

V. Asamoah · H. Mellerowicz · J. Venus · C. Klöckner · Oskar-Helene-Heim,  
Orthopädische Klinik und Poliklinik, Freie Universität Berlin

# Oberflächenvermessung des Rückens

## Wertigkeit in der Diagnostik der Wirbelsäulenerkrankungen

### Zusammenfassung

Die Röntgendiagnostik als Standard zur Objektivierung der klinischen Befunde bei Patienten mit Skoliosen und anderen Deformitäten der Wirbelsäule ist, neben einer Reihe von weiteren Problemen, insbesondere in der Verlaufsbeurteilung mit einer deutlichen Strahlenbelastung verbunden. Entsprechend sind im Verlauf der zurückliegenden Jahre eine Reihe von alternativen und ergänzenden Verfahren zur Wirbelsäulendiagnostik entwickelt worden, deren Grundprinzip in der Analyse der Rückenoberfläche besteht: Moirétopographie, Photogrammetrie/Rasterstereometrie, opTRImetric-System, ISIS-System, Videorasterstereometrie (Formetrik), ultraschallgestützte Wirbelsäulenanalyse (Zebris) und Ultraschalltopometrie.

Zur Abklärung der Wertigkeit hinsichtlich des Screenings, der Diagnostik und der Verlaufskontrolle von Skoliosen wurden das Formetric-System der Videorasterstereometrie und das Zebris-System zur ultraschallgestützten Wirbelsäulenanalyse untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass mittels dieser Systeme die Screeninguntersuchungen, die Diagnostik und Verlaufskontrollen der Skoliosen und sagittalen Fehlbildungen hinreichend genau vorgenommen werden können. Für das ultraschallassistierte Zebris-System eröffnet sich darüber hinaus die Möglichkeit dynamischer Analysen der Wirbelsäulenbewegungen.

Einschränkungen der Messgenauigkeit ergaben sich bei Adipositas, bei asymmetrischem Muskelrelief und bei operierten Patienten – wobei bei letzteren dennoch bei Kenntnis der radiologischen Winkel die Verlaufskontrolle verlässlich erfolgen konnte.

Es ist anzunehmen, dass die Bedeutung der Oberflächenvermessung für Klinik und Praxis weiter zunehmen wird.

### Schlüsselwörter

Wirbelsäulendiagnostik · Wirbelsäulendeformitäten · Screening · Oberflächenanalyse · Mobilitätsprüfung · Röntgendiagnostik · Klinische Studie

**N**eben der Analyse physiologischer Wirbelsäulenkrümmungen sind die Möglichkeiten zur bildgebenden diagnostischen Beurteilung pathologischer Veränderungen von zunehmendem Interesse.

Bei Erkrankungen wie der idiopathischen Skoliose ist die sichere frühzeitige Diagnostik von immenser Bedeutung, zumal zahlreiche Studien gemeinsam zu folgenden Aussagen über den Verlauf der Erkrankung kommen [27, 33, 21]:

- ▶ asymptomatischer Beginn in der präpubertären Phase [33, 27],
- ▶ z. T. erhebliche Progredienz innerhalb kürzester Zeit [27],
- ▶ Aussicht auf erfolgreiche Therapie (Verhindern einer weiteren Progredienz, z. T. deutliche Korrektur der Skoliose) bei frühzeitigem Behandlungsbeginn [3, 12, 21, 48, 55];
- ▶ schlechtere Ergebnisse bei spätem Therapiebeginn, (oft mit Indikation zur operativen Therapie wegen der

Tendenz zur Progredienz nach Wachstumsabschluss einerseits sowie der Beeinträchtigung von Vitalfunktionen [24, 46, 48, 53].

Diese Kenntnisse machen den Einsatz eines zuverlässigen Verfahrens zur objektiven Analyse der Wirbelsäule zwingend erforderlich. Notwendig sind Screeninguntersuchungen, Verlaufskontrollen und Möglichkeiten der prä- sowie postoperativen Befundkontrolle, wobei Verfahren zum Einsatz kommen sollten, die nichtinvasiv, beliebig reproduzierbar, zuverlässig und nebenwirkungsfrei sind.

Derzeitiger Standard der Diagnostik bei fraglichen Deformitäten der Wirbelsäule ist neben der eingehenden körperlichen Untersuchung mit Funktionsdiagnostik, die Anfertigung von Wirbelsäulenganzaufnahmen im a.-p.- und im seitlichen Strahlengang, ggf. ergänzt durch Funktions(Bending-)aufnahmen [9, 19, 32]. Daraus lassen sich der Krümmungswinkel [5] und die Wirbelrotation [11, 35] ausmessen sowie die Mobilität in den einzelnen Abschnitten feststellen.

Die Röntgendiagnostik ist jedoch mit einer Reihe von Problemen behaftet. Die Strahlenbelastung beträgt trotz optimierter Untersuchungstechniken, in Abhängigkeit von Körpergröße und

---

Dr. V. Asamoah  
Oskar-Helene-Heim, Orthopädische Klinik  
und Poliklinik, Freie Universität Berlin,  
Clayallee 229, 14195 Berlin

V. Asamoah · H. Mellerowicz · J. Venus ·  
C. Klöckner

## The effectiveness of diagnostic procedures of spinal diseases. Surface analysis of the back

### Abstract

X-ray study to verify clinical findings in patients with scoliosis and other deformities of the spine is associated with considerable radiation exposure as well as a variety of other problems, particularly as regards assessing disease progression. Hence, in the course of the past few years a number of alternative, supplementary spinal diagnostic procedures have been developed which are based on analysis of the surface of the back: Moiré topography, photogrammetry/ raster stereometry, opTRImetric system, ISIS system, video raster stereometry (formetrics), ultrasound-guided spine analysis (Zebri) and ultrasound topometry.

To assess the effectiveness of screening, diagnosis, and progression of scoliosis the formetric system of video raster stereometry and the Zebri system for ultrasound-guided spine analysis were tested. It was shown that the results of screening tests, diagnostic study, and progression evaluation of scoliosis and sagittal deformities were exact enough using these systems. Furthermore, the ultrasound-guided Zebri system offers the option of dynamic analysis of spinal movement.

Limitations in measurement precision were found in obese patients, asymmetric muscle surfaces, and in patients who had undergone surgery, although in the latter group progression could be reliably monitored if the radiological angle was known.

We can assume that surface analysis procedures will gain in importance clinically and in practice.

### Keywords

Spinal diagnostic procedures · Spinal deformities · Screening · Surface analysis · Mobility test · X-ray diagnostic procedures · Clinical study

Körpergewicht, bei einer Aufnahme zwischen 400 und 800  $\mu\text{Gy}$  Ganzkörperdosis [2, 30, 40]. Verlaufskontrollen während der Wachstumsphase sind unumgänglich. Nicht zuletzt wegen des jugendlichen Alters der Patienten ist dies problematisch und wird entsprechend von den Eltern teilweise oder auch vollständig abgelehnt [54].

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Reduktion der dreidimensionalen (3D-) Rückenform auf 2 Ebenen. Es führt zu einem systematischen Fehler der Röntgendiagnostik in dem eine wirklichkeitsgetreue Abbildung der Wirbelsäule nur gegeben ist, wenn sich diese parallel zur Aufnahmeebene befindet. Dennoch resultiert, bei optimaler Verfahrensweise, eine Abweichung von ca.  $5^\circ$  [9, 38]. Ferner ist der Vergleich von Röntgenaufnahmen im Verlauf nur exakt möglich, wenn die Fokussierung sowie der Abstand von Röntgenröhre, Wirbelsäule und Röntgenkassette zueinander absolut identisch gehalten werden [9, 38].

In den letzten Jahren sind eine Reihe von röntgenstrahlenfreien Methoden weiterentwickelt und einige neue Messtechniken eingeführt worden [37]. Maßgeblichen Anteil an der Beschleunigung des Fortschritts hat die rasante Entwicklung im Bereich der Computertechnologie. Einen umfassenden Einblick in die Entwicklung auf dem Gebiet der Oberflächenanalyse zur Wirbelsäulendiagnostik liefert Hierholzer [18]. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass sie auf nichtinvasive Art eine Oberflächenanalyse des Rückenprofils vornehmen und daraus die Verkrümmung und Torsion der Wirbelsäule berechnen.

Auf Grund der unterschiedlichen Technik können sie in 2 unterschiedliche Gruppen unterteilt werden:

- ▶ optische Methoden und
- ▶ ultraschallgestützte Oberflächenanalyssysteme.

### Optische Messsysteme

Bei den optischen Verfahren unterscheidet man, abgesehen vom technischen Messprinzip, Punkt- von Flächenmessmethoden [17].

Die Punktmessmethode bedient sich vorher festgelegter Punkte, in der Regel markanter anatomischer Strukturen, anhand derer die Fläche vermessen

wird. Aus der Beziehung der Fixpunkte zueinander lassen sich die verschiedenen Formparameter (Winkel, Rotation etc.) berechnen [17].

Beim Flächenmessprinzip wird die Oberfläche in gleichmäßig verteilten und dicht beieinander liegenden Punkten erfasst. Diese Verfahrensweise führt im Prinzip zur Erfassung aller Formeigenschaften der Oberfläche; die Berechnung der Parameter erfolgt durch Analyse und Berechnung geeigneter Punktdaten. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der geringeren subjektiven Beeinflussung der Messung, da die Auswahl der Fixpunkte, manuell oder visuell, durch den Untersucher entfällt. Andererseits führt die zunehmende Abstandsdichte nicht nur zur Steigerung der Messgenauigkeit, sondern auch zu einem erheblich gesteigerten Mess- und Auswertungsaufwand [8].

### Moirétopographie

Sie stellt eines der ältesten Verfahren zur optischen Vermessung von Skoliosen dar. Es erfolgt die Erfassung der Rückenoberfläche durch die Erzeugung von Interferenzmustern [37]. Hierfür sind in einer speziellen Anordnung ein Liniengitter, eine Lichtquelle und eine Kamera angeordnet. Durch Interferenzüberlagerungen des Lichtes erscheinen Schattenlinien, sog. Moiré-Streifen auf dem Rücken des Patienten. Bei Gesunden entsteht ein symmetrisches Muster, während bei Skoliosen, je nach Ausmaß derselben, eine mehr oder minder starke Asymmetrie des Interferenzmusters beobachtet wird. Durch Ausmessen des Musters und aus der Zahl der asymmetrischen Linien, kann der Skoliosewinkel geschätzt werden.

Die Sensitivität der Methode wird mit 94 % angegeben, der Anteil falsch-positiver Werte ist mit 17–25 % relativ hoch [10]. Die Korrelation zu radiologisch ermittelten Skoliosewinkeln beträgt 0,7 [10]. Es ist nur eine grobe Schätzung des Skoliosewinkels möglich. Das Verfahren eignet sich zwar prinzipiell zum Screening, das Auswertungsverfahren ist jedoch aufwendig, die Untersuchungsdauer erheblich, hinzu kommen die oben angeführten Unzulänglichkeiten [12, 47].

### Photogrammetrie/ Rasterstereometrie

Diese optischen Verfahren beruhen auf dem Prinzip der Triangulation. Die Lokalisation eines entfernten Punktes P wird aus der bekannten Basisstrecke b und den an ihren Endpunkten gemessenen Winkeln  $\alpha$  und  $\alpha'$  bestimmt. Befindet sich der zu berechnende Punkt nicht in der Horizontalebene, so bedarf es zusätzlich der Bestimmung zweier Höhenwinkel  $\beta$  und  $\beta'$  um die Lage des Objektpunktes vollständig zu bestimmen. Wesentliche Unterschiede der beiden Verfahren bestehen maßgeblich in verschiedenen Methoden zur Winkelmessung [19].

Bei der Stereophotogrammetrie registriert ein Paar von Kameras in einem Stereobildpaar zahlreiche Bildpunkte auf einmal. Für jedes Paar korrespondierender Bildpunkte Q und Q' können, eine bekannte Aufnahmegeometrie vorausgesetzt, die Horizontal- und Höhenwinkel bestimmt werden. Auf diese Weise sind durch Berechnung 3D-Rekonstruktionen der Objektpunkte möglich. Die Methode ist auch zur Bestimmung von bewegten Objekten geeignet. Der Rechenaufwand zur Bestimmung korrespondierender Bildpunkte ist bei diesem Verfahren erheblich. Da die Körperoberfläche relativ strukturlos ist, behilft man sich mit Mustern, die auf die Haut projiziert werden. Bei Wahl eines regelmäßigen Lichtmusters kann, bei bekannter Geometrie desselben, neben dem Auffinden der korrespondierenden Bildpunkte auch die Messung anhand der Lichtmustersgeometrie erfolgen. Dieses Prinzip wurde von Hierholzer weiterentwickelt und bildet die Grundlage der Rasterstereographie [19].

Die Anordnung bei der Rasterstereographie entspricht derjenigen der Stereophotogrammetrie. Der Unterschied besteht im Einsatz eines Projektors anstelle einer Kamera, über den ein Diapositiv ein Lichtmuster aus gleichmäßigen Linien, Punkten und flächenhaften Figuren auf die Körperoberfläche projiziert. Die mathematischen Verfahren zur Auswertung können von der Stereophotogrammetrie übernommen werden.

Der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Vereinfachung und größeren Objektivität bei der Erfassung und Vorverarbeitung der

Bilddaten. Bei vorgegebenem Rasterdiapositiv sind dessen Bildpunkte von vornherein bekannt, es bedarf somit nur noch der Zuordnung der Bildpunkte des Kamerabildes zu den Strukturen des Rasters. Dies ist, bei geeigneter Gestaltung des Rastermusters, leicht möglich.

Fortgeschrittene Anwendungssysteme dieses Prinzips sind das „opTRImetric-“ und das „ISIS-System“ [23].

#### opTRImetric-System

Durch Doppelbelichtung auf einen Film wird ein Messraster in die Körperebene hinein fotografiert. Über 2 Blitzdiaprojektoren, welche in definiertem Winkel Höhenlinien auf die Körperoberfläche projizieren, wird die 3. Dimension erhältlich. Das System liefert in einer Aufnahme eine Beschreibung des Wirbelsäulenverlaufs und der Körperstatik. Hierzu ist jedoch die vorherige Markierung von knöchernen Fixpunkten nötig. Der Einsatz zu Screeningzwecken und für Verlaufsbeobachtungen ist möglich, es werden jedoch keine dem Skoliosewinkel vergleichbaren Werte geliefert [42].

#### ISIS-System

Mittels automatischer Abtastung des Rückenprofils durch einen horizontalen Lichtstrahl bei synchroner Aufzeichnung durch eine Kamera, erfolgt die phototechnische Vermessung. Die aufgezeichneten Kurven werden computergestützt vermessen, es erfolgt die Rekonstruktion eines dreidimensionalen Bildes. Man erhält dem radiologischen Skoliosewinkel vergleichbare Werte [8, 10]. Die Korrelation beträgt 0,79–0,88 [10]. Falsch-positive Werte liegen bei 23 %. Rotation und Rückenprofil lassen sich objektiv erfassen. Das Verfahren kann zu Screeningzwecken eingesetzt werden [22, 50].

#### Videorasterstereometrie(VRS)- Formetric-System

Dieses auf einem Prototyp von Hierholzer [18] basierende Verfahren beruht auf den methodischen Grundlagen der Rasterstereographie. Neu bei dieser Methode ist, dass zur Bildaufnahme eine Halbleitervideokamera mit verzerungsfreiem Matrixsensor und Video-

interface zum Anschluss an einen Prozessrechner Verwendung findet. Die Sensitivität liegt bei 98 %, der Anteil falsch-positiver Werte beträgt 13,9 %. Die Korrelation zu radiologischen Winkeln wird mit 0,8–0,93 angegeben [10]. Es ist somit ein gutes Screeningverfahren, das hinsichtlich Reproduzierbarkeit, Messgenauigkeit und Schnelligkeit alle Anforderungen erfüllt und sich zu Verlaufskontrollen, zur Analyse von Fehlhaltungen und zur Bestimmung der Wirbelrotation eignet. Dynamische Untersuchungen sind, wie bei allen vorher beschriebenen Verfahren, nicht möglich [26, 52], (Abb. 1).

### Ultraschallgestützte Wirbelsäulenanalyse

Der Einsatz von sonographischen Verfahren ist in einer Reihe von Studien beschrieben worden. Allen älteren Methoden ist gemein, dass die mittels konventioneller Ultraschallgeräte erzielten Ergebnisse, keine hinreichende Genauigkeit besitzen [28, 29, 45].

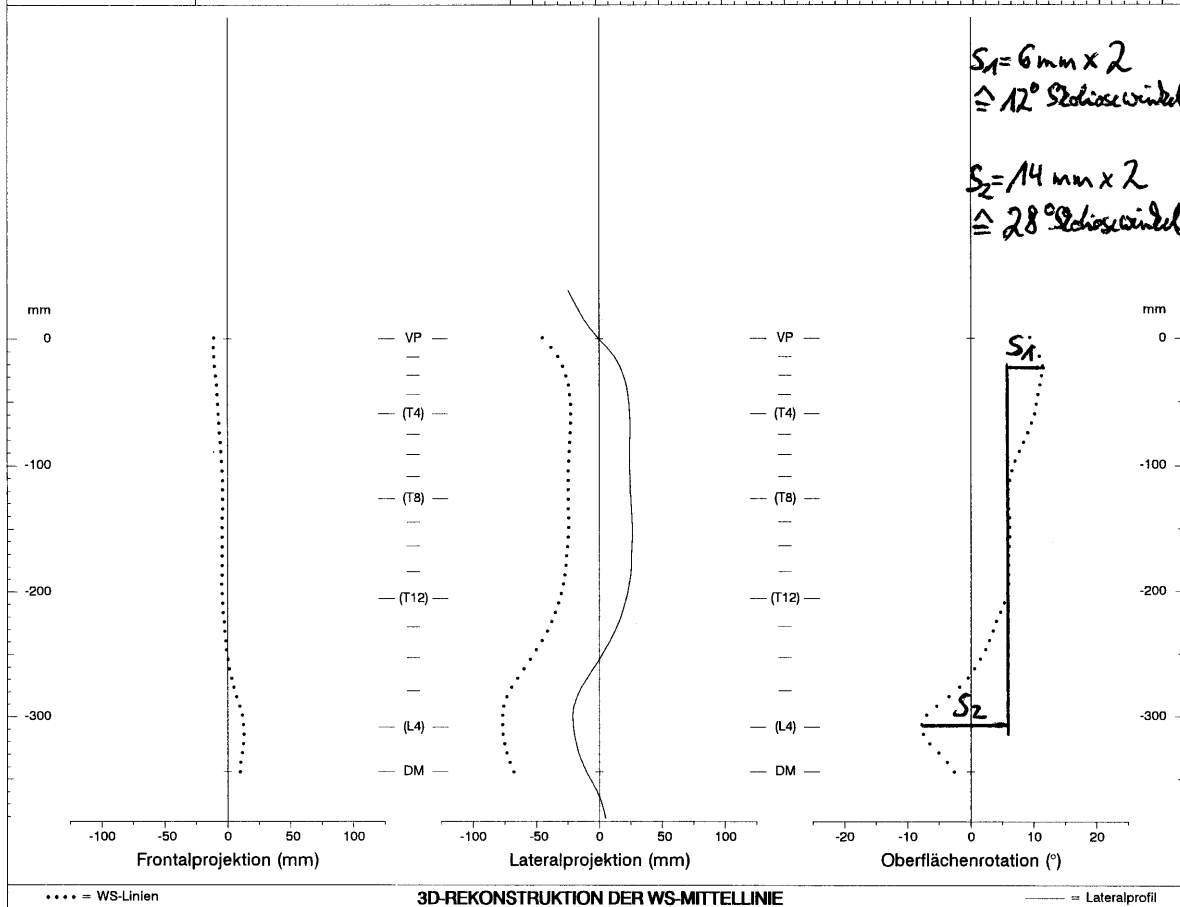
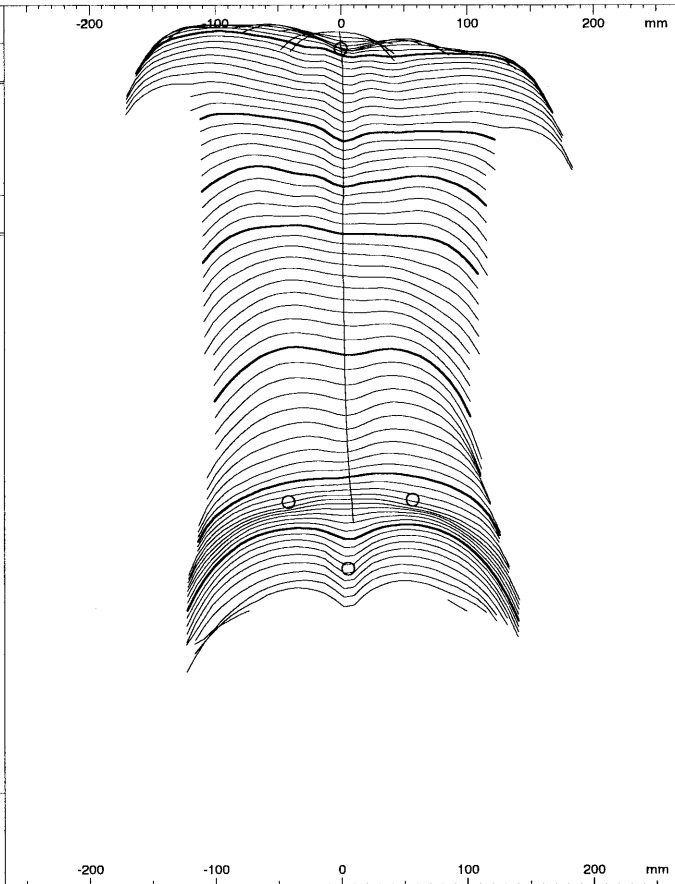
Ein neu entwickeltes Verfahren soll hier vorgestellt werden über dessen klinischen Nutzen erste Studien durchaus positive Resultate erbracht haben [25, 44].

#### Ultraschallgestützte 3D- Wirbelsäulenanalyse „Zebris“

Dieses Verfahren basiert auf der computergestützten Verarbeitung von Ultraschallsignalen anhand derer eine 3D-Rekonstruktion der Wirbelsäule (WS) möglich ist. In definierten Abständen werden Elektrodenmarker an markanten Fixpunkten sowie im Verlauf der Dornfortsätze der Wirbelsäule auf der Haut des Patienten aufgeklebt. Über einen Adapter sind die Marker mit dem Rechner verbunden. Ein Stativ mit 3 Richtmikrophonen befindet sich in definiertem Abstand zum Patienten und ist ebenfalls an den Rechner gekoppelt. Änderungen der Markerpositionen werden über die Mikrophone registriert und im Rechner verarbeitet. Auf diese Weise können Winkelwerte zwischen den einzelnen Markern und deren Veränderung bei Bewegung im Echtzeitverfahren bestimmt werden (Abb. 2, 3, 4).

Die computergestützt berechneten Winkelkurven sowie die 3D-WS-Rekonstruktion sind jederzeit abrufbereit; Be-

| JENOPTIK *** formetric    |                      |
|---------------------------|----------------------|
| JENOPTIK                  |                      |
| Name:                     | S.                   |
| Vorname:                  | Münerver             |
| geb.                      | 12.01.81             |
| Bild-Nr.:                 | 0079 Datum: 05.01.95 |
| Rumpflänge VP-DM          | = 344.4 mm           |
| Rumpflänge VP-SP          | = 423.8 mm           |
| Grübchenabstand DL-DR     | = 98.8 mm            |
| Lotabweichung (VP-DM)     | = -7.5 mm            |
| Lotabweichung (VP-DM)     | = -1.2 °             |
| Beckenschiefstand (DL-DR) | = 1.7 mm             |
| Beckenschiefstand (DL-DR) | = 1.0 °              |
| Beckentorsion (DL-DR)     | = -5.8 °             |
| Achsenfehler (VPDM/DLDR)  | = 0.3 °              |
| Seitabweichung (mittl.)   | $\sigma x = 3.2$ mm  |
| Seitabweichung (max.)     | $\delta x = -5.8$ mm |
| Rotation (mittl.)         | $\sigma r = 7.0$ °   |
| Rotation (max.)           | $\delta r = 11.4$ °  |
| Vorgabewerte (x/y mm):    |                      |



<vrplot> **3D-REKONSTRUKTION DER WS-MITTELLINIE** <03.03.95>

Abb. 1 ◀



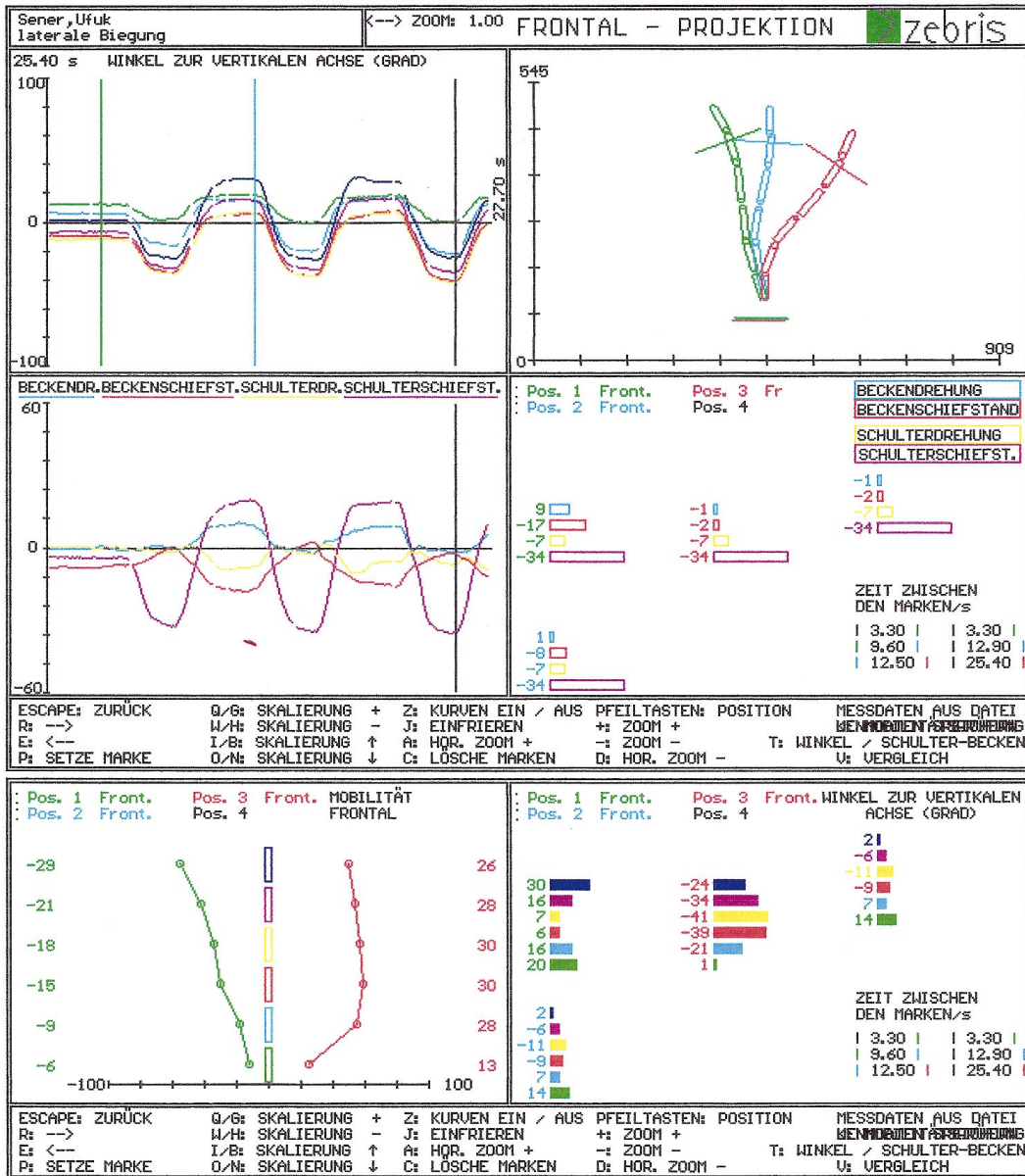


Abb. 2 a, b ◀ Darstellung der berechneten Winkelwerte bei der 3D-ultraschallgestützten Wirbelsäulenanalyse für Bending (a) und Anteflexion (b)

arbeitungen sind auch nach Beendigung der Messung möglich. Die Sensitivität der Methode liegt bei 98 %, die Spezifität bei 88 % [36].

Das System liefert Winkelwerte, die sich nicht direkt mit den radiologischen Werten nach Cobb vergleichen lassen. Das Verfahren erfüllt die Anforderungen, die an Screeningverfahren gestellt werden und ist zu diesen Zwecken ge-

eignet. Die Messvorbereitung erfordert Übung und ist mäßig zeitaufwendig. Rotation der Wirbelsäule sowie Körpersymmetrie können berechnet werden. Abweichend von allen anderen Systemen, ist hier zudem die dynamische Mobilitätsprüfung möglich [1, 25].

## Ergebnisse

### Videorasterstereometrie „Formetric“

In einer klinischen Studie wurden an der orthopädischen Klinik der FU-Berlin „Oskar-Helene-Heim“ 154 Skoliosepatienten zusätzlich zum Standarduntersuchungsgang mit dem „Formetric-

Videorasterstereographiesystem“ untersucht. Geprüft werden sollte:

- ▶ Fähigkeit des Systems, Wirbelsäulenkrümmungen zu erkennen,
- ▶ Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit des Systems hinsichtlich der Winkelbestimmung,
- ▶ weitere Anwendungsmöglichkeiten.

Zur Ermittlung der Reliabilität wurden 6 Patienten jeweils 15-mal im Verlauf eines Tages vermessen. Skoliosewinkel und relativer Variationskoeffizient wurden bestimmt. Der Bestimmung der Validität diente die Auswertung der erhobenen Daten an einer Kontrollgruppe

Abb. 1 ◀ Graphische Darstellung der Rückenoberfläche und Ausdruck der berechneten Parameter einer Wirbelsäulenoberflächenvermessung mittels Videorasterstereometrie (Formetric-System)

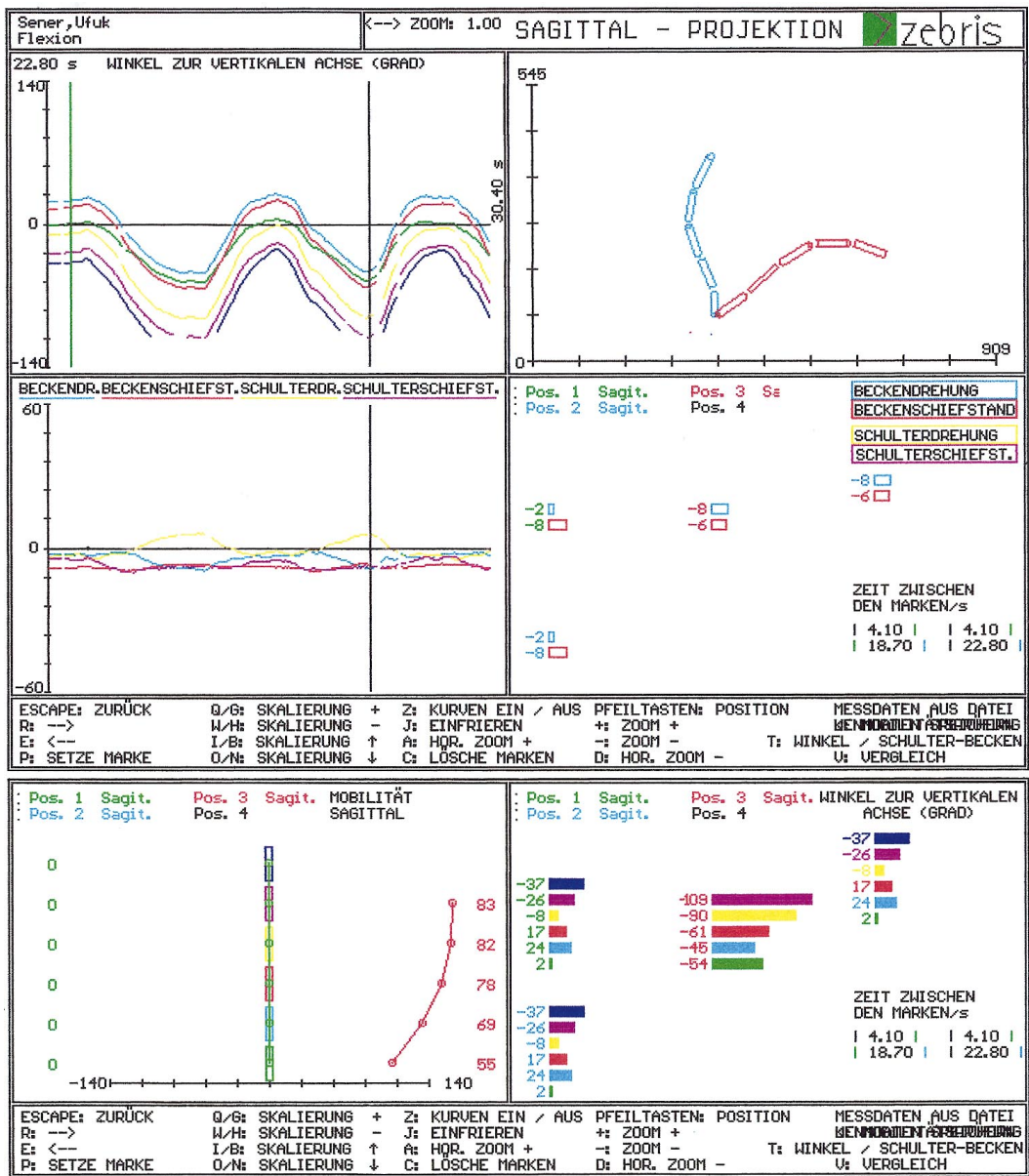


Abb. 2b ◀

**b**

von 25 normalgewichtigen Probanden gleichen Alters und Geschlechts ohne Anhalt auf Vorliegen einer Wirbelsäulendeformität sowie die Auswertung der Daten des Patientenkollektivs.

Zur Bestimmung der Genauigkeit bei Erfassung von Winkeln wurden die Werte der Messung mit den, aus am selben Tag angefertigten Röntgenaufnahmen radiologisch ermittelten Winkeln (nach Cobb) verglichen. Des Weiteren wurden Einflussfaktoren auf die Messergebnisse durch Aufschlüsselung des Patientengutes nach Skolioselokalisierung, Körpersymmetrie, zusätzlichen spondylären Veränderungen, Patien-

tenhabitus und Körpergewicht untersucht.

Der Einfluss eines ausgeprägten bzw. unterentwickelten Muskelreliefs wurde durch Analyse von 13 Kraftsportlern bei angespannter und bei entspannter Rückenmuskulatur beurteilt.

Durch Mehrfachmessungen über 15 Monate wurde die Eignung der Methode zur Verlaufsbeurteilung überprüft; 155 Schüler einer Altersstufe wurden im Screening auf Vorliegen einer Skoliose untersucht, wobei Messwerte >10° als Kriterium für Nachuntersuchungen im Rahmen der Skolioseprechstunde galten. Skoliotische Fehl-

haltungen, klinisch anhand des Armhalteversuchs nach Matthiass bestimmt, wurden in entspannter und in aufgerichteter Haltung vermessen, um die Werte mit den, vom selben Tage stammenden, Röntgenergebnissen zu vergleichen und eine Aussage über den Wert des Systems bei dieser Fragestellung zu ermöglichen. Zudem erfolgte die Vermessung von Kyphose- und Lordosewinkeln. Anhand der Kontrollgruppe wurde die Validität der Methode überprüft.

Die Sensitivität der Methode betrug in unserer Studie 98,0%. Die Spezifität lag bei 84%. Der Mittelwert der Variati-



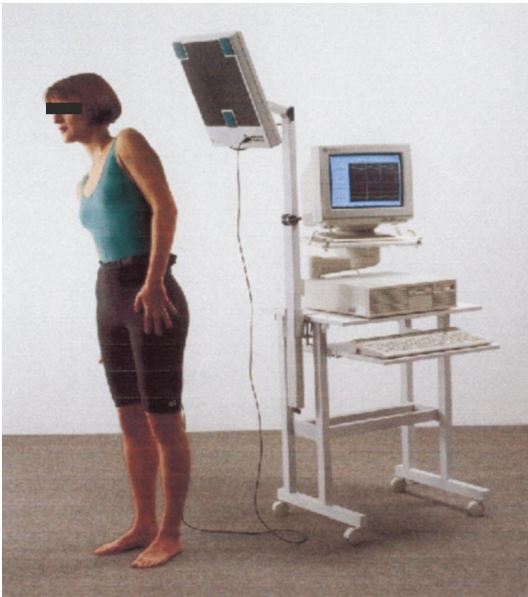


Abb. 3 ◀ Messplatzanordnung der ultraschallgestützten Wirbelsäulenanalyse mit dem Zebris-Messsystem

onskoeffizienten, Ausdruck der Reliabilität, lag bei 4,5 %. Für die Übereinstimmung von radiologisch ermitteltem Winkel und optisch erfasstem, ergab sich ein Korrelations-/Regressionskoeffizient von 0,89 und 0,91. Die Untersuchung der Kraftsportler zeigte, dass bei Vorliegen eines asymmetrischen ausgeprägten Muskelreliefs bei Muskelanspannung, um mehr als das 3-fache höhere Winkelwerte gemessen wurden als bei vergleichbaren Personen mit symmetrischem Muskelrelief in entspannter Haltung (10–26°).

Hinsichtlich des Einflusses der Konstitution zeigte sich: bei deutlichem Übergewicht von mehr als 20 % (nach Broca) ist die Korrelation Röntgen vs. Rasterstereometrie mit 0,56 deutlich erniedrigt. Ähnlich schlecht war die Korrelation bei operierten Skoliosen, bzw. bei Vorliegen von ossären Deformitäten wie beispielsweise Block- oder Schmetterlingswirbeln.

Die Analyse der Verlaufsbeobachtungen zeigte, dass in 75,7 % der Fälle korrekte Änderungen der Skoliose mit Abweichungen von maximal 4° registriert wurden. Die Veränderung in der Tendenz wurde sogar in 88,8 % richtig errechnet. Dies traf auch für die Patienten nach Skolioseoperationen zu, bei denen die Einzelmessung keine gute Übereinstimmung mit dem Cobb-Winkel ergeben hatte. Bei der Screeninguntersuchung betrug die Sensitivität 98 %, die Spezifität lag bei 84 %.

Die Gruppe der Patienten mit Kyphosen und Lordosen war für eine aussagekräftige statistische Auswertung zu klein; es zeigte sich jedoch, dass die Wirbelsäule in der Seitenansicht gut und zuverlässig beurteilt werden kann.

#### Ultraschallgestützte 3D-Wirbelsäulenanalyse „Zebris“

Im Rahmen einer weiteren klinischen Studie wurden in unserem Hause 74 Patienten über die Skoliosesprechstunde

zusätzlich zum Standarduntersuchungsgang mit dem „Zebris-System“ untersucht. Geprüft wurden:

- ▶ Fähigkeit, mittels dieser Methode Wirbelsäulenkrümmungen zu erkennen,
- ▶ Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit des Systems,
- ▶ Wertigkeit der Mobilitätsprüfung,
- ▶ weitere Anwendungsmöglichkeiten.

Das Studiendesign entsprach dem der „Formetric-Studie“ [52], die Patientenzahl war jedoch geringer und entsprechend kleiner waren die Referenzgruppen.

Anhand von 6 Patienten die im Verlauf eines Tages 10-mal vermessen wurden, erfolgte die Ermittlung der Reliabilität. Bestimmt wurde der Skoliosewinkel und der relative Variationskoeffizient. Zur Bestimmung der Validität erfolgte die Datenermittlung von 10 Patienten gleichen Geschlechts im Alter zwischen 21 und 35 Jahren, bei denen klinisch kein Anhalt für das Vorliegen einer Skoliose bestand sowie die Datenanalyse des Patientenkollektivs.

Die Genauigkeit der Winkelmessung wurde durch Vergleich der sonographisch ermittelten Winkelwerte, mit den am selben Tag mittels Röntgendiagnostik gewonnenen Winkeln nach Cobb überprüft. Die Möglichkeiten der

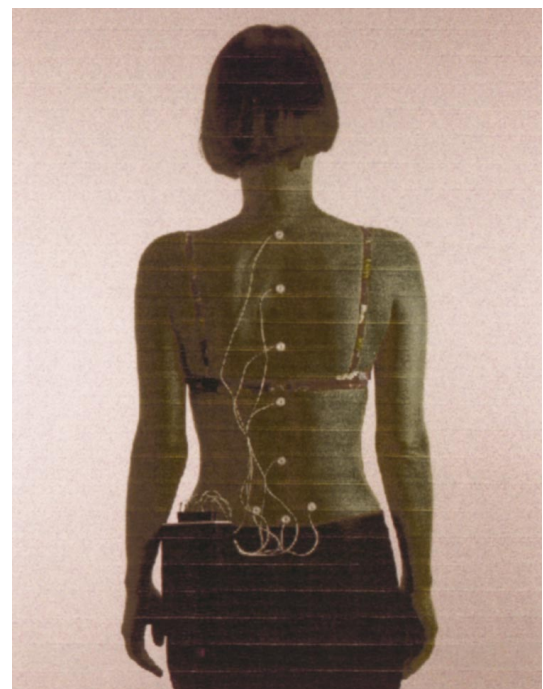


Abb. 4 ▶ Positionierung der Ultraschallmarker in Projektion auf die Dornfortsätze zur Wirbelsäulenanalyse mit dem Zebris-Messsystem

Verlaufskontrolle mit diesem Messsystem wurden durch Wiederholungsmessungen über einen Zeitraum von 18 Monaten bestimmt, wobei jeweils der Vergleich mit dem radiologischen Befund erfolgte.

Bei 50 Schülern einer Altersstufe wurde eine Screeninguntersuchung auf Vorliegen von Skoliosen durchgeführt. Winkel  $>10^\circ$  wurden dabei als Kriterium für die weitere Abklärung in der Skoliosesprechstunde gewählt. Durch Vergleich der klinischen und radiologischen Befunde mit den Werten der Mobilitätsprüfung erfolgte die Einstufung des Verfahrens hinsichtlich seines interessantesten Aspekts. Die dynamische Untersuchung umfasste das Seitwärts-Bending sowie die Flexion der Wirbelsäule jeweils aus der Neutralstellung heraus. Dabei wurden auch Einflüsse wie Operationen, Art der Deformität und Art der Therapie auf die Ergebnisse beleuchtet.

Für die Validität der Methode wurden die folgenden Werte ermittelt: Die Sensitivität betrug 98,8 %, die Spezifität 88 %. Der Mittelwert der Variationskoeffizienten lag bei 2,6 %. Die Differenz der radiologisch bestimmten Winkelwerte zu den sonographisch ermittelten Einschlusswinkeln zwischen den Markern lag durchschnittlich bei  $8,7^\circ$ ; ein direkter Vergleich ist wegen der verschiedenen Betrachtungsweisen nicht möglich. Ein signifikanter Einfluss von Gewicht und Konstitution auf das Messergebnis wurde hier nicht beobachtet; je schwieriger die Lokalisation der Dornfortsätze ist, desto größer wird der zeitliche Aufwand der einzelnen Messung.

Durch die Mobilitätsprüfung können Beweglichkeit und Bewegungseinschränkungen zuverlässig erfasst werden. Der Vergleich der Bending-Aufnahmen und des klinischen Untersuchungsbefunds mit den sonographischen Mobilitätsprüfungen zeigt, dass durch das Ultraschallsystem genaue Aussagen über Art und Umfang der Mobilität möglich sind. Das Verhalten der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte bei Bewegung kann analysiert, der Ort der Fixierung, sofern vorhanden, markiert werden. Schulter- und Beckenschiefstand wie auch Rotation werden qualitativ zu 86 % korrekt erfasst. Auch hier gilt jedoch, dass ein Vergleich der gemessenen Winkelwerte nur indirekt möglich ist. Bei Skoliosen zwischen  $20^\circ$  und  $30^\circ$

konnte eine ortsgebundene Fixierung von im Mittel 14 % im Vergleich zur Gegenseite ermittelt werden. Es zeigte sich ein signifikanter geschlechtsgebundener Unterschied hinsichtlich der Mobilität: Bei gleichstarker Krümmung wiesen männliche Patienten eine im Durchschnitt um 8 % höhere Mobilität der Wirbelsäule auf.

Die Auswertung der Verlaufskontrollen zeigte, dass Befundänderungen sonographisch in 86,4 % der Fälle richtig erfasst werden, im Vergleich mit der Röntgendiagnostik. Bei den fehlerhaften Befunden handelt es sich in 79 % der Fälle um tiefe Lumbalskoliosen.

Für die Screeninguntersuchung ergaben sich mit 97 % (Sensitivität) und 85 % (Spezifität) annähernd die gleichen Werte wie bei Überprüfung des Systems auf diese Parameter.

## Diskussion

Mit den Methoden zur Oberflächenvermessung der Wirbelsäule steht eine Ergänzung zur klinischen und radiologischen Diagnostik zur Verfügung. Die Videorasterstereometrie (VRS) hat sich als zuverlässiges Verfahren zur schnellen, reproduzierbaren Diagnostik von Wirbelsäulendeformitäten erwiesen. Der zeitliche Aufwand beträgt mit ca. 5 min [16, 52]  $1/3$  der Untersuchungszeit der Ultraschallvermessung, für die Analyse der Moirétopographie benötigt man etwa 25 min [8, 41]. Der Zeitaufwand der ISIS-Methode und für das optrimetric-System dürfte geringfügig größer sein, genaue Angaben wurden nicht gefunden. Gegenüber der optrimetric liefert die VRS deutlich mehr Informationen: Skoliosewinkel, Wirbelrotation, Kyphose und Lordose werden hier, wie bei dem ISIS-System, berechnet.

Die Zuverlässigkeit der Formetric-Messung sowie die Korrelation der ermittelten Winkel mit den Cobb-Werten sind deutlich höher als bei den anderen Methoden. Es ergibt sich daraus eine Überlegenheit dieser Methode hinsichtlich des Einsatzes zum Screening, wie auch bei der Beurteilung von Verläufen. Das ISIS-System ist in diesen Bereichen ebenfalls gut zu verwenden [51].

Von großer Bedeutung hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten und der Befundinterpretation ist der Einfluss des Oberflächenreliefs auf die Messergeb-

nisse [52]. Es zeigten sich starke Abweichungen bezüglich der Korrelation der gemessenen Winkel bei Adipositas sowie ausgeprägtem asymmetrischen Muskelrelief, wie auch bei Patienten deren Rückenoberfläche aufgrund von knöchernen Strukturanomalien bzw. nach operativen Eingriffen Veränderungen aufwies. Hier sind die absoluten Winkelwerte nicht zu verwenden. Bedeutsam in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass die Methode trotzdem zur postoperativen Verlaufskontrolle gut geeignet ist (Korrelation 81 %).

Liljenqvist et al. [26] kommen in einer prospektive Studie an 95 Skoliosepatienten zu ähnlichen Resultaten und stellen fest, dass das Formetric-Messsystem ein wertvolles Zusatzverfahren für die Beurteilung der Wirbelsäulendeformitäten darstellt.

Harzmann u. Paulus [16] untersuchten die Ergebnisse der VRS-Vermessung von 497 Kindern der 5. Jahrgangsstufe im Rahmen der schulärztlichen Einganguntersuchung. Neben der klinischen Untersuchung, auf der das Hauptgewicht lag, wurden die Kinder auch mit dem Formetric-System untersucht.

Die Autoren kommen zusammenfassend zu dem Ergebnis, dass die üblicherweise durchgeführte klinische Untersuchung zu Screeningzwecken für die Erfassung von Skolioseerkrankungen nicht ausreichend ist. Der Einsatz der VRS in Kombination mit dem klinischen Untersuchungsgang hat sich, bei guter Sensitivität und Spezifität der Werte im Vergleich zum Cobb-Winkel, als gutes und zuverlässiges Verfahren zur Früherkennung bewährt.

Einen weiteren wichtigen Beitrag zur Wirbelsäulendiagnostik liefert die sonographische dynamische 3D-Analyse (Zebri; Isny) [56]. Der Zeitaufwand bei diesem Verfahren beträgt ca. 15 min/Patient und ist damit größer als bei der VRS und dem ISIS-System [1]. Grund hierfür ist die aufwendige Patientenvorbereitung. Die mittlere Untersuchungsdauer einer WS-Ganzaufnahme a.-p.- und seitlich mit Auswertung beträgt 12 min [30, 40]. Die Validität der Methode war sehr gut und lag geringfügig über der, der VRS, die Messungen sind sehr gut reproduzierbar [1].

Ein unmittelbarer Vergleich zwischen den sonographisch ermittelten Einschlusswinkeln der einzelnen Mar-



ker und dem radiologisch gewonnenen Winkelwert ist nicht möglich. Die Abweichung betrug im Mittel 8,7°, es treten jedoch Ausreißer von über 27° auf. Dies ist Ausdruck eines grundsätzlich unterschiedlichen Systems der Winkelberechnung [6, 11, 25]. Signifikante Einflüsse des Oberflächenreliefs finden sich erwartungsgemäß nicht bei dieser Methode.

Wie bei der VRS zeigt sich die Eignung des Verfahrens zur qualitativen Beurteilung von Verläufen (Korrelation 86,4%). Das Verfahren eignet sich hinsichtlich der Zuverlässigkeit gut als Screeningmethode, ist jedoch, was den Zeitaufwand und die Handhabung angeht, sowohl der VRS als auch dem ISIS-System unterlegen (+10 min). Andererseits liefert die dynamische Prüfung wertvolle Informationen, die nicht nur zur zuverlässigen Diagnosenstellung beitragen, sondern bereits in die Überlegungen einer eventuellen Therapieplanung einbezogen werden können. Die Aussagen über den Grad der Mobilität bei Deformitäten der Wirbelsäule sind von großer Bedeutung und könnten für die Beurteilung der Therapie und des Verlaufes sowie ggf. präoperativ zur Therapieplanung verwendet werden [1].

Das Zebris-Messsystem ist demnach ein gut zu nutzendes adjuvantes Verfahren für die Wirbelsäulendiagnostik, dessen Einsatz zu Screeningzwecken sowie bei Verlaufskontrollen möglich ist. Natalis u. König [36] haben die Einsatzmöglichkeiten des Zebris-Messsystems bei der Analyse der Halswirbelsäulenbeweglichkeit überprüft. In ihrer Untersuchung an 20 gesunden Personen kamen sie zu dem Ergebnis, dass es sich bei der ultraschallgestützten Bewegungsanalyse um ein zuverlässiges und gut reproduzierbares Verfahren zur Erfassung der HWS-Beweglichkeit handelt. Ein neu entwickeltes System zur intraoperativen 3D-Korrekturkontrolle bei Skoliose Derotations- und Aufrichtungsverfahren stellt die Ultraschalltopometrie dar [43].

## Fazit für die Praxis

**Der Früherkennung kommt das entscheidende Gewicht im Hinblick auf eine erfolgreiche Therapie der Skoliose und Kyphose zu [14, 31, 39]. Hierbei hat sich gezeigt, dass die klinische Untersuchung zu Screeningzwecken unzureichend ist [39], während der Einsatz der Röntgendiagnostik hier wegen der hohen Strahlenbelastung (bei Verwendung modernster Technik, in Abhängigkeit von Körpergröße und Gewicht, immer noch 400–800 µGy Ganzkörperdosis [2, 40]) problematisch ist [15, 34].**

**Mit der VRS und der 3D-US-Analyse liegen 2 Oberflächenmesssysteme vor, durch deren Verwendung eine Ergänzung konventioneller Untersuchungsverfahren im Sinne einer deutlichen Reduktion der Strahlenexposition in der Therapie von Wirbelsäulenerkrankungen erreicht werden können.**

**Es ist zu erwarten, dass die Bedeutung der Oberflächenvermessung im Bereich der Wirbelsäulendiagnostik im klinischen Alltag und in der Praxis weiter zunehmen wird.**

## Literatur

- Asamoah V, Rohlmann T, Mellerowicz H (1999) Three-dimensional dynamic spine mobility in idiopathic scoliosis – a clinical study. *J Bone Joint Surg Br* 81 [Suppl I]
- Bernau A, Seeger W (1996) Reduzierung der Strahlenexposition bei Wirbelsäulenganznahmen von Jugendlichen. *Z Orthop* 4: 302–304
- Berwick DM (1985) Scoliosis screening: a pause in the chase. *Am J Public Health* 75: 1373–1374
- Bunnell WP (1993) Screening for adolescent idiopathic scoliosis. *JAMA* 269: 2667–2672
- Cobb JR (1948) Outline for the study of scoliosis. *Am. Academy of Orthopaedic Surgeons, Instruct. Course Lectures* 5: 261–275
- Cobb JR (1960) The problem of the primary curve. *J Bone Joint Surg Am* 42: 1413
- Cooke ED, Carter LM, Pilcher MF (1980) Identifying scoliosis in the adolescent with thermography: preliminary study. *Clin Orthop* 148: 172–176
- Daruwalla JS, Balasubramaniam (1985) Moiré topography in scoliosis. *J Bone Joint Surg Br* 67: 211–213
- Debrunner H (1973) Orthopädisches Diagnostikum. Thieme, Stuttgart New York
- Denton (1992) The use of instant Moiré Photographs to reduce exposure from scoliosis radiographs. *Spine* 17: 509–512
- Drerup B (1983) Die Bestimmung der Wirbelkörperrotation aus der Projektion der Bogenwurzeln. *Med Phys* 3172: 663–667
- Drerup B (1982) Die Bestimmung des Kyphosewinkels aus der berührungslosen Rückenvermessung. *Z Orthop* 120: 64–70
- Emans J B (1984) Diagnosis and current treatment. *Woman Health* 9: 81–102
- Gazioglu K, Goldstein LA (1968) Pulmonary function in idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 50: 1391–1399
- Giel JP, Bernau A (1994) Radiologische Diagnostik bei Skoliosen – Indikation und Befundinterpretation. *Orthop Prax* 5: 267–278
- Harzmann H, Paulus R (1999) Relevanz und Möglichkeiten der Videorasterstereographie als Screeningmethode von skoliotischen Fehlhaltungen und Fehlstellungen im Schulkindalter im Rahmen einer schulärztlichen Untersuchung. München, Orthopädische Klinik und Poliklinik der LMU München, Klinikum Großhadern
- Hierholzer E (1993) Objektive Analyse der Rückenform von Skoliosepatienten. Fischer, New York, S 6
- Hierholzer E (1993) Objektive Analyse der Rückenform von Skoliosepatienten. Fischer, New York, S 10–23
- Hierholzer E (1993) Objektive Analyse der Rückenform von Skoliosepatienten. Fischer, New York
- Hierholzer E (1993) Objektive Analyse der Rückenform von Skoliosepatienten. Fischer, New York, S 7
- JAMA (1993) Screening for adolescent idiopathic scoliosis – review article-. scoliosis screening. *USPSTF* 269: 2667–2672 s
- Johnson MR, Upadhyay SS (1987) ISIS- An evaluation of its capacity to measure lateral spine curve and appraise hump dynamics on forward flexion. *J Bone Joint Surg Br* 69: 851–852
- Kehl TH (1987) Skoliose – Untersuchung ohne Röntgenbild. *Ther Umschau* 44: 746–750
- Kolind- Soerensen V (1973) A follow – up study of patients with idiopathic scoliosis. *Acta Orthop Scand* 44: 98
- Layher F, Sander K (1993) Der Einfluss der Wirbelsäulenmarkierung auf die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse bei der 3D-Bewegungsanalyse. *Biomedizinische Technik, Bd 38. Schiele & Schön, Berlin, S 369–370*
- Liljenqvist U, Halm E (1998) Die dreidimensionale Oberflächenvermessung von Wirbelsäulendeformitäten anhand der Videorasterstereographie. *Z Orthop* 136
- Lonstein JE, Carlson MC (1984) Prediction of curve progression in untreated idiopathic scoliosis during growth. *J Bone Joint Surg Am* 66: 1061–1071
- Mauritzson L, Ilver J (1991) Two-dimensional airborne ultrasound real-time linear array scanner – applied to screening for scoliosis. *Ultrasound Med Biol* 17: 519–528
- Mauritzson L, Benoni G (1986) Three linear array back scanning with airborne ultrasound, surface topographie and spinal deformaty. *Ultrasound Med Biol* 12: 519–528
- Meyer D (1998) Private Korrespondenz. Radiologische Abteilung Krankenhaus am Urban, Berlin
- Moe JH, Bradford D, Lonstein JE et al. (1987) Moe's textbook of scoliosis and other spinal deformities. Saunders, Philadelphia

31. Morrissy RT, Goldsmith GS (1990) Measurement of the COBB- angle on radiographs of patients who have scoliosis: evaluation of intrinsic error. *J Bone Joint Surg Am* 72: 320–327
32. Nachemson A, Lonstein JE, Weinstein SL (1982) Report of the prevalence and natural history committee. Natural history committee of scoliosis research society, Park Ridge
33. Nash CL, Gregg EC (1979) Risks of exposure to X-Ray in patients undergoing long – term treatment for skoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 61: 371–374
34. Nash CL, Moe JH (1969) A study of vertebral rotation. *J Bone Joint Surg Am* 51: 223
35. Natalis M, König A (1999) Nichtinvasive, akkurate und reliable Messung der Halswirbelsäulenbeweglichkeit mittels ultraschallgestützter 3D-Echtzeit-Bewegungsanalyse. *Ultraschall Med* 20: 70–73
36. Neugebauer H, Windischbauer G (1982) Moiré Topographie in scoliosis research, optics in biomedical sciences. *Sciences* 31: 250–253
37. Neugebauer H (1983) The different methods of measuring the curve of a scoliotic spine, Moiré Fringe Topography and Spinal Deformity 2. Fischer, Stuttgart
38. Ohtsuka Y, Yamagata M (1988) School screening for scoliosis by the Chiba University Medical School screening programm. *Spine* 13: 1251–1257
39. Pekelsky JR, Moreland MS (1987) Moiré topogramm production and analysis at NRC: A status report. Fischer, Stuttgart
40. Rohlmann A, Siraky J (1985) Reproduzierbarkeit der Oberflächenvermessung des Rückens nach dem optimetrischen Verfahren. *Z Orthop* 123: 205–212
41. Schmitz A, Diedrich O (1999) Intraoperative, dreidimensionale Korrekturüberprüfung bei Skoliose mittels Ultraschalltopometrie. *Orthop Prax* 35: 237–241
42. Schreiber U (1998) Computerisiertes Meßsystem (zebris CMS 50) zur Bewegungsanalyse bei Patienten mit low back pain. *Motodiagnostik Mototherapie II*. Universitätsverlag Jena
43. Schumpe G, Messler H (1987) Comparison of parameters used for the measurement of spinal deformity by means of optRlmetric, ultrasonic and radiographic technique, surface topography and spinal deformity.
44. Smyth RJ, Chapman KR (1986) Ventilatory patterns during hypoxia, hypercapnia in adolescents with mild scoliosis. *Pediatrics* 77: 692–697
45. Stokes IAF, Moreland MS (1989) Concordance of back shape asymmetry and spine shape in idiopathic scoliosis. *Spine* 14: 73–78
46. Stone B, Beekmann C (1979) The effect of an exercise programm on change in adolescents with minimal idiopathic scoliosis: A preliminary study. *Phys Ther* 59: 759–763
47. Takasaki H (1970) Moiré topographie applied optics 9. S 1467–1472
48. Tredwell SJ, Barron M (1988) The use of ISIS optical scanner in the management of the braced adolescent idiopathic scoliosis patient. *Spine* 13: 1104–1105
49. Turner-Smith AR, Harris JD (1986) ISIS- an automated shape measurement and analysis system. Orthopaedic Eng. Center, Oxford
50. Venus J (1998) Rückenoberflächen-Vermessung von Patienten mit Skoliose mittels Video-Rasterstereometrie. Med. Dissertation, FU-Berlin, S 71–73
51. Weber H, Hirsch S (1986) Krankengymnastik bei idiopathischer Skoliose. Fischer, Stuttgart
52. Weinstein SL (1994) Advances in the diagnosis and management of adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop* 14: 561–563
53. Weiss HR (1992) Besonderheiten der krankengymnastischen Rehabilitation im Erwachsenenalter. *Rehabilitation* 31: 38–42