

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Klinik für Unfall-, Hand und Wiederherstellungschirurgie
der Westfälischen Wilhelms Universität Münster
– Direktor: Univ.- Prof. Dr. med. Michael J. Raschke–

Biomechanischer Vergleich der Primärstabilität von Achillessehnennähten nach
der Bunnell und Kessler Technik

INAUGURAL-DISSERTATION

zur
Erlangung des doctor medicinae

der Medizinischen Fakultät der
Westfälischen Wilhelms Universität Münster

vorgelegt von Haber, Axel Werner Gustav

aus Hamburg

2007

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Westfälischen Wilhelms Universität Münster

Dekan: Univ.- Prof. Dr. med. Volker Arolt

1.Berichterstatter: Priv. - Doz. Dr. med. Wolf Petersen

2.Berichterstatter: Prof. Dr. med. Georg Gosheger

Tag der mündlichen Prüfung: 06.06.07

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Institut für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie
der Westfälischen Wilhelms Universität Münster
– Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Michael J. Raschke –

Referent: Priv. Doz. Dr. med. Wolf Petersen
Coreferent: Univ. Prof. Dr. med. Georg Gosheger

Zusammenfassung

Biomechanischer Vergleich der Primärstabilität von Achillessehnennähten
nach der Bunnell und Kessler Technik
Axel Haber

Trotz der steigenden Inzidenz von Achillessehnenrupturen wird die adäquate operative Therapie noch immer kontrovers diskutiert.

In unserer in vitro Studie wurde die Primärstabilität zweier gängiger und häufig verwendeter Achillessehnennahttechniken, der Kessler und der Bunnell Naht, unter zyklischer Belastung und anschließender Maximalbelastung untersucht.

Wir verwendeten humane Achillessehen, die innerhalb von 24 Stunden post mortem gewonnen wurden. Diese wurden mit Hilfe einer uniaxialen Materialprüfmaschine zunächst zyklisch und anschließend bis zum Versagen der Naht belastet. Als Nahtmaterial diente für beide Gruppen 0,7 mm PDS Kordel. Während der zyklischen Belastung zeigte sich bei beiden Sehnennahttechniken kein signifikanter Unterschied in der Elongation. Bei der Belastung bis zum Versagen wies die Bunnell Naht mit einem Mittelwert von 255 N verglichen mit der Kessler Naht mit 192,8 N eine signifikant höhere Stabilität auf. Die Steifigkeit beider Sehnennähte unterschied sich nicht signifikant.

Der Versagensmodus war jeweils unterschiedlich, im Falle der Kessler Naht fand in allen Fällen ein Ausriss des Nahtmaterials aus der Sehne statt, während bei der Bunnell Naht bei allen untersuchten Sehnen das Nahtmaterial riss. Der typische Versagensmodus der Nahttechnik zeigt Hinweise auf die Möglichkeit einer Erhöhung der Bruchlast von Bunnell Nähten durch Verwendung eines stärkeren Nahtmaterials.

Aus den Messungen der Primärstabilität ergeben sich wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der noch immer kontrovers diskutierten Fragestellung der am besten geeigneten Nahttechnik bei Achillessehnennähten.

Tag der mündlichen Prüfung: 06.06.07

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|------------|---|---------------|
| 1 | Einleitung | - 1 - |
| 1.1 | Anatomie | - 1 - |
| 1.2 | Inzidenz | - 2 - |
| 1.3 | Diagnostik | - 2 - |
| 1.4 | Ätiologie | - 4 - |
| 1.5 | Behandlung | - 5 - |
| | 1.5.1 Die Kessler Naht | - 7 - |
| | 1.5.2 Die Bunnell Naht | - 8 - |
| 1.6 | Hypothese | - 10 - |
| 2 | Material und Methoden | - 11 - |
| 2.1 | Untersuchungsmaterialien | - 11 - |
| 2.2 | Präparation | - 11 - |
| 2.3 | Nahttechniken | - 14 - |
| 2.4 | Zugspannungsversuche | - 15 - |
| 2.5 | Statistik | - 17 - |
| 3 | Ergebnisse | - 18 - |
| 3.1 | Deskriptive Statistik | - 18 - |
| 3.2 | Zusammenfassung der Ergebnisse | - 24 - |
| 4 | Diskussion | - 25 - |
| 4.1 | Prüfung der Hypothese | - 25 - |
| 4.2 | Literaturvergleich | - 26 - |
| 4.3 | Einschränkungen und Methodenkritik | - 28 - |
| 4.4 | Klinische Relevanz | - 30 - |
| 4.5 | Fazit | - 32 - |

- Inhaltsverzeichnis -

| | | |
|----------|------------------------------|---------------|
| 5 | Abbildungsverzeichnis | - 34 - |
| 6 | Tabellenverzeichnis | - 35 - |
| 7 | Literaturverzeichnis | - 36 - |
| 8 | Lebenslauf | - 40 - |
| 9 | Danksagung | - 41 - |

1 Einleitung

1.1 Anatomie

Die Achillessehne ist, neben der Quadrizepssehne, die stärkste Sehne des menschlichen Körpers. Ihre Länge beträgt in der Regel zwischen 10-12 cm, der Durchmesser etwa einen halben bis einen Zentimeter. Sie wird aus Kollagenfaserbündeln und einer Grundsubstanz aus Mucopolysacchariden gebildet (33).

Sie bildet den gemeinsamen Ansatz des M. triceps surae, bestehend aus zwei Anteilen des M. gastrocnemius und dem M. soleus am Tuber calcanei. Proximal lassen sich die drei Sehnenportionen deutlich unterscheiden, distal verschmelzen sie miteinander und werden ca. 5-6 cm oberhalb des Ansatzes am Calcaneus zu einer homogenen Sehne (30).

Die Sehne ist, anders als bei anderen Sehnen, nicht von einer Sehnenscheide umgeben, sondern besitzt stattdessen ein Paratenon. Das Paratenon ist eine Struktur aus dünnem fibrösem Gewebe und spielt eine wichtige Rolle in der Blutversorgung der Achillessehne.



Abb. 1: Die Achillessehne mit Paratenon (oberhalb der Sonde)

1.2 Inzidenz

Die Ruptur der Achillessehne ist eine häufige Verletzung.

Ihre Inzidenz ist in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen insbesondere in einem Kollektiv sportlicher und aktiver Patienten (23, 33).

In dem von *Steinbrück* beobachteten Zeitraum von 1972-1997 wird über eine Inzidenz von 12:100.000 berichtet. Im Jahr 1996 lag die Gesamtzahl bei ca. 16.000 Fällen, damit ist die Achillessehnenruptur die häufigste Sehnenruptur im Sport. Sportarten, bei denen die Verletzung besonders häufig auftritt, sind Fußball (24,6%), Tennis (10,5%), Handball (7,7%), Volleyball (6,3%) und Badminton (4,9%) (32).

Personen männlichen Geschlechtes sind deutlich häufiger von einer spontanen Achillessehnenruptur betroffen, wobei sich insbesondere zwischen dem 3. und 5. Dezennium eine Häufung der Fälle findet (4, 11, 17).

Häufig treten Achillessehnenrupturen auch in Zusammenhang mit Gicht (14,3%) oder Steroidinjektionen (7,1%) auf (4).

1.3 Diagnostik

Patienten mit einer Achillessehnenruptur sind in der Regel gesunde, aktive und sportliche Individuen, die vor der Ruptur eher selten Schmerzen im Bereich des M. triceps surae oder der Ferse hatten (17).

Die klassische Symptomatik einer Achillessehnenruptur besteht in einem Schmerz über der Rissstelle, der Unterbrechung der Kontinuität, einer tastbaren Delle an der Rupturstelle, sowie einer kraftlosen Plantarflexion des Fußes. Die Achillessehne rupturiert in den meisten Fällen ca. 3 Querfinger oberhalb der Insertion am Calcaneus, an der Stelle, an der sie den geringsten Sehnenquerschnitt aufweist (11, 34).

Die Sonographie der Achillessehne und auch die Kernspintomographie sind als zuverlässiges Diagnostikum in der Erstdiagnostik, der dynamischen Erstuntersuchung und in der Verlaufskontrolle der Sehnenheilung zu sehen (34), jedoch gelten weiterhin die Anamnese und die klinische Untersuchung als der beste Weg eine Achillessehnenruptur zu diagnostizieren (23).

Der Test nach *Thompson* ist ein verlässliches Diagnosemittel einer Achillessehnenruptur. Hierbei wird die Wadenmuskulatur komprimiert, was normalerweise in einer passiven Plantarflexion des Fußes resultiert, die allerdings bei Vorliegen einer Achillessehnenruptur ausbleibt (11, 18, 36).

Einen weiteren Test stellt der von *O'Brien* 1984 beschriebene Nadelttest dar, bei dem perkutan eine Nadel proximal in die Achillessehne eingestochen wird. Bei einer passiven Plantarflexion des Fußes lässt sich im Falle einer erhaltenen Kontinuität eine Bewegung der Nadel nachweisen (26).

Das klinische und intraoperative Bild der typischen Achillessehnenruptur ist sehr gleichförmig. Aufgequollene und aufgelockerte Sehnenstrukturen mit mehr oder weniger ausgeprägten Blutungen als Ausdruck des Durchreißen der letzten Sehnenfasern bzw. des Peritendineums ergeben das klassische Bild. Demgegenüber stehen die unterschiedlichen Schweregrade der Sehnedegeneration bei den histologischen Befunden (11).



Abb. 2 : intraoperatives Bild einer Achillessehnenruptur

1.4 Ätiologie

Der Grund für die Ruptur der Achillessehne wird entweder einer Degeneration des Sehngewebes oder dem exzessiven Einwirken mechanischer Kräfte zugeschrieben (17).

Das oben als bevorzugt rupturierend beschriebene Sehnengebiet liegt in einem Grenzgebiet der arteriellen Versorgung, das darüber hinaus durch einen zunehmenden Kapillarschwund und fortschreitende Gefäßobliteration jenseits des 30. Lebensjahres gekennzeichnet ist (11, 24).

Man sieht deshalb zum einen in einer verminderten Durchblutung des Gewebes, als auch in einer übermäßigen, meist einseitigen Beanspruchung die Ursache für die degenerative Veränderung im Sehngleitgewebe (11). Insbesondere bei schnellen Kraftleistungen wird die Dehnbarkeit des Sehngewebes erschöpft, wobei äußere Faktoren, wie ungeeignetes Schuhwerk und harter Boden, vorzeitige Verschleißerscheinungen setzen (11).

Zu unterscheiden sind des weiteren rein traumatisch bedingte Achillessehnenrupturen von spontanen Sehnenrupturen, wobei sich die spontane Ruptur überwiegend bei Bagatellsituationen ereignet (11, 18). Bagatellsituationen als solche stellen beispielsweise das plötzliche Ausrutschen, Sprung über eine Hürde mit folgendem Sturz, Sturz nach vorne in Flexionsstellung des Kniegelenkes, Ausrutschen von einer Stufe, Verfehlen derselben oder der Tritt in eine nicht erkennbare Vertiefung dar (4).

Ursächlich liegen bei spontanen Achillessehnenrupturen fast immer degenerative Veränderungen unterschiedlichen Ausmaßes vor, wobei leichtere Degenerationsgrade überwiegen. Die degenerative Vorschädigung prädisponiert für kleinherdige Risse, die bindegewebig vernarben, wodurch die Belastbarkeit der Sehne zusätzlich eingeschränkt wird (11). Als wesentliche Ursache wird des Weiteren auch eine oft langjährige sportliche Betätigung der Patienten gesehen (11, 12). Bei Sportlern ist insbesondere das Sprungbein, d.h. bei Rechtsbeinern das linke und umgekehrt, rißgefährdet und es sind ebenfalls Mikrotraumata zu berücksichtigen, die als Narben die Sehne schwächen (11).

1.5 Behandlung

Die adäquate Behandlung der Achillessehnenruptur wird kontrovers diskutiert und es herrscht noch keine Einigkeit über die beste Behandlung (25).

Die Wahl der richtigen Behandlung hängt unter anderem von der körperlichen Aktivität und dem Alter des jeweiligen Patienten ab. Die meisten Operateure ziehen dabei das operative Vorgehen gerade bei jungen, aktiven Patienten vor (6, 7, 16, 18, 23).

Die konservative Therapie sollte für ältere Patienten reserviert sein, bei denen kein großer Vorteil durch eine Operation erzielt werden kann und diese zu hohe Risiken beinhaltet (39).

Die Hauptanliegen der operativen Behandlung von Achillessehnenrupturen liegen darin, die Sehnenstruktur in ihrer normalen Länge wiederherzustellen, mögliche Gewebeschäden zu reduzieren, die mechanische Stabilität an der Nahtstelle zu sichern und ein unmittelbares Bewegen des Fußes und des Knöchels (ohne Gewichtsbelastung) nach dem Eingriff zu gewährleisten (2, 24).

Während also gerade in der für diese Verletzung typischen Altersgruppe weitestgehend die operative Behandlung gegenüber der konservativen, immobilisierenden Behandlung einer Achillessehnenruptur favorisiert wird, werden die jeweiligen operativen Methoden, sowie die postoperative Behandlung teilweise kontrovers diskutiert (2).

Ist die Entscheidung zur operativen Versorgung getroffen worden, hat der Chirurg eine Vielzahl von Nahttechniken zur Auswahl. *Crolla et al.* fanden in einer Literaturübersicht 60 verschiedene, veröffentlichte Nahttechniken (10, 35). Die für unsere Studie ausgewählten Nahttechniken nach Kessler und Bunnell gehören zu den Standardnahttechniken in der operativen Versorgung der Achillessehnenruptur (38).

1.5.1 Die Kessler Naht

Bei der Naht nach Kessler handelt es sich um eine Rahmenspannaht, die im englischen Schrifttum als „grasping suture“, also „zupackende Naht“ bezeichnet wird. Durch den rechten Winkel im Verlauf der Naht innerhalb der Sehne bildet sie eine Schlaufe und greift dadurch einen Teil der Sehne (5, 20). Die Fixierung der Naht kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. In dieser Studie geschah sie gemäß der Modifikation durch Pennington mittels mehrerer gegenläufiger Knoten innerhalb der Schnittfläche (siehe Abbildung).

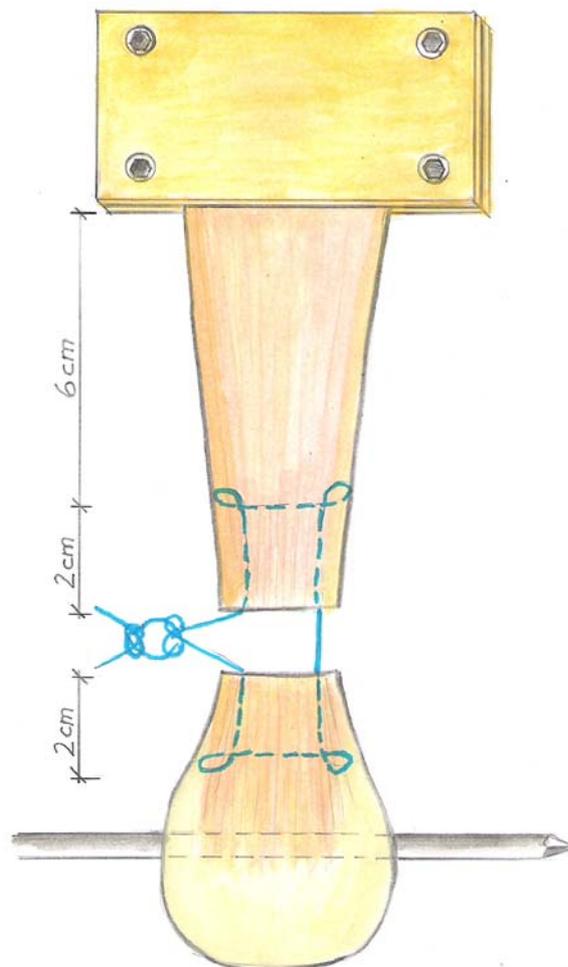


Abb.3: Die verwendete Kessler Naht

Vorteile der Kessler Naht sind die aufgrund des Fadenverlaufes verhältnismäßig unkomplizierte Durchführung der Nahttechnik und die ebenfalls dadurch bedingte mögliche Verwendung der Naht auch in perkutanen Techniken. Die beobachtete Sehnenstrangulation der Naht ist relativ gering. Nachteil ist ein häufig auftretendes Einschneiden des Nahtmaterials in die Sehne, dieses kann zum Ausreißen des Nahtmaterials aus der Sehne führen.

1.5.2 Die Bunnell Naht

Die Naht nach Bunnell ist eine Durchflechtungsnaht, die durch zickzackförmige Durchstechung der Sehne mit einem doppelt armierten Faden gekennzeichnet ist (13, 29).

Die Naht kann durch einen oder zwei Knoten entweder peripher oder innerhalb der Schnittfläche fixiert werden. Für unseren Versuchsaufbau verwendeten wir genau wie bei der Kessler Naht mehrere gegenläufigen Knoten innerhalb der Schnittfläche (siehe Abb. 4).

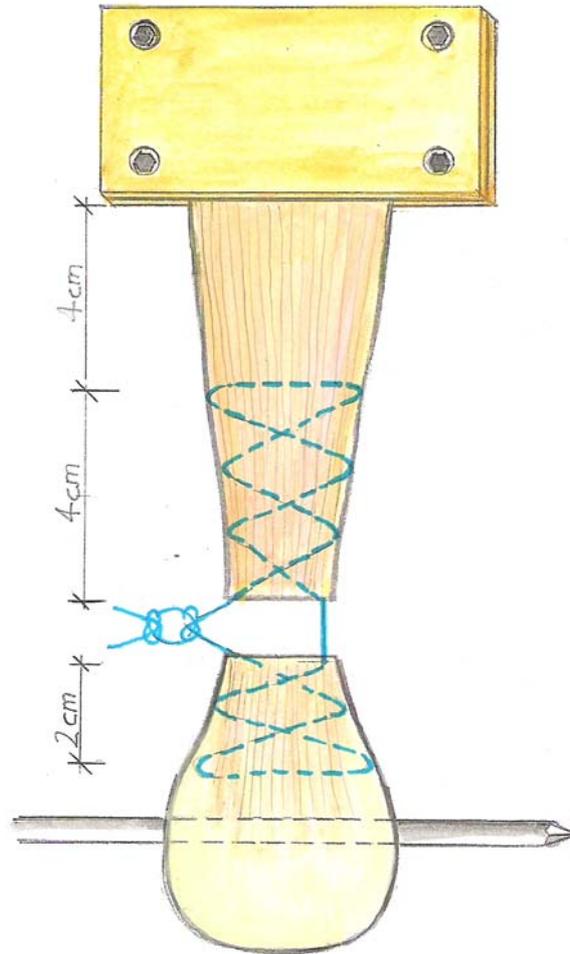


Abb. 4: Die verwendete Bunnell Naht

Die Bunnell Naht hat den Vorteil, dass Ausrisse des Nahtmaterials aus der Sehne aufgrund der Durchflechtung in der Regel nicht auftreten, als Nachteil ist jedoch die vermehrte Sehnenstrangulation und die relativ aufwendige Durchführung der Naht zu sehen. Der komplizierte Fadenverlauf mit Einhaltung der entsprechenden Winkel zum Verlauf der Sehnenstruktur erfordert außerdem einen entsprechend großen operativen Zugang.

1.6 Hypothese

Das Ziel der Studie ist, die Primärstabilität zweier im Falle einer offenen operativen Versorgung häufig durchgeführter Sehnennahttechniken zu vergleichen und damit die Frage zu beantworten, welche der Nahttechniken eine höhere Primärstabilität aufweist.

Die Primärstabilität spielt in der frühfunktionellen Behandlung eine wichtige Rolle. In unserer Studie entschieden wir, nicht nur die Kraft zu bestimmen, die zum Versagen einer Naht aufgebracht werden muss, sondern ebenfalls die Elongation und Steifigkeit unter zyklischer Belastung zu bestimmen. Dadurch versuchten wir die Belastung einer Sehnennaht unter frühfunktioneller Übungstherapie zu imitieren und Aussagen über die Stabilität während dieser Phase zu treffen.

Aufgrund der vermehrten Durchflechtung der Bunnell Naht stellten wir die Hypothese auf, dass die Bunnell Naht während der zyklischen Tests und der Test zur maximalen Versagenslast eine höhere Primärstabilität aufweisen wird als die relativ unkomplizierte Rahmenspannaht nach Kessler.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsmaterialien

Als Untersuchungsmaterial für die Studie wurden 24 (12 zusammengehörende Paare) menschliche Achillessehnen innerhalb von 24 Stunden post mortem gewonnen; das Alter der Körperspender lag zwischen 51 und 77 Jahren, das Durchschnittsalter betrug 69,9 Jahre.

Die Sehnen wurden nach der Gewinnung umgehend in mit NaCl getränkte Tücher gewickelt; um sie vor Austrocknung zu schützen. Anschließend wurden sie jeweils einzeln verpackt und bei -20°C eingefroren. Vor der anschließenden Präparation wurden die Sehnen bei Raumtemperatur langsam aufgetaut.

Woo et al. zeigten in einer Studie, dass das Einfrieren und anschließende Auftauen keine Auswirkungen auf die biomechanischen Eigenschaften einer Sehne hat (40). Auch während der Versuche wurden die Sehnen regelmäßig mit NaCl befeuchtet.

2.2 Präparation

Die Sehnen wurden zusammen mit dem hinteren Anteil des Calcaneus und des Beginns der Muskelbäuche des M. gastrocnemius und des M. soleus gewonnen. Danach fand die weitere Präparation statt, dazu wurden die Sehnen unter ständigem Befeuchten der Präparate von sämtlichem umgebenden Fett und Binde- und Muskelgewebe befreit.



Abb. 5: Achillessehne nach der Präparation mit Calcaneusanteil

Anschließend folgte das Einsetzen und die Fixierung des kranialen Teils der Sehne in speziell angefertigte Klemmen, so dass diese während der Zugversuche nicht aus der Haltevorrichtung herausrutschen konnte.

Der kaudale Teil der Sehne wurde dadurch fixiert, dass ein Steinman-Nagel von 4 mm Durchmesser durch den Calcaneus getrieben und anschließend in einer Haltevorrichtung fixiert wurde. Eine Abweichung des Bohrkanals von der Horizontalen konnte durch eine variable Befestigung des Steinman-Nagels in der Haltevorrichtung ausgeglichen werden.

Die Sehne wurde daraufhin in noch unversehrtem Zustand ohne Zuglast in die Materialprüfmaschine eingespannt, um einen korrekten Sitz der Haltevorrichtung zu kontrollieren, danach wurde die Sehne mitsamt der Haltevorrichtung wieder von der Maschine getrennt.

Das Auftreten von Rupturen der Achillessehne findet sich in den meisten Fällen im Bereich der Sehnentaille ca. 2-3 cm cranial des Ansatzes der Sehne am Calcaneus (1, 19).

Um diese zu simulieren führten wir eine standardisierte Tenotomie mit einem Skalpell jeweils ca. 2 cm cranial der Insertion am Calcaneus durch.

Die Gesamtlänge der Sehne wurde auf 10 cm vom Ansatz am Calcaneus bis zum Beginn der Haltevorrichtung eingestellt.



Abb.6: Achillessehne nach Tenotomie und Naht in der Haltevorrichtung der Materialprüfmaschine

2.3 Nahttechniken

Die jeweils linke und rechte Sehne wurden randomisiert einer Gruppe A oder B zugeordnet und danach mit 0,7 mm PDS (Polydioxanon) Kordel, einem geflochtenen resorbierbarem Nahtmaterial, genäht, die Gruppe A nach der Bunnell Technik und die Gruppe B nach der Kessler Technik.

Das gewählte Nahtmaterial ist eines der Standardnahtmaterialen in der Achillessehnenchirurgie und wurde bereits in anderen Studien verwendet (28).

Die Naht erfolgte unter Aufsicht eines Kollegen mit Erfahrung im Bereich der Sehnenchirurgie, um eine Lernkurve im Verlauf der Anwendung der Nahttechnik zu vermeiden. Die Naht geschah standardisiert und wurde mit jeweils vier Knoten versehen, die ersten beiden als chirurgischer Knoten gleichläufig, die nächsten beiden als einzelne Knoten in jeweils gegenläufiger Richtung.

Wir entschieden uns im Falle der Kessler Naht für die nach *Pennington* leicht modifizierte Version der Kessler Naht, bei der nur eine Seite der Naht mit chirurgischen Knoten versorgt wird. Diese Version der Kessler Naht wurde bereits in anderen biomechanischen Versuchen zur maximalen Last von Nahttechniken verwendet (31). Da Knoten häufig eine Schwachstelle in Nähten aufweisen und um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen, entschieden wir uns im Falle der Bunnell Naht ebenfalls an nur einer Stelle chirurgisch zu kneten.

2.4 Zugspannungsversuche

Als Materialprüfmaschine für die Zugspannungsversuche diente das von der Firma Lloyd Instruments aus Großbritannien entwickelte Modell LR-5 K Plus. Mit der Maschine wurde eine Zugspannung auf die zu prüfende Sehne ausgeübt, zunächst zyklisch und anschließend als Maximalkraft. Die daraus resultierende Elongation, Steifigkeit und maximale Last wurde mit Hilfe eines Computerprogramms (Nexygen, Ondio: Lloyd Instruments, Great Britain) aufgezeichnet. Der Versagensmodus wurde ebenfalls dokumentiert.

Um die notwendige Kraft zu bestimmen, belasteten wir zunächst zwei mit Nähten versorgte Sehnen bis zum Versagen. Die maximale Last lag bei durchschnittlich 231 N, wir entschieden uns daraufhin, die zur zyklischen Testung angewandte Kraft auf etwa ein Zehntel der Maximalkraft, also zwischen 5- 20 N, festzulegen. Die Belastung scheint der physiologischen Belastung während der frühfunktionalen Übungstherapie zu entsprechen, dieser Wert wurde von uns selbst festgelegt, da sich in der Literatur keine Studien zur zyklischen Belastung von humanen Achillessehnen fanden.

Nach erfolgter Naht wurden die präparierten, durchtrennten und mittels entsprechender Nahttechnik readaptierten Sehnen 1000 Zyklen lang von 5-20 N belastet. Die Geschwindigkeit mit der die Belastung stattfand betrug 200 mm/min. Im Anschluss an die zyklische Belastung erfolgte die Belastung der Naht bis zum Versagen.



Abb.7 : Die Materialprüfmaschine Lloyd LR5K plus

2.5 Statistik

Die gemessenen Daten wurden aufgezeichnet und anschließend mit Hilfe des Programms SPSS 13.0 ausgewertet.

Als Mittelwert bezeichnet man die Summe aller Messwerte einer Gruppe, dividiert durch die Anzahl der Messwerte, dieser wird auch als arithmetisches Mittel bezeichnet. Das Minimum und Maximum ist jeweils der tiefste bzw. höchste Wert einer Messreihe. Die Standardabweichung im Rahmen einer normalverteilten Grundgesamtheit bezeichnet den Bereich um den Mittelwert, in dem mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 % ein beliebiger Wert x der Messreihe liegt.

Mittels des Kolmogorow-Smirnov-Anpassungstestes wird überprüft, zu welchem Grad die Verteilung der Messwerte einer Verteilung im Sinne einer Gauß'schen Verteilungskurve, also einer Normalverteilung, entspricht.

Der dabei ermittelte p -Wert zeigt, ob die Messwerte einer Stichprobe aus Werten einer normalverteilten Grundgesamtheit entsprechen. Ein hoher p -Wert ($p > 0,05$) spricht für eine Normalverteilung, ist der p -Wert niedrig ($p < 0,05$), entspricht dies einer Irrtumswahrscheinlichkeit von über 5%, dieses deutet auf signifikantes Abweichen von der Normalverteilung hin.

Der T-Test dient zum Vergleich zweier unabhängiger Messreihen. Mit Hilfe dieses Testes wurden die Mittelwerte der Messreihen beider Nahttechniken nach Kessler und Bunnell verglichen.

Bei der Berechnung dieses Testverfahrens wird mit Hilfe des Levene- Tests der Varianzgleichheit berücksichtigt, ob die Streuungen beider Gruppen als gleich groß angenommen werden können oder nicht. Ein dabei ermittelte niedriger p -Wert ($p < 0,05$) spricht hier für einen signifikanten Unterschied beider Gruppen (14).

3 Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik

Während der Versuche haben sämtliche Nähte beider Prüfgruppen die gesamte zyklische Testung ohne Ruptur durchlaufen und wurden anschließend bis zum Versagen belastet.

Unterschieden wurde in den Versuchen also zwischen der Elongation unter zyklischer Belastung, der Steifigkeit und der Bruchlast.

Wir bestimmten zunächst die Elongation nach jeweils 10,100,500,750,1000. Zyklen in beiden Gruppen.

Die folgende Tabelle zeigt die Messergebnisse des zyklischen Belastungstests.

| | Elongation nach 10 Zyklen [mm] | Elongation nach 100 Zyklen [mm] | Elongation nach 500 Zyklen [mm] | Elongation nach 750 Zyklen [mm] | Elongation nach 1000 Zyklen [mm] |
|---------|---|--|--|--|---|
| Bunnell | 1,05 (+/-0,2) | 2,86 (+/-0,7) | 4,86 (+/-1,4) | 5,48 (+/-1,6) | 5,96 (+/-1,9) |
| Kessler | 1,25 (+/-0,3) | 3,29 (+/-1,2) | 4,95 (+/-1,7) | 5,33 (+/-1,8) | 5,58 (+/-1,8) |

Tabelle 1: Elongation nach zyklischer Belastung

Nachdem, wie im statistischen Teil erläutert, die Durchführung des Kolmogorov-Smirnov Testes eine Normalverteilung der Werte ergab und auch die Varianzgleichheit mittels des Levene- Testes bewiesen wurde, ergab der T-Test keinen signifikanten Unterschied in der Elongation ($p > 0,05$).

Der fortschreitend größer werdende Abstand zwischen den beiden Haltevorrichtungen lässt sich auch graphisch als Elongationskurve zeigen. Abbildung 3 zeigt einen typischen Verlauf der Elongationskurve, während der zyklischen Belastung.

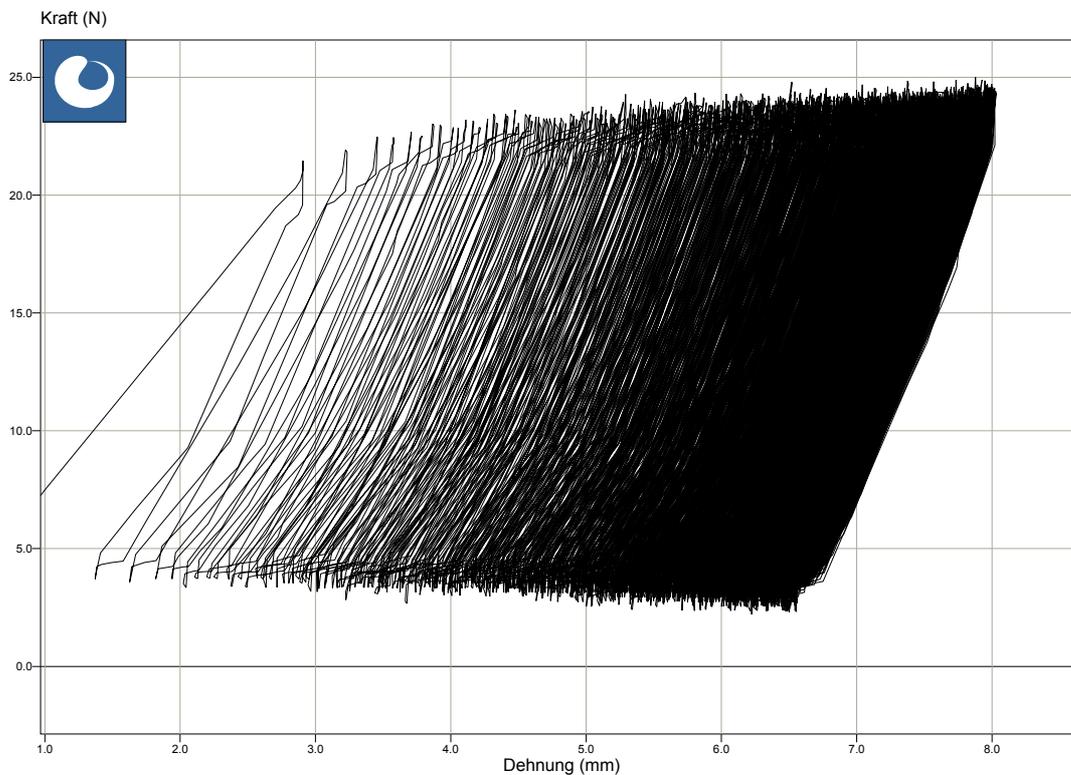


Abb.8: Typische Elongationskurve bei zyklischer Belastung

In der anschließenden Belastung bis zum Versagen der Naht wurden die Steifigkeit und die maximale Versagenslast des Konstrukts untersucht.

Die Steifigkeit ist definiert als die Steigung des linearen Kurvenabschnitts der Kraft- Elongationskurve. In diesem Bereich erfährt das Konstrukt eine elastische Verformung. Im Bereich der Steifigkeit zeigte der Levene- Test der Varianzgleichheit eine unterschiedlich große Varianz beider Messgruppen, daher wurde im weiteren Verlauf mit dem entsprechenden korrigierten Wert für den T-Test gerechnet. Die Steifigkeit ist in Tabelle 3 grafisch dargestellt, auch sie unterschied sich nicht signifikant.

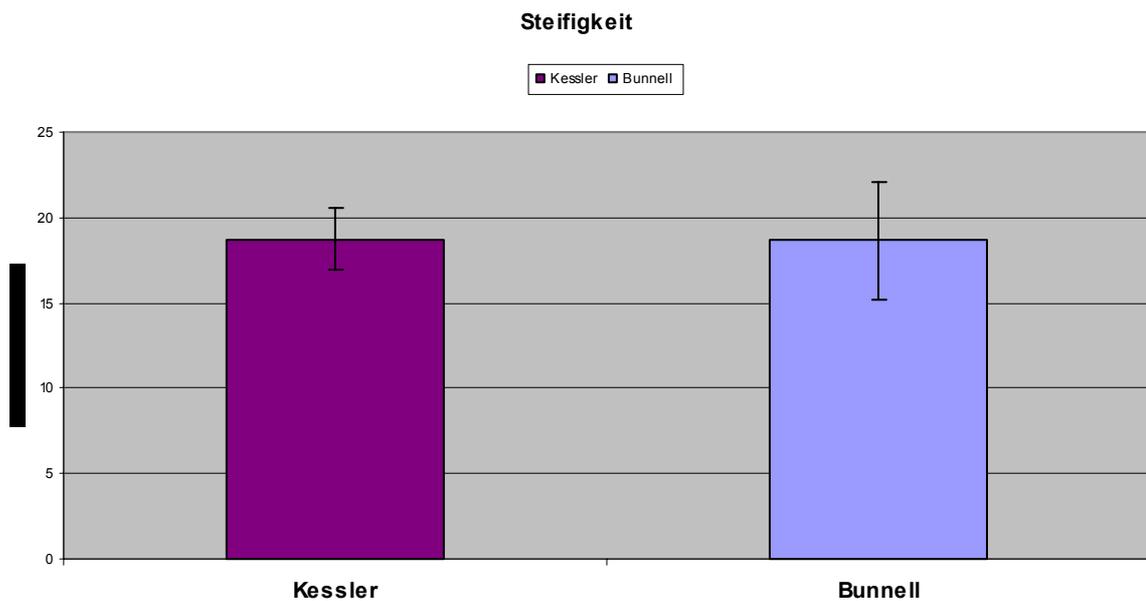


Tabelle 3: Steifigkeit

Bei dem Test zur maximalen Versagenslast zeigte die Naht nach der Gruppe B nach Bunnell mit einem Mittelwert von 255,0 N bei einer Standardabweichung von +/- 22,5 eine signifikant höhere maximale Last, als die Naht nach der Gruppe A nach Kessler mit einem Mittelwert von 192,8 N bei einer Standardabweichung von +/- 41,3.

Die maximale Versagenslast ist grafisch in Tabelle 2 dargestellt.

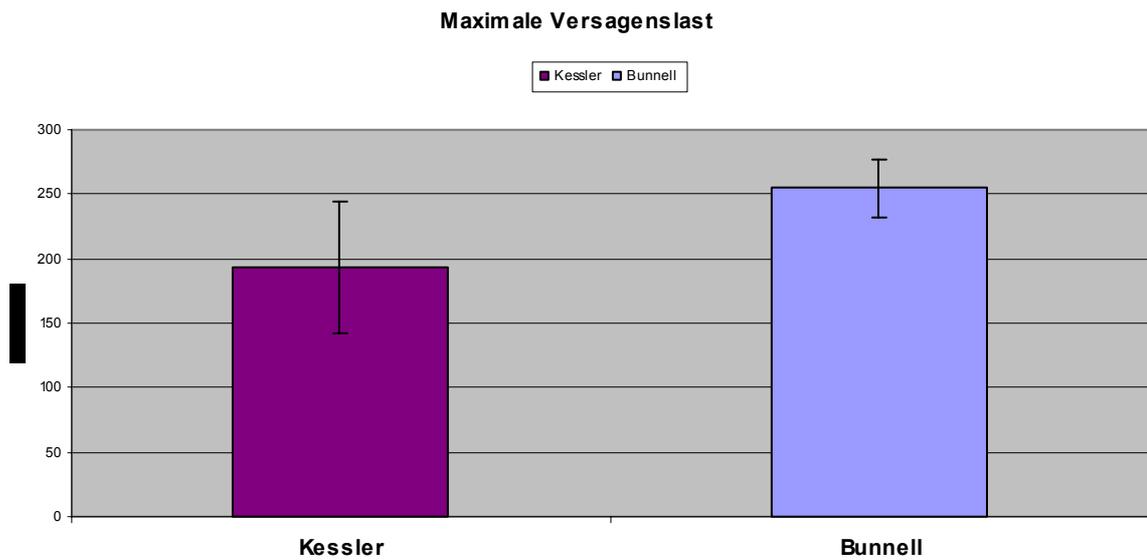


Tabelle 2: . Maximale Versagenslast

Das Ergebnis der gespeicherten Werte während der Bestimmung der Bruchlast lässt sich graphisch als Versagensmuster der beiden Nahttechniken darstellen. Der Versagensmodus war innerhalb der einzelnen Gruppen stets gleich, in der Kessler Gruppe riss regelmäßig das Nahtmaterial aus der Sehne heraus und bei der Bunnell Technik versagte stets das Nahtmaterial selbst.

Die typischen unterschiedlichen Versagensmuster beider Nähte sind in Abbildung 9 und 10 dargestellt.

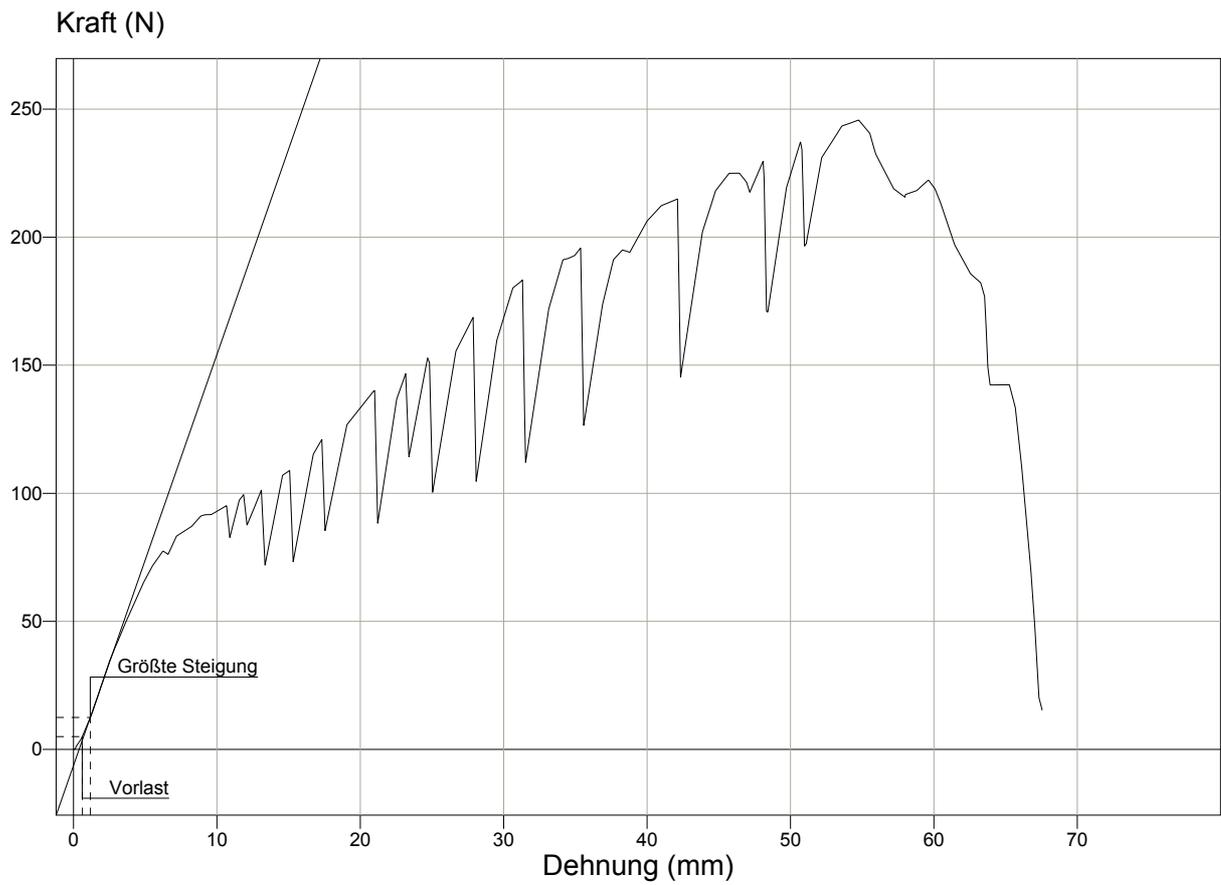


Abb. 9 Typisches Versagemuster bei maximaler Belastung Bunnell Naht, Versagen durch Riss des Nahtmaterials

Der sägezahnartige Verlauf der Versagenkurve im Falle der Bunnell Naht entspricht einer zunehmenden Sehnenstrangulation durch „Festziehen“ der einzelnen schräg durch die Sehnen ziehenden Nahtanteile.

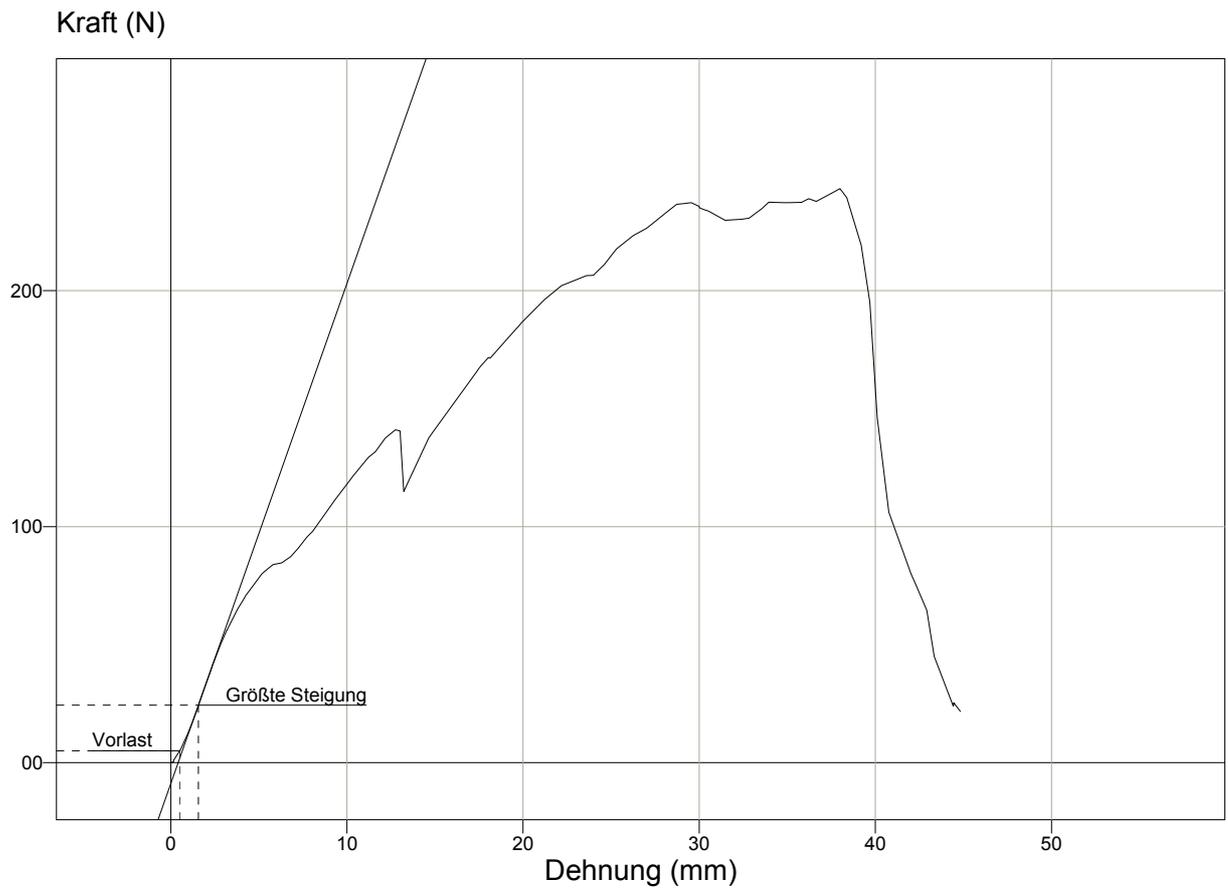


Abb. 10: typisches Versagensmuster bei maximaler Belastung Kessler Naht

Bei der Maximalbelastung zeigt sich eine fast lineare Dehnung, die dem langsamen Ausreißen der Naht aus der Sehne entspricht.

3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es ließen sich keine signifikanten Unterschiede der Elongation nach 10, 100, 500 und 1000 Zyklen zwischen Gruppe A, durch Kessler Nahttechnik readaptierten Sehnen. und Gruppe B, mittels Bunnell Nahttechnik versorgten Sehnen. nachweisen ($p > 0,05$).

Die Steifigkeit war in beiden Gruppen annähernd identisch mit 18,7 N/mm (+/- 1,85) in Gruppe A und 18,26 N/mm (+/- 3,46) in Gruppe B.

Die maximale Belastung lag in der Gruppe B (Bunnell) bei 255,0 N (+/- 22,5) und in der Gruppe A (Kessler) 192,8 N (+/- 41,3).

Dadurch ließ sich eine signifikant höhere Maximalbelastung für die Nahttechnik nach Bunnell nachweisen ($p < 0,05$).

Ein Unterschied beider Gruppen bestand im Versagensmodus. In jedem Fall einer mittels Kessler Naht versorgten Sehne der Gruppe A riss der intakte Faden aus der untersuchten Sehne heraus, während in Gruppe B, der Nahttechnik nach Bunnell, in allen Fällen das Nahtmaterial versagte.

Dadurch unterscheiden sich auch die Versagensmuster insofern, dass während man bei der Kessler Naht aufgrund des Ausrisses einen annähernd linearen Verlauf der Elongation während des Bruchlastversuches beobachtet, die Elongation bei der Bunnell Naht sägezahnartig verläuft, was für eine Sehnenstrangulation spricht.

4 Diskussion

4.1 Prüfung der Hypothese

Während der zyklischen Belastungstests, widerlegten wir teilweise die eingangs aufgestellte Hypothese, denn es ließ sich trotz der stärkeren Durchflechtung der Bunnell Naht kein signifikanter Unterschied beider Gruppen bezüglich der Elongation nachweisen. Lediglich im Bereich der Versagenslast der beiden Nahttechniken wies die Durchflechtungsnaht nach Bunnell tatsächlich eine signifikant höhere Stabilität auf.

Der Versagensmodus der jeweiligen Gruppen war konstant. Jede untersuchte Sehne der Gruppe A versagte aufgrund des Durchschneidens der Sehne durch das Nahtmaterial, in Gruppe B versagte das Nahtmaterial selbst. Die Verwendung eines stärkeren Nahtmaterials könnte die Maximallast der Bunnell Naht noch weiter verbessern.

Obwohl das Resultat der Sehnennaht zu einem großen Teil von der Primärstabilität abhängt, muss man in Betracht ziehen, welche Auswirkungen die Nahttechnik auf die Mikrozirkulation und somit auch auf die Wundheilung hat.

Wenn die Bunnell Nähte belastet werden, findet eine verglichen mit der Kessler Naht stärkere Sehnenstrangulation statt. Dadurch könnte die Mikrozirkulation negativ beeinflusst werden (3).

4.2 Literaturvergleich

Zur Untersuchung von Achillessehnennähten gibt es bereits eine große Anzahl an Studien, deren Großteil jedoch aus klinischen Arbeiten besteht, die keine Messungen der Primärstabilität beinhalten, sondern stattdessen die konservative Therapie mit der operativen Therapie oder die offene Operationstechnik mit der perkutanen vergleichen.

Es liegen verschiedene Studien zur Untersuchung der Primärstabilität mit Messung der jeweiligen Kräfte vor. Wir konnten jedoch keine Studie finden, in der eine zyklische Belastungsprüfung von Bunnell und Kessler Nähten vorgenommen wurde.

Watson et al. (1995) untersuchten die Primärstabilität von Bunnell und Kessler Nahttechniken in einem ähnlichen Versuchsaufbau und verglichen sie mit der locking loop Technik. Einer der wichtigsten Unterschiede zu unserer Studie besteht darin, dass in den erwähnten Versuchen keine zyklische Belastung stattfand, sondern lediglich Versuche zur Bruchlast. Als Nahtmaterial wurde in der Studie No 1 Ethibond verwendet, in allen Fällen versagte das Nahtmaterial. Die gemessenen Kräfte lagen mit einem Mittelwert von 85,24 N (Kessler) und 93,18 N (Bunnell) deutlich unter den in dieser Studie gemessenen Werten. Für die locking-loop Technik wurde ein Wert von 147,18 N bestimmt. Die Belastung verteilte sich hier jedoch auch auf vier Stränge der Naht, verglichen mit zwei in den beiden erstgenannten Techniken. Die einzige Schlussfolgerung, die man daraus ziehen kann, ist, dass vier Stränge eines Nahtmaterials stärker sind als zwei (38).

Yildirim et al (2002) verglichen die Ausreißkraft von Kessler, Bunnell und einer locking-loop Technik in einem Modell mit Achillessehnen von Schafen. Ähnlich unserer Studie wurde eine standardisierte Tenotomie durchgeführt, die Sehnen wurde anschließend mit Nr. 5 Ticron genäht und mit einer Materialprüfmaschine ebenfalls mit einer Geschwindigkeit von 20 mm pro

Minute bis zum Versagen belastet. In allen Fällen riss das Nahtmaterial aus der Sehne heraus. Es fand keine zyklische Belastung statt (41).

Ebenfalls Yildirim et al (2006) untersuchten die Haltekraft verschiedener Nahtmaterialien bei Verwendung der Kessler Nahttechnik bei standardisiert tenotomierten Schafsehnen und auch hier war der Versagensmodus stets das Ausreißen des Nahtmaterials aus der Sehne und, trotz verschiedener Nahtmaterialien, nicht das Versagen des Nahtmaterials selbst. (42)

In der jüngeren Literatur gewinnt die perkutane Operationstechnik eine immer größere Bedeutung (8, 22, 28).

Dieses hängt mit der durch Wundheilungsstörungen immer noch höheren Komplikationsrate der offenen Operation bei zugleich immer weiterentwickelten perkutanen Nahttechniken zusammen.

Zandbergen et al. (2005) verglichen in einer Studie mit humanen Sehnen im biomechanischen Modell die Bunnell Naht mit perkutanen Reparaturen, zum einem mit einem Calcaneustunnel und zum anderen mit einer Befestigung Mikroankern im Calcaneus. Das verwendete Nahtmaterial war Nr. 1 PDS in der offenen Technik und Nr.1 PDS II, oder Nr. 1 Panacryl bei den perkutanen Nähten. Der Versagensmodus war in den meisten Fällen ein Nahtriss und ein Ausriss der Befestigungsanker bei der Ankerfixation.

Die durchschnittliche Bruchlast lag von 166 N bis 211 N und zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den Messreihen. Die gemessenen Kräfte entsprechen in Ihrer Größenordnung den von uns gemessenen Ergebnissen, allerdings fand hier keine zyklische Belastung statt (43).

Auch nach intensiver Recherche fanden wir keine Studie, die die Primärstabilität von offenen Achillessehnennähten am menschlichen Modell unter zyklischer Belastung mit anschließender Maximalbelastung untersucht hat.

4.3 Einschränkungen und Methodenkritik

Für diese Studie benutzten wir menschliche Sehnen, die möglichst kurz post mortem entnommen wurden und sich geringfügig in Ihrem Durchmesser und Ihrer Länge unterschieden, je nach Alter und Ausprägung der Muskulatur des Spenders.

Um ein standardisiertes Ergebnis zu erzielen und um eine Vergleichbarkeit der Gruppen zu erreichen, führten wir die Versuche mit jeweils einem Sehnenpaar durch, die Zuordnung zur Gruppe A oder B erfolgte randomisiert.

Das Kollektiv der Sehnen bestand, ähnlich der Verteilung des realen Patientengutes, zu ca. 2/3 aus Sehnen männlicher Spender und zu 1/3 aus Sehnen weiblicher Spender. Vor der Verwendung der Sehnen wurden diese auf sichtbare entzündliche oder degenerative Veränderungen untersucht und gegebenenfalls aussortiert.

Obwohl Rinder- oder Schweinesehnen im Gegensatz zu menschlichen Sehnen in nahezu unbegrenzter Anzahl zur Verfügung stehen, entschieden wir uns für die Versuche humane Sehnen zu verwenden, da sie unserer Meinung nach für Untersuchungen, die Rückschlüsse auf Nähte an menschlichen Achillessehnen erlauben sollen, am besten geeignet sind.

Die Reproduktion einer Achillessehnenruptur *in vitro* ist nicht möglich, daher führten wir ca. 2 cm oberhalb des Ansatzes am Calcaneus eine standardisierte Tenotomie mit einem Skalpell durch. *Watson et al.* wählten ebenfalls eine standardisierte Tenotomie an dieser Stelle (15, 38).

In diesem Bereich befindet sich, wie oben erwähnt, die typische Lokalisation der Achillessehnenruptur (1, 19).

Die in dieser Studie gezeigten Ergebnisse lassen lediglich Rückschlüsse auf die Primärstabilität zu, für die Gesamtbeurteilung einer Naht spielen auch Faktoren, eine Rolle, die sich in vitro nicht reproduzieren lassen. Solche Faktoren sind beispielsweise die durch eine eventuelle Sehnenstrangulation herabgesetzte Durchblutung, die mechanische Belastung bei unzureichender Adaptation, Wundheilungsstörungen, sowie die Art der Mobilisierung.

Die Primärstabilität ist allerdings ein sehr wichtiges Glied in dieser Kette; ist sie ungenügend, ist die Versorgung insuffizient, unabhängig davon, wie positiv sich die anderen Faktoren auswirken könnten.

Es gestaltete sich als schwierig, die für die Versuche notwendigen Sehnen aus einem Kollektiv zu beschaffen, in dem das Alter der Körperspender dem Alter des für die Achillessehnenruptur typischen Patientenkollektivs entsprach. Wie eingangs erwähnt, liegt das typische Alter der Patienten mit dieser Verletzung zwischen dem 3. und 5. Dezennium, das Durchschnittsalter der Körperspender der untersuchten Sehnen betrug 69,9 Jahre.

Da dies jedoch für sämtliche Körperspender galt und auch immer jeweils ein Sehnenpaar auf beide Gruppen verteilt wurde, könnte das Alter der Sehnen zwar insgesamt einen Einfluss auf die erhobenen Messwerte haben, dürfte im Vergleich der Sehnen untereinander jedoch eine untergeordnete Rolle spielen.

4.4 Klinische Relevanz

Die Wahl der am besten geeigneten Nahttechnik bei Achillessehnenrupturen hängt zu einem großen Teil von der erwarteten Primärstabilität der jeweiligen Naht ab.

Die Bunnell und die Kessler Naht weisen unter zyklischer Belastung eine ähnliche Primärstabilität auf. Bei der Bunnell Naht beobachteten wir eine jedoch vermehrte Sehnenstrangulation und eine höhere Bruchlast.

Im Rahmen einer frühfunktionellen Mobilisierung, in der der Patient eine kontrollierte Belastung auf die Achillessehne ausübt, erscheinen die Nähte gleichwertig.

Die Bunnell Naht schützt bei Maximalbelastung länger vor Ausrissen des Nahtmaterials und könnte in Ihrer Stabilität durch stärkeres Nahtmaterial gegebenenfalls noch verbessert werden.

Ketchum et al. bezeichneten die Kessler und die Bunnell Naht zusammen mit der Mason Allan Naht als die stärksten Sehnennähte, je weniger strangulierend die Naht ist, desto schneller heilt die Sehne (21).

In unserem Versuch zeigte sich, dass die Kessler Naht in dem von uns getesteten Kräftebereich die gleiche Elongation aufweist wie die Bunnell Naht, bei kontrollierter Belastung könnte man also trotz einer höheren Bruchlast der Bunnell Naht der weniger strangulierenden Kessler Nahttechnik den Vorzug geben.

Die Kessler Naht bietet außerdem den Vorteil, dass sie aufgrund Ihres relativ unkomplizierten Fadenverlaufs auch für perkutane Nahttechniken geeignet ist.

Neuere Techniken wie zum Beispiel die endoskopisch assistierte perkutane Naht oder zusätzliche Inzisionen zur Darstellung und damit Schonung des N. suralis versuchen die Vorteile eines mikroinvasiven Zuganges mit denen eines offenen Zuganges zu kombinieren (22, 35).

Die Tendenz geht zu einer Nahttechnik, die versucht, die höhere Stabilität der offenen Nahttechniken und der damit verbundenen möglichen Frühmobilisierung, mit den mikroinvasiven Vorteilen einer perkutanen Naht unter Schonung des N. suralis zu vereinen (9).

4.5 Fazit

Die Achillessehnenruptur, von der insbesondere jüngere sportliche Patienten betroffen sind, ist die häufigste Sehnenruptur im Sport (23, 32, 33).

Bei ihrer Behandlung spielt die operative Therapie, verglichen mit der konservativen eine immer größere Rolle (6).

Obwohl gerade im Bereich der perkutanen Nahttechniken in den letzten Jahren eine große Entwicklung stattgefunden hat, die versucht, die Vorteile offener und perkutaner Techniken zu kombinieren, gibt es auch Indikationen zur Durchführung einer offenen Operation. Zu den Standardnahttechniken in der offenen Achillessehnenchirurgie zählen die Nahttechniken nach Bunnell und nach Kessler (37).

Die Primärstabilität verschiedener offener Achillessehnennähte wurde unseres Wissens nach noch nicht in biomechanischen Versuchen unter zyklischer Belastung untersucht. Sie stellt jedoch einen wichtigen Faktor in der Beurteilung verschiedener Nahttechniken der Achillessehne dar.

Wir führten diese Untersuchungen nach standardisierter Tenotomie und Anwendung der beiden oben genannten Nahttechniken durch, maßen Elongation, Steifigkeit und Bruchlast und verglichen die Ergebnisse.

In dem Kräftebereich von 5-20 N, der für unsere Versuche ausgewählt wurde, zeigten sich im Verlauf unserer zyklischen Belastungstestes keine signifikanten Unterschiede der Primärstabilität, bei den Versuchen bezüglich der Bruchlast, zeigte sich trotz vergleichbarer Steifigkeit eine signifikant höhere Bruchlast der Bunnell Naht. Auch der Versagensmodus war unterschiedlich, denn bei der Kessler Naht riss das Nahtmaterial aus der Sehnen heraus und bei der Bunnell Naht versagte das Nahtmaterial.

Aus den diesen Ergebnissen lassen sich therapeutische Konsequenzen ableiten.

Für die Entscheidung über die jeweils am besten geeignete Nahttechnik spielen unter anderem auch Faktoren wie das Alter des Patienten, der Zeitpunkt der Verletzung, die Mobilität, beziehungsweise sportliche Aktivität sowie die Compliance des Patienten eine Rolle.

Die von Bunnell beschriebene Nahttechnik weist eine verhältnismäßig gute Zugfestigkeit auf, vermindert das Auftreten einer Lücke im Rupturbereich und gewährleistet eine gute Adaptation der Sehnenenden (27).

Bei kontrollierter Belastung in einem Bereich von 5-20 N erreichen die Bunnell und die Kessler Naht eine ähnliche Primärstabilität. Bei Patienten, bei denen eine kontrollierte, niedrig dosierte Belastung sichergestellt ist, ist die einfach durchzuführende Kessler Naht eine gute Alternative, insbesondere wenn man Faktoren, wie die Sehnenstrangulation, mit in Betracht zieht.

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Achillessehne mit Paratenon

Abbildung 2: intraoperatives Bild einer Achillessehnenruptur

Abbildung 3: Die verwendete Kessler Naht

Abbildung 4: Die verwendete Bunnell Naht

Abbildung 5: Präparierte Achillessehne nach der Entnahme

Abbildung 6: Achillessehne nach Tenotomie und Naht in der Haltevorrichtung der Materialprüfmaschine

Abbildung 7: Die Prüfmaschine Lloyd LR5K plus

Abbildung 8: Typische Elongationskurve unter zyklischer Belastung

Abbildung 9: Typisches Versagensmuster Bunnell

Abbildung 10: Typisches Versagensmuster Kessler

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Elongation bei zyklischer Belastung

Tabelle 2: Balkendiagramm: Vergleich der Bruchlast

Tabelle 3: Balkendiagramm: Vergleich der Steifigkeit

7 Literaturverzeichnis

1. Arner O, and :, L. A. Histologic changes in subcutaneous ruptures of the Achilles tendon. *Acta Chir. Scand.* 116:484-490; 1959.
2. Assal M, Jung M, Stern R, Rippstein P, Delmi M, and P., H. Limited open repair of Achilles tendon ruptures. *J Bone Joint Surg Am* 84-A(2):161-70. ; 2002.
3. Bergljung, L. Vascular reaction after tendon suture and tendon transplantation: A stereomicrographic study on the calcaneal tendon of the rabbit. *Scand. J. Plast. Reconstr. Surg. Suppl* 4: 7-63; 1968.
4. Beskin, J. L., MD, Sanders, R. A., MD, Hunter, S. C., MD, and Hughston, J. C., MD Surgical repair of Achilles tendon ruptures. *The American Journal Sports Medicine* 15:1-8; 1987.
5. Bradley, J. P., Omodio, L. G., and Crider, J. R. Achilles tendon ruptures. Intraoperative techniques for repair. *Aorn J* 55:994-1008; 1992.
6. Cetti, R., Christensen, S. E., Ejsted, R., Jensen, N. M., and Jorgensen, U. Operative versus nonoperative treatment of Achilles tendon rupture. A prospective randomized study and review of the literature. *Am J Sports Med* 21:791-9; 1993.
7. Christensen, I. Rupture of the Achilles tendon; analysis of 57 cases. *Acta Chir Scand* 106:50-60; 1953.
8. Cretnik, A., Kosanovic, M., and Smrkolj, V. Percutaneous versus open repair of the ruptured Achilles tendon: a comparative study. *Am J Sports Med* 33:1369-79; 2005.
9. Cretnik, A., Zlajpah, L., Smrkolj, V., and Kosanovic, M. The strength of percutaneous methods of reair of the Achilles tendon: a biomechanical study. *Medicine & Science in Sports and Exercise* 32:16-20; 2000.
10. Crolla, R. M., van Leeuwen, D. M., van Ramshorst, B., and van der Werken, C. Acute rupture of the tendo calcaneus. Surgical repair with functional aftertreatment. *Acta Orthop Belg* 53:492-4; 1987.
11. Dederich R, Bonse H, Hild A, Konn G, and L., W. Achilles tendon rupture. Causes--surgical technic--results--problems with expert testimony. *Unfallchirurg* 91:259-269; 1988.

12. Fox JM, Blazina ME, Jobe FW, Kerlan RK, Carter VS, Shields CL Jr, and GJ., C. Degeneration and rupture of the Achilles tendon. Clin Orthop Relat Res. 107):221-4:221-4; 1975.
13. Hasday, C., Greenfield, J., Hansen, L., and Kaye, J. Achilles tendon rupture. A case report of percutaneous tendon repair. J Am Podiatr Med Assoc 77:596-600; 1987.
14. Heinecke, A., Hultsch, E., and Repges, R. Medizinische Biometrie: Springer Verlag; 1992.
15. Hockenbury RT, and JC, J. A biomechanical in vitro comparison of open versus percutaneous repair of tendon Achilles. Foot ankle int 11:0198-0211; 1990.
16. Hogsaa, B., Nohr, M., Lass, P., and Kaalund, S. Surgical treatment of Achilles tendon ruptures. Unfallchirurg 93:40-3; 1990.
17. Inglis, A. E., Scott, W. N., Sculco, T. P., and Patterson, A. H. Ruptures of the tendo achillis. An objective assessment of surgical and non-surgical treatment. J Bone Joint Surg Am 58:990-3; 1976.
18. Inglis, A. E., and Sculco, T. P. Surgical repair of ruptures of the tendo Achillis. Clin Orthop Relat Res:160-9; 1981.
19. Kannus P, and ., J. L. Histopathological changes preceding spontaneous rupture f a tendon: a controlled study of 891 patients. J. Bone Joint Surg Am 73:507-25. ; 1991.
20. Kessler, I. The "grasping" technique for tendon repair. Hand 5:253-5; 1973.
21. Ketchum, L. D. Suture materials and suture techniques used in tendon repair. Hand Clin 1:43-53; 1985.
22. Majewski, M., Rohrbach, M., Czaja, S., and Ochsner, P. Avoiding sural nerve injuries during percutaneous Achilles tendon repair. Am J Sports Med 34:793-8; 2006.
23. Majewski, M., Widmer, K. H., and Steinbruck, K. [Achilles tendon ruptures: 25 year's experience in sport-orthopedic treatment]. Sportverletz Sportschaden 16:167-73; 2002.
24. Motta, P., Errichiello, C., and Pontini, I. Achilles tendon rupture. A new technique for easy surgical repair and immediate movement of the ankle and foot. Am J Sports Med 25:172-6; 1997.

25. Nyssonen, T., and Luthje, P. Achilles tendon ruptures in South-East Finland between 1986-1996, with special reference to epidemiology, complications of surgery and hospital costs. *Ann Chir Gynaecol* 89:53-7; 2000.
26. O'Brien, T. The needle test for complete rupture of the Achilles tendon. *J Bone Joint Surg Am* 66:1099-101; 1984.
27. Park HG, Moon DH, and JM, Y. Limited open repair of ruptured Achilles tendon with Bunnell-Type Sutures. *Foot and Ankle Int.* 22:985-987; 2001.
28. Riedl, S., Sandberger, L., Nitschmann, K., and Meeder, P. J. [Suture of fresh Achilles tendon rupture. Comparison of open with percutaneous suture technique]. *Chirurg* 73:607-14; 2002.
29. Rowley, D. I., and Scotland, T. R. Rupture of the Achilles tendon treated by a simple operative procedure. *Injury* 14:252-4; 1982.
30. Segesser, B., Goesele, A., and Reneggli, P. The Achilles tendon in sports. *Orthopäde.* June 24:252-67; 1995.
31. Shaieb, M. D., and Singer, D. I. Tensile strengths of various suture techniques. *J Hand Surg [Br]* 22:764-7; 1997.
32. Steinbruck, K. [Epidemiology of sports injuries--25-year-analysis of sports orthopedic-traumatologic ambulatory care]. *Sportverletz Sportschaden* 13:38-52; 1999.
33. Thermann, H. Die Behandlung der Achillessehnenruptur. *Unfallchirurg* 101:299-314; 1998.
34. Thermann, H., Zwipp, H., and Tscherne, H. Funktionelles Behandlungskonzept der frischen Achillessehnenruptur. *Unfallchirurg* 98:21-32; 1995.
35. Thermann H., Tibesku C.O., Mastrokalos D.S., and H.H., P. Endoskopisch assistierte perkutane Achillessehennaht. *Unfallchirurg* 104:1020-1021; 2001.
36. Thompson, T. C., and Doherty, J. H. Spontaneous rupture of tendon of Achilles: a new clinical diagnostic test. *J Trauma* 2:126-9; 1962.
37. Watson, T., Jurist, K., Yang , K., and Shen, K. The strength of Achilles tendon repair: an in vitro study of the biomechanical behaviour in human cadaver tendons. *Foot and Ankle International* 16: 91-95; 1995.

38. Watson TW, Jurist KA, Yang KH, and Shen, KL, The strength of Achilles tendon repair: an in vitro study of the biomechanical behaviour in human cadaver tendons. *Foot and Ankle International* 16: 91-95; 1995.
39. Wong, J., Barrass, V., and Maffulli, N. Quantitative review of operative and nonoperative management of achilles tendon ruptures. *Am J Sports Med* 30:565-75; 2002.
40. Woo, S., Orlando, C., Camp, J., and Akeson, W. Effects of postmortem storage by freezing on ligament tensile behavior. *J Biomech* 19:399-404; 1986.
41. Yildirim, Y., and Esemeli, T. Initial pull-out strength of tendon sutures: an in vitro study in sheep Achilles tendon. *Foot Ankle Int* 23:1126-30; 2002.
42. Yildirim, Y., Kara, H., Cabukoglu, C., and Esemeli, T. Suture holding capacity of the Achilles tendon during the healing period: an in vivo experimental study in rabbits. *Foot Ankle Int* 27:121-4; 2006.
43. Zandbergen, R. A., de Boer, S. F., Swierstra, B. A., Day, J., Kleinrensink, G. J., and Beumer, A. Surgical treatment of achilles tendon rupture: examination of strength of 3 types of suture techniques in a cadaver model. *Acta Orthop* 76:408-11; 2005.

8 Lebenslauf

Name: Axel Werner Gustav Haber

Geburtsdatum: 2. Dezember 1976

Geburtsort: Hamburg

Familienstand: ledig

Staatsangehörigkeit: deutsch

Eltern: Friedrich Kurt Wolfgang Haber
Gabriele Haber (geb. Frühauf)

Geschwister: Dr. Juliane Stüven (geb. Haber)

Schulausbildung: 1982- 1986 Grundschule Schilksee
1986- 1996 Gymnasium Hebbelschule Kiel
1996 Abschluss Abitur

Berufsausbildung: 1998- 2004 Medizinstudium CAU Kiel
09/2003-04/2004 PJ University of Capetown
seit 05/2004 wissenschaftliche Hilfskraft im
Biomechaniklabor des Universitätsklinikums Münster
12/2004 Abschluss Studium 3. Staatsexamen

Beruf: 12/04- 06/2005 Assistenzarzt
Bundeswehrkrankenhaus Hamburg Abteilung
Unfallchirurgie,
seit 07/2005 Assistenzarzt Bundeswehrkrankenhaus
Hamburg Abteilung Hals-Nasen-Ohrenheilkunde

9 Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Michael J. Raschke danke ich für die zur Verfügung Stellung der Einrichtungen des biomechanischen Labors und die gute Betreuung.

Bei Herrn Priv. - Doz. Dr. med. Wolf Petersen bedanke ich mich für die Überlassung des Themas und seine gute Betreuung und Erreichbarkeit, bei Herrn Dr. med. Thore Zantop für die Hilfe bei der Durchführung der Sehnennähte, die Hilfe bei Interpretation der Ergebnisse und die hilfreichen Diskussionen. Bei Herrn Mirco Herbort für und viele hilfreiche Tipps zur Erstellung der Arbeit und für seine ständige Erreichbarkeit.

Bei Herrn Jan Sohnsmeier bedanke ich mich für seine Ratschläge bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse.

Meinem Chefarzt, Flottenarzt Dr. med. Lothar Gramer, danke ich, da er mir durch die zahlreichen Freistellungen vom Dienst ermöglicht hat, die Dissertation auch während meiner Tätigkeit im Bundeswehrkrankenhaus Hamburg im Biomechaniklabor des Universitätsklinikums Münster fertig zu stellen.

Weiterhin möchte ich meinem guten Freund und Kollegen Tim Kleffner danken, der mich während der Zeit in Münster unterstützt hat und mir die Arbeit in einer anderen Stadt auf diese Weise erleichtert hat.

Zum Schluss möchte ich meinen Eltern danken, sie haben mich jederzeit und in allen meinen Vorhaben unterstützt, ich kann mich immer auf sie verlassen.