

**Aus der Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie**

**Universitätsklinikum Münster**

**Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. W. Winkelmann**

**Stellenwert der Rückenformanalyse in der  
Therapie von Wirbelsäulendeformitäten**

**Habilitationsschrift zur Erlangung der Venia Legendi für das Fach  
Orthopädie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster**

**vorgelegt von Lars Hackenberg**

**2003**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1	Technische Möglichkeiten der Rückenformanalyse	1
1.2	Klinische Bedeutung der Rückenformanalyse	15
1.2.1	Konservative Therapie	18
1.2.2	Operative Therapie	19
1.3	Ziele der dieser Arbeit	21
<b>2.</b>	<b>Klinische Untersuchungen zur Rückenformanalyse mit der Rasterstereoagrafie</b>	<b>22</b>
2.1	Bisherige klinische Anwendungen	22
2.2	Erweiterung des Anwendungsspektrums	27
2.2.1	Höhergradige Wirbelsäulendeformitäten	27
2.2.2	Ventrale Korrekturspondylodese	34
2.2.3	Dorsale Korrekturspondylodese	45
2.2.4	Ein alternatives Maß zum Cobb-Winkel	55
2.2.5	Quantifizierungsversuch des kosmetischen Defektes	60
<b>3.</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Rasterstereoagrafie</b>	<b>63</b>
3.1	Lagekontrolle der Symmetrielinie	63
3.2	Rekonstruktionskontrolle mittels Kernspintomografie	70
3.3	Rasterstereoagrafie in Vorneige	85
3.4	Veränderung der Rückenoberfläche in Vorneige	89
3.4.1	Rasterstereoagrafie versus Skoliometer	94

<b>4.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>101</b>
4.1	Wesentliche Inhalte und Ergebnisse	101
4.2	Erreichte Ziele dieser Arbeit	110
<b>5.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>112</b>
<b>6.</b>	<b>Danksagung</b>	<b>123</b>

## 1. Einführung und Zielsetzung

### 1.1 Technische Möglichkeiten der Rückenformanalyse

Mit Bekanntwerden der berührungslosen Moiré Topografie ab 1975 begann eine euphorische Phase wissenschaftlicher Entwicklungen auf dem Gebiet der dreidimensionalen Formanalyse der Rückenoberfläche bei Patienten mit Wirbelsäulendeformitäten. Die bisher zur Verfügung stehenden klinischen und radiologischen Untersuchungsverfahren boten keine dreidimensionale Erfassung der Rumpfdeformität, von der man sich insbesondere in der Behandlung idiopathischer Skoliosen Fortschritte versprach. Das kosmetische Erscheinungsbild der Patienten und eine dreidimensionale Betrachtungsweise der Deformitäten standen bei der Rückenformanalyse im Zentrum des Interesses.

In den Jahren vor 1980 entwickelte Punktmessmethoden mit mechanischen Hilfsmitteln unter Ausnutzung anatomischer Fixpunkte oder segmentbezogene Oberflächennmessungen waren nicht berührungsfrei und daher mit subjektiven Messfehlern behaftet. Die übergreifende Vermessung der Rückenoberfläche war nicht möglich. Man musste sich auf die Regionen der ausgeprägtesten Deformierungen beschränken. Die bekanntesten Punktmessmethoden waren die Skoliometermessung des Rippenbuckels nach Götze (1) und die Kyphometermessung des Wirbelsäulenprofils nach Debrunner (2). Eine Entwicklung in Richtung einer Flächennmessung stellte die von Willner (3) beschriebene Pantografmessung dar. Hier wurde mechanisch eine größere Anzahl von Punkten auf einzelnen Profilen gemessen. Burwell et al. (4, 5, 6) maßen die Asymmetrie ausgewählter Querprofile mit einem mechanischen Abtastgerät in ähnlicher Weise. Die Grenzen dieser nicht berührungsfreien Methoden zeichneten sich aber ab, so daß sich die weiteren Entwicklungen auf berührungslose Flächennmessmethoden konzentrierten.

Die Computertomografie und Kernspintomografie entwickelten sich parallel dazu, boten aber auf absehbare Zeit keine vergleichbaren Untersuchungsmöglichkeiten. Wesentliche Probleme resultierten bei diesen Verfahren aus der Strahlenbelastung, den hohen Kosten und dem vergleichsweise hohen technischen Aufwand einer drei-

dimensionalen Rekonstruktion der Rückenoberfläche oder der Wirbelsäulenform aus den gemessenen Datensätzen. Die Messungen waren darüber hinaus nur im Liegen durchführbar, was eine erhebliche Veränderung der Rückenform mit sich brachte.

Bei den Flächenmessmethoden wurde die Oberfläche des Rückens zwar auch in Punkten abgetastet, die Punkte lagen aber dicht beieinander und waren gleichmäßig verteilt. Die Formeigenschaften einer Fläche konnten erfasst werden und die Qualität der Messung stieg mit der Abtastdichte. Grundsätzlich kamen berührungslose Foto- oder Videotechniken in Frage, bei denen eine simultane Erfassung aller Meßpunkte möglich war, um Meßungenauigkeiten durch Bewegungen des Patienten zu umgehen. Die Computertechnik ermöglichte dabei die schnelle Verarbeitung großer Datennengen, so daß trotz der hohen Punktdichte eine automatische Bildverarbeitung möglich war.

Die Moiré-Topografie wurde bereits 1970 durch Takasaki (7) und Meadows et al. (8) beschrieben. Dabei wurde die Körperoberfläche als System von Höhenlinien in Bezug auf die Frontalebene dargestellt. Die bei den Punktmessungen mechanisch bestimmten Parameter konnten nun indirekt aus dem Muster der Höhenlinien bestimmt werden. Die Methode vermied die Nachteile der nicht berührungslosen Messungen, die in der Literatur beschriebenen Anwendungen von Willner (9), Drerup (10), Moreland et al. (11) und Shinoto (12) verwertete jedoch die gewonnenen Informationen nur unvollständig und unterlag teilweise subjektiven Interpretationen. Auf unterschiedliche Weise wurden Höhen- und Winkeldifferenzen aus Oberflächepunkten, Längs- und Querprofilen berechnet und mit radiologischen Messungen der darunterliegenden Skeletteile korreliert. Weitere Verbesserungen durch eine Digitalisierung der Topogramme konnten von Neugebauer und Windischbauer (13) sowie Turner-Smith und Harris (14) erzielt werden. Erstere berechneten eine Oberflächenrotationskurve, letztere entwickelten ein automatisches Abtastgerät zur Rotationsbestimmung von Querprofilen. Drerup (15) entwickelte letztlich ein Verfahren zur Interpolation und Analyse digitaler Topogramme, welches den Endpunkt der Entwicklung darstellte. Bei diesen Methoden geht bereits ein Großteil der gemessenen Punkte auf der Rückenoberfläche in die Datenauswertung ein. Die Moiré-Topografie konnte sich jedoch gegenüber anderen Flächenmeßmethoden aufgrund ihrer Komplexität nicht durchsetzen und hat heute keine klinische Bedeu-

tung mehr. Basierend auf der Moiré-Topografie entwickelten Suzuki et al. (16, 17) einen klinisch anwendbaren Symmetrieindex, der sich zur Verlaufskontrolle und postoperativen Beurteilung der Rückenform eignete.

Weitere Verfahren, die bei der Registrierung der Rückenoberfläche und auch der Datenanalyse konsequent flächenhaft arbeiteten, sind bis Anfang der Neunzigerjahre selten beschrieben worden. Armstrong et al. (18) und Hefli (19) untersuchten die Asymmetrie und Rotationsdifferenzen einer Folge von fotografisch registrierten Querprofilen, die durch eine große Zahl nahezu gleich verteilter Punkte auf der Rückenfläche dargestellt werden. Trotz Computeranwendung ist die klinische Anwendbarkeit dieser Verfahren durch zusätzlich erforderliche manuelle Markierungen beschränkter. Versuche die Rückenoberfläche mit Ultraschall zu vermessen, wurden in den Achtzigerjahren unternommen (20, 21), die geringe Ortsauflösung und schlechte Handhabbarkeit verhinderte jedoch eine Weiterentwicklung dieser Verfahren.

Die weiteren Entwicklungen verschiedenster Arbeitsgruppen brachten in den Folgejahren eine große Zahl von Flächenmeßmethoden hervor. Die dreidimensionale Rekonstruktion der Rückenform oder sogar des gesamten Rumpfes (22) mit guter Genauigkeit und Möglichkeit der optischen Darstellung war nun möglich. Fast allen Methoden lagen fotogrammetrische Verfahren zugrunde. Zudem arbeiteten sie mit normalem Licht. Versuche wurden auch mit Abtastungen der Oberfläche mit Lasern unternommen, was jedoch nicht die simultane Abtastung aller Punkte ermöglichte (23) oder eine zusätzliche Röntgenuntersuchung erforderlich machte (24). Allein die Rekonstruktion der Rücken- oder Rumpfform ist jedoch nur von geringer klinischer Relevanz, solange nicht einzelne Formparameter wie Oberflächenrotation, Seitabweichung oder das sagittale Profil der Oberfläche quantifiziert werden und so dem Arzt fassbare und vergleichbare Daten liefern. Die dreidimensionale Rekonstruktion der knöchernen Wirbelsäulenform aus den Daten der Oberflächenformanalyse ist letztlich die beste Ausnutzung eines Verfahrens. Sie eröffnet weitreichende klinische Nutzungsmöglichkeiten. Um einen Überblick über wichtige Verfahren zu bekommen, werden im Folgenden nur die Methoden erwähnt, die über eine Rekonstruktion und Visualisierung der Oberfläche hinaus klinisch nutzbare Rekonstruktionen und Quantifizierungen ermöglichen.

Dangerfeld et al. stellten 1995 das Spinal Image Processing System (SIPS) vor (25, 26). Es ist eine automatisierte, fotogrammetrische Methode, welche eine 3D-Rekonstruktion der Rückenform ermöglicht. Die Autoren setzten die Methode prä- und postoperativ ein. Welche Parameter aus der rekonstruierten Fläche entnommen wurden, ging im Detail nicht aus den Publikationen hervor. Eine hohe Anfälligkeit gegenüber Bewegungsartefakten wurde von den Autoren eingeräumt. Die Methode wurde nach 1995 in der Literatur nicht mehr erwähnt. Die Evaluation der Genauigkeit der Methode anhand von Röntgenbildern wurde nicht mehr publiziert. Die Methode wurde nicht bis zur Serienreife entwickelt und stand anderen Instituten für routinemäßige klinische Anwendungen nicht zur Verfügung.

Drei Methoden sind letztlich soweit entwickelt worden, daß eine klinische Anwendung routinemäßig möglich war oder ist. Es handelt sich um das „Integrated Shape Imaging System“ (ISIS), das „Quantec Imaging System“ und die „Rasterstereografie“. Die entsprechenden Geräte stehen im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten und der klinischen Anwendung zur Verfügung. Grundlage der Meßmethoden ist in allen Fällen die Stereofotogrammetrie. Sie basiert auf dem Prinzip der Triangulation.

Bei der Triangulation wird die Lage eines entfernt liegenden Objektpunktes P aus einem bekannten Abstand zweier weiterer Punkte A und A' und den Winkeln des Dreieckes, welches sie mit dem nicht bekannten Punkt bilden, berechnet (Abb. 1). Sofern der unbekante Punkt nicht in der Horizontalebene liegt, sind neben zwei Horizontalwinkeln ( $\alpha$  und  $\alpha'$ ) auch zwei Höhenwinkel ( $\beta$  und  $\beta'$ ) zu messen, um die räumliche Lage genau zu bestimmen.

Bei der Stereofotogrammetrie registriert ein Paar von Kameras, welche den Punkten A und A' entsprechen, in einem Stereobildpaar eine Vielzahl von Punkten P auf einem Objekt gleichzeitig. Die Kameras können den klinischen Anforderungen entsprechend positioniert werden. Unter genauer Kenntnis und Kalibrierung der Aufnahmegeometrie erhält man ein unverzerrtes, dreidimensionales Modell des Objektes. Die Stereofotogrammetrie ist aufgrund eines sehr hohen Rechenaufwandes und einer subjektiven Komponente in der Interpretation nicht für klinische Routineanwendungen geeignet. Ersetzt man jedoch unter Beibehaltung der Aufnahmegeometrie

trie eine Kamera durch einen Diaprojektor und beleuchtet den zu vermessenden Gegenstand mit einem definierten regelmäßigen Lichtmuster (künstliche Strukturierung), so kann dieses für die Berechnung ebenfalls genutzt werden. Dadurch wird die Methode einfacher und objektiver. Man spricht dann von der Rasterstereografie (Abb. 2). Die Prinzipien der Rasterstereografie stellen die Grundlage der klimisch anwendbaren Methoden zur Rückenformanalyse dar, die im folgenden näher beschrieben werden.

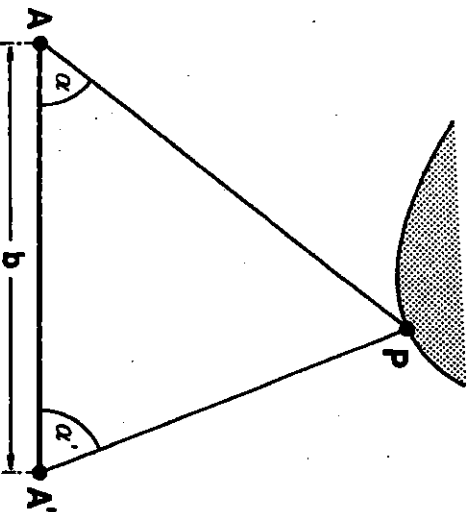


Abbildung 1

Prinzip der Triangulation

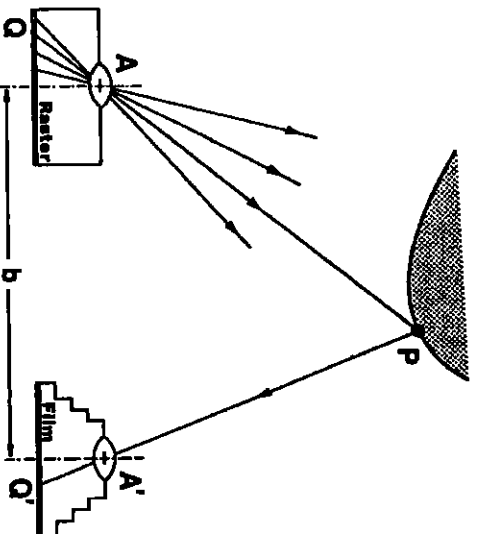


Abbildung 2

Prinzip der Rasterstereografie als Weiterentwicklung der Stereofotogrammetrie. Die Projektion eines geometrisch definierten regelmäßigen Lichttrasters (links) ersetzt am Punkt A eine von zwei Kameras, die bei der Stereofotogrammetrie würden.

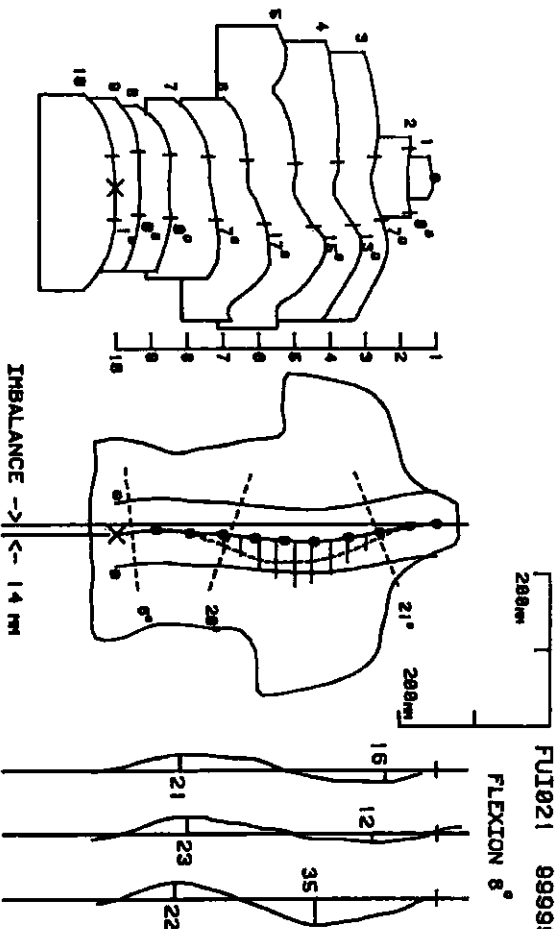


Das Quantec Imaging System wurde 1994 erstmals beschrieben (27). Es wird ein relativ hochauflösendes Liniengitter auf die Rückenoberfläche des stehenden Patienten projiziert und durch eine Videokamera aus einem definierten Winkel aufgenommen. Anatomische Landmarken müssen manuell markiert werden. Mittels Computer erfolgt die dreidimensionale Rekonstruktion der Rückenform nach den Prinzipien der Stereofotogrammetrie. Berechnet werden dann eine Seitabweichung (lateral curve), ein Beckenschiefstand, die Rumpflänge und das Wirbelsäulenprofil. Die Oberflächenrotation wird nicht berechnet. Ebenso erfolgt keine genaue Rekonstruktion der Wirbelsäule selbst, sondern nur eine Abschätzung der Wirbelsäulendeformität anhand der Rückenform. Die Reproduzierbarkeit des Verfahrens (27) und klinische Anwendungen bei konservativ und operativ behandelten Skoliosen sind Thema mehrerer Publikationen zu diesem Verfahren (28, 29, 30, 31).

Der ISIS Scanner war 1988 funktionsfähig (32, 33) und wurde in der Folgezeit in Publikationen zu ersten Anwendungen erwähnt (34, 35). Das Verfahren ist berührungslos, jedoch ist eine manuelle Markierung der Dornfortsätze durch Marker erforderlich, um einen Bezug der gemessenen Fläche zur Wirbelsäule herzustellen. Die Auflösung des Verfahrens ist mäßig. Es werden zehn Querprofile auf der Rückenoberfläche des stehenden Patienten gemessen. Sie ermöglichen die Berechnung des sagittalen Wirbelsäulenprofils, der Oberflächenrotation und der Seitabweichung der Dornfortsätze (Abb. 3). Eine Rekonstruktion der eigentlichen Wirbelsäulenform ist teilweise möglich. Anstelle des Cobb-Winkels wird „laterale Asymmetrie“ berechnet (Abb. 4). Eine Evaluation der Genauigkeit der Methode anhand von Röntgenbildern oder anderen bildgebenden Verfahren wurde nicht veröffentlicht. Die klinische Anwendung konzentriert sich auf die Früherkennung und Verlaufskontrolle idiopathischer Skoliosen (36, 37) und Untersuchungen zu dreidimensionalen Veränderungen des Rumpfes bei progredienten Skoliosen (38).

JUNE 1985

R. THORACIC  
FUI021 999999



1891 8 2° R 0.0.E.C.

Abbildung 3

Meßprotokoll des ISIS Scanners (nach Turner-Smith, 1988 (14))

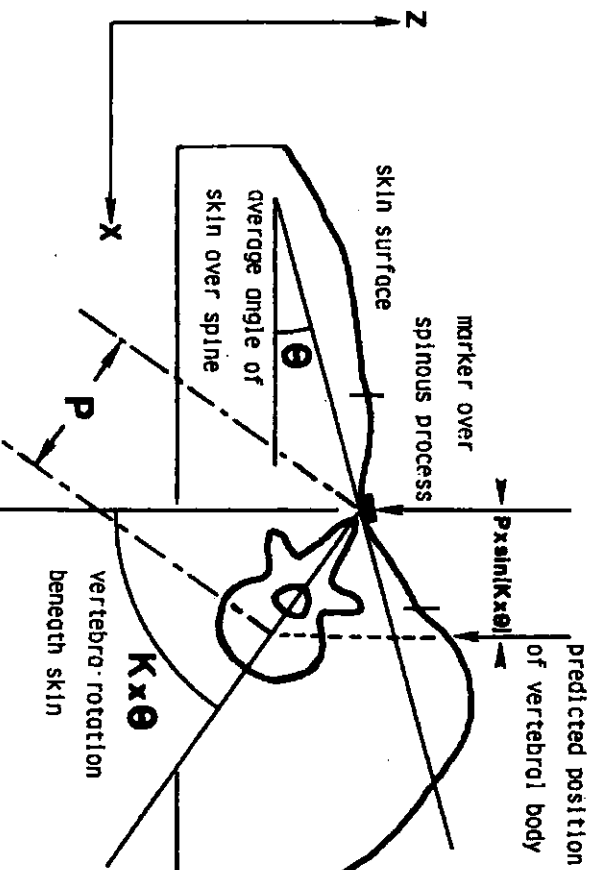


Abbildung 4

Rekonstruktion der lateralen Asymmetrie beim ISIS Scanner (nach Turner-Smith, 1988 (14))

Das ausgereifteste Verfahren mit den umfangreichsten klinisch verwertbaren Meßmöglichkeiten stellt die Rasterstereografie dar, die entscheidende Unterschiede und Vorteile zu den bisher dargestellten Verfahren aufweist (zum Verständnis der Terminologie ist das oben genannte optische Prinzip der „Rasterstereografie“ von dem Verfahren zur Rückenformanalyse gleichen Namens, ursprünglich Videorasterstereografie, zu unterscheiden):

- a) Die Methode arbeitet vollautomatisch. Eine Markierung anatomischer Landmarken ist nicht nötig, um einen Bezug der gemessenen Oberfläche zur Wirbelsäule selbst herzustellen. Das System erkennt die lokalen Krümmungseigenschaften der Rückenoberfläche und findet so automatisch die Landmarken.
- b) Die Auflösung ist höher.
- c) Nach Rekonstruktion der Rückenoberfläche erfolgt auf der Basis eines mathematischen Modells unter Abschätzung anatomischer Dimensionen die Rekonstruktion der unter der Oberfläche liegenden dreidimensionalen Wirbelsäulenform in Form einer Linie, die durch die Zentren der Wirbel verläuft (spinal midline). Die Genauigkeit der Rekonstruktion ist vor dem klinischen Einsatz umfangreich für idiopathische Skoliosen bis 50° Cobb-Winkel evaluiert worden.
- d) Das System bietet nicht nur die von allen zuvor erwähnten Systemen ebenfalls gebotene objektive Rekonstruktion und Beurteilbarkeit der Rückenform, sondern mit der Rekonstruktion der knöchernen Wirbelsäulenform auch eine Alternative zum Röntgenbild. Dies wiederum eröffnet die Möglichkeit, die Strahlenbelastung von Patienten durch Röntgenbilder zu reduzieren.
- e) Die zugrunde liegenden physikalischen und mathematischen Zusammenhänge sind in detaillierter Form in einer Vielzahl von Publikationen beschrieben und nachvollziehbar. Dies gilt in weniger detaillierter Form auch für das ISIS System.

Bei dem Verfahren der Rasterstereografie wird ein hoch aufgelöstes Raster von horizontalen Linien (weißes Licht, Abstand 10 mm) mit Hilfe eines ein Diapositivs auf

den Rücken des frei stehenden Patienten projiziert (Abb. 5). Von einem oberhalb des Projektors angeordneten, definierten Punkt aus wird das aus diesem Blickwinkel verzerrte Liniennaster mittels Videokamera registriert, digitalisiert und kann mit Hilfe eines Computers analysiert werden (Abb. 2 und 6) (39, 40, 41, 42). Diese Messung ermöglicht nach fotogrammetrischer Kalibrierung des Systems eine dreidimensionale Rekonstruktion der Rasterlinien. Jede Linie besteht bei der Rasterstereografie aus einer Vielzahl von Punkten, deren Lage im Raum durch drei Raumkoordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  definiert ist. Nach Glättung und Transformation der gemessenen Rasterlinien in ein regelmäßiges Punktraster ergibt sich die räumliche Form und Lage der vermessenen Rückenoberfläche.

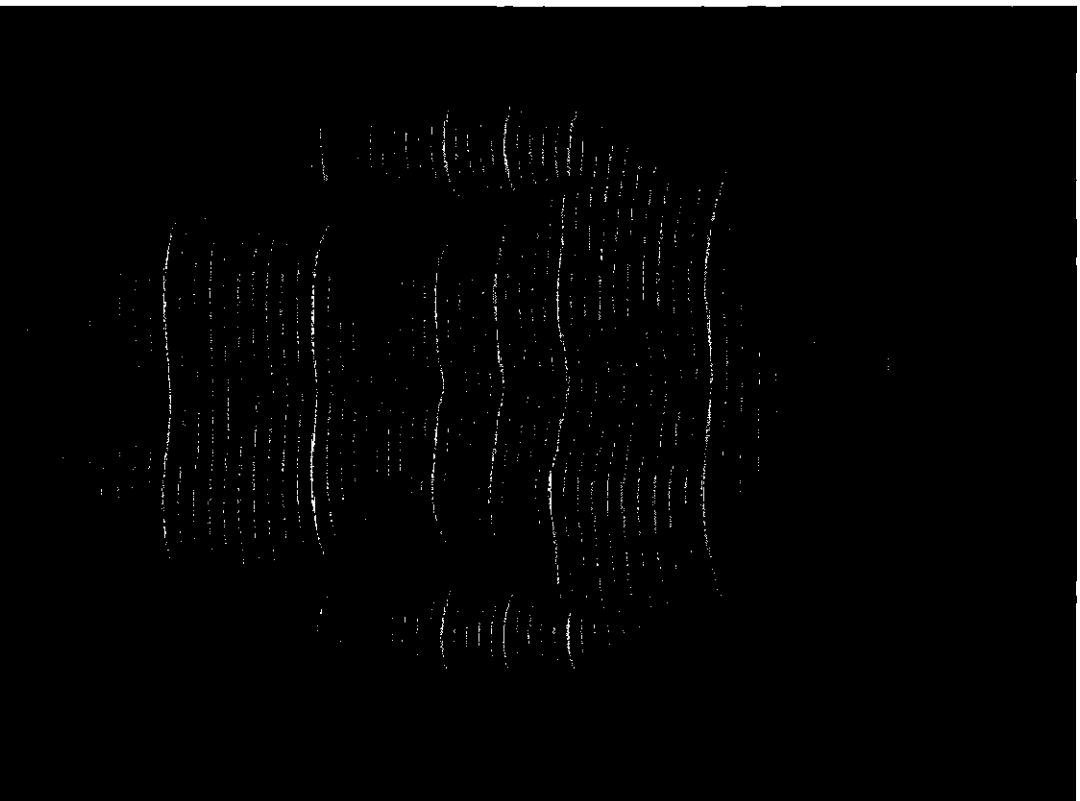


Abbildung 5  
Projiziertes Liniennaster auf der Rückenoberfläche

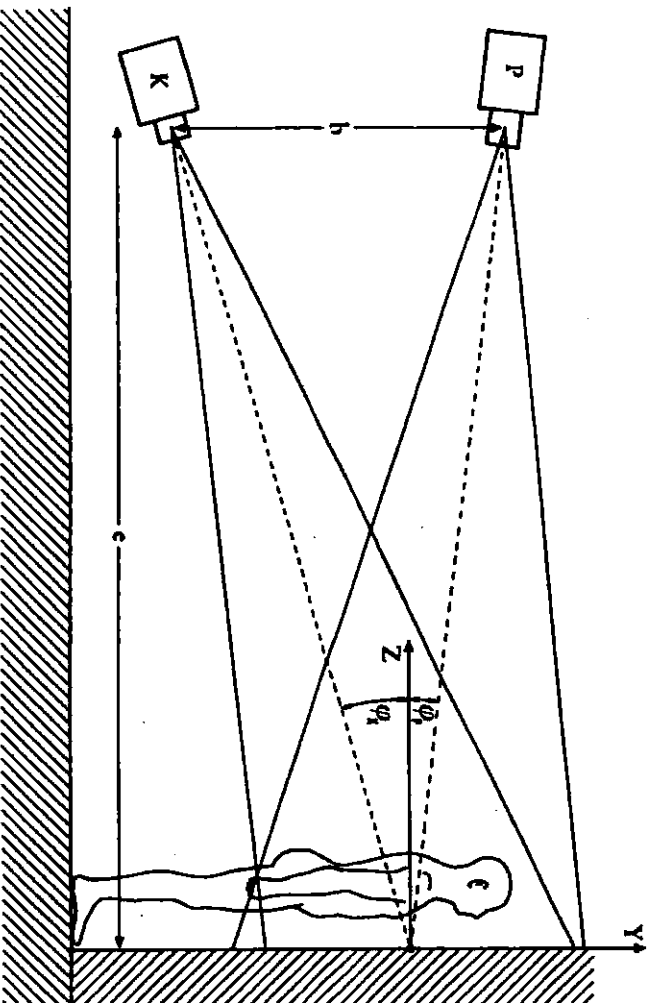


Abbildung 6

Projektor (P) und Videokamera (V) sind bei der Rasterstereografie im Sinne der Triangulation in definiertem Winkel zueinander angeordnet.

Anders als bei allen anderen verfügbaren Verfahren erfolgt nun eine Identifizierung anatomischer Landmarken berührungslos, also ohne eine manuelle Palpation und Markierung, um einen Zusammenhang zwischen der rekonstruierten Rückenform und der knöchernen Wirbelsäule selbst herzustellen. Dies stellt den ersten Schritt zur Rekonstruktion der Wirbelsäulenform anhand der an der Rückenoberfläche gemessenen Daten dar.

Zum Verständnis dieses Schrittes ist es wichtig, zwischen Lage und Form des Rückens zu unterscheiden. Ändert sich die räumliche Lage der Rückenfläche zur Videokamera, kommt es zu einer Änderung aller berechneten Raumkoordinaten. Die räumliche Lage der Raumkoordinaten untereinander ist dabei jedoch konstant. Sie beschreibt die Form des Rückens. Die Form des Rückens ist konstant und ändert sich nicht, wenn sich die Lage im Raum verändert. Ist eine Messung vorgenommen, spielt die Lage der Rückenfläche im Raum keine Rolle mehr. Man rechnet nun nur noch mit räumlich konstanten Meßdaten. Nur diese lageunabhängigen Daten, auch Invarianten genannt, stellen die Grundlage der automatischen Formanalyse dar.

Die Formanalyse der Rückenoberfläche (Krümmungsanalyse) erfolgt durch die Unterscheidung der drei Grundtypen der Flächenform: konvexe, konkave und sattelförmige Flächen. Die Krümmungsqualitäten können in Form einer Krümmungskarte farblich visualisiert werden (Abb. 7). Anatomische Strukturen können in diesen Krümmungskarten an ihrer typischen Form automatisch vom Computer identifiziert und sehr genau lokalisiert werden und stellen als Fixpunkte eine sichere räumliche Beziehung zum Skelett her (43, 44, 45, 46). Eine manuelle Markierung ist nicht erforderlich. Die wichtigsten Fixpunkte sind das beidseitige Lumbalgrübechen über der Spina iliaca posterior superior und der Vertebra prominens.

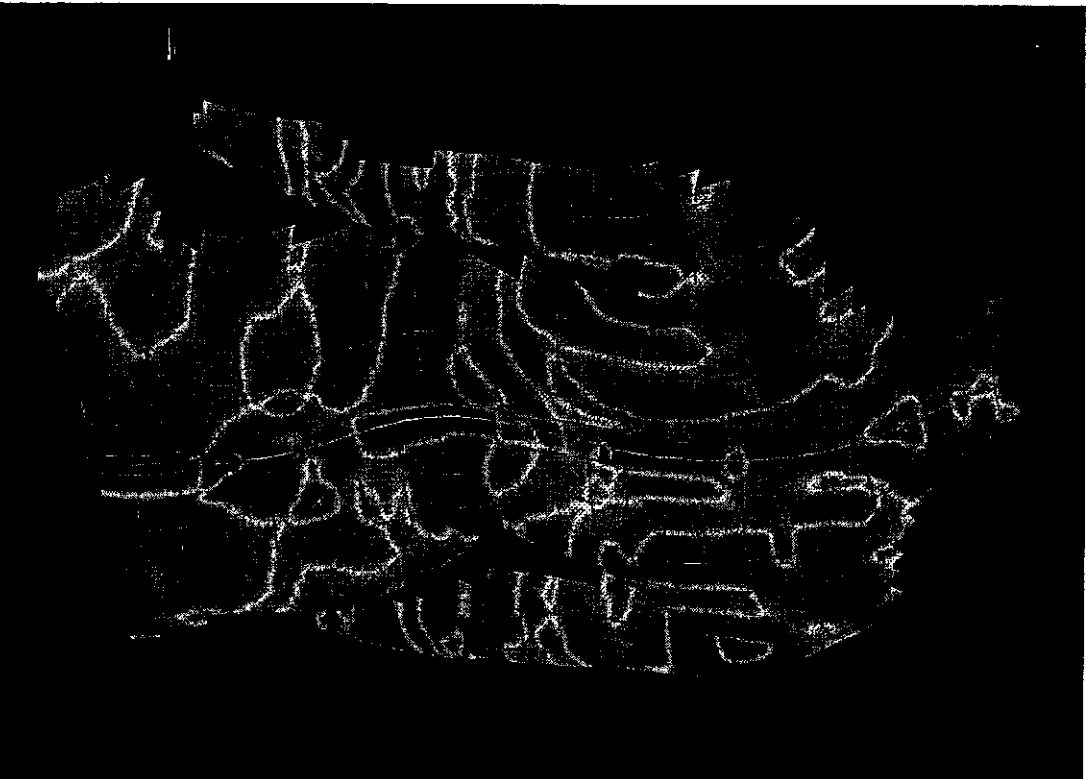


Abbildung 7

Krümmungskarte der Rückenform. Konvexe Flächen sind rot, konkave Flächen sind blau, sattelförmige Flächen sind grün gefärbt. Anatomische Strukturen können sicher identifiziert werden.

Um nun die knöcherne Wirbelsäulenform selbst anhand der Daten der dreidimensionalen Rückenform zu rekonstruieren, ist eine möglichst genaue Abschätzung oder

Messung der räumlichen Lage in allen drei Ebenen erforderlich:

- Seitabweichung der Wirbel in der Frontalebene
- Rotation der Wirbel in der Transversalebene
- Profil der Wirbelsäule in der Sagittalebene

Zur Messung der Seitabweichung der Wirbel ist die Lokalisation der Dornfortsätze naheliegend. Die Informationen der Krümmungsanalyse der Rückenform sind nicht ausreichend, um die Dornfortsätze in allen Ebenen zu identifizieren. Daher wird die Dornfortsatzlinie bei der Rasterstereografie mathematisch in Form der sogenannten Symmetrielinie berechnet. Die Symmetrielinie teilt alle Querprofile des aufgenommenen Lichtasters in zwei Hälften geringster Asymmetrie und berücksichtigt die anatomischen Fixpunkte. Die Grundüberlegung dieser Berechnung ist dabei, daß bei einem gesunden Patienten die Rückenform durch die Dornfortsatzlinie in zwei nahezu symmetrische Hälften geteilt wird. Sie verläuft dann auf der Medianlinie direkt über den Dornfortsätzen und bildet bei lateraler Betrachtung das Profil der Rückenform ab. Die Richtigkeit dieser Überlegung wurde durch eine Studie an 25 Patienten mit Skoliosen von 20-50° Cobb-Winkel, deren Dornfortsätze vor Durchführung der Rasterstereografie markiert wurden, untermauert (47). Die Anzahl der Patienten in dieser Studie ist allerdings relativ gering. Eine Validierung an einem größeren Patientenkollektiv mit höhergradigen Deformitäten der Wirbelsäule ist wünschenswert.

Zur Ermittlung der räumlichen Lage der Wirbelkörper ist die Lage der Dornfortsätze allein nicht ausreichend. Eine genauere Berechnung erfordert die Abschätzung der Wirbelrotation und die Kenntnis des Abstandes der Dornfortsatzspitze vom Wirbelkörpermittelpunkte. Das geometrische Modell zur Berechnung des Wirbelkörpermittelpunktes ist in Abb. 8 dargestellt und im Folgenden erklärt:

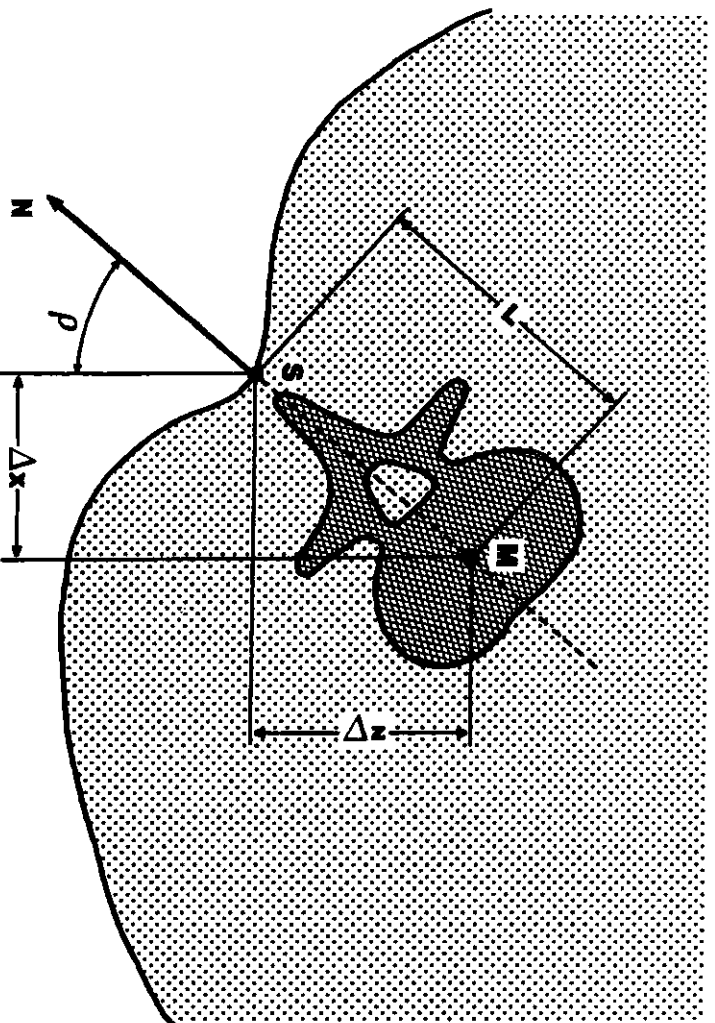


Abbildung 8

Geometrisches Modell zur Berechnung des Wirbelkörpermittelpunktes M

Die Rotation der Wirbel wird der Rotation ( $\rho$ ) der Rückenoberfläche über dem Dornfortsatz, also auf der Symmetrielinie (S), gleichgesetzt. Die Richtigkeit der Messung der Wirbelrotation hängt also davon ab, ob die Symmetrielinie korrekt berechnet wurde. Da die Rückenform regelmäßig im Bereich der Dornfortsätze stark konvex (thorakal) oder konkav (lumbal) ist, führen bereits geringe Abweichungen nach medial oder lateral zu klinisch relevanten Meßfehlern der Wirbelrotation und indirekt auch der Seitabweichung. Insbesondere bei höhergradigen Deformitäten der Wirbelsäule sind hier Meßfehler beobachtet worden. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob auch bei Deformitäten mit höhergradiger Fehrotation der Wirbel die Oberflächenrotation der Wirbelrotation noch entspricht. Es ist eine Hypothese, daß die Wirbelrotation aufgrund der Rigidität des dorsalen Brustkorbes bei höhergradigen Skoliosen größer ist als die Oberflächenrotation. Weitere Untersuchungen zur Validierung und Optimierung der Rasterstereografie sollten sich demnach auch auf die Überprüfung dieser Zusammenhänge bei Skoliosen mittlerer und starker Ausprägung konzentrieren. Die Oberflächen- bzw. Wirbelrotation wird für die klinische Anwendung grafisch als Kurve dargestellt (Abb. 9). Je weiter die Kurve sich von der vertikalen Null-



linie entfernt, desto stärker die Rotation. Eine Abweichung nach links entspricht einer Linkrotation.

Die Seitabweichung der Wirbel wird berechnet, indem die Flächennormale (N) entsprechend der lokalen Oberflächenrotation des Querprofils am Schnittpunkt der Symmetrielinie (S) gefällt wird (Abb. 8). Unter Abschätzung der anatomischen Dimension des Wirbelkörpers (L) kann der Mittelpunkt des Corpus vertebrae (M) ermittelt werden. Die Mittelpunkte bilden dann über alle Profile eine Linie, die sogenannte spinal midline. Diese entspricht der rekonstruierten dreidimensionalen Wirbelsäulenform und wird für die klinische Anwendung als Modell und graphisch in Kurvenform zweidimensional (Seitabweichung und Profil) visualisiert.

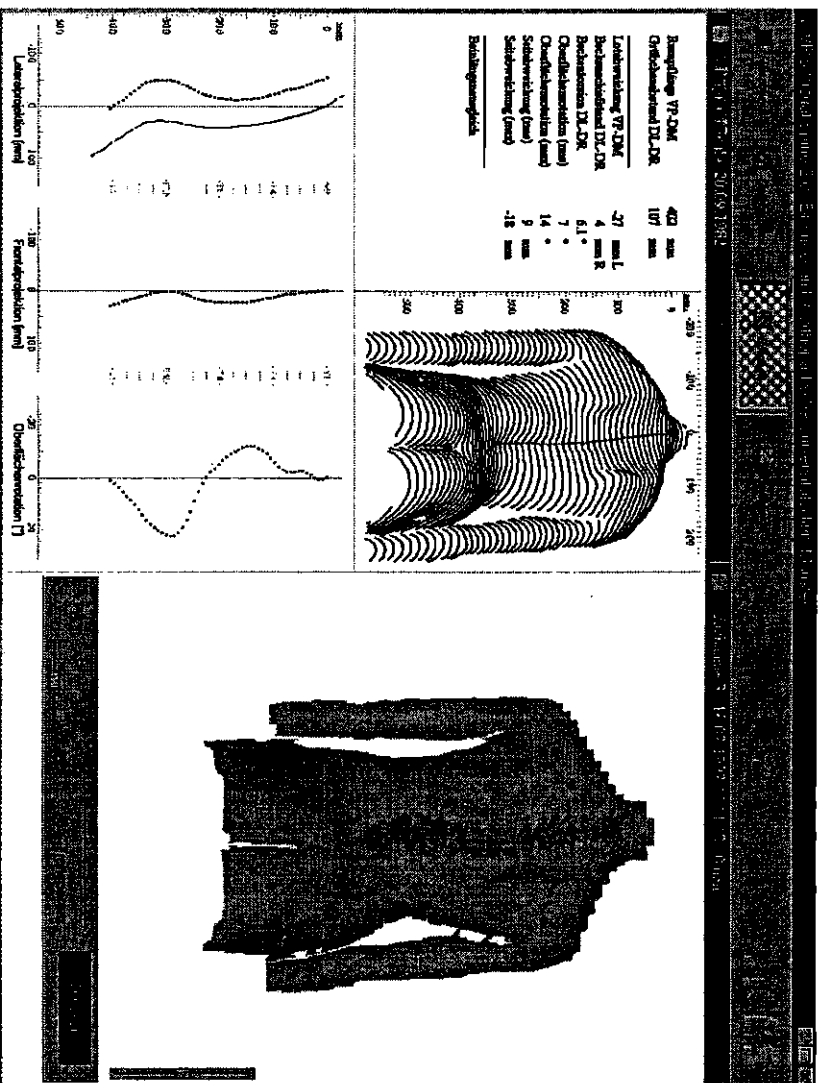


Abbildung 9

Ansicht der Meßergebnisse auf dem Computerbildschirm. Rechts: Dreidimensionales Modell der Wirbelsäule in allen Richtungen drehbar, oben links: Meßdaten und Übersichtsdarstellung der Rückenform durch perspektivische Darstellung der Querprofile; unten links: Grafische Darstellung des Rücken-(grün) und Wirbelsäulenprofils (blau), der Seitabweichung der Wirbel (blau) und der Oberflächen- bzw. Wirbelrotation (rot)

In der klinischen Routineanwendung gilt die Aufmerksamkeit zunächst den Übersichtsdarstellungen, dann den Kurven und dann den Einzelmessdaten. Die Messung dauert einschließlich Patienteneinstellung und Datenauswertung nur einige Sekunden. Der Patient nimmt eine entspannte Haltung ein und muß nicht speziell positioniert werden. Er muß nicht stillhalten, da die Aufnahmezeit der Videokamera sehr kurz ist. Unterschiedliche Körpergrößen und Beinlängendifferenzen werden mittels einfacher Hilfsmittel ausgeglichen.

Insgesamt sind die technischen Möglichkeiten der dreidimensionalen Rekonstruktion der Rückenform durch verschiedene Verfahren vielfältig. Die klinische Relevanz ist aber nur dann groß, wenn diese Daten in Bezug zur Wirbelsäule selbst gesetzt werden. Diese Möglichkeiten bieten derzeit nur der ISIS Scanner und die Rasterstereografie. Letzteres Verfahren ist genauer, komplett berührungslos, wissenschaftlich besser evaluiert und bietet vielfältigere klinische Nutzungsmöglichkeiten.

## 1.2 Klinische Bedeutung der Rückenformanalyse

Die Diagnostik von Wirbelsäulendeformitäten erfordert insbesondere eine ätiologische Zuordnung, eine genaue Messung und Dokumentation der Formveränderung und eine Einschätzung der Progredienz. Im Rahmen konservativer und operativer Therapiemaßnahmen sind möglichst genaue Angaben über die Auswirkungen der durchgeführten Maßnahmen wünschenswert. Zwei besondere Probleme in der Diagnostik und Behandlung von Wirbelsäulendeformitäten sind zu bedenken:

1) Die Deformitäten entstehen und verstärken sich abgesehen von akuten Krankheitszuständen wie beispielsweise Entzündungen oder Tumoren langsam und wachstumsabhängig, so daß oft Jahre lang diagnostische Maßnahmen regelmäßig erforderlich sind. Die betroffenen Patienten sind überwiegend Kinder und Jugendliche (48, 49). Die Nebenwirkungen diagnostischer und therapeutischer Maßnahmen müssen daher so gering wie möglich sein.

Da klinische Untersuchungstechniken eine sichere Einschätzung über die Prognose einer Deformität nicht gewährleisten, hat sich eine regelmäßige Röntgenkontrolle als ergänzende Diagnostik etabliert. Idiopathische Skoliosen und Kyphosen jugendlicher werden nach Empfehlungen erfahrener Behandler mindestens zweimal jährlich geröntgt, in aller Regel in zwei Ebenen (50). Die daraus resultierende Strahlenbelastung erreicht bis zu  $350\text{cGy/cm}^2$  Flächendosisprodukt pro Wirbelsäulenganzaufnahme (51). Das Risiko, ein Mammakarzinom zu entwickeln, ist bei Patientinnen mit idiopathischen Skoliosen, die über einen längeren Zeitraum regelmäßigen Röntgenkontrollen unterzogen wurden, aufgrund der relativ hohen Strahlenexposition signifikant erhöht (52, 53, 54, 55, 56). Die Strahlenbelastung von Kindern und Jugendlichen durch Röntgenaufnahmen stellt ein wesentliches Problem in der Diagnostik und Behandlung von Wirbelsäulendeformitäten dar. Eine signifikante Reduzierung der Strahlenexposition ist möglich, wenn ein Teil der Röntgenaufnahmen durch eine alternative Untersuchung ersetzt werden kann, welche objektiver und reproduzierbarer ist als die klinische Untersuchung, jedoch einen ähnlich aussagekräftigen Befund liefert wie die Röntgenuntersuchung. Die strahlungsfreie, lichtoptische Vermessung der Rückenform mit anschließender Rekonstruktion der Wirbelsäulenform stellt hier eine geradezu ideale Alternative zum Röntgenbild dar. Da nur der ISIS Scanner und die Rasterstereografie eine Rekonstruktion der Wirbelsäule ermöglichen, kommen diese Verfahren für diesen Anwendungsbereich in Frage. In eingeschränkter Form sind auch Verfahren, die nur die Rückenform rekonstruieren, anwendbar. In diesen Fällen erfordert die Interpretation der Befunde mehr Erfahrung.

2) Während die Wirbelsäule im gesunden Zustand ein zweidimensional geformtes Organ darstellt, führen pathologische Verformungen regelmäßig zu dreidimensionalen Verformungen, beispielsweise Wirbelverdrehungen und Wirbelseitabweichungen.

Die objektive Messung und Darstellung dreidimensionaler Formen der Wirbelsäule ist daher wünschenswert. Die andernfalls erforderliche Nutzung sich ergänzender zweidimensionaler Methoden (Röntgen in zwei Ebenen) ist die Alternative. Eine Visualisierung der Deformität ist teilweise möglich, wenn beide Aufnahmen gleichzeitig betrachtet werden. Bis heute stellt jedoch insbesondere die Messung der Wirbelfehlordrotation anhand von Röntgenbildern ein wesentliches Problem dar. Diese ist

bei den idiopathischen Skoliosen ein wesentlicher Bestandteil der Deformität, der bei der Diagnostik keinesfalls unberücksichtigt bleiben sollte. Die Meßmethode nach Nash and Moe (57) ist sehr grob. Eine Einteilung in vier Ausprägungsgrade der Rotation erscheint nicht mehr zeitgemäß und ist von geringer klinischer Aussagekraft. Die Messung nach Perdriolle (58) ist durch Nutzung eines speziellen Meßlineals auf 5° bis 10° genau. Da die Wirbeltraile und die Pedikel im Röntgenbild genau sichtbar sein müssen, ist eine Anwendung bei liegenden Metallimplantaten nahezu unmöglich oder sehr ungenau (59). Dieses Problem läßt sich durch eine Röntgenbilddigitalisierung umgehen. Dann können fehlende Daten interpoliert und eine Rotationskurve berechnet werden, die die Messung einzelner Wirbel ersetzen. Drenrup (60) hat entsprechende Verfahren beschrieben, für die klinische Routine sind sie jedoch zu aufwendig und zeitintensiv. Eine an das Stereoröntgen angelehnte Technik wurde in Kanada entwickelt und findet dort klinische Anwendung bei der Behandlung idiopathischer Skoliosen (61). Zahlreiche weitere Methoden zur Wirbelrotationsmessung werden in der Literatur beschrieben, keine ist jedoch in der klinischen Routine von wesentlicher Bedeutung. Die Methoden werden im Kapitel 2.2.1 zitiert und diskutiert. Eine hohe Meßgenauigkeit bietet die von Aaro und Dahlborn (62) beschriebene Messung mittels Computer Tomografie (CT), die dabei entstehende Strahlenexposition ist jedoch für eine klinische Routineanwendung inakzeptabel hoch. Birchall et al. beschrieben 1997 ein vergleichbares Verfahren mittels Magnet Resonanz Tomografie (MRT) (63). Der Nachteil der Strahlenexposition besteht hier nicht. Die Erhebung und Interpretation der Befunde ist jedoch aufwendig und komplex, wenn die gesamte Wirbelsäule betrachtet werden soll. Die Verfahren finden daher überwiegend bei wissenschaftlichen Untersuchungen Anwendung.

Neben der Wirbelrotation war auch die Rückenoberflächenrotation seither von großem Interesse in der Diagnostik von Skoliosen. Die Oberflächenrotation spiegelt bis zu einem gewissen Ausmaß der Deformität die Wirbelrotation wieder, so daß diese gerne anstelle der viel schwieriger zu messenden Wirbelrotation gemessen und klinisch berücksichtigt wurde. Darüber hinaus ist die Oberflächenrotation, also der Rippenbuckel und Lendenwulst, von wesentlicher Bedeutung für das kosmetische Erscheinungsbild der betroffenen Patienten (64). Die Messung der Oberflächenrotation stützt sich bis heute im Wesentlichen auf die klinische Untersuchung und ist segmentbezogen. Das heißt, sie wird an der Stelle ihrer stärksten Ausprägung gemessen.

Die Messung erfolgt unter Verwendung einfacher, teilweise nicht standardisierter technischer Hilfsmittel wie Skoliometer (1). Diese Hilfsmittel sind ähnlich wie die Beckenwaage und das Lot relativ ungenau und unterliegen subjektiven Einschätzungen und Inter- und Intraobserver-Meßfehlern (65, 66). Nicht selten finden diese Untersuchungsbeefunde bei wichtigen Entscheidungen in der Behandlung Berücksichtigung, so daß objektivere und reproduzierbarere Meßmethoden der Oberflächenrotation wünschenswert erscheinen. Hier könnte die Rückenformanalyse eine optimale Ergänzung zur Röntgendiagnostik und klinischen Untersuchung darstellen. Die Oberflächenrotation könnte segmentübergreifend gemessen werden, der kosmetische Defekt objektiv visualisiert und quantifiziert werden. Die Wirbelrotation kann auch bei liegenden Metallimplantaten mit relativ hoher Genauigkeit abgeschätzt werden. Alle Informationen könnten überschaubar dargestellt und in klinische Entscheidungen ohne großen Aufwand einbezogen werden.

### 1.2.1 Konservative Therapie

Bei der Nutzung der Rückenformanalyse für konservativ behandelte Patienten mit Wirbelsäulendeformitäten steht die Bemühung im Vordergrund, eine aussagekräftige Diagnostik mit einer geringen Anzahl von Röntgenbildern zu ermöglichen. Ein vollständiger Ersatz der Röntgendiagnostik ist jedoch nicht anzustreben. Ohne Röntgenaufnahmen besteht das Risiko einer Fehleinschätzung der Deformitäten. Die Rückenformanalyse sollte die Röntgendiagnostik immer dann ersetzen, wenn die Frage nach einer Progredienz der Krümmungen zu beantworten ist, denn dann ist nicht die absolute Bemessung des Krümmungsmaßes das Ziel, sondern die relative Veränderung zur Voruntersuchung. Liegt ein Röntgenbild zum Zeitpunkt der Voruntersuchung vor, sind die Veränderung und das aktuelle Ausmaß der Deformität anhand der Rückenformanalyse im Vergleich sicher einschätzbar. Die Verlaufskontrolle von Wirbelsäulendeformitäten über längere Zeiträume ist folglich ein ideales Anwendungsgebiet der Methoden. Bei schwachen Deformitäten kann unter der Voraussetzung einer ausreichenden klinischen Erfahrung auch bei der Erstvorstellung auf ein Röntgenbild verzichtet werden. Die Rückenform sollte jedoch immer vermessen werden, da sie im Vergleich zur klinischen Untersuchung (ggf. durch unterschiedli-

che Untersucher) wesentlich genauere und objektivere Daten liefern kann. Sind genaue röntgenologische Maße (Cobb-Winkel) der Deformitäten erforderlich, sollte ein Röntgenbild in der entsprechenden Ebene angefertigt werden. Dies ist der Fall, wenn über die Indikation zur Korsettbehandlung zu entscheiden ist oder die Position von Druckpiloten in Relation zur Wirbelsäulendeformität zu kontrollieren ist.

Aus diesen Aspekten ergibt sich als weiteres Anwendungsgebiet der Rückenformanalyse die Schultreihenuntersuchung (Screening) zur Früherkennung von behandlungsbedürftigen Deformitäten der Wirbelsäule. Diese rechtfertigt keinesfalls eine Röntgenuntersuchung. Die klinische Untersuchung wiederum unterliegt der subjektiven Einschätzung des ärztlichen Personals. Eine objektive Vermessung der Rückenform zusätzlich zur klinischen Untersuchung erscheint als Ergänzung sinnvoll, um die Qualität und Objektivität der Untersuchung zu steigern und die Notwendigkeit von Röntgenuntersuchungen besser zu indizieren.

### 1.2.2 Operative Therapie

Im Rahmen der operativen Therapie sind Röntgenaufnahmen vor der Operation zur genauen Planung unerlässlich. Postoperativ sind in regelmäßigen Abständen Röntgenaufnahmen erforderlich, um die Lage der Implantate zu kontrollieren. Während der postoperativen Kontrollen werden immer Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen angefertigt, um die Implantatlage sicher beurteilen zu können. Die Strahlenbelastung ist bei einem Nachbeobachtungszeitraum von vier bis sechs Jahren daher relativ hoch. Während dieser Nachbeobachtungsphase kann ein Teil der Röntgenaufnahmen durch eine Rückenformanalyse ersetzt werden. Dabei ist der Vergleich von Verlaufsufnahmen besonders wichtig. Tritt keine signifikante Veränderung an der Rückenoberfläche auf und ist der Patient schmerzfrei, kann von einer regelrechten Implantatlage ausgegangen werden. Auf diese Weise lassen sich die postoperativen Röntgenkontrollen durch die Nutzung der Rückenformanalyse um bis zu 50 % reduzieren.

Von wesentlicher Bedeutung aus der Sicht der Patienten ist im Rahmen einer operativen Korrektur einer Wirbelsäulendeformität die Verbesserung des kosmetischen Erscheinungsbildes. Die Vermeidung von Spätschäden und Unterbindung der langsame, lebenslangen Progression der Deformitäten stellen für die Patienten keine direkt spürbaren Effekte dar, wohl aber das neue Körpergefühl und die attraktivere Rückenform. Die Rückenform kann bisher nur durch eine klinische Messung einzelner Formparameter wie Rippenbuckel, Lendenwulst, Becken- und Schulterstand und Rumpfüberhang quantifiziert werden. Alternativ werden von den Operateuren gerne Fotografien des Rückens in Vorneige angefertigt. Fotografien im aufrechten Stand sind aufgrund der fehlenden Visualisierung der Oberflächenrotation wenig aussagekräftig. Beide Methoden stellen keine objektive Bewertung des kosmetischen Erscheinungsbildes dar. Eindrucksvolle Einzeleffekte können hervorgehoben werden, die Subjektivität der Bewertung wird dadurch jedoch nur noch gesteigert. Die Messungen werden gerne in Rumpfvorneige durchgeführt, um die Oberflächenrotation besser zu visualisieren. Ziel sollte es aber sein, die Rückenform im aufrechten Stand oder sitzend zu beurteilen, da dies der klinisch relevanten, alltäglichen Körperhaltung entspricht. Eine Rückenformanalyse im aufrechten Stand könnte die Möglichkeiten bieten, das prä- und postoperative kosmetische Erscheinungsbild des Rückens objektiv und in klinisch relevanter Körperhaltung zu dokumentieren und zu bewerten. Sowohl eine Gesamtansicht der Rückenform als auch einzelner Parameter wie Beckenstand, Rumpfüberhang oder Rippenbuckel wären dann zu beurteilen.

Somit würde nicht nur dem Patienten eine objektive und leicht verständliche Bewertung des kosmetischen Effektes der Operation geboten, sondern dem Arzt stünde mit der Rückenformanalyse eine zusätzliche Möglichkeit der Qualitätssicherung und -verbesserung in der operativen Therapie von Wirbelsäulendeformitäten zur Verfügung. Bisher stützt sich die Bewertung der Operationsergebnisse im Wesentlichen auf die röntgenologische Messung des Skoliosewinkels nach Cobb (67), obwohl die Messung nicht genauer als  $\pm 5^\circ$  ist (68), und die des Kypnosewinkels nach Stagnara (69). Die röntgenologische Messung der Wirbelfehlrotation (58) oder deren Korrektur wird im klinischen Alltag nur selten berücksichtigt, da sie insbesondere postoperativ sehr ungenau ist.

### 1.3 Ziele dieser Arbeit

Die vielversprechenden Anwendungsmöglichkeiten der Rückenformanalyse wurden in Münster schon früh erkannt. Traditionell wurden in der Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie Wirbelsäulendeformitäten behandelt. Gleichzeitig standen Wirbelsäulendeformitäten im Zentrum des Interesses des Institutes für Experimentelle Biomechanik, welches eng mit der orthopädischen Klinik zusammenarbeitete. Aus dieser Zusammenarbeit ging bereits in den Achtzigerjahren die Entwicklung der Rasterstereografie hervor. Dabei waren das Vorhandensein einer größeren Anzahl von Röntgenbildern von idiopathischen Skoliosen und kyphotischen Deformitäten in der orthopädischen Klinik von wesentlichem Wert für die Entwicklung der Meßmethode. Die Weiterentwicklung und klinische Evaluation der Rasterstereografie als Methode zur Rückenformanalyse und die Bearbeitung grundsätzlicher Fragestellungen zur Vermessung, Analyse und klinischen Bewertung der Rückenform bei Patienten mit Wirbelsäulendeformitäten stellen das Thema dieser Arbeit dar.

*Die Arbeit verfolgt im Wesentlichen drei Ziele:*

1. Erweiterung des Anwendungsspektrums der Rückenformanalyse mit der Rasterstereografie auf höhergradige Deformitäten (Cobb-Winkel  $> 50^\circ$ ) und operativ behandelte Patienten
2. Evaluation der Meßgenauigkeit der rasterstereografischen dreidimensionalen Rekonstruktion der knöchernen Wirbelsäulenform unter besonderer Berücksichtigung der neuen Anwendungsgebiete und die Suche nach Verbesserungsmöglichkeiten.
3. Vergleichende Analyse der Rückenform idiopathischer Skoliosen im Stehen und in Vorneige zur Klärung der Frage, inwieweit etablierte klinische Untersuchungs- und Meßmethoden überhaupt aussagekräftig sind und ob die Rückenformanalyse mit der Rasterstereografie zuverlässiger und objektiver ist.



## **2. Klinische Untersuchungen zur Rückenformanalyse mit der Rasterstereografie**

### **2.1 Bisherige klinische Anwendungen**

Im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen die bis 1998 etablierten klinischen Anwendungsmöglichkeiten der Rasterstereografie als Methode zur Rückenformanalyse. Die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit der Rasterstereografie bei idiopathischen Skoliosen bis 50° Cobb-Winkel konnte im Wesentlichen durch die vergleichende Untersuchung von etwa 500 digitalisierten a.p. Ganzwirbelsäulentröntgenaufnahmen und zeitnah durchgeführten Rasterstereografien durch Drerup und Hierholzer (70, 71) belegt werden. Die Arbeiten zeigten, daß der mittlere Fehler der rasterstereografischen Rekonstruktion der Wirbelsäule bei idiopathischen Skoliosen zwischen 20 und 50° Cobb-Winkel für die Wirbelseitabweichung 4 mm und die Wirbelrotation 3° beträgt. Dies wird den klinischen Anforderungen gerecht und führte 1994 zur Installation eines Gerätes in der orthopädischen Poliklinik. Auch im Bezug auf das sagittale Profil der Wirbelsäule konnte durch Drerup et al. (72, 73) eine hohe Genauigkeit der rasterstereografischen Messung nachgewiesen werden. Der mittlere Fehler beläuft sich auf 3°. Ein weiterer klinisch wertvoller Untersuchungsbefund, der rasterstereografisch mit hoher Genauigkeit quantifiziert werden kann, sind der Beckenschiefstand und die damit einhergehende Beckentorsion (74). Erste Erfahrungen mit dem Gerät in der Sprechstunden für Wirbelsäulendeformitäten in der Poliklinik der Klinik für Allgemeine Orthopädie zeigten eine technisch problemlose und wenig zeintensive klinische Anwendbarkeit der Rasterstereografie. Die Untersuchung eines Patienten erfordert einschließlich der Datenauswertung und des Ausdrucksens der Ergebnisse 2 Minuten. Der Patient steht aufrecht und entspannt (Abb. 10). Probeweise kann ein Beinlängenausgleich untergelegt werden. Eine spezielle Haltung muß nicht eingenommen werden und das Anhalten der Luft ist nicht erforderlich. Für die klinische Routineanwendung bei idiopathischen Skoliosen bis 50° Cobb-Winkel und Profilstörungen der Wirbelsäule wurden zwischen 1994 und 1998 Anwendungsstandards entwickelt, die auch heute Gültigkeit haben, aber von den Anwendern im Einzelnen nicht publiziert wurden.

### *Idiopathische Skoliosen:*

1. Klinische Untersuchung und Rasterstereografie bei Erstvorstellung, bei manifester skoliothischer Deformität Röntgenuntersuchung, bei geringen Deformitäten und Fehlhaltungen mit einer Wirbelseitabweichung unter 50 mm 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

### *Sagittale Profilstörungen:*

1. Klinische Untersuchung und Rasterstereografie bei Erstvorstellung, bei manifester kyphotischer Deformität Röntgenuntersuchung, bei geringen Deformitäten und Haltungsinsuffizienzen mit einem maximalen rasterstereografischen, thorakalen Kyphosewinkel unter 45° keine Röntgenuntersuchung
2. Siehe Skoliosen 2. – 4.

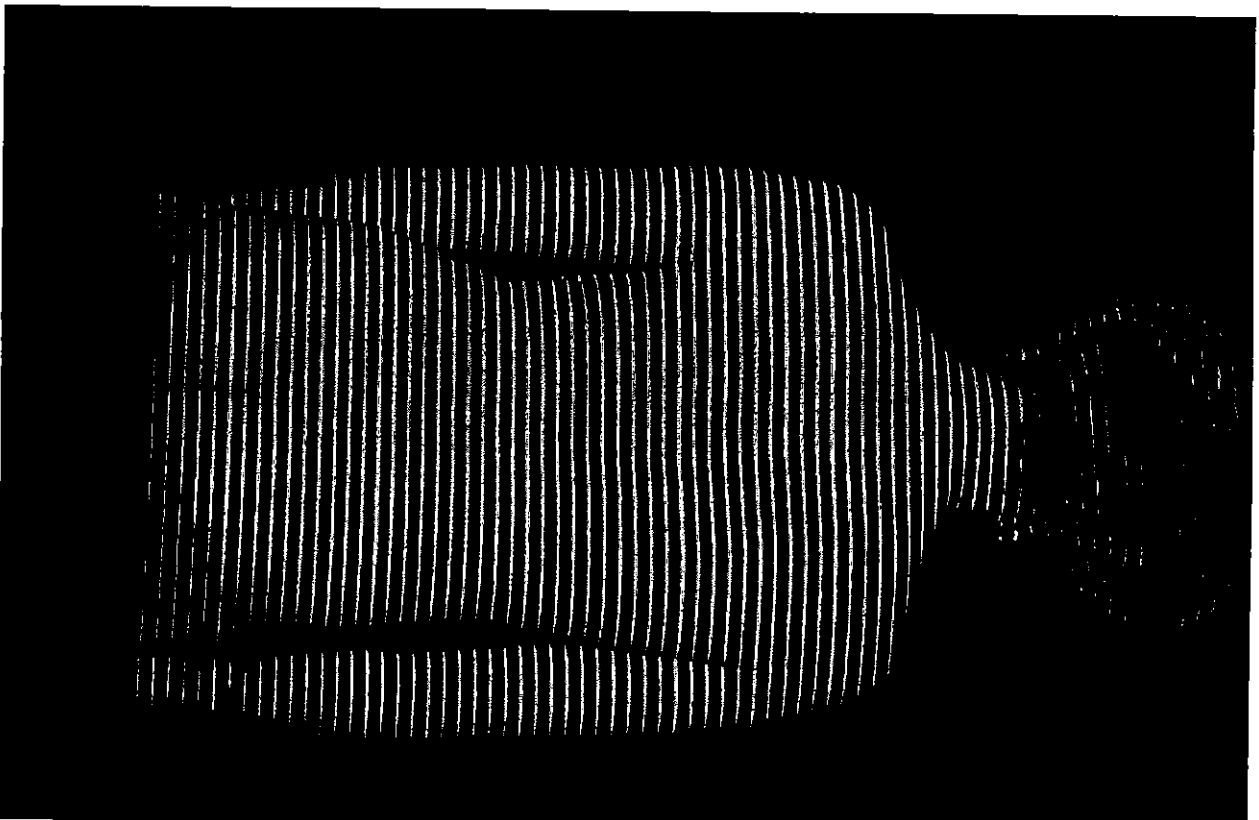


Abbildung 10

Entspannter, aufrechter Stand einer Patientin während der rasterstereografischen Messung.

Abklärungen einer Operationsindikation bei progredienten, höhergradigen Deformitäten erfordern immer eine Röntgenuntersuchung. Die ätiologische Zuordnung einer Deformität ist ebenfalls nur röntgenologisch möglich. Diese ist aber nur erforderlich, wenn eine Progredienz oder eine starke Ausprägung mit sofortiger Behandlungsnotwendigkeit vorliegt. Geringe Deformitäten können demnach zunächst ohne Röntgenuntersuchung verlaufskontrolliert werden. Die Abstände der Verlaufskontrollen sollten bei unsicheren Verläufen auf drei Monate reduziert werden.

Das Gerät muß nicht obligat von ärztlichem Personal bedient werden. Nach einer Einarbeitungszeit von einigen Tagen kann eine Krankenschwester/-pfleger oder Arzthelfer/-in der Poliklinik die Patienten untersuchen. Spezielle Vorkenntnisse auf dem Gebiet der Wirbelsäulendeformitäten sind nicht erforderlich. Sollten Fehler bei der Datenauswertung auftreten oder Optimierungen durch interaktive Vorgabe klinischer Befunde möglich sein (z. B. Vorgabe des Segmentes des Krümmungsscheitels), so ist dies durch das ärztliche Personal ohne eine erneute Messung des Patienten anhand des vorhandenen Datensatzes leicht und schnell möglich. Dies kommt selten vor, wenn die messende Hilfskraft mit dem Gerät vertraut ist. Die Rastersteuereografie sollte vor der klinischen Untersuchung und grundsätzlich vor der Röntgenuntersuchung durchgeführt werden.

Die Interpretation der Befunde wird in einer bestimmten Reihenfolge vorgenommen. Zunächst erfolgt die Betrachtung der Übersichtsdarstellung der Querprofile (Abb.11, oben rechts). Dies vermittelt einen Gesamteindruck über das Ausmaß der Asymmetrie und des kosmetischen Defektes. Dann erfolgt die Betrachtung der grafischen Darstellung der Wirbelrotation, der Wirbelsaitabweichung und des Profils der Wirbelsäule (Abb. 11, unten). Hier ist der Vergleich zu den Voruntersuchungen besonders wichtig. Erst zum Schluß sollten gezielt einzelne Werte in der Datentabelle interpretiert werden (Abb. 11 oben rechts). Die Bewertung von segmentbezogenen Einzelwerten birgt die Gefahr der Überbewertung. Ein wichtiger Wert in der Datentabelle bei der Beurteilung von Kyphosen ist der maximale Kyphosewinkel, da sich das Ausmaß der Deformität anhand der grafischen Darstellung nicht sicher bewerten läßt.

Aufgrund der positiven klinischen Erfahrungen wurde das Gerät zunächst bei der Firma Jenoptik in Jena hergestellt und wird aktuell bei der Firma Diets International in Wiesbaden in Serie gefertigt und unter dem Namen „Formetric“ mit CE-Zertifikation international vertrieben.

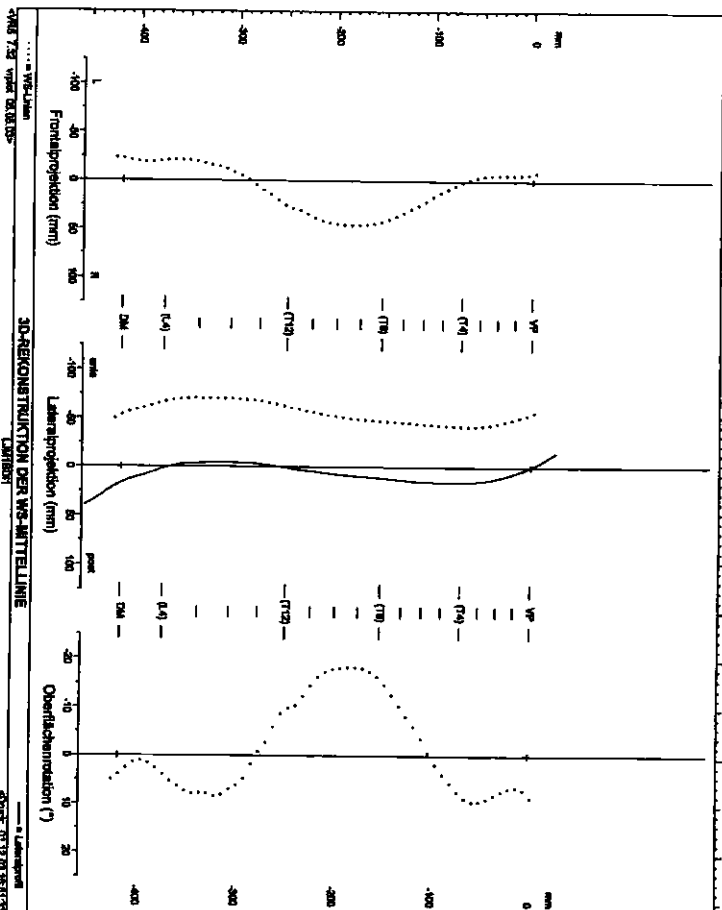
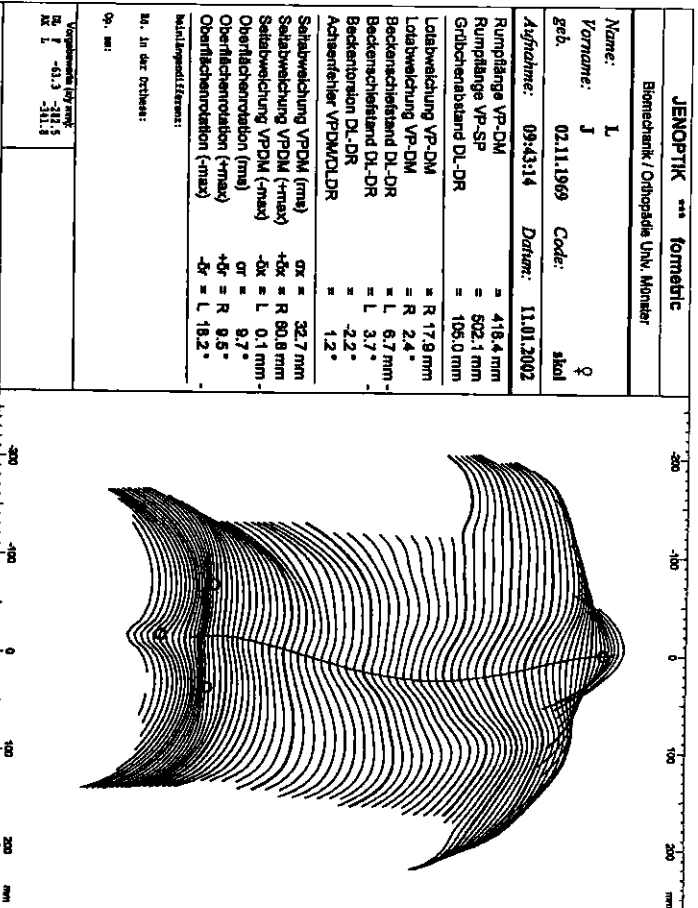


Abbildung 11

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 Wirbelfehrotation von etwa 25° und eine Seitabweichung von etwa 60 mm, das sagittale Profil ist unauffällig. Die exakten Meßdaten sind der Datentabelle oben links zu entnehmen. Die Werte des Wirbelsäulenprofils sind erst auf einem zweiten Blatt ausgedruckt.

## 2.2 Erweiterung des Anwendungsspektrums

Die guten Erfahrungen mit dem Gerät in der klinischen Anwendung bei konservativ behandelten Patienten mit mäßiggradigen Deformitäten führten ab 1998 zu einer erneuten intensiveren Zusammenarbeit der Klinik für Allgemeine Orthopädie und dem Institut für experimentelle Biomechanik. In den folgenden fünf Jahren wurden zahlreiche klinisch ausgerichtete Studien und Experimente durchgeführt, um die Möglichkeiten der Rückenformanalyse generell und insbesondere die Methode der Rasterstereografie weiter zu evaluieren. Wichtig erschien zunächst, die Zuverlässigkeit der Methode auch für skoliotische Deformitäten mit Cobb-Winkeln oberhalb von 50° zu überprüfen. Hierzu waren bislang keine sicheren Daten vorhanden. Aufgrund des zunehmenden Interesses am kosmetischen Defekt der betroffenen Patienten und dessen Korrektur nach operativer Therapie war auch eine Anwendung bei operativ behandelten Skoliosen wünschenswert. Dies stellte darüber hinaus in Aussicht, daß auch im Rahmen postoperativer Verlaufskontrollen Röntgenbilder einzusparen waren. Die weitere wissenschaftliche Evaluation der Methode konzentrierte sich daher zunächst auf die idiopathischen Skoliosen mit Cobb-Winkeln zwischen 50° und 90° und auf Patienten nach operativer Korrektur mit liegenden Metallimplantaten.

Alle in den Kapiteln 2.2.2 bis 3.3.3 beschriebenen wissenschaftlichen Untersuchungen werden in Form folgender Gliederung dargestellt: *Fragestellungen, Datenlage, Methode, Ergebnisse und Diskussion*

### 2.2.1 Höhergradige Wirbelsäulendeformitäten

*Fragestellungen:*

Wie genau und zuverlässig ist die rasterstereografische, dreidimensionale Rekonstruktion der Wirbelsäulenform bei idiopathischen Skoliosen mit Cobb-Winkeln über 50°?

Erlaubt die Genauigkeit eine routinemäßige, klinische Anwendung?

Gibt es systematische Meßfehler und welcher Art sind diese?

*Datenlage:*

Die Genauigkeit der Rasterstereografie ist bisher nur für Skoliosen bis 52° Cobb-Winkel untersucht worden. Von wesentlicher Aussagekraft sind die bereits erwähnten Studien von Hierholzer und Drenup (70, 71), welche die Rasterstereografie mit 478 digitalisierten a.p. Röntgenbildern von 113 Patienten vergleicht. Der mittlere Meßfehler für die Wirbelseitabweichung betrug 4 mm und für die Wirbelrotation 3°. Der Cobb-Winkel der vermessenen Skoliosen lag zwischen 10° und 52°. Liljenqvist et al. (75) untersuchten in einer zweiten Studie 85 Patienten mit idiopathischen Skoliosen zwischen 10° und 52°. Sie verglichen die Rasterstereografie mit nicht digitalisierten a.p. Röntgenbildern. Die radiografische Messung der Wirbelrotation erfolgte nach Perdirolle (58). Der Intra- und Interobserverfehler der Methode ist mit 0,5 bis 10° als hoch einzuschätzen (76). Die mittlere quadratische Abweichung für die rasterstereografische Wirbelrotation betrug in dieser Studie 7,8°. Dieser hohe Wert ist im Hinblick auf die methodisch bessere Studie von Hierholzer und Drenup im Wesentlichen auf Meßfehler bei der Wirbelrotationsmessung nach Perdirolle zurückzuführen und nicht der rasterstereografischen Messung anzulasten. Die Seitabweichung der Wirbel wurde in dieser Studie nicht verglichen.

*Methode:*

Von entscheidender Bedeutung für eine zuverlässige Qualitätskontrolle der Rasterstereografie ist eine möglichst genaue Messung der Wirbelrotation und der Wirbelseitabweichung, die gleichzeitig eine gute Vergleichbarkeit mit den rasterstereografischen Kurven gewährleistet. Verschiedene Methoden der Wirbelrotationsmessung anhand von a.p. Röntgenbildern, Röntgenbildern in zwei Ebenen und Stereoröntgenbildern sind Thema zahlreicher experimenteller und klinischer Studien (77, 78, 79, 80, 81, 82). Die Methoden haben aufgrund ihrer Komplexität keine weite Verbreitung gefunden, stehen aber wissenschaftlichen Untersuchungen zur Verfügung. Nachdem auch die CT und MRT zur Verfügung standen, haben weitere Autoren ver-

sucht, mit diesen Verfahren die Wirbelrotation bei Skoliosen möglichst genau zu messen (62, 63, 83, 84, 85). Die Anpassung der transversalen Ebene für die präzise Rotationsmessung an die Verkipfung des Wirbels in der Frontalebene ist dabei als wesentliche Meßfehlerquelle zu berücksichtigen. Man kam zu der Erkenntnis, daß die präzise Wirbelrotationsmessung bei Skoliosen dreidimensional erfolgen sollte (70, 71, 86). Die Tomografen müssen aus technischen Gründen immer im Liegen durchgeführt werden, was die objektive Messung der Wirbelrotation bei Skoliosen durch Ausschaltung der Schwerkraft im Sinne einer Abschwächung negativ beeinflussen kann.

Eine dreidimensionale Vermessung der Wirbelsäule mittels MRT im Stehen erscheint als optimale Methode zur Bestimmung der Wirbelrotation bei Skoliosen, diese steht aber nicht zur Verfügung. Liegendaufnahmen sind zum Vergleich mit Rasterstereografen weniger geeignet, wie in einem weiteren Kapitel ausgeführt werden wird. Die CT ist wegen ihrer Strahlenbelastung nicht diskutabel und ebenfalls stehend nicht durchführbar. Unter diesen Voraussetzungen wurde zur Evaluation der Rasterstereografie bei höhergradigen Skoliosen in Anlehnung an die Studien von Drerup und Hierholzer (70, 71) erneut auf a.p. Röntgenbilder zurückgegriffen, welche nach einer Methode von Drerup (87, 88, 89, 90) im Institut für Experimentelle Biomechanik digital ausgewertet wurden.

Folgende Vorteile dieser Methode waren ausschlaggebend:

- A.p. Röntgenbilder stehen in großer Zahl für den Vergleich mit der Rasterstereografie zur Verfügung.
- Die Methode ist genau beschrieben und evaluiert und hat sich in vorausgehenden Studien bewährt.
- Ungenauigkeiten der Wirbelrotationsmessung durch Metallimplantate werden durch Interpolation kompensiert.