

Interkorporelle Fusionsverfahren an der Wirbelsäule

Die Entwicklung aus historischer Sicht

Die Fusion der lumbalen Wirbelsäule wird heutzutage routinemäßig auf hohem Niveau durchgeführt. Hierfür war die Entwicklung modernster Implantate und standardisierter Implantationstechniken unabdingbar. Vor allem Fusionen der Lendenwirbelsäule (LWS) in PLIF- (posteriore lumbale interkorporelle Fusion) und TLIF-Technik (transforaminale lumbale interkorporelle Fusion) haben sich im Laufe der vergangenen Jahre zu einem erfolgreichen Verfahren mit hohen Fusionsraten und guter Patientenzufriedenheit etabliert. Dieser Artikel befasst sich v. a. mit der Entwicklung dieser beiden Verfahren aus historischer Sicht und soll chronologisch den Weg der Etablierung und dessen Beweggründe hierfür darstellen.

Entwicklung der dorsalen und Idee der intersomatischen Fusion

Mit der Spondylodese steht ein Operationsverfahren zur Verfügung, mit dem das symptomatische, pathologisch veränderte Bewegungssegment versteift wird. Die Theorie der Spondylodese gründet sich auf den guten Ergebnissen des natürlichen Heilverlaufs nach Verletzungen der Bandscheiben und Wirbelkörper, der operativen Behandlung der tuberkulösen Spondylitis und der Skoliose [1, 32]. Alle diese Erkrankungen versuchen über eine Spontanversteifung (osteophytäre Ab-

stützung) eine Ausheilung des pathologischen Prozesses zu erreichen.

R. Hibbs [32] und F. Albee [1] berichteten – unabhängig voneinander – im Jahre 1911 über die dorsale Wirbelfusion. Albee nutzte autologe Tibiaspäne als Fusionsmasse zur Anlagerung auf die gespaltenen Dornfortsätze der betroffenen Wirbelkörper. Die von Hibbs beschriebene Dekortizierung der Wirbelbögen als Fusionsbett wurde in den Folgejahren u. a. von McKenzie-Forbes [40] durch Anlagerung kortikaler Knochenspäne auf dekortizierte Laminae und 1933 von Ghormley [24] durch Anlage eines autologen Knochentransplantats aus dem Beckenkamm modifiziert.

Die Spondylodese bei degenerativen Veränderungen der Bandscheiben steht in engem Zusammenhang mit der Einführung der Nukleotomie durch Mixter u. Barr im Jahre 1934 [41]. Trotz der guten kurzfristigen Ergebnisse der Bandscheibenoperationen klagten viele Patienten auch nach dem Eingriff über Rückenschmerzen. Als eine der Ursachen wurden degenerative Veränderungen der benachbarten Wirbelkörper und eine durch die Bandscheibenentfernung ausgelöste Instabilität angesehen.

Als Alternative zur lateralen sowie posteromedialen Anlagerung von Knochen und zur Stabilitätsverbesserung etablierte Bosworth 1942 [6] die Interposition von einem H-Span zwischen den Dornfortsätzen, der in Distraction eingebracht wurde und sich dann in Normalstellung verklemmte.

Durch Entwicklungen zur Verbesserung der Stabilität mittels interner Fixierung durch Drahtverbindungen (Haddra [26]), interartikuläre Facettengelenkschrauben (King [37]), Haken-Stab (Harrington [30, 31]), Schrauben-Platten (Roy-Camille [47]) bzw. später Schrauben-Stab-Systeme (Magerl [39]; Dick [19]) wurde die Idee der intervertebralen Fusion zusätzlich vorangetrieben.

» Die Spondylodese hat sich als bewährtes Verfahren bei Instabilitäten der Wirbelsäule durchgesetzt

Im Laufe von zahlreichen Jahrzehnten hat sich die Spondylodese als bewährtes Verfahren bei Instabilitäten der Wirbelsäule durchgesetzt. Voraussetzung für diese Entwicklung waren Fortschritte der Operationstechnik, die Weiterentwicklung der Implantate und eine Standardisierung der Eingriffe.

Im Rahmen dieser Entwicklungsstufen wurde auch die intersomatische Spondylodese von anterior und posterior verfolgt. Hieraus ging schlussendlich die posteriore lumbale intersomatische (PLIF) und die transforaminale lumbale intersomatische (TLIF) Fusion hervor.

Posterolaterale Fusion

Vor der Entwicklung der interkorporellen Fusionsverfahren wurde die posterolaterale Fusion am häufigsten angewandt.

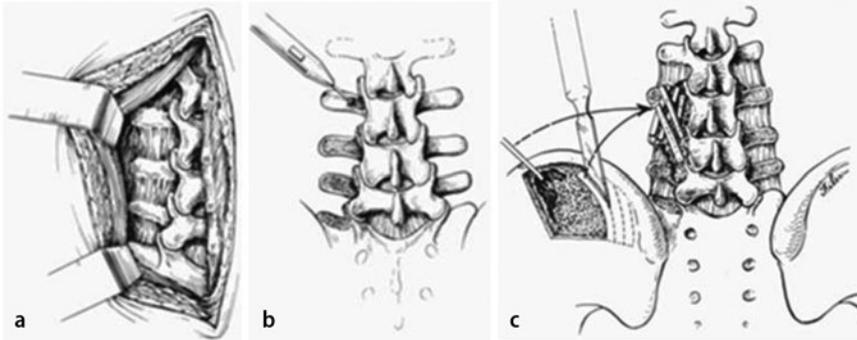


Abb. 1 ▲ **a** Zugang zur LWS zur Vorbereitung einer intertransversalen Fusion. Die entsprechenden Processi transversi und Facettengelenke der zu fusionierenden Segmente müssen sorgfältig dargestellt werden. **b** Die Processi transversi und die laterale Begrenzung der Facettengelenke müssen dekortiziert werden. **c** Entnahme von Beckenkammknochen, der in das angefrischte Knochenbett auf die Processus transversi eingebracht wird. (Mit freundl. Genehmigung von Elsevier, aus [23])

Campbell führte 1939 [14] die klassische posterolaterale (intertransversale) Fusion durch. Er überbrückte die Querfortsätze mit autologen Beckenkammspänen über einen Mittellinienzugang und erreichte damit Fusionen von LWK4 bis zum Sakrum.

Das Prinzip der posterolateralen Fusion bestand aus einer defektüberbrückenden Knochenspan- bzw. Spongiosanlagerung an die dorsalen und lateralen Strukturen der Lendenwirbel, nachdem zunächst Laminae, Gelenk- und Querfortsätze dekortiziert wurden, um ein gut angefrischtes „Spanbett“ mit Mikroblutungen zu erhalten. Anschließend wurden Spongiosaspäne, z. B. aus dem Bereich des Beckens angelagert ([51, 53],

■ **Abb. 1a–c).**

1953 erfolgte die Erstbeschreibung des lateralen intermuskulären Zugangs zu den Querfortsätzen mit Anlagerung trikortikaler Beckenkammspäne durch Watkins, welcher später durch Wiltse (1968, [57]) zum posterolateralen intermuskulären Zugang modifiziert („sacrospinalis splitting approach“) wurde und heute als Grundlage dient für muskelschonende paramediane dorsale Fusion- und Instrumentationstechniken [54]. Die Pseudarthrose rate dieser Technik lag zwischen 7 und 36% [55].

Entwicklung der PLIF-Technik

Die Entwicklung der „posterior lumbar interbody fusion“ (PLIF) war ein bedeutender Fortschritt in der Wirbelsäulenchirurgie und v. a. in der Behandlung von de-

generativen Wirbelsäulenerkrankungen. Das Verständnis, dass die primär lasttragende Achse der Wirbelsäule im Bereich der Wirbelkörper und nicht der dorsalen Elemente liegt und das Erreichen höherer Fusionsraten waren entscheidende Beweggründe hin zum Schritt der interkorporellen Fusion. Zudem machten Fehlschläge nach Nukleotomien oder auch die fehlende Knochenanlagerungsmöglichkeit nach Laminektomien eine weitere Verbesserung der bisherigen Verfahren notwendig.

» Die Entwicklung der PLIF war ein bedeutender Fortschritt in der Wirbelsäulenchirurgie

Das PLIF-Verfahren wurde erstmals 1944 von Briggs und Milligan [11] beschrieben und hauptsächlich im Bereich des lumbosakralen Übergangs durchgeführt. Sie versuchten primär autologe Knochenchips in den intervertebralen Raum einzubringen, nachdem das Bandscheibenmaterial entfernt wurde und stellten hier aber mangelnden Erfolg bezüglich interkorporeller Fusionen fest. Offensichtlich führten sie diese Misserfolge auf mangelnde Primärstabilität zurück und modifizierten ihre Technik dahingehend, dass sie ein entsprechendes Knocheninterponat aus dem Processus spinosus anfertigten und dann intervertebral zwischen die zu fusionierenden Wirbelkörper einbrachten. Kombiniert wurde dieses Vorgehen zusätzlich mit einer dorsalen Anlage von Knochenchips der Länge nach von der L5- bis zur

S1-Lamina und querverlaufend die beiden Facettengelenke einschließend. Zuvor wurden die Nervenwurzeln mit Muskel- oder Fettgewebepatches bedeckt, wobei die Kollegen keine Probleme darin sahen, kleine Knochenchips direkt auf die Dura zu positionieren. Zur Verbesserung der Stabilität konnte optional noch ein Knochenblock zwischen einen LWK5 Processus articularis inferior und das Sakrum eingebracht werden. Postoperativ wurde den Patienten nach Immobilisation von 10–14 Tagen ein Korsett angepasst, mit dem sie frei mobilisiert werden konnten. Die meisten Patienten konnten das Krankenhaus nach ca. 3 Wochen verlassen (■ **Abb. 2).**

1946 publizierte Jaslow [35] die modifizierte Technik nach Hibbs (Knochenanlagerung nach Dekortizieren von Lamina und Processus spinosi), bei der wie bereits zuvor erwähnt ein Stück des Dornfortsatzes nach Entfernen der Bandscheibe zwischen die Wirbelkörper eingebracht wurde. Dieser Knochenblock aus dem Dornfortsatz des darüber liegenden Wirbelkörpers war üblicherweise 2 cm lang und wurde mit diskret überdimensionierter Passform in das Bandscheibenfach eingebracht. In manchen Fällen konnten bis zu vier Dornfortsatzknochenblöcke in das zu versorgende Bandscheibenfach positioniert werden.

Weiter beschreibt er in seiner Publikation, dass Dr. Henry Briggs bei der Ideengebung maßgeblich beteiligt war und die Erstimplantation dieses Processus-spinosus-Interponats supervisierte. Jaslow sah hierin verschiedene Vorteile. Zunächst wies er auf eine Verbesserung bezüglich Erhaltung der Höhe des Bandscheibenfaches hin. Durch diesen Höhererhalt konnte letztendlich auch eine Einengung der Nervenwurzeln in den entsprechenden Neuroforamina vermieden werden. In einigen Fällen beschreibt er eine Aufrichtung des Bandscheibenfaches mit Höhengewinn im Vergleich zum präoperativen Zustand. Auch sieht er die Voraussetzung für eine knöcherne Fusion optimiert, da der Hohlraum, der beim Entfernen der Bandscheibe entsteht, mit autologem Knochenersatzmaterial aufgefüllt wird. Ein weiterer Aspekt stellt auch die frühere Mobilisation der Patienten dar, da mit Interposition des Knochenblocks eine

Interkorporelle Fusionsverfahren an der Wirbelsäule. Die Entwicklung aus historischer Sicht

Zusammenfassung

Hintergrund. Die Entwicklung der interkorporellen Fusionsverfahren erstreckt sich mittlerweile über viele Jahrzehnte und ist noch immer nicht abgeschlossen.

Diskussion. Aufgrund der Abwesenheit von entsprechenden Implantaten erfolgten die initialen Fusionen durch Dekortizierung der dorsalen und lateralen Strukturen der Wirbelsäule und anschließendes Anlagern von autologem Knochenmaterial. Trotz passabler Fusionsergebnisse manifestierte sich das Bestreben nach einer besseren Primärstabilität und höheren Fusionsraten. Zudem verbreitete sich auch das Verständnis, dass der primär lasttragende Anteil der Wirbelsäule ventral im Bereich des Corpus der Wirbelkörper liegt. Diese Überlegungen führten letztendlich zur Entwicklung der PLIF-Technik (posteriore lumbale interkorporelle Fusion), die unter Cloward 1953 deutlich an Popularität gewann. Nach Ausräumung des Bandscheiben-

faches interpositionierte er Beckenkammknochenblöcke zwischen die Wirbelkörper, die sich entsprechend verklemmten. Basierend auf dieser Technik und diesen Überlegungen erfolgte in den 1970er Jahren die Entwicklung von intervertebralen Implantaten. Der sog. „Bagby Basket“ war der erste intervertebrale Cage, der zunächst bei Pferden mit „Wobbler-Syndrom“ eingesetzt wurde. Weitere Meilensteine in der Verbesserung des Cagedesigns schlossen sich an, was zur Herstellung vielzähliger Implantatformen und -materialien führte. Das Elastizitätsmodul der intersomatischen Implantate näherte sich durch moderne Werkstoffe immer mehr dem von Knochen an, so dass ein Einsintern der Cages reduziert und die Fusionen weiter gesteigert werden konnten. Durch den Einsatz von Schrauben-Stab-Systemen konnte die Primärstabilität zusätzlich weiter gesteigert werden, sodass die dorsale Instrumen-

tierung heute den Standard im Rahmen von PLIF (posteriore lumbale interkorporelle Fusion)- und TLIF-Prozeduren (transforaminale lumbale interkorporelle Fusion) darstellt. Das von Harms beschriebene TLIF-Verfahren war eine neue Modifikation und konnte Komplikationen bei lumbalen Fusionen minimieren sowie die Invasivität des Eingriffs reduzieren. **Schlussfolgerung.** Heutzutage steht uns eine Vielzahl unterschiedlichster Implantate und Implantationstechniken zur Verfügung, was die interkorporelle Fusion in PLIF- und TLIF-Technik zu sicheren und erfolgreichen Verfahren macht.

Schlüsselwörter

Implantationstechnik · Fusion, posteriore lumbale interkorporelle · Fusion, transforaminale lumbale interkorporelle · Bandscheibe · Elastizitätsmodul

Interbody fusion procedures. Development from a historical perspective

Abstract

Background. The development of interbody fusion now stretches over many decades and is still not complete.

Discussion. Due to the lack of appropriate implants, the initial fusions were performed via decortication of the dorsal and lateral structures of the spine, followed by placement of an autograft. Despite acceptable fusion results, better primary stability and higher fusion rates were desired. In addition, it became known that the primary load-bearing of the spine is located ventrally in the area of the corpus of the vertebrae. These considerations led to the development of the PLIF technique that was introduced by Cloward in 1953 and gained significantly in popularity. After removal of the intervertebral disc, he

positioned iliac crest bone blocks between the vertebral bodies. Based on this technique and these considerations, intervertebral implants were developed in the 1970s. The so-called Bagby Basket was the first intervertebral cage that was initially used in horses with wobbler syndrome. Other milestones in the improvement of the cage designs followed, resulting in the production of different implant shapes and materials. The elastic modulus of the interbody implants approached by modern materials became more and more similar to bone, so that subsidence of cages reduced and the fusion rate could be further increased. The primary stability could be further increased with screw-rod systems, so that dorsal instrumentation became the

standard in the context of PLIF and TLIF procedures today. The TLIF procedure described by Harms was a new modification and minimized complications of lumbar fusions and reduced the invasiveness of the procedure. **Conclusion.** Nowadays a wide variety of implants and implantation techniques are available, making interbody fusions in PLIF and TLIF techniques safe and successful procedures.

Keywords

Implantation technique · Fusion, posterior lumbar interbody · Fusion, transforaminal lumbar interbody · Intervertebral disk · Elastic modulus

bessere Primärstabilität geschaffen und die Gefahr der Pseudarthrosenbildung minimiert wird. Die Operationszeit sah Jaslow durch diesen zusätzlichen Operationsschritt als nur unwesentlich verlängert an. Seine postoperativen Fusionsergebnisse beschrieb er als sehr gut und klinisch war bei den Patienten sowohl der Rücken- als auch Beinschmerz gelindert ([35], [Abb. 3a, b](#)).

Dr. Ralph Cloward, Neurochirurg aus Hawaii, beschrieb 1953 [16] eine neue Technik. Er entnahm aus dem Beckenkamm Knochenblöcke und impaktierte selbige in den Bandscheibenraum. Durch diese Maßnahme stieg die Popularität der PLIF-Prozedur deutlich. Der Neurochirurg wies darauf hin, dass die ideale, mechanisch effizienteste Methode zur Fusion im Bereich der Hauptbelastungszone, also im Bereich des Korpus der Wir-

belkörper liegen sollte. Hierzu sollte ein stabiles intervertebrales Transplantat eingebracht werden, um den intervertebralen Raum entsprechend stabil zu überbrücken und wiederherzustellen.

Cloward benötigte für diese Art der Fusion, die er bereits seit 1944 durchführte, ca. 3,5–4 h und beschreibt sie als eine dreigestufte Operation. Zunächst erfolgt die Entnahme eines Beckenkammspans aus dem Os Ilium, das er auch als

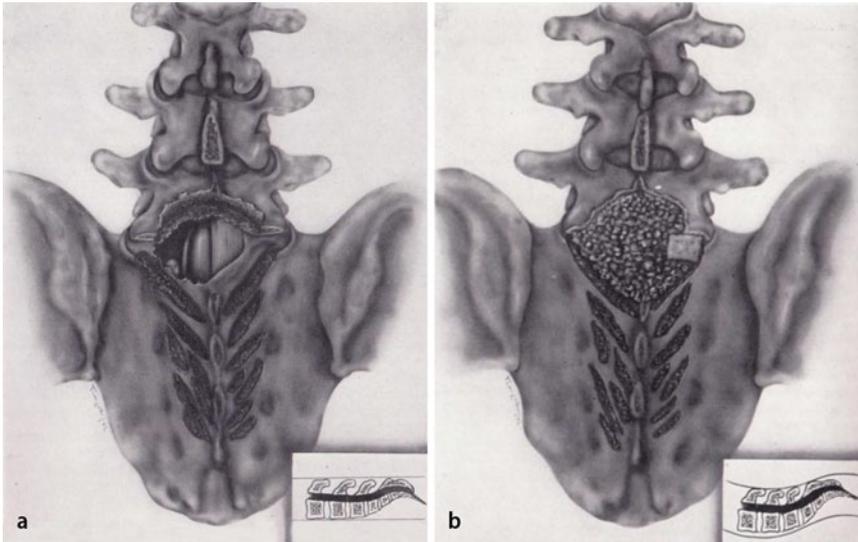


Abb. 2 ▲ **a** Laminotomie mit Resektion des Processus articularis inferior beidseits, Darstellung des Spinalkanals mit abgehender S1-Wurzel links und eines Nucleus-pulposus-Prolaps. **b** Auflage von kleinen Knochenchips nachdem die Nervenwurzel mit Fett bedeckt wurde. Rechtsseitig wurde zur Verbesserung der Stabilität ein Processus-spinosus-Knochenblock impaktiert [11]. (Mit freundl. Genehmigung von JBJS)

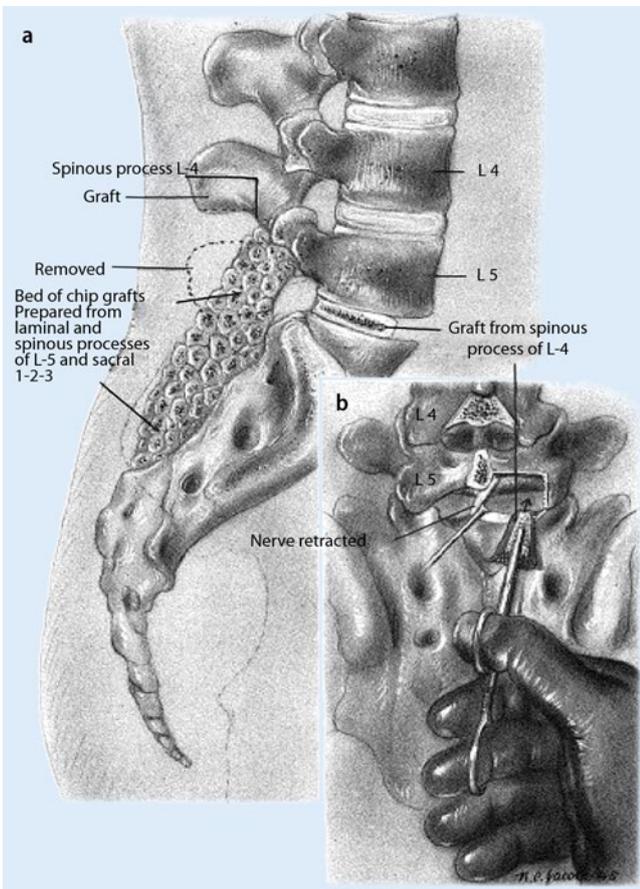


Abb. 3 ◀ **a** Positionierung des interkorporalen Knochenmaterials, sowie Knochenanlagerung von dorsal. **b** Einbringen des Knochenblocks mit übertriebener Darstellung der Retraction der Nervenwurzel [35]. (Mit freundl. Genehmigung von Elsevier)

das ideale Knochenersatzmaterial für diese Art der Fusion ansah. Hierbei verwendete er zu Beginn sowohl autologen Knochen und später Leichenknochen (1952),

den er in einer Art Knochenbank konservierte. Hier wurde hauptsächlich der Knochen von jungen gesunden Todesopfern im Rahmen von Verkehrsunfällen

entnommen und aufbewahrt. Dadurch gelang es ihm, seine Operationszeit auf ca. 2 h zu verkürzen und v. a. die Komorbiditäten der Beckenkammernahme, wie z. B. einen zweiten Zugang und langanhaltenden postoperativen Schmerz auszuschalten.

Nach Gewinnung des Transplantats erfolgte die Laminektomie sowie Entfernung des Bandscheibenmaterials aus dem intervertebralen Raum mit Entfernung der Knorpeloberfläche an den Endplatten.

Im letzten Schritt erfolgte dann die Fusion. Die hierfür gewonnenen keilförmigen Knochenspäne wurden mit dem spitz zulaufenden Ende voran in den Bandscheibenraum eingebracht. Die spongiosen Anteile des Spanes wurden so positioniert, dass sie Kontakt zu den angefrischten Endplatten hatten. Das kortikale Ende schloss zum Spinalkanal hin ab, dadurch sollte auch ein Wuchern des Knochens in den Spinalkanal verhindert werden. Je nach Möglichkeit wurden 3–4 Knochenspäne eingebracht. Abschließend erfolgte eine dorsale Fusion mit Knochenchips (Beckenkammspongiosa), nachdem die Dura zuvor mit einem Gelschaum und teilweise erhaltenem Lig. flavum bedeckt wurde [15, 16].

Vorteile sah Cloward auch in der verbesserten Stabilität des Transplantats mit den entsprechenden kortikalen Anteilen des Beckenkammes, das auch bei Belastung den entsprechenden axialen Kompressionskräften standhielt und nicht dislozierte (Abb. 4a, b).

Die neue Methode war technisch aufwendiger als eine posterolaterale Fusion, jedoch resultierten höhere Fusionsraten von > 85 %. Trotz verbesserter Fusionsraten zeigten sich einige Komplikationen wie vermehrter Blutverlust, Nervenverletzung, Arachnoiditis, Transplantatabstoßung, -einbrüche und -dislokationen [17].

Letztendlich konnte oftmals die Zwischenwirbelkörperhöhe durch Transplantatabsorption nicht aufrechterhalten werden und auch die Pseudarthrose rate war noch nicht zufriedenstellend. Insgesamt wurden die transplantatbezogenen Komplikationen bei dieser Technik mit 3–18 % angegeben.

Daraus schlussfolgerte man, dass intersomatische Implantate entwickelt werden müssen, die eine sofortige Primärstabilität

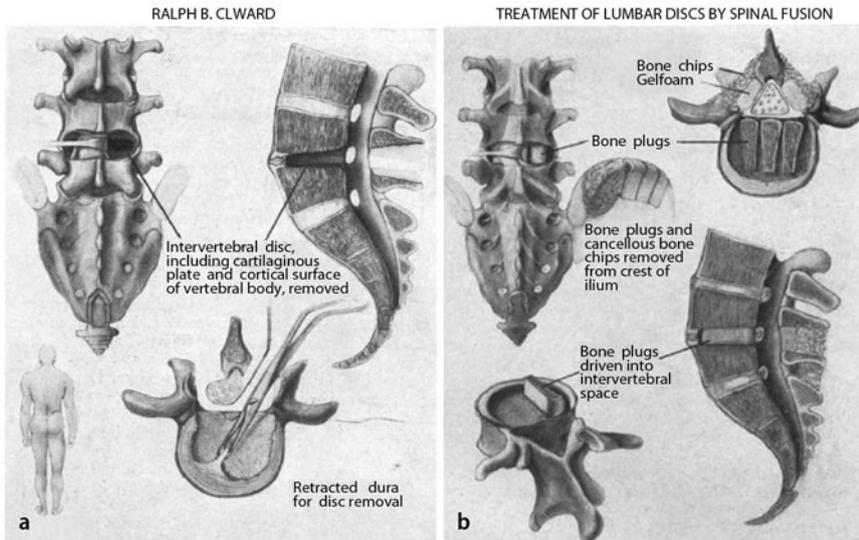


Abb. 4 ▲ **a** Entfernung des Bandscheibenmaterials und Präparation des intervertebralen Raums. **b** Intervertebrale Fusionstechnik: Darstellung des Spinalkanals über eine Facettektomie. Oben rechts bedeckt ein Gelschaum die Dura mater [16]. (Mit freundl. Genehmigung von JBJS)

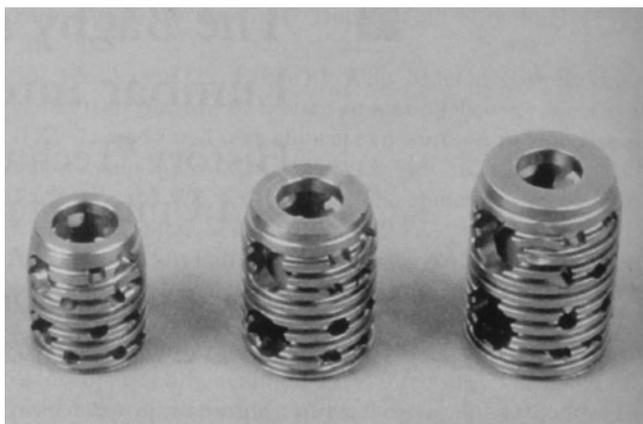


Abb. 6 ◀ Das BAK-Implantat – ein modifizierter „Bagby Basket“ [38]. (Mit freundl. Genehmigung von Wolters Kluwer Health)

ermöglichen, Langzeitstabilität garantieren und eine solide Fusion herbeiführen. Damit einhergehend konnten auch die unerwünschten Nebenwirkungen durch Entnahme von Beckenkamspan bzw. -spongiosa reduziert werden.

Intervertebrale Implantate

Während der 1970er und frühen 1980er Jahre war Dr. George Bagby verantwortlich für die Entwicklung eines ersten intervertebralen Cages. Er behandelte zunächst Pferde mit einem sog. „Wobbler-Syndrom“, einer Form der spondylarthrotischen Myelopathie, die zur Ataxie führte. Er stellte fest, dass die Cloward-Technik mit einer hohen Spanentnahmemorbidität einherging.

Bagby [2] entwickelte den ersten interkorporellen Platzhalter aus rostfreiem Stahl, der 30 mm lang, einen Durchmesser von 25 mm und 2 mm Fenestrations für ein entsprechendes Einwachsen des Knochens aufwies.

Während einer Standardprozedur mit ventraler Dekompression der Halswirbelsäule (HWS) wurde der Cage mit autologen Knochenchips beladen und in das Bandscheibenfach eingebracht, um eine anteriore Fusion zu unterstützen. Der Cage wurde tendenziell überdimensioniert eingebracht, um den intervertebralen Raum zu distrahieren. Anschließend konnten Studien aufzeigen, dass Pferde, die mit dem Bagby-Cage behandelt wurden, ihre neurologische Funktion verbesserten. Als kleine Anmerkung sei gestattet, dass manche Pferde nicht nur für vie-

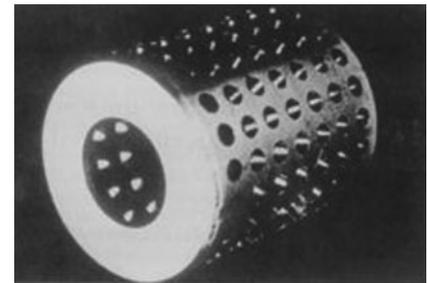


Abb. 5 ▲ Der „Bagby Basket“: Dieser Stahlzylinder wurde eingesetzt im Rahmen von Fusionen der HWS bei Pferden mit dem sog. „Wobbler-Syndrom“ [38]. (Mit freundl. Genehmigung von Wolters Kluwer Health)

le Jahre überlebten, sondern sogar noch Pferderennen gewannen [25].

Der Vorteil dieses Implantats lag darin, dass sowohl in seinem Hohlraum als auch um den Zylinder Knochenmaterial angelagert werden konnte. Mit diesem Implantat, das auch „Bagby Basket“ genannt wurde, konnten nicht nur Fusionsraten bis 88 % erreicht werden, sondern auch die normale Bandscheibenhöhe rekonstruiert werden. Es wurde auch als die „Distractions-Kompressions-Stabilisierungs-Technik“ bezeichnet (■ Abb. 5).

Ein Problem beim Einsatz dieses Stahlimplantats als ein intervertebraler Platzhalter war die Tatsache, dass das Elastizitätsmodul von dem normalen Knochen weit entfernt lag. Aufgrund dieser Gegebenheit stellte die Sinterung des Cages ein Problem dar.

1986 untersuchten Butt et al. [13] das „Bagby-Konzept“ biomechanisch. Sie verwendeten erstmals zwei parallel in das Bandscheibenfach eingebrachte Implantate, die eine entsprechende Distraction bewirkten und durch den Druck auf die Endplatten und den subchondralen Knochen zu einer sofortigen Stabilitätsverbesserung führten.

» Verbesserungen der Material- und Cageeigenschaften führten zum BAK-Cage

Den „Bagby Basket“ als Grundlage nehmend, führten weitere Verbesserungen der Material- und Cageeigenschaften letztendlich zu dem Implantat, das heute unter dem Namen Bagby- und Kuslich-Cage (BAK) bekannt ist ([3], ■ Abb. 6).

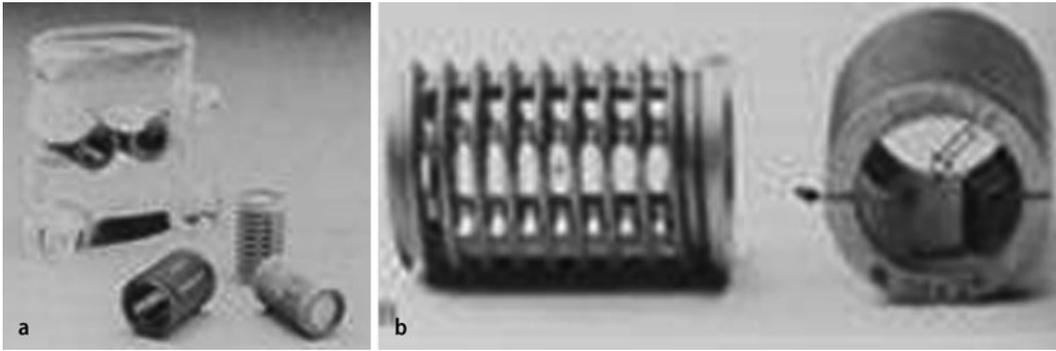


Abb. 7 ◀ „Ray threaded fusion cage“ (Ray-TFC, [44]). (Mit freundl. Genehmigung von Wolters Kluwer Health [44])

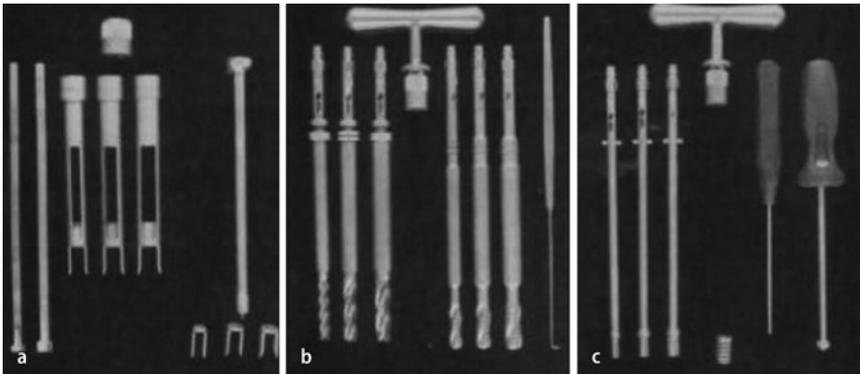


Abb. 8 ▲ Entsprechende Instrumente, Retraktoren, Bohrer und Inserte für den Ray-TFC [44]. (Mit freundl. Genehmigung von Wolters Kluwer Health)

Der BAK-Cage ist ein zylindrischer leicht konischer Titankorb mit einem Hohlraum und äußerem Gewinde. Durch das Gewinde kommt der Cage beim Einbringen gut in den Kontakt mit den knöchernen Endplatten und führt dadurch zu einer guten Stabilität. Außerdem soll durch die Aussparungen in den Gewindegängen auch Knochen beim Eindrehen in den Cage eindringen und so einen sofortigen Kontakt zum Knochenersatzmaterial herstellen. Die erste Anwendung bei einem Menschen erfolgte 1992.

Der BAK-Cage konnte sowohl von anterior (ALIF) als auch von posterior (PLIF) eingebracht werden.

Mit Weiterentwicklung der Implantate und neuen Setzinstrumenten hat sich die PLIF-Prozedur weiter verbessert und optimiert, so dass manche Autoren über Fusionsraten von >90 % berichteten ([44], ▣ Abb. 7, 8).

In der Folge wurden zahlreiche Implantatvarianten von verschiedenen Autoren vorgeschlagen, wie z. B. vorgeformte Allograft-Knochendübel, -keile oder -chips [4].

Dennoch stellte die Qualität der Knocheninterponate weiterhin Probleme dar und besonders die Allografts schienen nicht die erforderlichen mechanischen Eigenschaften mitzubringen; um den axialen Kräften standzuhalten. Es wurden Versagensraten von bis zu 30 % angegeben.

Die intervertebralen Cages wurden immer populärer und auch die Materialkombinationen entwickelten sich in den 1990er Jahren weiter, hauptsächlich um dem Problem des Knochentransplantatversagens entgegenzuwirken (z. B. Transplantatkollaps). So fanden nun auch Titanmaschenkörbchen (Harms-Cage), Kohlenfaser- und PEEK-Cages (Polyetheretherketon) ihre Anwendung.

1986 entwickelte Prof. Dr. Jürgen Harms den sog. Harms-Cage. Hierbei handelt es sich um ein Implantat aus einem zylindrisch geformten Titandrahtgeflecht (▣ Abb. 9). Auch durch diese Art Cage konnte durch die sofortige stabile Abstützung eine Beckenkammspannentnahme entfallen, sofern für die Füllung des Cages andere Materialien (lokaler autologer, homologer Knochen oder

synthetischer Knochenersatz) zur Verfügung stand. Darüber hinaus war sein Elastizitätsmodul (E-Modul) im Vergleich zu den rigiden Vorgängerimplantaten dem E-Modul des Wirbelkörpers ähnlicher. Zudem war durch die geringe Kontaktfläche von Cage zu den Endplatten das Fusionsareal vergrößert, da mehr Knochenmaterial den physiologischen oder anatomischen Endplatten direkt anlag.

F. Kandziora untersuchte 2003 [36] den Einfluss von Cagedesign, Carriersystemen und Wachstumsfaktoren auf die intervertebrale Spondylodese tierexperimentell an der HWS von Schafen. Hierbei wies der Harms-Cage (Zylinderdesign) im Vergleich zu einem Cage im Boxdesign eine signifikant höhere intervertebrale Knochen-/Gesamtvolumenrelation auf, was einem akzelerierten Einheilungsverhalten entsprach. Zudem ergab sich für den Harms-Cage ein deutlich höherer Intra-Cage-Kompressionsdruck, was das „stress shielding“ der inkorporierten Spongiosa im Harms-Cage deutlich reduziert.

»» Der Harms-Cage konnte universal angewendet werden

Der Harms-Cage konnte universal angewendet werden, da die entsprechende Cagehöhe intraoperativ individuell angepasst und mit seinen verschiedenen Durchmesser optimal an die erforderlichen anatomischen Gegebenheiten adaptiert werden konnte. Dadurch konnten mit diesem Implantat auch sämtliche Abschnitte der Wirbelsäule versorgt werden. Jedoch sollte additiv immer eine posteriore Instrumentierung durchgeführt wer-

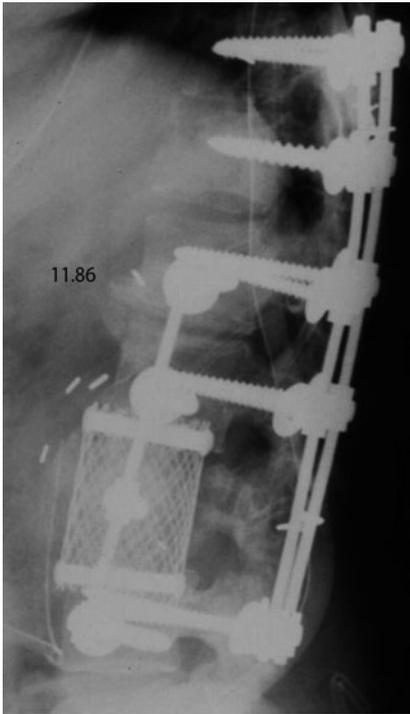


Abb. 9. ▲ Erste klinische Cageapplikation bei lumbaler Fraktur 1986. (Mit freundl. Genehmigung von Prof. J. Harms)

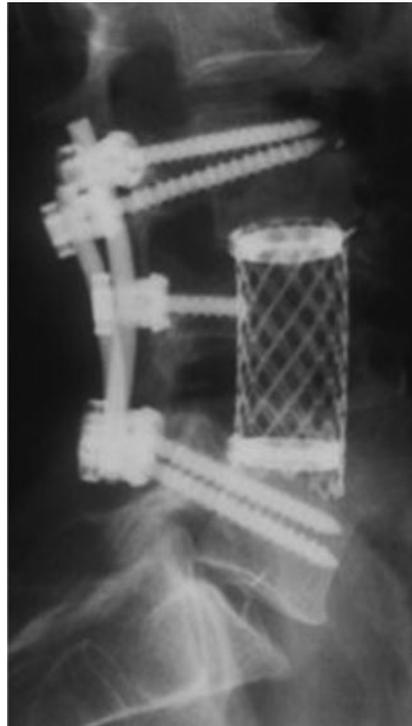


Abb. 10 ▲ Ovaler Endring, der mit zusätzlichen Titanschrauben fixiert werden muss. (Mit freundl. Genehmigung von Prof. J. Harms)

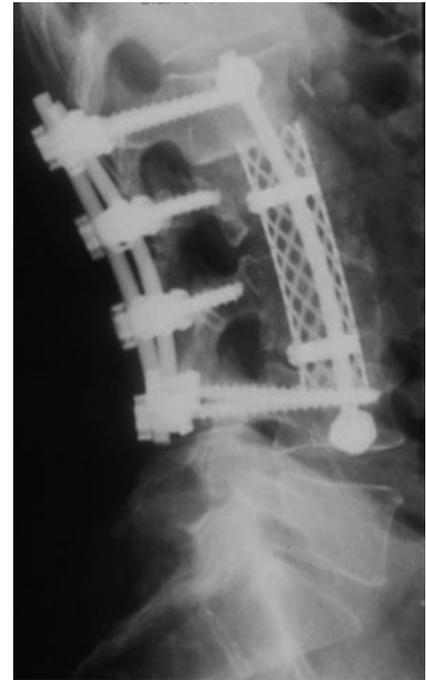


Abb. 11 ▲ Titan-Mesh-Cage als Wirbelkörperersatz, der auf die gewünschte Angulation im Bereich der Endplatten zugeschnitten werden kann. (Mit freundl. Genehmigung von Prof. J. Harms)

den, um forcierten Scher- und Biegekräften entgegenzuwirken [29, 42].

Somit wurde der Harms-Cage initial auch hauptsächlich als Wirbelkörperersatz verwendet. Ab 1991 wurde er auch im Rahmen von lumbalen intervertebralen Fusionen eingesetzt.

Für den Fall einer biomechanisch gewünschten höheren Stabilität des Implantats konnte an den Cageenden auch ein Ring bzw. eine Endkappe fixiert werden, welche zusätzliche Stabilität verlieh (▣ **Abb. 10**, [28]).

Durch diese Eigenschaften fand der Harms-Cage Anwendung bei Tumoren, Frakturen, Spondylodiszitiden, Deformitäten und lumbalen Fusionen. Dieses Konzept hat über die Jahrzehnte kontinuierlich Bestand, so dass es auch heute noch regelmäßig bei den verschiedenen Entitäten in allen Wirbelsäulenabschnitten seinen Einsatz findet (▣ **Abb. 11**).

Brantigan [9] entwickelte einen CFRP-Cage („carbon-fiber-reinforced polymer“), der „Zähne“ an den Oberflächen hatte, um eine Dislokation bzw. Retropulsion in den Spinalkanal zu verhindern, Querverstrebungen, um der Gewichtsbelastung und Kompressionskräften stand-

zuhalten und eine Kammer, welche zum Befüllen mit autologem Knochenersatzmaterial dienen sollte. Zudem war das Karbon strahlendurchlässig und somit konnte die knöcherne Fusion im konventionellen Röntgenbild entsprechend besser evaluiert werden als bei Titanimplantaten. Er sah damit die optimalen Voraussetzungen gegeben, da dieser Cage ideale mechanische Implantateigenschaften mitbrachte und die biologische Fusion durch Einbringen von autologem Knochen gewährleistet war.

Das Karbonfasermaterial lag mit seinem E-Modul nahe an dem von kortikalem Knochen, was außerdem das Problem der Implantatsinterung reduzierte. Zusätzlich erbrachten Studienergebnisse Hinweise auf schnellere und verlässlichere Fusionsraten bei Karbonkörbchen, die mit autologem Knochen gefüllt wurden, im Vergleich zu Allograftknochen alleine [7, 9, 10].

Daher ergibt sich für das zu verwendende Cagematerial, dass es nicht nur eine gute Histokompatibilität und eine knochenähnliche Festigkeit aufweisen sollte, sondern nach Möglichkeit auch über eine osteokonduktive Eigenschaft

verfügt, um zeitnah eine gute Fusion zu erreichen.

Die Historie zeigt, dass bei der Entwicklung eines stabilen Wirbelkörperersatzes zwei mechanische Lösungsansätze verfolgt wurden. Erstens das Konzept der horizontalen Zylindercages, die ohne additive Stabilisierung eingeschraubt wurden, wie z. B. der BAK-Cage.

Zweitens die sog. „Open-box-Cages“, wie z. B. der „Brantigan-Cage“, der mit zusätzlicher Pedikelschraubensinstrumentierung gute Fusionsraten zeigte (▣ **Abb. 12**, [50]).

Weiner u. Fraser [56] erweitern die Einteilung der bisher entwickelten Cages noch um die „Vertical-ring-Cages“, die hauptsächlich bei ventralen Zugängen (ALIF) eingesetzt werden und deshalb auch in diesem Artikel nicht weiter erläutert werden.

➤ Die etablierten Cagematerialien sind Titan, Karbon und PEEK.

PEEK wird seit 1997 beim Menschen als Cagematerial verwendet und liegt mit seinem E-Modul nahe an dem des Knochens. Im Vergleich dazu ist die Elastizität



Abb. 12 ▲ Der lumbale I/F-Cage [8]. (Mit freundl. Genehmigung von Elsevier)

zität von Titan 10-mal höher als die des kortikalen Knochens, was das Risiko einer Cagesinterung erhöht. Auch nach dem „Wolff-Transformationsgesetz des Knochens“ kann somit PEEK die Fusion besser unterstützen, da das entsprechende Knochenersatzmaterial optimaler belastet wird und so durch Mikrobewegungen die Knochenneubildung ausreichend stimuliert [58]. Zudem wird durch die geringe Kontaktfläche von Cage zu den Endplatten das Fusionsareal vergrößert, da mehr Knochenersatzmaterial den Endplatten direkt anliegt.

Durch diese Entwicklung haben sich nicht nur die Fusionsraten weiter verbessert, sondern auch die Anwendung wurde einfacher, womit sich die Sicherheit dieses Verfahrens weiter verbesserte.

Letztendlich stellte dann die Augmentation mit Platten- und Pedikelschraubensystemen eine weitere Stabilitätsverbesserung dar, was im Vergleich mit der sog. „Stand alone-Anwendung“ zu einem weiteren Anstieg der erzielten Fusionen führte [12, 49].

Da der PLIF-Zugang die Verletzung der strukturellen Integrität erfordert, indem beide Facettengelenke reseziert bzw. teilreseziert werden, um eine gute Übersicht für die Implantatpositionierung zu gewinnen, wird die postoperative Instabilität erhöht und kann zum Versagen führen, sofern keine Instrumentierung hinzugefügt wird [22].

Zur Durchführung einer PLIF müssen der Duralsack und die Nervenwurzel entsprechend mobilisiert und retrahiert werden, um einen ausreichenden Zugang zum Bandscheibenfach durch den spina-

len Kanal zu erhalten. Diese Manöver erhöhen das Risiko von Duraverletzungen, Nervenwurzelschädigungen oder Conus-medullaris-Schäden für die Anwendung oberhalb L2/L3. Die Zahl der Verletzung neuraler Strukturen steigt weiter an, wenn das PLIF-Verfahren in der Revisionschirurgie eingesetzt wird und hier entsprechendes epidurales Narbengewebe vorliegt und mobilisiert werden muss. Unabhängig vom Revisionsfall wurde beschrieben, dass der Einsatz von entsprechenden Dübeln und Cages mit einer postoperativen Radikulopathie von ungefähr 13 % einhergeht. Außerdem wurden auch vermehrt Anschlussinstabilitäten des kranialen Segments beobachtet [4].

Entwicklung der TLIF-Technik

Um die Nachteile und Risiken der PLIF-Technik zu reduzieren, entwickelten Harms und Blumes die TLIF-Technik („transforaminal lumbar interbody fusion“). Harms wendete dieses Verfahren seit 1993 an und beschrieb selbiges detailliert mit Jeszenszky im Jahre 1998 [27]. Bei der TLIF-Technik erfolgte in der Originalbeschreibung am Beispiel einer L5/S1-Spondylolisthese eine einseitige Eröffnung des Foramen intervertebrale über eine entsprechende Resektion des Facettengelenks. Zuvor wurde das Segment über eine Pedikelschraubeninstrumentierung distrahiert und nach Einbringen von 2 Titanabstützkörben die Distraction in Kompression umgewandelt. Zur Schonung der neuralen Strukturen sollte v. a. der laterale Anteil des Lig. flavum belassen und nur in Ausnahmefällen reseziert werden. Entsprechende Modifikationen ergeben sich bei der Versorgung einer Spinalkanalstenose oder klinisch symptomatischen bilateralen Neuroforamenstenose, bei der auch eine bilaterale Laminotomie erfolgen kann [5].

Harms betont, dass die abgehende Nervenwurzel nur sehr zurückhaltend zu mobilisieren ist und nicht aus ihrer fettgewebigen Hülle herauspräpariert werden sollte. Vielmehr sollte sie durch Palpation im Verlauf des Foramens identifiziert werden. Nach Ausräumung der Bandscheibe wurden dann 2 Titankörbchen, die mit autologer Spongiosa befüllt wurden, in den intervertebralen Raum transforami-

nal eingebracht und anschließend komprimiert.

Die Hauptvorteile dieser Technik lagen darin, dass nur eine einseitige Resektion der Facettengelenkfortsätze erfolgen musste. Dies ermöglichte auch eine Vergrößerung der Fusionsfläche auf der Gegenseite für die dorsale Knochenanlagerung durch die benachbarten intakten Laminae und Processus spinosi (■ **Abb. 13**).

Weiterhin konnten die neuralen Strukturen wie Dura und Nervenwurzeln, sowie die biomechanisch bedeutenden Strukturen von Lig. flavum und Lig. interspinosum besser geschont werden. Insgesamt zeigten sich Vorteile gegenüber der PLIF-Technik, da auch die epidurale Narbenbildung und der intraoperative Blutverlust reduziert werden konnte.

Einer der Nachteile der TLIF-Technik ist die fehlende Visualisierung der Gegenseite und hier v. a. der kontralateralen Nervenwurzel [33]. Dadurch kann bei vorbestehender kontralateraler Foramenstenose bei der abschließenden Kompression eine zusätzliche Einengung des kontralateralen Neuroforamens entstehen, was dann zu einer Kompression der kontralateralen Nervenwurzel führen kann.

Zwischen 1993 und 1996 versorgte Harms 191 Patienten in der oben genannten Technik und fand eine geringe Pseudarthroserate von 2 % in Bezug auf die fusionierten Segmente. Als die ideale Indikation sah er die degenerative Spondylolisthese an.

Die Fusionsraten für TLIF-Fusionen werden bis heute relativ gleichbleibend mit ca. 90 % beschrieben. Die Rate von guten und befriedigenden Ergebnissen variiert zwischen 79 und 91 %, wobei die Fusionsrate sicherlich auch von der Qualität der Bandscheibenausräumung und der Präparation der Endplatten abhängig ist [34, 52].

Auch im weiteren Verlauf der TLIF-Entwicklung gab es diverse Modifikationen, so wurde statt der initialen Doppelcageimplantation auch das Einbringen nur eines Cages populärer und in zahlreichen Studien auch entsprechend beschrieben (■ **Abb. 14**). Hierdurch sollte das Einbringen der Implantate verbessert werden, da es schwierig war die beiden Cages symmetrisch zu platzieren und

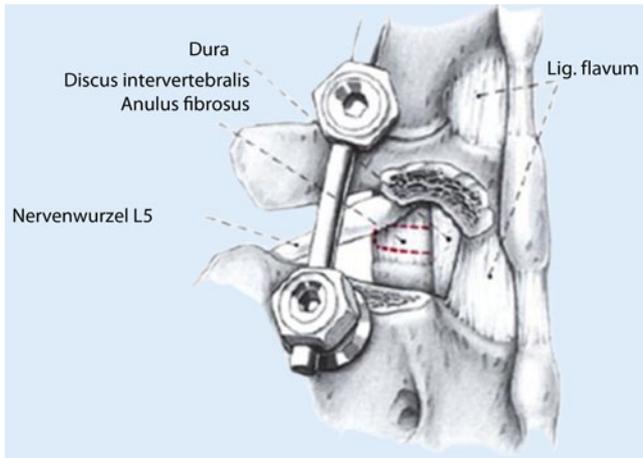


Abb. 13 ◀ Unilaterale Resektion des Facettengelenks und Zugang zum Bandscheibenfach. (Aus [27])

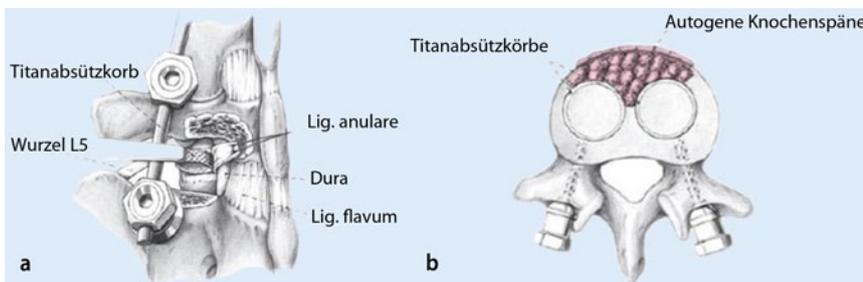


Abb. 14 ▲ **a** Einbringen der Titankörbchen in den Wirbelkörperzwischenraum. **b** Die Körbchen sollten links und rechts der Mittellinie sitzen, um eine gute Abstützung herzustellen. (Aus [27])

es beim Einbringen des zweiten Cages auch zu Lockerungen und Dislokationen beim primär implantierten Cage kommen konnte. Zudem erhoffte man sich auch eine Kostenersparnis sofern nur ein Implantat verwendet wurde [20, 59].

Daher kam es auch zur Anpassung der TLIF-Cages, die in ihrer Form auch an die Implantationstechnik angepasst wurden und heutzutage regelhaft als „Oblique-“, „Nieren-“ oder „Bananencages“ eingesetzt werden.

- Oblique-Cages sind prinzipiell einfacher in das Bandscheibenfach einzubringen, können aber bezüglich der Auflagefläche bei konkaven Endplatten und mangelnder Konturierung Nachteile aufzeigen.
- Bananenförmige Cages sind schwieriger zu positionieren, zeigen aber biomechanische Vorteile, da bei ihnen das Risiko einer posterioren Migration reduziert ist.
- Eine neue Entwicklung sind expandierbare Oblique-TLIF-Cages, die zusätzlich das Risiko einer Nervenwurzelverletzung minimieren sollen, indem sie in kontrahiertem Zu-

stand in das Bandscheibenfach eingebracht werden und dann anschließend erst die Distraction vorgenommen wird [45].

TLIF minimal-invasiv (MIS)

Mit diesen weiteren Optimierungen konnte das TLIF-Verfahren unter dem Einsatz tubulärer Retraktorsysteme auch zur minimal-invasiven Prozedur weiterentwickelt werden und zeigt aktuell vielversprechende Ergebnisse. Erstmals wurde diese Technik von Foley et al. 2003 beschrieben [21]. Hierdurch soll v. a. das Weichteil- und Muskeltrauma weiter reduziert werden. Der Zugang kann über eine paramediane Inzision nach Wiltse sowie Muskeldilatation erfolgen. Die Pedikelschrauben werden perkutan positioniert. Durch diese minimal-invasive Versorgung zeigen sich Vorteile bezüglich postoperativem Schmerz, Blutverlust, Länge des Krankenhausaufenthalts und Rehabilitation. Die Fusions- und Komplikationsraten konnten noch keine wesentlichen Unterschiede aufweisen [43, 48].

Fazit für die Praxis

- Die schrittweise Entwicklung der interkorporellen Fusionsverfahren im Laufe von Jahrzehnten und die wertvollen Erfahrungen der Vergangenheit haben die Grundlage gelegt für die modernen Fusionstechniken, die uns heute zur Verfügung stehen. Den frühen rein dorsalen Fusionen mit Auflage von autologem Knochenersatzmaterial stehen heute eine Fülle an modernsten Cage Technologien und Schrauben-Stab-Systemen gegenüber.
- Auch das Spektrum von verschiedenen Zugängen zur Wirbelsäule bis hin zur minimal-invasiven Versorgung hat sich erheblich erweitert.
- Dennoch strebt man auch heute noch nach höheren Fusionsraten und zuverlässigeren Fusionstechniken, so dass der Status quo noch weitere Innovationen zulässt. Die ideale Cage-Form, das Material und die Herstellungsweise lassen hier noch großen Spielraum für weitere Entwicklungen.
- Zuletzt sollte auch bedacht werden, dass trotz modernster Technik das Individuum Mensch ein schwer zu berechnender Faktor für einen guten Erfolg nach einer Operation ist. Dementsprechend muss bereits bei der Indikationsstellung auch der „richtigen“ Versorgungsstrategie Rechnung getragen werden.

Korrespondenzadresse



Dr. M. Rickert
Abteilung für
Wirbelsäulenthopädie
Orthopädische
Universitätsklinik
Friedrichsheim gGmbH
Marienburgstraße 2
60528 Frankfurt a.M.
marcus.rickert@friedrichsheim.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. J. Harms ist der Entwickler des im Text benannten Harms Cage. M. Rickert, M. Rauschmann, C. Fleege, E. Behrbalk und J. Harms geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag enthält keine Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

- Albee FH (1911) Transplantation of a portion of the tibia into the spine for Pott's disease. *JAMA* 57:885–886
- Bagby GW (1988) Arthrodesis by the distraction-compression method using a stainless steel implant. *Orthopedics* 11:931–934
- Bagby G (1999) The Bagby and Kuslich (BAK) method of lumbar interbody fusion. *Spine* 24:1857
- Barnes B, Rodts GE Jr, Haid RW Jr et al (2002) Allograft implants for posterior lumbar interbody fusion: results comparing cylindrical dowels and impacted wedges. *Neurosurgery* 51:1191–1198 (discussion 8)
- Blume H, Rojas CH (1981) Unilateral lumbar interbody fusion (posterior approach) utilizing dowel graft. *J Neurol Orthop Surg* 2:171–175
- Bosworth DM (1942) Clothespine or inclusion graft for spondylolisthesis or laminal defects of the lumbar spine. *Surg Gynecol Obstet* 75:593–599
- Brantigan JW, Steffee AD (1993) A carbon fiber implant to aid interbody lumbar fusion. Two-year clinical results in the first 26 patients. *Spine (Phila Pa 1976)* 18(14):2106–2107
- Brantigan JW, Steffee AD, Geiger JM (1991) A carbon fiber implant to aid interbody lumbar fusion. Mechanical testing. *Spine* 16:S277–S282
- Brantigan JW, McAfee PC, Cunningham BW, Wang H, Orbegoso CM (1994) Interbody lumbar fusion using a carbon fiber cage implant versus allograft: an investigational study in the Spanish goat. *Spine* 19:1436–1444
- Brantigan JW, Neidre A, Toohey JS (2004) The Lumbar I/F Cage for posterior lumbar interbody fusion with the variable screw placement system: 10-year results of a food and drug administration clinical trial. *Spine J* 4(6):681–688
- Briggs H, Milligan P (1944) Chip fusion of the low back following exploration of the spinal canal. *J Bone Joint Surg* 26:125–130
- Brodke DS, Dick JC, Kunz DN et al (1997) Posterior lumbar interbody fusion. A biomechanical comparison, including a new threaded cage. *Spine* 22:26–31
- Butts M, Kuslick S, Bechtold J (1987) Biomechanical analysis of a new method for spinal interbody fusion. American Society of Mechanical Engineers, Boston
- Campbell WC (1939) An operation for extra-articular fusion of sacroiliac joint. *Surg Gynecol Obstet* 45:218–219
- Cloward RB (1952) The treatment of ruptured lumbar intervertebral disc by vertebral body fusion. III. Method of use of banked bone. *Ann Surg* 136(6):987–992
- Cloward RB (1953) The treatment of ruptured lumbar intervertebral discs by vertebral body fusion. I. Indications, operative technique, after care. *J Neurosurg* 10:154–168
- Cloward RB (1985) Posterior lumbar interbody fusion updated. *Clin Orthop Relat Res* 193:16–19
- Davis H (1994) Increasing rates of cervical and lumbar spine surgery in the United States, 1979–1990. *Spine* 19:1117–1123 (discussion 23–4)
- Dick W, Kluger P, Magerl F, Woersdörfer O, Zäch G (1985) A new device for internal fixation of thoracolumbar and lumbar spine fractures: the 'fixateur interne'. *Paraplegia* 23(4):225–232
- El-Masry MA, Khayal H, Salah H (2008) Unilateral transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) using a single cage for treatment of low grade lytic spondylolisthesis. *Acta Orthop Belg* 74(5):667–671
- Foley KT, Holly LT, Schwender JD (2003) Minimally invasive lumbar fusion. *Spine* 15(suppl):26–35
- Freeman BJ, Licina P, Mehdiian SH (2000) Posterior lumbar interbody fusion combined with instrumented postero-lateral fusion: 5-year results in 60 patients. *Eur Spine J* 9:42–46
- Galalis ID, Kang JD (1998) Thoracic and lumbar fusions for degenerative disorders: rationale for selecting the appropriate fusion techniques. *Orthop Clin North Am* 29(4):829–842
- Ghormley RK (1933) Low back pain, with special reference to the articular facets, with presentation of an operative procedure. *JAMA* 101:1773–1777
- Grant BD, Hoskinson JJ, Barbee DD, Gavin PR, Sande RD, Bayly WM (1985) Ventral stabilization for decompression of caudal cervical spine cord compression in the horse. Read at the Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners, Toronto, Ontario, Canada, 30:1985
- Hadra BE (1975) The classic: wiring of the vertebrae as a means of immobilization in fracture and Pott's disease. Berthold E. Hadra. *Med Times and Register*, Vol 22, May 23, 1891. *Clin Orthop Relat Res* 112:4–8
- Harms JG, Jeszensky D (1998) Die posteriore, lumbale, interkorporelle Fusion in unilateraler transforaminaler Technik. *Orthop Traumatol* 10:90–102
- Harms J, Tabasso G (1999) Instrumented spinal surgery: principles and technique. Thieme, Stuttgart, S 20
- Harms J, Behle BA, Böhm H et al (1996) Lumbosacral fusion with Harms instrumentation. In: Margulies JY, Floman Y, Farcy JPC, Neuwirth MG. Lumbosacral and spinopelvic fixation. Lippincott-Raven, Philadelphia, S 529–538
- Harrington PR (1962) Treatment of scoliosis. Correction and internal fixation by spine instrumentation. *J Bone Joint Surg Am* 44:591–610
- Harrington PR (1967) Instrumentation in spine instability other than scoliosis. *S Afr J Surg* 5:7–13
- Hibbs RA (1911) An operation for progressive spinal deformities. *New York Med J* 93:1013–1016
- Humphreys SC, Hodges SD, Patwardhan AG et al (2001) Comparison of posterior and transforaminal approaches to lumbar interbody fusion. *Spine* 26:567–571
- Jang J, Lee S (2005) Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion with ipsilateral pedicle screw and contralateral facet screw fixation. *J Neurosurg Spine* 3(3):218–223
- Jaslow IA (1946) Intercorporeal bone graft in spinal fusion after disc removal. *Surg Gynecol Obstet* 82:215–218
- Kandziora F (2003) Habilitationsschrift. Einfluss von Cagedesign, Carrier-Systemen und Wachstumsfaktoren auf die intervertebrale Spondylodese. Berlin 2003. <http://edoc.hu-berlin.de/habilitationen/kandziora-frank-2003-10-23>
- King D (1948) Internal fixation for lumbosacral fusion. *J Bone Joint Surg [Am]* 30:560–565
- Kuslich SD, Ulstrom CL, Griffith SL, Ahern JW, Dowdle JD (1998) The Bagby and Kuslich method of lumbar interbody fusion. History, techniques, and 2-year follow-up results of a United States prospective, multicenter trial. *Spine (Phila Pa 1976)* 23(11):1267–1278
- Magerl FP (1984) Stabilization of the lower thoracic and lumbar spine with external skeletal fixation. *Clin Orthop Relat Res* 189:125–141
- McKenzie-Forbes A (1922) The operative treatment of scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 4:446–452
- Mixter WJ, Barr JS (1934) Rupture of the intervertebral disc with involvement of the spinal canal. *N Engl J Med* 211:210–225
- O'Brien JP, Dawson MH, Heard CW, Momberger G, Speck G, Weatherly CR (1986) Simultaneous combined anterior and posterior fusion. A surgical solution for failed spinal surgery with a brief review of the first 150 patients. *Clin Orthop Relat Res* 203:191–195
- Peng CW, Yue WM, Poh SY, Yeo W, Tan SB (2009) Clinical and radiological outcomes of minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion. *Spine (Phila Pa 1976)* 34(13):1385–1389
- Ray CD (1997) Threaded titanium cages for lumbar interbody fusions. *Spine* 22:667–679
- Rhee JM, Wiesel SW, Boden SD, Flynn JM (2013) Operative techniques in spine surgery. Wolters Kluwer, S 184
- Resnick DK, Choudhri TF, Dailey AT et al (2005) Guidelines for the performance of fusion procedures for degenerative disease of the lumbar spine. Part 8: lumbar fusion for disc herniation and radiculopathy. *J Neurosurg Spine* 2:673–678
- Roy-Camille R, Roy-Camille M, Demeulenaere C (1970) Osteosynthesis of dorsal, lumbar, and lumbosacral spine with metallic plates screwed into vertebral pedicles and articular apophyses. *Presse Med* 78(32):1447–1448
- Schwender JD, Holly LT, Rouben DP, Foley KT (2005) Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF): technical feasibility and initial results. *J Spinal Disord Tech* 18(Suppl):S1–S6
- Steffee AD, Sitkowski DJ (1988) Posterior lumbar interbody fusion and plates. *Clin Orthop Relat Res* 227:99–102
- Steffen T, Tsantrizos A, Fruth I, Aebi M (2000) Cages: designs and concepts. *Eur Spine J* 9(Suppl. 1):S89–S94
- Tajima N, Chosa E, Watanabe S (2004) Posterolateral lumbar fusion. *J Orthop Sci* 9:327–333
- Taneichi H, Suda K, Kajino T, Matsumura A, Moridaira H, Kaneda K (2006) Unilateral transforaminal lumbar interbody fusion and bilateral anterior-column fixation with two Brantigan I/F cages per level: clinical outcomes during a minimum 2-year follow-up period. *J Neurosurg Spine* 4(3):198–205
- Wang JC, Mummaneni PV, Haid RW (2005) Current treatment strategies for the painful lumbar motion segment: posterolateral fusion versus interbody fusion. *Spine* 30:533–543
- Watkins MB (1953) Posterolateral fusion of the lumbar and lumbosacral spine. *J Bone Joint Surg Am* 35-A(4):1014–1018
- Watkins MB (1959) Posterolateral bonegrafting for fusion of the lumbar and lumbosacral spine. *J Bone Joint Surg Am* 41-A(3):388–396
- Weiner BK, Fraser RD (1998) Spine update lumbar interbody cages. *Spine (Phila Pa 1976)* 23(5):634–640
- Wiltse LL, Bateman JG, Hutchinson RH, Nelson WE (1968) The paraspinous sacrospinalis-splitting approach to the lumbar spine. *J Bone Joint Surg Am* 50:919–926
- Wolff J (1986) The law of bone remodelling (trans: Maquet P, Furlong R). Springer, Berlin
- Zhou J, Wang B, Dong J, Li X, Zhou X, Fang T, Lin H (2011) Instrumented transforaminal lumbar interbody fusion with single cage for the treatment of degenerative lumbar disease. *Arch Orthop Trauma Surg* 131(9):1239–1245