



Adoleszente idiopathische Skoliose

Leitfaden für die praktische Anwendung

Die Deformität Skoliose führt bei Nicht-erkennen oder zu spätem Ergreifen der richtigen Behandlungsschritte zu schweren Folgen für die Betroffenen. Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist daher, in der Praxis tätigen Ärzten den derzeitigen Stand der Diagnostik und Therapie der Skoliose für die Patientenberatung nahe zu bringen.

Epidemiologie

Die Skolioseerkrankung ist eine strukturelle Deformität, die nicht aktiv aufrichtbar ist und durch Seitabweichung der Wirbel, deren Rotation im Segment und der Torsion des Gesamtorgans Wirbelsäule sowie Veränderung des seitlichen Profils gekennzeichnet ist. Als neuerer Aspekt tritt die Erkenntnis hinzu, dass eine Skoliose meist zu einer Abflachung des seitlichen Profils führt. Der frühere Begriff der Kyphoskoliose trifft nur selten zu und sollte nicht mehr verwendet werden.

Skoliosen mit über 10 Grad werden mit einer Häufigkeit von über 1 % angegeben (2,6 % bei Mädchen und 0,9 % bei Jungen) [40].

Der Spontanverlauf ist abhängig von Alter, Skelettreife, Geschlecht und Krümmungswinkel. Daraus kann man das Progredienzrisiko ableiten [47]. In **Tab. 1** ist dieses nach Lonstein dargestellt. Daraus erkennt man das besondere Verschlechterungsrisiko von 68 % bei präpubertären Patienten mit einem Winkel nach Cobb zwischen 20 und 29°, woraus sich die konservative Behandlungsindikation

ableitet. Neuerdings gibt es genetische Hinweise auf individuell abweichende Prognosen abhängig von der Disposition [47].

Ätiologie und Pathogenese

Die Ursache der Skolioseerkrankung ist noch unklar [42]. Daher wird die Skoliose mit der Bezeichnung idiopathisch beschrieben. Folgende multifaktorielle Einflüsse werden angegeben:

- genetische Faktoren,
- Veränderungen des Nervensystems,
- hormonelle und metabolische Dysfunktionen,
- Anomalien im Skelettwachstum,
- biomechanische Faktoren,
- Umwelt- und Lebensfaktoren als multifaktoriell beschrieben.

Ein einheitlicher Erbgang oder ein nachvollziehbarer genetischen Test konnten bisher nicht herausgearbeitet werden.

Pathogenetisch folgt man der Theorie von Hefti [15]: Es kommt dabei etwa im 10. Lebensjahr zu einer Imbalance des Wachstums von Wirbel und dorsalen Elementen. Damit müssen die Wirbel in ihrem Mehrwachstum nach seitlich drehend ausweichen. Gleichzeitig entsteht dabei auch die vermehrte Lordosierung der skoliotischen Wirbelsäule. Somit setzt sich die mehrdimensionale Deformität der Skoliose aus Seitabweichung, Rotation, Torsion und Lordosierung zusammen.

Klinische Diagnostik

Bereits in der Anamnese können familiäre Hinweise für eine Disposition ergründet werden. Des Weiteren sollten Entwicklungsverzögerungen, Wachstumsphasen, Zeichen der Geschlechtsreife (Menarche) und suspekten neurologische sowie Fehlbildungskriterien erfasst werden. Schmerzen spielen in der Pubertät eine untergeordnete Rolle.

Für die klinische Erfassung der Skoliosezeichen ist der Vorneigetest wichtig (**Abb. 1**). Dabei werden Rippenbuckel und -tal sowie Lendenwulst betrachtet und möglichst metrisch erfasst. Die Höhe des Rippenbuckels kann in Winkelgraden zur Horizontalen mit einem sog. Skoliometer gemessen werden. Bei etwa 7 Grad sollte ein Röntgenbild erfolgen [17].

Röntgendiagnostik

Schon bei der Erstdiagnose sollten Wirbelsäulengesamtaufnahmen im Stehen in 2 Ebenen erfolgen. Dabei wird der Cobb-Winkel der Krümmungen von End- zu Endwirbel gemessen. Ebenso ist das seit-

Tab. 1 Progredienzrisiko einer Skoliose nach Lonstein in Abhängigkeit von Cobb-Winkel und Reifegrad nach Risser

Risser-Zeichen	Progredienzrisiko (%)	
	Cobb-Winkel 5–19°	Cobb-Winkel 20–29°
0–1	22	68
2–4	1,6	23



Abb. 1 ◀ Bestimmung des Rotationswinkels am Rippenbuckel mithilfe eines Skoliometers

liche Profil der Wirbelsäule nach Cobb für Brustwirbelsäule (BWS) und Lendenwirbelsäule (LWS) zu messen. Ein Wirbelgleiten des lumbosakralen Übergangs und Missbildungen der Wirbel sollten ausgeschlossen werden. Im Verlauf der Behandlung genügt die Anterior-posterior-Aufnahme der Wirbelsäule im Korsett und bei Operationsentscheidung ohne Orthese. Bending-Aufnahmen gestatten bei konservativen Grenzentscheidungen oder vor der Operation eine Aussage über die Flexibilität der Krümmungen.

Klassifikation

Idiopathische Skoliosen werden altersbezogen eingeteilt in

- infantile Skoliosen 1.–3. Lebensjahr,
- juvenile Skoliosen 4.–5. Lebensjahr,
- adoleszente Skoliose 10.–15. Lebensjahr und nach der anatomischen Lage des Scheitelwirbels in
 - thorakale Skoliose,
 - thorakolumbale Skoliose,
 - lumbale Skoliose.

Die Gesamteinschätzung im Hinblick auf die operative Konsequenz einer Skoliose wird heute nicht mehr nach King sondern nach Lenke ausgeführt [23]. Dabei werden 6 Krümmungsformen, die Auslenkung des lumbalen Scheitels aus dem Lot und das sagittale Profil eingeschätzt (▣ Abb. 2 aus [16]).

Therapie

Konservative Therapie

Es gibt keine belastbaren Daten in der Literatur, dass eine bestimmte Form der Krankengymnastik das Outcome einer

Korsettbehandlung im Langzeitergebnis beeinflusst.

Die kurzzeitigen Effekte einer intensiven Physiotherapie sind allerdings belegt [30, 45].

Eine Korsettbehandlung dient der Wachstumslenkung der Wirbelsäule mithilfe von Orthesen. Dazu bedarf es eines Behandlungsregimes, das garantiert, dass die Wirbelsäule mit dem Korsett korrigiert wird. Dies wird durch die sogenannte Primärkorrektur gemessen, die zeigt, dass die Orthese den Winkel nach Cobb um einen Mindestwert von 40 % korrigiert [21].

Das Korsett muss jedoch auch getragen werden, was von der Compliance des Patienten abhängt. Durch Thermo-sensoren konnte dieser Zusammenhang erstmals gemessen und als wesentlicher, positiv prädiktiver Faktor für den Erfolg gewertet werden [19]. Seifert et al. [37] zeigten, ebenso wie andere Autoren [21], dass auch eine strukturierte Complianceanamnese diesem gemessenen Wert nahe kommt.

» Es wird weiterhin die Skoliosebehandlung mit Korsetten empfohlen

Nach den Empfehlungen der Scoliosis Research Society wird die Behandlung als Erfolg gewertet, wenn der Winkel nach Cobb 2 Jahre nach Ende der Behandlung mehr als 5° besser als vor der Behandlung oder $\pm 5^\circ$, also konstant ist [31]. In Studien sollte demnach auch die Quote der Patienten mit Cobb-Winkeln über 45° angegeben werden.

Nach den Kriterien der evidenzbasierten Medizin (EBM) gibt es nur

3 Studien, die mit geringer Qualität die Vorteile einer Korsettbehandlung gegenüber der beobachteten Kontrollgruppe zeigen. Die größte Studie aus dem Register von Nachemson zeigt, dass die Erfolgsquote 286 korsettbehandelter Patienten von 74 % einer Erfolgsrate von 34 % nichtkorsettbehandelter Patienten gegenübersteht [29]. Die Gruppe um Weinstein zeigte eine Erfolgsquote von 75 % unter Korsettbehandlung vs. 42 % in einer randomisierten Beobachtungsgruppe [44]. Demgegenüber steht die Tatsache, dass im Spontanverlauf von 68 % Verschlechterungswahrscheinlichkeit von Skoliosen mit Cobb-Winkeln zwischen 20 und 29° bei Risserzeichen 0–2 auszugehen ist [27]. Daher wird auch weiterhin die konservative Behandlung von Skoliosen mit Korsetten empfohlen. Dass hierbei eine 23-stündige Behandlungszeit optimal ist, wiesen Rowe et al. nach [32, 44].

Es müssen Korrekturkräfte nach dem Drei-Punkt-Prinzip in den deformierten Körper eingeleitet werden. Dabei werden die sich deformierenden Ringapophysen der Wirbel zu einem Mehrwachstum im Bereich der verkürzten Konkavität bzw. umgekehrt zu einem Minderwachstum in der Konvexität angeregt (▣ Abb. 3).

Entsprechend der Studienlage gibt es 2 Möglichkeiten der Korsettbehandlung: die langzeitige 20- bis 23-stündige Fulltime-Behandlung bei ausgeprägten Befunden von 25–40° und die nächtliche Parttime-Behandlung bei leichteren Befunden z. B. zwischen 20 und 25° [32, 37].

Ganztageskorsett

Hierzu wird ein Cheneau-Korsett nach den Regeln angefertigt [35]. Zumeist geschieht das durch Gipsabdruck vom deformierten Körper. In das entstandene Negativmodell des Körpers wird Gips gegossen und das entstandene Positivmodell durch Auf- und Abtragen von Material für die geplante Korrektur ausgerichtet. Darüber wird letztlich erhitzter Kunststoff gezogen und das Korsett mit Streben, Verschlüssen sowie Polstern fertiggestellt. In einer Eingewöhnungsphase für den Patienten muss das Korsett immer länger und fester ange-

legt werden und frühestens 6–8 Wochen nach Anlage möglichst gemeinsam durch Arzt und Orthopädietechniker kontrolliert werden. Hierbei sollte eine Wirbelsäulengesamtaufnahme im Stehen angefertigt, die Cobb-Winkel gemessen und die Lage der markierten Korrekturpelotten festgestellt und gegebenenfalls korrigiert werden. Dabei erhält man durch Prozentangabe den Primärkorrekturwert aus dem Verhältnis des Cobb-Winkels vor der Behandlung zum Wert im Korsett (■ **Abb. 4**).

Die Anamnese erfasst die Compliance aus Trageanamnese, Termintreue, Hauttragespuren, Korsetttragespuren und Erfassen eines Abbruchs [21].

Daran schließt sich die Tragephase an, während der der Behandlungsverlauf bis zur Reife durch mindestens halbjährliche Kontrolltermine und mindestens jährliche Röntgenkontrollen im Korsett begleitet wird. Das Durchführen von Krankengymnastik hat dabei zumindest den Effekt der Complianceförderung. Eine Sportbefreiung ist nicht erforderlich.

Bei einem Risser-Stadium 4 der Beckenapophyse, etwa im 15. bzw. 16. Lebensjahr kann als Nebenprodukt der Wirbelsäulenaufnahme das Wachstumsende ermittelt werden. Bei dessen Erreichen wird das Korsett über etwa 6 Monate, stundenweise abfallend abgelegt. Eine Endkontrolle des Behandlungsergebnisses erfolgt 2 Jahre nach Korsettabelle.

Nachtkorsett

Eine Variante der Korsettbehandlung ist das nächtlich umkrümmende „night-time bending brace“ [11, 36, 39]. Die zeitlich begrenzte Wirkung des Korsetts mit höherer Primärkorrektur setzt für dessen Erfolg geringere Winkel zur Indikationsstellung voraus. Wir empfehlen den Bereich 20–25°. Alle Ablaufschritte sind identisch. Die Akzeptanz und letztlich Compliance des Nachtkorsetts ist mit 92 % wesentlich höher als beim Ganztageskorsett 58 % [38]. Auch die psychischen Auswirkungen der nächtlichen Behandlung sind geringer [7].

Orthopäde 2016 · 45:509–517 DOI 10.1007/s00132-016-3274-5
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

J. Seifert · F. Thielemann · P. Bernstein

Adoleszente idiopathische Skoliose. Leitfaden für die praktische Anwendung

Zusammenfassung

Die idiopathische Skoliose ist mit einer Inzidenz von mehr als 1 % eine relativ häufige Deformität, die durch frühes Erkennen einer erfolgreichen Therapie zugeführt werden kann. Die Ausprägung der Erkrankung wird durch die Messung des Cobb-Winkels im anteroposterioren Röntgenbild der gesamten Wirbelsäule bestimmt. Abhängig vom individuellen Progredienrisiko wird im Winkelbereich 20–25° mit einer Korsettbehandlung begonnen. Ausreichende Primärkorrektur und compliantes Trageverhalten sind die wesentlichen Prädiktoren für den Therapieerfolg. Ab einem Cobb-Winkel von 40°–50° wird i. d. R. eine Indikation zur Operation gestellt.

Bei skeletal reifen Jugendlichen erfolgt die Operation als versteifendes Verfahren, entweder als ventrale oder als dorsale Korrekturspondylothese – abhängig von der Einordnung der Deformität nach der Lenke-Klassifikation. Im Sinn eines bestmöglichen Behandlungsergebnisses sollte sowohl die konservative als auch die operative Therapie durch einen Skoliosespezialisten geführt werden.

Schlüsselwörter

Orthopädische Fixationsvorrichtung · Korsett · Spondylothese · Behandlungsergebnis · Knochenschrauben

Adolescent idiopathic scoliosis. Guideline for practical application

Abstract

Juvenile or adolescent idiopathic scoliosis is a relatively common spinal deformity, with an incidence of more than 1 %. Early diagnosis can lead to successful therapy. In the case of pathological clinical findings, the anteroposterior X-ray of the whole spine leads the way to the correct grading, according to Cobb angle measurement. Depending on the individual risk of progression, brace treatment will be started with a Cobb angle range of 20–25°. Important predictors of therapeutic success are sufficient primary corrective power and patient compliance. COBB angles of 40–50° usually lead to the recommendation

for surgery, which is performed as either anterior or posterior spinal fusion in skeletally mature adolescents, depending on the grade of the deformity according to Lenke's classification. To achieve the best possible results, it is recommended that both conservative and surgical treatments are carried out by scoliosis specialists.

Keywords

Orthopedic fixation devices · Braces · Spondylodesis · Treatment outcome · Bone screws

Operative Therapie

Indikation

Die Indikationsstellung zur operativen Korrektur einer idiopathischen Skoliose am heranwachsenden Jugendlichen hat zum Ziel, eine aktuelle und zukünftige Verschlechterung aufzuhalten und die Wirbelsäule zu begradigen.

Man weiß aus Langzeitbeobachtungen über 50 Jahre, dass mit einer Progredienz des Cobb-Winkels von 1° pro Jahr zu rechnen ist, wenn die Kurven 40°–50° zum Zeitpunkt der Skelettreife erreichen [43]. Ein weiterer Faktor für eine Progre-

dienz im Erwachsenenalter ist eine ausgeprägte lumbale Rotationskomponente. Gegenüber der Normalbevölkerung ist dann mit einer erhöhten Prävalenz (61 % vs. 35 %) chronischen Rückenschmerzes und bei thorakalen Kurven > 80° Cobb-Winkel auch mit einem erhöhten Risiko pulmonaler Einschränkung zu rechnen [43]. Unabhängig von diesen offensichtlichen medizinischen Indikationen ist inzwischen auch belegt, dass Kurvenausmaß und Rumpfasymmetrie zu einer negativ veränderten Körperwahrnehmung führen [3, 9]. Die hier beschriebenen Einschränkungen des Erwachsenen durch die in der Kindheit und Jugend durch-

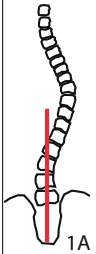

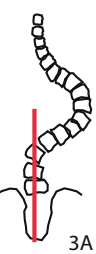

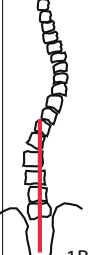
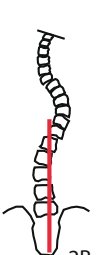
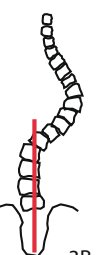
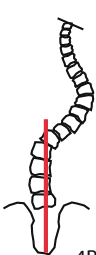
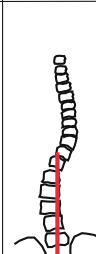

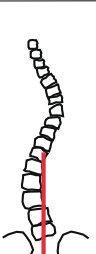

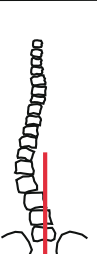
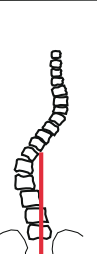
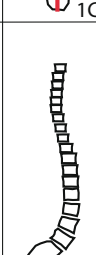

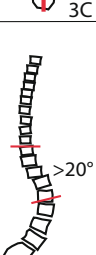

Lumbale Abweichung (A-C)	Typ 1 einfach thorakal	Typ 2 doppelt thorakal	Typ 3 S-förmig	Typ 4 Dreifachkrümmung	Typ 5 thor.-lumbal od. lumbal	Typ 6 thor.-lumbal od. lumbal
A minimal	 1A	 2A	 3A	 4A		
B mäßig	 1B	 2B	 3B	 4B		
C stark	 1C	 2C	 3C	 4C	 5C	 6C
Sagittalebene	 normal	 zerv.-thor. Kyphose >20°	 thor.-lumb. Kyphose >20°	 zerv.-thor + thor.-lumb. Kyphose >20°		

Abb. 2 ◀ Skolioseklassifikation nach Lenke [23]: 6 Typen mit unterschiedlicher Verteilung der strukturellen Verkrümmungen (Aus [16])

gemachte Erkrankung Skoliose sind aber sehr variabel und die individuelle Situation durch Studien nicht zu erfassen. Es ist daher wichtig, sich ein Gesamtbild aus Lungenfunktion, Kurvenausmaß und -progredienz, gestörter Balance, Asymmetrie und Kosmetik zu verschaffen, um eine Entscheidung zur Operation beim Kind und Jugendlichen zu treffen [26].

Eine operative Skoliosekorrektur bei idiopathischen Skoliosen wird i. d. R. als versteifender Eingriff durchgeführt.

Bei progredienter idiopathischer Skoliose öffnet sich ab 40° (lumbal) bzw. 50° (thorakal) Cobb-Winkel ein Indikationsfenster zur operativen Korrektur. Ziel sollte es sein, die Korrektur des frontalen und sagittalen Profils frühzeitig durchzuführen, um sowohl die Fusionsstrecke kurz, die Komplikationsrate niedrig sowie die Lebensqualität hoch zu halten. Wann immer möglich, sollte die definitive Fusionsoperation nach dem pubertären Wachstumsschub (Mädchen

12. Lebensjahr, Jungen 14. Lebensjahr) durchgeführt werden.

Planung

Eine genaue Analyse der Wirbelsäulendeformität hinsichtlich struktureller (operativ zu behabender) und funktioneller (kompensatorischer) Verkrümmungen ist essenziell für die Planung der operativen Korrektur.



Abb. 3 ◀ Dresdner Skolioseorthese modifiziert nach Cheneau mit Becken- und Schulterfassung des Rumpfs. Freiräume im Bereich der Konkavität und Druckzonen im Bereich der Konvexität

Im Rahmen der präoperativen klinischen Untersuchung wird auf folgende Punkte besonders geachtet:

- Schulterstand,
- Lotabweichung,
- Vorhandensein und Größe der Lendenwulst,
- Beckenstand,
- Hüftbeweglichkeit.

Die präoperative radiologische Diagnostik umfasst Röntgenaufnahmen der Ganzwirbelsäule im Stehen in 2 Ebenen und Anterior-posterior-Aufnahmen der ganzen Wirbelsäule in Umkrümmung im Liegen („bending“), gegebenenfalls erweitert durch Traktionsaufnahmen. Anhand dieser Informationen erfolgt eine Klassifikation der Skoliose nach Lenke ([23]; **Abb. 2**).

Ziel der Lenke-Klassifikation ist die Abgrenzung struktureller Krümmungen, die fusioniert werden müssen, von kompensatorischen Gegenkrümmungen, die nicht operativ angegangen werden müssen.

Die Definition des kaudal instrumentierten Wirbels (LIV) ist ebenfalls ein wesentlicher Planungsschritt und baut auf den bereits erwähnten Analysen auf. Durch moderne Pedikelschraubensysteme ist eine gewisse Manipulation des Wirbels möglich, sodass gegebenenfalls eine Kranialisierung des LIV möglich wird.

Biomechanische Grundlagen

Essenziell für alle Überlegungen zur Korrektur einer Wirbelsäulendeformität ist das Prinzip der gekoppelten Bewegung. Bei der idiopathischen Skoliose liegt immer eine Kombination aus rotatorischer und Seitbiegungskomponente vor. Die Adressierung der ventralen Säule ist der effektivste Weg zur Kontrolle der Rotation, da diese 90 % der rotatorischen Stabilität gewährleistet. Über eine Kombinationsbewegung aus Derotation und Seitbiegung lässt sich somit von ventral auf dem kürzesten Weg eine einfache Kurve begradigen. Aufgrund der Bandscheibenresektion hat dieses Vorgehen einen kompressiven, also kyphosierenden Effekt, sollten die Zwischenwirberräume nicht mit Platzhaltern gefüllt werden [12].

Demgegenüber haben dorsale Verfahren aufgrund des Distraktionsmoments einen eher lordosierenden Effekt. Moderne pedikelschraubenbasierte Lösungen eröffnen hier jedoch Spielräume. Wichtige Innovationen liegen im Design der Schrauben (konischer Schaft, asymmetrisches Gewinde, poly- und biaxiale Schraubenköpfe, Langkopf-Tulpenschrauben), im Material der Stäbe (höhere Steifigkeit bei Cobalt-Chrom-Stahl gegenüber Titan) und in den darauf aufbauenden Korrekturtechniken, die im Abschnitt zur Operationstechnik näher erläutert werden.

Es gibt einen klaren Trend zu dorsalen Verfahren aufgrund einer universel-

len Einsetzbarkeit des Systems. Nichtsdestotrotz besitzt der ventrale Zugang bei lumbalen Kurven (Lenke-Typ 5), hochgradigen Skoliosen > 90° (Lenke-Typ 6, zusammen mit der dorsalen Korrektur) und in erfahrenen Händen bei rein thorakalen Skoliosen (Lenke-Typ 1) sein Indikationsgebiet.

Operationstechniken

Allgemeine Voraussetzungen

In Anbetracht der Größe des Eingriffs und der potenziellen Schädigungsmöglichkeiten sind folgende Dinge perioperativ zu beachten:

- Optimales Wärme- und Blutungsmanagement (z. B. Cell-Saver);
- Enge Kommunikation mit der Anästhesie während des gesamten Eingriffs;
- Beiderseitiges Wissen um die kritischen Punkte während des Operationsablaufs;
- Trainiertes Operationsteam;
- Langjährige skoliosespezifische Erfahrung des Operateurs [2];
- Postoperative Überwachung auf Intensivstation;
- Elektrophysiologische Kontrolle, alternativ ein Aufwachtest [41];
- Schmerztherapie durch Anlage eines Periduralkatheters (PDK) [28], die bei ventralen Verfahren präoperativ sicher platzierbar ist [46] und bei dorsalen Verfahren am Ende der Operation durch den Operateur erfolgt.

Alle nachfolgenden Instrumentierungs- und Spondylodese-Techniken haben eine sofortige korsettfreie Vollmobilisierbarkeit zum Ziel.

Dorsale Korrekturspondylodese

Die Lagerung in Bauchlage sollte die gewünschte Einstellung des sagittalen Profils berücksichtigen. Unter Bildwandler werden die relevanten Landmarken (LIV, Neutralwirbel, Endwirbel) eingezeichnet. Die Präparation erfolgt über einen konventionellen Mittellinienzugang. Nach dem dorsalen Zugang zur Wirbelsäule im Fusionssektor werden alle Wirbelgelenke aufgemeißelt. Dadurch

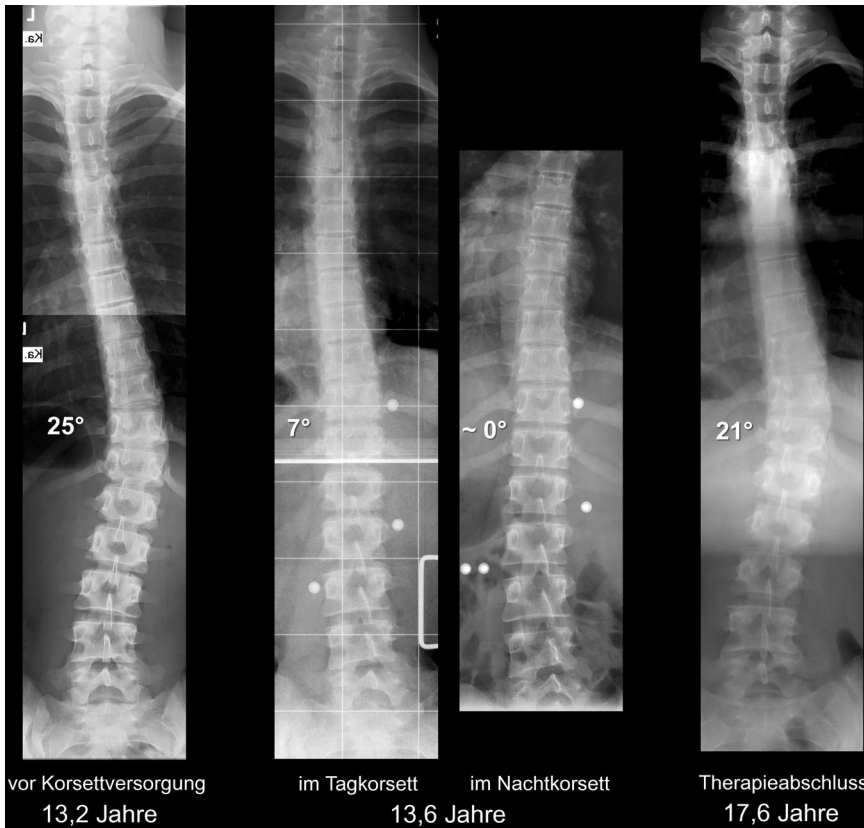


Abb. 4 ▲ Günstiger Behandlungsverlauf einer thorakolumbalen c-förmigen Skoliose. *Links* Aufnahmen vor der Behandlung, *Mitte* Korrekturaufnahmen in verschiedenen Korsetten, *rechts* Aufnahme 2 Jahre nach Ablage

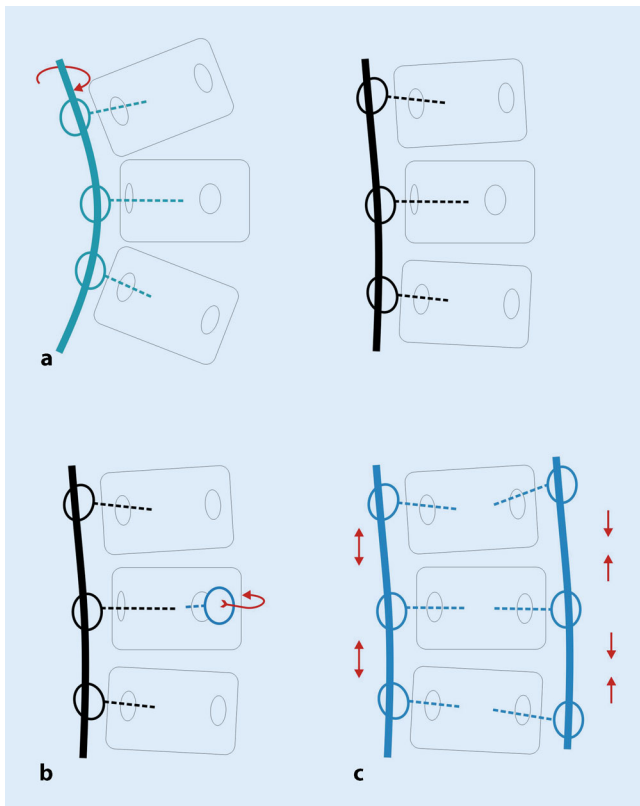


Abb. 5 ◀ Korrekturmanöver bei dorsaler Korrekturspondylodese. **a** Cotrel-Debusset-Prinzip, 90°-Rotation eines in Skoliose gebogenen Stabs in Kyphose bzw. Lordose; **b** apikale Derotation der rotierten Scheitelwirbel; **c** Harrington-Prinzip mit Kompression und Distraction

wird es möglich, in Freihandtechnik Pedikelschrauben zu platzieren.

Die Freihandtechnik ist eine wesentliche Voraussetzung für einen zügigen und sicheren Ablauf der Operation, besitzt aber eine flache Lernkurve [6, 20, 34]. Es ist nicht notwendig, alle Wirbel mit Schrauben zu besetzen. Die Verteilung der Korrekturkräfte auf viele Schrauben senkt jedoch deren Ausrissmoment und muss auf Pedikelgröße, Knochenqualität, und Rigidität der Deformität abgestimmt werden. Bei Problemen und sehr kleinen Pedikeln wird die Bildverstärkerunterstützung, alternativ eine Navigation genutzt, die die Sicherheit noch einmal erhöht [18].

Nach Implantation von stabilen Pedikelschrauben an strategischen Regionen (in den Neutralwirbeln und im Scheitel) erfolgt die Skoliosekorrektur mit folgenden Manövern:

- Cotrel-Debusset-Prinzip (CD-Manöver; [8]; ■ **Abb. 5a**): Ein entsprechend des gewünschten sagittalen Profils überkonturierter Stab wird konkavseitig eingelegt. Eine 90°-Rotation aus der Skoliosestellung führt zu einer Translation der Wirbelsäule und Korrektur des anterior-posterior projizierten Cobb-Winkels. Der Einfluss dieses Manövers auf die Rotation der Wirbelsäule und damit auf die Korrektur des Rippenbuckels ist jedoch begrenzt, z. T. auch konträr [10]. Eine aggressive Korrektur des anterior-posterioren Cobb-Winkels hat zudem einen (nicht erwünschten) thorakal entkyphosierenden Effekt [25].
- Apikale Derotation des Krümmungsscheitels (DVR; [22]; ■ **Abb. 5b**): Es existieren inzwischen mehrere technische Spielarten der apikalen Derotation, deren Effektivität im Einzelfall nicht abschließend geklärt ist. Nach Durchführung des CD-Manövers muss der konkavseitige Stab in der Korrekturposition gehalten werden. Über im konvexseitigen Scheitelbereich positionierte Monoaxialschrauben wird eine von posterior nach medial gerichtete Kraft, entgegen der Rotation des CD-Manövers, eingeleitet. Das DVR-Manöver ist mit einem gewissen Risiko des Schraubenausbrechens



Abb. 6 ▲ Differenzialindikation ventrale vs. dorsale Skolioseaufriechung. **a** Lenke-Typ 6C, in Bending-Aufnahmen verbleibt skoliotische Komponente, in klinischer Untersuchung besteht Rippenbuckel, Versorgung mithilfe dorsaler Korrekturspondylodese von Th5 bis L4; **b** Lenke-Typ 5C, ausreichende Aufrichtung der thorakalen Komponente in Bending-Aufnahmen, kein Rippenbuckel in klinischer Untersuchung, Versorgung durch ventrale Derotationsspondylodese von Th10 bis L3

verbunden und erfordert diesbezüglich besondere Sorgfalt [5]. Dies schlägt sich in einem höheren Blutverlust und in einer Verlängerung der Operationszeit von etwa 30–60 min nieder [10]. Das Verfahren verspricht eine echte Derotation und damit Rippenbuckelkorrektur, den unerwünschten entkyphosierenden Effekt kann es aber nicht unterbinden [10]. Inwiefern sich die relativ neue Methode langfristig durchsetzen kann, muss beobachtet werden [33].

- Cantilever-Manöver [4]: Nach Durchführung des CD-Manövers wird der unterkonturierte Stab auf der Konvexseite eingeführt und von kranial nach kaudal in die Tulpenköpfe reponiert. Dabei kommt es zum zusätzlichen Druck auf die rippenbuckelseitigen Schrauben. Die dabei entstehenden Kräfte können zum Ausreißen der kranialen Verankerungspunkte führen.
- Harrington-Prinzip ([14]; ■ Abb. 5c): Dieses älteste Prinzip der Skoliose-

korrektur wird zur Feinabstimmung verwendet, insbesondere, um eine korrekte Loteinstellung herbeizuführen. Aufgrund des ohnehin distrahierenden Effekts der zuvor beschriebenen Manöver sollte bevorzugt eine konvexeitige Kompression und nur milde konkavseitige Distraction erfolgen, um den Stress auf das Rückenmark so gering wie möglich zu halten.

Wichtige Komponenten der Eingriffe sind die

- Wiederaufrichtung der Seitabweichung,
- Horizontalisierung der Schultern am oberen Krümmungsende,
- Remodellierung des seitlichen Profils durch gute Mobilisation der Wirbelsäule, Implantatverankerung und starre Crom-Cobalt-Stäbe (■ Abb. 6a),
- Dekortikation der Wirbelsäule nach Risser zum Erreichen einer knöchernen Spondylodese.

Das Einbringen von Beckenkamm-spongiosa, Fremdknochen oder Osteoinduktoren ist nicht erforderlich.

Ventrale Derotationsspondylodese

Der Zugang besteht entweder bei Thorakalskoliose (Lenke-Typ 1) in einer Thorakotomie oder bei lumbalen und thorakolumbalen (Lenke-Typ 5 und teilweise -Typ 6) Indikationen in einer Thorakophrenolumbotomie. In der Regel wird die im Zugangsbereich liegende Rippe entfernt und als Spondylodese-material verwendet. Nach konvexeitigem Freilegen der Wirbelsäule im Krümmungsbereich werden die Segmentgefäße ligiert und alle zu fusionierenden Bandscheiben entfernt. Die Bandscheibenresektion dient einerseits der Vorbereitung der Spondylodese, andererseits offeriert sie wesentliche Landmarken (Wirbelkörpergröße, Lage des Spinalkanals). Nach Plattenapplikation und Verschraubung wird mithilfe zweier Korrekturstäbe (bei kleineren Wirbeln mitunter auch nur ein Stab) eine Kompression der Konvexität und eine Derotation über einen zumeist vorgebogenen, dickeren Augmentationsstab appliziert. In die Intervertebralräume

werden Rippenstücke oder Cages eingebracht, um eine Kyphosierung des lumbalen Anteils zu vermeiden. Wichtig ist die optimale, planmäßige Korrektur der Deformität in frontaler und seitlicher Ebene. Bei selektiven Fusionen von doppelbogigen Skoliosen sollte in den präoperativen Bending-Aufnahmen eine entsprechende Flexibilität der nicht adressierten Kurve nachgewiesen werden. In jedem Fall ist eine Überkorrektur zu vermeiden.

Nach kurzzeitiger Pleuradrainage ist die korsettfreie Sofortmobilisation unter voller Belastung möglich (bei Einstab-Systemen und/oder schlechter Knochenqualität ist mitunter noch ein Korsett erforderlich).

Risiken der Operation bestehen im Verletzen der inneren Organe (Lunge, Darm, Milz, Niere) und der großen Gefäße, in der Fehlplatzierung der Schrauben und dem theoretischen Risiko eines vaskulären Querschnitts bei Ligatur der A. radicularis magna.

Die Instrumentierung erfolgt i. d. R. von End-zu-Endwirbel (Abb. 6b). In der Originalbeschreibung des Zielke-Verfahrens wurden mitunter der rotierte Wirbel oberhalb der Endwirbel als LIV verwendet, was die enormen derotierenden Möglichkeiten des Verfahrens unterstreicht [48]. Die Weiterentwicklung des Verfahrens durch Halm – wie oben beschrieben – erzeugt eine primär stabile Spondylodese, sodass die Nachbehandlung korsettfrei erfolgen kann [13]. Die Korrekturwirkung liegt in der Frontalebene zwischen 60–70 %, in 10 % der Patienten kann es zu einem kaudalen Adding-on-Phänomen (neue Skoliose unterhalb der Fusion) kommen, die Pseudarthrose-Rate ist trotz manchmal beobachteter Stab- oder Schraubenbrüche gering (0–2 %; [1, 13]).

Prinzipiell ist eine ventrale Skolioseoperation auch minimalinvasiv, unter Verwendung von thorakoskopischer Technik möglich. Hier ist aber mit einer deutlich längeren Operationszeit und einer noch flacheren Lernkurve zu rechnen.

Der Einfluss der Operateurerfahrung auf Fusionslänge, Operationszeit und Blutverlust ist für Skolioseoperationen im Allgemeinen nachgewiesen [2]. Dies unterstreicht die Forderung, sowohl Di-

agnostik als auch Therapie von Skoliosen speziellen Zentren vorzubehalten.

Fazit für die Praxis

- Die idiopathische Skoliose ist eine dreidimensionale Deformität mit genetischer Disposition, die im präpubertären Wachstumsschub eskalieren kann.
- Heranwachsende sollten bezüglich eines Rippenbuckels bzw. einer Lendenwulst im Vorneigetest geprüft werden. Auffällige Patienten gehören in orthopädische Kontrolle.
- Eine frühe Korsettbehandlung ab einem Cobb-Winkel von 20–25° zeigt zufriedenstellende Ergebnisse.
- Primärkorrektur und Compliance müssen als Prädiktoren eines guten Outcomes optimiert werden.
- Die Grenze zur Operationsindikation liegt unverändert bei einem Cobb-Winkel von 40 bis 50°.
- Das Operationsverfahren und die Fusionslänge wird anhand der Lenke-Klassifikation bestimmt.
- Auch wenn der Trend zur dorsalen Korrekturspondylodese geht, gibt es gute Ergebnisse für die ventrale Operation bei einbogigen Krümmungen.
- Viele perioperative Maßnahmen haben zur Reduktion der Morbidität und zur frühfunktionellen Belastung der Patienten geführt.
- Es sollte nicht mehr zu spät operiert werden. Die Behandlung sollte durch Skoliosespezialisten erfolgen.

Korrespondenzadresse

Dr. J. Seifert, Chefarzt

Interdisziplinäre Wirbelsäulenchirurgie, AKG Klinik Hohwald GmbH
Hohwaldstraße 40, 01844 Neustadt in Sachsen, Deutschland
je.seifert@asklepios.com

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. J. Seifert, F. Thielemann und P. Bernstein geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

1. Bullmann V, Halm HF, Niemeyer T et al (2003) Dual-rod correction and instrumentation of idiopathic scoliosis with the Halm-Zielke instrumentation. *Spine* 28:1306–1313
2. Cahill PJ, Pahys JM, Asghar J et al (2014) The effect of surgeon experience on outcomes of surgery for adolescent idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 96:1333–1339
3. Carreon LY, Sanders JO, Polly DW et al (2011) Spinal appearance questionnaire: factor analysis, scoring, reliability, and validity testing. *Spine* 36:E1240–1244
4. Chang KW (2003) Cantilever bending technique for treatment of large and rigid scoliosis. *Spine* 28:2452–2458
5. Cheng I, Hay D, Iezza A et al (2010) Biomechanical analysis of derotation of the thoracic spine using pedicle screws. *Spine* 35:1039–1043
6. Chung KJ, Suh SW, Desai S et al (2008) Ideal entry point for the thoracic pedicle screw during the free hand technique. *Int Orthop* 32:657–662
7. Climent JM, Sanchez J (1999) Impact of the type of brace on the quality of life of adolescents with spine deformities. *Spine* 24:1903–1908
8. Cotrel R, Dubouset J, Guillaumat M (1988) New universal instrumentation in spinal surgery. *Clin Orthop Relat Res* 227:10–23
9. Danielsson AJ, Hasslerius R, Ohlin A et al (2012) Body appearance and quality of life in adult patients with adolescent idiopathic scoliosis treated with a brace or under observation alone during adolescence. *Spine* 37:755–762
10. Di Silvestre M, Lolli F, Bakaloudis G et al (2013) Apical vertebral derotation in the posterior treatment of adolescent idiopathic scoliosis: myth or reality? *Eur Spine J* 22:313–323
11. Gepstein R, Leitner Y, Zohar E et al (2002) Effectiveness of the Charleston bending brace in the treatment of single-curve idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop* 22:84–87
12. Maher TR, Valdevitt A (2009) Biomechanics of spinal instrumentation. In: Errico TJ, Lonner B, Moulton A (Hrsg) *Surgical management of spinal deformities*. Saunders Elsevier, Philadelphia, 571–85
13. Halm H, Niemeyer T, Halm B et al (2000) Halm-Zielke instrumentation as primary stable improvement of the Zielke-VDS in idiopathic scoliosis. 1 to 4 year outcome of a prospective study of 29 consecutive patients. *Orthopäde* 29:563–570
14. Harrington PR (1962) Treatment of scoliosis. Correction and internal fixation by spine instrumentation. *J Bone Joint Surg Am* 44-A:591–610
15. Hefti F (2013) Pathogenesis and biomechanics of adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *J Child Orthop* 7:17–24
16. Hefti F (2014) *Kinderorthopädie in der Praxis*, 3. Aufl. Springer, Heidelberg
17. Huang SC (1997) Cut-off point of the scoliosimeter in school scoliosis screening. *Spine* 22:1985–1989
18. Jin M, Liu Z, Liu X et al (2015) Does intraoperative navigation improve the accuracy of pedicle screw placement in the apical region of dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type I: comparison between O-arm navigation and free-hand technique. *Eur Spine J*. doi:10.1007/s00586-015-4012-0
19. Katz DE, Herring JA, Browne RH et al (2010) Brace wear control of curve progression in adolescent idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 92:1343–1352

20. Kim YJ, Lenke LG, Bridwell KH et al (2004) Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? *Spine* 29:333–342
21. Landauer F, Wimmer C, Behensky H (2003) Estimating the final outcome of brace treatment for idiopathic thoracic scoliosis at 6-month follow-up. *Pediatr Rehabil* 6:201–207
22. Lee SM, Suk SI, Chung ER (2004) Direct vertebral rotation: a new technique of three-dimensional deformity correction with segmental pedicle screw fixation in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 29:343–349
23. Lenke LG, Betz RR, Harms J et al (2001) Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am* 83-A:1169–1181
24. Liljenqvist U, Lerner T, Bullmann V (2009) Selective fusion of idiopathic scoliosis with respect to the Lenke classification. *Orthopade* 38:189–197
25. Lonner BS, Lazar-Antman MA, Sponseller PD et al (2012) Multivariate analysis of factors associated with kyphosis maintenance in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 37:1297–1302
26. Lonstein JE (2006) Scoliosis: surgical versus nonsurgical treatment. *Clin Orthop Relat Res* 443:248–259
27. Lonstein JE, Carlson JM (1984) The prediction of curve progression in untreated idiopathic scoliosis during growth. *J Bone Joint Surg Am* 66:1061–1071
28. Milbrandt TA, Singhal M, Minter C et al (2009) A comparison of three methods of pain control for posterior spinal fusions in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 34:1499–1503
29. Nachemson AL, Peterson LE (1995) Effectiveness of treatment with a brace in girls who have adolescent idiopathic scoliosis. A prospective, controlled study based on data from the brace study of the scoliosis research society. *J Bone Joint Surg Am* 77:815–822
30. Negrini S, De Mauroy JC, Grivas TB et al (2014) Actual evidence in the medical approach to adolescents with idiopathic scoliosis. *Eur J Phys Rehabil Med* 50:87–92
31. Richards BS, Bernstein RM, D'amato CR et al (2005) Standardization of criteria for adolescent idiopathic scoliosis brace studies: SRS committee on bracing and nonoperative management. *Spine* 30:2068–2075
32. Rowe DE, Bernstein SM, Riddick MF et al (1997) A meta-analysis of the efficacy of non-operative treatments for idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 79:664–674
33. Rushton PR, Grevitt MP (2014) Do vertebral derotation techniques offer better outcomes compared to traditional methods in the surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis? *Eur Spine* 23:1166–1176
34. Samdani AF, Ranade A, Saldanha V et al (2010) Learning curve for placement of thoracic pedicle screws in the deformed spine. *Neurosurgery* 66:290–294
35. Schaal A, Cheneau J (1995) Lage, Wirkung und Form der Druckzonen im Cheneau-Korsett. *Orthopädie-Technik* 4:317–321
36. Seifert J, Selle A (2009) Is night-time bracing still appropriate in the treatment of idiopathic scoliosis? *Orthopade* 38:146–150
37. Seifert J, Selle A, Flieger C et al (2009) Compliance as a prognostic factor in the treatment of idiopathic scoliosis. *Orthopade* 38:151–158
38. Selle A, Seifert J (2010) Compliancevergleich verschiedener Skoliose-Bracing-Konzepte. *Orthopädie-Technik* 61:1–4
39. Selle A, Seifert J (2008) Frühzeitiges Night-Time-Bracing – eine Alternative in der Skoliosebehandlung. *Orthopädie-Technik* 59:236–241
40. Soucacos PN, Zacharis K, Gelalis J et al (1998) Assessment of curve progression in idiopathic scoliosis. *Eur Spine* 7:270–277
41. Thuet ED, Winscher JC, Padberg AM et al (2010) Validity and reliability of intraoperative monitoring in pediatric spinal deformity surgery: a 23-year experience of 3436 surgical cases. *Spine* 35:1880–1886
42. Wang WJ, Yeung HY, Chu WC et al (2011) Top theories for the etiopathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop* 31:14–27
43. Weinstein SL, Dolan LA, Spratt KF et al (2003) Health and function of patients with untreated idiopathic scoliosis: a 50-year natural history study. *JAMA* 289:559–567
44. Weinstein SL, Dolan LA, Wright JG et al (2013) Effects of bracing in adolescents with idiopathic scoliosis. *N Engl J Med* 369:1512–1521
45. Weiss HR, Klein R (2006) Improving excellence in scoliosis rehabilitation: a controlled study of matched pairs. *Pediatr Rehabil* 9:190–200
46. Wenk M, Ertmer C, Weber TP et al (2010) Feasibility and efficacy of preoperative epidural catheter placement for anterior scoliosis surgery. *Anesthesiology* 113:353–359
47. Wong HK, Tan KJ (2010) The natural history of adolescent idiopathic scoliosis. *Indian J Orthop* 44:9–13
48. Zielke K (1982) Ventral derotation spondylodesis. Results of treatment of cases of idiopathic lumbar scoliosis (author's transl). *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 120:320–329

Computergenerierte medizinische Diagnosen

MRT, CT, Pathologie – Ärzte müssen immer mehr und immer komplexere medizinische Bilddaten berücksichtigen, um Diagnosen zu stellen und Therapien zu überwachen. Ein neuer Ansatz, an dem das Fraunhofer-Institut für Bildgestützte Medizin MEVIS in Bremen gemeinsam mit der niederländischen Radboud-Universität Nijmegen arbeitet, soll sie dabei unterstützen. Beim Projekt AMI (Automation in Medical Imaging) sollen selbstlernende Computeralgorithmen die Datenfluten automatisch durchforsten und nach Auffälligkeiten suchen, um dadurch künftig die Treffsicherheit von computergenerierten Diagnosen zu steigern. Diese sogenannten Deep-Learning-Algorithmen können ihre Stärken vor allem dann ausspielen, wenn riesige Datenmengen zu bewältigen sind, so MEVIS. Bei der Analyse geht es darum, feinste Unterschiede zwischen neueren und älteren Aufnahmen zu erkennen, um zum Beispiel Tumoren im Frühstadium aufzuspüren. Veränderungen von Form, Grauwert oder Textur können Rechner hervorragend unterscheiden und sogar selbst herausfinden, welche davon entscheidend sind. Das AMI-Team will zunächst drei konkrete Beispiele entwickeln:

- Krebsfrüherkennung: Analyse der CT-Scans bei Risikopatienten, beispielsweise für Lungenkrebs.
- Augenheilkunde: Analyse von Laser-scans von Patienten mit Erkrankungen der Netzhaut.
- Digitale Pathologie: Analyse von digitalisierten, hochaufgelösten Gewebeschnitten von Tumorpatienten und Aufspüren kleinster Mikrometastasen.

Quelle: Fraunhofer Institut, www.mevis.fraunhofer.de