

M. Schultheiss · H.-J. Wilke · L. Claes · L. Kinzl · E. Hartwig

MACS-TL-twin-screw

Ein neues thorakoskopisch implantierbares Stabilisationssystem
zur Behandlung von Wirbelfrakturen –
Implantatdesign, Implantationstechnik und In-vitro-Testung

M. Schultheiss¹ · H.-J. Wilke² · L. Claes² · L. Kinzl¹ · E. Hartwig¹

¹ Abteilung für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universität Ulm

² Institut für Unfallchirurgische Forschung und Biomechanik, Universität Ulm

MACS-TL-twin-screw

Ein neues thorakoskopisch implantierbares Stabilisationssystem zur Behandlung von Wirbelfrakturen – Implantatdesign, Implantationstechnik und In-vitro-Testung

Zusammenfassung

Die Etablierung minimal-invasiver Techniken in der Frakturbehandlung der Wirbelsäule wurde durch das Fehlen geeigneter Implantate und Instrumente erschwert. Mit der Entwicklung des MACS-TL-Systems® ist nun ein an die endoskopische Technik angepasstes System konzipiert worden, welches eine komplett endoskopische Stabilisation von Th5 bis L1, ggf. mit endoskopischem Zwerchfellsplitting von L1 bis L2 und von L2 bis L4 retroperitoneal mono- und mehrsegmental ermöglicht.

In dieser Studie wird das Implantatdesign, die Implantationstechnik sowie die vergleichende biomechanische In-vitro-Primärstabilitätstestung in einem Korporektomiemodell mit abstützendem Knochen-span und überbrückender Spondylodese erörtert.

Das neue System demonstriert eine suffiziente Primärstabilität im Vergleich zum dorsalen Stabilisationssystem und ermöglicht so neben den Vorteilen des endoskopischen Vorgehens klinisch eine sofortige korsettfreie Mobilisation der Patienten. Bislang wurden über 150 Patienten in einer Multicenterstudie mit dem neuen System operativ versorgt.

Schlüsselwörter

Wirbelsäule · Frakturbehandlung · Instabilität · Biomechanik

Minimal-invasive Techniken sind im Bereich der Traumatologie auf dem Vormarsch. Aufgrund des technischen Fortschritts im Bereich endoskopisch anwendbarer Instrumente, erfolgt derzeit die Modifikation offener zu mehr minimal-invasiven und sogar vollständig endoskopischen chirurgischen Vorgehensweisen.

Die Vorteile der endoskopischen Technik liegen in der Verkleinerung des operativen Zugangs, Verringerung des intraoperativen Blutverlusts und der postoperativen Schmerzen, dem besseren kosmetischen Ergebnis, der früheren Mobilisation sowie Verkürzung des Krankenhausaufenthalts.

Seit 1994 wurden Erfahrungen mit minimal-invasiven Eingriffen auch im Bereich der ventralen Säule gesammelt [2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17]. Initial haben sich diese Eingriffe vornehmlich auf degenerative Veränderungen beschränkt. Die Entwicklung im Bereich der Frakturversorgung wurde durch den Mangel spezieller, an die endoskopische Technik angepasster Implantate verzögert.

Die endoskopische Instrumentation war initial nur durch zeitaufwendige Improvisationen, wie z. B. die Fixation der verwendeten Schrauben an Fäden, um deren Verlust im Situs zu vermeiden, möglich. Die ersten Stabilisationen wurden hauptsächlich mit der Z-Platte (Sofamore Danek®) mono- und bisegmental durchgeführt [2, 3, 4, 13]. Das Setzen der 1. dorsalen von 2 Verankerungsschrauben im Wirbelkörper über einen

Spickdraht unter radiologischer Kontrolle erwies sich für die endoskopische Technik als entscheidender Schritt, um „Landmarks“ als Abgrenzung zum Spinalkanal und für das weitere Vorgehen (Diskektomie, Korporektomie, spinale Entlastung etc.) zu haben. Der Mangel einer ventralen Repositionsmöglichkeit konnte durch ein zweizeitiges Vorgehen mit initialer dorsaler Instrumentation und Aufrichtung kompensiert werden.

Wegen einer langen „learning curve“ stellte das thorakoskopische Vorgehen, evtl. mit endoskopischem Zwerchfellsplitting, durch die aufwendigen Improvisationen und hohen Anforderungen an das Geschick des Operateurs keine Intervention für den Notfall dar.

Um der Philosophie des minimal-invasiven Vorgehens vollständig gerecht zu werden, sollte ein System entwickelt werden, dessen Handhabung speziell an die Anforderungen der endoskopischen Vorgehensweise angepasst ist:

- sichere und einfache endoskopische Implantationstechnik (einfacher Wechsel zur offenen Technik jederzeit falls notwendig z. B. im Fall einer größeren Blutung);
- sichere stabile Verankerungstechnik und 4-Punkt-Abstützung;

Dr. M. Schultheiss

Abteilung für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum, Steinhövelstraße 9, 89081 Ulm,

E-Mail: Markus.Schultheiss@medizin.uni-ulm.de

M. Schultheiss · H.-J. Wilke · L. Claes
L. Kinzl · E. Hartwig

MACS TL twin screw

A new thoracoscopically implantable anterior stabilization system for fracture treatment of the spine: implant design, implantation technique, and in vitro testing

Abstract

Due to the lack of an appropriate instrumentation system for minimally invasive procedures to treat spinal fracture, a new thoracoscopically implantable stabilization system was developed.

This report describes the new implant design and implantation technique. In a biomechanical in vitro study, an anterior corpectomy model representing the worst case of burst fracture instability was simulated, and the primary stability parameters of the new system were evaluated in comparison to a dorsal stabilization system.

With the interbody graft and fixation, the new system demonstrated higher stabilizing effects in flexion/extension and lateral bending and restored axial stability beyond the intact spine and the dorsal stabilization system. Considering all the advantages of the endoscopic procedure and this biomechanical characterization, the clinical trial is warranted; its usefulness has been demonstrated in more than 150 cases in a multicenter study to date.

Keywords

Spine · Thoracolumbar fracture treatment · Stabilization · Biomechanics

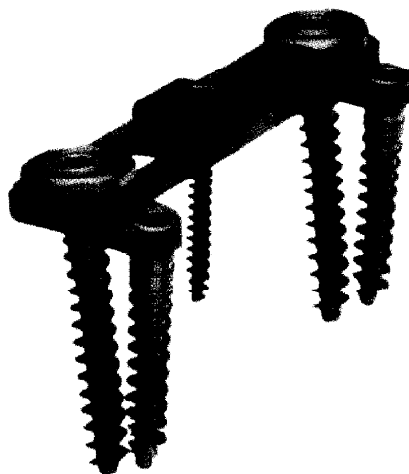


Abb. 1 ▲ MACS-TL-System

- kein Kompromiss bzgl. verkleinerter Implantatdimension hinsichtlich biomechanischen und mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen Stabilisationen;
- mono- und mehrsegmentale Anwendbarkeit.

Ziel dieser Studie ist die Beschreibung eines neu entwickelten, vollständig endoskopisch implantierbaren Stabilisationssystem, sowie dessen biomechanische Vergleichstestung.

Die Untersuchung war zur Beantwortung der folgenden Hypothese konzipiert: Das neue endoskopisch ventral implantierbare System zeigt eine suffiziente Primärstabilität im Falle einer Korporektomie, Spanimplantation und Instrumentation trotz verkleinerter Implantatdimension und allen Vorteilen der endoskopischen Technik.

Material und Methoden

Implantatdesign

Es wurde ein neues, vollständig endoskopisch implantierbares System zur Stabilisation von Frakturen von Th5 bis L3 entwickelt (Abb. 1). Das neue MACS-TL (modular anterior construct system thoracic lumbar, Fa. Aesculap, Tuttlingen) ermöglicht einen endoskopischen Zugang thorakoskopisch von Th5 bis L1, mit endoskopischem Zwerchfellsplitting bis L2 und minimal-invasiv retroperitoneal bis L3/4.

Als „twin screw concept“ besteht das System aus einer Platte mit niedri-

gem Profil (<10 mm) und jeweils 2 selbstschneidenden, monokortikal verankerten, winkelstabilen Schrauben im angrenzenden Wirbelkörper. Das System ist zur mono-, bi- (Platte) und mehrsegmentalen (Stäbe) Stabilisation konzipiert. Es besteht vollständig aus einer Titanlegierung (ISOTAN® F-Titanlegierung, TiAl₆V₄ nach ISO 5832-3).

Die dorsal gelegene Polyaxialschraube wird initial über einen unter Röntgensicht platzierten Spickdraht eingedreht. Die Länge dieser kanülierten Schraube beträgt 25–50, der Durchmesser 7 mm. Die Richtung der ventralen Stabilisierungsschraube ist durch ein Spannelement zwischen den beiden Schrauben und der Platte vorgegeben (s. Abb. 1). Im Spannelement ist die dorsale Schraube polyaxial beweglich (Bewegungsumfang 15°); zusammen vormontiert wird es anfänglich mit dieser Schraube eingebracht. Die konvergierende Richtung der Schrauben beträgt 14°. Die Länge der vorderen im Spannelement winkelstabil geführten Stabilisierungsschraube beträgt 25–50 mm, der Durchmesser 6,5 mm. Durch einen Klickmechanismus im Spannelement wird ein Auswandern der Schraube verhindert, ein Auswechseln ist aber durch spezielles Instrumentarium gewährleistet.

Die Platten sind in einer Länge zwischen 45–100 mm, Stäbe bis 200 mm erhältlich. Die Platte wird am Spannelement jeweils mit einer Fixationsmutter fest fixiert. Die Winkelstabilität der dorsal gelegen polyaxial gelagerten Schraube wird zuletzt durch eine Klemmschraube erzielt (Abb. 2, 3). Zusätzlich kann der Knochenspan über einen Knochenspanklemmer mit einer Knochenspannschraube an der Platte fixiert werden (s. Abb. 1).

Implantationstechnik

Die gesamte Operation in endoskopischer Technik wird in einer stabilen Seitenlage in Vollnarkose und einseitiger Beatmung durchgeführt. Die Implantation erfolgt über 3 Arbeitsports in den Zwischenrippenräumen und einem Kameraport.

Die folgende Ausführung beschränkt sich auf die Beschreibung der Instrumentation des Implantats, nicht des operativen Handlings.

Die vollständige Instrumentation erfolgt in 14 Schritten:

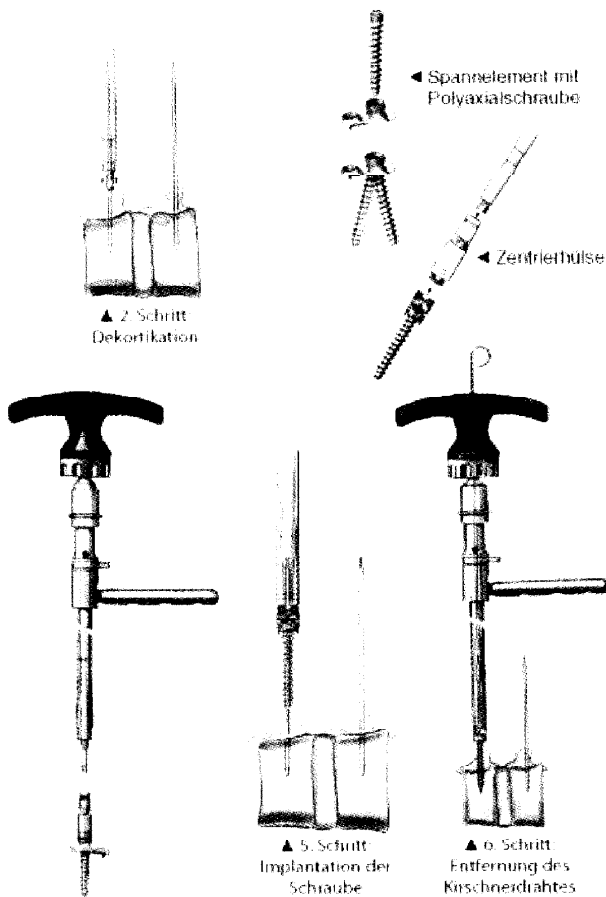


Abb. 2 ◀ **Implantationschritte MACS-TL**

1. Implantation des Kirschner-Drahtes: Unter Röntgenkontrolle wird ein Spickdraht (Durchmesser 2 mm) 10 mm frontal der Wirbelkörperhinterkante und in 10 mm Distanz zu den Endplatten im jeweils dem Defekt angrenzenden Wirbelkörper platziert. Durch ein Gewinde lässt sich anschließend der vordere Teil des Spickdrahtes (80 mm) ablösen und verbleibt im Situs (s. Abb. 2).
2. Dekortikation: Über diesen Spickdraht wird ein kanulierten Ankörner eingeführt und die Kortikalis des Wirbelkörpers entsprechend dem Kerndurchmesser der dorsal gelegenen Schraube perforiert (s. Abb. 2).
3. Montage der Zentrierhülse: Zur weiteren Montage wird eine Montagehilfe, genannt Zentrierhülse auf das vormontierte Spannelement geschraubt, in welchem die dorsale Schraube polyaxial gelagert ist (s. Abb. 2).
4. Implantationsinstrumentarium: Im weiteren Schritt werden die Einschraubinstrumente vorbereitet und über die Zentrierhülse mit dem ver-

montierten Schrauben/ Spannelement konnektiert (s. Abb. 2).

5. Implantation der Schraube: Über die verbleibenden Spickdrähte wird die dorsale Schraube eingedreht, das Spannelement nach vorne orientiert. Um eine Polyaxialität des Plattenlagers im Spannelement zu ermöglichen, darf die Schraube noch nicht vollständig eingedreht werden, dies erfolgt erst in Schritt 12 (s. Abb. 2).
6. Entfernung des Kirschner-Drahtes: Nach partiellem Schraubeneindrehen wird der Spickdraht durch das kanulierte Instrument wieder entfernt (s. Abb. 2).
7. Entfernen des Implantationsinstruments. Anschließend wird das Implantationsinstrument von der Zentrierhülse gelöst.
8. Distraction: Mit Hilfe eines Ratschenmechanismus, welcher über die Zentrierhülsen gesteckt wird, ist mit einer Distaktionszange die Frakturposition bzw. nach Dekompression oder Korporektomie die Knochenspanplatzierung unter Distraction möglich (s. Abb. 3).

9. Stabilisierungsplatte: Anschließend wird eine Platte entsprechender Länge in den Spannelementen platziert.
10. Abschließende Fixierung: Die Fixationsmuttern fixieren die Platte am Spannelement. Ein Anzugsmoment von 15 Nm wird mit einem Drehmomentschlüssel appliziert (s. Abb. 3).
11. Entfernung der Zentrierhülsen: Die Zentrierhülsen werden entfernt.
12. Anziehen der Polyaxialschrauben: Nun erfolgt das endgültige Anziehen der dorsalen Polyaxialschrauben und damit der Gesamtinstrumentation an die Wirbelkörper bis die Spannelemente Knochenkontakt haben (s. Abb. 3).
13. Twin-screw-Prinzip – Implantation der Stabilisierungsschraube: Mit Hilfe der Zentrierhülse für die anteriore Stabilisierungsschraube werden die vorderen Schrauben platziert (s. Abb. 3).
14. Implantation der Klemmschraube: Als letzte Schritt wird jeweils die Klemmschraube mit einem Anzugsmoment von 10 Nm eingedreht und sorgt für Winkelstabilität im Polyaxialmechanismus zwischen dorsaler Schraube und Spannelement (s. Abb. 3).

Biomechanische In-vitro-Vergleichstestung

Die biomechanischen In-vitro-Untersuchungen wurden an 6 humanen Wirbelsäulenpräparaten Th10 bis L2 durchgeführt. Das mittlere Präparatealter betrug 77 ± 18 Jahre. Vor der Testung waren die Präparate in Gefrierfolie dreifachverpackt bei -28°C tiefgefroren. Die Knochendichte wurde mittels quantitativer Computertomographie (XCT-9600A pQCT®, Fa. Stratec, Birkenfeld) in einer horizontalen Linie an jedem Wirbelkörper gemessen und betrug durchschnittlich $145 \pm 40 \text{ mg/cm}^3$. Der Computertomograph wurde zuvor jeweils mittels einem Phantom aus Hydroxylapatit kalibriert.

Vor der Testung wurden die Präparate bei Raumtemperatur aufgetaut. Weichteilgewebe und Muskeln wurden sorgfältig unter Erhalt aller diskoligamentären Strukturen entfernt. Während der ganzen Versuchsvorbereitung und der Testung wurden die Präparate mit 0,9% NaCl-Lösung feucht gehalten.

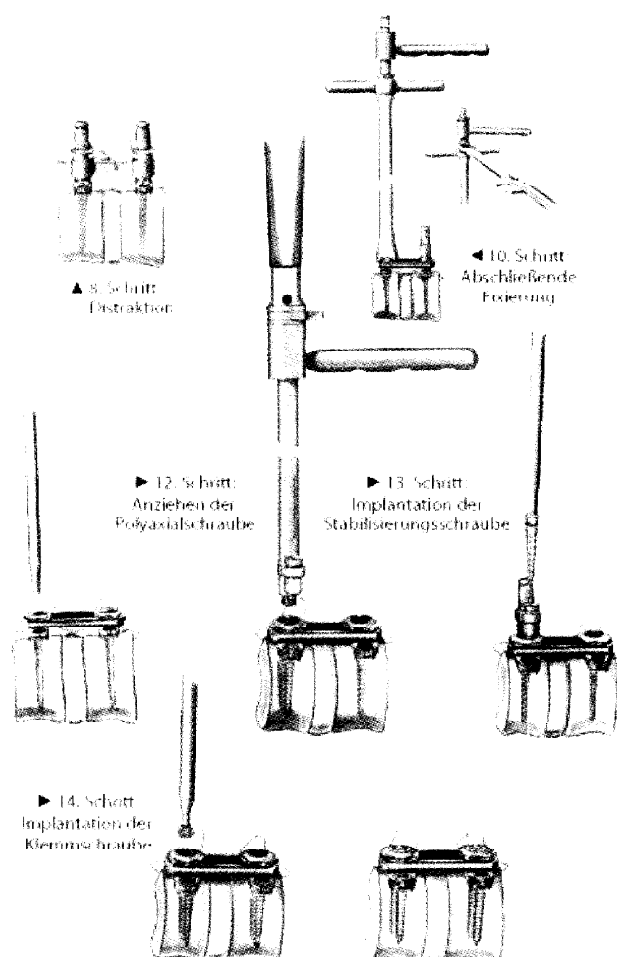


Abb. 3 ◀ Implantationschritte MACS-TL

Anschließend wurde Th10 und L2 in Technovitblöcke (Technovit® 3040, Fa. Heraeus Kulzer, Wehrheim/Ts) zur Fixierung im Wirbelsäulenbelastungssimulator eingegossen [19]. Der untere Kunststoffblock wurde dabei fest und der obere in einem Kardangeln fixiert (Abb. 4). In dieses Kardangeln sind Schrittmotoren integriert, über die auf die Präparate reine Momente von $\pm 3,75$ Nm für Flexion/Extension, Links- und Rechtsneigung und axiale Links- und Rechtsdrehung eingelegt wurden.

Zunächst wurden die Präparate im intakten Zustand getestet. Danach wurde eine Korporektomie von Th12 erzeugt und mit einem höhenadaptierten Holzblock, einen Knochenspan simulierend abgestützt und mit überbrückenden Implantaten stabilisiert. Die Instrumentation der Implantate erfolgte nach Gebrauchsanweisung der Hersteller, anschließend wurde durch a.-p.- und seitliche Röntgenaufnahmen die Implantatlage jeweils kontrolliert. Die verwendete Schraubenlänge der dorsalen polyaxia-

len MACS-TL-Schraube betrug 40 mm, die der ventralen 35 mm, die Plattenlänge variierte zwischen 80 und 100 mm.

Folgende Implantatkombinationen wurden verwendet:

- ▶ native Wirbelsäule,
- ▶ USS® dorsal (Fa. Stratec, Oberdorf, Schweiz),
- ▶ MACS-TL ventral.

Der gesamte Versuchsablauf wurde gemäß den Empfehlungen zur standardisierten Implantatatestung der Gesellschaft für Wirbelsäulenchirurgie durchgeführt [20]. Es wurden jeweils 3 Belastungszyklen mit reinen Momenten von $\pm 3,75$ Nm in Flexion/Extension, Links-/ Rechtsneigung und Links-/Rechtsrotation appliziert und der 3. Belastungszyklus zur Auswertung herangezogen um die viskoelastischen Effekte der initialen 2 Belastungszyklen zu eliminieren. Die resultierenden dreidimensionalen Bewegungen wurden zwischen Th11 und L1 für den überbrückten Bereich mit einem UL-

traschallbewegungsanalysemesssystem (Cmstrao 1.0®, Fa. Zebis, Isny) ermittelt.

Der Gesamtbewegungsumfang ROM (range of motion) bei maximal aufgebrachtter Last und die neutrale Zone (NZ), als Flexibilitätsmaß ohne Belastung wurden ausgewertet [10, 11]. Zur statistischen Auswertung wurde ein Friedman-Test und der Wilcoxon-signed-rank-Test herangezogen, wobei die ermittelten p -Werte in dieser Studie Tendenzen anzeigen und die deskriptive Statistik unterstreichen sollen und nicht statistisch signifikante Unterschiede widerspiegeln, da unter unterschiedlichen Bedingungen viele Parameter ermittelt wurden.

Ergebnisse

In Flexion wurde der native ROM nach Korporektomie, Spaninterposition und MACS-TL-Stabilisation von $3,3^\circ$ (NZ= $0,6^\circ$) auf $1,3^\circ$ (NZ= $0,5^\circ$) reduziert, durch das USS auf $1,0^\circ$ (NZ= $0,4^\circ$). In Extension verringerte sich der native ROM nach Korporektomie, Spaninterposition und MACS-TL-Stabilisation von $3,0^\circ$ (NZ= $0,6^\circ$) auf $1,9^\circ$ (NZ= $0,5^\circ$), durch das USS auf $2,0^\circ$ (NZ= $0,4^\circ$), (Abb. 5).

In Linksneigung konnte der native ROM durch die MACS-TL-Stabilisierung von $4,0^\circ$ (NZ= $0,5^\circ$) auf $1,4^\circ$ (NZ= $0,1^\circ$) verkleinert werden, mittels dem USS auf $1,8^\circ$ (NZ= $0,4^\circ$). In Rechtsneigung reduzierte sich der native ROM durch die MACS-TL-Stabilisierung von $3,3^\circ$ (NZ= $0,5^\circ$) auf $0,6^\circ$ (NZ= $0,1^\circ$), mitt-

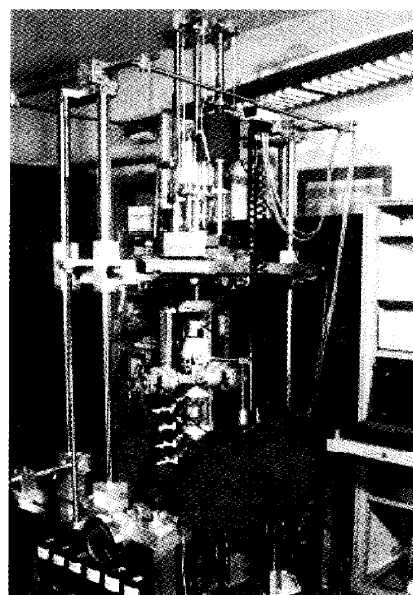


Abb. 4 ▲ Wirbelsäulenbelastungssimulator

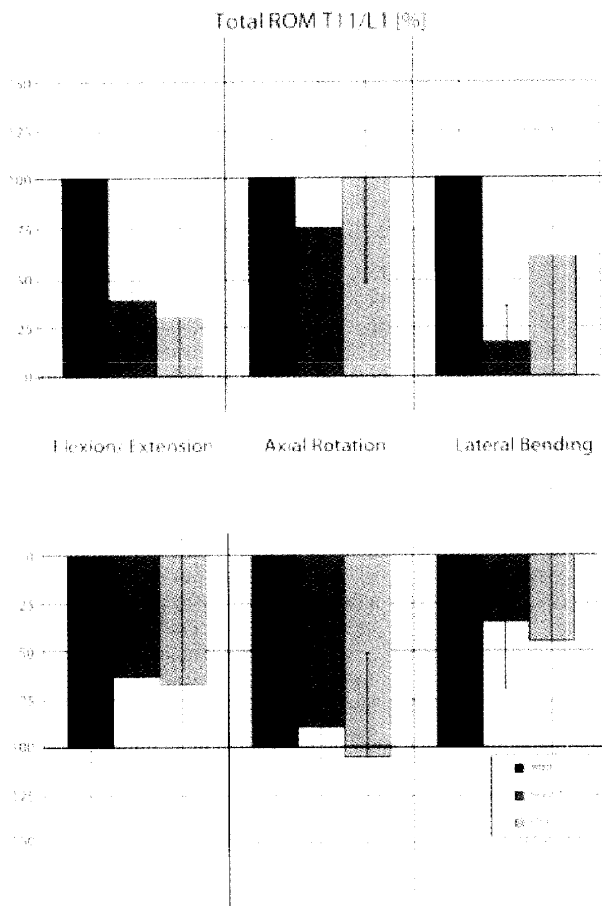


Abb. 5 ◀ ROM Th11 bis L1 (in %) der einzelnen Instrumentationen in Bezug zur nativen Wirbelsäule (100%) bei maximaler Belastung mit $\pm 3,75$ Nm in Flexion/Extension, Rotation und Seitneigung

les dem USS auf $2,0^\circ$ ($NZ=0,4^\circ$), (s. Abb. 5).

Durch MACS-TL-Instrumentierung nahm der native ROM in Linksrotation von $2,1^\circ$ ($NZ=0,2^\circ$) auf $1,6^\circ$ ($NZ=0,6^\circ$) ab und blieb dem USS gleich $2,1^\circ$ ($NZ=1,0^\circ$).

In Rechtsrotation reduzierte sich der native ROM durch die ventrale Stabilisation von $2,1^\circ$ ($NZ=0,2^\circ$) auf $1,9^\circ$ ($NZ=0,6^\circ$), durch die dorsale Instrumentierung zeigte sich eine Zunahme auf $2,2^\circ$ ($NZ=1,0^\circ$), (s. Abb. 5).

Die Ergebnisse der statistische Auswertung sind in Tabelle 1 angeführt.

Diskussion

Die initiale Hypothese, dass das neue, endoskopisch ventral implantierbare System eine suffiziente Primärstabilität im Falle einer Korporektomie, Spanimplantation und Instrumentation trotz verkleinerter Implantatdimension im direkten Vergleich mit dem dorsalen USS-System zeigt, konnte mit dieser Studie bestätigt werden.

Das neue System ermöglicht ein offenes, minimal-invasives oder vollständiges

endoskopisches Vorgehen. Es ermöglicht im Gegensatz zu bisherigen Stabilisierungen die sichere thorakoskopische Implantation ohne zeitaufwendige Improvisationen durch ein an die Erfordernisse der endoskopischen Technik angepasstes Instrumentarium und Implantat [2, 3, 4, 8, 13].

Beide Stabilisationsvarianten verringerten für die jeweilige Defektsituation den Gesamt-ROM und die Gesamt-NZ gegenüber der nativen Wirbelsäule in Flexion/Extension und Seitneigung erheblich. In Linksrotation veränderte sich der ROM durch die dorsale Instrumentierung nicht, nahm in Rechtsrotation gegenüber dem nativen Präparat sogar zu. Im Gegensatz zur dorsalen Instrumentierung wurde der ROM gerade in Rotation und Seitneigung mit der ventralen Stabilisierung deutlich mehr verringert und demonstriert so in diesem biomechanischen Vergleich zum dorsalen USS-System eine verbesserte Primärstabilität. Die erhobenen Daten sind mit früheren Studien hinsichtlich ROM und NZ vergleichbar [1, 7, 18, 21].

Eine frühe Mobilisation ohne Korsett ist klinisch deshalb möglich.

Durch die Vorteile der endoskopischen Vorgehensweise wird der operative Zugang verkleinert und dorsale muskuläre Strukturen geschont. Inwieweit mittels dem gezeigten Distraktionsmechanismus eine ausreichende Frakturposition möglich ist, muss die klinische Anwendung zeigen. Mit dem neuen System vereinfacht sich das operative endoskopische Handling, die „learning curve“ wird verkürzt, das System auch außerhalb der gängigen Arbeitszeiten (im Notfall, nachts) einsetzbar.

Die Studie wurde in Anlehnung an die Empfehlungen zur Standardisierung von Implantattestungen an der Wirbelsäule durchgeführt [20]. Der Gebrauch von reinen Momenten zur Präparatebelastung in dieser Studie entspricht derzeit dem anerkannten Belastungsmodus zur Implantattestung [10, 11, 12, 19, 20].

Bei dieser Art der In-vitro-Tests muss jedoch weiterhin auf einige Einschränkungen hingewiesen werden. Es wurden Muskelkräfte, Körpergewicht etc. vernachlässigt, die Tests wurden an Präparaten aus einer hohen Altersgruppe mit schlechter Knochendichte durchgeführt, die Instrumentation entspricht klinisch der Versorgung einer Verletzungssituation einer AO-A3.3-Berstungsfraktur mit Ausräumung und Spaninterposition sowie überbrückender bisegmentaler Stabilisierung, wobei in dieser biomechanischen Untersuchung auch das vordere Längsband durchtrennt wurde. Die klinische Defektsituation variiert in dieser Hinsicht oft, zumal gerade beim endoskopischen ventralen Vorgehen oftmals eine monosegmentale ventrale Stabilisation möglich ist und diese mit einer geringeren Implantatbelastung einhergeht, die biomechanische Testung simuliert die „Worst-case-Situation“ [2, 17].

Fazit für die Praxis

Zusammenfassend ist mit der neuen, vollständig thorakoskopisch implantierbaren MACS-TL-Instrumentation ein System entwickelt worden, das trotz verkleinerter Implantatdimension biomechanisch eine hohe Primärstabilität erzielt und alle Vorteile der minimal-invasiven Technik ermöglicht.

Tabelle 1

Statistische Auswertung ROM für die Maximalbelastung bei $\pm 3,75$ Nm mit Friedman- und Wilcoxon-rank-Test in den 3 Bewegungsrichtungen

	Extension Flexion			Seitliche Neigung			Axiale Rotation		
	ROM+	ROM–	NZ	ROM+	ROM–	NZ	ROM+	ROM–	NZ
Friedman-Test	0,01	0,01	0,08	0,01	0,01	0,01	0,20	0,61	0,04
Wilcoxon-rank-Test: MACS-TL vs. Intact	0,04	0,07	0,34	0,04	0,02	0,02	0,24	0,75	0,04
Wilcoxon-rank-Test: MACS-TL vs. USS	0,02	0,24	0,34	0,02	0,68	0,04	0,17	0,91	0,41

Klinisch wurden in unserer Klinik bislang 20 Patienten mit dem System operativ versorgt, in einer Multicenterstudie sind bislang über 150 Implantationen erfolgreich durchgeführt worden, über deren klinische Ergebnisse an anderer Stelle berichtet wird.

Literatur

1. An HS, Lim TH, You JW, Hong JH, Eck J, Mc Grady LM (1995) Biomechanical evaluation of anterior thoracolumbar spinal instrumentation. *Spine* 20: 1979–1983
2. Beisse R, Potulski M, Bühren V (2000) Thoracoscopic-assisted anterior approach to thoracolumbar fractures. In: Mayer HM (ed) *Minimally invasive spine surgery. A surgical manual*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
3. Beisse R, Potulski M, Temme C, Bühren V (1998) Endoscopically controlled division of the diaphragm. A minimally invasive approach to ventral management of thoracolumbar fractures of the spine. *Unfallchirurg* 101: 619–627
4. Bühren V, Beisse R, Potulski M (1997) Minimally invasive ventral spondylodesis in injuries to the thoracic and lumbar spine. *Chirurg* 68: 1076–1084
5. Cunningham BW, Kotani Y, McNulty PS, Cappuccino A, Kanayama M, Fedder IL, McAfee PC (1998) Video-assisted thoracoscopic surgery versus open thoracotomy for anterior thoracic spinal fusion. A comparative radiographic, biomechanical, and histologic analysis in a sheep model. *Spine* 23: 1333–1340
6. Hertlein H, Hartl WH, Dienemann H, Schurmann M, Lob G (1995) Thoracoscopic repair of thoracic spine trauma. *Eur Spine J* 4: 302–307
7. Lim TH, An HS, Hong JH, Ahn JY, You JW, Eck J, McGrady LM (1997) Biomechanical evaluation of anterior and posterior fixations in an unstable calf spine model. *Spine* 22: 261–266
8. Mayer HM (2000) *Minimally invasive spine surgery. A surgical manual*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
9. Mayer MH (1997) A new microsurgical technique for minimally invasive anterior lumbar interbody fusion. *Spine* 22: 691–699
10. Panjabi MM (1992) The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. *J Spinal Disord* 5: 383–389
11. Panjabi MM (1992) The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis. *J Spinal Disord* 5: 390–397
12. Panjabi MM, Oxland TR, Lin RM, McGowan TW (1994) Thoracolumbar burst fracture. A biomechanical investigation of its multidirectional flexibility. *Spine* 19: 578–585
13. Potulski M, Beisse R, Bühren V (1999) Die thorakoskopisch gesteuerte Behandlung der „vorderen Säule“ – Technik und Ergebnisse. *Orthopäde* 28: 723–730
14. Regan JJ, Ben-Yishay A, Mack MJ (1998) Video-assisted thoracoscopic excision of herniated thoracic disc: description of technique and preliminary experience in the first 29 cases. *J Spinal Disord* 11: 183–191
15. Regan JJ, Guyer RD (1997) Endoscopic techniques in spinal surgery. *Clin Orthop* 335: 122–139
16. Regan JJ, Mack MJ, Picetti GD 3rd (1995) A technical report on video-assisted thoracoscopy in thoracic spinal surgery. Preliminary description. *Spine* 20: 831–837
17. Schultheiss M, Hartwig E, Wilke H-J, Neller S, Claes L, Kinzl L (2000) Biomechanical aspects of anterior instrumentation in thoracoscopic spine surgery. In: Mayer HM (ed) *Minimally invasive spine surgery. A surgical manual*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
18. Shono Y, McAfee PC, Cunningham BW (1994) Experimental study of thoracolumbar burst fractures. A radiographic and biomechanical analysis of anterior and posterior instrumentation systems. *Spine* 19: 1711–1722
19. Wilke HJ, Claes L, Schmitt H, Wolf S (1994) A universal spine tester for in vitro experiments with muscle force simulation. *Eur Spine J* 3: 91–97
20. Wilke HJ, Wenger K, Claes L (1998) Testing criteria for spinal implants: recommendations for the standardization of in vitro stability testing of spinal implants. *Eur Spine J* 7: 148–154
21. Zdeblick TA, Warden KE, Zou D, McAfee PC, Abitbol JJ (1993) Anterior spinal fixators. A biomechanical in vitro study. *Spine* 18: 513–517