Arthroskopie 2021 · 34:185–191
<https://doi.org/10.1007/s00142-021-00440-3>
 Angenommen: 22. Januar 2021
 Online publiziert: 15. Februar 2021
 © Der/die Autor(en) 2021

Redaktion

M. Flury, Wallisellen/Schweiz
 A. M. Müller, Basel/Schweiz

Paul Borbas · Karl Wieser · Florian Grubhofer

Abteilung für Schulter- und Ellbogenchirurgie, Universitätsklinik Balgrist, Zürich, Schweiz

Fixationssysteme und Techniken zur arthroskopischen Rotatorenmanschettenrekonstruktion

Evidenz im Jahr 2021

Operationsbedürftige Risse der Rotatorenmanschette werden heutzutage üblicherweise in arthroskopischer Technik rekonstruiert. Technische Weiterentwicklungen von ursprünglich einreihigen („single row“) zu zweireihigen („double row“) Techniken konnten in den letzten Jahren ebenso wie die Fortschritte bei den Fixationsmaterialien Verbesserungen bringen. Somit können Rekonstruktionen der Rotatorenmanschette (RM) heute anatomischer durchgeführt werden.

Die arthroskopische RM-Rekonstruktion ist eine gängige orthopädische Operationstechnik, die eine hohe Erfolgsquote hinsichtlich Patientenzufriedenheit und funktioneller Verbesserung aufweist. Bis Ende der 1990er Jahre wurden Rotatorenmanschettenrupturen in offener Weise rekonstruiert [1]. Dabei wurden die Fixierungsfäden mit einer Nadel transossär eingeführt und am Insertionsbereich ausgeleitet. Der Faden im Bereich der Insertionsstelle (*Footprint*) der gerissenen Sehne wurde dann durch die Sehne gestochen, und durch das Verknüpfen der beiden Fadenenden wurde die Sehne an die Insertionsstelle fixiert. Durch die Entwicklung der arthroskopischen Chirurgie wurden Nahtanker entwickelt, die eine vollständig arthroskopische Rekonstruktion der Rotatorenmanschette ermöglichen und zur Methode der Wahl wurden.

Die arthroskopischen Reparaturtechniken haben sich von einreihigen zu doppelreihigen Nahtankerrekonsstruk-

tionen weiterentwickelt (Abb. 1). Die klassische Double-row-Rekonstruktion umfasst neben einem oder mehreren medialen Ankern, deren Fäden durch die Sehne geschuttelt und geknüpft werden, zusätzlich einen oder mehrere laterale Anker, bei welchen diese Prozedur am lateralen Sehnenanteil wiederholt wird. Bei einer Weiterentwicklung der doppelreihigen Nahtankerrekonstruktion werden im lateralen Anker die überstehenden Fadenenden des medialen Ankers knotenlos fixiert. Durch die Verwendung von zwei lateralen Ankern können somit die insgesamt 4 Fadenenden der medialen Reihe in gerader oder gekreuzter Weise in die laterale Reihe fixiert werden (*Suture-Bridge*). Dabei wird mit dem anterolateralen Anker ein Faden des bereits verknüpften antero-medialen und ein Faden des verknüpften posteromedialen Ankers fixiert. Mit dem posterolateralen Anker wird der jeweils zweite verknüpfte Faden des antero- und posteromedialen Ankers im lateralen Aspekt des Tuberculum majus fixiert. Da diese Verankerungsmethode mechanisch weitestgehend der transossären Fixierungsmethode entspricht, wird diese Fixierungsmethode „transosseous-equivalent“ (TOE) Fixierungsmethode genannt. Der Vorteil der TOE gegenüber der Fixierung mit nur einer Ankerreihe ist theoretisch die Maximierung der Druckverteilung im Footprint-Bereich.

Neben der Entwicklung der Ankersysteme wurden auch arthroskopische ossäre Tunnelierungsinstrumente entwickelt, welche analog zur offenen Fixationsmethode eine arthroskopische transossäre

RM-Rekonstruktion ohne Verwendung von Ankermaterial ermöglichen. Im folgenden Abschnitt sollen die biomechanischen Eigenschaften sowie klinischen Behandlungsergebnisse von Single-row-, Double-row- sowie „transosseous equivalent“ Ankerrekonstruktionen beleuchtet werden.

Biomechanische Eigenschaften der Fixationsmethoden

Ziel jeder RM-Rekonstruktion ist die Heilung der gerissenen Sehne an den ursprünglichen Insertionsort am proximalen Humerus. Nach einem Riss der Rotatorenmanschette kann die Sehne retrahieren, was die Heilung beeinträchtigt bzw. spontan nicht mehr zulässt. Durch das Einbringen von Anker-Fadensystemen soll die Sehne an die Insertionsstelle 1) mechanisch temporär stabilisiert werden und 2) biologisch an den Knochen anheilen.

» Die zweireihige ist der einreihigen Fixierungsmethode biomechanisch überlegen

Das fibrovaskuläre Narbengewebe besteht hauptsächlich aus quervernetzten Kollagen-III-Fasern, während die Sehneninsertion einer gesunden, nichtgerissenen Sehne hauptsächlich aus parallel orientierten Kollagen-I-Fasern besteht [2]. Bei der einreihigen Ankerfixierung wird die Sehne durch ein Anker-Fadensystem an den medialen Footprint-Bereich refixiert. Hierbei kann die Sehne

Abb. 1 ▲ Illustration einer transossären (a), einreihigen (b) und zweireihigen (c) Nahttechnik zur Rekonstruktion von Rupturen der Rotatorenmanschette. (Aus [8], mit freundlicher Genehmigung von Elsevier)

Abb. 2 ▲ Darstellung der knotenlosen Speed-Bridge-Technik mit Verwendung von zwei gekreuzten FiberTapes und je zwei medialen und lateralen Ankern. (Aus [13], mit freundlicher Genehmigung von Elsevier)

durch End-zu-End-Verknüpfung („simple stiches“) oder horizontale Seit-zu-End-Verknüpfung („horizontal mattress stiches“) oder aber „cross horizontal mattress sutures“ wieder an den Footprint refixiert werden. Biomechanische Studien konnten zeigen, dass die „mattress stiches“ eine höhere Stabilität aufweisen im Vergleich zu „simple stiches“ [3]. Bei der zweireihigen Fixierung wird ein weiterer Fadenanker am lateralen Aspekt des ursprünglichen Insertionsorts am proximalen Humerus eingebracht, um die lateralen Anteile der RM-Sehne an den lateralen Ansatzbereich zu fixieren. Dadurch soll die Kontaktfläche der gerissenen Sehne vergrößert und die Kompression der Sehnenfixierung verstärkt werden, was theoretisch zu einer besseren Einheilung führen sollte. In einer Studie von Meier

et al. wurde die Kontaktfläche der ein- und zweireihigen sowie transossären Fixierungsmethode ausgemessen, dabei konnte mit der zweireihigen Fixierungsmethode der Footprint der gerissenen Sehne zu 100 % wiederhergestellt werden. Mit der einreihigen und der transossären Fixierungsmethode konnte lediglich 40 und 72 % des Footprints bedeckt werden [4]. In den Kadaverstudien von Park et al. konnte gezeigt werden, dass der Anpressdruck der Sehnen im Insertionsbereich bei der zweireihigen Ankerfixierung signifikant höher ist als bei der einreihigen [5, 6]. In verschiedenen biomechanischen Studien konnte fortan gezeigt werden, dass die zweireihige der einreihigen Fixierungsmethode hinsichtlich Rissbildung unter statischer Belastung, Festigkeit und Steifigkeit der Sehnenrekonstruktion und Widerstandsfähigkeit gegen zyklische Belastung überlegen ist [7, 8]. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die zweireihige der einreihigen Fixierungsmethode biomechanisch überlegen ist.

Bei der transossär-äquivalenten Technik wird zuerst über eine mediale Ankerreihe die Sehne an den medialen Footprint fixiert. Nach dem Verknoten der medialen Reihe werden die Fadenenden der medial platzierten Knoten verwendet, um diese an der lateralen Tuberculum-majus- oder Tuberculum-minus-Facette mit einem knotenlosen Anker zu fixieren.

In biomechanischen Studien konnte gezeigt werden, dass die Ausrisskraft und Festigkeit der TOE-Technik der konven-

tionellen zweireihigen Fixierungsmethode überlegen ist [9–11]. Der Anpressdruck der TOE-Fixierung ist höher und zeigt eine gleichmäßigere Verteilung im Footprint-Bereich der Sehne als die zweireihige Fixierung, bei der zwei mediale Anker und ein lateraler Anker verwendet wurden [10, 11]. In einer klinischen Studie von Cho et al. wurde festgestellt, dass die Ruptur nach einer medial geknoteten TOE-Fixierungsmethode insbesondere am muskulotendinösen Übergang entsteht [12]. Man spricht hier von einem sog. „medial row failure“. Durch die Entwicklung einer knotenlosen TOE-Fixierungsmethode („Speed Bridge“, Arthrex, Naples, FL, USA), bei der weniger strangulierendes Fadenmaterial – also Fäden in Bandform („suture tapes“) – verwendet wird, sollen die lateralen Sehnenanteile mehr geschont werden als bei der medial verknöteten TOE-Technik ([13]; ■ **Abb. 2**). Biomechanisch war die geknotete der knotenlosen TOE-Technik hinsichtlich biomechanischer Ausrisskraft und Rissbildung jedoch überlegen [14, 15]. Dies wurde auch in einer Studie von Leek et al. bestätigt, wo das zusätzliche Knüpfen der medialen Reihe zu einer signifikant höheren Stabilität im Vergleich zur konventionellen, knotenlosen Speed-Bridge-Methode führte [16]. Tashjian et al. beschrieben eine knotenlose transossäre Fixationsmethode, bei der die Fixation der Sehne wie bei einer Speed-Bride-Fixation erfolgt, mit dem Unterschied, dass die Tapes transossär an den medialen Footprint-Bereich geschuttelt und lediglich durch laterale Ankerim-

P. Borbas · K. Wieser · F. Grubhofer

Fixationssysteme und Techniken zur arthroskopischen Rotatorenmanschettenrekonstruktion. Evidenz im Jahr 2021

Zusammenfassung

Arthroskopische Rotatorenmanschettenrekonstruktionen wurden initial mit einer einreihigen („single row“) Technik beschrieben. Im Rahmen technischer Weiterentwicklungen der arthroskopischen Chirurgie wurden diverse Techniken zur zweireihigen („double row“), transossären und transossär-äquivalenten Sehnenfixation entwickelt, nicht zuletzt durch eine zunehmende Verbreitung knotenloser Anker. Die klinischen Ergebnisse zeigen keine relevanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Techniken. Biomechanisch sind zweireihige Rekonstruktionen jedoch durch Vergrößerung der Kontaktfläche an der Insertionsstelle und der erreichten Stabilität überlegen, insbesondere mit medial geknoteten Fäden, welche in eine laterale Reihe als sog. Suture-

Bridge abgespannt werden. Klassischerweise wurden Schraubanker aus Metall für eine arthroskopische Sehnenfixierung verwendet. Im Laufe der letzten Jahre wurde das Anker-Portfolio jedoch durch moderne bioresorbierbare und nichtresorbierbare (PEEK) Schraub- und Einschlaganker sowie auch um reine Fadenanker (All-suture) erweitert. Ein allgemeingültiger Goldstandard für die Ankerverwendung existiert bis dato nicht, wobei die meisten gängigen Anker – zumindest bei guter Knochenqualität – ausreichende Stabilität gewährleisten. Beim Nahtmaterial kam es ebenso zu relevanten Weiterentwicklungen, sodass dem Versagen der Nähte heutzutage weniger Bedeutung zukommt. Das Aufkommen von bandartigem Nahtmaterial (Tapes) konnte in diversen

biomechanischen Studien seine Überlegenheit nachweisen, jedoch ist bei geknoteten Techniken mit Tapes aufgrund des womöglich negativen Einflusses durch größere Knoten Vorsicht geboten. Nicht zuletzt ist die mediale Stichposition möglichst nahe des Rotatorenkabels von großer Bedeutung, da der häufigste Versagensmechanismus einer Rotatorenmanschettenrekonstruktion mit modernem Naht- und Ankermaterial weiterhin ein Hindurchschneiden der Fäden durch das vorgeschädigte Sehngewebe ist.

Schlüsselwörter

Schulter · Faden · Anker · Sehnenfixation · Suture-Bridge

Fixation systems and techniques for arthroscopic rotator cuff repair. Evidence in the year 2021

Abstract

Arthroscopic rotator cuff repair was originally described with a single row technique. With technical advances in arthroscopic surgery various techniques for a double row, transosseous and transosseous-equivalent (TOE) tendon fixation were developed, especially with increasing use of knotless suture anchors. The clinical results show significantly different results with respect to the technique applied; however, biomechanical data could demonstrate improved footprint coverage and mechanical strength of double row reconstruction techniques. Techniques with a combination of medial row mattress sutures and a knotless lateral row in a suture bridge technique (modified TOE) are superior to

fully knotless double row repair. Metal screw-in anchors were originally used in the first decade of arthroscopic rotator cuff repair; however, the portfolio has been substantially expanded over the recent years as resorbable and non-resorbable push-in and screw-in anchors as well as all-suture anchors have been introduced. No generally valid gold standard for anchor usage exists to date but most available anchors offer sufficient biomechanical strength, at least in good bone quality. Substantial improvements could also be achieved in the field of suture material available for rotator cuff repair, which is no longer the weak point of the construct in terms of suture breakage. The

development of tape-type sutures could demonstrate biomechanical superiority in several studies; however, caution is advised for knotted techniques with the use of tapes due to possible negative effects of the bigger knot size. As the most frequent failure mode in arthroscopic rotator cuff repair remains suture material cutting through the damaged tendon, it should be highlighted that a stitch position just medial to the rotator cable provides the strongest suture hold.

Keywords

Shoulder · Suture · Anchor · Suture fixation · Suture bridge

plantation fixiert werden. Biomechanisch ließen sich in seiner Studie keine Nachteile gegenüber der Speed-Bridge-Fixation nachweisen [17]. Der Vorteil dieser Methode ist, dass lediglich 2 und nicht 4 Anker, wie sie bei der Speed-Bridge zur Anwendung kommen, notwendig sind.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass bei zweireihigen Fixierungsmethoden, bei der zwei laterale Fixationspunkte verwendet werden, eine höhere biomechanische Stabilität mit einer zusätzlich geknoteten medialen Reihe im Vergleich

zur reinen knotenlosen Technik erreicht wird. TOE-Techniken sind wiederum der klassischen zweireihigen Technik mit separat geknüpfter medialer und lateraler Reihe überlegen.

Klinische Ergebnisse und Heilungsraten

In einer Metaanalyse von Perser et al. wurden 3 Level-I- und 2 Level-II-Studien eingeschlossen. Das funktionelle Behandlungsergebnis von insgesamt

303 Patienten mit Single- vs. Double-row-Rotatorenmanschettenrekonstruktion wurden untersucht. Nach einem Nachkontrollzeitraum von mindestens einem Jahr konnte kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden [18]. In einer weiteren Metaanalyse wurden ebenfalls keine klinischen Unterschiede zwischen Patienten nach ein- vs. zweireihiger Ankerfixation festgestellt, allerdings zeigte sich in der Double-row-Gruppe eine signifikant höhere Sehnenheilungsrate [19]. Zhang et al. unter-

suchten in einer weiteren Metaanalyse die klinischen Behandlungsergebnisse von 619 Patienten mit einem Mindest-Nachkontrollzeitraum von 24 Monaten. In dieser Studie wurde zudem eine Subgruppenanalyse hinsichtlich der Rupturgröße durchgeführt. Es zeigte sich, dass bei Patienten mit zweireihiger Fixationstechnik und großer (min. 3 cm) Rotatorenmanschettenruptur signifikant höhere Sehnenheilungsraten und bessere funktionelle Ergebnisse zu sehen waren [20]. In einer Metaanalyse von Millet et al. wurden 7 Level-I-Studien mit 567 Patienten eingeschlossen: Hier konnte zwar eine signifikant höhere Rerupturrate in der einreihigen Fixationsgruppe im Vergleich zur Double-row-Gruppe festgestellt werden, dies hatte jedoch keine Auswirkung auf das klinische Behandlungsergebnis 21 Monate nach Indexoperation. In einer Metanalyse von Sobhy et al. wurden 477 Patienten mit Single- und Double-row-Rotatorenmanschettenversorgung untersucht, und es zeigte sich ein signifikant verbesserter UCLA Schulter-Funktionswert in der Double-row-Gruppe mit niedrigeren Partialrupturraten. Die totalen Rerupturen zeigten keinen Unterschied zwischen den 2 Gruppen. Multiple Studien haben die klinischen Behandlungsergebnisse und Sehnenheilungsraten von Patienten mit klassischer zweireihiger Fixationstechnik und TOE untersucht. In keiner der Studien konnte ein signifikanter Unterschied des klinischen Behandlungsergebnisses festgestellt werden. In einer Studie von Rhee et al. wurde die geknotete TOE mit der knotenlosen TOE verglichen [21]. Auch hier konnte kein klinischer Unterschied hinsichtlich der Funktion festgestellt werden, allerdings zeigte sich in der geknoteten TOE-Gruppe eine signifikant höhere Rerupturrate, was sich jedoch klinisch nicht ausgewirkt hat. 72 % der Rupturen ereigneten sich dabei im Bereich der muskulotendinösen Übergangs. Huget al. untersuchten ebenfalls Patienten, welche mittels TOE geknotet vs. nichtgeknotet behandelt wurden, und konnten keine klinischen oder radiologischen Unterschiede finden. Auch Millet et al. untersuchten 102 Patienten, welche TOE geknotet vs. nichtgeknotet behandelt wurden; auch

sie konnten keine klinischen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen nachweisen. In einer retrospektiven Matched-controlled-Studie von Srikumaran et al. mit 100 Patienten mit transmuralen Supraspinatussehnenrupturen, die mit arthroskopischer transossärer Fixation und zweireihiger TOE-Fixationsmethode behandelt wurden, konnte ebenfalls kein Unterschied hinsichtlich Sehnenheilung und Schulterfunktion festgestellt werden [22].

Zusammenfassend lässt sich somit konstatieren, dass die klinischen Kurzeitergebnisse nach einreihiger, zweireihiger, TOE und transossärer arthroskopischer Rotatorenmanschettenrekonstruktion vergleichbar sind. In Bezug auf die Sehnenheilung zeigt sich jedoch eine klare Tendenz hinsichtlich besserer Heilungsraten bei zweireihigen Techniken. Es bleibt abzuwarten, ob diese besseren strukturellen Ergebnisse schließlich im klinischen Langzeitverlauf zu tragen kommen werden.

Ankerfixationssysteme

Grundlegend lassen sich drei verschiedene Ankertypen zur Refixation einer gerissenen Rotatorenmanschette unterscheiden:

- Schraubanker, welche in den Knochen eingedreht werden und mit einem („single loaded“), zwei („double loaded“) oder drei („triple loaded“) Fäden beladen sind,
- Einschlag-Anker, welche üblicherweise eine knotenlose Fixation ermöglichen und häufig mit einem zusätzlichen Faden beladen sind, um eine ergänzende Sehnennaht zu ermöglichen,
- Reine Fadenanker („all-suture“), welche in den Knochen eingeschlagen werden und sich durch *Verknäulen* von weichem Fadenmaterial im Knochen ausdehnen und dadurch Halt finden.

Es gibt auch Ankersysteme, welche zwar klassisch in den Knochen geschraubt werden, aber zusätzlich eine knotenlose Fixation durch Einspannen eines Fadens oder Tapes ermöglichen (z. B. SwiveLock, Arthrex, Naples, FL, USA). Die klassische

Fixation erfolgte mit Schraubankern aus Metall (Titan), üblicherweise mit einem oder zwei nichtresorbierbaren Fäden beladen. Resorbierbare Anker wurden aufgrund des Vorteils der artefaktfreien MRT-Untersuchung eingeführt, hatten aber initial Probleme mit Osteolysen infolge der Resorption des Materials. Diese scheinen infolge von Weiterentwicklungen der Materialien aber nun kein relevantes Problem mehr zu sein und sie zählen, neben PEEK-Ankern, mittlerweile zu den populärsten Schraubankern, während die Verwendung von Metallankern rückläufig ist. Die Materialien resorbierbarer Anker umfassen heutzutage vor allem PLLA (Poly-L-Lactid), PLDLA (Poly-L,D-Lactid) oder eine Kombination aus den erstgenannten mit Hydroxylapatit oder (beta-)Trikalziumphosphat, welche osteokonduktive Eigenschaften aufweisen. PEEK (Polyetheretherketon) ist im Gegensatz dazu nicht resorbierbar, hat aber neben der im Vergleich zu Metall besseren MRT-Qualität auch den Vorteil, dass die Anker bei Revisionen einfach überbohrt werden können. Die üblichen Ankerdurchmesser liegen zwischen 4,5 und 6,5 mm, das typischerweise verwendete Fadenmaterial sind nichtresorbierbare hochbelastbare Fäden der Stärke 2.

» **Primäres Ziel aller Ankersysteme ist die Gewährleistung einer ausreichend hohen Stabilität für die Sehnenheilung**

Das primäre Ziel aller Ankersysteme ist prinzipiell das gleiche, nämlich die Gewährleistung einer ausreichend hohen Stabilität, welche für eine erfolgreiche Sehnenheilung erforderlich ist. Neben einer möglichst hohen Primärstabilität mit ausreichendem Sehnenanpressdruck an den Footprint sollte auch eine ausreichende zyklische Stabilität vorhanden sein, um das Auftreten einer sog. „gap formation“, also der Entstehung einer Distanz zwischen Sehne und Knochen, zu verhindern [23].

Die Knochendichte im Bereich der Sehneninsertion ist ebenso von großer Bedeutung. Hier konnte gezeigt werden,

Abb. 3 ▲ Darstellung möglicher Stichpositionen bei einer Supraspinatusrekonstruktion, wobei sich zentral unmittelbar medial des Rotatorenkabels (Position 6) der beste Halt zeigt. (Aus [33])

dass Schraubanker in osteoporotischem Knochen eine höhere biomechanische Stabilität aufweisen als Einschlag-Anker [24]. Insbesondere im lateralen Anteil des Tuberculum majus ist die Knochenqualität schlechter, Schraubanker aus Metall zeigen hier eine Überlegenheit gegenüber anderen Ankertypen und Materialien. Das Ausreißen des Ankers aus dem Knochen ist jedoch insgesamt nicht die häufigste Art des Versagens einer RM-Rekonstruktion, sondern nur am dritthäufigsten nach dem *Durchschneiden* der Fäden durch die Sehne und dem Versagen der Ankeröse („eyelet“). Der Versagensmechanismus ist natürlich auch abhängig von der Qualität des Knochens bzw. der Sehne und, gerade bei osteoporotisch reduzierter Knochenqualität, sind einzelne Ankertypen durchaus als problematisch einzustufen.

Barber et al. untersuchten in einer umfangreichen biomechanischen Studie insgesamt 24 verschiedene Anker für RM-Rekonstruktionen hinsichtlich zyklischer Belastbarkeit und ultimativer Versagenslast [25]. Hierbei zeigte sich eine durchschnittliche Versagenslast von 448 N. Somit konnten alle Anker die von Mazzocca et al. postulierten 250 N überstehen [26], was als minimal notwendige Belastbarkeit für die erfolgreiche RM-Rekonstruktion beschrieben wurde. Keiner der getesteten Anker versagte im Rahmen der zyklischen Testung bis 200 N, wobei Versagen als Elongation von mindestens 5 mm definiert wurde. Auffällig war hierbei jedoch, dass einer der getesteten Anker eine signifikant höhere Elongation bei der zyklischen Testung aufwies (Twifix, Smith & Ne-

Abb. 4 ▲ a, b Illustration des vermehrten Schneidens durch die Sehne („cheese wiring“) eines FiberWire-Fadens (blau) im Vergleich zu Dynacord (weiß-blau) nach zyklischer Belastung. (Aus [37], mit freundlicher Genehmigung von Elsevier)

phew Endoscopy, Andover, MA, USA). All-suture-Anker, d. h. reine Fadenanker, haben unterschiedliche Mechanismen der Auslösung, welche letztlich aber alle zu einem *Verknäulen* von Fadenmaterial nach Zug an den Fixationsfäden führen. In der englischsprachigen Literatur wird hier gerne davon gesprochen, dass sich der Anker beim Auslösen zu einem *Ball* ausbreitet. Der zentrale Ankeranteil kann entweder ein Tape oder ein Schlauch („tube“) sein und ist üblicherweise aus demselben Material wie die Fäden selbst, nämlich UHMWPE („ultra-high-molecular-weight polyethylene“). Barber et al. verglichen wiederum diverse reine Fadenankermodelle und stellten teils erhebliche Unterschiede fest, wobei die ultimative Versagenslast logischerweise auch davon abhing, ob die Anker einfach oder doppelt beladen waren [27]. Auch in dieser Untersuchung konnten sämtliche getestete Anker die geforderten Kriterien hinsichtlich einer Elongation von weniger als 5 mm bei der zyklischen Testung und einer ultimativen Versagenslast von mehr als 250 N erfüllen. In mehreren biomechanischen Vergleichsstudien zeigte sich keine statistisch signifikante Unterlegenheit der All-suture-Anker gegenüber konventionellen Schraubankern, jedoch waren die Fadenanker hinsichtlich zyklischer Belastbarkeit und maximaler Versagenslast den konventionellen Ankern zumeist nicht ebenbürtig [28–30]. Dieses Problem akzentuiert sich bei primär schlechter, oder durch zu aggressivem *Anfrischen* (*shaven*) sekundär reduzierter kortikaler Knochenqualität. Ein weiterer Nachteil von All-suture-An-

kern könnte die Entstehung zystischer Knochenreaktionen um den Anker sein [30].

Biomechanische Charakteristiken von Fäden und Tapes

Wie zuvor erwähnt, ist die Übergangszone von Muskel zu Sehne („musculotendinous junction“) von entscheidender Bedeutung, nicht nur in Bezug auf die beschriebenen „medial row failures“. So haben diverse Autoren darauf hingewiesen, dass der häufigste Versagensmechanismus einer RM-Rekonstruktion das Hindurchschneiden des Fadenmaterials durch die Sehne ist [31, 32]. Neben der zuvor schon erwähnten Refixationstechnik (einreihig, zweireihig, Suture-Bridge, TOE) ist auch die Lokalisation des Durchstechens durch die Sehne bei der medialen Reihe von Bedeutung. So konnten Wieser et al. zeigen, dass die Fäden direkt medial des sog. Rotatorenkabels („rotator cable“), welche eine Verdickung der Sehne darstellt, den besten Halt finden und weniger leicht durch die Sehne durchschneiden können ([33]; ■ Abb. 3). Nicht zuletzt hat jedoch auch das verwendete Fadenmaterial eine entscheidende Bedeutung. Historisch betrachtet war lange Zeit Ethibond (Ethicon, Somerville, NJ, USA), ein geflochtener nichtresorbierbarer Polyesterfaden, das meistverbreitete Produkt. Die Entwicklung von Fäden aus UHMWPE zeigten jedoch nach ihrer Einführung eine klare biomechanische Überlegenheit. Insbesondere FiberWire (Arthrex, Naples, FL, USA), ein Mehrphasenpo-

Abb. 5 ▲ Gleiche Knotenhöhe von FiberTape (links) und SutureTape (rechts). (Aus [36], mit freundlicher Genehmigung von Elsevier)

lymer aus einem zentralen UHMWPE-Kern und einer geflochtenen Polyesterhülle, zeigte eine biomechanisch höhere Stabilität im Vergleich zu ähnlichen Produkten und gewann entsprechend zunehmend an Bedeutung [32]. Die absolute Reißfestigkeit von FiberWire, wie im Übrigen auch von anderen ähnlichen Fäden (z. B. Ultrabraid, Smith & Nephew, Memphis, TN, USA), liegt über 300 N und somit ist das Reißen von Fäden als Modus des Versagens kein alltägliches Problem mehr. Es gab jedoch auch Berichte, dass die abrasiven Eigenschaften von FiberWire ungünstiger sind und diese Fäden entsprechend häufiger durch das Sehnen Gewebe hindurchschneiden können. Kürzlich erfolgte die Entwicklung eines innovativen Fadens (DynaCord, DePuy Mitek, Raynham, MA, USA), welcher weniger Abrasivität im Sehnen Gewebe als FiberWire zeigte ([34]; ■ Abb. 4). DynaCord zeichnet sich dadurch aus, dass er einen zentralen Silikon-Salz-Kern und eine geflochtene UHMWPE-Hülle hat, sodass es im feuchten Milieu zu einer Ausdehnung durch Hydrierung des Fadenkerns und entsprechend sekundär höheren und konstanten Stabilität kommen soll. Eigene, bisher unveröffentlichte biomechanische Daten zeigten jedoch – zumindest unter trockenen Bedingungen – eine deutlich verringerte Steifigkeit und erhöhte Elongation bei diesem Faden.

Das Aufkommen von bandartigen Fäden, besser bekannt als Tapes, stellt einen weiteren Meilenstein in der Nahtmaterial-Entwicklung dar. Ein vergleichsweise weit verbreitetes Produkt ist hierbei FiberTape (Arthrex, Naples, FL, USA), welches u. a. in der vorhin beschriebenen Speed-Bridge-Technik Anwendung fin-

det. FiberTape ist ein 2 mm breites Band mit einer ähnlichen Zusammensetzung wie FiberWire aus UHMWPE und Polyester, jedoch mit einer ca. 3-fach erhöhten biomechanischen Stabilität hinsichtlich Rissfestigkeit und Steifigkeit. FiberTape konnte auch in einer eigenen, bisher unveröffentlichten Untersuchung von neun am Markt verfügbaren Fäden und Tapes eine biomechanische Überlegenheit hinsichtlich Rissfestigkeit, Steifigkeit und Elongation nachweisen. Es zeigte sich auch gesamthaft eine biomechanische Überlegenheit von Tapes gegenüber Fäden, wenngleich dies in der Detailanalyse nicht für alle Tapes der Fall war.

Im Gegensatz zu früheren wissenschaftlichen Arbeiten [35–37] ließ sich in der eigenen Untersuchung keine verminderte Abrasivität (d. h. kein vermindertes Durchschneiden von Fadenmaterial durch das Sehnen Gewebe) von Tapes gegenüber Fäden nachweisen.

Ein möglicher Nachteil von Tapes liegt im erhöhten Knotenvolumen, welches bei FiberTape nahezu doppelt so hoch ist im Vergleich zu konventionellen Fäden der Stärke 2. Inwiefern dies klinisch zu subakromialen Irritationen und Bursitiden führt, ist bisher nicht bekannt. In einer Tierstudie konnte jedoch gezeigt werden, dass dieser Punkt mitunter relevant ist, da es durch prominente Knoten zu einem negativen Einfluss auf die Sehnenheilung mit chronischer Entzündung kommen kann [38]. Eine sinnvolle Weiterentwicklung erscheint hierbei jene des sog. SutureTape (Arthrex, Naples, FL, USA), welches einen UHMWPE-Anteil mit einem geflochtenen Überzug aus UHMWPE/Polyester hat, da dieses verglichen mit FiberWire eine signifikant höhere biomechanische Stabilität aufweist, bei vergleichbarem Knotenvolumen ([36]; ■ Abb. 5).

Fazit für die Praxis

- Zweireihige Fixierungsmethoden sind einreihigen Techniken biomechanisch überlegen.
- Klinische Studien konnten bisher im Kurzzeitverlauf jedoch keine signifikant besseren Resultate nach zweireihiger Technik zeigen.

- Die Fadenpassage durch die Sehne sollte unmittelbar im oder knapp medial des Rotatorenkabels erfolgen.
- Eine übermäßige Spannung sollte bei der Sehnenrekonstruktion verhindert werden, da insbesondere bei zweireihiger Technik die Gefahr eines „medial row failures“ besteht.
- Unzählige Anker für arthroskopische Rotatorenmanschettenrekonstruktionen sind auf dem Markt verfügbar und zeigen in den allermeisten Fällen eine ausreichende biomechanische Stabilität für eine erfolgreiche Sehnenheilung.
- Modernes bandförmiges Fadenmaterial („Tapes“) ist herkömmlichen Fäden biomechanisch überlegen.

Korrespondenzadresse

Dr. med. Paul Borbas

Abteilung für Schulter- und Ellbogenchirurgie,
Universitätsklinik Balgrist
Forchstraße 340, 8008 Zürich, Schweiz
paul.borbas@balgrist.ch

Funding. Open access funding provided by University of Zurich

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. P. Borbas, K. Wieser und F. Grubhofer geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Literatur

- Harryman DT 2nd, Mack LA, Wang KY, Jackins SE, Richardson ML, Matsen FA 3rd (1991) Repairs of the rotator cuff. Correlation of functional results with integrity of the cuff. *J Bone Joint Surg Am* 73(7):982–989
- Atesok K, Fu FH, Wolf MR, Ochi M, Jazrawi LM, Doral MN et al (2014) Augmentation of tendon-to-bone healing. *J Bone Joint Surg Am* 96(6):513–521
- Yamakado K (2017) Biomechanical Analysis of a Modified Mattress Configuration: The Cross-Mattress Suture. *Shoulder Elbow*. <https://doi.org/10.1111/j.1758-5740.2011.00110.x>
- Meier SW, Meier JD (2006) Rotator cuff repair: the effect of double-row fixation on three-dimensional repair site. *J Shoulder Elbow Surg* 15(6):691–696
- Park MC, Tibone JE, ElAttrache NS, Ahmad CS, Jun BJ, Lee TQ (2007) Part II: biomechanical assessment for a footprint-restoring transosseous-equivalent rotator cuff repair technique compared with a double-row repair technique. *J Shoulder Elbow Surg* 16(4):469–476
- Park MC, ElAttrache NS, Tibone JE, Ahmad CS, Jun BJ, Lee TQ (2007) Part I: Footprint contact characteristics for a transosseous-equivalent rotator cuff repair technique compared with a double-row repair technique. *J Shoulder Elbow Surg* 16(4):461–468
- Smith CD, Alexander S, Hill AM, Huijsmans PE, Bull AM, Amis AA et al (2006) A biomechanical comparison of single and double-row fixation in arthroscopic rotator cuff repair. *J Bone Joint Surg Am* 88(11):2425–2431
- Meier SW, Meier JD (2006) The effect of double-row fixation on initial repair strength in rotator cuff repair: a biomechanical study. *Arthroscopy* 22(11):1168–1173
- Park MC, Idjadi JA, Elattrache NS, Tibone JE, McGarry MH, Lee TQ (2008) The effect of dynamic external rotation comparing 2 footprint-restoring rotator cuff repair techniques. *Am J Sports Med* 36(5):893–900
- Park MC, Cadet ER, Levine WN, Bigliani LU, Ahmad CS (2005) Tendon-to-bone pressure distributions at a repaired rotator cuff footprint using transosseous suture and suture anchor fixation techniques. *Am J Sports Med* 33(8):1154–1159
- Hatta T, Giambini H, Hooke AW, Zhao C, Sperling JW, Steinmann SP et al (2016) Comparison of passive stiffness changes in the supraspinatus muscle after double-row and knotless transosseous-equivalent rotator cuff repair techniques: a cadaveric study. *Arthroscopy* 32(10):1973–1981
- Cho NS, Yi JW, Lee BG, Rhee YG (2010) Retear patterns after arthroscopic rotator cuff repair: single-row versus suture bridge technique. *Am J Sports Med* 38(4):664–671
- Vaishnav S, Millett PJ (2010) Arthroscopic rotator cuff repair: scientific rationale, surgical technique, and early clinical and functional results of a knotless self-reinforcing double-row rotator cuff repair system. *J Shoulder Elbow Surg* 19(2 Suppl):83–90
- Pauly S, Kieser B, Schill A, Gerhardt C, Scheibel M (2010) Biomechanical comparison of 4 double-row suture-bridging rotator cuff repair techniques using different medial-row configurations. *Arthroscopy* 26(10):1281–1288
- Busfield BT, Glousman RE, McGarry MH, Tibone JE, Lee TQ (2008) A biomechanical comparison of 2 technical variations of double-row rotator cuff fixation: the importance of medial row knots. *Am J Sports Med* 36(5):901–906
- Leek BT, Robertson C, Mahar A, Pedowitz RA (2010) Comparison of mechanical stability in double-row rotator cuff repairs between a knotless transtendon construct versus the addition of medial knots. *Arthroscopy* 26(9 Suppl):S127–S133
- Tashjian RZ, Hoy RW, Helgerson JR, Guss AD, Henninger HB, Burks RT (2018) Biomechanical comparison of transosseous knotless rotator cuff repair versus transosseous equivalent repair: half the anchors with equivalent biomechanics? *Arthroscopy* 34(1):58–63
- Perser K, Godfrey D, Bisson L (2011) meta-analysis of clinical and radiographic outcomes after arthroscopic single-row versus double-row rotator cuff repair. *Sports Health* 3(3):268–274
- Prasathaporn N, Kuptniratsaikul S, Kongruegreetiyos K (2011) Single-row repair versus double-row repair of full-thickness rotator cuff tears. *Arthroscopy* 27(7):978–985
- Zhang Q, Ge H, Zhou J, Yuan C, Chen K, Cheng B (2013) Single-row or double-row fixation technique for full-thickness rotator cuff tears: a meta-analysis. *Plos One* 8(7):e68515
- Rhee YG, Cho NS, Parke CS (2012) Arthroscopic rotator cuff repair using modified Mason-Allen medial row stitch: knotless versus knot-tying suture bridge technique. *Am J Sports Med* 40(11):2440–2447
- Srikumaran U, Huish EG Jr., Shi BY, Hannan CV, Ali I, Kilcoyne KG (2020) Anchorless arthroscopic transosseous and anchored arthroscopic transosseous equivalent rotator cuff repair show no differences in structural integrity or patient-reported outcomes in a matched cohort. *Clin Orthop Relat Res* 478(6):1295–1303
- Denard PJ, Burkhart SS (2013) The evolution of suture anchors in arthroscopic rotator cuff repair. *Arthroscopy* 29(9):1589–1595
- Tingart MJ, Apreleva M, Lehtinen J, Zurakowski D, Warner JJ (2004) Anchor design and bone mineral density affect the pull-out strength of suture anchors in rotator cuff repair: which anchors are best to use in patients with low bone quality? *Am J Sports Med* 32(6):1466–1473
- Barber FA, Herbert MA (2013) Cyclic loading biomechanical analysis of the pullout strengths of rotator cuff and glenoid anchors: 2013 update. *Arthroscopy* 29(5):832–844
- Mazzocca AD, Millett PJ, Guanche CA, Santangelo SA, Arciero RA (2005) Arthroscopic single-row versus double-row suture anchor rotator cuff repair. *Am J Sports Med* 33(12):1861–1868
- Barber FA, Herbert MA (2017) All-suture anchors: biomechanical analysis of pullout strength, displacement, and failure mode. *Arthroscopy* 33(6):1113–1121
- Mazzocca AD, Chowanec D, Cote MP, Fierra J, Apostolakis J, Nowak M et al (2012) Biomechanical evaluation of classic solid and novel all-soft suture anchors for glenoid labral repair. *Arthroscopy* 28(5):642–648
- Bernardoni ED, Frank RM, Veera SS, Waterman BR, Griffin JW, Shewman EF et al (2019) Biomechanical analysis of medial-row all-suture suture anchor fixation for rotator cuff repair in a pair-matched cadaveric model. *Arthroscopy* 35(5):1370–1376
- Pfeiffer FM, Smith MJ, Cook JL, Kuroki K (2014) The histologic and biomechanical response of two commercially available small glenoid anchors for use in labral repairs. *J Shoulder Elbow Surg* 23(8):1156–1161
- Cummins CA, Murrell GA (2003) Mode of failure for rotator cuff repair with suture anchors identified at revision surgery. *J Shoulder Elbow Surg* 12(2):128–133
- Bisson LJ, Manohar LM, Wilkins RD, Gurske-Deperio J, Ehrensberger MT (2008) Influence of suture material on the biomechanical behavior of suture-tendon specimens: a controlled study in bovine rotator cuff. *Am J Sports Med* 36(5):907–912
- Wieser K, Rahm S, Farshad M, Ek ET, Gerber C, Meyer DC (2013) Stitch positioning influences the suture hold in supraspinatus tendon repair. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21(7):1587–1592
- Williams JF, Patel SS, Baker DK, Schwertz JM, McGwin G, Ponce BA (2016) Abrasiveness of high-strength sutures used in rotator cuff surgery: are they all the same? *J Shoulder Elbow Surg* 25(1):142–148
- Gnandt RJ, Smith JL, Nguyen-Ta K, McDonald L, LeClere LE (2016) High-tensile strength tape versus high-tensile strength suture: a biomechanical study. *Arthroscopy* 32(2):356–363
- Leishman DJ, Chudik SC (2019) Suture tape with broad full-width core versus traditional round suture with round core: a mechanical comparison. *Arthroscopy* 35(8):2461–2466
- Owens BD, Algeri J, Liang V, DeFroda S (2019) Rotator cuff tendon tissue cut-through comparison between 2 high-tensile strength sutures. *J Shoulder Elbow Surg* 28(10):1897–1902
- Sun Y, Kwak JM, Kholinne E, Tan J, Koh KH, Jeon IH (2019) Nonabsorbable suture knot on the tendon affects rotator cuff healing: a comparative study of the knots on tendon and bone in a rat model of rotator cuff tear. *Am J Sports Med* 47(12):2809–2815