentielle Fehlerquellen haben sich herausgestellt:

- Die Symmetrielinie in der Rasterstereografie ist Basis der Berechnung der Parameter. In Einzelfällen war es schwierig bis unmöglich, diese trotz Apexvorgabe weit genug nach lateral zu bringen, so dass eine Unterschätzung der Deformität resultiert.
- Es kommt zu einer höheren Bewertung der Rotation durch die Rasterstereografie insbesondere bei geringeren Deformitäten.

## 4 Diskussion

Es wurden die rasterstereografischen und röntgenologischen Verläufe von 16 Patienten (9♀, 7♂) mit idiopathischer Skoliose verglichen. Bei einem durchschnittlichen follow up von 8 Jahren (range 3-14 Jahre) und 6 zu vergleichenden Bildpaaren (range 3-9) kam es zu einer Progredienz des Cobb-Winkels von 22° auf 35°.

Die Rasterstereografie ist ein lichtoptisches, nebenwirkungsfreies Verfahren, welches anhand einer Rückenoberflächenvermessung eine dreidimensionale Wirbelsäulenrekonstruktion berechnet. Daraus lassen sich die Seitabweichung der Wirbelsäule von der Mittellinie, auch Translation oder Lateraldeviation genannt, und die Oberflächenrotation ermitteln, welche innerhalb kürzester Zeit dem Untersucher in einem Auswertungsbogen zur Verfügung stehen. Beide Parameter werden als Maximalwert einem bestimmten Segment zugeordnet sowie als root mean square (RMS) wirbelsäulenübergreifend als gemittelter Wert angegeben. Die am gleichen Tag parallel zu den Rasterstereografien durchgeführten p.-a.-Röntgenbilder sind nach dem Drerup'schen Verfahren digitalisiert und ausgewertet worden. Dieses Verfahren ermöglicht neben einer Frontalprojektion der Wirbelsäule und einer Rotationskurve, welche unmittelbar mittels einer Kurvenüberlagerung der rasterstereografischen Wirbelsäulenrekonstruktion gegenübergestellt werden kann, die z.Zt. genaueste Berechnung der Wirbelkörperrotationen und Seitabweichungen. Auch hier werden neben den Maximalwerten auch die RMS-Werte angegeben und sind direkt mit den Analoga aus der Rasterstereografie zu vergleichen. Der Cobb-Winkel ist ebenfalls Ergebnis der Digitalisierung nach Drerup.

Der Vergleich der beiden Methoden wurde anhand verschiedener Aspekte vorgenommen:

1. Als zentraler Beleg für die geringen Unterschiede der Rasterstereografie und Röntgenanalyse wurde in den vorangegangenen Untersuchungen die Kurvenüberlagerung herangezogen. Die Differenz der virtuellen Überlagerung der Rotationskurven und Frontalprojektionen als root mean square zeigt den Fehler der Rasterstereografie im Vergleich zum Röntgen an.
2. Die Parameter maximale und gemittelte Seitabweichung bzw. Rotation der Rasterstereografie werden im Sinne einer linearen Regression mit den gleichnamigen Pendanten der Röntgenuntersuchungen korreliert und deren Absolutwerte gegenübergestellt.

3. Der Zusammenhang der jeweils 4 Parameter zum Cobb-Winkel wird ebenfalls mittels einer Regressionsanalyse überprüft. Geht eine Veränderung des Cobb-Winkels auch mit einer Veränderung der Translationen und/oder der Rotationen einher? Gibt es hier qualitative Zusammenhänge? Gilt dies für beide Methoden?

4. Die Progredienzen der verschiedenen Parameter im Untersuchungszeitraum werden a) als prozentuale Progredienz von der ersten zur letzten Untersuchung und b) als Progredienz über die Zeit angegeben. Inwiefern stimmen die Progredienzen der rasterstereografischen Translationen und Rotationen mit denen der Radiologie überein? Wie fällt der Vergleich zum Cobb-Winkel aus?

Zu 1.:

In den bisherigen Evaluationen der Rasterstereografie anhand von digitalisierten Röntgenbildern mittels der Kurvenüberlagerung haben sich sehr geringe Differenzen von  $\sigma_x=4-6\text{mm}$  in den Frontalprojektionen und  $\sigma_{ro}=3-4,6^\circ$  für die Rotationskurven als Beweis für die Genauigkeit der Rasterstereografie herausgestellt (13, 15, 28, 30, 74). Diese positiven Ergebnisse konnten in dieser Studie voll bestätigt werden. Bei 96 Bildpaaren kam es zu einer Differenz von  $\sigma_x=3,2\text{mm}$  und  $\sigma_{ro}=2,5^\circ$  bei Cobb-Winkeln bis ca.  $50^\circ$ . Diese minimalen Differenzen belegen entsprechend den vorangegangenen Studien die Verlässlichkeit der rasterstereografischen Rekonstruktion der Wirbelsäule. Dieses Erkenntnis gibt dem Untersucher allerdings noch kein Instrumentarium an die Hand, das aktuelle Ausmaß einer Deformität einzuschätzen oder eine Verlaufsanalyse durchzuführen. Hierzu bedarf es der Betrachtung einzelner Parameter.

Zu 2.:

Da die Translationen und Rotationen der beiden Verfahren den gleichen pathologischen Aspekt der Skoliose bewerten und der Kurvenvergleich minimale Differenzen ergab, wurden hier weitgehende Übereinstimmungen erwartet.

Im Durchschnitt aller 96 Untersuchungen kam es zu geringen Differenzen der Parameter. Die maximalen Translationen lagen rasterstereografisch bei 28mm und röntgenologisch bei 25mm, die gemittelten übereinstimmend bei 12mm. Bei den Rotationen waren die Differenzen höher mit rasterstereografisch gemessenen  $17^\circ$  zu radiologisch  $13^\circ$  für die Maxima und  $7^\circ$  zu  $6^\circ$  für die gemittelten Rotationen.

Die lineare Regression wurde in der Einzelfallanalyse durchgeführt. In 13 Fällen gab es signifikante Korrelationen zwischen den maximalen Translationen, in 2 Fällen waren die Korrelationen trotz Koeffizienten über 0,91 aufgrund der geringen Untersuchungszahlen nicht signifikant und in einem Fall kam es zu keinem Zusammenhang. Die Ergebnisse der gemittelten Translationen zueinander fielen ähnlich aus, bei geringfügig geringeren Korrelationskoeffizienten und Signifikanzen. Der durchschnittliche Korrelationskoeffizient war bei den Maxima 0,8 und den RMS-Translationen 0,73.

Auch bei den Rotationsverläufen korrelierten die Maxima etwas besser, wobei insgesamt die Korrelationen schwächer als bei den Translationen waren. Es kam hier bei 9 Patienten zu einem signifikanten Zusammenhang, bei den gemittelten Rotationen bei 7 Patienten. Der mittlere Koeffizient war bei den Maxima 0,57 und den RMS-Rotationen 0,49. Obwohl rein statistisch der Zusammenhang zwischen den rasterstereografischen und röntgenologischen Rotationen nur mittelstark war, ist auf deskriptiver Ebene bis auf eine Ausnahme immer eine ausreichend gute Übereinstimmung zu erkennen gewesen. Bei der Analyse der Rotationsverläufe sind mögliche Fehlerquellen zu beachten. Auf rasterstereografischer Seite gelang es bei einigen Patienten nicht, die Symmetrielinie durch interaktive Korrektur im Computerprogramm in ausreichendem Maße an den Dornfortsatz des Scheitelwirbels anzunähern, was eine Unterschätzung der Pathologie zur Folge hat. Dieser Fehler ist aber von einem geübten Untersucher erkennbar und auszugleichen und würde sowohl die Rotationsverläufe wie auch die Translationen verbessern. Um einen Untersucher-BIAS zu verhindern, wurde in dieser Studie aber ausschließlich mit den Werten der automatisierten Computeranalyse gearbeitet, so dass hier noch ein großes Potential zur Verbesserung der Statistik und der Beurteilung von Einzelfällen abzurufen wäre, insbesondere bei den Rotationsverläufen. Bei den Röntgenuntersuchungen sind als mögliche Fehlerquellen die Positionierung des Patienten an der Filmkassette (Derotation durch den Kontakt des Rippenbuckels) und Schwächen bei der Bestimmung der Rotation aus der zweidimensionalen p.-a.-Röntgenaufnahme zu beachten. Letztlich ist nicht sicher, wie genau die Wirbelkörperrotation aus der Röntgenaufnahme bestimmbar ist. Als weitere Fehlerquelle muss noch das unregelmäßige und nicht methodenübergreifende Verwenden eines Beinlängenausgleichs angeführt werden, dessen quantitativer Effekt von Hackenberg (31) untersucht wurde. Hier zeigte sich, dass eine Beinlängendifferenz von 2 cm eine Oberflächenrotation von 5° zur Folge hat.

Die rasterstereografisch und röntgenologisch gemessenen Translationen stimmen in hohem Maße überein und erfüllen in vollem Umfang die hier gestellten Erwartungen. Für die Rotationen gilt dies in etwas geringerem Maße, auf deskriptiver Ebene ist aber eine gute und ausreichende Übereinstimmung zu erkennen.

Zu 3.:

Es stellt sich die Frage, inwieweit eine Veränderung des Cobb-Winkels als Goldstandard und Basis therapeutischer Überlegungen, eine Veränderung anderer Parameter zur Folge hat. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass eine ausgeprägtere Pathologie, gemessen anhand des Cobb-Winkels, auch eine höhere Translation und Wirbelkörperrotation bedingt. Unklar ist, wie zuverlässig diese Veränderungen sich gleichsinnig verhalten und ob es Unterschiede zwischen den Verfahren gibt. Die Regressionen wurden in der Einzelfallanalyse durchgeführt.

Es zeigten sich in den Korrelationen zum Cobb-Winkel keine relevanten Unterschiede zwischen den rasterstereografischen und röntgenologischen Translationen und Rotationen. Es kam insgesamt zu sehr hohen, signifikanten Zusammenhängen zwischen den Translationen und dem Cobb-Winkel in 15 von 16 Verläufen. Im Mittel lagen die Korrelationskoeffizienten bei 0,8 (Maxima) und 0,68 (RMS) bei der Rasterstereografie und bei 0,89 (Maxima) sowie 0,8 (RMS) bei den Röntgentranslationen.

Bei den Rotationen zeigten sich nur in ca. 50% der Verläufe signifikante Zusammenhänge. In den übrigen Verläufen kam es zu einem wesentlich geringeren Anstieg der Rotationen im Vergleich zum Cobb-Winkel oder zu konstanten Rotationsfehlstellungen. Die durchschnittlichen Koeffizienten liegen jeweils bei 0,6 und deuten auf einen mittelstarken Zusammenhang hin.

Es lassen sich also nur unsichere Rückschlüsse von den Rotationen auf den Cobb-Winkel machen. Eine Verschlechterung der Rotationskomponente führte in diesem Kollektiv allerdings immer zu einer Progredienz des Cobb-Winkels. Umgekehrt ist aus einem konstanten Verlauf der Rotation nicht zu schlussfolgern, dass auch der Cobb-Winkel sich nicht verschlechtert hat.

Zu 4.:

a) Bei der Betrachtung der prozentualen Progredienzen aller 16 Patienten kam es zu Unterschieden zwischen den rasterstereografischen und röntgenologischen Translationen und Rotationen. Die RSG-Translationen lagen ca. 10% höher, welches fast ausschließlich in der höheren Bewertung der Translationen zum Ende des Untersuchungszeitraums zustande kommt. Es scheint also so zu sein, dass mit zunehmender Pathologie die Rasterstereografie systematisch höhere Absolutwerte misst.

Die Rotationsprogredienzen hingegen liegen röntgenologischen höher (ca. 75% zu 45% Zunahme). Hier sind die rasterstereografischen Rotationen bei geringeren Deformitäten höher, zum Untersuchungsende gleichen sich die Werte zunehmend an, so dass die entsprechenden prozentualen Unterschiede resultieren. Hier sind die bereits unter Punkt 2 angeführten Fehlerquellen zu berücksichtigen.

Die berechneten prozentualen Progredienzen beruhen allerdings nur auf den 16 Untersuchungen zu Beginn und zum Ende der Untersuchungszeiträume, so dass Ausreißer sehr hohen Einfluß haben. Insofern erklären sich z.B. auch die Widersprüche zu Punkt 1, in dem die Unterschiede zwischen den Absolutwerten als sehr gering bezeichnet wurden, da diese sich auf alle 96 Untersuchungen bezogen. So können die unter Punkt 1 gemachten Aussagen um diese Erkenntnisse erweitert werden.

b) Es kam zu keinen relevanten Unterschieden zwischen den RSG- und Röntgenrotationsprogredienzen über die Zeit. Sie lagen übereinstimmend bei ca.  $0,86^\circ/\text{Jahr}$  für die Maxima und  $0,35^\circ/\text{Jahr}$  für die RMS-Werte. Die RMS-Seitabweichungen zeigen minimale Differenzen ( $1\text{mm}/\text{Jahr}$  zu  $0,9\text{mm}/\text{Jahr}$ ), die höhere rasterstereografische Progredienz ist bei den Maxima allerdings deutlich mit  $2,65\text{mm}/\text{Jahr}$  zu  $2,04\text{mm}/\text{Jahr}$ , analog zu den Ergebnissen unter a). Die Progredienz des Cobb-Winkels liegt mit  $1,8^\circ/\text{Jahr}$  betraglich zwischen denen der maximalen und gemittelten RSG-Progredienzen. Aufgrund der hohen interindividuellen Streuungen kann auf den Cobb-Winkel-Verlauf nicht viel genauer zuverlässig geschlossen werden.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden rasterstereografische und radiologische Parameter bei Patienten mit idiopathischer Skoliose im Langzeitverlauf miteinander verglichen, um zu prüfen, inwieweit die Rasterstereografie die Progredienz dieser Erkrankung ausreichend genau analog der Röntgenaufnahmen widerspiegelt. Ziel ist es, Kriterien zu finden, die eine ähnlich hohe Aussagekraft haben wie der Cobb-Winkel als Goldstandard in der Beurteilung der Deformität. So wäre eine Reduktion der karzinogenen Röntgenstrahlenbelastung der meist jungen Patienten möglich.

In der Zusammenschau der Ergebnisse dieser Studie ist mit einer hohen Zuverlässigkeit mittels der Rasterstereografie eine der Röntgenanalyse gleichende Verlaufsbeobachtung zu leisten. Dabei sollten folgende Hinweise bedacht werden:

- 1) Da es hohe interindividuelle Unterschiede in den Absolutwerten der Rotationen und Translationen zwischen beiden Verfahren geben kann, sollte anhand einiger gezielter Röntgen- und RSG-Aufnahmen zu Beginn eine individuelle „Verlaufsskalierung“ vorgenommen werden.
- 2) Eine Progredienz der rasterstereografischen Rotation ist ein dringender Hinweis auf eine Progredienz auch des Cobb-Winkels. Auf die Höhe der Progredienz des Cobb-Winkels kann nicht sicher zurückgeschlossen werden, sie liegt fast immer über der der Rotationen.
- 3) Die rasterstereografischen Translationen weisen einen hohen Zusammenhang zu den Röntgentranslationen und auch zum Cobb-Winkel auf. Es ist mit höchster Wahrscheinlichkeit von einem gleichgerichteten Verlauf auszugehen, so dass eine Prognose des Cobb-Winkels möglich ist.
- 4) Die Höhe der Progredienz des Cobb-Winkels kann mit annähernder Sicherheit abgeschätzt werden. Die zeitliche Progredienz des Cobb-Winkels liegt zwischen der der maximalen und gemittelten RSG-Translation. Eine prozentuale Zunahme der RSG-Translationen (die Progredienzen der maximalen und gemittelten Werte sind annähernd gleich) um ca. 90% entspricht einer ca. 60%igen Zunahme des Cobb-Winkels.
- 5) Die Genauigkeit der Rasterstereografie kann im Zweifelsfall durch engmaschigere Kontrollen erhöht werden. Dies ist aufgrund der Strahlenbelastung in dem Maße bei Röntgenkontrollen nicht möglich. Die Ergebnisse der rasterstereografischen Untersu-

chungen in der Klinik entsprechen dabei mindestens der Qualität in dieser Studie. Sie kann durch einen erfahrenen Untersucher durch entsprechende Interaktionen sogar noch erhöht werden. Die hohe Qualität der Röntgenauswertungen durch Digitalisierung in dieser Studie ist aufgrund des enormen Aufwandes im Klinikalltag nicht möglich. Der Untersucher muss sich mit einer eingeschränkten Genauigkeit in der Bewertung des Röntgenbefundes abfinden, insbesondere der Fehlrotation der Wirbel. Dies unterstreicht die Tauglichkeit der Rasterstereografie im klinischen Alltag im Vergleich zur konventionellen Röntgenaufnahme.

Aufgrund der nachgewiesenen Qualität der Rasterstereografie ist eine Reduktion der radiologischen Kontrollen im Verlauf idiopathischer Skoliosen sicher möglich. Die Höhe des Einsparpotentials hängt vom individuellen Verlauf ab und ist anhand der beschriebenen Kriterien durchzuführen. In der Mehrzahl der Fälle kann nach anfänglicher radiologischer Diagnostik auf weitere Röntgenaufnahmen verzichtet werden, solange keine Progredienz in der rasterstereografischen Beurteilung festzustellen ist.

## 6 Literatur

1. Adair IV, Wisk MC, Armstrong GWD (1977) Moire topographie in scoliosis screening. Clin Orthop 129: 165
2. Amendt LE, Ause-Ellias KL, Eybers JL, Wadsforth CT, Nielsen DH, Weinstein SL (1990) Validity and reliability testing of the Scoliometer. Phys Ther 70: 108-116
3. Asamoah V, Mellerowicz H, Venus J, Klockner C (2000) Oberflächenvermessung des Rückens. Wertigkeit in der Diagnostik der Wirbelsäulenerkrankungen. Orthopäde 29: 480-489
4. Bernau A, Seeger W (1996) Reduzierung der Strahlenexposition bei Wirbelsäulenganzaufnahmen von Jugendlichen. Z Orthop 4: 302-304
5. Brooks HL, Azen SP, Gerberg E, Brooks R, Chan L (1975) Scoliosis: A prospective epidemiological study. JBJS 57 A: 968
6. Bradford DS (1995) Juvenile Kyphosis. In: Lonstein JE, Winter RB, Bradford DS, Ogilvie JW (Hrsg) Moe`s textbook of scoliosis and other spinal deformities. Saunders Company, Philadelphia
7. Bullmann V, Halm H, Niemeyer T, Hackenberg L, Liljenqvist U (2003) Dual-rod correction and instrumentation of idiopathic scoliosis with the halm-zielke instrumentation. Spine 15: 1306-1313
8. Bunnell WP (1984) An objective criterion for scoliosis screening. J Bone Joint Surg 66: 1381-1387
9. Cobb J R (1948) Outline for the study of scoliosis. Instruct. Course Lect. Amer. Acad. Orthop. Surg. 5: 261
10. Cote P, Kreitz BG, Cassidy JD, Dzus AK, Martel J (1998) A study of the diagnostic accuracy and reliability of the scoliometer and Adam`s forward bending test. Spine 23: 796-802
11. Debrunner HU (1973) Orthopädisches Diagnostikum. Georg Thieme Verlag, Stuttgart S 72
12. Drerup B (1981) A procedure for the numerical analysis of Moire-Topograms. Photogrammetria 36: 41-49

13. Drerup B (1981) The measurement of angles in Moire-Topograms. In: Moreland MS, Pope MH, Armstrong GWD (Hrsg) Moire Fringe Topography and Spinal Deformity 1. Pergamon Press, New York, S 190-200
14. Drerup B. (1993) Die Form der skoliotischen Wirbelsäule: Vermessung und mathematische Analyse von Standard-Röntgenaufnahmen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart New York
15. Drerup B, Hierholzer E (1994) Back shape measurement using video rasterstereography and three-dimensional reconstruction of spinal shape. Clin Biomech 9: 28-36
16. Drerup B, Hierholzer E (1996) Assessment of scoliotic deformity from back shape asymmetrie using an improved mathematical model. Clin Biomech 11: 376-383
17. Dutkowsky JP, Shearer D, Schepps B, Orton C, Scola F (1990) Radiation exposure to patients receiving routine scoliosis radiography measured at depth in an anthropometric phantom. J Pediatr Orthop 10: 532-534
18. Giehl JP, Bernau A (1994) Radiologische Diagnostik bei Skoliosen – Indikation und Befundinterpretation. Orthop Praxis 5: 267-278
19. Goldberg CJ (2001) Surface Topography, Cobb Angles, and Cosmetic Change in Scoliosis. Spine 26: 55-63
20. Goldberg CJ, Kaliszer M, Moore DP, Fogarty E, Dowling FE (2001) Surface topography, Cobb angles, and cosmetic change in scoliosis. Spine 15: E55-63
21. Goldberg CJ, Moore DP, Fogarty E, Dowling FE (2002) Surface topography and the several components of scoliotic deformity. In: Grivas TB (Hrsg) Research into spinal deformities 4. IOS/Omsha, Amsterdam Tokyo, Bd 4, S 67-69
22. Greulich WW, Pyle SI. (1966) Radiography Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist. Oxford University Press, London
23. Griffiths CJ, Tweedie RJ, Fitzgerald JE, Gigson M, Leonard MA (1997) Surface topography measurement of back asymmetry in relation to scoliosis surgery. In: Sevastic JA, Diab KM (Hrsg) Research into spinal deformities 1. IOS Press/Ohmsha, Amsterdam Tokyo, S 309-311
24. Grossmann TW, Mazur JM, Cummings RJ (1995) An evolution of the Adams forward bend test and the scoliometer in a scoliosis school screening setting. J Ped Orthop 15: 535-538

25. Hackenberg L, Liljenqvist U, Hierholzer E, Halm H (2000) Rasterstereografische Oberflächenvermessung idiopathischer Skoliosen nach VDS. *Z Orthop* 138: 353-359
26. Hackenberg L, Hierholzer E (2002) 3-D back surface analysis of severe idiopathic scoliosis by rasterstereography: comparison of rasterstereographic and digitized radiometric data. *Stud Health Technol Infom* 88: 86-89
27. Hackenberg L, Hierholzer E (2002) Comparison of rasterstereographs with MR scans in scoliotic patients. *Stud Health Technol Infom* 88: 196-199
28. Hackenberg L. (2003) Stellenwert der Rückenformanalyse in der Therapie von Wirbelsäulendeformitäten. Habilitationsschrift aus der Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie des Universitätsklinikums Münster
29. Hackenberg L, Hierholzer E, Pötzl W, Götze C, Liljenqvist U (2003) Rasterstereographic back shape analysis in idiopathic scoliosis after anterior correction and fusion. *Clin Biomech* 18: 1-8
30. Hackenberg L, Hierholzer E, Pötzl W, Götze C, Liljenqvist U (2003) Rasterstereographic back shape analysis in idiopathic scoliosis after posterior correction and fusion. *Clin Biomech* 18: 883-889
31. Hackenberg L, Hierholzer E, Bullmann V, Liljenqvist U, Götze C (2006) Rasterstereographic analysis of axial back surface rotation in standing versus forward bending posture in idiopathic scoliosis. *Eur Spine* 15: 1144-1149
32. Halm H, Liljenqvist U, Niemeyer T, Chan DP, Winkelmann W (1998) Halm-Zielke instrumentation for primary stable anterior scoliosis surgery: operative technique and 2 year results in ten consecutive adolescent idiopathic scoliosis patients within a prospective clinical trail. *Eur Spine* 7: 429-434
33. Halm H (2000) Ventrale und dorsale korrigierende und stabilisierende Verfahren bei idiopathischer Skoliose. *Orthop* 29: 543-562
34. Harrington PR (1962) Treatment of scoliosis. Correction and internal fixation by spine instrumentation. *J Bone Joint Surg* 44 A: 591-610
35. Hierholzer E (1993) Objektive Analyse der Rückenform von Skoliosepatienten, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart New York
36. Hierholzer E, Drerup B (1995) Vermessung der Wirbelsäule mittels Rasterstereografie. In: Neugebauer H (Hrsg) Was gibt es Neues in der Medizin? / Medizinisches Jahrbuch. Peter Müller Verlag, Wien, S 171-184

37. Hierholzer E, Hackenberg L (2002) Three-dimensional shape analysis of the scoliotic spine using MR tomography and rasterstereography. *Stud Health Technol Inform* 91: 184-189
38. Hilpert P (1975) Die Lungenfunktion bei Skoliosepatienten. *Z Orthop* 113: 583-585
39. Hoffman DA, Lonstein LE, Morin MM, Visscher W, Harris BSH III, Boice JD (1989) Breast cancer in women with scoliosis exposed to multiple diagnostic x rays. *J Natl Cancer Inst* 81: 1307-1312
40. Inami K, Suzuki T, Ono T, Yamashita K, Khono K, Morisue H (1999) Analysis of Posterior Trunk Symmetry Index (POTSI) in scoliosis. Part 2. In: Stokes IAF (Hrsg) *Research into spinal deformities 2*. IOS Press/Omsa Amsterdam Tokyo, 85-88
41. Jäger M, Wirth CJ. (1986) *Praxis der Orthopädie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York
42. King HA, Moe JH, Bradford DS, Winter RB (1983) The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 65, 9: 1302-1313
43. King HA (1994) Analysis and treatment of type II idiopathic scoliosis. *Orthop Clin North Am* 25: 225-237
44. Kummer F (1973) Die Skolioseleung als Modell für eine extrapulmonal bedingten Atemstörung. *Z Inn Med* 54: 524
45. Krismer M, Bauer R, Wimmer C (1998) Die operative Behandlung der idiopathischen Skoliose. *Orthop* 27: 147-157
46. Landauer F, Krismer M, Bauer R (1997) Konservative Behandlung der idiopathischen Skoliose. *Orthop* 26: 808-817
47. Levy AR, Goldberg MS, Hanley JA, Mayo NE, Poitras B (1994) Projecting the lifetime risk of cancer from exposure to diagnostic ionizing radiation for adolescent idiopathic scoliosis. *Health Phys* 66: 621-633
48. Liljenqvist U, Halm H, Hierholzer E, Drerup B, Weiland M (1998) Die dreidimensionale Oberflächenvermessung von Wirbelsäulendeformitäten anhand der Videorasterstereografie. *Z Orthop* 136: 57-64
49. Lonstein JE (1995) Idiopathic scoliosis. In: : Lonstein JE, Winter RB, Bradford DS, Ogilvie JW (Hrsg) *Moe's textbook of scoliosis and other spinal deformities*. Saunders Company, Philadelphia

50. Mardia KV, Walder AN, Berry E, Sharples D, Millner PA, Dickson RA (1999) Assessing spinal shape. *J Appl Stat* 26, 6: 735-745
51. Matussek J, Mellerowicz H, Klöckner C, Sauerland B, Nahr K, Neff G (2000) Zwei- und dreidimensionale Korrektur von Skoliosen durch Korsettbehandlung. *Orthop* 29: 490-499
52. Matzen P (2002) *Praktische Orthopädie*. J.A. Barth Verlag im Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York, S 342
53. Mau H (1984) Spezifizierung der korrespondierenden Wachstumsgesetze von Hueter-Volkman und Pauwels (Wachstumsdeformitäten) und ihre Beziehung zu den Belastungsdeformitäten. *Z Orthop* 122: 237
54. McArdle FJ, Griffiths CJ, MacDonald AM, Gibson MJ (2002) Monitoring the sagittal curvature in kyphoscoliosis with surface topography: a trend analysis of 57 patients. In: Grivas TB (Hrsg) *Research into spinal deformities 4*. IOS/Omsha, Amsterdam Tokyo, Bd 4, S 199-203
55. Meadows DM, Johnson WO, Allen JB (1970) Generation of surface contours by Moire patterns. *Applied Optics* 9: 942-947
56. Meznik F, Kummer F (1970) Skoliose und Lungenfunktion. *Z Orthop* 108: 382
57. Moe JH, Purcell GA, Bradford DS (1983) Zielke instrumentation (VDS) for correction of spinal curvature. *Clin Orthop* 180: 133-153
58. Moreland MS, Barce CA, Pope MH (1981) Moire-Topography in scoliosis: pattern recognition and analysis. In: Moreland MS, Pope MH, Armstrong GWD (Hrsg) *Moire Fringe Topography and Spinal Deformity 1*. Pergamon Press, New York
59. Morin Doody M, Lonstein JE, Stovall M, Hacker DG, Luckyanov N, Land CE (2000) Breast cancer mortality after diagnostic radiography: findings from the U. S. Scoliosis Cohort Study. *Spine* 25: 2053-2063
60. Murell GAC, Coonrad RW, Moorman CT, Fitch RD (1993) An assessment of the reliability of the scoliometer. *Spine* 18: 709-712
61. Nash CL, Moe JH (1969) A study of vertebral rotation. *J Bone Joint Surg* 51 A: 223-229
62. Nash CL, Gregg EC, Brown RH, Pillai K (1979) Risks of exposure to x rays in patients undergoing long-term treatment for scoliosis. *J Bone Joint Surg* 61: 371-374

63. Neugebauer H (1972) Cobb oder Ferguson. Eine Analyse der beiden gebräuchlichsten Röntgenmessmethoden von Skoliosen. *Z Orthop.* 110: 342-356
64. Neugebauer H, Windischbauer G. (1982) Moire-Topography in scoliosis research. In: v. Bally G, Greguss P (Hrsg) *Optics in Biomedical Science*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, S 250-253
65. Niethard FU (1997) *Kinderorthopädie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York
66. Perdriolle R (1979) *La Scoliose*. Ed. Maloine S A, Paris
67. Perdriolle R, Vidal J (1985) Thoracic idiopathic scoliosis curve. Evolution and prognosis. *Spine* 10: 785
68. Pearsall DJ, Reid GJ, Hedden DM (1992) Comparison of three noninvasive methods for measuring scoliosis. *Phys Ther* 72: 648-657
69. Risser JC, Ferguson AB (1936) Scoliosis: Its prognosis. *J Bone Joint Surg* 38 B: 640
70. Rogala EJ, Drummond DS, Gurr J (1978) Scoliosis: Incidence and natural history. *JBJS* 60 A: 173
71. Sakka SA, Wojcik A, Macindoe S, Mehta MH (1995) Reproducibility and Reliability of the Quantec surface imaging system in the assessment of spinal deformity. In: D'Amico M, Merolli A, Santambrogio GC (Hrsg) *Threedimensional Analysis of Spinal Deformities*. IOS Press/Ohmsa, Amsterdam Tokyo, S 441-445
72. Schied E (1955) Ein Beitrag zur Ossifikation der Wirbelsäule. *Langenbecks Arch Klin Chir* 280: 241
73. Shinoto A, Ohtsuka Y, Inoue S. Quantitative analysis of scoliosis and kyphosis deformity by Moire method. In: Moreland MS, Pope MH, Armstrong GWD (Hrsg) *Moire Fringe Topography and Spinal Deformity 1*. Pergamon Press, New York
74. Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G (1982) Reciprocal angulation of vertebral bodies in the sagittal plane: Approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine* 7: 335
75. Stephens Richards B (1992) Measurement error in assessment of vertebral rotation using the Perdriolle Torsiometer. *Spine* 17: 513-517
76. Suzuki N, Inami K, Ono T, Khono K, Asher MA (1999) Analysis of Posterior Trunk Symmetry Index (POTSI) in scoliosis. Part 1. In: Stokes IAF (Hrsg) *Research into spinal deformities 2*. IOS Press/Omsa Amsterdam Tokyo, 81-84
77. Takasaki H (1970) Moire-Topography. *Applied Optics* 9: 1467-1472

78. Thiemann HH, Nitz I. (1991) Röntgenatlas der normalen Hand im Kindesalter. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York
79. Turner-Smith AR, Harris JD, Houghton GR, Jefferson RJ (1988) A method for analysis of back shape in scoliosis. *J Biomech* 21: 497-509
80. Turner-Smith AR (1988) A television/computer three-dimensional surface shape measurement system. *J Biomech* 21: 515-529
81. Weiß HR (2003) Die konservative Behandlung der idiopathischen Skoliose durch Krankengymnastik und Orthesen. *Orthop* 32: 146-156
82. Willner S (1981) Comparison between Moire and x-ray findings in structural scoliosis. In: Moreland MS, Pope MH, Armstrong GWD (Hrsg) *Moire Fringe Topography and Spinal Deformity 1*. Pergamon Press, New York, S 157-165
83. Witt AN, Rettig H, Schlegel KF (1990) Orthopädie in Praxis und Klinik. Spezielle Orthopädie. Wirbelsäule-Thorax-Becken., Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York Bd. V/Teil 1, 2. Aufl. S 7.77-7.117
84. Witt AN, Rettig H, Schlegel KF (1990) Orthopädie in Praxis und Klinik. Spezielle Orthopädie. Wirbelsäule-Thorax-Becken. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York Bd. V/Teil 1, 2. Aufl. S 7.2-7.44
85. Zielke K, Stunkat R (1978) Ergebnisse der ventralen Derotationsspondylodese. In: Junghans H (Hrsg) *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis*. Bd. 72: Skoliose und Kyphose, Hippokrates, Stuttgart
86. Zielke K, Berthet A (1978) VDS – Ventrale Derotationsspondylodese – Vorläufiger Bericht über 58 Fälle. *Orthop Traumatol* 25: 85-87
87. Zielke K (1982) Ventrale Derotationsspondylodese. Behandlungsergebnisse bei idiopathischen Lumbalskoliosen. *Z Orthop* 120: 320-329

## 7 Danksagung

Ich möchte mich vor allem bei meinen Betreuern Herrn Priv. Doz. Dr. med. L. Hackenberg und Herrn Priv. Doz. Dr. E. Hierholzer für die Überlassung dieses Themas und das entsprechende Vertrauen bedanken. Beide waren jederzeit da, um mich bei der Bearbeitung dieser Dissertation zu unterstützen. Der tragische Tod von Herrn Priv. Doz. Dr. E. Hierholzer im Dezember 2004 war ein großer Schock und Verlust. Nicht nur seine fachliche Kompetenz, sondern insbesondere auch seine außergewöhnlichen menschlichen Qualitäten haben ein großes Vakuum hinterlassen.

Außerdem gebührt den Mitarbeitern im Archiv für die Hilfe bei der Suche nach den vielen Röntgenbildern, der experimentellen Biomechanik, hier insbesondere Herrn Dr. Frobin für die Unterstützung in Fragen zur Technik und Auswertung von Rasterstereografien, und Herrn Dr. rer.nat. Dipl.-Biol. G. Burkhardtsmaier aus dem Institut für Informatik und Statistik für die Unterstützung bei der Auswertung der Daten mein ganz besonderer Dank.

Im Mittelpunkt dieser Danksagung steht selbstverständlich meine Familie. Meinen Eltern danke ich für die Unterstützung bei dem Absolvieren von 2 Studiengängen und meinen Schwiegereltern für unzählige kleine und große Hilfestellungen, der Betreuung unserer Tochter und so vieles mehr in den Jahren des Studiums und danach. Nicht vergessen werden soll an dieser Stelle mein Schwager Olaf, welcher großen Anteil an der Entscheidung für ein Studium der Humanmedizin hatte.

Meiner lieben Frau Sabine danke ich herzlich für Ihre Nähe, Liebe und ihr Verständnis. Meiner Tochter Kira danke ich für die ungeahnte Bereicherung in meinem Leben.

## 8 Lebenslauf

### Angaben zur Person:

Name: Börke  
Vorname: Andreas  
Geburtsdatum: 13.04.1970 in Nieder-Weisel, jetzt Butzbach  
Staatsangehörigkeit: deutsch

### Schulbildung:

1976-1980 Grundschule Hochdahl/Millrath  
1980-1984 Gymnasium Hochdahl  
1984-1990 Gymnasium Brackwede, Abitur

### Hochschulausbildung:

1992-1998 Studium an der Universität Bielefeld  
Abschluss: Diplom Sportwissenschaftler mit dem Schwerpunkt  
Rehabilitation und Prävention  
2000-2006 Studium der Humanmedizin an der WWU Münster, Praktisches  
Jahr in den Städtischen Kliniken Bielefeld  
Abschluss: 3. Staatsexamen mit voller Approbation im Mai 2006

### Weitere Tätigkeiten:

1990-1992 Zivildienst in der Physikalischen Therapie der Städtischen  
Krankenanstalten Bielefeld Mitte  
1993-1995 studentische Hilfskraft der Fakultät für Sportwissenschaften,  
Universität Bielefeld, Stützkurs Geräteturnen  
1994-2004 Nebentätigkeit bzw. Vollzeitbeschäftigung in der „Sportphysio-  
Seidenstickerhalle GbR“, von 1999-2003 als Teilhaber  
2002-2003 studentische Hilfskraft (Tutor) an der WWU Münster  
Betreuung des Praktikums der Physiologie für Studierende der  
Human- und Zahnmedizin  
ab 2007 Lehrkraft an der Krankenpflegeschule des Klinikums Minden

**Ärztliche Berufstätigkeit:**

01.06.-30.09.2006 Assistenzarzt in der Orthopädischen Klinik der Städtischen  
Kliniken Bielefeld

ab 01.10.2006 Assistenzarzt in der Unfallchirurgischen Klinik des Klinikums  
Minden

**Promotion:**

ab 2003 betreut von Herrn Priv. Doz. Dr. med. L. Hackenberg, ehemaliger  
Oberarzt in der Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie  
der WWU Münster, seit 2006 in der Niederlassung  
und Herrn Priv. Doz. Dr. E. Hierholzer († 2004), Institut für experi-  
mentelle Biomechanik, Klinik und Poliklinik für Allgemeine  
Orthopädie der WWU Münster  
Titel: Vergleich rasterstereografischer und röntgenologischer Pa-  
rameter im Langzeitverlauf idiopathischer Skoliosen.