

Aus der
Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen
Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
Sektion Sporttraumatologie und arthroskopische Chirurgie

**Biomechanischer Vergleich im zyklischen Zugversuch
Augmentierte Nahttechniken bei Achillessehnenrupturen
im ex vivo Schweinemodell**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Benignus, Christian Boris

2023

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. A. Ateschrang

2. Berichterstatter: Professor Dr. C. Thiel

Tag der Disputation: 15.12.2023

meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
1 Einleitung	11
1.1 Anatomie und Biomechanik	11
1.1.1 Anatomie	11
1.1.2 Biomechanik.....	14
1.2 Akute Achillessehnenruptur	16
1.2.1 Epidemiologie	17
1.2.2 Ätiologie und Pathogenese	18
1.2.3 Diagnostik	20
1.2.4 Therapie.....	22
1.2.5 Rehabilitation	30
1.3 Forschungsfrage.....	32
2 Material und Methoden	34
2.1 Methoden	34
2.1.1 Auswahl und Beschreibung der Nahttechniken.....	34
2.1.2 Auswahl des Testverfahren	36
2.1.3 Auswahl der Testkriterien	37
2.2 Material.....	37
2.2.1 Präparate	38
2.2.2 Prüfmaschinen	40
2.2.3 Nahtmaterial	43
2.3 Durchführung und Dokumentation	44
2.3.1 Durchführung	44
2.3.2 Dokumentation	46
2.4 Auswertung.....	46
2.4.1 Zielgrößen	47
2.4.2 Signifikanzniveau und Power	47
2.4.3 Normalverteilung.....	47
2.4.4 Signifikanztest	47

2.4.5	Zuordnung der Präparate und Fallzahlplanung	48
2.4.6	Vorversuche.....	48
3	Ergebnisse	57
3.1	Deskriptive Statistik.....	57
3.1.1	Zykluszahl bei initialer Spaltbildung.....	57
3.1.2	Zykluszahl bei 3 mm Spaltbildung.....	58
3.1.3	Zykluszahl bei 5 mm Spaltbildung.....	59
3.1.4	Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen innerhalb der ersten Serie.....	60
3.1.5	Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen innerhalb der zweiten Serie.....	62
3.1.6	Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen innerhalb der dritten Serie.....	64
3.1.7	Querschnittsfläche A	64
3.1.8	Überleben	65
3.2	Schließende Statistik.....	68
3.2.1	Test auf Normalverteilung.....	68
3.2.2	Signifikanztest	70
3.3	Ergebnis	74
4	Diskussion	75
5	Zusammenfassung.....	92
6	Literaturverzeichnis.....	94
7	Erklärung zum Eigenanteil	102
8	Lebenslauf.....	103
9	Danksagung	104
10	Anhang	105
10.1	Messwerte	105
10.2	Histogramme.....	110
10.3	Deskriptive Statistik.....	116

Abkürzungsverzeichnis

95 % KI	95 % Konfidenzintervall
A	Querschnittsfläche
A.	Arteria
Abb.	Abbildung
Art.	Articulatio
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
c	Zykluszahl (Anzahl der Zyklen)
cm	Zentimeter
d	Dehiszenz
df	degrees of freedom (deutsch: Anzahl der Freiheitsgrade)
f	Frequenz
F	Kraft
Fa.	Firma
FL	Florida
F _{min}	Minimalkraft
F _{max}	Maximalkraft
geb.	geboren
h	hour (deutsch: Stunde)
Hz	Hertz
IQR	interquartile range (deutsch: Interquartilsabstand)
LBMK	locking block modified Krackow
M.	Musculus
m	Meter
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
MPa	Megapascal
MRT	Magnetresonanztomographie
N	Newton

n	Anzahl
N.	Nervus
NJ	New Jersey
Nr.	Nummer
NY	New York
Pa	Pascal
PARS	Percutaneous Achilles Repair System
Q1	25 % Quartil
Q3	75% Quartil
s	Weg
SD	standard deviation (deutsch: Standardabweichung)
SH	Small Half
Tab.	Tabelle
UHMWPE	Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene
USA	United States of America (deutsch: Vereinigte Staaten von Amerika)
USP	United States Pharmacopoe

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1.1:* Darstellung der Muskulatur des Unterschenkels von lateral
- Abbildung 1.2:* Darstellung der Muskulatur des Unterschenkels von posterior
- Abbildung 1.3:* Kraft-Elongations-Diagramm bei einem Zugversuch
- Abbildung 1.4:* Schematische Darstellung verschiedener offen-chirurgischer Nahttechniken
- Abbildung 2.1:* Krackow-Nahttechnik
- Abbildung 2.2:* Bunnell-Nahttechnik
- Abbildung 2.3:* Präparation der tiefen Beugesehne
- Abbildung 2.4:* Materialprüfmaschine ZwickiLine Z2.5
- Abbildung 2.5:* Eingespannte Sehne
- Abbildung 2.6:* Optisches Messsystem PONTOS 5M
- Abbildung 2.7:* Fibertape®
- Abbildung 2.8:* Graphische Darstellung des zyklischen Testprotokolls
- Abbildung 2.9:* Box-Plot der gemessenen Werte für die initiale Spaltbildung in den Vorversuchen
- Abbildung 2.10:* Box-Plot der gemessenen Werte für die 3 mm Spaltbildung in den Vorversuchen
- Abbildung 2.11:* Box-Plot der gemessenen Werte für die 5 mm Spaltbildung in den Vorversuchen
- Abbildung 2.12:* Box-Plot der gemessenen Werte der Querschnittsflächen der verschiedenen Nahtgruppen in den Vorversuchen
- Abbildung 3.1:* Box-Plot der gemessenen Werte für die initiale Spaltbildung in den Hauptversuchen
- Abbildung 3.2:* Box-Plot der gemessenen Werte für die 3 mm Spaltbildung in den Hauptversuchen
- Abbildung 3.3:* Box-Plot der gemessenen Werte für die 5 mm Spaltbildung in den Hauptversuchen
- Abbildung 3.4:* Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 200. Zyklus der ersten Serie
- Abbildung 3.5:* Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 250. Zyklus der ersten Serie
- Abbildung 3.6:* Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 200. Zyklus der zweiten Serie
- Abbildung 3.7:* Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 250. Zyklus der zweiten Serie
- Abbildung 3.8:* Box-Plot der gemessenen Werte der Querschnittsflächen A [mm²]
- Abbildung 3.9:* Kaplan-Meier-Überlebensfunktion für c_{initial}
- Abbildung 3.10:* Kaplan-Meier-Überlebensfunktion für $c_{3\text{mm}}$
- Abbildung 3.11:* Kaplan-Meier-Überlebensfunktion für $c_{5\text{mm}}$
- Abbildung 10.1:* Histogramme der verschiedenen Techniken der Vorversuche bei initialer Spaltbildung
- Abbildung 10.2:* Histogramme der verschiedenen Techniken der Vorversuche bei 3 mm Spaltbildung
- Abbildung 10.3:* Histogramme der verschiedenen Techniken der Vorversuche bei 5 mm Spaltbildung

- Abbildung 10.4:* Histogramme der Querschnittsflächen A [mm^2] der Sehnen in den Vorversuchen
- Abbildung 10.5:* Histogramme der gemessenen Werte der Hauptversuche bei initialer Spaltbildung
- Abbildung 10.6:* Histogramme der gemessenen Werte der Hauptversuche bei 3 mm Spaltbildung
- Abbildung 10.7:* Histogramme der gemessenen Werte der Hauptversuche bei 5 mm Spaltbildung
- Abbildung 10.8:* Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 200. Zyklus in der ersten Serie
- Abbildung 10.9:* Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 250. Zyklus in der ersten Serie
- Abbildung 10.10:* Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 200. Zyklus in der zweiten Serie
- Abbildung 10.11:* Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 250. Zyklus in der zweiten Serie
- Abbildung 10.12:* Histogramme der Querschnittsflächen A [mm^2] der Sehnen in den Hauptversuchen

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 2.1:* Minima und Maxima der jeweiligen Testserie
- Tabelle 2.2:* Akquirierte Bilder der PONTOS 5M
- Tabelle 2.3:* Test auf Normalverteilung für c_{initial} , $c_{3\text{mm}}$ und $c_{5\text{mm}}$ in den Vorversuchen
- Tabelle 2.4:* Vergleich der Krackow- und modifizierten Bunnell-Nahttechnik in den Vorversuchen
- Tabelle 2.5:* Vergleich der modifizierten Krackow- und modifizierten Bunnell-Nahttechnik in den Vorversuchen
- Tabelle 2.6:* Test auf Normalverteilung für die Querschnittsfläche A [mm^2] in den Vorversuchen
- Tabelle 3.1:* Test auf Normalverteilung für c_{initial} , $c_{3\text{mm}}$ und $c_{5\text{mm}}$ in den Hauptversuchen
- Tabelle 3.2:* Test auf Normalverteilung für den 200. und 250. Zyklus der ersten und zweiten Serie in den Hauptversuchen
- Tabelle 3.3:* Test auf Normalverteilung für die Querschnittsfläche A [mm^2] in den Hauptversuchen
- Tabelle 3.4:* Mann-Whitney-U-Test für die Zykluszahl bei initialer Spaltbildung
- Tabelle 3.5:* Mann-Whitney-U-Test für die Zykluszahl bei 3 mm Spaltbildung
- Tabelle 3.6:* Mann-Whitney-U-Test für die Zykluszahl bei 5 mm Spaltbildung
- Tabelle 3.7:* Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 200 Zyklen in der ersten Serie
- Tabelle 3.8:* Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 250 Zyklen in der ersten Serie
- Tabelle 3.9:* Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 200 Zyklen in der zweiten Serie
- Tabelle 3.10:* Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 250 Zyklen in der zweiten Serie
- Tabelle 4.1:* Zusammenfassung der zyklischen Studien
- Tabelle 10.1:* Messwerte der Vorversuche
- Tabelle 10.2:* Messwerte der Hauptversuche
- Tabelle 10.3:* Deskriptive Statistik der verschiedenen Nahttechniken bei c_{initial} , $c_{3\text{mm}}$ und $c_{5\text{mm}}$ in den Vorversuchen
- Tabelle 10.4:* Power, Effektstärke sowie errechnete Gruppengröße bei c_{initial} , $c_{3\text{mm}}$ und $c_{5\text{mm}}$ in den Vorversuchen von Krackow und Bunnell + Z-Nähte im Vergleich
- Tabelle 10.5:* Power, Effektstärke sowie errechnete Gruppengröße bei c_{initial} , $c_{3\text{mm}}$ und $c_{5\text{mm}}$ in den Vorversuchen von Krackow + Z und Bunnell + Z im Vergleich
- Tabelle 10.6:* Querschnittsflächen A [mm^2] der Sehnen in den Vorversuchen pro Nahttechnik
- Tabelle 10.7:* Deskriptive Statistik von c_{initial} , $c_{3\text{mm}}$ und $c_{5\text{mm}}$ in den Hauptversuchen
- Tabelle 10.8:* Deskriptive Statistik der Dehiszenz d in der ersten Serie
- Tabelle 10.9:* Deskriptive Statistik der Dehiszenz d in der zweiten Serie
- Tabelle 10.10:* Querschnittsflächen A [mm^2] der Sehnen in den Hauptversuchen pro Nahttechnik
- Tabelle 10.11:* Power und Effektstärke c_{initial} , $c_{3\text{mm}}$ und $c_{5\text{mm}}$ in den Hauptversuchen

1 Einleitung

1.1 Anatomie und Biomechanik

Um die Vorgänge, die zu einem Riss der Achillessehne führen, besser verstehen zu können, stellen die Kenntnisse der Anatomie und Biomechanik einer intakten Achillessehne die notwendige Grundlage dar.

1.1.1 Anatomie

Tibia (Schienbein) und Fibula (Wadenbein) sind die beiden Knochen des Unterschenkels, die proximal über ein unbewegliches Gelenk (Amphiarthrose) – das Art. tibiofibularis – sowie distal über die Syndesmosis tibiofibularis verbunden sind. Die Tibia artikuliert proximal mit den Kondylen des Femurs im Kniegelenk. Die Fibula ist daran nicht beteiligt. Im restlichen Unterschenkelbereich werden Tibia und Fibula durch die Membrana interossea verbunden. Distal bildet die Tibia den Malleolus medialis und die Fibula den Malleolus lateralis, die zusammen mit dem Talus das obere Sprunggelenk bilden. Das untere Sprunggelenk teilt sich in ein vorderes und hinteres Teilgelenk, woran Talus, Calcaneus und Os naviculare beteiligt sind [1].

Die Achillessehne, die anatomisch auch als Tendo calcanei bezeichnet wird, ist die stärkste und längste Sehne im menschlichen Körper. Sie entsteht aus dem Zusammenschluss der Fasern der beiden Köpfe des M. gastrocnemius und des M. soleus, zusätzlich strahlen kleinere Fasern des M. plantaris ein [2]. Der mediale Kopf des M. gastrocnemius entspringt am medialen sowie der laterale Kopf am lateralen Epicondylus des Femurs (siehe *Abbildung 1.2*). In der Mitte der Wade treffen sich beide Köpfe und bilden eine Aponeurose, die distal ebenfalls einen Teil der Achillessehne bildet [3]. Der M. soleus liegt vor den beiden Köpfe des M. gastrocnemius (siehe *Abbildung 1.1*) und entspringt an der proximalen Dorsalseite der Fibula von Kopf und Hals sowie der Linea musculi solei der Tibia und dem Arcus tendineus solei [1]. M. gastrocnemius und M. soleus werden gemeinsam auch als M. triceps surae bezeichnet. Der M. plantaris, der in 6 - 8 % der Fälle gar nicht angelegt ist [2], entspringt etwas proximal des lateralen Kopfes des M. gastrocnemius am lateralen Epicondylus des Femurs. Gemeinsam bilden sie die Achillessehne. Sie ist etwa 15 cm lang und die letzten Muskelfasern inserieren etwa 8 -

10 cm proximal der Ansatzstelle am Tuber calcanei [4]. All diese Muskeln verlaufen in der oberflächlichen Flexorenloge, die durch die Fascia cruris von den anderen Logen getrennt wird. Die Innervation wird durch den N. tibialis (S1, 2) des N. ischiadicus übernommen [5].

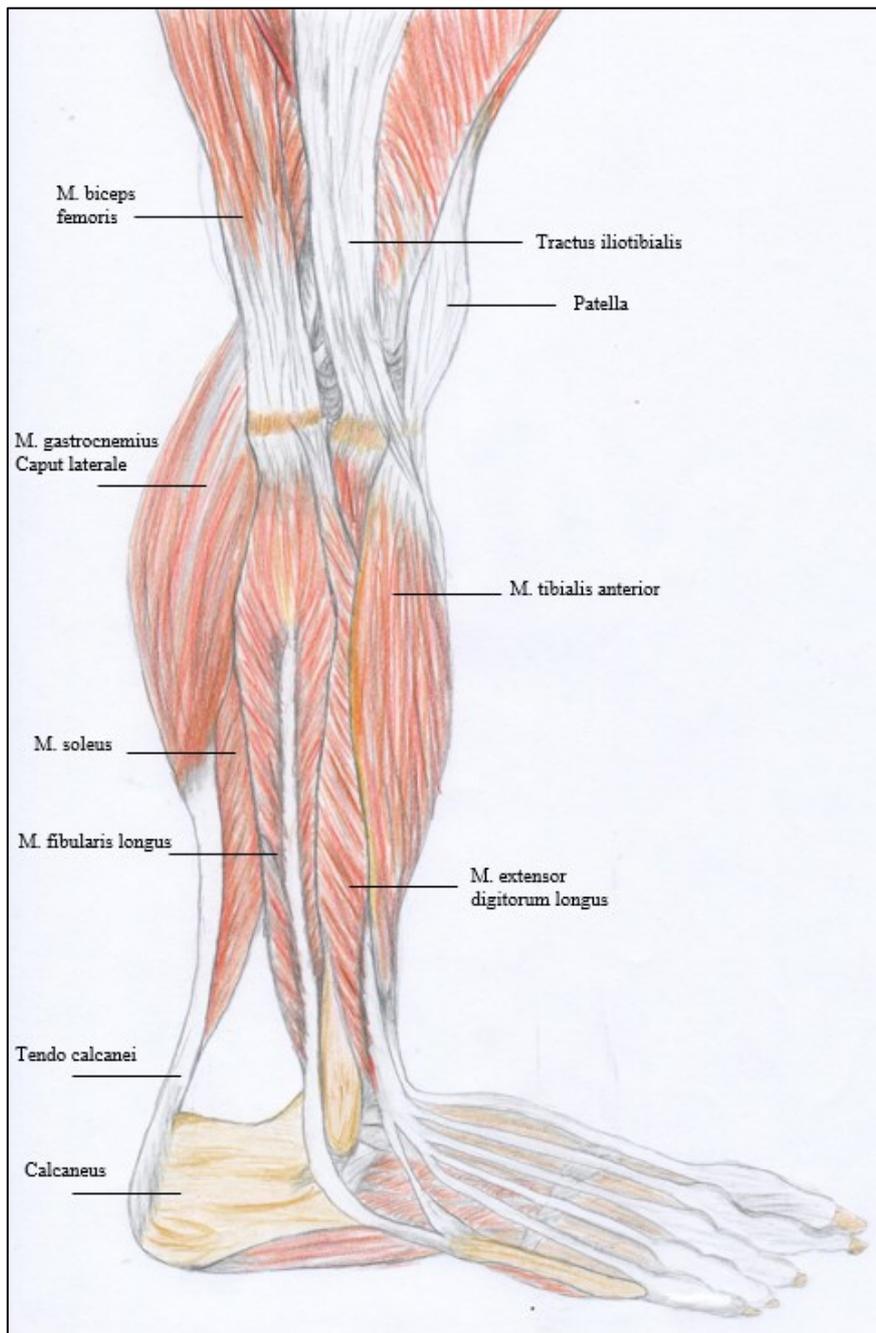


Abbildung 1.1: Darstellung der Muskulatur des Unterschenkels von lateral

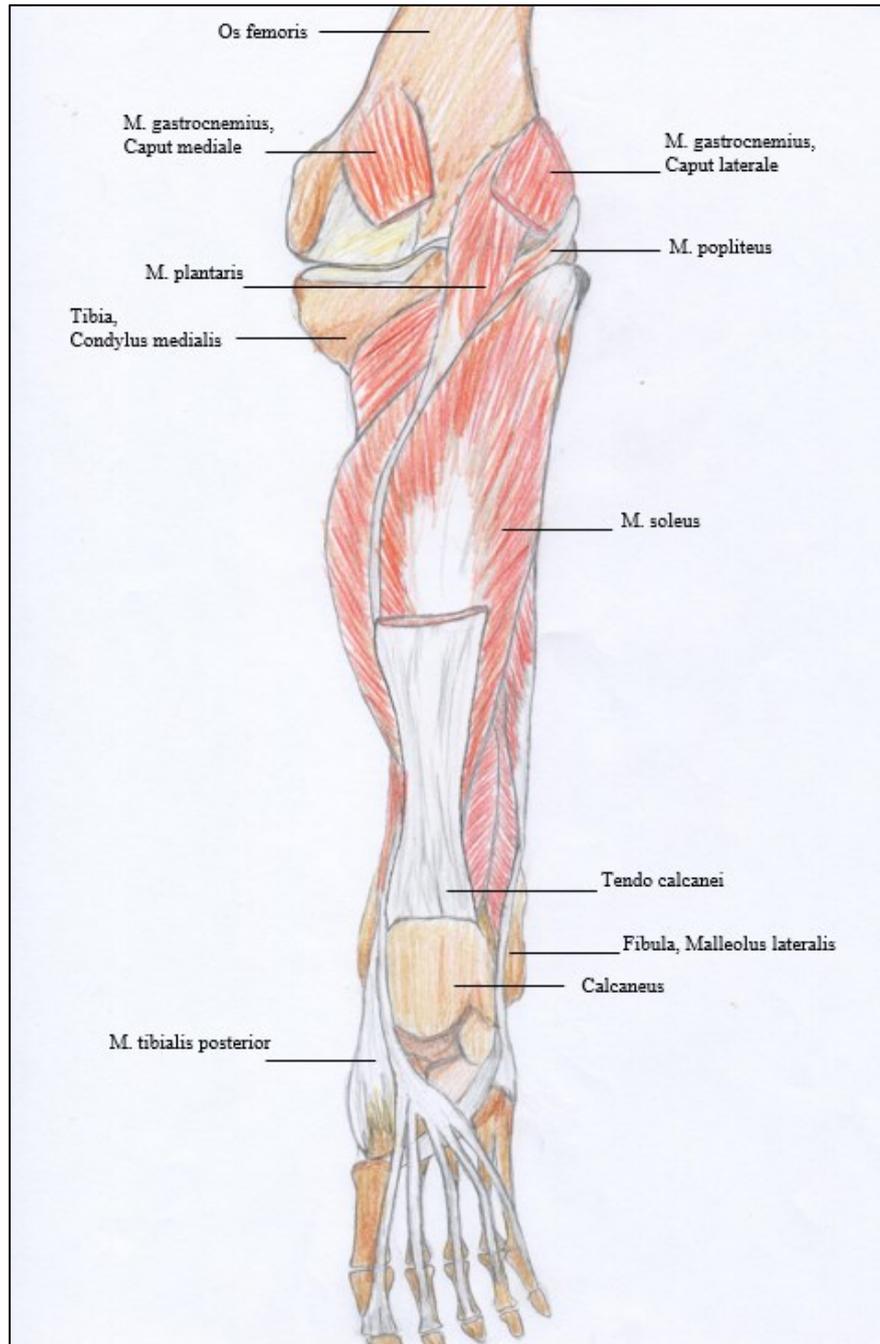


Abbildung 1.2: Darstellung der Muskulatur des Unterschenkels von posterior

Betrachtet man nun den genauen Aufbau der Achillessehne, dann ist zu erkennen, dass sie aus straffem, parallelfaserigem Bindegewebe besteht, das größtenteils Kollagen Typ I enthält [6]. Tenozyten (eine Art von Fibroblasten) produzieren und sezernieren dies. Elastin findet sich dagegen kaum im Sehnengewebe und erklärt somit die eingeschränkte

Dehnbarkeit. Am Sehnenansatz des Tuber calcanei strahlen die Kollagenfasern in den Knochen ein, um eine stabile Verbindung herzustellen.

Zusätzlich wird die Sehne hier durch Faserknorpel umhüllt [7]. Proximal strahlen die Kollagenfasern in das Sarkolemm der Myozyten hinein und stellen eine Verbindung zur Basallamina her [8]. Kollagenfibrillen bilden die kleinste Einheit, die sich zu Kollagenfaszikeln und weiter zu Kollagenfaserbündeln zusammenschließen [9]. Die Bündel sind spiralförmig angeordnet, um die Elastizität zu erhöhen [10]. Die Achillessehne ist nicht von einer synovialen Hülle umgeben, jedoch von einem Peritendineum, welches sich weiter in ein Peritendineum internum und externum unterteilen lässt und aus lockerem Bindegewebe besteht. Das Peritendineum internum (auch Endotendineum) umhüllt die Kollagenfaserbündel und enthält kleine Blutgefäße – hauptsächlich Äste aus der A. tibialis posterior [11] – und Nervenäste zur Versorgung des Sehngewebes [8]. Das Peritendineum externum (auch Epitendineum) umhüllt die Sehne im Gesamten und geht am muskulotendinösen Übergang in das Perimysium des Muskels und am Tuber calcanei in das Periost über. Das Peritendineum grenzt die Sehne von der tiefen Muskelfaszie ab und bewirkt aufgrund seiner elastischen Struktur und Fülle an Mukopolysacchariden die Gleitfähigkeit der Sehne mit dem umliegenden Gewebe [3].

1.1.2 Biomechanik

Der M. gastrocnemius ist zusammen mit dem M. soleus der wichtigste Flexor im oberen Sprunggelenk und wichtigste Supinator im unteren Sprunggelenk. Der M. plantaris kann aufgrund seines geringen Querschnitts funktionell vernachlässigt werden [12].

Ist das Kniegelenk gestreckt, wird der M. gastrocnemius wegen seiner Ausdehnung über das Kniegelenk gedehnt und kann aufgrund der erhöhten Vorspannung besonders kraftvoll agieren. Eine Flexion im Kniegelenk führt zum Gegenteil, und der M. gastrocnemius ist in Bezug auf das Sprunggelenk praktisch wirkungslos. Der M. soleus bringt für die Plantarflexion etwa die doppelte Kraft im Vergleich zum M. gastrocnemius auf [13], diese ist bei flektiertem Kniegelenk aber trotzdem ungenügend, um eine Art Gang ausführen zu können. Seine volle Kraftentfaltung entwickelt der M. triceps surae vor allem bei der Abstoßbewegung des menschlichen Gangs, wenn das Kniegelenk voll gestreckt ist, und das Sprunggelenk gebeugt ist [10]. Sobald der Fuß den Boden verlassen hat, und die Schwungbeinphase beginnt, hat der M. triceps surae keine relevante Funktion

mehr. Während der Standbeinphase schwingt das kontralaterale Bein nach vorn und der M. triceps surae – hier vor allem der M. soleus – wirkt als Stabilisator des Standbeins, um die Balance halten zu können [3]. Im subtalaren Gelenk (hinteres Teilgelenk des unteren Sprunggelenks) kann der M. triceps surae – je nach Position des Fußes – ein Supinator oder auch ein Pronator sein. Je weiter die Achillessehne lateral ansetzt, desto eher trägt der Muskel zur Pronation bei, und je weiter die Sehne medial ansetzt, desto eher trägt der Muskel zur Supination bei [3].

Die Verformung der Achillessehne ist in Zugversuchen mit Findung der Maximalkraft gut darstellbar und zeigt eine Kraft-Elongationskurve mit vier verschiedenen Phasen (siehe *Abbildung 1.3*) [14]. In Phase I kommt es durch moderate Kräfte zum Anziehen der Sehne, sodass am Ende dieser Phase alle Kollagenfasern gestreckt sind. Phase II ist durch einen linearen Anstieg gekennzeichnet, an deren Ende es zu ersten Rissen in der Sehne kommt. In Phase III kommt es zu unvorhersehbaren Rissen. Phase IV endet im Totalversagen [14].

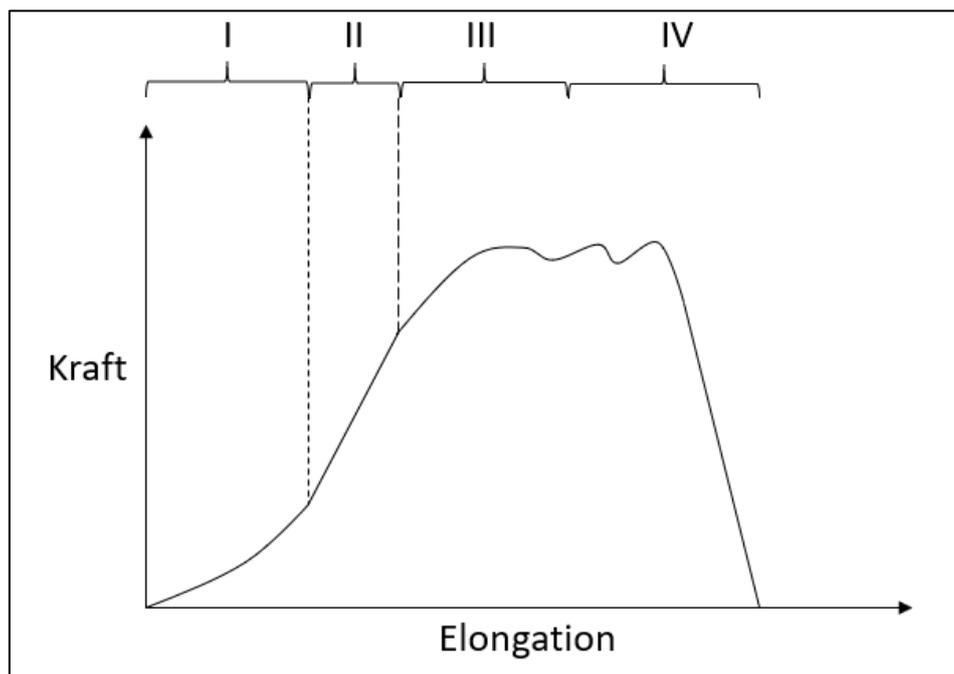


Abbildung 1.3: Das Diagramm zeigt die 4 verschiedenen Phasen des Verhaltens einer Sehne bei einem Zugversuch bis zum Versagen; orientiert an Maganaris et al. [14]

Wichtige Parameter sind auch die mechanische Spannung σ und die Dehnung ϵ , die aufgetragen auf einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm die gleiche Kurve ergeben wie

eine Kraft-Elongations-Diagramm (siehe *Abbildung 1.3*). Sie geben aber im Gegensatz dazu eher Informationen über Materialeigenschaften als zu strukturellen Eigenschaften [14]. Aus einem solchen Diagramm kann die maximale Dehnung oder mechanische Spannung abgelesen werden. Die Steigung beschreibt den Elastizitätsmodul E (auch Youngscher Modul). Je steiler diese Steigung ist, desto größer ist der Elastizitätsmodul und desto weniger elastisch ist die Sehne. Er gilt für linear-elastische Materialien [15].

Nun stellt sich die Frage, wie viel Belastung eine „gesunde“ Sehne aushält. Hierzu gibt es in der Literatur unterschiedliche Angaben. Lewis und Shaw untersuchten 16 menschliche Sehnenpräparate verschiedenen Alters. Im Mittel hielten es die Sehnen bis zum Totalversagen bis zu einer maximalen Zugkraft von 59 ± 18 MPa aus. Die maximale Längenänderung betrug 22 ± 7 %, der Elastizitätsmodul 375 ± 102 MPa und die Steifigkeit 685 ± 262 N/mm [16]. Louis-Ugbo et al. konnten im Mittel eine maximale Zugkraft von 1189 N – mit einer Spannweite von 360 - 1965 N – bis zum Totalversagen feststellen, was im Mittel 118,9 kg entsprechen würde. Der Elastizitätsmodul betrug im Mittel 559 N/mm² (= MPa) [17]. Die Belastbarkeit kann auch mit dem Vielfachen des Körpergewichts angegeben werden, wobei hier Werte bis zum etwa 12-fachen angegeben werden [18, 19].

Eine Belastung unterhalb der Kräfte, die zu einer Ruptur führen, ist wichtig für die Funktion der Fibroblasten, die durch die mechanische Reizung zur Produktion von Kollagen angeregt werden und somit die Integrität der Sehne erhalten. Durch diesen Mechanismus werden auch kleinste Verletzungen im Sehnengewebe repariert [20].

1.2 Akute Achillessehnenruptur

Die Achillessehnenruptur kann nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden. Man unterscheidet komplette Rupturen von Teilrupturen und kann weitere Einteilungen je nach Verletzungsmechanismus und Lokalisation vornehmen. Außerdem spielt das Alter eine Rolle, welches direkte Auswirkungen auf die Therapie hat. Amlang und Zwipp unterscheiden dabei in ihrer klinischen Klassifikation fünf Typen von Rupturen [21]. Die akute Achillessehnenruptur zeichnet sich durch die typische Symptomatik mit peitschenartig reißendem Schmerz aus. Mit einer Häufigkeit von ca. 80 % ist sie die häufigste Rissform nach Alter. Die Therapie sollte innerhalb von 72 Stunden nach dem Ereignis beginnen, um einer eventuellen Verkürzung sowie Fibrosierung des

Sehnengewebes entgegenzuwirken. Des Weiteren unterscheiden sie noch eine spontane, veraltete, subakute und chronische Achillessehnenruptur. Erwähnenswert ist, dass die spontane Ruptur ohne ein typisches Ereignis auftritt und die chronische Ruptur dieses zwar aufweist, die Therapie aber erst nach frühestens 4 Wochen beginnt [22].

1.2.1 Epidemiologie

Betrachtet man die Zahl der Sehnenrupturen wird deutlich, dass die Achillessehne am häufigsten reißt [23], und dies betrifft vor allem Männer im sportlich aktiven Alter zwischen 30 und 50 Jahren, wobei sich das Verhältnis von Mann zu Frau in unterschiedlichen Populationen zwischen 3:1 bis 7:1 bewegt [24-26]. Dieser Unterschied zwischen Mann und Frau kann bis heute jedoch noch nicht genau erklärt werden und liegt eventuell in hormonellen oder biologischen Aspekten begründet [27]. In Studien aus Skandinavien und Schottland [28] zeigte sich ein Anstieg der Inzidenz innerhalb der letzten Jahrzehnte. Houshian et al. konnten in Dänemark einen Anstieg von 18,2/100.000 Einwohner auf 37,3/100.000 innerhalb von 13 Jahren (1984 - 1996) nachweisen [29].

In Deutschland treten jährlich bis zu 20.000 Rupturen auf, was einer Inzidenz von etwa 24/100.000 Einwohner im Jahr entspricht [30]. Rupturen aufgrund sportlicher Belastung ereigneten sich hauptsächlich in der Altersgruppe 30 - 49 Jahre, wohingegen Rupturen ohne sportliche Einwirkung eher in einem höheren Lebensalter auftreten [29]. Junge Menschen verletzen sich häufiger bei sportlicher Aktivität. Bei den Älteren ist der Auslöser bei Alltagsaktivitäten zu finden [31]. Sportarten mit Schläger wie bspw. Tennis, Squash und Badminton scheinen besonders häufig zu Achillessehnenrupturen zu führen, aber auch Ball- und Laufsportarten sowie Skifahren sind zu nennen [25, 32].

Das Alter der Patienten bei Ruptur liegt im Median bei etwa 40 - 45 Jahren und steigt vermutlich – womöglich aufgrund sportlicher Aktivität im höheren Lebensalter [33] – weiter an [24, 32]. Ältere Studien legten nahe, dass der Altersgipfel beim weiblichen Geschlecht bei über 80 Jahren liegen würde [28], in neueren Studien wiesen sie allerdings einen ähnlichen Altersgipfel wie das männliche Geschlecht auf [24]. Die linke Achillessehne scheint öfter betroffen zu sein als die rechte [34, 35]. Lea und Smith erfassten die Höhe der Ruptur und fanden, dass 73 % intratendinös, 24 % im muskulotendinösen Übergangsbereich und 3 % am Ansatz reißen [36]. Nach Ruptur einer Achillessehne beträgt das Risiko einer kontralateralen Ruptur bis zu 26 % [37].

1.2.2 Ätiologie und Pathogenese

Die Achillessehnenruptur ist von multifaktorieller Ätiologie. Die Sehne befindet sich in einem Zusammenspiel mit der Muskulatur und nimmt an Steifigkeit zu, wenn die Vorspannung ansteigt. Eine höhere Steifigkeit der Sehne kann zu einem erhöhten Risiko einer Ruptur führen, vor allem wenn es bei sportlicher Aktivität zu schnellen Wechslen zwischen An- und Entspannung kommt [38]. Besonders gefährdet sind Freizeitsportler, die ihren Arbeitsalltag in sitzender Position verbringen und in der Freizeit Sport in hoher Intensität betreiben [38]. Aber auch Leistungssportler können aufgrund einer Überlastung eine Ruptur erleiden, die eine außerordentliche Auswirkung auf deren sportliche Karriere haben kann, wobei bis zu 30 % nicht mehr in den kompetitiven Sport zurückkehren können [39, 40].

Es werden direkte von indirekten Ursachen unterschieden. Zu den direkten Ursachen gehören Schnittverletzungen sowie direkte Schläge oder Quetschungen des Rückfußbereichs, die aber insgesamt gesehen selten auftreten [38]. Viel häufiger tritt eine Ruptur aufgrund von indirekten Ursachen auf, die im Rahmen einer Überbelastung an einer vorgeschädigten Sehne stattfinden. Bereits Arner et al. nahmen 1959 an, dass es keine spontane Ruptur ohne pathologische Veränderung der Sehne geben würde, da sie in 74 von 75 Sehnen Veränderungen finden konnten [41]. Józsa und Kannus untersuchten 397 gerissene Achillessehnen auf Veränderungen und konnten diese auch in allen Exemplaren finden. Es wurden hypoxische oder mukoide Degenerationen, Tendolipomatosen, kalzifizierende Tendinopathien oder Kombinationen aus diesen auf histologischem oder histochemischem Weg dargestellt. Auch bei der Kontrollgruppe mit 220 nicht-gerissenen Achillessehnen wurden Auffälligkeiten gefunden, jedoch hier auch gesunde Sehnen. Zusätzlich wurden verschiedene andere Sehnen untersucht, bei denen in allen gerissenen Sehnen ebenfalls Pathologien gefunden wurden [42].

Sowohl Puddu et al. als auch Arner et al. konnten zeigen, dass Anzahl und Durchmesser der Gefäße im Bereich von 2 - 6 cm proximal des Ansatzes am Calcaneus reduziert sind, und dies somit eine Prädilektionsstelle für Rupturen darstellt [41, 43]. Auch eine angiographische Studie konnte den gleichen Bereich als Schwachstelle ausmachen [44].

Eine funktionelle Hyperpronation aufgrund einer Varusfehlstellung führt zur Innenrotation der Tibia und einer bogenförmigen Verlagerung der Achillessehne nach

medial. Dies kann insbesondere im medialen Bereich zu Mikrotraumata und Degenerationen führen, die schlussendlich in einem inflammatorischen Prozess und einer Ruptur enden können. Während des Gangs führt die Hyperpronation zu einem Wringen der Achillessehne, vor allem im bereits oben genannten Prädilektionsbereich von 2 - 6 cm proximal des Ansatzes [45]. Auch eine geringe Flexibilität des Gastrocnemius/Soleus-Komplexes ist zu bedenken [45].

Temperaturen über 42,5 °C scheinen einen Einfluss auf die Funktion der Fibroblasten zu haben und könnten ein Grund für Rupturen bei körperlicher Belastung sein [46]. Zusätzliche Risikofaktoren stellen Therapien mit Fluorochinolonen oder systemische sowie lokale Steroidapplikationen dar [47]. Sie sind jedoch eher von untergeordneter Relevanz. Lokale Steroidinjektionen finden vor allem bei Achillodynie Anwendung. Sie führen zwar zur Schmerzreduktion, erhöhen aber das Rupturrisiko [48]. Auch Immunsuppressiva nach erfolgter Nierentransplantation oder im Rahmen von rheumatischen Erkrankungen können Rupturen begünstigen [49]. Eine alleinige Medikamenteneinnahme scheint jedoch nicht verantwortlich zu sein. Eventuell trägt vielmehr die Grunderkrankung einen entscheidenden Faktor zur Ruptur der Sehne bei [50]. Kujala et al. konnten auch einen Zusammenhang zwischen einer Achillessehnenruptur und der Blutgruppe nach AB0-System finden. Die Blutgruppen A und 0 zeigten ein vermehrtes Auftreten von Rupturen, was auf eine genetische Verbindung zwischen AB0-System und molekularer Struktur der Achillessehne schließen lassen könnte [51].

Die Unfallmechanismen, die sich aufgrund einer indirekten Ursache ereignen, lassen sich nach Arner und Lindholm grob in 3 Typen unterscheiden [52]:

1. Der plantarflektierte Fuß wird bei Knieextension kraftvoll abgestoßen. Dies sieht man typischerweise beim Sprintstart oder auch beim Abspringen vom Boden, z.B. beim Volleyball oder Basketball. Hierbei handelt es sich um den häufigsten Unfallmechanismus.
2. Beim Laufen kommt es bspw. aufgrund eines Lochs im Boden zu einer abrupten Dorsalextension im Sprunggelenk bei kontrahierter Wadenmuskulatur.
3. Der Fuß kommt in Plantarflexion bei kontrahierter Wadenmuskulatur nach einem Sprung auf dem Boden auf.

1.2.3 Diagnostik

Die Diagnose einer Achillessehnenruptur erscheint auf den ersten Blick aufgrund des häufig eindrücklichen Knalls bei Ruptur und der anschließenden Symptomatik einfach zu sein. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bis zu 25 % der Rupturen bei der Erstkonsultation übersehen werden. Dies führt zu einem schlechteren Behandlungsergebnis [53]. Der häufigste Grund einer übersehenen Ruptur ist eine erhaltene Plantarflexion [54]. Eine sorgfältige Diagnostik ist daher entscheidend und leistet einen wichtigen Beitrag zu einem guten Ergebnis. Neben der klinischen Untersuchung besitzen auch die bildgebenden Verfahren wie die Sonographie und die Magnetresonanztomographie (MRT) sowie in Sonderfällen die klassische Röntgendiagnostik eine Relevanz.

1.2.3.1 Klinisches Erscheinungsbild

Bei kompletten Achillessehnenrupturen kommt typischerweise ein hinkender Patient in die Notaufnahme und stellt dabei schon häufig selbst die richtige Verdachtsdiagnose, da der peitschenartige Knall bei Ruptur laut und eindrücklich ist. Im Anschluss an die Ruptur treten dumpfe, einschießende Schmerzen in der Wade und eine aufgehobene Plantarflexion auf [55].

1.2.3.2 Klinische Untersuchung

Durch den Riss der Achillessehne kann der Patient mit dem betroffenen Bein nicht mehr auf die Zehenspitzen stehen. Daher sollte der Patient bei einer klinischen Untersuchung aufgefordert werden, auf Zehenspitzen zu stehen. Bei kompletten Rupturen ist dies nicht möglich. Patienten mit Übernahme der Plantarflexion durch tiefe Flexoren, wie bspw. den M. tibialis posterior, können jedoch noch eine leichte Flexionsfähigkeit aufweisen, sodass dieser Test eine Ruptur nicht völlig ausschließen kann. Sie fallen klinisch durch eine gesteigerte Dorsalextension der Rupturseite im Vergleich zur Gegenseite auf [38]. Bei der Palpation der Achillessehne fällt außerdem eine Delle auf, die bei ausgeprägtem Hämatom (meist 48 h nach Trauma ausgehärtet) aber auch fehlen und so zu einer verzögerten Diagnose führen kann [38]. Der Test nach Copeland kann das Übersehen einer Ruptur vermeiden, wird heutzutage jedoch nur selten angewandt. Der Untersucher befestigt eine Blutdruckmanschette am Unterschenkel des Patienten, pumpt diese auf 100 mmHg auf und führt eine passive Plantarflexion durch. Bei Anstieg auf 140 mmHg ist

mit einer intakten Achillessehne zu rechnen. Ändert sich der Druck hingegen kaum, liegt mit großer Wahrscheinlichkeit eine Ruptur vor [56].

Beim Test nach Simmonds wird der Patient in Bauchlage auf der Liege gelagert, wobei die Füße ohne Kontakt zur Liege freihängend liegen. Der Untersucher komprimiert nun beide Waden im Seitenvergleich und überprüft den Grad der Plantarflexion. Bei Ruptur ist keine Flexion möglich und der Test fällt positiv aus [57]. Auch hier muss man aufpassen, denn ein erhaltener M. plantaris kann eventuell zu einem falsch-negativen Ergebnis führen [58]. Der Simmonds-Test wird fälschlicherweise häufig Thompson-Test genannt, der den gleichen Test aber erst fünf Jahre nach dem Erstbeschreiber Simmonds in der Literatur veröffentlichte [59, 60]. Dieser Test wird in der Praxis am häufigsten eingesetzt. Beim Matles-Test wird der Patient ebenfalls in Bauchlage mit überhängenden Füßen gebracht und nun aufgefordert, seine Knie aktiv um 90° zu beugen. Der Untersucher beobachtet dabei die Stellung des Fußes. Sollte es zu einer Dorsalextension auf der betroffenen Seite kommen, ist eine Ruptur wahrscheinlich [61].

1.2.3.3 Apparative Diagnostik

Um Fehldiagnosen zu vermeiden, beispielsweise bei erhaltender Plantarflexion, kann jedoch auch eine weiterführende Diagnostik nötig sein. [62]. Außerdem gilt es in einigen Fällen einen knöchernen Ausriss der Achillessehne auszuschließen. Hierfür sollten Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen in anterior-posteriorer sowie medio-lateraler Richtung akquiriert werden. Das sogenannte Kager-Dreieck hilft bei der Erkennung einer Ruptur. Es wird in der seitlichen Röntgenaufnahme dorsal durch die Achillessehne, ventral durch die Tibia und distal vom Calcaneus begrenzt und ist von Fettgewebe ausgefüllt. Stellt sich dieses Dreieck nur noch unscharf dar, liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Ruptur vor [63]. Zusätzlich können mithilfe des Röntgen Differentialdiagnosen wie bspw. eine Fraktur des oberen Sprunggelenks ausgeschlossen werden.

Neben der Röntgendiagnostik kann auch die Sonographie eine Ruptur bestätigen. Optimalerweise wird hierfür ein Linearschallkopf mit 5 - 10 MHz genutzt, um eine ausreichend gute Auflösung zu erreichen. Eine Eindringtiefe von etwa 3 - 4 cm ist ausreichend [64]. Normalerweise stellt sich die Achillessehne echoarm und mit durchgängigen Fasern dar. Die rupturierte Sehne hingegen zeigt eine Unterbrechung mit

zwei Sehnenstümpfen, die sich auch ausgefranst präsentieren können. Der Vorteil der Sonographie liegt in der dynamischen Untersuchung. Durch eine passive Plantarflexion von 20° kann getestet werden, ob sich die beiden Sehnenstümpfe einander annähern, was eine direkte Konsequenz für die Therapie hat. Dabei ist jedoch genauestens darauf zu achten, dass sich beide Sehnenstümpfe in kompletter Zirkumferenz berühren [55].

Auch die MRT-Bildgebung kann eine Ruptur detektieren und sollte in axialen und sagittalen Schichten in T1- und T2-Wichtung generiert werden. Ist die Sehne intakt, erscheint sie in der T2-Wichtung hypointens. Eine Erhöhung der Intensität in dieser Sequenz innerhalb der Sehne zeigt ein Ödem bzw. Hämatom und ist praktisch beweisend für eine Ruptur. In der T1-Wichtung kommt es ebenfalls zu einer Störung des Signals innerhalb der Sehne [65, 66]. Die T1-Wichtung dient außerdem der genauen Beurteilung der Sehnenqualität sowie des Grades einer eventuellen Verfettung [55]. Das MRT wird in Plantarflexion durchgeführt und kann somit ebenfalls die Approximation bzw. Berührung der Sehnenstümpfe beurteilen. Somit stellt sie eine Alternative zur Sonographie bei eingeschränkten Untersuchungsbedingungen dar [55].

Aström et al. verglichen präoperativ die MRT-Bildgebung mit der Sonographie und konnten diese bei chronischer Tendinopathie der Achillessehne in 21 von 26 Fällen mittels Sonographie und in 26 von 27 Fällen mit der MRT nachweisen. Die MRT wies in dieser Studie sowohl eine höhere Sensitivität als auch Spezifität auf [67].

1.2.4 Therapie

Die Möglichkeiten der Therapie einer Achillessehnenruptur sind mannigfaltig. Zuerst werden die Vor- und Nachteile sowie die Limitationen einer konservativen Therapie diskutiert. Anschließend werden die verschiedenen Techniken der operativen Therapie in offen-chirurgische und minimalinvasive Verfahren unterteilt und näher erläutert. Dabei ist auch die Unterscheidung zwischen akuten und chronischen Rupturen relevant.

1.2.4.1 Konservative Therapie

Die konservative Therapie kommt nur in Frage, wenn die Annäherung der Sehnenstümpfe in der Sonographie in ausreichendem Maß möglich ist. Hierfür gibt es unterschiedliche Therapiemaßnahmen den Fuß in Plantarflexion zu fixieren, um eine Heilung zu erreichen [68]. Manche Autoren behandeln die Ruptur in einem Unterschenkelgips für 6 - 8

Wochen [35], aber auch Behandlungen im Oberschenkelgips werden empfohlen, die dann zum Teil nach zwei Wochen auf einen Unterschenkelgips umgestellt werden. Mit dieser Methode konnten Fruensgrad et al. gute Ergebnisse – vor allem in Bezug auf die Rerupturrate – zeigen [69]. Häufig findet die konservative Behandlung in einer speziellen Orthese statt, die nach Thermann für acht Wochen in 20° Plantarflexion belassen werden sollte. Vollbelastung ist möglich und im Rahmen der Möglichkeiten erwünscht, da diese zur Heilung der Sehne beiträgt. Weiterhin wird nach 8-wöchiger Therapie die Einlage eines Keils von 1 cm in einen normalen Schuh für 6 Wochen empfohlen. Kontrollen via Sonographie sind im Verlauf nach 4 und 8 Wochen sinnvoll, um einen verzögerten Heilungsverlauf oder ein Auseinanderweichen der Stümpfe frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls auf ein operatives Vorgehen umzusteigen. Auf eine Dorsalextension sollte in dieser Zeit verzichtet werden, um der Sehne die nötige Zeit zur Heilung zu geben. Parallel zur Therapie in der Orthese können erste Übungen beim Physiotherapeuten sowie leichtes Radfahren vom Patienten durchgeführt werden [70]. In der Literatur finden sich noch zahlreiche weitere Konzepte, die aufgrund ihrer fehlenden klinischen Relevanz jedoch kaum noch Anwendung finden und daher hier nicht weiter diskutiert werden.

Die konservative Therapie eignet sich vor allem für ältere Patienten, die einer Operation aufgrund verschiedener Kontraindikationen nicht zugänglich sind, oder für Patienten mit nur geringem sportlichen Anspruch [71-73]. Auch Rupturen des muskulotendinösen Übergangs heilen nach konservativer Therapie sehr gut aus und bedürfen häufig keiner operativen Therapie [74]. Die häufigsten Komplikationen der konservativen Therapie sind Rerupturen, die in bis zu 35 % der Fälle auftreten [75], sowie Längungen der Achillessehne. Zwar können chirurgischen Komplikationen in Form von Wundinfektionen sowie Verletzungen von Gefäßen oder Nerven vermieden werden [71], jedoch ergibt die konservative Therapie funktionell schlechtere Ergebnisse als die operative Therapie [49]. Die Achillessehne zeigt allerdings auch nach konservativ behandelten Verläufen gute Ergebnisse in Hinblick auf die Belastbarkeit [76]. Insgesamt gesehen benötigt eine Achillessehne bei der konservativen Herangehensweise im Vergleich zur operativen Therapie mehr Zeit zur Heilung [73].

1.2.4.2 Operative Therapie

Die operative Therapie unterteilt sich in offen-chirurgische und minimalinvasive Verfahren, die in den folgenden Unterkapiteln dargelegt werden sollen. Minimalinvasive Verfahren versuchen, durch kleine Schnitte mit einhergehendem Zugang zur Sehne das umliegende Weichteilgewebe zu schonen. Die klassischen offen-chirurgischen Verfahren wählen einen längeren Zugang, der aber eine bessere Übersicht über die Ruptur gewährleistet. Sollte in der Sonographie eine Adaptation beider Sehnenstümpfe nicht möglich sein und die Entfernung beider > 1 cm sein, so ist ein operatives Vorgehen auf jeden Fall indiziert [77]. Im Allgemeinen findet die operative Therapie insbesondere Anwendung bei Patienten mit hohem Anspruch an deren sportliche Aktivität [34]. Auch Rupturen, die älter als eine Woche sind, sollten einer operativen Therapie zugeführt werden, um ein gutes Ergebnis zu erreichen [78]. Operationen an der Achillessehne finden im Normalfall in Bauchlage auf einem dafür geeigneten Operationstisch unter Vollnarkose statt. Es sind aber auch lokal- oder regionalanästhetische Verfahren denkbar. Eine Blutsperrung kann in Abhängigkeit von der gewählten Technik angelegt werden. Beide Füße überragen den Tisch und werden steril abgewaschen, um intraoperativ die Sehnenanspannung beider Achillessehnen einander anpassen zu können. Außerdem kann eine perioperative Gabe eines Antibiotikums erwogen werden, um die Gefahr einer Wundinfektion zu minimieren. Typischerweise werden hierfür Cephalosporine verwendet [77].

1.2.4.2.1 Offen-chirurgisch

Die offen-chirurgischen Verfahren finden vor allem Anwendung bei jungen Patienten oder Leistungssportlern, um hier ein möglichst stabiles Konstrukt zu schaffen [72, 79]. Chronische Rupturen, die älter als 4 Wochen sind, sollten mit einem offenen Verfahren versorgt werden, da hier ein vorliegendes Hämatom innerhalb des Rupturspalts optimal entfernt werden kann [80]. Diese alten Rupturen neigen außerdem zu einer Verkürzung des M. triceps surae, sodass hier häufig rekonstruierende Verfahren nötig sind [81]. Der Zugang erfolgt meist von dorsomedial, um die Gefahr einer Verletzung des lateral der Sehne gelegenen N. suralis zu minimieren [82]. Es werden jedoch auch laterale oder mediane Zugänge beschrieben [38]. Die Haut wird dabei oberhalb der Sehne über eine Länge von etwa 5 - 8 cm eröffnet. Es folgt die Präparation mit Eröffnung des Peritendineums und Entfernung des Rupturhämatoms sowie die Anfrischung der

Rupturenden. Nach Beendigung einer der zahlreichen Nahttechniken, die die beiden Sehnenenden wieder aneinander bringen sollten, wird das Peritendineum verschlossen. Nähte des Subkutangewebes sowie der Haut beenden den Eingriff [83]. Hierbei sollte man vor allem auf einen spannungsfreien Wundverschluss achten, um das Risiko einer Wundinfektion möglichst gering zu halten [77].

Welche Technik für die Versorgung einer Achillessehnenruptur am besten geeignet ist, kann bisher nicht eindeutig beantwortet werden, da die Studienlage uneindeutig ist [49, 71]. Die Wahl der Technik hängt auch von den Präferenzen des Operateurs ab.

In der Literatur wurden viele Nähte bzw. Reparationsmöglichkeiten beschrieben, von denen hier die wichtigsten in den folgenden Absätzen beschrieben werden.

Die Technik nach Bunnell ist eine Durchflechtungsnaht, die den Schnürsenkeln beim Binden eines Schuhs ähnelt (siehe *Abbildung 1.4 a*). Zuerst wurde sie mit einem nicht-resorbierbaren Metalldraht entwickelt und sollte möglichst schonend für die Sehne sein, sodass zusätzlich ein Schiffchen aus Metall auf die Sehne als Widerlager angebracht wurde. Dadurch konnte ein Einschneiden der Sehne verhindert werden. Der Draht und das Schiffchen mussten nach erfolgter Sehnenheilung jedoch entfernt werden. Die Technik wurde im Laufe der Jahre modifiziert und wird heute mithilfe eines meist langsam resorbierbaren Fadens in gleicher Technik genäht [84]. Es wird ein langer Faden verwendet und der Knoten liegt distal oder proximal der Ruptur. Knoten innerhalb des Rupturspalts sollten vermieden werden, da die Belastung hier am größten ist [85].

Krackow entwickelte eine Technik, die nach ihm als Krackow-Naht benannt wurde (siehe *Abbildung 1.4 b*). Ursprünglich wurde für diese Naht pro Sehnenende ein Faden benötigt. Der Knoten lag innerhalb des Rupturufers. Zuerst wird der Faden quer über den proximalen Teil der Sehne gelegt, was den sogenannten Steg darstellt. Die überragenden Enden des Fadens sollten auf beiden Seiten gleich lang sein. Anschließend wird auf beiden Seiten ein Teil des Querschnitts der Sehne mit einem Stich von hinten nach vorne gefasst. Der Ausstich kommt dabei oberhalb des querverlaufenden Fadens zu liegen und wird nach distal gezogen. Um eine sogenannte Leiterstruktur zu erhalten, wird dieses Vorgehen auf beiden Seiten bis zum Rupturufer fortgeführt. Mit dem zweiten Faden wird das Vorgehen am anderen Sehnenende wiederholt. Zwei Knoten im Rupturufer beenden die Nahttechnik nach Krackow [86, 87]. Wie bereits oben beschrieben, erweist sich ein

Knoten innerhalb des Rupturspalts als nachteilig, sodass auch diese Technik modifiziert wurde und nun mit lediglich einem Faden genäht wird. Der Knoten liegt auch hier entweder proximal oder distal der Ruptur.

Eine Modifikation der klassischen Krackow-Naht stellt die Giftbox-Naht dar (siehe *Abbildung 1.4 c*). Dabei wird jedes Sehnenende mit einer Leiterstruktur versorgt. Anstatt nun aber zwei Knoten innerhalb des Rupturspalts anzulegen, werden die aus den Rupturufern austretenden Fäden mithilfe von langen Nadeln einmal oberflächlich bis vor den queren Steg der Naht auf der anderen Seite der Ruptur geführt und einmal tief über den Steg hinaus. Dies wird auf beiden Seiten in gleicher Weise durchgeführt. Die Fäden werden nun oberhalb des Stegs verknotet, sodass jeweils proximal und distal in Höhe des Stegs ein Knoten zu liegen kommt [85]. In einer biomechanischen Studie wurde die Giftbox-Naht mit der klassischen Krackow-Naht verglichen und zeigte bei Zugversuchen, die die maximal mögliche Zugkraft bis zum Versagen der Naht testeten, eine etwas mehr als doppelt so hohe Belastbarkeit der Giftbox-Naht (im Mittel 168 N im Vergleich zu 81 N bei der Krackow-Naht) [85].

Eine weiterhin häufig eingesetzte Technik ist die Kessler-Naht (siehe *Abbildung 1.4 d*), die zuvor als „Grasping-Technik“ bezeichnet und für Sehnen der Extensoren und Flexoren der Hand entwickelt wurde [88]. Mithilfe eines mit einer langen Nadel armierten Fadens wird 1 cm proximal der Ruptur eingestochen und etwa ein Viertel der Sehne gefasst. Ein Knoten an dieser Stelle sichert die Naht. Anschließend wird die Nadel transversal durch die Sehne geführt und erneut ein Knoten angelegt, der nun ein Viertel der anderen Seite der Sehne fasst. Jetzt wird die Nadel in axialer Richtung durch das Rupturufer geführt und die gleiche Prozedur erfolgt am zweiten Sehnenende. Der Knoten kommt nach erneutem Durchlaufen des Rupturufers – von distal nach proximal – am Beginn der Naht zu liegen und beendet diese Nahttechnik [89].

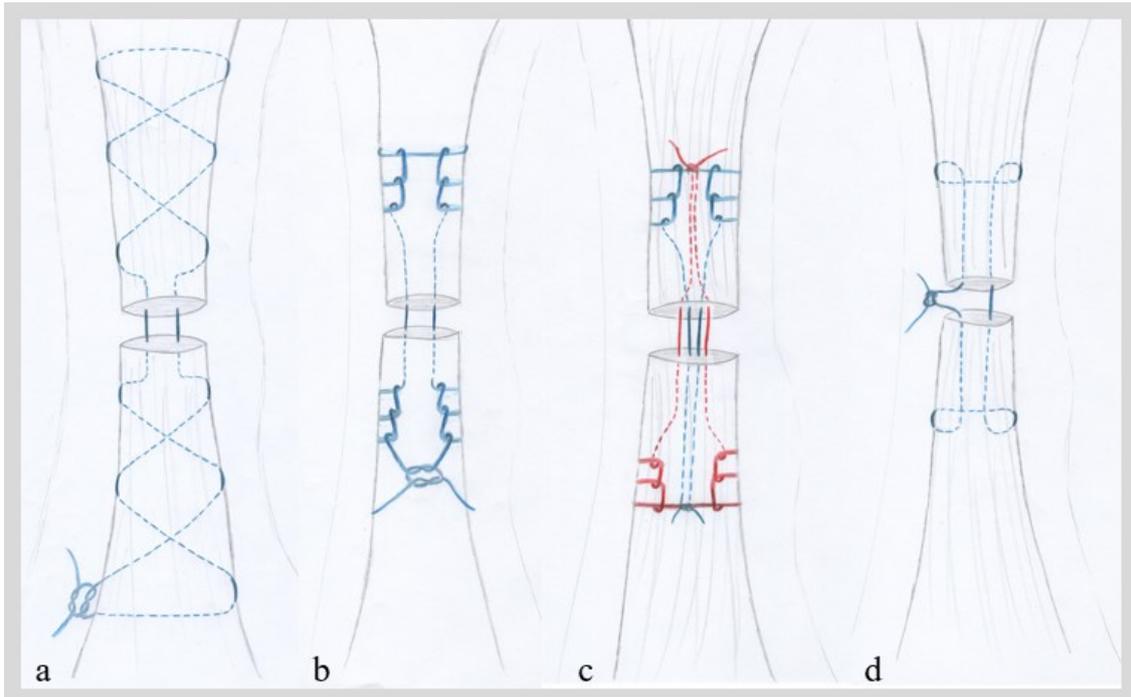


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung verschiedener offen-chirurgischer Nahttechniken: a) Bunnell-Technik, b) Krackow-Technik, c) modifizierte Krackow-Technik in der Giftbox-Variante, d) Kessler-Technik

Sollte die Kern-Naht (z.B. Bunnell-, Krackow-Naht) nicht zu einer ausreichenden Stabilität führen, kann eine Feinadaptation mit einem resorbierbaren Nahtmaterial, wie z.B. Vicryl oder PDS II (beides Fa. Ethicon GmbH, Norderstedt, Deutschland) erfolgen [77]. Die Stärke des Fadens variiert und beträgt dabei meist USP 2-0 oder 3-0. Die Feinadaptation kann entweder mit Einzelknopfnähten oder einer fortlaufender Naht bewerkstelligt werden und verbessert die Stärke des Nahtkonstrukts um etwa 15%. Die Sehnenheilung wird dadurch jedoch negativ beeinflusst [83].

Bei schlechter Struktur der Sehne oder mangelhafter Naht kann eine Augmentation in Form einer Durchflechtung mithilfe der Plantarissehne Abhilfe schaffen und die Achillessehne verstärken [83]. In der Literatur werden auch Gracilis-, Semitendinosus-, Gastrocnemius-Faszien- und Fascia-lata-Transplantate beschrieben [38]. Aktas et al. verglichen in einer prospektiven Studie die Krackow-Naht mit einer Krackow-Naht augmentiert mit M plantaris-Sehne. Sie konnten in Bezug auf die Rerupturrate jedoch keine Unterschiede feststellen [90]. Die Augmentation mithilfe einer nach unten

geschwenkten Gastrocnemius-Faszie scheint ebenfalls keinen Vorteil auf die Rate der Rerupturen zu haben [91].

Bei entzündlichen Vorgängen im Bereich der Achillessehne werden gern Kortisoninjektionen vorgenommen, die aber das Sehnengewebe nachhaltig schädigen können [92]. Sollte es im Verlauf zu Rupturen kommen, ist eine RepARATION mit den oben beschriebenen Techniken oft nur schwer oder insuffizient möglich, sodass hier ein Teil- oder Komplettersatz der Sehne nötig wird. Der M. flexor hallucis longus eignet sich dafür besonders gut [93]. Die Umkipplastik nach Silfverskiöld und Lindholm schwenkt einen Lappen des M. gastrocnemius in den Defektbereich und kann auch bei einfachen Rupturen eine Alternative für Sportler darstellen, um das Rerupturrisiko gering zu halten [94].

Bei ansatznahen Rupturen ist eine direkte Sehnennaht nicht möglich, sodass hier ein transcalcaneärer Bohrkanal angelegt werden muss. Die Sehne wird mit einer der oben genannten Techniken versorgt und zur distalen Fixation durch den Bohrkanal geführt [95]. Nahtanker können ebenfalls bei distalen Rupturen eingesetzt werden und befestigen die Sehne wieder an dessen Ansatz [96, 97]. Sollte es zu einem Ausriss der Sehne am Calcaneus mit Knochenschuppe kommen, spricht man von einer Avulsionsfraktur. Diese können bspw. mit kanülierten Kortikalisschrauben und Unterlegscheiben [98] oder einer Suture-Bridge™ (Fa. Arthrex, Naples (Florida), USA) versorgt werden [99].

Die Achillessehne kann auch durch einen Fibrinkleber repariert werden. Dies wurde vor allem in den 1970er Jahren propagiert, wurde heute jedoch weitestgehend aufgrund besserer Alternativen und hoher Kosten kaum mehr Anwendung. Hin und wieder kann der Fibrinkleber heutzutage allerdings noch zusätzlich zur eigentlichen Naht eingesetzt werden, um die Stabilität im Bereich des Rupturspalts zu erhöhen [77]. Die funktionellen Ergebnisse nach alleiniger Klebung zeigen zum Teil gute Ergebnisse sowie niedrige Rerupturraten [100], können Sportlern jedoch keinesfalls empfohlen werden [101].

Das Schweißen einer Sehne ist prinzipiell möglich, hält aber die postoperativ auf sie einwirkenden Kräfte nicht aus, sodass diese Technik keine Relevanz im Alltag hat [102].

Die Rerupturrate beträgt bis zu 4 % und ist im Vergleich zur konservativen Therapie deutlich geringer [49, 73, 103]. Doch steigt die Komplikationsrate in Bezug auf Schäden

des N. suralis oder Wundinfektionen erheblich an [73, 77]. Wills et al. geben das Komplikationsrisiko nach offener Operation mit 20 % an, konnten aber zeigen, dass die meisten Komplikationen das funktionelle Ergebnis unangetastet lassen [75]. Besonders Infektionen können zu schweren Verläufen mit eventuellem Verlust der Achillessehne führen, sodass hier Verfahren zum Ersatz der Sehne notwendig werden. Das Risiko einer Infektion steigt vermutlich auch aufgrund von Nikotinkonsum, peripherer arterieller Verschlusskrankheit, immunsuppressiver Therapie oder Diabetes mellitus [77]. Die Funktion nach offener Naht scheint gute Ergebnisse zu erzielen, besonders hinsichtlich einer Rückkehr in den Sport [104]. Leistungssportler erreichen jedoch häufig nicht mehr das Niveau, das sie vor der Ruptur hatten [40]. Patienten nach operativer Versorgung kehren außerdem schneller an ihren Arbeitsplatz zurück als solche, die konservativ behandelt wurden [73].

1.2.4.2.2 Minimalinvasiv

Die minimalinvasiven Techniken wurden von Ma und Griffith begründet. Sie versuchten die Vorteile sowohl der offen-chirurgischen Naht als auch der konservativen Therapie zu kombinieren. Das Ziel war somit die Senkung der Wundinfektionsrate in Kombination mit der Approximation der Sehnenstümpfe mittels Naht [105]. Zusätzlich ist es möglich, diese Techniken in Lokalanästhesie und ohne Nutzung einer Blutsperre durchzuführen [106]. Wichtig ist jedoch eine rasche Behandlung, da alte Rupturen oft aufgrund von Hämatomen im Rupturspalt schwierig aneinander zu bringen sind. Die Operation sollte daher innerhalb von 7 Tagen erfolgen [49].

Seit der Entwicklung durch Ma und Griffith wurden zahlreiche Modifikationen beschrieben. Hierbei können zwei verschiedene Herangehensweisen unterschieden werden. Die minimalinvasive Technik kann perkutan in Kombination mit einem offenen Vorgehen kombiniert werden. Der offen-chirurgische Teil der Operation versorgt dabei den Rupturspalt und entfernt das Hämatom. Zu diesen Techniken zählen unter anderem die Hannoveraner Technik [80] und eine von Gorschewsky et al. beschriebene Technik, die zwei perkutan angelegte Lengemann-Nähte nutzt und das Rupturufer mit Fibrinkleber repariert [107]. Häufiger werden jedoch rein perkutane Techniken angewandt, zu denen auch die Technik nach Ma und Griffith gehört. Die Dresden-Technik arbeitet mit zwei speziellen Instrumentarien und 2 - 3 langen atraumatischen Nadeln, die jeweils einen

Faden der Stärke USP 0 oder 1 tragen. Hierfür sind verschiedene Materialien, wie z.B. PDS II (Polydioxanon) oder Ethibond (beides Fa. Ethicon GmbH, Norderstedt, Deutschland), denkbar. Das Instrumentarium wird zwischen Peritendineum und Unterschenkelfaszie proximal der Ruptur nach distal geführt und hat am Ende 2 - 3 Rahmennähte zum Ergebnis. Die Technik schont vor allem das Peritendineum und den N. suralis [108, 109]. Auch das Achillon®-Instrumentarium zeigte gute Ergebnisse [110, 111]. In einer biomechanischen Arbeit von Heitman et al. erreichte diese Naht die gleiche Stabilität wie die Krackow-Naht [112]. Die Bunnell-Naht kann auch als minimalinvasive Naht genäht werden und erzielte in einer koreanischen Studie bei 14 Patienten gute Ergebnisse nach einem Follow-Up von 26 Monaten. Es wurden weder Fälle von Rerupturen noch Verletzungen des N. suralis beobachtet [113].

Einige Studien beschreiben, dass die Wundinfektionsrate im Vergleich zu offen-chirurgischen Verfahren deutlich gesenkt werden konnte [110, 114, 115]. Die kosmetischen Ergebnisse sind aufgrund der geringen Zugangsgrößen ebenfalls besser [116]. Vorteilhaft scheint auch die Schonung des Peritendineums zu sein, das bei minimalinvasiven Zugängen kaum eröffnet wird. Das intakte Peritendineum trägt zu einer verbesserten Heilung der Sehne bei [77]. Nachteilig ist jedoch eine verminderte Stabilität im Vergleich zu offenen Nahttechniken, da die optimale Adaptation der Sehnenstümpfe schwieriger ist [114, 117]. Rerupturen werden bei perkutanen Nahttechniken häufiger beobachtet, weshalb Leistungssportler besser mit einer offen-chirurgischen Naht versorgt werden sollten [79]. Verletzungen des N. suralis konnten anfangs häufig beobachtet werden [105]. Verbesserungen in der Technik haben das Risiko dafür allerdings gesenkt [70]. Ebenso scheinen perkutane Nähte nur 50 % der Stärke einer Bunnell-Naht zu besitzen [118].

1.2.5 Rehabilitation

Nach einer operativ versorgten Achillessehnenruptur mussten die Patienten bis in die 1980er Jahre regelhaft einen Gips in 20° Plantarflexion über 6 Wochen und länger tragen [119]. Dies führte jedoch zu Wadenatrophien, verminderter Beweglichkeit im Sprunggelenk und langen Rekonvaleszenzzeiten [120]. Die frühfunktionelle Nachbehandlung zeigt bessere Ergebnisse hinsichtlich der Wadenatrophie [104], eine Belastung ist früher wieder möglich [121], sodass diese Art der Nachbehandlung

heutzutage präferiert wird [122]. Weitere Studien verglichen die beiden Nachbehandlungsoptionen und zeigten ebenfalls bessere klinische Ergebnisse zugunsten der frühfunktionellen Therapie mit einer schnelleren Rückkehr in den Sport oder zur Arbeit [123] und einer geringeren Längung der Achillessehne [124].

Die frühfunktionelle Nachbehandlung wurde in der Literatur in vielen verschiedenen Varianten beschrieben. Sie findet in einer Orthese statt, die es sowohl in starrer als auch flexibler Version gibt [31]. Hin und wieder findet vor der Anpassung einer Orthese auch noch eine kurze Phase in einer Gipsschienung statt [70]. Relevant sind vor allem die Belastung sowie die Bewegungsfreiheit, die zwar frühzeitig gegeben ist, aber dennoch begrenzt werden muss. Die Dorsalextension kann zu Beginn noch nicht freigegeben werden, da es ansonsten zu einer erhöhten Spannung auf die Sehne kommt, die im schlechtesten Fall zu einer Reruptur führen kann [125]. Die Stellung innerhalb der Orthese kann ebenfalls variieren und reicht von der Neutralstellung [125] bis hin zu einer beinahe maximalen Plantarflexion mit keilförmigen Einlagen innerhalb der Orthese [126].

In einer Kadaverstudie wurde die Neutralstellung mit der 30° Plantarflexion an fünf Präparaten bezüglich der auf die Sehne einwirkende Kraft nach Krackow-Naht gemessen. Es konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden [127]. Der Beginn der Belastung nach Operation variiert ebenfalls. Je nach verwendetem Konzept findet diese nach einem Tag oder auch erst nach zwei Wochen statt. Manche Autoren lassen sogar eine sofortige Vollbelastung in der Orthese zu [128]. Ebenso muss bedacht werden, ab wann welche physiotherapeutischen Übungen, z.B. in Bezug auf aktive und passive Bewegung, erlaubt sind und in welchen Schritten welche Freiheits- bzw. Bewegungsgrade freigegeben werden. Direkt nach der Operation können anscheinend alle Freiheitsgrade ohne Belastung erlaubt werden [129]. Zusätzlich muss für die Zeit der Behandlung in einer Orthese oder auch einem Gips eine Thromboseprophylaxe stattfinden [130].

Lymphdrainage und physikalische Therapiemaßnahmen, wie z.B. Wärme-, Elektrotherapie und die Behandlung der Narbe gehören ebenfalls zu den therapeutischen Maßnahmen [70]. Im fortgeschrittenen Nachbehandlungszeitraum werden muskelkräftigende Übungen, Dehnübungen der Flexoren, Gangschulungen sowie die

Verbesserung der Propriozeption (bspw. auf dem Wackelbrett) empfohlen. Der Patient sollte die Übungen auch im häuslichen Umfeld nach Schulung durch einen Physiotherapeuten alleine durchführen [70]. Dies führt alles in allem zu einem komplexen Zusammenspiel mehrerer Stellschrauben, die bei der Planung der Nachbehandlung berücksichtigt werden müssen.

Die Ruptur der Achillessehne ereignet sich meist ohne Fremdverschulden, sodass die Patienten häufig Angst bei der Durchführung der Übungen im Rahmen der Physiotherapie zeigen. Dies sollte ernst genommen werden und von den behandelnden Therapeuten sowie Ärzten offen angesprochen werden, um die Motivation und das Selbstvertrauen des Patienten zu stärken. Der erarbeitete Zeitplan bis zur Wiedererlangung der vollen Sportfähigkeit sollte dabei immer wieder ins Gewissen gerufen werden. Eine Beschwerdefreiheit stellt sich bei adäquater Therapie üblicherweise nach 6 Monaten und die Sportfähigkeit nach etwa einem Jahr ein [77].

1.3 Forschungsfrage

Das Ziel dieser biomechanischen ex vivo Studie an den tiefen Beugesehnen des Schweins ist es, die beiden wohl etabliertesten offen-chirurgischen Nahttechniken in Hinblick auf deren Stabilität miteinander zu vergleichen. Diese Sehnen wurden gewählt, da sie der menschlichen Achillessehne sehr nahekommen und daher als Modell geeignet sind. So soll in einem zyklischen Zugversuch ermittelt werden, welche Nahttechnik nach einer bestimmten Anzahl an Zügen mit unterschiedlichen Kräften eine geringere Dehiszenz im Bereich des Rupturspalts aufweist. Das Biomechaniklabor der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen besitzt hierfür eine Materialprüfmaschine sowie ein optisches Messsystem, für derartige Versuche.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der operativen Behandlung einer akuten Achillessehnenruptur im Bereich der Prädilektionsstelle 2 - 6 cm proximal des Calcaneus, die mit offener Nahttechnik versorgt wird. Nicht berücksichtigt werden die Achillodynie oder chronische Rupturen. Dafür sind oft ausgedehntere Nahttechniken in Form von Verstärkungen der Achillessehne mit autologen Sehnen oder Ersatz durch Muskelgewebe notwendig, wie sie bereits weiter oben beschrieben wurden. Distale Rupturen und solche am muskulotendinösen Übergang sind ebenso ausgeschlossen. Die hier vorliegende

Studie arbeitet bewusst mit totem Material, um die abhängige oder unabhängige Variable der Sehnenheilung auszuschalten.

Das Alleinstellungsmerkmal dieser Studie ist der Vergleich der Nahttechniken nach Krackow und Bunnell – mit jeweils drei zusätzlichen Einzelknopfnähten in Z-Technik am Rupturspalt – in einem dreistufigen, zyklischen Zugversuch. Das Protokoll orientiert sich dabei an einem physiotherapeutischen Rehabilitationsprogramm, das auch hausintern genutzt wird. Ein derartiger Vergleich ist in der Literatur bisher nicht beschrieben worden. Bei der Durchführung der Studie wurde auf die Einhaltung der aktuellen Standards, sowie eine sorgfältige Arbeitsweise geachtet. Im Anschluss daran wurden die erhobenen Messwerte interpretiert, um Schlussfolgerungen zu ziehen. Die gewonnenen Daten sollen zur Klärung der Frage beitragen, welche Nahttechnik und auch welches Nahtmaterial die optimale Versorgung einer akuten Achillessehnenruptur gewährleisten kann. Bei der Fülle an Reparationstechniken und Materialien zur Versorgung einer solchen Ruptur stehen für zukünftige Studien noch viele Kombinationsmöglichkeiten zur Verfügung.

2 Material und Methoden

2.1 Methoden

Zunächst werden die Auswahl und Durchführung der genutzten Nahttechniken beschrieben. Anschließend folgen die Testkriterien sowie das Testverfahren.

2.1.1 Auswahl und Beschreibung der angewandten Nahttechniken

Die Krackow- und Bunnell-Nahttechniken gehören zu den häufigsten offen-chirurgisch angewandten Nahttechniken zur Reparatur einer humanen Achillessehnenruptur [77]. Die Krackow-Naht wird häufig auch als der Goldstandard der offenen Techniken betitelt.

Die Präparate wurden vor Beginn der jeweiligen Nahttechnik mithilfe eines Stiftes markiert, um für jede einzelne Naht die gleichen Abstände einhalten zu können. Angezeichnet wurden die Sehnen bei 1,0 cm, 1,8 cm und 2,6 cm Abstand distal und proximal des Rupturspalts. Diese Markierungen stellen jeweils Ein- bzw. Ausstiche der Naht dar. Der Rupturspalt wurde stets am Ansatz der Unterstützungssehne mithilfe eines Skalpell Nr. 21 mit einem glatten, geraden Schnitt angelegt.

Die Krackow-Naht beginnt 2,6 cm proximal des Rupturspalts. Zuerst wird der Faden hier quer über die Sehne gelegt und anschließend je von links und rechts ein Drittel der Sehnenbreite gefasst. Der Durchstich erfolgt von posterior nach anterior. Der Ausstich kommt dabei leicht proximal des querverlegten Fadens aus der Sehne und wird in axialer Richtung nach distal gezogen. 1,8 cm proximal des Rupturspalts wird der Faden nun quer zur Sehne nach lateral gelegt und erneut ein Drittel der Sehnenbreite gefasst. Der Ausstich kommt ebenfalls knapp proximal des quer verlaufenden Fadens zu liegen und wird nach distal gezogen. So entsteht die typische Leiterstruktur einer Krackow-Naht, die sich bei jedem Zug nach distal selbst beklemmt. 1,0 cm proximal des Rupturspalts wird ebenso vorgegangen wie bereits oben beschrieben. Nun folgt sowohl rechts als auch links der Stich durch das proximale Rupturufer und ein Festziehen der Fäden. Im nächsten Schritt werden die Rupturufer einander angenähert. Es muss darauf geachtet werden, dass der Faden in beiden Rupturufern auf gleicher Höhe und Breite verläuft, damit die Naht nicht verzogen wird. Der zweite Sehnenstumpf wird ebenso bei 1,0 cm, 1,8 cm und 2,6 cm distal des Rupturspalts mit der Leiterstruktur nach Krackow versorgt. Neun chirurgische Knoten beenden die Kern-Nahttechnik nach Krackow (siehe *Abbildung 2.1*).

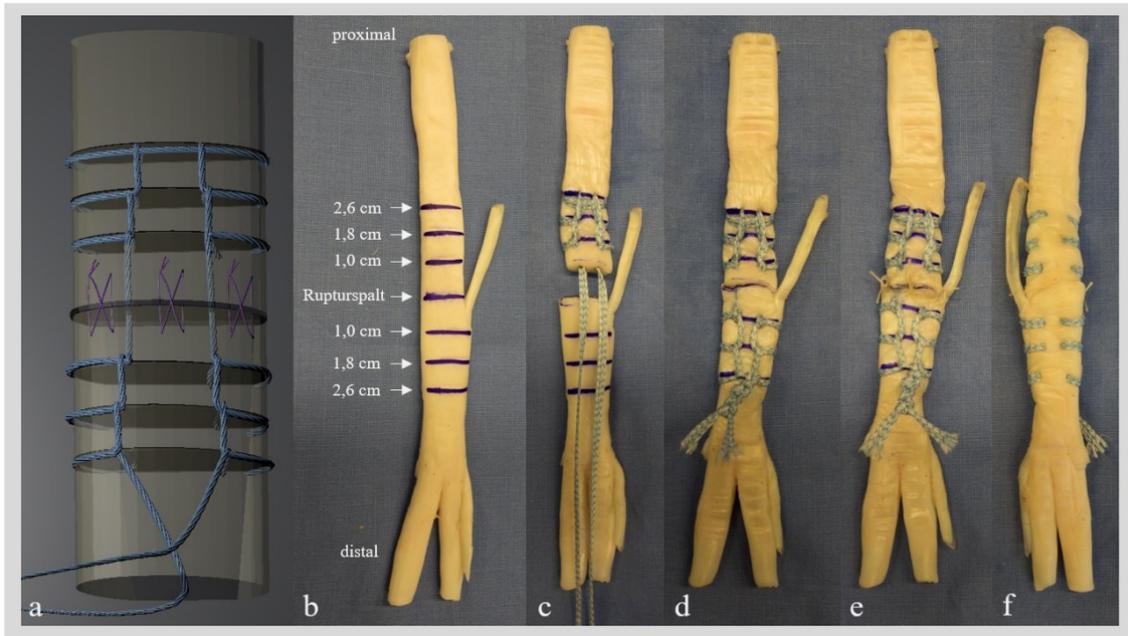


Abbildung 2.1: Krackow-Nahttechnik

- a) schematische Darstellung der Krackow-Naht und der drei Z-Nähte in ventraler Ansicht (erstellt mit Blender, Version 2.79b)
- b) Sehne nach Markierung der verschiedenen Höhen und des Rupturspalts
- c) Naht des proximalen Sehnenendes bis zum Rupturspalt
- d) Komplettierung der Naht im distalen Sehnenende mit neun chirurgischen Knoten
- e) zusätzliche Anlage von drei epitendinösen Z-Nähten
- f) Ansicht von dorsal

Die Bunnell-Naht beginnt 2,6 cm proximal des Rupturspalts mit einem horizontal verlaufenden Stich, der die mittleren zwei Viertel der Sehne fasst. Die beiden Fadenenden werden so weit durchgezogen, bis beide überstehenden Fadenreste die gleiche Länge haben. Nun wird der linke Faden schräg nach distal in Richtung der Markierung bei 1,8 cm gestochen. Der Ausstich kommt dabei so zu liegen, dass rechts lateral noch ein Viertel der Sehnenbreite unberührt bleibt. Der rechte Faden wird ebenfalls nach schräg distal in Richtung derselben Markierung gestochen, verläuft dabei jedoch intratendinös unterhalb des links eingestochenen Fadens. Links lateral bleibt auch hier ein Viertel der Sehne vom Faden unberührt. Von der Markierung bei 1,8 cm wird ebenso vorgegangen, um die bei 1,0 cm zu erreichen. Der links eingestochene Faden liegt dabei intratendinös stets oberhalb des rechten Fadens. So entsteht eine sogenannte Schnürsenkelnaht. Nun erfolgt auch bei dieser Nahttechnik die Überwindung des Rupturspalts. Dies gleicht dem Vorgehen bei der Krackow-Naht. Anschließend wird die Naht in der beschriebenen Technik für das distale Sehnenende fortgeführt. Bei Erreichen der Markierung bei 2,6 cm

distal des Rupturspalts wird die Kern-Naht ebenfalls durch neun chirurgische Knoten beendet (siehe *Abbildung 2.2*).

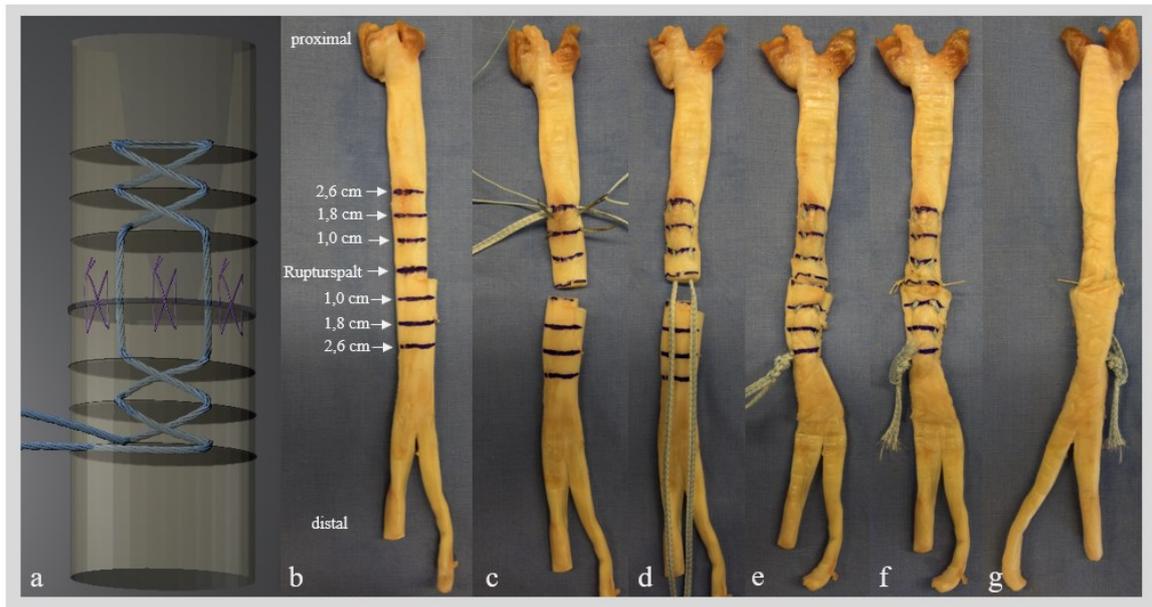


Abbildung 2.2: Bunnell-Nahttechnik

- a) schematische Darstellung der Bunnell-Naht und der drei Z-Nähte in ventraler Ansicht (erstellt mit Blender, Version 2.79b)
- b) Sehne nach Markierung der verschiedenen Höhen und des Rupturspalts
- c) Darstellung der schrägen Stiche indem die Nadeln belassen wurden, der linke Faden kommt dabei intratendinös oberhalb des rechten Fadens zu liegen
- d) Naht des proximalen Sehnenendes bis zum Rupturspalt
- e) Komplettierung der Naht im distalen Sehnenende mit neun chirurgischen Knoten
- f) zusätzliche Anlage von drei epitendinösen Z-Nähten
- g) Ansicht von dorsal

Nach Beendigung der jeweiligen Kern-Naht wurden zusätzlich noch drei epitendinöse Z-Nähte angelegt, deren Ein- bzw. Ausstiche jeweils 0,6 cm distal und proximal des Rupturufers zu liegen kamen. Es erfolgte eine gleichmäßige Verteilung der Z-Nähte. Die beiden Fäden der Kern-Naht, die das Rupturufer passieren, werden jeweils links bzw. rechts lateral von einer Z-Naht begleitet. Die dritte Z-Naht liegt zwischen den beiden Fäden in der Mitte der Sehne.

2.1.2 Auswahl des Testverfahren

Für die Auswahl des Testverfahrens fand eine Orientierung an einem Rehabilitationsprogramm nach operativ versorgter Achillessehnenruptur statt. Dabei sollten die auf die Präparate einwirkenden Kräfte, denen bei Belastung des menschlichen

Gangs in der Realität möglichst nahekommen. Berechnungen ergaben eine Belastung von 553 N während des normalen Gangs. Bei Immobilisation ergaben sich in Neutralstellung 369 N, mit einer Erhöhung von 0,5 Inch (= 1,27 cm) Kräfte von 282 N und mit einer Erhöhung von 1 Inch (= 2,54 cm) Kräfte von 191 N [131]. Orishimo et al. untersuchten die Kräfte, die bei passiver Bewegung des Sprunggelenks auf die Achillessehne wirkten. Das Kniegelenk war dabei flektiert. In Neutralstellung ergab sich 17,8 N und bei passiver 10° Dorsalextension 98,6 N [132]. Für diese Studie wurde die Minimalkraft $F_{min} = 20\text{ N}$ verwendet, die in etwa der Kraft bei Neutralstellung von 17,8 N entspricht. Das dreistufige Testprotokoll verwendete als Maximalkräfte $F_{max} [N]$ jeweils die einwirkende Kraft bei passiver Dorsalextension von 100 N, beim Gang mit 1 Inch Erhöhung von 191 N und beim Gang in Neutralstellung von 369 N. Die Frequenz $f [Hz]$ des menschlichen Gangs wurde auf 1 Hz festgelegt. Lee et al. nutzten in ihrer zyklischen Studie schon das gleiche Testverfahren, jedoch mit anderen Nahttechniken, an menschlichen Achillessehnen von Körperspendern [133]. In den Vorversuchen mussten die Präparate zunächst 300 Zyklen absolvieren, was in den Hauptversuchen jedoch auf 250 Zyklen reduziert werden konnte.

2.1.3 Auswahl der Testkriterien

Das entscheidende Testkriterium während des Ablaufs des dreistufigen Testprotokolls war die sich bildende Dehiszenz im Rupturspalt. Mit Dehiszenz ist die Spaltbildung in mm gemeint, die das Auseinanderweichen der beiden Sehnenenden unter Belastung beschreibt. Es wurde dabei die Anzahl der bereits absolvierten Zyklen (Zykluszahl c) bis zum Erreichen einer Dehiszenz gemessen. Dies wurde noch weiter unterteilt in eine erstmalig sichtbare Spaltbildung $c_{initial}$ sowie einer Spaltbildung von 3 mm (c_{3mm}) und 5 mm (c_{5mm}). Zusätzlich wurde vorsorglich noch die Spaltbildung beim 200. und 250. Zyklus jeder Teststufe ermittelt, falls Präparate keine Dehiszenz von 3 mm oder 5 mm aufweisen sollten und eine Berechnung nötig werden würde. Dies war jedoch nur möglich, da sich die Dehiszenzbildung in den Vorversuchen ab dem 200. - 250. Zyklus als beinahe linear präsentierte.

2.2 Material

In diesem Abschnitt wird die Präparation der tiefen Beugesehnen der Hinterläufe von Schweinen beschrieben, sowie die beiden verwendeten Prüfmaschinen. So wurden für die

durchgeführten Versuche die Materialprüfmaschine ZwickiLine Z2.5 (Fa. ZwickRoell, Ulm, Deutschland) und das optische Messsystem PONTOS 5M (Gesellschaft für Optische Messtechnik, Braunschweig, Deutschland) zur Bestimmung der Abstände der Rupturufer bzw. der Spaltbreite genutzt. Auch das Nahtmaterial wird näher beschrieben.

2.2.1 Präparate

Für biomechanische Testungen eignen sich vor allem die tiefen Beugesehnen von Schweinen, da sie der menschlichen Achillessehne ähneln und in deutlich höheren Stückzahlen zu bekommen sind als humane Präparate. Die Verwendung der Sehnen machte keinen Antrag bei der Ethik-Kommission nötig, da es sich um tierische Nebenprodukte handelt, die bei der regulären Verarbeitung von Schlachttieren anfallen. Sowohl Nutzung als auch Transport wurden jedoch dem Veterinäramt gemeldet.

In einem nahegelegenen Schlachthof wurden die rechten Hinterläufe von zwei Jahre alten Schweinen distal des Kniegelenks abgetrennt. Die erworbenen Präparate wurden zur besseren Fixierung in einen Schraubstock eingespannt. Nun erfolgte ein Hautschnitt auf der plantaren Seite von proximal nach distal in Richtung der beiden zentralen Zehen, wobei der Schnitt sich hier nun auf die beiden Zehenenden aufteilt, sodass ein nahezu Y-förmiger Zugang entsteht.

In den nächsten Schritten wurde das Haut- und Subkutangewebe entfernt sowie die oberflächliche (*Tendo musculi flexoris digitorum superficialis*) und tiefe Beugesehne (*Tendo musculi flexoris digitorum profundus*) identifiziert, indem man die Sehnenscheiden eröffnete. Die oberflächliche Beugesehne wurde komplett entfernt. Proximal wurde die tiefe Beugesehne von ihrem Muskelbauch getrennt, sodass man sich nun unter adäquatem Zug dem distalen Ende widmen konnte. Hier teilt sich die Sehne in vier Teile, die jeweils zu den Phalanges distales der Zehen I - IV ziehen. Die Sehnen der Zehen I und IV wurden basisnah abgetrennt, sodass lediglich die beiden zentralen Sehnenausläufer übrigblieben. Diese wurden ansatznah abgetrennt. Zusätzlich vereinigt sich eine Unterstützungssehne mit der tiefen Beugesehne. Dieser Punkt stellte stets den Ort der späteren Ruptur dar. Die Unterstützungssehne wurde ebenfalls entfernt (siehe *Abbildung 2.3*).

Nach Bergung der Sehne wurde diese vermessen. Die Breite und die Dicke wurden jeweils am Ansatz der Unterstützungssehne gemessen, um daraus die Querschnittsfläche A der späteren Rupturufer berechnen zu können. Die Sehnen wurden einzeln in Gefrierbeutel gepackt und mit einer ansteigenden Nummerierung versehen, die jeweils den Präparationstag und die Sehnenummer enthielt. Die Sehnen wurden bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiefgefroren und zwei Stunden vor Durchführung der Versuche aufgetaut.

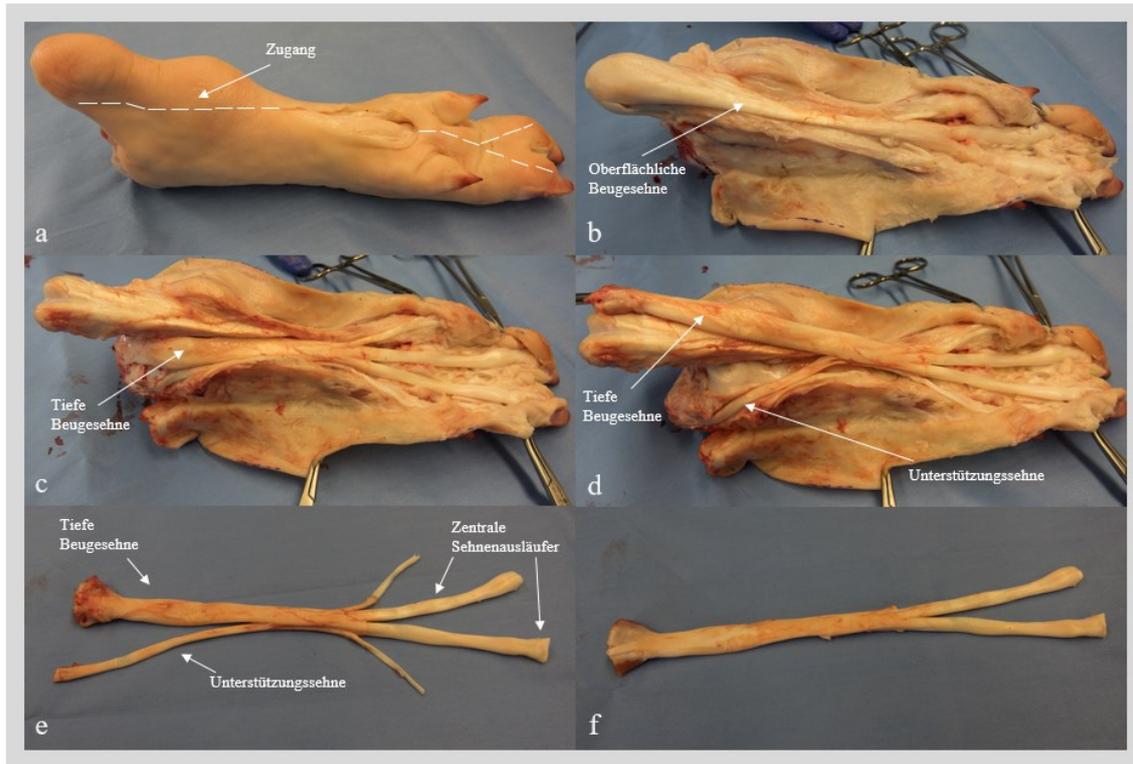


Abbildung 2.3: Präparation der tiefen Beugesehne

- a) Ansicht von plantar lateral mit eingezeichnetem Zugangsweg
- b) Darstellung der oberflächlichen Beugesehne nach Entfernung der Haut und des Subkutangewebes
- c) Situs nach Entfernung der oberflächlichen Beugesehne
- d) Mobilisation der tiefen Beugesehne mit Abtrennung des Muskelbauchs und Darstellung der Unterstützungssehne
- e) Tiefe Beugesehne nach Entnahme mit allen vier Sehnenausläufern und der Unterstützungssehne
- f) Tiefe Beugesehne nach Entfernung der beiden seitlichen Ausläufer und der Unterstützungssehne

2.2.2 Prüfmaschinen

Die Versuche wurden mithilfe von zwei Prüfmaschinen durchgeführt. Hierfür wurden eine Materialprüfmaschine und ein optisches Messsystem verwendet. Die tiefen Beugesehen wurden mit Spannmitteln in der Materialprüfmaschine fixiert.

2.2.2.1 Materialprüfmaschine

Es wurde die ZwickiLine Z2.5 (Fa. ZwickRoell, Ulm, Deutschland, siehe *Abbildung 2.4*) als Materialprüfmaschine genutzt, die einen servomotorischen Antrieb nutzt. Es können Versuche in einachsiger Druck- und Zugrichtung mit einer maximalen Prüfkraft von 2,5 kN durchgeführt werden [134]. Zusätzlich wurde die Kraftmessdose Xforce HP 2,5 kN (Fa. ZwickRoell, Ulm, Deutschland) angebracht. Diese verfügt über einen Messbereich von 165 % der 2,5 kN der Materialprüfmaschine [135]. Die hier gemessenen Daten wurden mit 500 Hz an den angeschlossenen Computer übertragen und dort mit dem Programm testXpert II™ (Fa. ZwickRoell, Ulm, Deutschland) dokumentiert und im Nachhinein ausgewertet. Die Sehnen wurden mit den Schraub-Probenhaltern Typ 8133 (Fa. ZwickRoell, Ulm, Deutschland) und ungehärteten, gewellten Stahlbackeneinsätzen (Höhe x Breite: 30 x 32 mm) fixiert [136]. Die Schraub-Probenhalter sind für eine maximale Prüfkraft bis 1 kN konstruiert [137]. Am unteren Ende der Materialprüfmaschine wurden die Halter fest und am oberen Ende verfahrbar fixiert (siehe *Abbildung 2.5*). Auch die Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit spielen eine Rolle, wobei diese zwischen 10 und 35 °C bzw. 20 und 90 % liegen müssen, um verwertbare Ergebnisse zu erhalten [134].

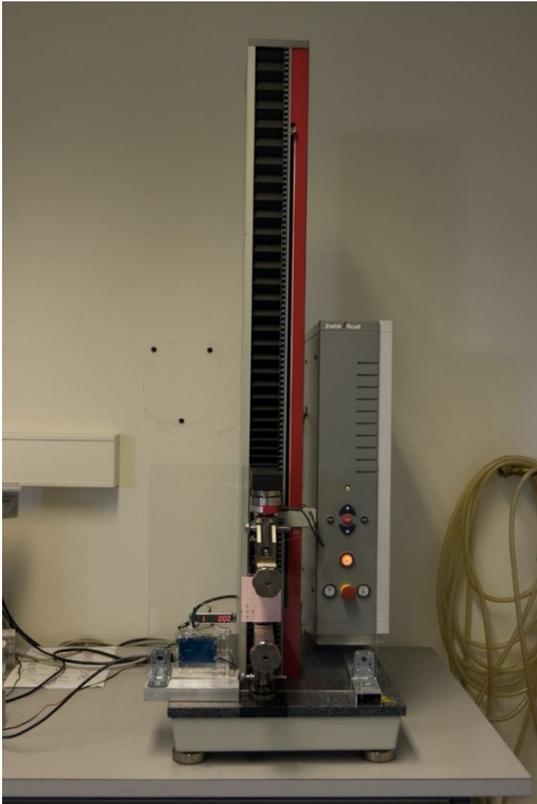


Abbildung 2.4: Materialprüfmaschine ZwickiLine Z2.5 (Fa. ZwickRoell, Ulm, Deutschland)

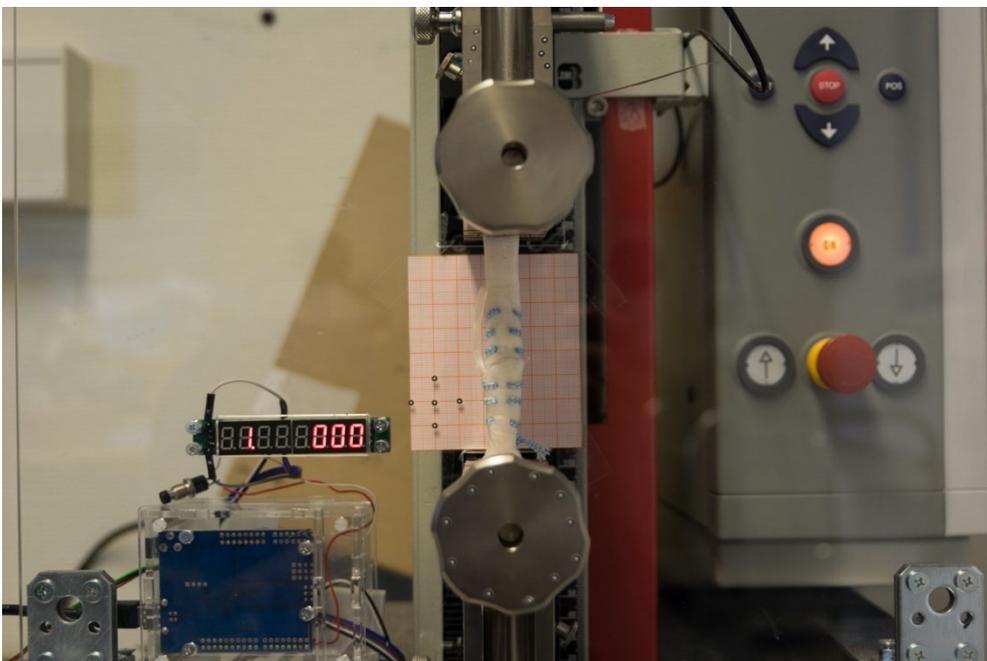


Abbildung 2.5: Die Abbildung zeigt eine mit der Krackow-Nahttechnik versorgte Sehne, die mithilfe der Probenhalter fixiert wurde. Zusätzlich ist unten links die 7-Segment-Anzeige zu erkennen, die sowohl Serien- als auch Zykluszahl anzeigt.

2.2.2.2 Optisches Messsystem

Die PONTOS 5M (Gesellschaft für Optische Messtechnik, Braunschweig, Deutschland, siehe *Abbildung 2.6*) diente als optisches Messsystem. Sie verfügt über zwei Kameras, die eine dreidimensionale Aufnahme der Umgebung und eine genaue Vermessung mithilfe von Messpunkten ermöglicht. In dieser Studie erfolgte jedoch eine manuelle Messung der entstandenen Spaltentwicklung. Pro Sekunde können maximal 15 Bilder generiert werden. Die Auflösung der Kamera beträgt 2448 x 2050 Pixel [138].

Das System wurde so positioniert, dass eine gleichmäßige Ausleuchtung der Sehne während des Zugvorgangs erzielt werden konnte. Zusätzlich wurde die PONTOS 5M über die IO-Karte mit der ZwickiLine Z2.5 gekoppelt, um eine Bildaufnahme zu vorher festgelegten Zykluszahlen gewährleisten zu können. Außerdem wurde eine 7-Segment-Anzeige innerhalb des erfassten Bereichs der PONTOS 5M Kamera angebracht, um sowohl die aktuelle Serie als auch die Anzahl der bereits durchlaufenen Zyklen zu dokumentieren. Gesteuert wurde dies mithilfe der bereits erwähnten IO-Karte und eines Arduino Uno R3 (Arduino, Turin, Italien).

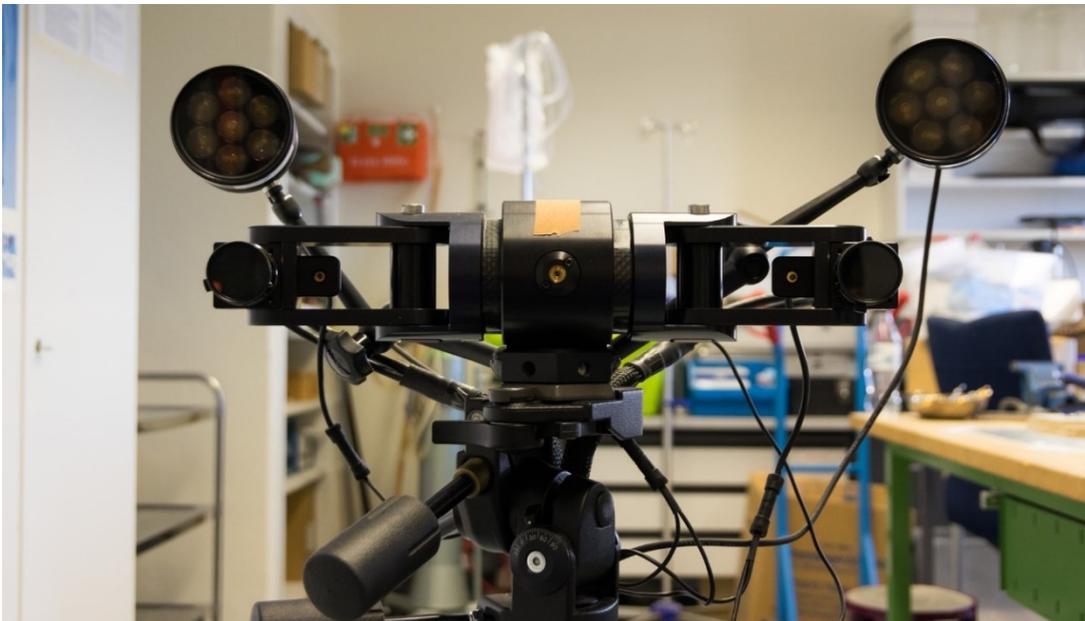


Abbildung 2.6: Optisches Messsystem PONTOS 5M mit zwei Kameras

2.2.3 Nahtmaterial

Die Kern-Naht wurde mithilfe des 2 mm breiten Fibertape® (Fa. Arthrex, Naples, FL, USA, siehe *Abbildung 2.7*) genäht. Es ist ein nicht-resorbierbares, geflochtenes Band aus ultrahoch-molekularem Polyethylen (UHMWPE) und Polyester-Garn, welches die Kernstruktur aus Fiberwire® umgibt. Der Kern des Fiberwire® besteht wiederum aus UHMWPE-Garn. Der Kern wird von einer geflochtenen Hülle aus UHMWPE und Polyester umgeben wird. Der Durchmesser verringert sich an beiden Enden des Bandes jeweils auf die Größe des Fiberwire® der Stärke 2 (Durchmesser von ca. 0,5 mm) nach USP. Das Band hat eine Länge von 137,2 cm. Das Fibertape® ist sowohl für die Adaptation als auch Ligatur von Weichgewebe gedacht und findet seine Anwendung vor allem in orthopädischen Operationsverfahren [139].

Die drei adaptierenden Z-Nähte am Rupturufer wurden mit einem 3-0 Vicryl SH-1 plus (Fa. Ethicon, Somerville, NJ, USA) angefertigt. Vicryl besteht aus Polyglactin 910, das ein Copolymer aus Glycolid und Lactid darstellt. Der Durchmesser von USP 3-0 entspricht etwa 0,2 mm. Der Faden hat eine Länge von 70 cm. Es wurden die armierten Nadeln SH-1 plus genutzt, die flache Rundkörpernadeln sind und eine Länge von 22 mm aufweisen, um die Gewebetraumatisierung möglichst gering zu halten. Dieser Faden ist ebenfalls für die Adaptation und Ligatur von Weichgewebe vorgesehen [140].

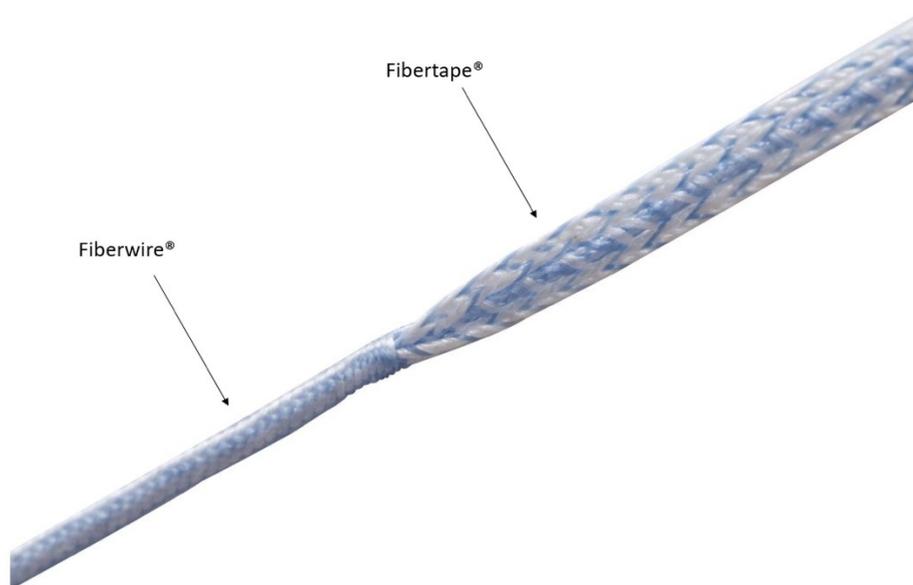


Abbildung 2.7: Das 2 mm breite Fibertape® geht an den Enden in den Fiberwire® der Stärke 2 über (Quelle: Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Arthrex, Naples, FL, USA)

2.3 Durchführung und Dokumentation

Es folgt die Beschreibung der Durchführung und Dokumentation der Versuche im Rahmen dieser Arbeit.

2.3.1 Durchführung

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf dem Testprotokoll sowie der Abstimmung der beiden Prüfmaschinen zur korrekten Durchführung der Versuche.

2.3.1.1 Vorbereitung und Naht der Sehne

Die Präparate wurden zwei Stunden vor Versorgung mit der jeweiligen Nahttechnik bei Zimmertemperatur (etwa 21 °C) aufgetaut. Durch das Einfrieren und Auftauen der Sehnen entstand ein systematischer Messfehler. Dieser kann aus Gründen der Praktikabilität jedoch vernachlässigt werden. Ein Austrocknen der Sehnen wurde während der gesamten Versuchsdurchführung mithilfe von Kochsalzlösung vermieden.

Genäht wurde mit einer Spannvorrichtung, die den Nähvorgang im Operationssaal möglichst gut nachbildete. Die Nahttechniken wurden bereits ausführlich im Kapitel 2.1.1 beschrieben.

2.3.1.2 Testprotokoll und Ablauf

Das zyklische Testprotokoll wurde auf dem Rechner der ZwickiLine Z2.5 mithilfe von testXpert II™ programmiert und gestartet. Insgesamt musste ein Präparat drei Serien durchlaufen. Sollte es am Ende einer Serie bereits zu einer Dehiszenz > 5 mm gekommen sein, wurde die nächste Serie nicht mehr gestartet und das Präparat hatte somit bereits frühzeitig versagt.

Nach dem Einspannen der genähten Sehne in die Schraub-Probenhalter wurde die Kraftmessdose auf deren Eigengewicht genullt. Dies stellt gleichzeitig den Startpunkt der Messung dar. Pro Serie wurden 250 Zyklen durchlaufen. Die Minimalkraft F_{min} betrug stets 20 N. Die Maximalkraft F_{max} variierte je nach Serie und betrug 100 N, 191 N bzw. 369 N (siehe *Tabelle 2.1* und *Abbildung 2.8*). Die Frequenz f wurde auf 1 Hz festgelegt.

Tabelle 2.1: Minima und Maxima der jeweiligen Testserie

Serie	Minimalkraft F_{min} [N]	Maximalkraft F_{max} [N]	Frequenz f [Hz]
1. Serie	20	100	1
2. Serie	20	191	1
3. Serie	20	369	1

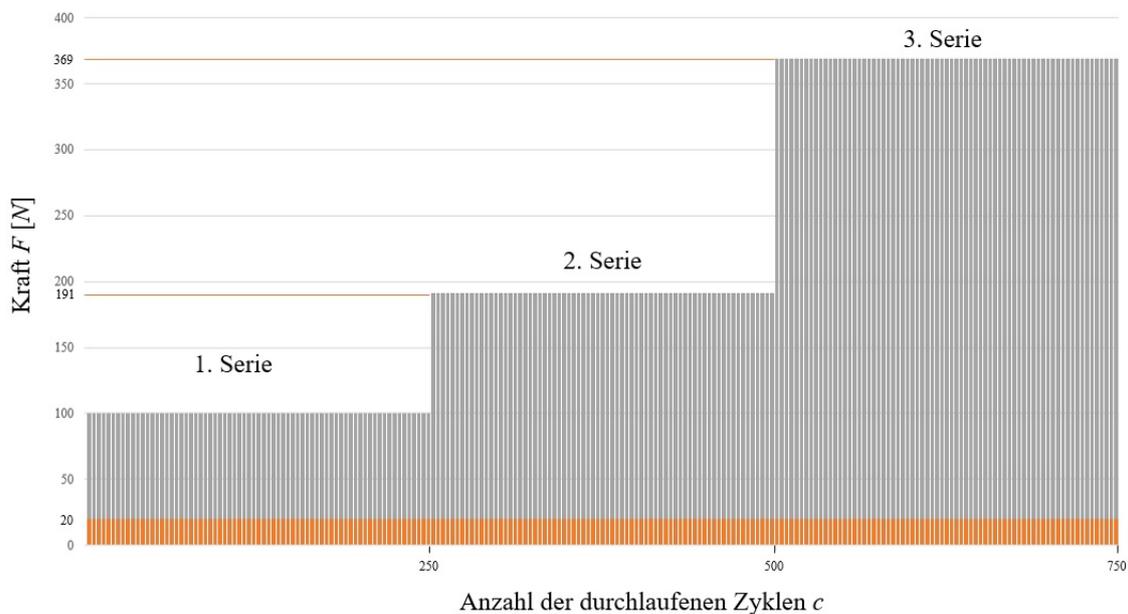


Abbildung 2.8: Graphische Darstellung des zyklischen Testprotokolls mit drei Belastungsserien

2.3.1.3 Abstimmung der Prüfmaschinen

Die Kopplung der ZwickiLine Z2.5 und der PONTOS 5M erfolgte mithilfe der IO-Karte der Materialprüfmaschine. Sobald ein Maximum in einer Serie erreicht wurde, sendete testXpert II™ ein elektrisches Signal an das optische Messsystem. Zur Auswertung war es jedoch nicht nötig, bei jedem Erreichen eines Maximums ein Bild zu generieren. Vor allem zu Beginn und zum Schluss einer Serie wurden viele Aufnahmen erstellt (siehe Tabelle 2.2). Wichtig waren auch die Aufnahmen bei Zyklus 200 und 250, die in die spätere Auswertung miteinfließen. Bei einer Kraft von 5 N bestand eine geringe Vorspannung der Sehne, sodass hier eine Aufnahme zum späteren Vergleich und Ermittlung der tatsächlichen Weite des Rupturspalts erstellt wurde.

Tabelle 2.2: Akquirierte Bilder der PONTOS 5M entsprechend des Zyklusbereichs

Zyklusbereich	Auslösen der PONTOS 5M bei Erreichen
1 - 20	aller Maxima
21 - 50	jedes 2. Maximums
51 - 100	jedes 5. Maximums
101 - 195	jedes 10. Maximums
196 - 205	aller Maxima
206 - 245	jedes 10. Maximums
246 - 250	aller Maxima

2.3.2 Dokumentation

Die Dokumentation der Versuche erfolgte sowohl mithilfe der Software testXpert II™, die der Steuerung der ZwickiLine Z2.5 diente, als auch mit der PONTOS-Software zur Steuerung des optischen Messsystems PONTOS 5M. Hierfür waren zwei Rechner notwendig. Mit testXpert II™ wurde die Kraft F [N], Zeit t [s] sowie der Verfahrweg der oberen Traverse s [mm] aufgezeichnet. Die Dehiszenz d [mm] konnte aufgrund der Elongation der Sehne nicht mithilfe dieser Software ausgewertet werden, sodass hierfür das optische Messsystem PONTOS 5M sowie dessen Software zur Bestimmung der Dehiszenz d mittels Bildpunkten genutzt wurde. Die Zuordnung der Bilder zum jeweiligen Zyklus erfolgte über die 7-Segment-Anzeige, die die Seriennummer sowie Zyklusanzahl abbildete.

2.4 Auswertung

Die statistische Auswertung der Vor- und Hauptversuche erfolgte mithilfe der Software IBM SPSS Statistics 25 (International Business Machines Corporation, Amonk, NY, USA) und G*Power 3.1 (Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf). Dabei erfolgte die Erstellung der Box-Plots, die Berechnung der Normalverteilung sowie die Durchführung der Signifikanztests mithilfe von SPSS Statistics 25. G*Power wurde für die Berechnung der Effektstärke, der Power sowie der erforderlichen Gruppengröße genutzt.

2.4.1 Zielgrößen

Die Dehiszenz im Rupturspalt stellt die relevante Zielgröße dieser Arbeit dar. Diese wurde weiter in drei Zielgrößen unterteilt:

1. Anzahl der durchlaufenen Zyklen $c_{initial}$, die zu einer initialen Spaltbildung führten
2. Anzahl der durchlaufenen Zyklen c_{3mm} , die zu einer Spaltbildung von 3 mm führten
3. Anzahl der durchlaufenen Zyklen c_{5mm} , die zu einer Spaltbildung von 5 mm führten

In der Literatur werden verschiedene Zielgrößen bei zyklischen Zugversuchen untersucht. Die Entscheidung für die drei beschriebenen Zielgrößen erfolgte aufgrund der Annahme, dass eine Heilung ab einer Dehiszenzbildung von 3 mm unwahrscheinlich ist. In der Literatur wird aber auch häufig die Zielgröße einer Spaltbildung von 5 mm genutzt, sodass diese zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls ausgewertet wurde.

2.4.2 Signifikanzniveau und Power

Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde mit $\alpha = 5\%$ (0,05) festgesetzt, wie dies allgemein üblich ist. Da es in den Versuchen zu einer multiplen Testung kam, wurde eine Korrektur nach der Bonferroni-Methode angewandt, sodass sich das Signifikanzniveau auf $0,01\bar{6}$ ($p = \frac{\alpha}{n} = \frac{0,05}{3}$) änderte. Die Power sollte nicht unter 80 % liegen.

2.4.3 Normalverteilung

Um die Normalverteilung der Zielgrößen zu klären, wurde ein Test auf Normalverteilung durchgeführt. Im Voraus wurde von nicht-normalverteilten Zielgrößen ausgegangen. Sollte die Annahme der Nicht-Normalverteilung bestätigt werden, würde zusätzlich ein nicht parametrischer Test angewandt werden. Im Gegensatz dazu wurde bei der Querschnittsfläche A [mm^2] der Sehnenrupturer von einer Normalverteilung ausgegangen. Hierfür sollte ebenfalls ein Test auf Normalverteilung angewandt werden.

2.4.4 Signifikanztest

Es konnten nur nicht-parametrische Tests für die Zielgrößen verwendet werden, da es sich bei diesen um Laufzeitvariablen handelt. Jedem Tier wurde nur die Sehne des rechten Hinterlaufs entnommen, sodass die Proben unverbunden sind. Hierfür eignet sich der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test. Für die Querschnittsfläche wurde mit einer Normalverteilung gerechnet, sodass hier ein Student's t-Test zu nutzen wäre. Sollte sich

keine Normalverteilung zeigen, wäre ebenfalls ein Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test zu wählen. Ob nun die exakte oder asymptotische Signifikanz zur Auswertung herangezogen wird, hängt maßgeblich von der Gruppengröße ab. Sobald die Größe der Gruppe > 30 beträgt, sollte die asymptotische Signifikanz gewählt werden. Bei $n \leq 30$ wurde die exakte Signifikanz gewählt.

2.4.5 Zuordnung der Präparate und Fallzahlplanung

Die Sehnen wurden nicht anhand der Querschnittsfläche einer Gruppe zugeteilt, sondern nach der laufenden Nummer folgend entnommen und mit der jeweiligen Naht versorgt. Die Vorversuche dienten der Fallzahlplanung der Hauptversuche. Hierfür wurden je 10 Sehnen pro Nahttechnik genutzt. Die errechnete Effektstärke der Vorversuche sollte schließlich die Gruppengröße der Hauptversuche bestimmen.

2.4.6 Vorversuche

Die Vorversuche dienten der Findung der Nahttechniken sowie der Errechnung der nötigen Gruppengröße für die Hauptversuche. Es wurden die Krackow-Nahttechnik – mit und ohne Z-Nähte – sowie die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten an jeweils 10 Sehnen durchgeführt.

In den Vorversuchen wurden noch 300 Zyklen pro Serie durchlaufen. Dies konnte in den Hauptversuchen aufgrund des annähernd linearen Verlaufs der Dehiszenzbildung auf 250 Zyklen abgesenkt werden. Die Vergleiche der einzelnen Nahttechniken wurden in den folgenden Diagrammen mithilfe der Box-Plots visualisiert. Der Kasten bildet dabei den Bereich von der 25. - 75. Perzentile ab, den sogenannten Interquartilsabstand (IQR). Die Trennlinie stellt den Median dar. Mithilfe der Whisker (Verlängerungslinien an der Box) werden Werte angezeigt, die das bis zu 1,5-fache des IQR betragen. Ausreißer, die mithilfe eines Kreises dargestellt werden, sind Werte zwischen dem 1,5- und 3-fachen des IQR. Ausreißer in Sternform sind größer als das 3-fache des IQR.

2.4.6.1 Zykluszahl bei einer initialen, 3 mm und 5 mm Spaltbildung

Der Mittelwert und die Standardabweichung für die initiale Spaltbildung betrug für die Krackow-Nahttechnik ohne Z-Nähte $1,00 \pm 0,00$. Der Median betrug 1,00. Die 25. Perzentile (Q1) und 75. Perzentile (Q3) beliefen sich jeweils auf 1,00. So ergab sich ein Interquartilsabstand (IQR) von 0. Auch Minimum und Maximum erbrachten jeweils 1. Folglich ergab sich eine Spannweite von 0. Die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten hatte einen Mittelwert von 46,20 mit einer SD von 54,13. Der Median betrug 24,50. Für die 25. Perzentile ergab sich 1,00 sowie 98,25 für die 75. Perzentile. Somit ergab sich hier ein IQR von 97. Das Minimum betrug 1, das Maximum 146, sodass die Spannweite 145 betrug. Für die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte sich ein Mittelwert mit SD $104,30 \pm 117,30$. Der Median ergab 61,00. Die 25. Perzentile belief sich auf 6,50 und die 75. Perzentile auf 184,75. Dies ergab somit eine IQR von 178. Das Minimum war hier ebenfalls 1, das Maximum 311. Somit ergab sich hier eine Spannweite von 310.

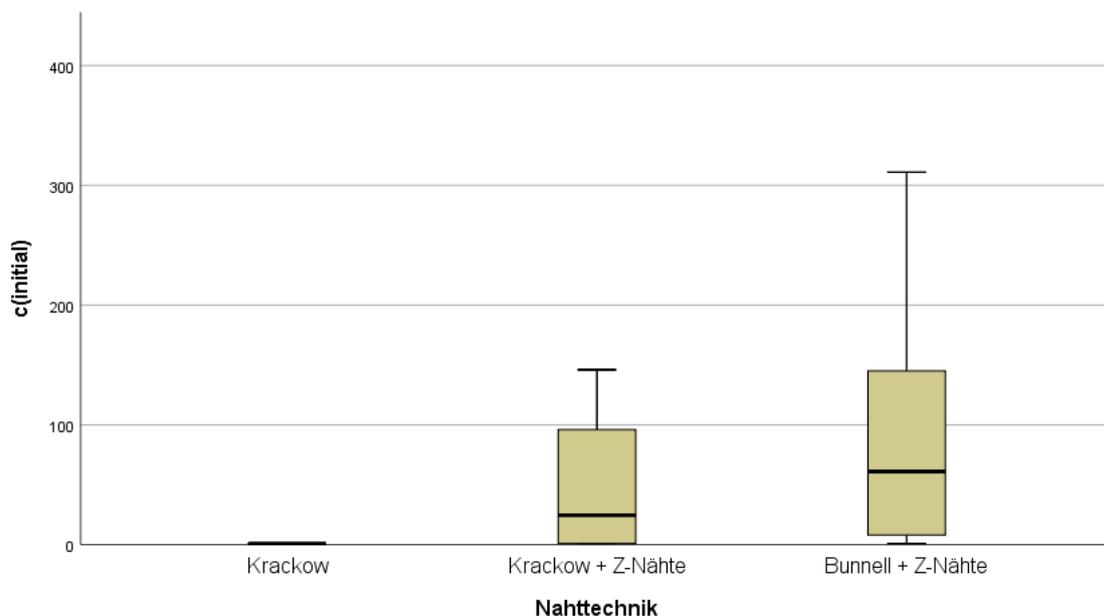


Abbildung 2.9: Box-Plot der gemessenen Werte für die initiale Spaltbildung in den Vorversuchen

Für die Spaltbildung von 3 mm ergab sich für die Krackow-Nahttechnik ohne Z-Nähte ein Mittelwert und eine SD von $4,00 \pm 7,09$ sowie ein Median von 2,00 und einem IQR von 2. Die Spannweite betrug 23. Die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten ergab $114,00 \pm 128,15$ für den Mittelwert und die SD. Der Median betrug 61,00 und der IQR 234. Die Spannweite ergab 300. Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten erbrachte einen Mittelwert und eine SD von $289,10 \pm 105,01$ sowie einen Median von 302,50 und einen IQR von 106. Die Spannweite betrug hier 384.

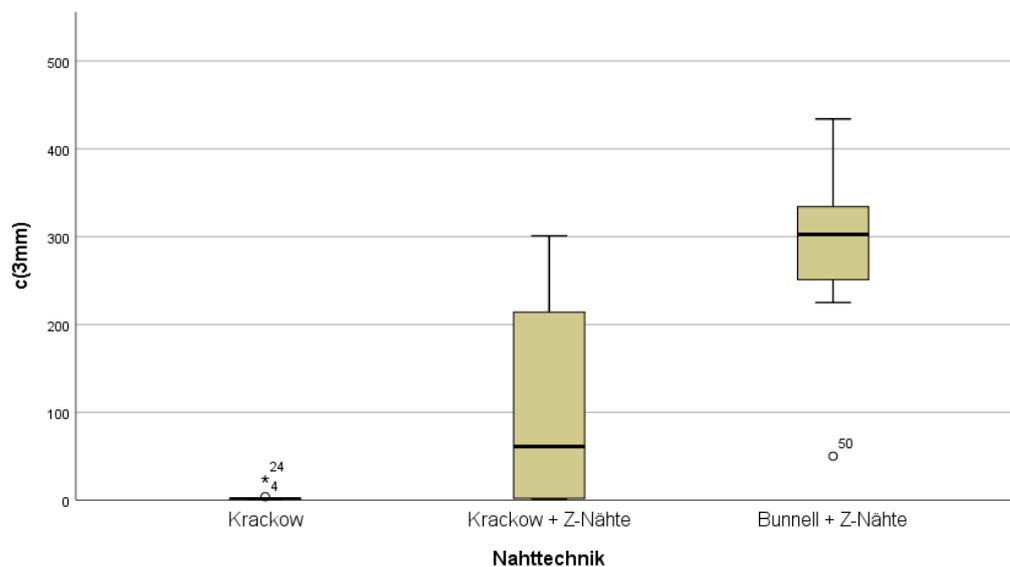


Abbildung 2.10: Box-Plot der gemessenen Werte für die 3 mm Spaltbildung in den Vorversuchen

Für die Spaltbildung von 5 mm ergaben sich für die Krackow-Nahttechnik ohne Z-Nähte ein Mittelwert und eine SD von $25,40 \pm 50,77$ sowie ein Median von 2,00. Der IQR betrug 33 und die Spannweite 163. Die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten erbrachte einen Mittelwert von 135,70 mit einer SD von 143,72. Der IQR betrug 296 und die Spannweite 300. Für die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten konnte ein Mittelwert und eine SD von $318,00 \pm 109,26$ sowie ein Median von 304,50 ermittelt werden. Der IQR betrug 68 und die Spannweite 402.

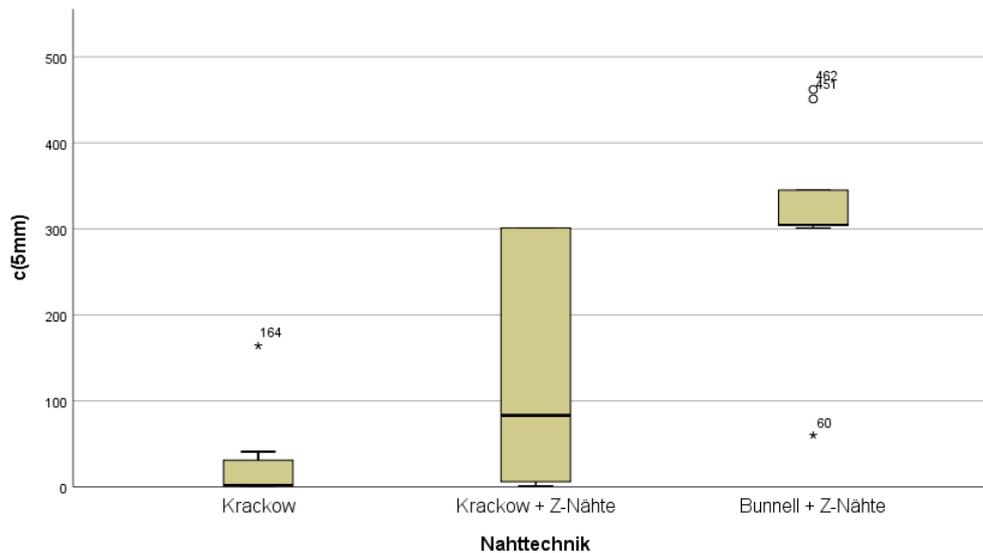


Abbildung 2.11: Box-Plot der gemessenen Werte für die 5 mm Spaltbildung in den Vorversuchen

Die restlichen Messwerte finden sich in der *Tabelle 10.3* im Anhang auf Seite 117.

Im Vorfeld der Durchführung der Vorversuche wurde davon ausgegangen, dass es innerhalb der Gruppen $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} pro Nahtgruppe nicht zu einer Normalverteilung kommt. Dies wurde sowohl mithilfe des Kolmogorov-Smirnoff-Tests als auch des Shapiro-Wilk-Tests geprüft. Ergibt sich hierbei in den Tests eine Signifikanz von $< 0,05$, spricht dies für eine Nicht-Normalverteilung. Dies konnte für alle Gruppen mit Ausnahme der Bunnell + Z-Nähte bei c_{3mm} nachgewiesen werden. Der Kolmogorov-Smirnoff-Test konnte dies auch für die gleiche Nahttechnik bei $c_{initial}$ nachweisen. Das Ergebnis konnte im Shapiro-Wilk-Test jedoch nicht bestätigt werden, sodass insgesamt von nicht normalverteilten Daten ausgegangen und folglich ein nicht-parametrischer Test für den Vergleich der beiden Gruppen gewählt wurde.

Tabelle 2.3: Test auf Normalverteilung für $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} in den Vorversuchen mithilfe des Shapiro-Wilk- und Kolmogorov-Smirnoff-Tests

	Nahttechnik	Kolmogorov-Smirnoff ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
$c_{initial}$	Krackow	-	10	-	-	10	-
	Krackow + Z	0,298	10	0,012	0,821	10	0,026
	Bunnell + Z	0,215	10	0,200*	0,815	10	0,022
c_{3mm}	Krackow	0,411	10	<0,001	0,466	10	<0,001
	Krackow + Z	0,300	10	0,011	0,799	10	0,014
	Bunnell + Z	0,171	10	0,200*	0,913	10	0,303
c_{5mm}	Krackow	0,319	10	0,005	0,562	10	<0,001
	Krackow + Z	0,307	10	0,008	0,745	10	0,003
	Bunnell + Z	0,338	10	0,002	0,803	10	0,016

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz
a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Als nicht-parametrischer Test wurde der Mann-Whitney-U-Test gewählt. Zuerst wurde die Krackow-Nahttechnik ohne Z-Nähte mit der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten verglichen. Eine Signifikanz lag nach Bonferroni-Korrektur ab einem $p = 0,01\bar{6}$ vor. Bei $c_{initial}$ betrug der Median der Krackow-Nahttechnik 1,00 und der Median der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten lag bei 61,00.

Es ergab sich ein hochsignifikanter Unterschied von $p < 0,001$ und einem $U = 5,000$. Der Median bei c_{3mm} ergab für die Krackow-Nahttechnik 2,00 und für die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten 302,50, sodass sich hier ebenfalls ein hochsignifikanter Unterschied mit einem $p < 0,001$ und einem $U = 0,000$ zeigte. Bei c_{5mm} ergab sich ein Median von 2,00 für die Krackow-Technik und von 304,50 für die modifizierte Bunnell-Nahttechnik. Auch hier lag ein signifikanter Unterschied mit $p < 0,001$ und einem U von 1,000 vor.

Tabelle 2.4: Vergleich der Krackow- und modifizierten Bunnell-Nahttechnik in den Vorversuchen

	$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}
Mann-Whitney-U	5,000	0,000	1,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	<0,001	<0,001	<0,001
Exakte Signifikanz (2-seitig)	<0,001	<0,001	<0,001

Anschließend wurden die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten und die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten miteinander verglichen. Bei $c_{initial}$ ergab sich ein Median von 24,50 für die modifizierte Krackow-Technik sowie von 61,00 für die modifizierte Bunnell-Technik. Der Unterschied war in diesem Fall nicht signifikant mit einem $p = 0,165$ und einem $U = 31,500$. Für c_{3mm} zeigte sich jedoch ein signifikanter Unterschied von $p = 0,003$ und einem $U = 12,000$ bei einem Median von 61,00 für die Krackow-Nahtgruppe mit Z-Nähten sowie von 302,50 für die Bunnell-Nahtgruppe mit Z-Nähten. Für c_{5mm} zeigte sich ein hochsignifikanter Unterschied von $p < 0,001$ und einem $U = 6,500$ bei Medianwerten von 83,00 für die Krackow-Nahtgruppe mit Z-Nähten und 304,50 für die Bunnell-Nahtgruppe mit Z-Nähten.

Tabelle 2.5: Vergleich der modifizierten Krackow- und modifizierten Bunnell-Nahttechnik in den Vorversuchen

	$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}
Mann-Whitney-U	31,500	12,000	6,500
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,156	0,004	0,001
Exakte Signifikanz (2-seitig)	0,165	0,003	<0,001

Beim Vergleich der Krackow-Nahttechnik ohne Z-Nähte mit der modifizierten Bunnell-Nahttechnik ergaben sich hohe Effektstärken von 3,830 bei c_{3mm} und 3,455 bei c_{5mm} . Die Power betrug hierbei für beide Zielgrößen $> 0,999$. Für $c_{initial}$ konnte weder eine Effektstärke noch eine Power berechnet werden, da alle Nähte der Krackow-Nahttechnik diesen Punkt bereits mit dem ersten Zyklus erreichten. Beim Vergleich zwischen der modifizierten Krackow- und Bunnell-Nahttechnik ergaben sich Effektstärken von 0,637 für $c_{initial}$, 1,495 für c_{3mm} und 1,439 für c_{5mm} . Die Power betrug dabei 0,259 für $c_{initial}$, 0,868 für c_{3mm} und 0,842 für c_{5mm} . Diese und weitere Daten können den Tabellen 10.4 und 10.5 auf Seite 117 und 118 im Anhang entnommen werden.

2.4.6.2 Querschnittsfläche A

Für die Querschnittsfläche A der Sehnen der Krackow-Nahttechnik ergab sich ein Mittelwert und eine SD von $42,188 \pm 4,763$ sowie ein Median von 41,893. Der IQR betrug 8,152 und das 95 % Konfidenzintervall 38,781 - 45,595. Für die Querschnittsfläche A der modifizierten Krackow-Nahttechnik ergab sich ein Mittelwert von 36,151 mit einer SD

von 5,227. Der Median betrug 33,890 und das 95 % Konfidenzintervall 32,411 - 39,890. Für die modifizierte Bunnell-Nahttechnik ergab sich für die Querschnittsfläche A ein Mittelwert mit einer SD von $43,805 \pm 5,960$. Der Median betrug 45,380 und das 95 % Konfidenzintervall 39,541 - 48,068. Diese und weitere Werte können der Tabelle 10.6 auf Seite 118 im Anhang entnommen werden.

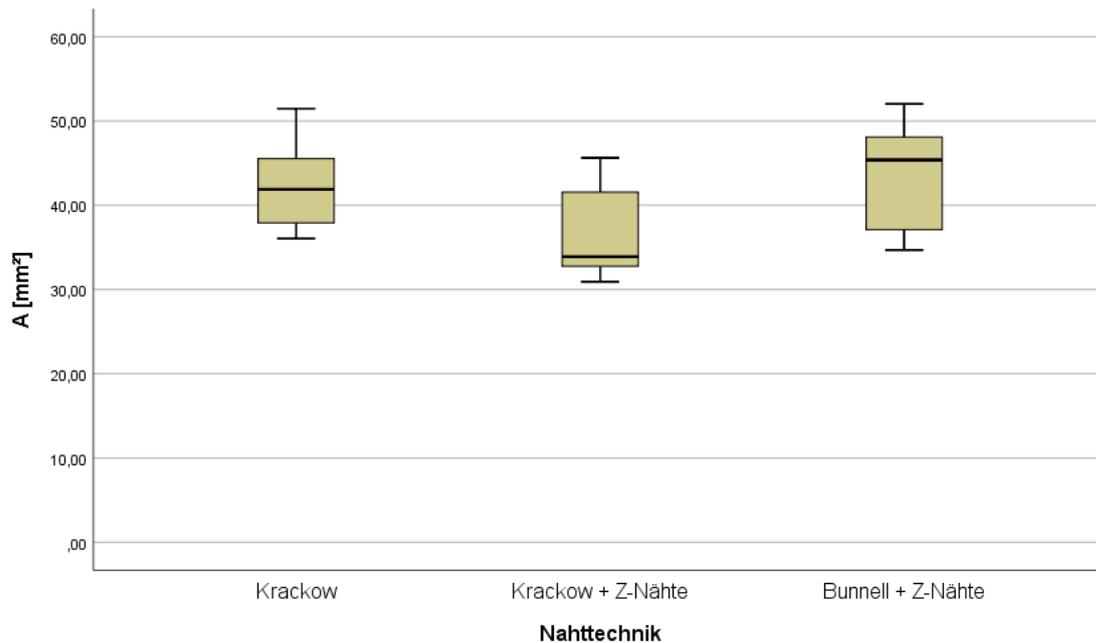


Abbildung 2.12: Box-Plot der gemessenen Werte der Querschnittsflächen der verschiedenen Nahtgruppen in den Vorversuchen

Im Vorfeld wurde von einer Normalverteilung der Querschnittsflächen innerhalb der einzelnen Nahtgruppen ausgegangen. Hierfür wurde sowohl der Kolmogorov-Smirnoff- als auch der Shapiro-Wilk-Test zur Auswertung genutzt. Sowohl die Krackow-Nahtgruppe als auch die modifizierte Bunnell-Nahtgruppe zeigten sich in Bezug auf die Querschnittsfläche – wie im Vorhinein angenommen – als normalverteilt. Die Krackow-Nahttechnik mit den Z-Nähten zeigte jedoch keine Normalverteilung mit Signifikanzwerten von 0,018 im Kolmogorov-Smirnoff- und 0,031 im Shapiro-Wilk-Test. Dieser Fehler sollte für die Hauptversuche ausgeschlossen werden, sodass es dort zu einer Normalverteilung kommt.

Tabelle 2.6: Test auf Normalverteilung für die Querschnittsfläche A [mm^2] in den Vorversuchen mithilfe des Shapiro-Wilk- und Kolmogorov-Smirnoff-Tests

	Nahttechnik	Kolmogorov-Smirnoff ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
A [mm^2]	Krackow	0,134	10	0,200*	0,954	10	0,720
	Krackow + Z	0,288	10	0,018	0,828	10	0,031
	Bunnell + Z	0,195	10	0,200*	0,920	10	0,354

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz
a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Für den Vergleich der Querschnittsflächen der Krackow-Nahtgruppe und der modifizierten Bunnell-Nahttechnik konnte ein parametrischer Test zum Vergleich genutzt werden, nämlich der t-Test für unverbundene Stichproben. Der Levene-Test bestätigte mit einer Signifikanz von 0,271 die Gleichheit der Varianzen. Der anschließende t-Test ergab für $t(18) = -0,670$ und $p = 0,511$. Das Ergebnis bestätigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Querschnittsflächen der beiden Gruppen gibt. Da es in der Gruppe der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten zu einer Nicht-Normalverteilung gekommen war, wurde zum Vergleich zwischen dieser und der modifizierten Bunnell-Nahtgruppe ein Mann-Whitney-U-Test gewählt. Es entstand ein signifikanter Unterschied zwischen den Querschnittsflächen der beiden Gruppen mit einem $p = 0,005$ ($< 0,05$) und einem $U = 14,000$. Dieser Fehler sollte in den Hauptversuchen ausgeschlossen werden.

2.4.6.3 Errechnete Gruppengröße und Schlussfolgerung

Die Berechnung der Gruppengröße erfolgte für zweiseitige Tests mit einem Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur von $p = 0,01\bar{6}$. Die Power sollte nicht unter 80 % liegen. Für den Vergleich der Krackow-Nahttechnik ohne Z-Nähte und der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten ergab sich für die Berechnung bei c_{3mm} und c_{5mm} – bei einer Power von $> 0,8$ – eine nötige Gruppengröße von je 3 Nähten, um ein signifikantes Ergebnis in der Hauptversuchen zu erzielen. Bei Erhöhung der Power auf $> 0,95$ ergab sich eine nötige Gruppengröße von jeweils 4 Nähten pro Gruppe, sodass auf einen Vergleich dieser beiden Nahttechniken in den Hauptversuchen verzichtet wurde, da das

Ergebnis in den Vorversuchen bereits bei lediglich 10 Nähten pro Gruppe hochsignifikant war.

Die Berechnung der Gruppengröße zwischen der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten und der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten ergab für $c_{initial}$ eine Gruppengröße von 42, bei einer Power $> 0,8$. Bei Erhöhung der Power auf $> 0,95$ wäre eine Gruppengröße von 69 nötig, um ein signifikantes Ergebnis zu erreichen. Für c_{3mm} errechnete sich eine Gruppengröße von 9 bei einer Power $> 0,8$ bzw. 14 bei einer Power $> 0,95$. Für c_{5mm} ergab sich eine Gruppengröße von 10 bei einer Power $> 0,8$ bzw. 15 bei einer Power $> 0,95$. Zu bedenken ist hier jedoch der signifikante Unterschied in der Querschnittsfläche A der beiden Nahtgruppen. Dies sollte in den Hauptversuchen definitiv vermieden werden, um einen möglichen Störfaktor auszuschließen. Diese und weitere Werte sind den Tabellen 10.4 und 10.5 auf Seite 117 und 118 im Anhang zu entnehmen.

Innerhalb der Arbeitsgruppe wurden noch weitere Nahttechniken zur Reparatur einer Achillessehnenruptur angewandt. Es wurde entschieden, dass alle Nahtgruppen eine Gruppengröße von $n = 50$ aufweisen sollten, um eine bessere Vergleichbarkeit aller Gruppen untereinander gewährleisten zu können.

3 Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik stellt die gemessenen Werte grafisch sowie mit errechneten Werten dar. Die verschiedenen Stufen der Spaltbildung werden mithilfe von Box-Plots dargestellt. Kaplan-Meier-Funktionen stellen das Überleben dar.

3.1.1 Zykluszahl bei initialer Spaltbildung

Für die initiale Spaltbildung ergab sich für die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten ein Mittelwert von 41,02 mit einer SD von 62,652. Der Median betrug 10,50. Für die 25. Perzentile ergab sich 2,75 sowie 57,00 für die 75. Perzentile. Der IQR betrug demnach 54. Das Minimum betrug 1, das Maximum 251, sodass sich hieraus eine Spannweite von 250 ergab. Für die Bunnell-Nahttechnik ergab sich für den Mittelwert und die SD 441,10 \pm 91,796. Der Median ergab 501,00. Die 25. Perzentile belief sich auf 356,00 und die 75. Perzentile auf 501,00. Dies ergab somit eine IQR von 145. Das Minimum lag bei 256, das Maximum bei 502. Somit ergab sich hier eine Spannweite von 246. *Abbildung 3.1* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

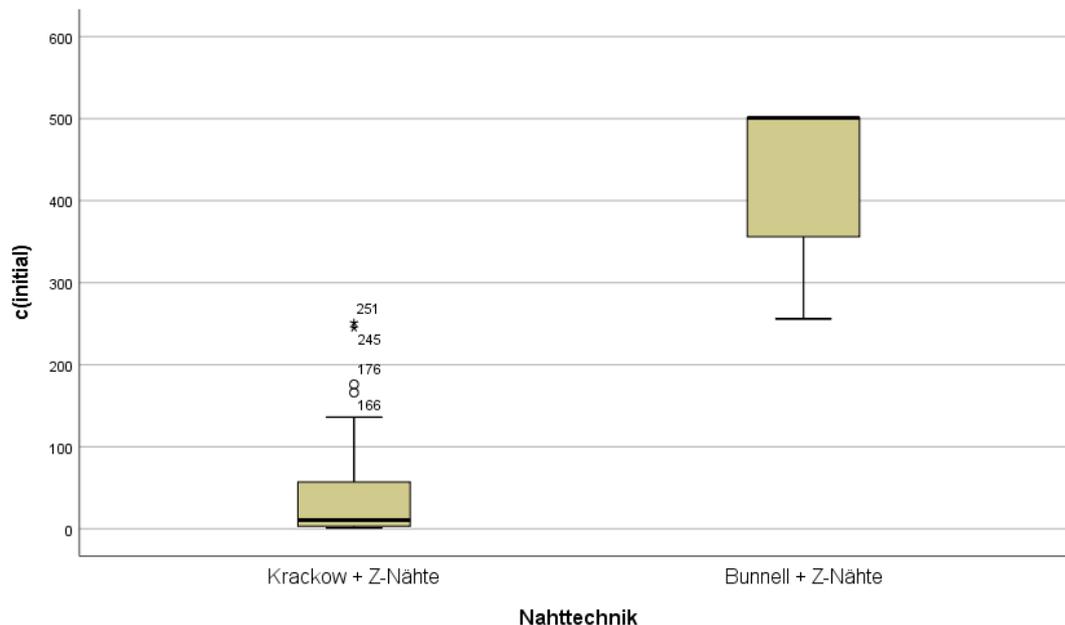


Abbildung 3.1: Box-Plot der gemessenen Werte für die initiale Spaltbildung in den Hauptversuchen

3.1.2 Zykluszahl bei 3 mm Spaltbildung

Bei einer Spaltbildung von 3 mm war für die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten der Mittelwert und die SD $193,64 \pm 82,190$. Der Median betrug 224,00. Die 25. Perzentile ergab 163,50 und die 75. Perzentile 251,00. Der IQR lag somit bei 88. Das Minimum lag bei 1, das Maximum bei 315. Somit betrug die Spannweite 314. Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten erbrachte einen Mittelwert und eine SD von $496,58 \pm 31,157$ sowie einen Median von 501,00. Die 25. Perzentile belief sich auf 501, die 75. Perzentile auf 502. Dies ergab einen IQR von 1. Das Minimum mit 286 und das Maximum mit 511 ergaben zusammen eine Spannweite von 225. *Abbildung 3.2* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

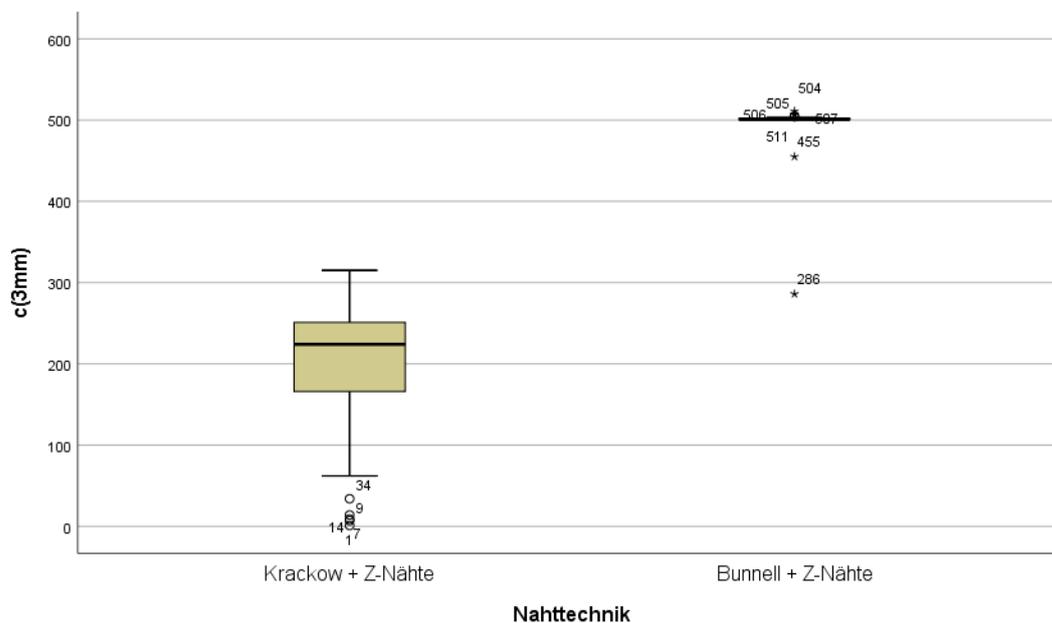


Abbildung 3.2: Box-Plot der gemessenen Werte für die 3 mm Spaltbildung in den Hauptversuchen

3.1.3 Zykluszahl bei 5 mm Spaltbildung

Für eine Spaltbildung von 5 mm ergaben sich für die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten ein Mittelwert und eine SD von $238,52 \pm 83,949$. Der Median betrug 251,00. Die 25. Perzentile ergab 251,00 und die 75. Perzentile 258,50. Dies ergab einen IQR von 8. Das Minimum ergab 1, das Maximum 500. Somit ergab sich eine Spannweite von 499. Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten erbrachte einen Mittelwert und eine SD von $498,00 \pm 30,713$ sowie einen Median von 501,00. Die 25. Perzentile belief sich auf 501, die 75. Perzentile auf 502. Dies ergab einen IQR von 1. Das Minimum betrug 286 und das Maximum 514. Somit ergab sich eine Spannweite von 228. *Abbildung 3.3* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

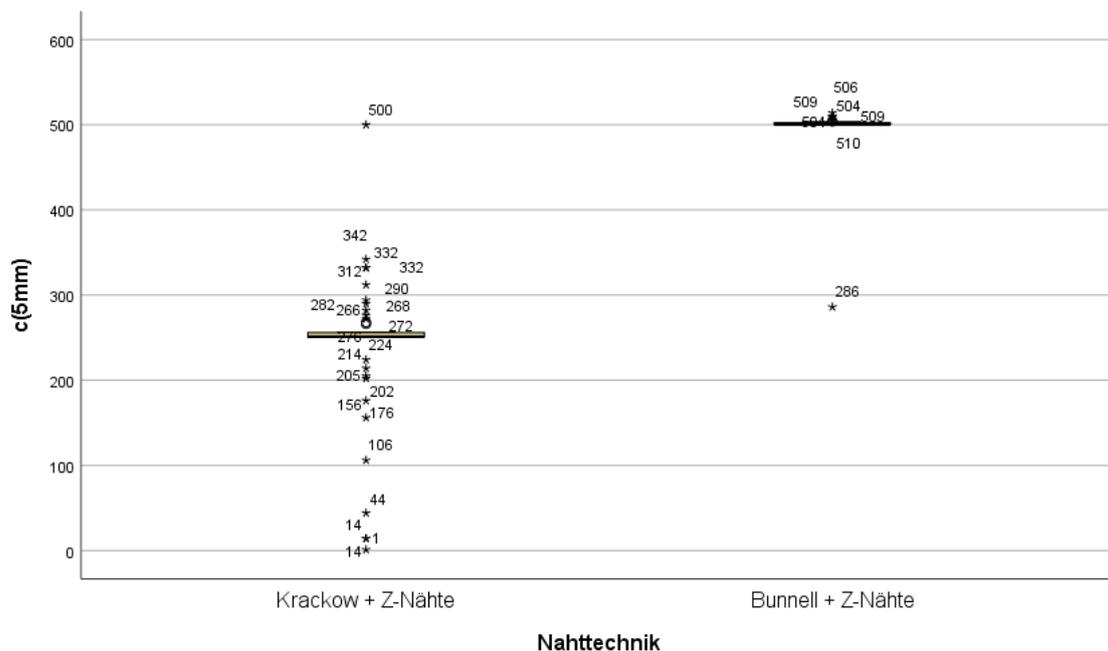


Abbildung 3.3: Box-Plot der gemessenen Werte für die 5 mm Spaltbildung in den Hauptversuchen

3.1.4 Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen innerhalb der ersten Serie

Die Messung der Dehiszenz d [mm] erfolgte beim 200. und 250. Zyklus der ersten Serie. Berücksichtigt man alle Nähte, die auch eine Spaltbildung von > 5 mm innerhalb der ersten Serie erreichten, können alle 50 Krackow-Nähte mit Z-Nähten Eingang in die Auswertung finden. Bei Erreichen des 200. Zyklus ergab sich ein Mittelwert von 3,1 mm und eine SD von 2,50 mm. Der Median betrug 2,75 mm. Die 25. Perzentile lag bei 1,5 mm, die 75. Perzentile bei 3,75 mm. Dies ergab einen IQR von 2,25. Das Minimum lag bei 0,0 mm, das Maximum bei 12,5 mm, sodass sich eine Spannweite von 12,5 mm ergab.

Der 200. Zyklus der ersten Serie wurde von allen Bunnell-Nähten mit Z-Nähten erreicht. Keine der Nähte wies zu diesem Zeitpunkt eine Spaltbildung auf. Der Mittelwert und die SD ergaben hierfür also $0,0 \pm 0,0$ mm. Für den Median ergab sich ebenfalls 0,0 mm. Sowohl für die 25. als auch die 75. Perzentile ergaben sich 0,0 mm. Auch Minimum und Maximum betrugen jeweils 0,0 mm. *Abbildung 3.4* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

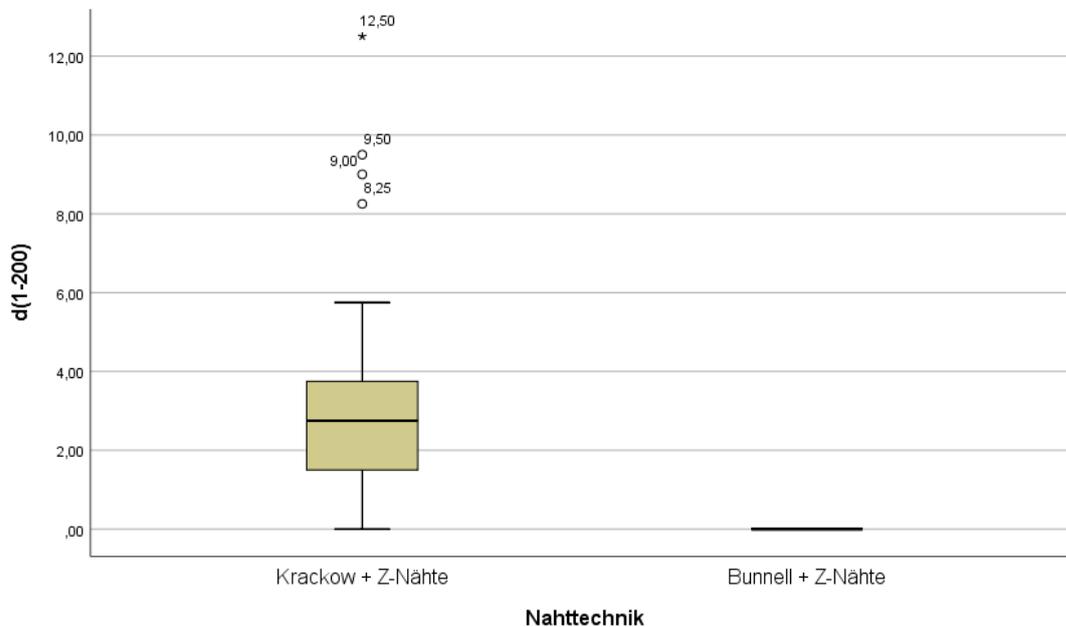


Abbildung 3.4: Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 200. Zyklus der ersten Serie

Auch der 250. Zyklus wurde von 50 Krackow-Nähten mit Z-Nähten erreicht. Hier betrug der Mittelwert und die SD $3,66 \pm 2,74$ mm. Der Median ergab 3,25 mm. Die 25. und 75. Perzentile ergaben 1,75 mm bzw. 4,38 mm. Somit errechnete sich ein IQR von 2,63 mm. Das Minimum lag hier ebenfalls bei 0,0 mm, das Maximum bei 14 mm. Die Spannweite beträgt somit 14 mm. Alle Bunnell-Nähte mit Z-Nähten erreichten den Zeitpunkt des 250. Zyklus innerhalb der ersten Serie, ohne eine Spaltbildung aufzuweisen. Somit ergab sich hier für alle errechneten Werte (Mittelwert \pm SD, Median, 25. und 75. Perzentile, IQR, Minimum, Maximum und Spannweite) 0,0 mm. *Abbildung 3.5* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

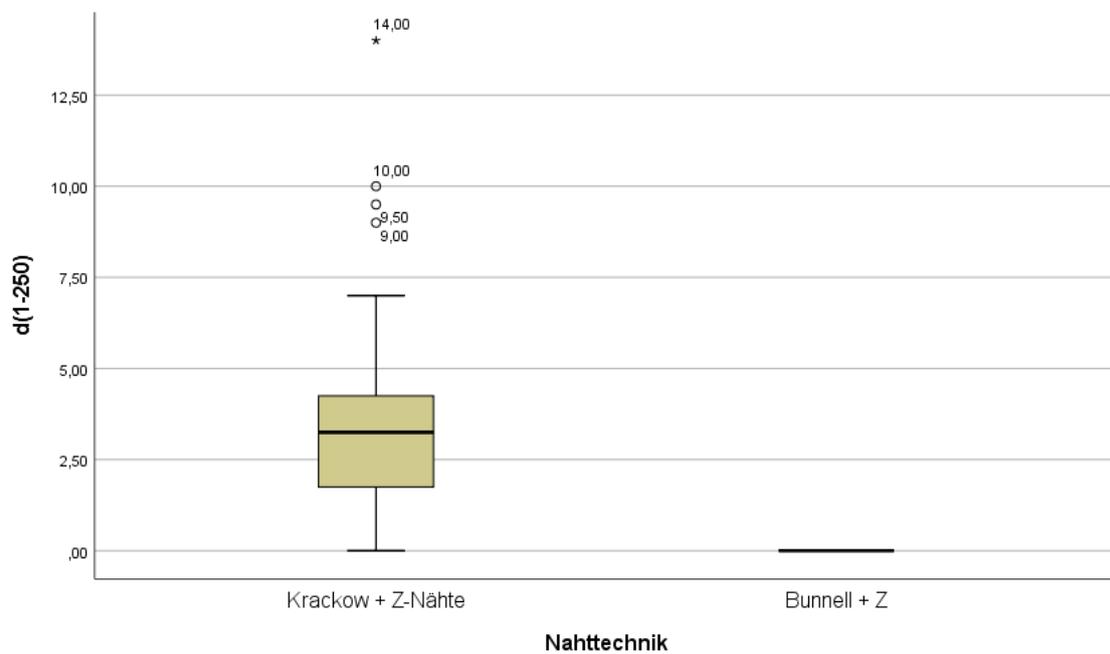


Abbildung 3.5: Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 250. Zyklus der ersten Serie

3.1.5 Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen innerhalb der zweiten Serie

Die Messung der Dehiszenz d [mm] erfolgte beim 200. und 250. Zyklus der zweiten Serie. Berücksichtigt man auch alle Nähte, die eine Spaltbildung von > 5 mm innerhalb der zweiten Serie erreichten, können 39 Krackow-Nähte mit Z-Nähten in die Auswertung einbezogen werden. 11 Nähte konnten nicht weiter ausgewertet werden, da sie bereits in der ersten Serie komplett versagten. Bei Erreichen des 200. Zyklus ergab sich ein Mittelwert von 13,01 mm und eine SD von 3,61 mm. Der Median ergab 14,25 mm. Die 25. Perzentile lag bei 10,25 mm, die 75. Perzentile bei 15,25 mm. Dies ergab einen IQR von 5 mm. Das Minimum lag bei 4,5 mm, das Maximum bei 21,5 mm, sodass sich eine Spannweite von 17 mm ergab.

Von den Bunnell-Nähten mit Z-Nähten erreichten 49 Nähte den 200. Zyklus. Es ergab sich ein Mittelwert und eine SD von $0,32 \pm 0,599$ mm. Der Median betrug 0,0 mm. Die 25. Perzentile lag bei 0,0 mm, die 75. Perzentile bei 0,5 mm, sodass sich ein IQR von 0,5 mm ergab. Das Minimum lag bei 0,0 mm, das Maximum bei 2,5 mm. Daraus ergab sich eine Spannweite von 2,5 mm. *Abbildung 3.6* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

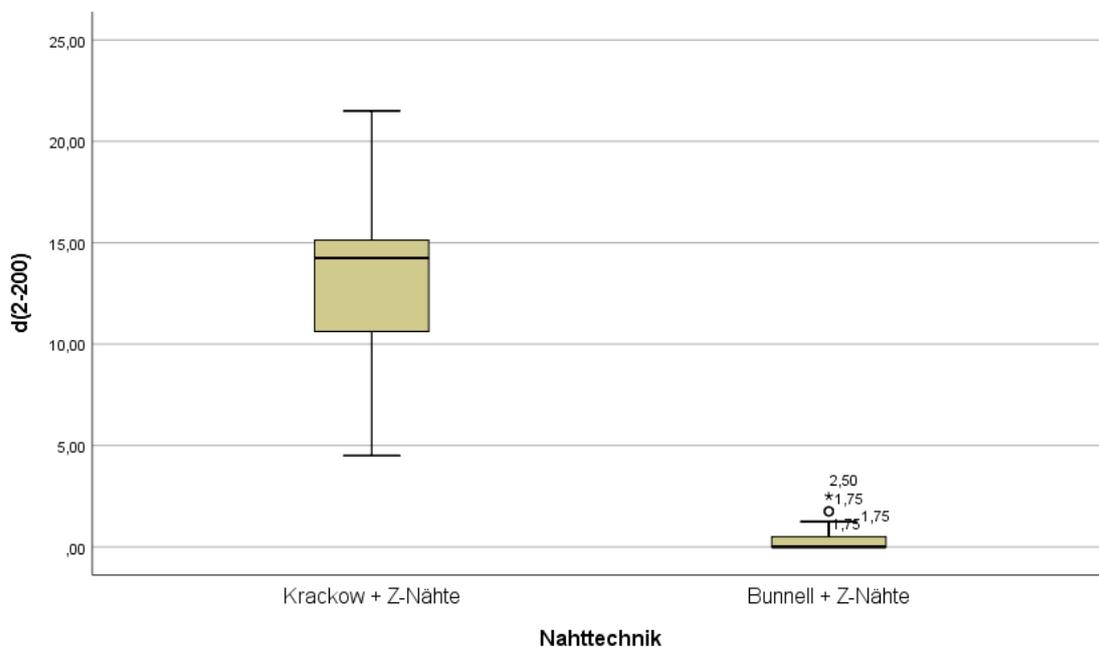


Abbildung 3.6: Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 200. Zyklus der zweiten Serie

Auch der 250. Zyklus wurde von 39 Krackow-Nähten mit Z-Nähten erreicht. Hier betrug der Mittelwert und die SD $13,62 \pm 3,55$ mm. Der Median betrug 14,5 mm. Die 25. und 75. Perzentile ergaben 11 mm bzw. 16 mm. Dies ergab einen IQR von 5 mm. Das Minimum lag bei 6 mm, das Maximum bei 21,75 mm. Die Spannweite beträgt somit 15,75 mm. Für die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten ergaben sich keine Unterschiede, da eine Naht bereits in der ersten Serie versagte. 49 Nähte der Bunnell-Naht mit Z-Nähten erreichten den 250. Zyklus der zweiten Serie. Der Mittelwert und die SD betragen $0,42 \pm 0,79$ mm. Der Median betrug 0,0 mm. Die 25. Perzentile lag bei 0,0 mm, die 75. Perzentile bei 0,63 mm. Somit errechneten sich ein IQR von 0,63 mm. Das Minimum betrug 0,0 mm. Das Maximum lag bei 3,25 mm. Daraus errechnete sich eine Spannweite von 3,25 mm. *Abbildung 3.7* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

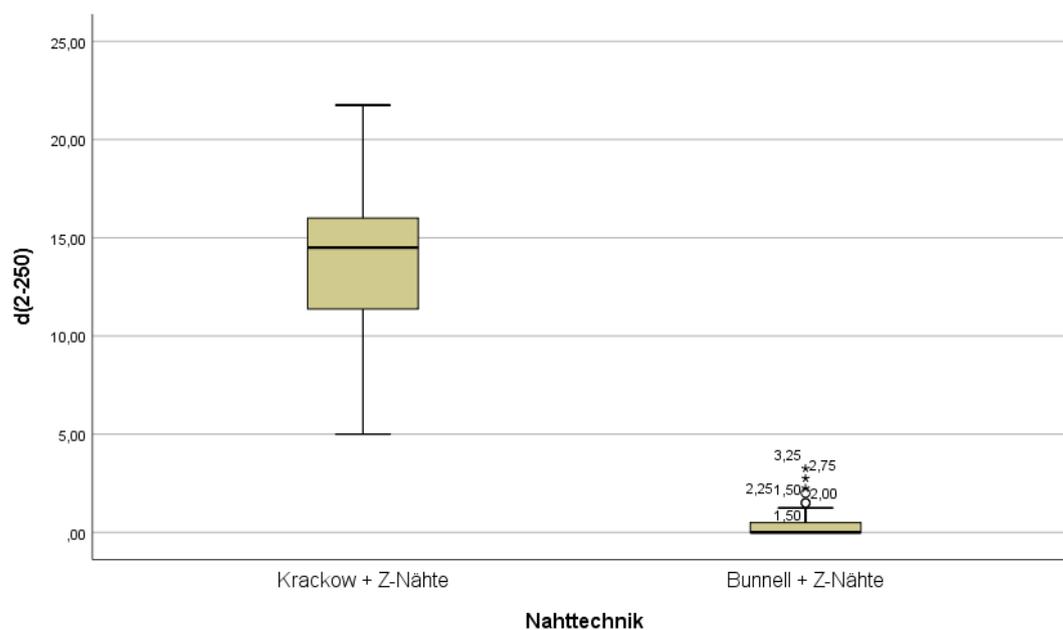


Abbildung 3.7: Box-Plot der gemessenen Dehiszenzen für den 250. Zyklus der zweiten Serie

3.1.6 Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen innerhalb der dritten Serie

Eine Messung der Spaltbildung des 200. bzw. 250. Zyklus der dritten Serie war nicht möglich, da alle Nähte bereits im Vorfeld aufgrund einer Spaltbildung von > 5 mm versagt hatten.

3.1.7 Querschnittsfläche A

Für die Querschnittsfläche A [mm^2] der Sehnen der Krackow-Nähte mit Z-Nähten ergab sich ein Mittelwert von $39,64 \pm 4,12$ mm^2 . Das 95%-Konfidenzintervall reichte von 38,47 - 40,81 mm^2 . Der Median betrug 40,17 mm^2 . Die 25. Perzentile lag bei 37,12 mm^2 , die 75. Perzentile bei 42,39 mm^2 . Somit ergab sich ein IQR von 5,27. Das Minimum lag bei 31,23 mm^2 , das Maximum bei 49,0 mm^2 . Daraus ergab sich eine Spannweite von 17,77 mm^2 . Der Mittelwert und die SD der Sehnen der Bunnell-Nähte mit Z-Nähten betrug $38,0 \pm 4,22$ mm^2 . Das 95%-Konfidenzintervall reichte von 36,8 - 39,19 mm^2 . Für den Median ergab sich 37,66 mm^2 . Die 25. Perzentile lag bei 35,20 mm^2 , die 75. Perzentile bei 40,5 mm^2 . Daraus ergab sich ein IQR von 5,29 mm^2 . Das Minimum lag bei 28,98 mm^2 , das Maximum bei 51,46 mm^2 . Somit betrug die Spannweite 22,48 mm^2 . *Abbildung 3.8* zeigt die Box-Plots der gemessenen Werte.

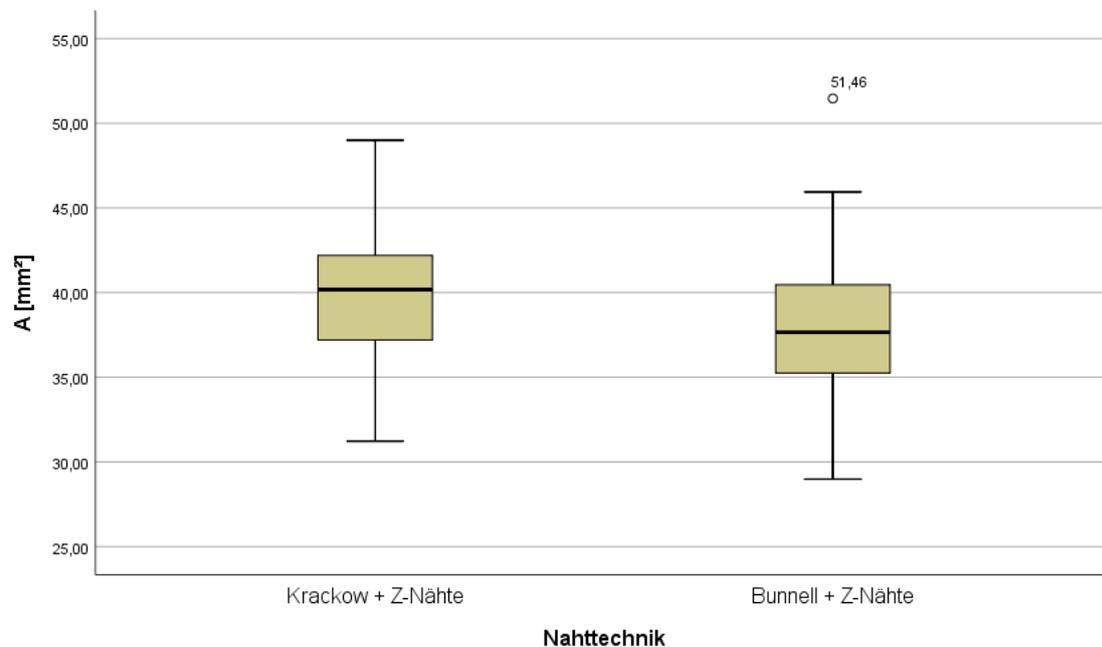


Abbildung 3.8: Box-Plot der gemessenen Werte der Querschnittsflächen A [mm^2]

3.1.8 Überleben

Alle 100 Nähte versagten aufgrund einer Spaltbildung von > 5 mm. Es lag weder an einem Versagen des Knotens noch an technischem Versagen oder am Durchschneiden des Fadens durch das Sehnenmaterial.

Die Überlebenskurve nach Kaplan-Meier zeigt beide Nahtgruppen im Vergleich und die Anzahl der Nähte, die bei welcher Zyklusanzahl versagt haben.

Abbildung 3.9 stellt die Überlebenskurve für die initiale Spaltbildung dar. Eine große Anzahl der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigt bereits zu Beginn einen Abfall, sodass sich hier bereits ein Spalt gebildet hat. Spätestens beim 251. Zyklus hatten alle Nähte eine Spaltbildung aufgewiesen. Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte in der ersten Serie keine Spaltbildung. Die Spaltbildung begann frühestens ab dem 256. Zyklus. Mit Beginn der dritten Serie wiesen alle Nähte eine Spaltbildung auf. Das Maximum lag bei 502 Zyklen.

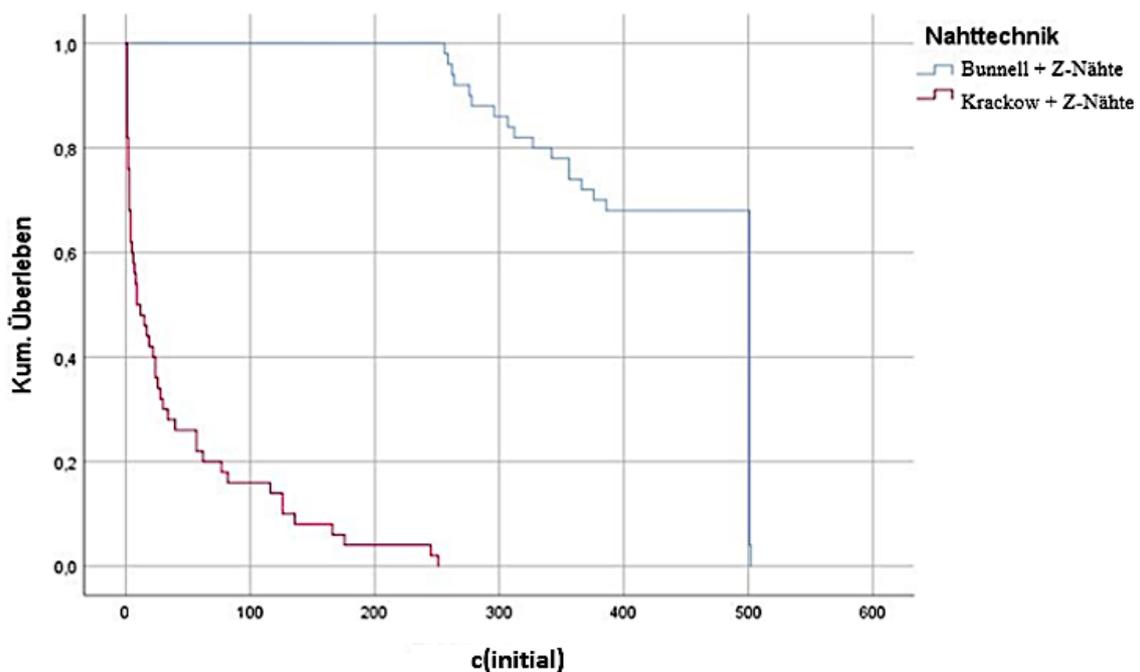


Abbildung 3.9: Kaplan-Meier-Überlebensfunktion für $c_{initial}$

Abbildung 3.10 zeigt die Überlebenskurve für die 3 mm Spaltbildung. Hier zeigt sich ebenfalls ein früherer Abfall in der Gruppe der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten in der ersten Serie. Mit Beginn der zweiten Serie ist ein großer Abfall zu verzeichnen. Das Maximum lag bei 315 Zyklen. Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte sich innerhalb der ersten Serie ohne Abfall. Innerhalb der zweiten Serie versagten nur wenige Nähte. Mit Beginn der dritten Serie versagten fast alle Nähte. Das Maximum lag bei 511 Zyklen.

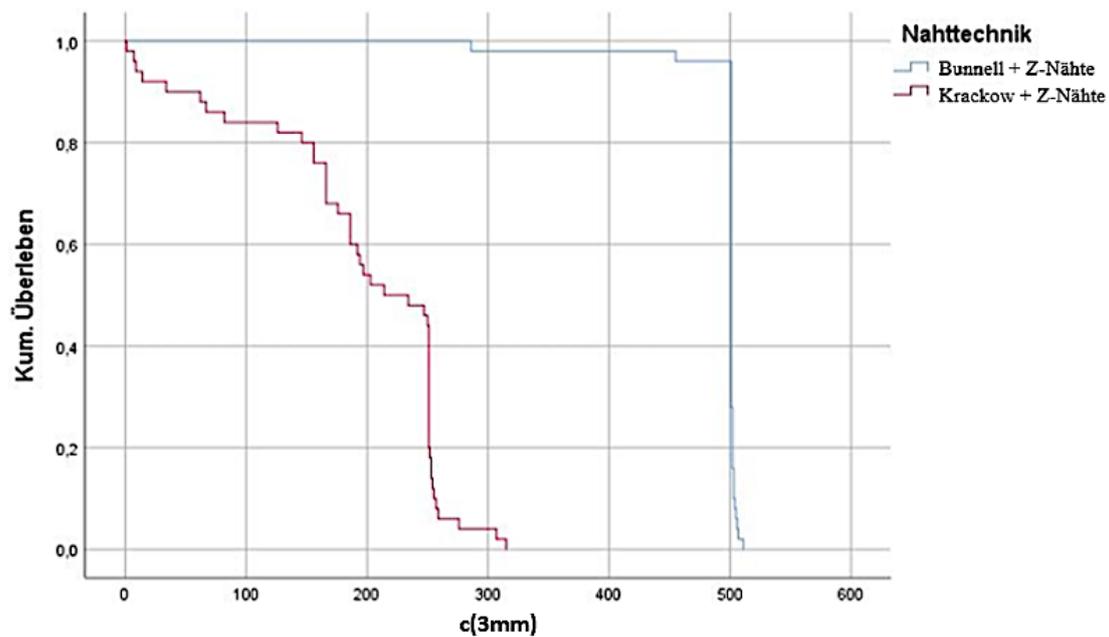


Abbildung 3.10: Kaplan-Meier-Überlebensfunktion für c_{3mm}

Abbildung 3.11 zeigt die Überlebenskurve für die 5 mm Spaltbildung. Die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte einen starken Abfall mit Beginn der zweiten Serie. Das Maximum betrug 500 Zyklen und markierte somit das Ende der zweiten Serie. Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte während der ersten Serie keinen Abfall. In der zweiten Serie versagten nur wenige Nähte. Mit Beginn der dritten Serie versagte der Großteil der Nähte. Das Maximum betrug 514 Zyklen.

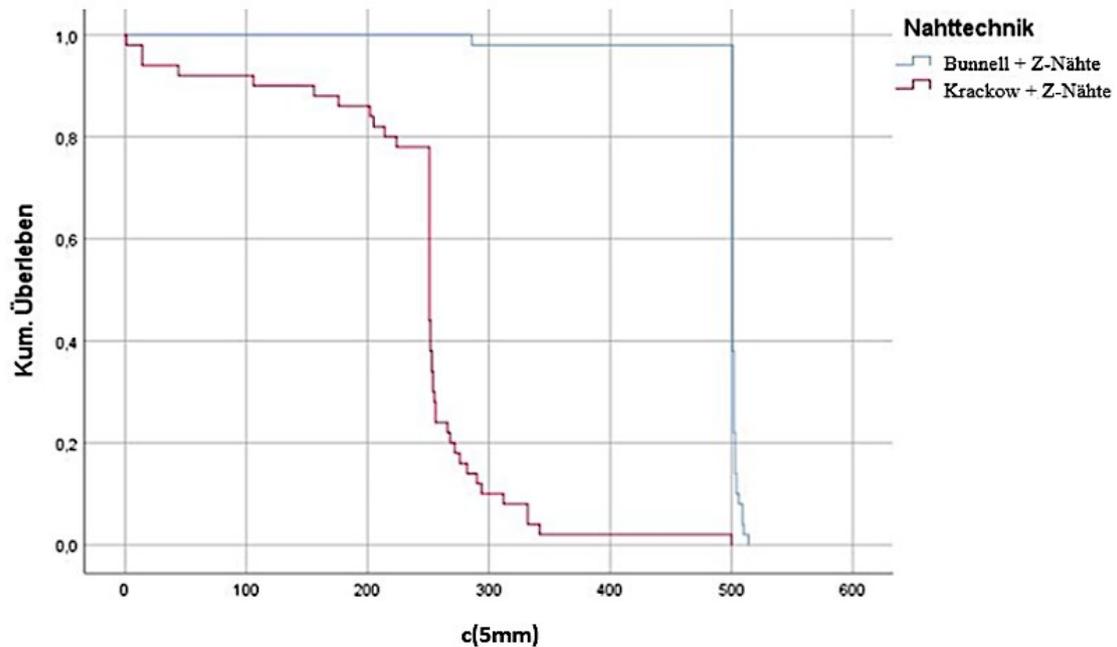


Abbildung 3.11: Kaplan-Meier-Überlebensfunktion für c_{5mm}

3.2 Schließende Statistik

In diesem Teil werden die Werte der deskriptiven Statistik bewertet und die jeweiligen Gruppen miteinander verglichen, um eine abschließende Bewertung vorzunehmen.

3.2.1 Test auf Normalverteilung

Da sich in den Vorversuchen fast ausschließlich eine Nicht-Normalverteilung ergab, wurde diese Annahme auch in den Hauptversuchen fortgeführt. Sobald sich eine Signifikanz von $p < 0.05$ ergibt, spricht dies für eine Nicht-Normalverteilung. Dies konnte für beide Nahttechniken auf allen drei Stufen nachgewiesen werden, sodass der Mann-Whitney-U-Test zur Auswertung genutzt werden konnte.

Tabelle 3.1: Test auf Normalverteilung für $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} in den Hauptversuchen mithilfe des Shapiro-Wilk- und Kolmogorov-Smirnoff-Tests

	Nahttechnik	Kolmogorov-Smirnoff ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
$c_{initial}$	Krackow + Z	0,270	50	<0,001	0,681	50	<0,001
	Bunnell + Z	0,423	50	<0,001	0,657	50	<0,001
c_{3mm}	Krackow + Z	0,222	50	<0,001	0,850	50	<0,001
	Bunnell + Z	0,516	50	<0,001	0,197	50	<0,001
c_{5mm}	Krackow + Z	0,339	50	<0,001	0,763	50	<0,001
	Bunnell + Z	0,519	50	<0,001	0,173	50	<0,001

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz
a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Es erfolgte ebenfalls eine Testung auf Normalverteilung für die Zyklen 200 und 250 der ersten und zweiten Serie. Der 200. bzw. 250. Zyklus in der dritten Serie wurde von keiner Naht erreicht, sodass hierfür keine Testung stattfinden konnte. Für die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte sich für alle ausgewerteten Stufen eine Nicht-Normalverteilung mit einer Signifikanz von $p < 0,05$. Für die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte sich eine Nicht-Normalverteilung für die erste Serie sowie ein grenzwertiges Ergebnis in der zweiten Serie, sodass sich eine Normalverteilung ergab. Zur Auswertung wurde in der Zusammenschau der Mann-Whitney-U-Test genutzt.

Tabelle 3.2: Test auf Normalverteilung für den 200. und 250. Zyklus der ersten und zweiten Serie in den Hauptversuchen mithilfe des Shapiro-Wilk- und Kolmogorov-Smirnoff-Tests

Serie	Zyklusanzahl	Nahtechnik	Kolmogorov-Smirnoff ^a			Shapiro-Wilk		
			Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
1	200	Krackow + Z	0,178	50	<0,001	0,848	50	<0,001
	200	Bunnell + Z		50			50	
	250	Krackow + Z	0,190	50	<0,001	0,865	50	<0,001
	250	Bunnell + Z		50			50	
2	200	Krackow + Z	0,170	39	0,006	0,944	39	0,050
	200	Bunnell + Z	0,395	49	<0,001	0,606	49	<0,001
	250	Krackow + Z	0,139	39	0,056	0,944	39	0,052
	250	Bunnell + Z	0,397	49	<0,001	0,613	49	<0,001
*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors								

In den Vorversuchen ergab sich für die Gruppe der Krackow-Nahtechnik mit Z-Nähten für die Querschnittsfläche A eine Nicht-Normalverteilung. Dieser Fehler sollte in den Hauptversuchen ausgeschlossen werden. Für die Hauptversuche konnte mit einem $p > 0,05$ im Kolmogorov-Smirnoff- und Shapiro-Wilk-Test Normalverteilung gezeigt werden, sodass ein parametrischer t-Test für unverbundene Stichproben zur Auswertung genutzt werden konnte.

Tabelle 3.3: Test auf Normalverteilung für die Querschnittsfläche A [mm^2] in den Hauptversuchen mithilfe des Shapiro-Wilk- und Kolmogorov-Smirnoff-Tests

	Nahtechnik	Kolmogorov-Smirnoff ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
A [mm^2]	Krackow + Z	0,087	50	0,200	0,983	50	0,677
	Bunnell + Z	0,087	50	0,200	0,979	50	0,506
*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors							

3.2.2 Signifikanztest

Bevor ein Vergleich der beiden Nahttechniken stattfinden kann, werden zunächst eine Nullhypothese und eine Alternativhypothese aufgestellt. Diese lauten:

Nullhypothese H_0 :

Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten und der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten.

Alternativhypothese H_1 :

Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten und der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten.

Im Folgenden wird der Vergleich beider oben genannter Nahttechniken – mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests bzw. des Student's t-Test für die Querschnittsflächen – beschrieben.

3.2.2.1 Signifikanztest für Zykluszahl bei initialer Spaltbildung

In der deskriptiven Statistik ergab sich für die Krackow-Naht mit Z-Nähten ein Median von 10,5 Zyklen und ein Median von 501 Zyklen für die Bunnell-Naht mit Z-Nähten. Im Mann-Whitney-U-Test ergab sich ein $U = 0,00$ und ein $p < 0,001$.

Die Effektstärke belief sich auf 5,137 und die Power auf $> 0,999$. Somit kann die Alternativhypothese H_1 für die initiale Spaltbildung angenommen werden. Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Bunnell-Naht mit Z-Nähten erreicht signifikant mehr Zyklen bei initialer Spaltbildung als die Krackow-Naht mit Z-Nähten.

Tabelle 3.4: Mann-Whitney-U-Test für die Zykluszahl bei initialer Spaltbildung

	<i>C_{initial}</i>
Mann-Whitney-U	0,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	< 0,001
Exakte Signifikanz (2-seitig)	< 0,001

3.2.2.2 Signifikanztest für Zykluszahl bei 3 mm Spaltbildung

In der deskriptiven Statistik ergab sich für die Krackow-Naht mit Z-Nähten ein Median von 224 Zyklen und ein Median von 501 Zyklen für die Bunnell-Naht mit Z-Nähten. Im Mann-Whitney-U-Test ergab sich ein $U = 2,00$ und ein $p < 0,001$. Die Effektstärke belief sich auf 4,888 und die Power auf $> 0,999$. Somit kann die Alternativhypothese H_1 für die Spaltbildung bei 3 mm angenommen werden. Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Bunnell-Naht mit Z-Nähten erreicht signifikant mehr Zyklen bei 3 mm Spaltbildung als die Krackow-Naht mit Z-Nähten.

Tabelle 3.5: Mann-Whitney-U-Test für die Zykluszahl bei 3 mm Spaltbildung

	C_{3mm}
Mann-Whitney-U	2,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	$< 0,001$
Exakte Signifikanz (2-seitig)	$< 0,001$

3.2.2.3 Signifikanztest für Zykluszahl bei 5 mm Spaltbildung

In der deskriptiven Statistik ergab sich für die Krackow-Naht mit Z-Nähten ein Median von 251 Zyklen und ein Median von 501 Zyklen für die Bunnell-Naht mit Z-Nähten. Im Mann-Whitney-U-Test ergab sich ein $U = 7,00$ und ein $p < 0,001$. Die Effektstärke belief sich auf 4,166 und die Power auf $> 0,999$. Somit kann die Alternativhypothese H_1 für die Spaltbildung bei 5 mm angenommen werden. Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Bunnell-Naht mit Z-Nähten erreicht signifikant mehr Zyklen bei 5 mm Spaltbildung als die Krackow-Naht mit Z-Nähten.

Tabelle 3.6: Mann-Whitney-U-Test für die Zykluszahl bei 5 mm Spaltbildung

	C_{5mm}
Mann-Whitney-U	7,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	$< 0,001$
Exakte Signifikanz (2-seitig)	$< 0,001$

3.2.2.4 Signifikanztest für Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen in der ersten Serie

Für die Krackow-Naht mit Z-Nähten ergab sich ein Median von 2,75 mm. Im Mann-Whitney-U-Test ergab sich ein $U = 50,00$ und ein $p < 0,001$. Somit kann die Alternativhypothese H_1 für die Spaltbildung bei 200 Zyklen in der ersten Serie angenommen werden. Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Bunnell-Naht mit Z-Nähten zeigt signifikant weniger Spaltbildung als die Krackow-Naht mit Z-Nähten.

Tabelle 3.7: Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 200 Zyklen in der ersten Serie

	200. Zyklus in der ersten Serie
Mann-Whitney-U	50,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	< 0,001
Exakte Signifikanz (2-seitig)	< 0,001

Für die Krackow-Naht mit Z-Nähten ergab sich ein Median von 3,25 mm. Im Mann-Whitney-U-Test ergab sich ein $U = 25,00$ und ein $p < 0,001$. Somit kann die Alternativhypothese H_1 für die Spaltbildung bei 250 Zyklen in der ersten Serie angenommen werden. Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Bunnell-Naht mit Z-Nähten zeigt hier signifikant weniger Spaltbildung als die Krackow-Naht mit Z-Nähten.

Tabelle 3.8: Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 250 Zyklen in der ersten Serie

	250. Zyklus in der ersten Serie
Mann-Whitney-U	25,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	< 0,001
Exakte Signifikanz (2-seitig)	< 0,001

3.2.2.5 Signifikanztest für Spaltbildung bei 200 und 250 Zyklen in der zweiten Serie

Für die Krackow-Naht mit Z-Nähten ergab sich ein Median von 14,25 mm. Im Mann-Whitney-U-Test ergab sich ein $U = 0,00$ und ein $p < 0,001$. Somit kann die Alternativhypothese H_1 für die Spaltbildung bei 200 Zyklen in der zweiten Serie angenommen werden. Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Bunnell-Naht mit Z-Nähten zeigt signifikant weniger Spaltbildung als die Krackow-Naht mit Z-Nähten.

Tabelle 3.9: Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 200 Zyklen in der zweiten Serie

	200. Zyklus in der zweiten Serie
Mann-Whitney-U	0,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	< 0,001
Exakte Signifikanz (2-seitig)	< 0,001

Für die Krackow-Naht mit Z-Nähten ergab sich ein Median von 14,50 mm. Im Mann-Whitney-U-Test ergab sich ein $U = 0,00$ und ein $p < 0,001$. Somit kann die Alternativhypothese H_1 für die Spaltbildung bei 250 Zyklen in der zweiten Serie angenommen werden. Die Nullhypothese H_0 wird verworfen. Die Bunnell-Naht mit Z-Nähten zeigt signifikant weniger Spaltbildung als die Krackow-Naht mit Z-Nähten.

Tabelle 3.10: Mann-Whitney-U-Test für die Spaltbildung bei 250 Zyklen in der zweiten Serie

	250. Zyklus in der zweiten Serie
Mann-Whitney-U	0,000
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	< 0,001
Exakte Signifikanz (2-seitig)	< 0,001

3.2.2.6 Querschnittsfläche A

Für den Vergleich der Querschnittsflächen der Krackow-Technik mit Z-Nähten und der modifizierten Bunnell-Nahttechnik konnte ein parametrischer Test zum Vergleich genutzt werden, nämlich der t-Test für unverbundene Stichproben. Der Levene-Test bestätigte mit einer Signifikanz von 0,909 die Gleichheit der Varianzen. Der

anschließende t-Test ergab für $t(98) = 1,974$ und $p = 0,051$. Das Ergebnis bestätigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Querschnittsflächen der beiden Gruppen gibt.

3.3 Ergebnis

Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte bei $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} signifikant höhere Zyklusanzahlen als die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten. Auch bei Messung der Spaltbreite für den 200. und 250. Zyklus der ersten Serie ergaben sich hochsignifikante Vorteile zugunsten der Bunnell-Technik. Für den 200. und 250. Zyklus innerhalb der zweiten Serie zeigte sich ebenfalls eine deutliche Überlegenheit der Bunnell-Nahttechnik. Es wurde eine Power von $> 0,8$ verlangt, welche auf allen Stufen deutlich überschritten werden konnte.

4 Diskussion

Die Achillessehnenruptur ist die häufigste Sehnenruptur des Menschen und betrifft vor allem Männer im sportlich aktiven Alter. Mithilfe der typischen Klinik und apparativen Diagnostik ist eine Diagnose meist eindeutig zu stellen. Es kann zwischen einer konservativen und operativen Therapie gewählt werden. Die konservative Therapie eignet sich eher für Patienten mit geringem Anspruch oder einem hohen Operationsrisiko. Die operative Therapie ist für sportlich aktive Patienten häufig die beste Option, wobei zwischen minimalinvasiven und offen-chirurgischen Methoden unterschieden werden muss.

Da in dieser Arbeit mit der Krackow- und Bunnell-Nahttechnik zwei offen-chirurgische Techniken miteinander verglichen wurden, liegt das Hauptaugenmerk in der Diskussion auf den offen-chirurgischen Nahttechniken. In dieser Studie wurde mithilfe eines dreistufigen Testprotokolls im zyklischen Zugversuch *in vitro* untersucht, welche der beiden Nahttechniken nach einer festgelegten Anzahl von Zyklen eine geringere Dehiszenz aufweist. Das verwendete Testprotokoll wurde in der Literatur bereits beschrieben [133], jedoch wurden auf jeder der drei Stufen 1000 Zyklen durchlaufen und andere Techniken verglichen. Der zyklische Zugversuch wurde mit der Prüfmaschine ZwickiLine Z2.5 (Fa. ZwickRoell, Ulm, Deutschland) sowie dem optischen Messsystem PONTOS 5M (Gesellschaft für Optische Messtechnik, Braunschweig, Deutschland) durchgeführt.

Folgende Hypothesen wurden vor Durchführung der Versuche aufgestellt:

- **Nullhypothese H_0 :** Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten und der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten
- **Alternativhypothese H_1 :** Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen der Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten und der Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten

Diese Hypothesen bezogen sich auf die erreichten Zyklen bei einer initialen Spaltbildung sowie einer von 3 mm und 5 mm. Ebenfalls wurde die Spaltbildung in mm bei Erreichen des 200. und 250. Zyklus der ersten und zweiten Serie gemessen und verglichen.

Alle Präparationsschritte und Nähte wurden lediglich von einer Person durchgeführt, um ein unterschiedliches Vorgehen durch verschiedene Personen ausschließen zu können. Vor Beginn der Vor- sowie Hauptversuche wurden die genannten Nähte ausgiebig geübt, um eine möglichst flache Lernkurve innerhalb der Versuche zu generieren. Eine Verbesserung der Nahttechnik im Verlauf ist jedoch nicht auszuschließen.

Die Präparate stammten alle von etwa zwei Jahre alten Schweinen und es wurde jeweils nur der rechte Hinterlauf genutzt, um mögliche Unterschiede der Sehnenqualität möglichst gering zu halten. Die Querschnittsfläche A zeigte jedoch teils große Unterschiede zwischen den einzelnen Präparaten, innerhalb der Gruppen in den Hauptversuchen konnte jedoch kein signifikanter Unterschied der Querschnittsfläche A gezeigt werden. Rein makroskopisch waren keine Beschädigungen des Sehnenmaterials auszumachen. Mikroskopische Degenerationen, die mit dem bloßen Auge nicht sichtbar sind, waren jedoch nicht auszuschließen.

Das 2 mm breite Fibertape® (Fa. Arthrex, Naples, FL, USA) und 3-0 Vicryl SH-1 plus (Fa. Ethicon, Somerville, NJ, USA) wurden für alle Nähte genutzt. Es wurde darauf geachtet, dass die Nahtabstände bei allen Nähten penibel eingehalten wurden und nur Fadenmaterial derselben Charge verwendet wurde. Da vor allem das Fibertape® ein stark einschneidendes Nahtmaterial darstellt, ist davon auszugehen, dass es beim Durchziehen des Fadens zu Beschädigungen der Sehnenfasern gekommen ist. Der Faden wurde stets manuell durch die Sehne gezogen, da ein Anpacken mit Nadelhalter oder Pinzette zu einer Traumatisierung führt und dies somit eine stärkere Schädigung der Sehne verursachen könnte.

Sowohl die Prüfmaschine ZwickiLine Z2.5 als auch das optische Messsystem PONTOS 5M funktionierten während der kompletten Versuche fehlerfrei. Eine gewisse Ungenauigkeit im Rahmen der Messungen muss jedoch – wie bereits weiter oben beschrieben – berücksichtigt werden.

Im Folgenden sollen zuerst die erzielten Ergebnisse diskutiert und schließlich mit den bereits in der Literatur vorhandenen Ergebnissen verglichen werden.

Der Versuchsaufbau gründet sich auf ein Rehabilitationsprogramm und soll testen, ob ein früher Beginn der Belastung mit der jeweiligen Nahttechnik möglich ist. Die

Achillessehne wird in Neutralstellung etwa mit 20 N belastet. Eine passive Dorsalextension von 10° führt dabei etwa zu 100 N Belastung [132]. Dies stellt die erste Serie des Protokolls dar. Bei einer Belastung in einer speziellen Orthese mit einer Fersenerhöhung von 2,54 cm (1 Inch) erlebt die Sehne eine Belastung von 191 N. Vollbelastung im Stand ohne Erhöhung resultiert in einer Kraft von 369 N [131]. Dies sind die oberen Grenzwerte für die zweite und dritte Serie. Bei längerer Immobilisation nach Operation führt dies zu verlängerten Rekonvaleszenzzeiten und einer erhöhten Rerupturrate sowie zu Muskelatrophien, sodass eine frühe Mobilisation zur Optimierung der Heilung zu empfehlen ist [35, 141]. Der Faktor Heilung konnte in diesem Modell jedoch nicht berücksichtigt werden, sodass in dieser Studie von einer direkten Belastung nach Operation ausgegangen wird.

Die modifizierte Bunnell-Naht zeigte innerhalb der ersten Serie keinerlei Spaltbildung. Dies konnte bei den Messungen des 200. und 250. Zyklus in der ersten Serie nachgewiesen werden. Die initiale Spaltbildung begann innerhalb der zweiten Serie. Hierfür ergab sich ein Mittelwert mit SD von $441,1 \pm 91,8$ Zyklen (Median: 501) mit einem Maximum von 502. 32 % der Nähte zeigten eine initiale Spaltbildung innerhalb der zweiten Serie. Die restlichen 68% wiesen diese erst in der dritten Serie auf. Gemessen wurde hier der erste sichtbare Spalt, was klinisch jedoch kaum von Relevanz zu sein scheint. Eine Spaltbildung von 3 mm ereignete sich im Mittel nach $496,6 \pm 31,2$ (Median: 501) Zyklen. Das Maximum betrug 511 Zyklen. Eine Naht der modifizierten Bunnell-Technik versagte innerhalb der zweiten Serie, eine weitere Sehne erreichte eine Spaltbildung von 3,25 mm beim 250. Zyklus. 48 Reparationen blieben unterhalb der Marke von 3 mm. 49 Bunnell-Nähte konnten die dritte Serie beginnen.

Eine Spaltbildung von 5 mm ereignete sich nach $498 \pm 30,7$ (Median: 501) mit einem Maximum von 514 Zyklen. Bei Erreichen des 200. Zyklus der zweiten Serie betrug die Weite des Spalts lediglich $0,3 \pm 0,6$ mm (Median: 0,0 mm), beim 250. Zyklus $0,4 \pm 0,8$ mm (Median: 0,0 mm). Somit blieben 96 % aller Nähte innerhalb der zweiten Serie unter einer Spaltbildung von 3 mm und 5 mm, sodass die Belastung der Sehne nach Naht mit der modifizierten Bunnell-Technik in einer speziellen Orthese mit einer Erhöhung von 2,54 cm gut durchführbar scheint.

Bei Vollbelastung zeigte sich hingegen ein schnelles Versagen aller Nähte zu Beginn der dritten Serie. 60 % der Nähte versagten bereits bei Belastung innerhalb des ersten Zyklus der dritten Serie mit 369 N, indem sie eine Spaltbildung von 5 mm überschritten. Es konnte ein Maximum von 514 durchlaufenen Zyklen erreicht werden. Somit sollte eine direkt postoperative Vollbelastung der Sehne nach Reparatur mit der Bunnell-Technik mit Z-Nähten unterbleiben.

Eine initiale Spaltbildung trat in der Gruppe der modifizierten Krackow-Nahttechnik bei 98% der Nähte bereits in der ersten Serie auf. Die verbliebene Naht zeigte eine initiale Spaltbildung dann schließlich zum 251. Zyklus. Im Mittel kam es nach $41 \pm 62,7$ Zyklen (Median: 10,5) zu einer initialen Spaltbildung. Zu diesem Zeitpunkt ereignete sich in der Vergleichsgruppe der modifizierten Bunnell-Naht noch keine Spaltbildung. Eine Spaltbildung von 3 mm ergab sich nach $193,6 \pm 82,2$ (Median: 224) und einem Maximum von 315 Zyklen. 54 % der Nähte überschritten die 3 mm bereits innerhalb der ersten Serie. Die weiteren 46 % versagten innerhalb der zweiten Serie, meist bereits am Anfang. Eine Spaltbildung von 5 mm ereignete sich nach $238,5 \pm 83,9$ (Median: 251) Zyklen. 22 % der Nähte erreichten die zweite Serie nicht, 78 % erreichten die zweite Serie, versagten jedoch meist auch bereits zu Beginn. Lediglich eine Naht erreichte ein Maximum von 500 Zyklen.

Die dritte Serie wurde von keiner der modifizierten Krackow-Nähte erreicht. Innerhalb der ersten Serie zeigte die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten zum Zeitpunkt des 200. Zyklus im Mittel eine Spaltbildung von $3,1 \pm 2,5$ mm (Median: 2,75 mm). Das Maximum betrug 12,5 mm. Für den 250. Zyklus ergab sich ein Mittelwert mit SD von $3,7 \pm 2,7$ mm (Median: 3,25 mm). Bei Erreichen des 200. Zyklus der zweiten Serie wies die Krackow-Nahttechnik bereits eine Spaltbildung von $13 \pm 3,6$ mm (Median: 14,25 mm) auf. Diese erhöhte sich beim 250. Zyklus auf $13,6 \pm 3,6$ mm (Median: 14,5 mm). 46 % aller Nähte wiesen bereits zum 200. Zyklus der ersten Serie eine Spaltbildung ≥ 3 mm auf. Dies erhöhte sich auf 56 % beim 250. Zyklus. 14 % überschritten eine Spaltbildung von 5 mm zum 200. Zyklus der ersten Serie, 20 % zum 250. Zyklus.

Bereits eine Belastung von 100 N scheint für diese Nahttechnik – je nachdem wie die klinisch relevante Spaltbildung definiert wird – kritisch zu sein, da bereits > 50 % der Nähte eine Spaltbildung von ≥ 3 mm aufwiesen und es auch einige Sehnen mit einer

Spaltbildung ≥ 5 mm gab. Hier sollte ein sehr behutsames Nachbehandlungsprocedere angestrebt werden. Eine Belastung von 191 N in einer speziellen Orthese mit einer Erhöhung von 2,54 cm sowie eine Belastung von 369 N direkt nach der Operation kann nicht empfohlen werden.

Im Signifikanztest nach Mann-Whitney-U ergab sich für die Messung der initialen Spaltbildung sowie der Spaltbildung von 3 mm und 5 mm ein hochsignifikanter Unterschied mit einem $p < 0,001$. Die Messungen des 200. und 250. Zyklus, die jeweils innerhalb der ersten und zweiten Serie vorgenommen wurden, zeigten ebenfalls hochsignifikante Unterschiede zugunsten der modifizierten Bunnell-Nahttechnik mit einem $p < 0,001$.

Zu beachten ist jedoch auch die Streuung innerhalb der beiden Nahtgruppen. Während die modifizierte Bunnell-Nahtgruppe eine relativ geringe Streuung mit konstanteren Ergebnissen aufweist, zeigt die Gruppe der modifizierten Krackow-Nahttechnik deutliche Schwankungen. Dies bedeutet, dass die modifizierte Bunnell-Nahttechnik im Vergleich zur Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten besser beherrscht wurde und eine Verbesserung in der technischen Durchführung der Krackow-Technik eventuell zu besseren Ergebnissen dieser Gruppe führen würde.

Im Vorfeld wurde durch Üben der Nahttechniken versucht, die Lernkurve innerhalb der Versuche so flach wie möglich zu halten. Die Versuche zeigen jedoch eine Verbesserung in der Durchführung innerhalb der Gruppe der modifizierten Krackow-Nahttechnik mit laufender Nummer. Außerdem ist zu beachten, dass die Nähte nicht von einem erfahrenen Chirurgen mit Expertise in Sehnennähten angefertigt wurden.

Tabelle 4.1 zeigt eine Zusammenfassung der zyklischen Studien, die zum Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit dienen. Die Ergebnisse der einzelnen Studien sind dem Fließtext zu entnehmen.

Lee et al. [133] untersuchten an 15 humanen Achillessehnen von Kadavern 3 verschiedene Nahttechniken. Die erste Gruppe wurde mithilfe einer dem Achillon-System ähnlichen Naht genäht, die normalerweise eine perkutane Naht darstellt. Die zweite Gruppe war eine normale Krackow-Naht mit 3 Leiterstrukturen je Seite. Die dritte Gruppe war eine Krackow-Naht mit einer fortlaufenden epitendinösen Naht, die mit PDS

der Stärke 0 genäht wurde. Die Kern-Naht wurde jeweils mit einem Ethibond der Stärke 2 angelegt. Das Testprotokoll hatte ebenfalls drei Stufen von 20 - 100 N, 20 - 190 N und 20 - 369 N. Die Sehnen durchliefen jedoch 1000 Zyklen je Stufe bei 1 Hz.

Nach Überleben der zyklischen Belastung wurde noch ein Zugversuch mit 25 mm/s zur Findung der Maximalkraft durchgeführt. Gemessen wurde die Anzahl der Zyklen bei initialer Spaltbildung und einer von 5 mm sowie bei totalem Versagen. Die perkutane Naht zeigte im Mittel bereits nach 5 Zyklen eine initiale Spaltbildung sowie nach 22 Zyklen (Spannweite: 9 - 35) eine Spaltbildung von 5 mm. Alle Krackow-Nähte ohne Augmentation erreichten die zweite Serie und versagten innerhalb dieser komplett. Eine initiale Spaltbildung ereignete sich nach 502 Zyklen (Spannweite: 90 - 1070). Eine Spaltbildung von 5 mm erfolgte im Mittel nach 741 Zyklen. Alle augmentierten Krackow-Nähte erreichten die dritte Serie, ohne eine Spaltbildung aufzuweisen. Eine überlebte sogar das komplette Testprotokoll. Eine initiale Spaltbildung trat in dieser Studie später auf als in der Gruppe der modifizierten Krackow-Nähte der hier vorgelegten Arbeit. Die 5 mm Spaltbildung ist in etwa vergleichbar.

Die modifizierte Bunnell-Technik zeigte bessere Ergebnisse als die Krackow-Naht und die perkutane Technik von Lee et al. Jedoch ergab die Krackow-Naht mit Augmentation bessere Ergebnisse als beide Nahtgruppen dieser Studie. Die Augmentation wurde hier jedoch auch anders angelegt. Es wurde ein dickerer Faden mit PDS der Stärke 0 verwendet und eine fortlaufende Naht an der Sehne am Rupturspalt angebracht. Die Einstiche befanden sich dabei 2,5 cm vom Rupturspalt entfernt und fassten ebenfalls Sehngewebe. Dies erscheint eine bessere Versorgung im Bereich des Rupturspalts – im Vergleich zu den drei Z-Nähten, die lediglich eine Entfernung von 0,6 cm – zum Rupturspalt aufwiesen – zu sein. Diese fortlaufende Naht sorgt aber auch für eine deutliche Verkürzung der Sehne und ergibt zwar gute Ergebnisse im in vitro Experiment, könnte jedoch zu einer schlechteren Heilung sowie einem Verlust von Sehnenlänge in der klinischen Praxis führen und ist deshalb kritisch zu bewerten. Die Gruppengröße war in dieser Studie mit 5 Sehnen pro Gruppe sehr gering. Die Messung des Rupturspalts erfolgte kontinuierlich mithilfe eines Messschiebers, was im Vergleich zu einer optischen Messung eine ungenaue Methode darstellt.

Demetracopoulos et al. [142] führten ihre Versuche an 31 humanen Achillessehnen durch. Es wurden nur minimalinvasive Techniken untersucht. 10 Nähte wurden nach dem Modell des Achillon Systems und 21 Nähte mit 3 verschiedenen Variationen des „Percutaneous Achilles Repair System (PARS, Arthrex, Naples, FL, USA)“ ausgeführt. Fiberwire® der Stärke 2 wurde zur Reparation genutzt. Anfänglich wurden 10 Zyklen von 20 - 100 N appliziert. Anschließend wurde eine statische Vorspannung von 20 N erzeugt. Dann folgte eine Belastung der Sehne von 20 - 100 N und 20 - 190 N für jeweils 1000 Zyklen bei einer Frequenz von 1 Hz. Sobald eine Spaltbildung von 9,5 mm erreicht wurde, setzte ein Zugversuch zur Findung der Maximalkraft mit 0,025 m/s ein. Eine Spaltbildung von 5 mm ereignete sich im Mittel bei 1002 Zyklen (Spannweite: 170 - 1013) für das Achillon System sowie von 1004 Zyklen (Spannweite: 91 - 1223) für die PARS-Nähte. Hierfür zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Techniken mit einem $p = 0,053$.

Signifikante Unterschiede zugunsten der PARS-Techniken zeigten sich in Bezug auf eine Spaltbildung von 2,0 und 9,5 mm sowie für die Maximalkraft. Die modifizierten Krackow-Nähte unserer Studie zeigten ebenfalls häufig eine Spaltbildung von 5 mm zu Beginn der zweiten Serie. Jedoch durchliefen diese Nähte nur ein Viertel der Zyklen der hier getesteten Nähte. Mit einem Mittelwert von 238,5 Zyklen lag dieser noch innerhalb der ersten Serie, sodass die perkutanen Nähte etwas besser zu sein scheinen. Die modifizierte Bunnell-Technik ist den hier getesteten perkutanen Techniken überlegen.

Carmont et al. [143] nutzten ein ähnliches Testprotokoll zur Prüfung von 19 bovinen Flexorsehnen, die mit einer modifizierten Bunnell-Kessler-Naht versorgt wurden. Proximal des Rupturspalts wurde im Stile einer Bunnell-Naht und distal mit einer Kessler-Naht genäht. Es erfolgte eine Aufteilung in 3 Gruppen. Die erste Gruppe bestand aus 4 Strängen, die zweite Gruppe aus 6 Strängen. Es wurde jeweils ein Fiberwire® der Stärke 2 verwendet. Die dritte Gruppe bestand aus 8 Strängen und wurde mit einem resorbierbaren Maxon-Faden der Stärke 1 (Fa. Covidien, Mansfield, Massachusetts, USA) versorgt. Zu Beginn wurden 10 Zyklen von 20 - 100 N appliziert, gefolgt von 90 Zyklen von 20 - 100 N und weiteren 100 Zyklen von 20 - 190 N. Zum Schluss wurde ein Zugversuch zur Bestimmung der Maximalkraft durchgeführt. Die Nahtkonstrukte galten ab einer Spaltbildung ≥ 20 mm als Versager. Die Entfernung wurde jedoch nicht kontinuierlich gemessen, sondern erst am Ende jeder Stufe mithilfe eines Messschiebers

bestimmt. Ein Spaltbildung von 20 mm erscheint sehr viel zu sein. Die Autoren berufen sich dabei auf eine Studie von Heikkinen et al. [144], die eine Separation von 20 mm mit einer vertretbaren Elongation nach konservativer Therapie verglichen hatten. Zwischen den mithilfe des Fiberwire der Stärke 2 angelegten Nähten zeigt sich kein signifikanter Unterschied nach der 3. Phase ($p = 1$). Die Nähte, die mithilfe des Maxon-Fadens angefertigt wurden, zeigten ein signifikant schlechteres Ergebnis im Vergleich zu den Nähten mit 4 und 6 Strängen mit jeweils einem $p = 0,017$ bzw. $p = 0,04$. Der resorbierbare Faden scheint somit nicht geeignet für die Reparatur. Bereits nach 10 Zyklen zeigten alle mit dem Maxon-Faden versorgten Rupturen eine Spaltbildung von $11,0 \pm 2,7$ mm. Keine der Nähte blieb unterhalb einer Spaltbildung von 5 mm. Die mit 4 Strängen versorgten Rupturen zeigten im Mittel nach 10 Zyklen eine Spaltbildung von 5,9 mm mit einer SD von 1,5 mm. Lediglich eine Naht blieb unterhalb einer Spaltbildung von 5 mm. Nach 100 Zyklen wiesen alle Nähte eine Spaltbildung > 5 mm auf. Die Nähte mit 8 Strängen wiesen nach 100 Zyklen eine Spaltbildung von $8,2 \pm 4,3$ mm auf. Lediglich eine Naht blieb unterhalb der Marke von 5 mm. Folglich waren nach weiteren 100 Zyklen mit einer Belastung von 190 N alle Nähte weit über einer Spaltbildung von 5 mm. Sowohl die modifizierte Krackow-Naht als auch Bunnell-Naht zeigten deutlich bessere Ergebnisse.

Tian et al. [145] nutzten 20 bovine Achillessehnen, um zwei modifizierte Krackow-Techniken miteinander zu vergleichen. Beide Techniken wurden mit 2 Fäden genäht, sodass jeder Faden einen Stumpf der Ruptur bis zum Spalt in der gewohnten Krackow-Technik versorgte. Anschließend wurden die Fäden durch das Rupturufer der Gegenseite geführt und jeweils am Steg geknotet. Die LBMK („locking block modified Krackow“) - Technik führte die Fäden der Gegenseite jeweils durch die drei Schlaufen der angelegten Krackow-Naht und verknötete die Fäden nach Durchtritt der letzten Schlaufe. Die zweite Technik war eine Giftbox-Naht. Die Nähte wurden jeweils mit zwei Fiberwire®-Fäden der Stärke 2 angefertigt. Die Sehnen wurden für 5 Minuten mit 20 N belastet. Anschließend wurde eine zyklische Belastung von 20 - 100 N für 500 Zyklen und von 20 - 190 N für weitere 500 Zyklen appliziert. Die Frequenz betrug ebenfalls 1 Hz. Im Anschluss erfolgte noch eine Testung der Maximalkraft mit 25 mm/s. Eine Spaltbildung von 5 mm galt als Versagen der Naht. Die Spaltbildung wurde mithilfe eines Messschiebers gemessen. Die Spaltbildung nach den ersten 500 Zyklen belief sich auf

0,76 ± 0,44 mm für die LBMK-Technik sowie auf 0,86 ± 0,47 mm für die Giftbox-Technik. Keine Naht überschritt eine Spaltbildung von 2 mm. Die modifizierte Bunnell-Technik zeigte im Vergleich zu diesen beiden Techniken keine Spaltbildung nach der ersten Serie, wurde jedoch auch nur mit der Hälfte an Zyklen belastet. Die modifizierte Krackow-Technik dieser Arbeit ist klar unterlegen. Nach der zweiten Serie zeigte die LBMK-Technik eine Spaltbildung von 3,68 ± 1,08 mm. Zwei Nähte überschritten eine Spaltbildung von 5 mm. Die Giftbox-Technik hatte drei Versager und wies eine Spaltbildung von 4,07 ± 1,28 mm auf. Auch hier zeigte die modifizierte Bunnell-Technik bessere Ergebnisse. Die modifizierte Krackow-Technik konnte jedoch nicht mithalten.

In einer Arbeit derselben Arbeitsgruppe [146] wurde die LBMK-Technik mit der Kessler- und PARS-Technik mithilfe desselben Versuchsaufbaus verglichen. Für die LBMK-Technik wurden die Ergebnisse aus der bereits vorgestellten Studie übernommen und mit jeweils 10 Nähten der Kessler- und PARS-Technik verglichen. Nach den ersten 500 Zyklen zeigte die Kessler-Technik eine Spaltbildung von 1,80 ± 0,82 mm. 4 Nähte zeigten eine Spaltbildung > 2 mm. Die PARS-Technik wies eine Spaltbildung von 2,66 ± 1,04 mm auf. Hier boten 8 Nähte eine Spaltbildung > 2 mm. Nach der zweiten Serie hatten alle Nähte der PARS-Technik versagt und wiesen einen Spalt von 7,59 ± 1,26 mm auf. 8 Nähte der Kessler-Technik hatten zu diesem Zeitpunkt ebenfalls versagt und wiesen eine Spaltbildung von 5,70 ± 0,89 mm auf. Die LBMK-Technik wies nach 500 und 1000 Zyklen sowie für die Maximalkraft signifikant bessere Ergebnisse mit einem $p < 0,001$ auf. Die modifizierte Krackow-Naht dieser Studie zeigte erneut schlechtere Ergebnisse als alle hier verwendeten Techniken. Die modifizierte Bunnell-Technik zeigte hingegen bessere Ergebnisse mit einer Spaltbildung von 0,4 ± 0,8 mm nach der zweiten Serie. Sie durchlief jedoch nur die Hälfte der Zyklen und die Maximalkraft wurde nicht getestet.

Van Dyke et al. [147] führten ebenfalls einen zyklischen Zugversuch mit humanen Achillessehnen durch. Sie verglichen die modifizierte Krackow-Technik in Giftbox-Art mit 4 Leiterstrukturen je Seite mit der Bunnell-Technik. Hierfür nutzten sie Fiberwire® der Stärke 2 als Nahtmaterial. Der Rupturspalt wurde mithilfe einer fortlaufenden epitendinösen Naht mit Polypropylen 3-0 gesichert. Die Sehnen waren am Calcaneus belassen und in 30° Dorsalextension fixiert, sodass dies einer Belastung der Sehne mit einer Erhöhung gleichen sollte. Die Sehnen wurden zu Beginn für 1 Minute mit 10 N belastet. Anschließend folgten 1000 Zyklen von 10 bis 100 N bei einer Frequenz von 2

Hz. Mit Messschiebern wurde der Spalt nach dem 500. und 1000. Zyklus gemessen. Ab einem Abstand von 5 mm galt die Naht als Versager. Nach 1000 Zyklen schloss sich ein eventueller Test auf Maximalkraft mit 0,2 mm/s an. Nach 500 Zyklen konnten keine Versager ausgemacht werden. 2 von 10 Bunnell-Nähten versagten nach 1000 Zyklen, bei 4 weiteren Nähten lag die Spaltbildung zwischen 2 und 4,9 mm. Lediglich eine Naht der Giftbox-Gruppe wies einen Spalt mit 1,5 mm auf. Die Ergebnisse für die Giftbox waren signifikant besser ($p = 0,02$), dies konnte im Test auf Maximalkraft bestätigt werden. Lediglich 2 Messungen während des zyklischen Zugversuchs sind relativ ungenau und erschweren einen Vergleich mit den Daten dieser Studie. Es wurden viermal mehr Zyklen durchlaufen, jedoch wurde eine geringere Kraft aufgewendet. Bei einer Kraft von 100 N zeigten die Nähte der modifizierten Bunnell-Technik dieser Studie nach 250 Zyklen keine Spaltbildung, sodass diese ein besseres Ergebnis erzielt haben, ebenso im Vergleich zu der Giftbox-Technik. Die Maximalkraft wurde jedoch nicht getestet.

Boin et al. [148] verglichen in einem Modell der distalen Achillessehnenruptur die herkömmliche Krackow-Nahttechnik mit 4 Leiterstrukturen mit einer Nahtankerkonstruktion, die Swivelock Anker (Fa. Arthrex, Naples, FL, USA) nutzte. Es wurde Fiberwire® der Stärke 2 verwendet. Die Sehne wurde in 60° Dorsalextension ausgerichtet, um die postoperative Belastung in einem frühen Rehabilitationsprogramm zu simulieren. Die Sehnen wurden zuerst für 60 Sekunden mit 100 N belastet. Anschließend erfolgte eine zyklische Belastung von 10 - 100 N über 2000 Zyklen bei 2 Hz. Mithilfe eines Messschiebers wurde die Länge der Sehne nach der Vorbelastung für 60 Sekunden sowie nach dem zyklischen Teil gemessen. Die Differenz der beiden Messungen ergab das Ergebnis. Eine Messung des Rupturspalts wäre für eine Vergleichbarkeit besser gewesen, da hier ebenfalls die Elongation einen Einfluss besitzt. Versagt hatten die Nähte ab einer Spaltbildung von 5 mm. Die Krackow-Technik zeigte nach dem zyklischen Zugversuch im Mittel einen Abstand von $3,33 \pm 1,47$ mm und war der Nahtankerkonstruktion ($1,54 \pm 1,13$ mm) statistisch signifikant unterlegen.

Benthien et al. [149] nutzten eine Krackow-Nahttechnik mit 2 Kernnähten pro Seite zum Vergleich des Fiberwire® der Stärke 2 mit einem Ethibond Polyester Faden der Stärke 2 (Ethicon, Somerville, NJ, USA). Die Naht bestand aus 5 Leiterstrukturen pro Seite und der Knoten lag im Rupturspalt. Alle Sehnen wurden mit einer Kraft von 10 N vorbelastet. Anschließend folgte eine Belastung bis 50 N, 75 N, 100 N oder 125 N für Sehnen, die

mit dem Polyesterfaden versorgt wurden, für 3000 Zyklen bei einer Frequenz von 1 Hz. Der Spalt wurde mithilfe eines Sensors gemessen, der in die Sehne gelegt wurde. Die Nähte, die bis 75 N belastet wurden, wurden mit Nähten verglichen, die mit Fiberwire® der Stärke 2 versorgt wurden. Eine Spaltbildung ≥ 5 mm ereignete sich für alle Nähte, die bis 100 N oder 125 N belastet wurden. Für die Nähte mit Fiberwire® zeigte sich nach 3000 Zyklen eine Spaltbildung von $3,3 \pm 0,3$ mm, für die mit Polyester-Fäden versorgten Sehnen eine von $4,9 \pm 1,0$ mm. Dies stellt einen signifikanten Unterschied dar ($p = 0,002$). Die modifizierte Krackow-Technik dieser Studie wies nach 250 Zyklen mit einer Belastung von 100 Zyklen eine Spaltbildung von $3,66 \pm 2,75$ mm auf. Die Nähte von Benthien et al. hatten während der Belastung mit 100 N alle versagt, jedoch ist eine Vergleichbarkeit schwierig, da wesentlich mehr Zyklen durchlaufen wurden und die Kräfte unterschiedlich waren. Die Bunnell-Technik dieser Studie scheint hingegen besser zu sein, da diese selbst nach einer Belastung von 191 N nach insgesamt 500 Zyklen eine deutlich geringere Spaltbildung aufweist.

Jordan et al. [150] untersuchten an 80 Flexorensehnen von Schweinen vier verschiedene Arten der Bunnell-Technik mithilfe eines zyklischen Testprotokolls. Die erste Gruppe stellte die normale Bunnell-Technik dar. In der zweiten Gruppe wurde der Faden stärker angezogen, sodass es beiderseits des Rupturspalts zu einer Komprimierung von 3 mm kam. Die dritte Gruppe war eine sogenannte „Cross-lock Bunnell“. Hier verläuft ein Teil des Fadens auf der Sehne. Die vierte Gruppe stellte eine stärker angezogene „Cross-lock Bunnell“ dar. Die Kern-Naht wurde mit PDS der Stärke 1 und eine epitendinöse Naht mit PDS 5-0 angelegt. 10 Sehnen jeder Gruppe wurden zyklisch getestet, die anderen 10 unterliefen einen Test der Maximalkraft. Im zyklischen Versuch wurden die Sehnen zuerst mit 3 N belastet, ehe sie für 10 Zyklen bis zu 10 N belastet wurden. Es folgte ein Testprotokoll von 20 - 100 N für 100 Zyklen mit einer Rate von 20 mm/min. Beim Test auf Maximalkraft zeigte die normale Bunnell-Naht eine 5 mm Spaltbildung bereits bei $79,9 \pm 12,3$ N. Für die zweite, dritte und vierte Gruppe ergaben sich $128,5 \pm 30,3$ N, $116,9 \pm 13,3$ N bzw. $182,2 \pm 22,7$ N. Die modifizierte Bunnell-Technik dieser Studie zeigte nach 500 Zyklen und einer Belastung bis 191 N nur eine geringe Spaltbildung und somit ein besseres Ergebnis als die 4 Gruppen von Jordan et al. Im zyklischen Zugversuch wurde die Elongation gemessen, sodass eine Vergleichbarkeit hier wiederum nicht

möglich ist. Die einfache Bunnell-Naht zeigte im Vergleich zu den anderen Gruppen jedoch die deutlichste Elongation, am geringsten war sie in der zweiten Gruppe.

Clanton et al. [151] verglichen an 33 humanen Achillessehnen eine aus 3 Kessler-Nähten bestehende offene Technik mit dem Achillon-System, der PARS-Technik und einer SpeedBridge-Technik, die für distale Achillessehnenrupturen genutzt wird und 2 Anker für die Verankerung im Calcaneus nutzt. Als Nahtmaterial wurde ein Fiberwire® der Stärke 2 genutzt. Die offene Technik wurde zusätzlich mit einer fortlaufenden epitendinösen Naht versorgt. Hierfür wurde Monocryl 2-0 (Fa. Ethicon, Somerville, NJ, USA) verwendet. Das Testprotokoll bestand aus 4 Stufen mit je 250 Zyklen bei einer Frequenz von 1 Hz. Es war folgendermaßen aufgebaut: 20 - 100 N, 20 - 200 N, 20 - 300 N, 20 - 400 N. Nach Durchlauf aller Zyklen wurde die Maximalkraft mit 25 mm/s getestet. Hier wurde jedoch nicht die Spaltbildung gemessen, sondern die Elongation, sodass eine Vergleichbarkeit schwierig ist. In die Elongation fließt neben der Vergrößerung des Spalts auch die Verlängerung der Sehne während des Zugvorgangs mit ein. Die Elongation der offenen Technik nach 250 Zyklen war mit $5,2 \pm 1,1$ mm signifikant niedriger als die der minimalinvasiven Techniken. Die Autoren schlussfolgerten, dass offene Techniken einem frühen Rehabilitationsprogramm besser zugänglich sind als die minimalinvasiven Techniken.

Backus et al. [152] nutzten den gleichen Versuchsaufbau, untersuchten aber ebenfalls nicht die Spaltbildung, sondern die Elongation. Die besten Ergebnisse zeigten sich für eine sechsfache Kessler-Naht, die mit Fäden der Stärke 2-0 genäht wurden, sowie für eine Variante, die aus 3 Kessler-Nähten bestand. 2 der 3 Kern-Nähte wurden mithilfe von Fiberwire® der Stärke 2 und 1 Kern-Naht mit FiberTape® angebracht. Im umgekehrten Verhältnis der 3 Kern-Nähte zeigten sich schlechtere Ergebnisse. Im Median überlebte die Technik mit 6 Kessler-Nähten 805 Zyklen und wies nach 250 Zyklen eine Elongation von 5,1 mm auf. Die Variante mit 3 Kessler-Nähten überlebte im Median 1000 Zyklen und wies nach 250 Zyklen eine Elongation von 4,6 mm auf. Laut den Autoren scheint diese Technik einem frühen Rehabilitationsprogramm in einer Orthese ohne Erhöhung zugänglich zu sein.

In weiteren Studien wurde ein anderes Testprotokoll genutzt. Hierbei wurden die Sehnen zuerst mit 10 N belastet. Es folgte eine zyklische Phase von 2 bis 30 N für 20 Zyklen mit

2 N/s oder 5 N/s. Zum Schluss erfolgte ein Test der Maximalkraft mit 6 mm/s. Dieses Protokoll gleicht dem dieser Studie jedoch kaum. Auch die zyklische Belastung von 2 - 30 N für 20 Zyklen scheint eher willkürlich gewählt, sodass eine Vergleichbarkeit hier nicht gegeben ist. Bei Berlet et al. [153] wurde die normale Krackow-Technik mit einer – mithilfe von Kollagenmatrix – verstärkten Krackow-Naht verglichen. Hier zeigte sich für die Krackow-Naht nach 20 Zyklen bereits eine Spaltbildung von $4,6 \pm 3,9$ mm. Die augmentierte Technik erwies sich mit $0,7 \pm 0,7$ mm als widerstandsfähiger. Die Ergebnisse der Krackow-Naht sind schlechter als die für die modifizierte Krackow-Technik dieser Studie, sodass bei Berlet et al. von einer insuffizienten Anlage der Krackow-Nähte ausgegangen werden kann. Weder Song et al. [154], noch Giza et al. [155] oder Barber et al. [156] führten eine Messung des Spalts durch.

Die epitendinöse Naht wurde in dieser Studie mithilfe von 3 Z-Nähten angebracht. Diese wurden nur auf der posterioren Fläche der Sehne angebracht, da eine anteriore Versorgung in vivo schwierig zu bewerkstelligen ist. Es gilt als bewiesen, dass die epitendinöse Naht das Nahtkonstrukt im Vergleich zur Anlage der jeweiligen Kern-Naht ohne epitendinöse Naht deutlich verstärkt und die Spaltbildung verringert [157]. Shepard et al. [158] untersuchten in einem Zugversuch der Maximalkraft zwei verschiedene Techniken der epitendinösen Naht. Eine fortlaufende Naht sowie eine Kreuzstichnaht („cross-stitch suture“) wurde mithilfe eines Nylonfadens der Stärke 4-0 in kompletter Zirkumferenz der Sehne angebracht.

Die Kreuzstichnaht wurde von Silfverskiöld et al. beschrieben [159, 160]. Die Kern-Naht war jeweils eine Krackow-Naht, die mit Ethibond der Stärke 2 angefertigt wurde. Es zeigte sich eine um 53 % erhöhte Maximalkraft zugunsten der Kreuzstichnaht. Lee et al. [161] verglichen die Kreuzstichnaht mit einer Versorgung des Rupturspalts mithilfe von 3 Nähten, die jeweils die Form einer 8 bildeten. Dabei zeigte sich die Kreuzstichnaht in Hinblick auf die maximale Kraft bei Versagen der Naht und Erreichen einer Spaltbildung von 5 mm hochsignifikant im Vorteil ($p < 0,001$). Dieselbe Arbeitsgruppe nutzte diese Verstärkung in einer späteren Studie, die bereits oben ausführlich beschrieben wurde [133]. Die Versorgung durch Lee et al. scheint ebenfalls die gesamte Zirkumferenz zu erfassen. Dies ist in vivo jedoch schwierig durchführbar, wäre jedoch der Idealfall. Im Vergleich zur Anbringung von 3 Z-Nähten scheint eine fortlaufende Kreuzstichnaht mit zusätzlichem Greifen von Sehngewebe eine verbesserte Versorgungsart darzustellen.

Es ist bisher immer noch nicht klar, welche Spaltbildung zu einem klinischen Versagen der Naht führt und ob dies interindividuelle Unterschiede zeigt. In der Literatur wird meist von einem Versagen der Naht ab einer Spaltbildung von 5 mm ausgegangen [162]. Hierfür wären optimalerweise in vivo Versuche am Menschen nötig, die jedoch nicht durchführbar sind. Eventuell könnte dies in Zukunft am Tiermodell erprobt werden.

Die Tenotomie wurde in dieser Studie mit einem glatten Schnitt durchgeführt, sodass die Abstände im Rupturspalt immer die gleichen waren. Eine natürliche Ruptur hinterlässt jedoch ausgefranste Enden. Die Risse der einzelnen Sehnenfasern liegen dabei nicht auf derselben Höhe und eine Adaptation stellt sich deutlich schwieriger dar. In vivo könnte es zu schlechteren Ergebnissen der jeweiligen Techniken im Vergleich zum Nähen am Modell kommen. Natürliche Rupturen weisen stets degenerativ verändertes Gewebe auf [42]. Die Sehnen der Schweine wurden im Vorhinein zumindest auf grob sichtbare Veränderungen überprüft und haben eine geringere Wahrscheinlichkeit der Degeneration, da diese lediglich ein Alter von etwa 2 Jahren aufwiesen.

In den zyklischen Studien werden meist unterschiedliche Versuchsaufbauten genutzt. So unterscheiden sich die Prüfmaschinen sowie die Messsysteme erheblich voneinander. Die Prüfmaschinen sind meist von unterschiedlichen Herstellern, scheinen jedoch hinsichtlich der Durchführung der Protokolle ähnliche Ergebnisse zu erzielen. Die Messung des Spalts weicht jedoch deutlich voneinander ab. In dieser Studie wurde ein optisches Messsystem verwendet, das in einem vorgegebenen Rhythmus Bilder akquirierte. So konnte eine genaue Bestimmung des Spalts über die Zeit festgestellt werden. In anderen Studien wurde häufig ein handelsüblicher Messschieber zur Bestimmung des Spalts genutzt. Eine kontinuierliche Messung des Spalts bei einer Kadenz von bspw. 1 Hz erscheint hier schwierig durchführbar. In einigen Studien wurde der Spalt erst am Ende der jeweiligen Stufe gemessen, sodass eine bestimmte Spaltweite nicht einer genauen Zykluszahl zugeordnet werden konnte. In dieser Studie wurde ein genaues und hochwertiges Messsystem genutzt.

Auch die Testprotokolle zeigten erhebliche Unterschiede. Ein dreistufiges Protokoll – angelehnt an ein frühes Rehabilitationsprogramm – scheint am sinnvollsten und sollte in weiteren Studien verwendet werden. Sollten Sehnen am Ende der dritten Stufe noch nicht versagt haben, ist ein Test der Maximalkraft F_{max} empfehlenswert, um etwaige

Unterschiede detektieren zu können. Dies war in dieser Studie jedoch nicht nötig, da alle Nähte spätestens zu Beginn der dritten Stufe versagten.

Das Sehnenmaterial sollte idealerweise menschlich sein, um eine optimale Übertragbarkeit auf den Patienten zu gewährleisten. Dies stellt jedoch einen großen Aufwand dar und ist in größeren Stückzahlen schwierig zu erhalten. In weiteren Studien werden Sehnen vom Rind, Schwein, Schaf oder Hasen genutzt. Die Wahl fiel in dieser Studie auf die des Schweins, da die tiefen Flexorensehnen der menschlichen Achillessehne ähneln und in großen Stückzahlen einfach zu erwerben sind. Dies stellt einen guten Kompromiss dar, sodass eine Übertragbarkeit auf den Menschen zwar nicht komplett gegeben ist, jedoch ein Vergleich der jeweiligen Nahtmaterialien oder Nahttechniken gute Hinweise auf die Versorgung beim Menschen geben kann.

Es wird meist ein Fiberwire® der Stärke 2 genutzt. Dieser zeigte sehr gute Ergebnisse [149]. Das in dieser Studie verwendete Fibertape® wurde nur in einer weiteren vergleichbaren Studie genutzt und zeigte zusammen mit 2 weiteren Fiberwire® der Stärke 2 vielversprechende Ergebnisse. Da das Fibertape® mit 2 mm jedoch sehr breit ist, zeigte es in Kombination mit einem weiteren Fibertape® und Fiberwire® der Stärke 2 schlechtere Ergebnisse [152]. Hierfür sind ebenfalls noch weitere Studien nötig, um herauszufinden, in welcher Anwendung das Fibertape® eine optimale Versorgungsmöglichkeit darstellt.

Die modifizierte Bunnell-Nahttechnik zeigte gute Ergebnisse und scheint einer frührehabilitativen Belastung in einer speziellen Orthese mit Erhöhung von 2,54 cm gut Stand zu halten. Die Krackow-Nahttechnik mit 3 Z-Nähten sollte in zukünftigen Studien jedoch verbessert werden. Die Giftbox- oder LBMK-Modifikationen der Krackow-Naht stellen hierfür gute Alternativen dar und können in weiteren Studien gegen eine modifizierte Bunnell-Naht getestet werden. Die zusätzliche Versorgung des Rupturspalts mit einer epitendinösen Naht sollte auf jeden Fall erfolgen. Die 3 Z-Nähte scheinen hierfür schlechter geeignet als eine fortlaufende Naht, optimalerweise in Kreuzstichttechnik. Eine Versorgung sollte aus Gründen der Übertragbarkeit auf die klinische Praxis jedoch nur an der dorsalen Seite sowie an der medialen und lateralen Seite erfolgen.

Eine Übernahme der Ergebnisse biomechanischer Arbeiten auf die klinische Praxis ist vorsichtig zu bewerten, da der Faktor Heilung sowie die komplexe Anatomie in vivo nicht nachgebildet werden können. Diese Studie nimmt ebenfalls keinen Bezug auf Unterschiede zwischen Mann und Frau sowie auf Menschen unterschiedlicher Ethnien.

Es ist nach wie vor nicht klar, welche Technik die Beste ist. Auch zur Findung des optimalen Nahtmaterials sind weitere Studien nötig. Eine frührehabilitative Belastung im Rahmen der Möglichkeiten und mit physiotherapeutischer Expertise kann zur verbesserten Heilung empfohlen werden. Die Ergebnisse nach Versorgung mittels Naht können alle nicht mit einer intakten Sehne mithalten, sodass eine Belastung der Naht nur mit Vorsicht erfolgen sollte.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der zyklischen Studien. Die Ergebnisse sind dem Fließtext zu entnehmen.

Autor	n	Präparat	Nahtmaterial	Vorbelastung	F_{max}	Testprotokoll	f	Nahttechnik
Backus	36	Mensch	Fiberwire® #2 Fibertape® 2 mm Nähte # 2-0	nein	ja (2,5 mm/s)	vierstufig, je 250 Zyklen: 20 - 100 N; 20 - 200 N, 20 - 300 N; 20 - 400 N	1 Hz	Kessler (4 Varianten)
Benignus	100	Schwein	Fiberwire® #2 Vicryl #3-0 (epitendinös)	nein	nein	dreistufig, je 250 Zyklen: 20 - 100 N 20 - 191 N 20 - 369 N	1 Hz	mod. Krackow mod. Bunnell
Benthien	27	Rind	Fiberwire® #2 Ethibond #2	10 N	ja (1 mm/s)	bis 50 N, 75 N, 100 N oder 125 N, je 3000 Zyklen	1 Hz	Krackow
Boin	18	Mensch	Fiberwire® #2	100 N für 1 min	ja (0,2 mm/s)	10 - 1000 N, 2000 Zyklen	2 Hz	Krackow Swivelock Ankernaht
Carmont	19	Rind	Fiberwire® #2 Maxon #1	10 Zyklen: 20 - 100 N	ja	zweistufig: 20 - 100 N (90 Zyklen) 20 - 190 N (100 Zyklen)	1 Hz	Kombination aus Bunnell und Kessler
Clanton	33	Mensch	Fiberwire® #2 Monocryl #2-0 (epitendinös)	nein	ja (2,5 mm/s)	vierstufig, je 250 Zyklen: 20 - 100 N; 20 - 200 N, 20 - 300 N; 20 - 400 N	1 Hz	Kessler Achillon PARS SpeedBridge
Demetracopoulos	31	Mensch	Fiberwire® #2	10 Zyklen: 20 - 100 N, dann statisch 20 N	ja (2,5 mm/s)	zweistufig, je 1000 Zyklen: 20 - 100 N 20 - 190 N	1 Hz	Achillon PARS (3 Varianten)
Jordan	80	Schwein	PDS #1 PDS #5-0 (epitendinös)	3 N, dann 10 Zyklen bis 10 N	nein	20 - 100 N für 100 Zyklen	20 mm/min	Bunnell (4 Varianten)
Lee	15	Mensch	Ethibond #2 PDS #0 (epitendinös)	nein	ja (2,5 mm/s)	dreistufig, je 1000 Zyklen: 20 - 100 N 20 - 190 N 20 - 369 N	1 Hz	Achillon Krackow Mod. Krackow
Tian	20	Rind	Fiberwire® #2	20 N für 5 min	ja (2,5 mm/s)	zweistufig, je 500 Zyklen: 20 - 100 N 20 - 190 N	1 Hz	LBMK Giftbox
Tian	30	Rind	Fiberwire® #2	20 N für 5 min	ja (2,5 mm/s)	zweistufig, je 500 Zyklen: 20 - 100 N 20 - 190 N	1 Hz	LBMK Kessler ARS
Van Dyke	44	Mensch	Fiberwire® #2 Polypropylen 3-0 (epitendinös)	10 N für 1 min	ja (0,2 mm/s)	10 - 100 N, 1000 Zyklen	2 Hz	Giftbox Bunnell

5 Zusammenfassung

Eine akute Achillessehnenruptur kann sowohl konservativ als auch operativ therapiert werden. Dabei unterscheidet man zwischen offen-chirurgischen und minimalinvasiven Operationstechniken. In dieser Arbeit wurde eine modifizierte Krackow-Technik mit drei Z-Nähten mit einer modifizierten Bunnell-Technik verglichen, die ebenfalls mit drei Z-Nähten augmentiert wurde. Genäht wurde an 100 Flexorensehnen von zwei Jahre alten Schweinen. Für diese zyklische Studie wurde ein dreistufiges Testprotokoll genutzt, das sich an einem frührehabilitativen Behandlungsprotokoll orientierte. Es erfolgten Belastungen von 20 - 100 N, 20 - 191 N und 20 - 369 N für je 250 Zyklen bei einer Kadenz von 1 Hz. Hierfür wurden die Materialprüfmaschine ZwickiLine Z2.5 und das optische Messsystem PONTOS 5M genutzt. Die Kernnaht wurde mithilfe des Fibertape® 2 mm und die Z-Nähte mithilfe von Vicryl 3-0 genäht. Gemessen wurde die Anzahl der Zyklen bis zum Erreichen einer initialen Spaltbildung sowie einer Spaltbildung von 3 mm und 5 mm. Eine Spaltbildung von 5 mm ereignete sich bei der modifizierten Bunnell-Technik nach $498 \pm 30,7$ Zyklen mit einem Maximum von 514.

Im Vergleich dazu zeigte die modifizierte Krackow-Naht eine Spaltbildung von 5 mm nach $238,5 \pm 83,9$ Zyklen. Die Streubreite innerhalb der Krackow-Gruppe war dabei größer als innerhalb der Bunnell-Gruppe. Die Bunnell-Nahttechnik mit Z-Nähten zeigte signifikant höhere Zyklusanzahlen für eine initiale Spaltbildung sowie Spaltbildung bei 3 mm und 5 mm als die Krackow-Nahttechnik mit Z-Nähten ($p < 0,001$). Zusätzlich wurde die Weite des Spalts am 200. und 250. Zyklus der jeweiligen Stufe erhoben. Hier ergaben sich auch hoch-signifikante Ergebnisse zugunsten der Bunnell-Nahttechnik ($p < 0,001$).

Die modifizierte Bunnell-Nahttechnik zeigt im Vergleich zu anderen oder ähnlichen Nahttechniken, die in der Literatur veröffentlicht wurden, gute Ergebnisse und kann zur Reparatur empfohlen werden. Die modifizierte Krackow-Technik kann hingegen nicht uneingeschränkt empfohlen werden und bedarf einiger Verbesserungen.

In künftigen Studien sollte ein dreistufiges Testprotokoll mit anschließender Testung der Maximalkraft genutzt werden. Die epitendinöse Naht scheint mit einer fortlaufenden

Technik besser versorgt zu sein. Die modifizierte Bunnell-Technik kann beispielsweise mit der LBMK- oder Giftbox-Modifikation der Krackow-Technik verglichen werden.

Abstract

An acute Achilles tendon rupture can be treated both conservatively and surgically. A distinction is made between open surgical and minimally invasive surgical techniques. In this study, a modified Krackow technique with three Z-sutures was compared with a modified Bunnell technique, which was also augmented with three Z-sutures. Sutures were made on 100 porcine flexor tendons. A testing protocol with three stages was used for this cyclic study, which was based on an early rehabilitative treatment protocol. Loads of 20 - 100 N, 20 - 191 N, and 20 - 369 N were applied for 250 cycles each at a cadence of 1 Hz. The ZwickiLine Z2.5 testing machine and the PONTOS 5M optical measuring system were used for this purpose. The core suture was made using Fibertape® 2 mm and the Z-sutures using Vicryl 3-0. The number of cycles until an initial gap formation as well as a gap formation of 3 mm and 5 mm was measured. A gap formation of 5 mm occurred with the modified Bunnell technique after 498 ± 30.7 cycles with a maximum of 514. In comparison, the modified Krackow suture showed a gap formation of 5 mm after 238.5 ± 83.9 cycles. The spread within the Krackow group was larger than within the Bunnell group. The Bunnell suture technique with Z-sutures showed significantly higher numbers of cycles for initial gap formation and at 3 mm and 5 mm than the Krackow suture technique with Z-sutures ($p < 0.001$). In addition, the width of the gap was measured at the 200th and 250th cycle of each stage. Here, there were also highly significant results in favor of the Bunnell suture technique ($p < 0.001$).

The modified Bunnell suture technique shows good results compared to other or similar suture techniques published in the literature and can be recommended for repair. In contrast, the modified Krackow technique cannot be fully recommended and needs some improvements.

Further studies should use a testing protocol with three stages followed by a peak load to failure test. The epitendinous suture seems to be better with a continuous technique. For example, the modified Bunnell technique can be compared with the LBMK or giftbox modification of the Krackow suture.

6 Literaturverzeichnis

1. Schünke, M., et al., *PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*, in *LernAtlas der Anatomie*. 2018, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York.
2. O'Brien, M., *The anatomy of the Achilles tendon*. *Foot Ankle Clin*, 2005. **10**(2): p. 225-38.
3. Dayton, P., *Anatomic, Vascular, and Mechanical Overview of the Achilles Tendon*. *Clin Podiatr Med Surg*, 2017. **34**(2): p. 107-113.
4. Benjamin, M.T., P.; Suzuki, D.; Toumi, H., *The anatomy of the Achilles tendon*, in *The Achilles tendon*, N.A. Maffulli, L., Editor. 2007, Springer Verlag: London.
5. Rigoard, P., *The Tibial Nerve*, in *Atlas of Anatomy of the Peripheral Nerves : The Nerves of the Limbs – Student Edition*, P. Rigoard, Editor. 2017, Springer International Publishing: Cham. p. 244-263.
6. Coombs, R., et al., *Collagen typing in achilles tendon ruptures*. *J. Bone Joint Surg.*, 1980. **62**: p. 258.
7. Waggett, A.D., et al., *Characterization of collagens and proteoglycans at the insertion of the human Achilles tendon*. *Matrix Biol*, 1998. **16**(8): p. 457-70.
8. Welsch, U. and T. Deller, *Lehrbuch Histologie: Unter Mitarbeit von Thomas Deller*. 2016: Elsevier Health Sciences.
9. Birk, D.E., et al., *Collagen fibrillogenesis in vitro: interaction of types I and V collagen regulates fibril diameter*. *J Cell Sci*, 1990. **95 (Pt 4)**: p. 649-57.
10. Kapandji, A.R., S., *Funktionelle Anatomie der Gelenke*. 2016, Stuttgart: Thieme Verlag.
11. Ahmed, I.M., et al., *Blood supply of the Achilles tendon*. *J Orthop Res*, 1998. **16**(5): p. 591-6.
12. Aumüller, G.A., G.; Conrad, A.; Engele, J.; Kirsch, J.; Maio, G., *Duale Reihe Anatomie*. 5., korrigierte Auflage ed. 2020, Stuttgart: Thieme.
13. Silver, R.L., J. de la Garza, and M. Rang, *The myth of muscle balance. A study of relative strengths and excursions of normal muscles about the foot and ankle*. *J Bone Joint Surg Br*, 1985. **67**(3): p. 432-7.
14. Maganaris, C.N., M.V. Narici, and N. Maffulli, *Biomechanics of the Achilles tendon*. *Disabil Rehabil*, 2008. **30**(20-22): p. 1542-7.
15. Seibt, W., *Physik für Mediziner*. 2015: Thieme.
16. Lewis, G. and K.M. Shaw, *Tensile properties of human tendo Achillis: effect of donor age and strain rate*. *J Foot Ankle Surg*, 1997. **36**(6): p. 435-45.
17. Louis-Ugbo, J., B. Leeson, and W.C. Hutton, *Tensile properties of fresh human calcaneal (Achilles) tendons*. *Clin Anat*, 2004. **17**(1): p. 30-5.
18. Benjamin, M., et al., *Where tendons and ligaments meet bone: attachment sites ('entheses') in relation to exercise and/or mechanical load*. *J Anat*, 2006. **208**(4): p. 471-90.
19. Komi, P.V., *Relevance of in vivo force measurements to human biomechanics*. *J Biomech*, 1990. **23 Suppl 1**: p. 23-34.
20. Eliasson, P., et al., *Primary gene response to mechanical loading in healing rat Achilles tendons*. *J Appl Physiol* (1985), 2013. **114**(11): p. 1519-26.
21. Amlang, M.H. and H. Zwipp, *Tendinose und Ruptur der Achillessehne*. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*, 2011. **6**(04): p. 259-282.
22. Maffulli, N., A.G. Via, and F. Oliva, *Chronic Achilles Tendon Rupture*. *Open Orthop J*, 2017. **11**: p. 660-669.

23. Kannus, P. and A. Natri, *Etiology and pathophysiology of tendon ruptures in sports*. Scand J Med Sci Sports, 1997. **7**(2): p. 107-12.
24. Ganestam, A., et al., *Increasing incidence of acute Achilles tendon rupture and a noticeable decline in surgical treatment from 1994 to 2013. A nationwide registry study of 33,160 patients*. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2016. **24**(12): p. 3730-3737.
25. Möller, A., M. Astron, and N. Westlin, *Increasing incidence of Achilles tendon rupture*. Acta Orthop Scand, 1996. **67**(5): p. 479-81.
26. Nillius, S.A., B.E. Nilsson, and N.E. Westlin, *The incidence of Achilles tendon rupture*. Acta Orthop Scand, 1976. **47**(1): p. 118-21.
27. Vosseller, J.T., et al., *Achilles tendon rupture in women*. Foot Ankle Int, 2013. **34**(1): p. 49-53.
28. Maffulli, N., et al., *Changing incidence of Achilles tendon rupture in Scotland: a 15-year study*. Clin J Sport Med, 1999. **9**(3): p. 157-60.
29. Houshian, S., T. Tscherning, and P. Riegels-Nielsen, *The epidemiology of Achilles tendon rupture in a Danish county*. Injury, 1998. **29**(9): p. 651-4.
30. Ulmar, B., et al., *Die Achillessehnenruptur*. Der Unfallchirurg, 2014. **117**(10): p. 921-939.
31. Kearney, R.S. and M.L. Costa, *Current concepts in the rehabilitation of an acute rupture of the tendo Achillis*. J Bone Joint Surg Br, 2012. **94**(1): p. 28-31.
32. Levi, N., *The incidence of Achilles tendon rupture in Copenhagen*. Injury, 1997. **28**(4): p. 311-3.
33. Huttunen, T.T., et al., *Acute achilles tendon ruptures: incidence of injury and surgery in Sweden between 2001 and 2012*. Am J Sports Med, 2014. **42**(10): p. 2419-23.
34. Kellam, J.F., G.A. Hunter, and J.P. McElwain, *Review of the operative treatment of Achilles tendon rupture*. Clin Orthop Relat Res, 1985(201): p. 80-3.
35. Cetti, R., et al., *Operative versus nonoperative treatment of Achilles tendon rupture. A prospective randomized study and review of the literature*. Am J Sports Med, 1993. **21**(6): p. 791-9.
36. Lea, R.B. and L. Smith, *Non-surgical treatment of tendo achillis rupture*. J Bone Joint Surg Am, 1972. **54**(7): p. 1398-407.
37. Jessing, P. and E. Hansen, *Surgical treatment of 102 tendo achillis ruptures-- suture or tenoplasty?* Acta Chir Scand, 1975. **141**(5): p. 370-7.
38. Pagenstert, G., et al., *Achillessehnen- und Tibialis-anterior-Sehnenruptur*. Der Orthopäde, 2010. **39**(12): p. 1135-1147.
39. Trofa, D.P., et al., *Professional Athletes' Return to Play and Performance After Operative Repair of an Achilles Tendon Rupture*. Am J Sports Med, 2017. **45**(12): p. 2864-2871.
40. Trofa, D.P., et al., *Professional Soccer Players' Return to Play and Performance After Operative Repair of Achilles Tendon Rupture*. Orthop J Sports Med, 2018. **6**(11): p. 2325967118810772.
41. Arner, O., A. Lindholm, and S.R. Orell, *Histologic changes in subcutaneous rupture of the Achilles tendon; a study of 74 cases*. Acta Chir Scand, 1959. **116**(5-6): p. 484-90.
42. Józsa, L. and P. Kannus, *Histopathological findings in spontaneous tendon ruptures*. Scand J Med Sci Sports, 1997. **7**(2): p. 113-8.
43. Puddu, G., E. Ippolito, and F. Postacchini, *A classification of Achilles tendon disease*. Am J Sports Med, 1976. **4**(4): p. 145-50.
44. Lagergren, C. and A. Lindholm, *Vascular distribution in the Achilles tendon; an angiographic and microangiographic study*. Acta Chir Scand, 1959. **116**(5-6): p. 491-5.
45. Clement, D.B., J.E. Taunton, and G.W. Smart, *Achilles tendinitis and peritendinitis: etiology and treatment*. Am J Sports Med, 1984. **12**(3): p. 179-84.

46. Wilson, A.M. and A.E. Goodship, *Exercise-induced hyperthermia as a possible mechanism for tendon degeneration*. J Biomech, 1994. **27**(7): p. 899-905.
47. Raikin, S.M., D.N. Garras, and P.V. Krapchev, *Achilles tendon injuries in a United States population*. Foot Ankle Int, 2013. **34**(4): p. 475-80.
48. Amlang, M., *Achillessehnenruptur*, in *Rückfußchirurgie*, D. Sabo and S. Rammelt, Editors. 2018, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 147-158.
49. Maffulli, N., *Rupture of the Achilles tendon*. J Bone Joint Surg Am, 1999. **81**(7): p. 1019-36.
50. Mahler, F. and D. Fritschy, *Partial and complete ruptures of the Achilles tendon and local corticosteroid injections*. Br J Sports Med, 1992. **26**(1): p. 7-14.
51. Kujala, U.M., et al., *ABO blood groups and musculoskeletal injuries*. Injury, 1992. **23**(2): p. 131-3.
52. Arner, O. and A. Lindholm, *Subcutaneous rupture of the Achilles tendon; a study of 92 cases*. Acta Chir Scand Suppl, 1959. **116**(Suppl 239): p. 1-51.
53. Inglis, A.E., et al., *Ruptures of the tendo achillis. An objective assessment of surgical and non-surgical treatment*. J Bone Joint Surg Am, 1976. **58**(7): p. 990-3.
54. Ralston, E.L. and E.R. Schmidt, Jr., *Repair of the ruptured Achilles tendon*. J Trauma, 1971. **11**(1): p. 15-21.
55. Thermann, H., *Achillessehnenruptur – Teil 1: Ätiologie und Diagnostik*. Der Chirurg, 2019. **90**(10): p. 863-872.
56. Copeland, S.A., *Rupture of the Achilles tendon: a new clinical test*. Ann R Coll Surg Engl, 1990. **72**(4): p. 270-1.
57. Simmonds, F.A., *The diagnosis of the ruptured Achilles tendon*. Practitioner, 1957. **179**(1069): p. 56-8.
58. Waterston, S.W., N. Maffulli, and S.W. Ewen, *Subcutaneous rupture of the Achilles tendon: basic science and some aspects of clinical practice*. Br J Sports Med, 1997. **31**(4): p. 285-98.
59. Thompson, T.C., *A test for rupture of the tendo achillis*. Acta Orthop Scand, 1962. **32**: p. 461-5.
60. Thompson, T.C. and J.H. Doherty, *Spontaneous rupture of tendon of Achilles: a new clinical diagnostic test*. J Trauma, 1962. **2**: p. 126-9.
61. Matles, A.L., *Rupture of the tendo achilles: another diagnostic sign*. Bull Hosp Joint Dis, 1975. **36**(1): p. 48-51.
62. Hattrup, S.J. and K.A. Johnson, *A review of ruptures of the Achilles tendon*. Foot Ankle, 1985. **6**(1): p. 34-8.
63. Kager, H., *Zur klinik und Diagnostik des Achillessehnenrisses*. Chirurg, 1939. **11**(691-695): p. 86.
64. Fornage, B.D. and M.D. Rifkin, *Ultrasound examination of tendons*. Radiol Clin North Am, 1988. **26**(1): p. 87-107.
65. Kabbani, Y.M. and D.P. Mayer, *Magnetic resonance imaging of tendon pathology about the foot and ankle. Part I. Achilles tendon*. J Am Podiatr Med Assoc, 1993. **83**(7): p. 418-20.
66. Kabbani, Y.M. and D.P. Mayer, *Magnetic resonance imaging of tendon pathology about the foot and ankle. Part II. Tendon ruptures*. J Am Podiatr Med Assoc, 1993. **83**(8): p. 466-8.
67. Aström, M., et al., *Imaging in chronic achilles tendinopathy: a comparison of ultrasonography, magnetic resonance imaging and surgical findings in 27 histologically verified cases*. Skeletal Radiol, 1996. **25**(7): p. 615-20.

68. Thermann, H., H. Zwipp, and H. Tscherne, *[Functional treatment concept of acute rupture of the Achilles tendon. 2 years results of a prospective randomized study]*. Unfallchirurg, 1995. **98**(1): p. 21-32.
69. Fruensgaard, S., et al., *Conservative treatment for acute rupture of the Achilles tendon*. Int Orthop, 1992. **16**(1): p. 33-5.
70. Thermann, H., *Achillessehnenruptur – Teil 2: Therapie und Nachbehandlung*. Der Chirurg, 2020. **91**(1): p. 85-100.
71. Leppilähti, J., J. Puranen, and S. Orava, *Incidence of Achilles tendon rupture*. Acta Orthop Scand, 1996. **67**(3): p. 277-9.
72. Landvater, S.J. and P.A. Renström, *Complete Achilles tendon ruptures*. Clin Sports Med, 1992. **11**(4): p. 741-58.
73. Zhao, H.M., et al., *Outcomes and complications of operative versus non-operative treatment of acute Achilles tendon rupture: a meta-analysis*. Chin Med J (Engl), 2011. **124**(23): p. 4050-5.
74. Amlang, M.H., et al., *Klinische und sonografische Kriterien für eine differenzierte Therapiewahl bei der Achillessehnenruptur*. Fuß & Sprunggelenk, 2009. **7**(4): p. 230-241.
75. Wills, C.A., et al., *Achilles tendon rupture. A review of the literature comparing surgical versus nonsurgical treatment*. Clin Orthop Relat Res, 1986(207): p. 156-63.
76. Carlstedt, C.A., K. Madsen, and T. Wredmark, *Biomechanical and biochemical studies of tendon healing after conservative and surgical treatment*. Arch Orthop Trauma Surg, 1986. **105**(4): p. 211-5.
77. Amlang, M.H., et al., *Operative Behandlung der Achillessehnenruptur*. Der Unfallchirurg, 2010. **113**(9): p. 712-720.
78. Carden, D.G., et al., *Rupture of the calcaneal tendon. The early and late management*. J Bone Joint Surg Br, 1987. **69**(3): p. 416-20.
79. Bradley, J.P. and J.E. Tibone, *Percutaneous and open surgical repairs of Achilles tendon ruptures. A comparative study*. Am J Sports Med, 1990. **18**(2): p. 188-95.
80. Hüfner, T., C. Krettek, and K. Knobloch, *Achillessehnenruptur*. Fuß & Sprunggelenk, 2007. **5**(4): p. 269-277.
81. Maffulli, N. and A. Ajis, *Management of chronic ruptures of the Achilles tendon*. J Bone Joint Surg Am, 2008. **90**(6): p. 1348-60.
82. Thermann, H., T. Hüfner, and H. Tscherne, *Achillessehnenruptur*. Der Orthopäde, 2000. **29**(3): p. 235-250.
83. Hofstätter, S., et al., *Achillessehne*, in *Atlas sportorthopädisch-sporttraumatologische Operationen*, A.B. Imhoff and M.J. Feucht, Editors. 2017, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 417-431.
84. Bunnell, S., *Gig pull-out suture for tendons*. J Bone Joint Surg Am, 1954. **36-a**(4): p. 850-1.
85. Labib, S.A., et al., *The "Giftbox" repair of the Achilles tendon: a modification of the Krackow technique*. Foot Ankle Int, 2009. **30**(5): p. 410-4.
86. Krackow, K.A., S.C. Thomas, and L.C. Jones, *A new stitch for ligament-tendon fixation. Brief note*. J Bone Joint Surg Am, 1986. **68**(5): p. 764-6.
87. Krackow, K.A., S.C. Thomas, and L.C. Jones, *Ligament-tendon fixation: analysis of a new stitch and comparison with standard techniques*. Orthopedics, 1988. **11**(6): p. 909-17.
88. Kessler, I. and F. Nissim, *Primary repair without immobilization of flexor tendon division within the digital sheath. An experimental and clinical study*. Acta Orthop Scand, 1969. **40**(5): p. 587-601.
89. Kessler, I., *The "grasping" technique for tendon repair*. Hand, 1973. **5**(3): p. 253-5.

90. Aktas, S., et al., *End-to-end versus augmented repair in the treatment of acute Achilles tendon ruptures*. J Foot Ankle Surg, 2007. **46**(5): p. 336-40.
91. Pajala, A., et al., *Augmented compared with nonaugmented surgical repair of a fresh total Achilles tendon rupture. A prospective randomized study*. J Bone Joint Surg Am, 2009. **91**(5): p. 1092-100.
92. Shrier, I., G.O. Matheson, and H.W. Kohl, 3rd, *Achilles tendonitis: are corticosteroid injections useful or harmful?* Clin J Sport Med, 1996. **6**(4): p. 245-50.
93. Amlang, M.H., et al., *Der Flexor-hallucis-longus-Transfer zum Ersatz der Achillessehne*. Der Unfallchirurg, 2008. **111**(7): p. 499-506.
94. Ateshrang, A., et al., *Die Umkipplastik nach Silfverskjöld bei Achillessehnenruptur: Eine Alternative für Sportler?* Z Orthop Unfall, 2007. **145**(02): p. 207-211.
95. Bibbo, C., et al., *Repair of the Achilles tendon sleeve avulsion: quantitative and functional evaluation of a transcalcaneal suture technique*. Foot Ankle Int, 2003. **24**(7): p. 539-44.
96. Hanna, J.R., R.D. Russell, and J.A. Giacomelli, *Repair of distal tendo Achillis rupture with the use of the Mitek Anchor System*. J Am Podiatr Med Assoc, 1993. **83**(12): p. 663-8.
97. Weinraub, G.M., et al., *A new method for reattachment of the tendo Achillis following retrocalcaneal exostectomy*. J Foot Ankle Surg, 1998. **37**(2): p. 86-95.
98. Rauer, T., et al., *Avulsion Fracture of the Calcaneal Tuberosity: Case Report and Literature Review*. J Foot Ankle Surg, 2018. **57**(1): p. 191-195.
99. Cho, B.K., J.K. Park, and S.M. Choi, *Reattachment using the suture bridge augmentation for Achilles tendon avulsion fracture with osteoporotic bony fragment*. Foot (Edinb), 2017. **31**: p. 35-39.
100. Rupp, G., et al., *Klinische Erfahrungen mit Kleben von Sehnenrupturen*. Langenbecks Archiv für Chirurgie, 1979. **349**(1): p. 351-353.
101. Ambacher, T., et al., *Kraftverhältnisse und funktionelle Ergebnisse nach operativer Therapie der Achillessehnenruptur mittels Fibrinklebung*. Zentralbl Chir, 2001. **126**(12): p. 989-994.
102. Kilkelly, F.X., et al., *Tendon repair by laser welding: a histologic and biomechanical comparison and suture repair with CO2 and argon lasers*. Lasers Surg Med, 1996. **19**(4): p. 487-91.
103. Lynch, R.M., *Achilles tendon rupture: surgical versus non-surgical treatment*. Accid Emerg Nurs, 2004. **12**(3): p. 149-58.
104. Häggmark, T., et al., *Calf muscle atrophy and muscle function after non-operative vs operative treatment of achilles tendon ruptures*. Orthopedics, 1986. **9**(2): p. 160-4.
105. Ma, G.W. and T.G. Griffith, *Percutaneous repair of acute closed ruptured achilles tendon: a new technique*. Clin Orthop Relat Res, 1977(128): p. 247-55.
106. Tomak, S.L. and L.L. Fleming, *Achilles tendon rupture: an alternative treatment*. Am J Orthop (Belle Mead NJ), 2004. **33**(1): p. 9-12.
107. Gorschewsky, O., et al., *[Percutaneous tenodesis of the Achilles tendon. A new surgical method for treatment of acute Achilles tendon rupture using percutaneous tenodesis]*. Z Orthop Ihre Grenzgeb, 1997. **135**(6): p. 516-21.
108. Amlang, M.H., et al., *Die perkutane Naht der Achillessehne mit dem Dresdner Instrument*. Operative Orthopädie und Traumatologie, 2006. **18**(4): p. 287-299.
109. Amlang, M.H. and H. Zwipp, *Die perkutane Naht mit dem Dresdner Instrument (pDI-Naht)*, in *Sprunggelenk und Rückfuß*, J. Hamel and H. Zwipp, Editors. 2016, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 207-213.
110. Aktas, S. and B. Kocaoglu, *Open versus minimal invasive repair with Achillon device*. Foot Ankle Int, 2009. **30**(5): p. 391-7.

111. Calder, J.D. and T.S. Saxby, *Independent evaluation of a recently described Achilles tendon repair technique*. Foot Ankle Int, 2006. **27**(2): p. 93-6.
112. Heitman, D.E., et al., *Biomechanical comparison of the Achillon tendon repair system and the Krackow locking loop technique*. Foot Ankle Int, 2011. **32**(9): p. 879-87.
113. Park, H.G., D.H. Moon, and J.M. Yoon, *Limited open repair of ruptured Achilles tendons with Bunnell-type sutures*. Foot Ankle Int, 2001. **22**(12): p. 985-7.
114. Lim, J., R. Dalal, and M. Waseem, *Percutaneous vs. open repair of the ruptured Achilles tendon--a prospective randomized controlled study*. Foot Ankle Int, 2001. **22**(7): p. 559-68.
115. Gigante, A., et al., *Open versus percutaneous repair in the treatment of acute Achilles tendon rupture: a randomized prospective study*. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2008. **16**(2): p. 204-9.
116. Khan, R.J., et al., *Treatment of acute achilles tendon ruptures. A meta-analysis of randomized, controlled trials*. J Bone Joint Surg Am, 2005. **87**(10): p. 2202-10.
117. Riedl, S., et al., *Die Naht der frischen AchillessehnenrupturVergleich der offenen mit einer perkutanen Nahttechnik*. Der Chirurg, 2002. **73**(6): p. 607-614.
118. Hockenbury, R.T. and J.C. Johns, *A biomechanical in vitro comparison of open versus percutaneous repair of tendon Achilles*. Foot Ankle, 1990. **11**(2): p. 67-72.
119. Keller, J. and T.B. Rasmussen, *Closed treatment of Achilles tendon rupture*. Acta Orthop Scand, 1984. **55**(5): p. 548-50.
120. Maxwell, L.C. and C.S. Enwemeka, *Immobilization-induced muscle atrophy is not reversed by lengthening the muscle*. Anat Rec, 1992. **234**(1): p. 55-61.
121. Pneumáticos, S.G., et al., *The Effects of Early Mobilization in the Healing of Achilles Tendon Repair*. Foot & Ankle International, 2000. **21**(7): p. 551-557.
122. Suchak, A.A., et al., *Postoperative rehabilitation protocols for Achilles tendon ruptures: a meta-analysis*. Clin Orthop Relat Res, 2006. **445**: p. 216-21.
123. Majewski, M., et al., *Postoperative rehabilitation after percutaneous Achilles tendon repair: early functional therapy versus cast immobilization*. Disabil Rehabil, 2008. **30**(20-22): p. 1726-32.
124. Kangas, J., et al., *Achilles tendon elongation after rupture repair: a randomized comparison of 2 postoperative regimens*. Am J Sports Med, 2007. **35**(1): p. 59-64.
125. Speck, M. and K. Klaue, *Early full weightbearing and functional treatment after surgical repair of acute achilles tendon rupture*. Am J Sports Med, 1998. **26**(6): p. 789-93.
126. Bhattacharyya, M. and B. Gerber, *Mini-invasive surgical repair of the Achilles tendon--does it reduce post-operative morbidity?* Int Orthop, 2009. **33**(1): p. 151-6.
127. Labib, S., et al., *The effect of ankle position on the static tension in the Achilles tendon before and after operative repair: a biomechanical cadaver study*. Foot Ankle Int, 2007. **28**(4): p. 478-81.
128. Kearney, R.S., et al., *A systematic review of early rehabilitation methods following a rupture of the Achilles tendon*. Physiotherapy, 2012. **98**(1): p. 24-32.
129. Motta, P., C. Errichiello, and I. Pontini, *Achilles tendon rupture. A new technique for easy surgical repair and immediate movement of the ankle and foot*. Am J Sports Med, 1997. **25**(2): p. 172-6.
130. List, M., *Frakturen und Luxationen im Bereich der Sprunggelenke, Band- und Achillessehnenverletzungen*, in *Physiotherapie in der Traumatologie*, M. List, Editor. 2009, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 353-372.
131. Akizuki, K.H., et al., *The relative stress on the Achilles tendon during ambulation in an ankle immobiliser: implications for rehabilitation after Achilles tendon repair*. Br J Sports Med, 2001. **35**(5): p. 329-33; discussion 333-4.

132. Orishimo, K.F., et al., *Effect of knee flexion angle on Achilles tendon force and ankle joint plantarflexion moment during passive dorsiflexion*. J Foot Ankle Surg, 2008. **47**(1): p. 34-9.
133. Lee, S.J., et al., *Cyclic loading of 3 Achilles tendon repairs simulating early postoperative forces*. Am J Sports Med, 2009. **37**(4): p. 786-90.
134. ZwickRoell. *Produktinformation: zwickiLine Material-Prüfmaschinen*. 2011 19.05.2020]; Available from: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/02_396_material_pruefmaschine_zwickiline_z0_5_bis_z2_5_pi_de.pdf.
135. ZwickRoell. *Xforce-Kraftaufnehmer*. 19.05.2020]; Available from: <https://www.zwickroell.com/de-de/kraftaufnehmer/xforce>.
136. ZwickRoell. *Produktinformation: Backeneinsätze Typ 8287 / 8487*. 2012 19.05.2020]; Available from: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/04_703_backeneinsaetze_typ_8287_8487_de.pdf.
137. ZwickRoell. *Produktinformation: Schraub-Probenhalter Typ 8133*. 2019 29.05.2019 19.05.2020]; Available from: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/04_332_schraub_probenhalter_typ_8133_f_max_1_kn_pi_de.pdf.
138. Gesellschaft für Optische Messtechnik, *Pontos: Benutzerinformation - Hardware*. 2011.
139. Arthrex. *Arthrex-Produktreihe für Fadenmaterial*. 2018 21.05.2020]; Available from: <https://www.arthrex.com/de/weiterfuehrende-informationen/gebrauchsanleitungen/zFPPkg2xOUuSswFmMBVmCA/arthrex-produktreihe-fur-fadenmaterial>.
140. Ethicon. *Wound Closure Manual*. 2007 04.10.2019]; Available from: https://web.mit.edu/2.75/resources/random/ethicon_wound_closure_manual.pdf.
141. Hillin, C.D., et al., *Effects of immobilization angle on tendon healing after achilles rupture in a rat model*. J Orthop Res, 2019. **37**(3): p. 562-573.
142. Demetracopoulos, C.A., et al., *Limited-Open Achilles Tendon Repair Using Locking Sutures Versus Nonlocking Sutures: An In Vitro Model*. Foot Ankle Int, 2014. **35**(6): p. 612-618.
143. Carmont, M.R., et al., *Tendon end separation with loading in an Achilles tendon repair model: comparison of non-absorbable vs. absorbable sutures*. J Exp Orthop, 2017. **4**(1): p. 26.
144. Heikkinen, J., et al., *Soleus Atrophy Is Common After the Nonsurgical Treatment of Acute Achilles Tendon Ruptures: A Randomized Clinical Trial Comparing Surgical and Nonsurgical Functional Treatments*. Am J Sports Med, 2017. **45**(6): p. 1395-1404.
145. Tian, J., et al., *Achilles tendon rupture repair: Biomechanical comparison of the locking block modified Krackow technique and the Giftbox technique*. Injury, 2020. **51**(2): p. 559-564.
146. Tian, J., et al., *A biomechanical comparison of Achilles tendon suture repair techniques: Locking Block Modified Krackow, Kessler, and Percutaneous Achilles Repair System with the early rehabilitation program in vitro bovine model*. Arch Orthop Trauma Surg, 2020. **140**(11): p. 1775-1782.
147. Van Dyke, R.O., et al., *Biomechanical Head-to-Head Comparison of 2 Sutures and the Giftbox Versus Bunnell Techniques for Midsubstance Achilles Tendon Ruptures*. Orthop J Sports Med, 2017. **5**(5): p. 2325967117707477.
148. Boin, M.A., et al., *Suture-Only Repair Versus Suture Anchor-Augmented Repair for Achilles Tendon Ruptures With a Short Distal Stump: A Biomechanical Comparison*. Orthop J Sports Med, 2017. **5**(1): p. 2325967116678722.

149. Benthien, R.A., et al., *Cyclic loading of Achilles tendon repairs: a comparison of polyester and polyblend suture*. Foot Ankle Int, 2006. **27**(7): p. 512-8.
150. Jordan, M.C., et al., *Bunnell or cross-lock Bunnell suture for tendon repair? Defining the biomechanical role of suture pretension*. J Orthop Surg Res, 2015. **10**: p. 192.
151. Clanton, T.O., et al., *A Biomechanical Comparison of an Open Repair and 3 Minimally Invasive Percutaneous Achilles Tendon Repair Techniques During a Simulated, Progressive Rehabilitation Protocol*. Am J Sports Med, 2015. **43**(8): p. 1957-64.
152. Backus, J.D., et al., *Effect of Suture Caliber and Number of Core Strands on Repair of Acute Achilles Ruptures: A Biomechanical Study*. Foot Ankle Int, 2017. **38**(5): p. 564-570.
153. Berlet, G.C., et al., *Collagen ribbon augmentation of Achilles tendon tears: a biomechanical evaluation*. J Foot Ankle Surg, 2014. **53**(3): p. 298-302.
154. Song, L., et al., *Biomechanical evaluation of acellular collagen matrix augmented Achilles tendon repair in sheep*. J Foot Ankle Surg, 2010. **49**(5): p. 438-41.
155. Giza, E., et al., *Augmented tendon Achilles repair using a tissue reinforcement scaffold: a biomechanical study*. Foot Ankle Int, 2011. **32**(5): p. S545-9.
156. Barber, F.A., et al., *A biomechanical study of Achilles tendon repair augmentation using GraftJacket matrix*. Foot Ankle Int, 2008. **29**(3): p. 329-33.
157. Shepard, M.E., D.P. Lindsey, and L.B. Chou, *Biomechanical testing of epitendon suture strength in Achilles tendon repairs*. Foot Ankle Int, 2007. **28**(10): p. 1074-7.
158. Shepard, M.E., D.P. Lindsey, and L.B. Chou, *Biomechanical comparison of the simple running and cross-stitch epitendon sutures in achilles tendon repairs*. Foot Ankle Int, 2008. **29**(5): p. 513-7.
159. Silfverskiöld, K.L. and C.H. Andersson, *Two new methods of tendon repair: an in vitro evaluation of tensile strength and gap formation*. J Hand Surg Am, 1993. **18**(1): p. 58-65.
160. Silfverskiöld, K.L. and E.J. May, *Flexor tendon repair in zone II with a new suture technique and an early mobilization program combining passive and active flexion*. J Hand Surg Am, 1994. **19**(1): p. 53-60.
161. Lee, S.J., et al., *Optimizing Achilles tendon repair: effect of epitendinous suture augmentation on the strength of achilles tendon repairs*. Foot Ankle Int, 2008. **29**(4): p. 427-32.
162. Maquirriain, J., *Achilles tendon rupture: avoiding tendon lengthening during surgical repair and rehabilitation*. Yale J Biol Med, 2011. **84**(3): p. 289-300.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Sektion der Sporttraumatologie und arthroskopischen Chirurgie der Unfall- und Wiederherstellungschirurgie der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen unter der Betreuung von Herrn Prof. Dr. med. Atesch Ateschrang durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr. med. Atesch Ateschrang und Herrn Dr. Christoph Salewski, Assistenzarzt der Universitätsklinik für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie in Tübingen.

Die Versuche wurden von mir durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte durch mich.

Ich versichere, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 27.03.2023

Christian Benignus

8 Lebenslauf

9 Danksagung

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Atesch Ateschrang für die Überlassung des Themas sowie die Organisation und Bereitstellung der nötigen Materialien und Geräte, um einen reibungslosen Ablauf der Versuche zu gewährleisten. Außerdem stand er mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite und unterstützte den Prozess dieser Arbeit in jeder Phase.

Herrn Dr. Christoph Salewski wird für die Einarbeitung in die Gerätschaften sowie die gemeinsame Erarbeitung des zyklischen Testprotokolls und die Darstellung der angewendeten Nahttechniken gedankt. Auch er hatte jederzeit ein offenes Ohr und half dabei, bestehende Probleme zu beseitigen sowie den Prozess voranzubringen.

Herrn Philipp Hacker danke ich ebenfalls für die gemeinsame Erarbeitung des Testprotokolls sowie für die zahlreichen Stunden, die wir zusammen im Labor verbracht haben. Hierbei unterstützte er mich stets bei aufkommenden Fragen und konnte meist rasche Abhilfe leisten. Dies sorgte für eine angenehme Arbeitsatmosphäre sowie eine professionelle Zusammenarbeit.

Ich danke meiner Frau Nathalie Benignus für die Unterstützung und den Rückhalt während der Erstellung dieser Arbeit sowie die Hilfe bei der Zeichnung einzelner Abbildungen. Außerdem danke ich meiner Tochter Amilia und meinem Sohn Lennard, die, abseits dieser oft nervenaufreibenden Arbeit, für schöne Stunden sorgten und mich somit motivierten.

Meinen Eltern sowie der restlichen Familie danke ich für die Möglichkeit zu studieren und somit eine solche Arbeit erstellen zu können.

10 Anhang

10.1 Messwerte

Tabelle 10.1: Messwerte der Vorversuche

Sehnen-ID	Nahttechnik	$C_{initial}$	C_{3mm}	C_{5mm}	Versagensmodus	A [mm^2]
04-27	Krackow	1	2	2	Spaltbildung	51,459
04-29	Krackow	1	2	10	Spaltbildung	36,757
04-31	Krackow	1	1	1	Spaltbildung	36,050
04-32	Krackow	1	1	1	Spaltbildung	45,522
04-33	Krackow	1	2	31	Spaltbildung	41,925
04-35	Krackow	1	1	1	Spaltbildung	37,919
04-37	Krackow	1	4	41	Spaltbildung	40,856
04-38	Krackow	1	2	2	Spaltbildung	41,862
04-39	Krackow	1	1	1	Spaltbildung	42,977
04-40	Krackow	1	24	164	Spaltbildung	46,558
03-01	Krackow + 3 Z-Nähte	1	1	1	Spaltbildung	33,207
03-02	Krackow + 3 Z-Nähte	96	214	301	Spaltbildung	45,632
03-03	Krackow + 3 Z-Nähte	1	2	6	Spaltbildung	41,563
03-04	Krackow + 3 Z-Nähte	48	193	272	Spaltbildung	34,989
03-05	Krackow + 3 Z-Nähte	1	5	11	Spaltbildung	30,913
03-06	Krackow + 3 Z-Nähte	105	301	301	Spaltbildung	32,767
03-07	Krackow + 3 Z-Nähte	1	1	1	Spaltbildung	32,798
03-08	Krackow + 3 Z-Nähte	62	116	155	Spaltbildung	43,024
03-09	Krackow + 3 Z-Nähte	1	6	8	Spaltbildung	34,573
03-10	Krackow + 3 Z-Nähte	146	301	301	Spaltbildung	32,044
04-11	Bunnell + 3 Z-Nähte	117	321	345	Spaltbildung	52,025
04-12	Bunnell + 3 Z-Nähte	304	398	451	Spaltbildung	48,915
04-13	Bunnell + 3 Z-Nähte	311	434	462	Spaltbildung	36,545
04-14	Bunnell + 3 Z-Nähte	33	304	304	Spaltbildung	41,846
04-15	Bunnell + 3 Z-Nähte	2	50	60	Spaltbildung	45,522
04-16	Bunnell + 3 Z-Nähte	145	334	344	Spaltbildung	48,090
04-17	Bunnell + 3 Z-Nähte	8	251	304	Spaltbildung	48,066
04-18	Bunnell + 3 Z-Nähte	70	301	301	Spaltbildung	34,683
04-19	Bunnell + 3 Z-Nähte	1	225	305	Spaltbildung	45,239
04-20	Bunnell + 3 Z-Nähte	52	273	304	Spaltbildung	37,118

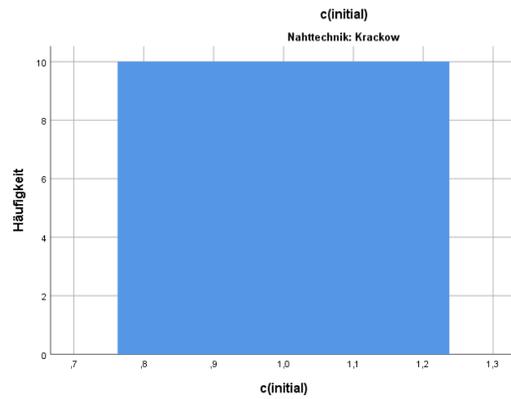
Tabelle 10.2: Messwerte der Hauptversuche

Sehnen-ID	Nahttechnik	1. Serie					2. Serie		3. Serie		Versagensmodus	A [mm ²]
		$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}	d_{200}	d_{250}	d_{200}	d_{250}	d_{200}	d_{250}		
03-11	Krackow + 3 Z-Nähte	126	251	255	0,5	0,75	11,5	12	-	-	Spaltbildung	32,916
03-12	Krackow + 3 Z-Nähte	5	166	251	3,75	4,25	16,5	17	-	-	Spaltbildung	48,996
03-13	Krackow + 3 Z-Nähte	3	186	251	3,5	3,75	14,25	14,5	-	-	Spaltbildung	31,227
03-14	Krackow + 3 Z-Nähte	1	1	1	12,5	14	-	-	-	-	Spaltbildung	42,977
03-15	Krackow + 3 Z-Nähte	6	67	176	5	5,5	-	-	-	-	Spaltbildung	42,192
03-16	Krackow + 3 Z-Nähte	1	14	106	5,75	6,5	-	-	-	-	Spaltbildung	42,977
03-17	Krackow + 3 Z-Nähte	57	250	251	2,75	3	15,75	16	-	-	Spaltbildung	36,215
03-18	Krackow + 3 Z-Nähte	3	186	251	3,5	4	17,5	18	-	-	Spaltbildung	39,458
03-19	Krackow + 3 Z-Nähte	116	214	251	2,75	3,25	17	17,5	-	-	Spaltbildung	40,684
03-20	Krackow + 3 Z-Nähte	1	166	214	4,75	5,75	-	-	-	-	Spaltbildung	42,977
03-21	Krackow + 3 Z-Nähte	166	251	251	0,5	1,5	13,75	15,25	-	-	Spaltbildung	40,173
03-22	Krackow + 3 Z-Nähte	245	251	254	0	0,75	14,25	14,5	-	-	Spaltbildung	37,495
03-23	Krackow + 3 Z-Nähte	4	197	251	3	3,25	15,5	15,75	-	-	Spaltbildung	41,563
03-24	Krackow + 3 Z-Nähte	24	34	44	9	9,5	-	-	-	-	Spaltbildung	47,218
03-25	Krackow + 3 Z-Nähte	1	194	252	3	3,25	12,25	13	-	-	Spaltbildung	40,684
03-26	Krackow + 3 Z-Nähte	2	156	224	4,75	6,5	-	-	-	-	Spaltbildung	43,527
03-27	Krackow + 3 Z-Nähte	1	7	14	9,5	10	-	-	-	-	Spaltbildung	40,055
03-28	Krackow + 3 Z-Nähte	9	156	251	3,25	3,5	15	16,25	-	-	Spaltbildung	40,432
03-29	Krackow + 3 Z-Nähte	1	62	156	5,5	7	-	-	-	-	Spaltbildung	39,914
03-30	Krackow + 3 Z-Nähte	3	251	253	2	2,25	15	15,5	-	-	Spaltbildung	40,739
03-31	Krackow + 3 Z-Nähte	3	176	202	4,25	6,5	-	-	-	-	Spaltbildung	36,898
03-32	Krackow + 3 Z-Nähte	62	192	251	3,25	4	15,25	16	-	-	Spaltbildung	33,929
03-33	Krackow + 3 Z-Nähte	1	9	14	8,25	9	-	-	-	-	Spaltbildung	37,840
03-34	Krackow + 3 Z-Nähte	1	234	251	2,25	3,25	15,5	16	-	-	Spaltbildung	36,191
03-35	Krackow + 3 Z-Nähte	2	203	251	2,75	3,25	15,5	16,25	-	-	Spaltbildung	31,227
03-36	Krackow + 3 Z-Nähte	82	251	253	1,75	2	15	15,75	-	-	Spaltbildung	36,694
03-37	Krackow + 3 Z-Nähte	1	126	251	3,75	4,75	21,5	21,75	-	-	Spaltbildung	41,210
03-38	Krackow + 3 Z-Nähte	30	251	332	1,5	1,75	6	7,5	-	-	Spaltbildung	44,595
03-39	Krackow + 3 Z-Nähte	34	251	254	1	1,25	15	16	-	-	Spaltbildung	41,351
03-40	Krackow + 3 Z-Nähte	9	82	205	4,75	5,5	-	-	-	-	Spaltbildung	34,330
03-41	Krackow + 3 Z-Nähte	136	315	500	0,5	0,75	4,5	5	-	-	Spaltbildung	32,398
03-42	Krackow + 3 Z-Nähte	77	247	251	1,5	3,75	16,75	17,5	-	-	Spaltbildung	37,652

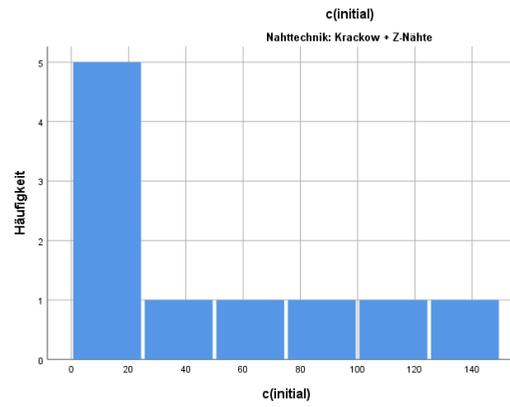
Sehnen-ID	Nahttechnik	$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}	1. Serie		2. Serie		3. Serie		Versagensmodus	$A [mm^2]$
					d_{200}	d_{250}	d_{200}	d_{250}	d_{200}	d_{250}		
03-43	Krackow + 3 Z-Nähte	176	259	282	0,5	0,75	12,25	12,75	-	-	Spaltbildung	37,196
03-44	Krackow + 3 Z-Nähte	26	252	268	1,25	1,5	12,25	12,75	-	-	Spaltbildung	40,291
03-45	Krackow + 3 Z-Nähte	28	251	256	2,25	2,5	10	10,5	-	-	Spaltbildung	33,694
03-46	Krackow + 3 Z-Nähte	40	255	276	0,75	1	11	11,75	-	-	Spaltbildung	45,333
03-47	Krackow + 3 Z-Nähte	8	251	251	2,5	2,75	14,75	15,5	-	-	Spaltbildung	40,173
03-48	Krackow + 3 Z-Nähte	22	166	251	3,5	4	13,75	14	-	-	Spaltbildung	41,147
03-49	Krackow + 3 Z-Nähte	4	146	252	3,5	4	13,5	14	-	-	Spaltbildung	39,207
03-50	Krackow + 3 Z-Nähte	19	166	251	3,25	3,75	15	15,5	-	-	Spaltbildung	41,728
03-51	Krackow + 3 Z-Nähte	2	251	266	2,75	2,75	14,25	15	-	-	Spaltbildung	37,605
03-52	Krackow + 3 Z-Nähte	17	257	290	1	1,25	7,5	8	-	-	Spaltbildung	33,709
03-53	Krackow + 3 Z-Nähte	57	251	251	1,75	2	13,5	13,75	-	-	Spaltbildung	43,982
03-54	Krackow + 3 Z-Nähte	7	251	256	1,5	1,75	9,75	11	-	-	Spaltbildung	47,124
03-55	Krackow + 3 Z-Nähte	15	276	342	1,5	1,75	7,25	7,5	-	-	Spaltbildung	37,495
03-56	Krackow + 3 Z-Nähte	4	253	294	2,5	2,5	9,5	10,25	-	-	Spaltbildung	38,924
03-57	Krackow + 3 Z-Nähte	126	254	312	1	1,25	10,25	10,75	-	-	Spaltbildung	38,704
03-58	Krackow + 3 Z-Nähte	251	307	332	0	0	6,75	7,5	-	-	Spaltbildung	43,982
03-59	Krackow + 3 Z-Nähte	24	186	252	3,25	3,5	14,75	15	-	-	Spaltbildung	41,123
03-60	Krackow + 3 Z-Nähte	12	253	272	1,5	1,75	8	8,5	-	-	Spaltbildung	43,794
05-01	Bunnell + 3 Z-Nähte	502	505	506	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	34,817
05-02	Bunnell + 3 Z-Nähte	264	501	502	0	0	0,75	1	-	-	Spaltbildung	36,285
05-03	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	504	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	39,254
05-04	Bunnell + 3 Z-Nähte	386	501	501	0	0	0,75	1	-	-	Spaltbildung	45,946
05-05	Bunnell + 3 Z-Nähte	307	507	509	0	0	0,5	0,5	-	-	Spaltbildung	37,919
05-06	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	502	503	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	34,919
05-07	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	502	502	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	37,322
05-08	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	38,736
05-09	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	35,249
05-10	Bunnell + 3 Z-Nähte	356	501	501	0	0	0,5	0,75	-	-	Spaltbildung	37,652
05-11	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	44,721
05-12	Bunnell + 3 Z-Nähte	296	501	501	0	0	1,25	1,5	-	-	Spaltbildung	43,794
05-13	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	503	503	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	33,182
05-14	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	33,026
05-15	Bunnell + 3 Z-Nähte	376	501	501	0	0	0,25	0,5	-	-	Spaltbildung	35,304
05-16	Bunnell + 3 Z-Nähte	259	501	501	0	0	1,25	1,5	-	-	Spaltbildung	36,191

Sehnen-ID	Nahttechnik	$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}	1. Serie		2. Serie		3. Serie		Versagensmodus	$A [mm^2]$
					d_{200}	d_{250}	d_{200}	d_{250}	d_{200}	d_{250}		
05-17	Bunnell + 3 Z-Nähte	256	501	501	0	0	1,75	2,25	-	-	Spaltbildung	32,987
05-18	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	38,956
05-19	Bunnell + 3 Z-Nähte	262	501	501	0	0	0,75	1	-	-	Spaltbildung	51,459
05-20	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	37,196
05-21	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	34,165
05-22	Bunnell + 3 Z-Nähte	342	501	502	0	0	1	1,25	-	-	Spaltbildung	38,406
05-23	Bunnell + 3 Z-Nähte	312	501	501	0	0	1,75	2	-	-	Spaltbildung	42,247
05-24	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	30,041
05-25	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	40,464
05-26	Bunnell + 3 Z-Nähte	276	501	501	0	0	0,25	0,5	-	-	Spaltbildung	38,987
05-27	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	41,508
05-28	Bunnell + 3 Z-Nähte	327	501	501	0	0	0,5	0,75	-	-	Spaltbildung	40,589
05-29	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	502	502	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	41,281
05-30	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	37,385
05-31	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	502	502	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	35,060
05-32	Bunnell + 3 Z-Nähte	278	286	286	0	0	-	-	-	-	Spaltbildung	37,581
05-33	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	42,883
05-34	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	31,887
05-35	Bunnell + 3 Z-Nähte	356	501	501	0	0	1,75	2,75	-	-	Spaltbildung	42,718
05-36	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	502	503	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	37,196
05-37	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	28,981
05-38	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	32,311
05-39	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	502	502	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	37,660
05-40	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	503	503	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	38,485
05-41	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	504	510	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	38,453
05-42	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	38,453
05-43	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	503	504	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	41,390
05-44	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	44,438
05-45	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	502	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	34,683
05-46	Bunnell + 3 Z-Nähte	366	455	501	0	0	2,5	3,25	-	-	Spaltbildung	35,249
05-47	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	501	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	40,212
05-48	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	506	509	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	40,055
05-49	Bunnell + 3 Z-Nähte	501	501	502	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	35,626
05-50	Bunnell + 3 Z-Nähte	502	511	514	0	0	0	0	-	-	Spaltbildung	36,474

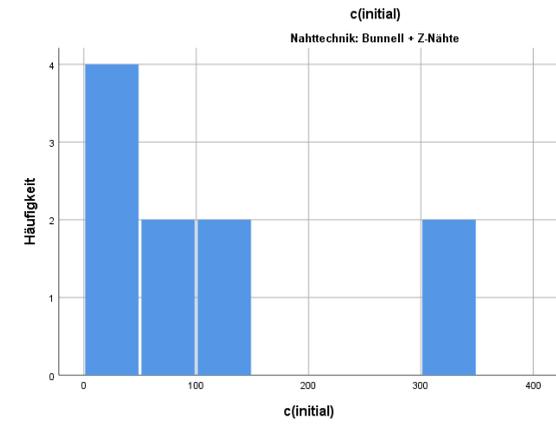
10.2 Histogramme



a) Krackow

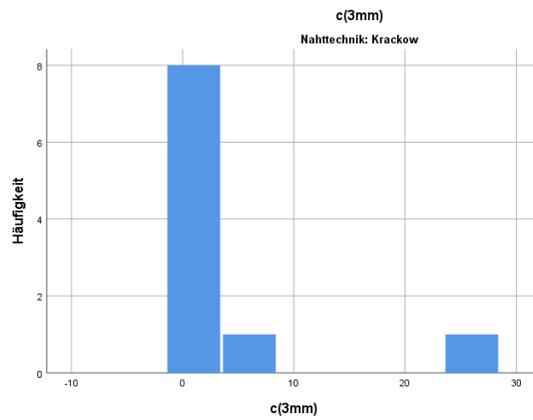


b) Krackow + Z-Nähte

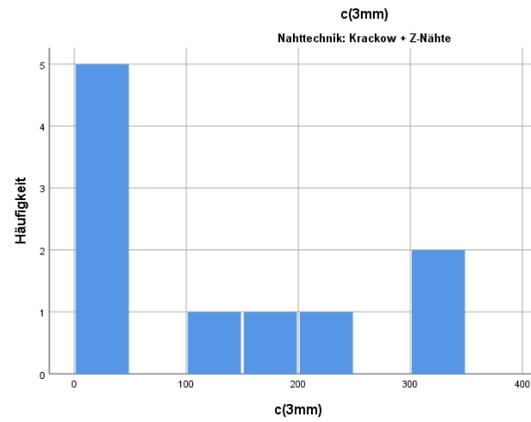


c) Bunnell + Z-Nähte

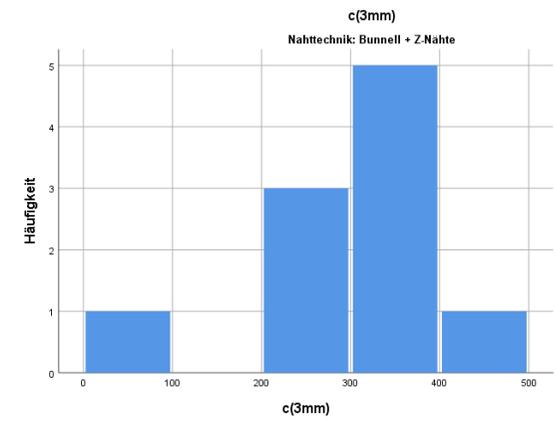
Abbildung 10.1: Histogramme der verschiedenen Techniken der Vorversuche bei initialer Spaltbildung



a) Krackow

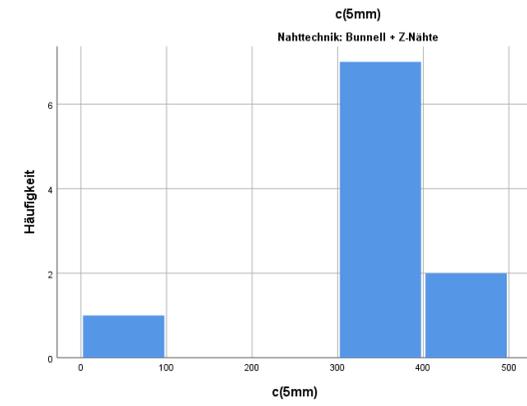
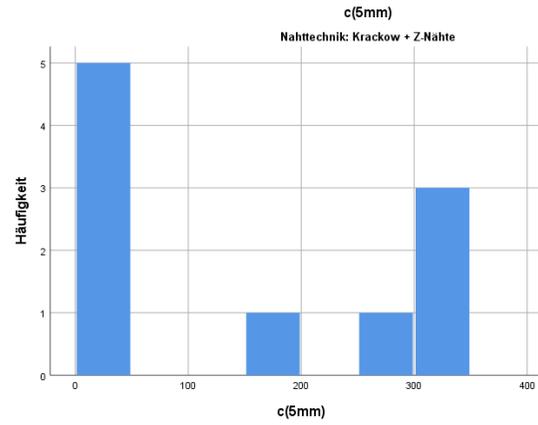
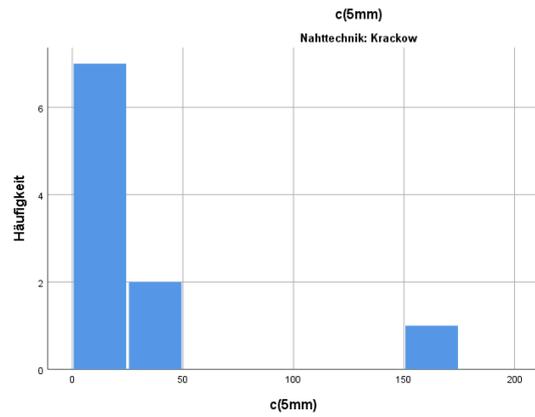


b) Krackow + Z-Nähte



c) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.2: Histogramme der verschiedenen Techniken der Vorversuche bei 3 mm Spaltbildung

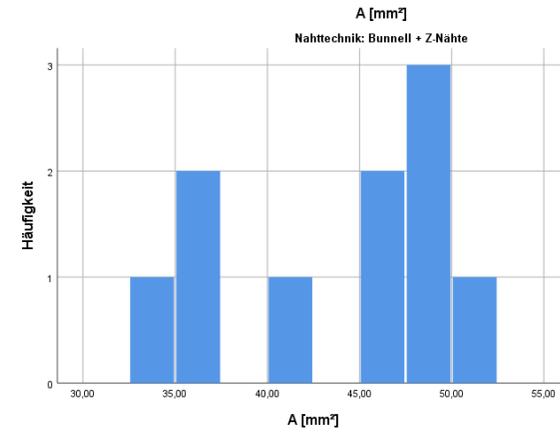
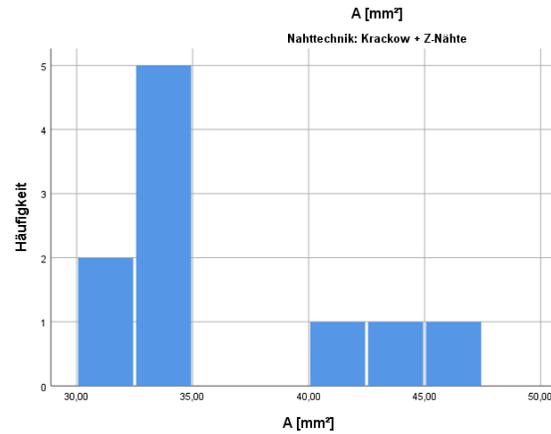
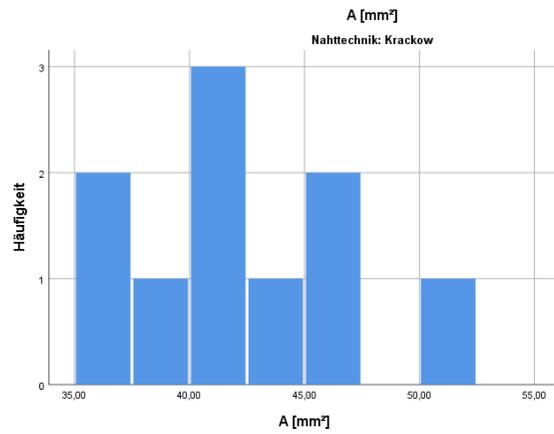


a) Krackow

b) Krackow + Z-Nähte

c) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.3: Histogramme der verschiedenen Techniken der Vorversuche bei 5 mm Spaltbildung

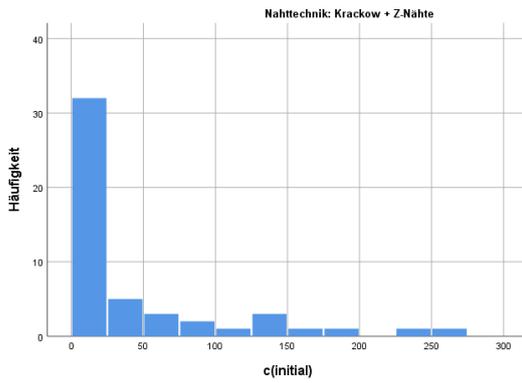


a) Krackow

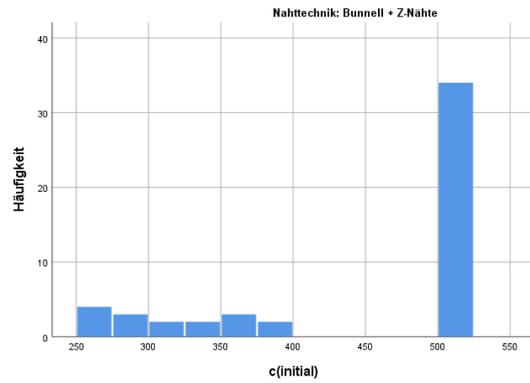
b) Krackow + Z-Nähte

c) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.4: Histogramme der Querschnittsflächen $A [mm^2]$ der Sehnen in den Vorversuchen

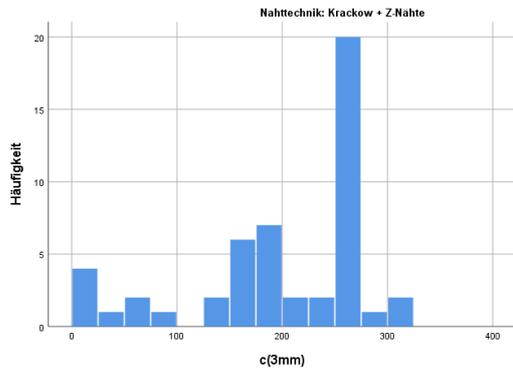


a) Krackow + Z-Nähte

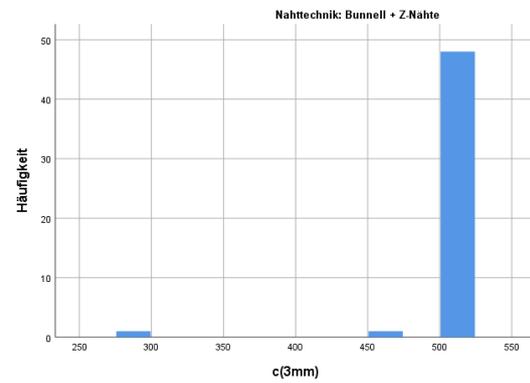


b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.5: Histogramme der gemessenen Werte der Hauptversuche bei initialer Spaltbildung

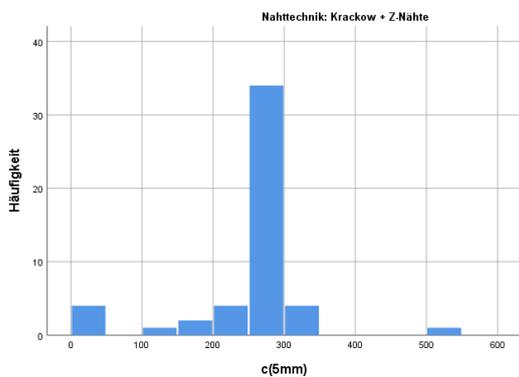


a) Krackow + Z-Nähte

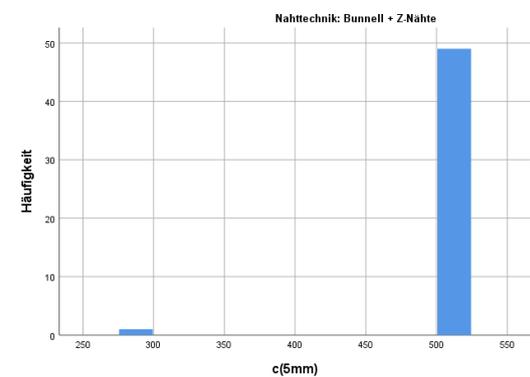


b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.6: Histogramme der gemessenen Werte der Hauptversuche bei 3 mm Spaltbildung

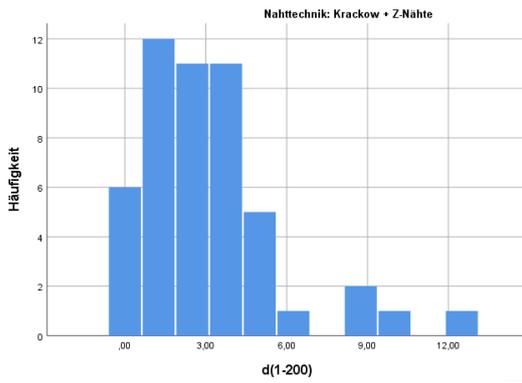


a) Krackow + Z-Nähte

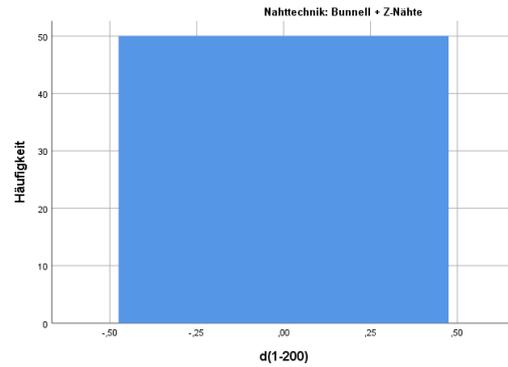


b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.7: Histogramme der gemessenen Werte der Hauptversuche bei 5 mm Spaltbildung

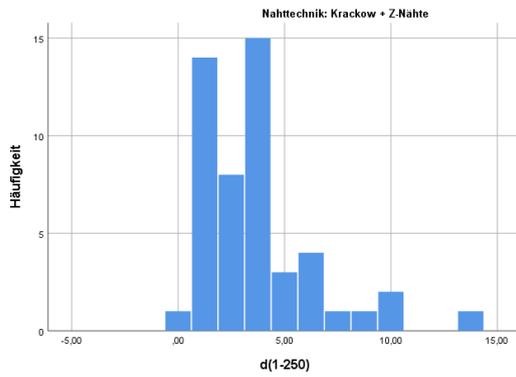


a) Krackow + Z-Nähte

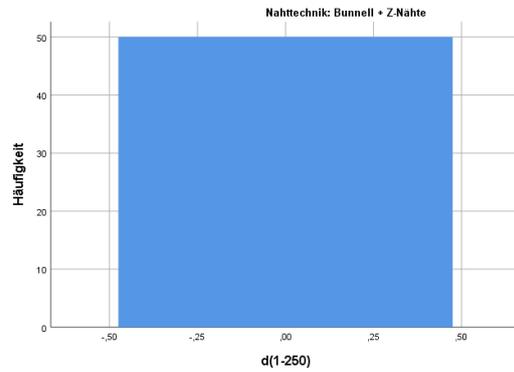


b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.8: Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 200. Zyklus in der ersten Serie

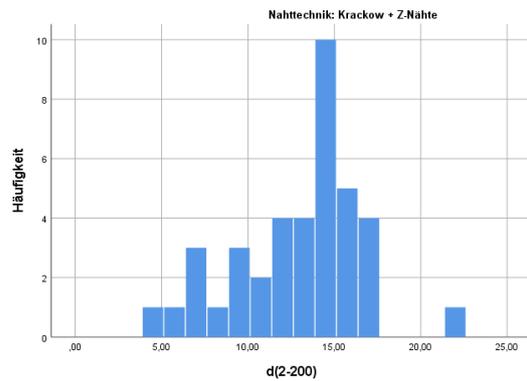


a) Krackow + Z-Nähte

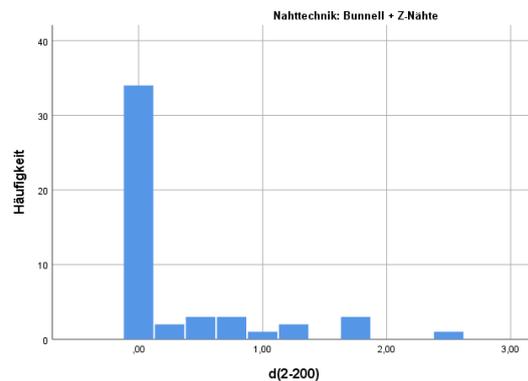


b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.9: Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 250. Zyklus in der ersten Serie

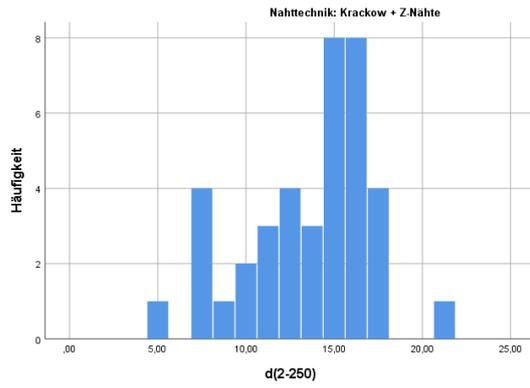


a) Krackow + Z-Nähte

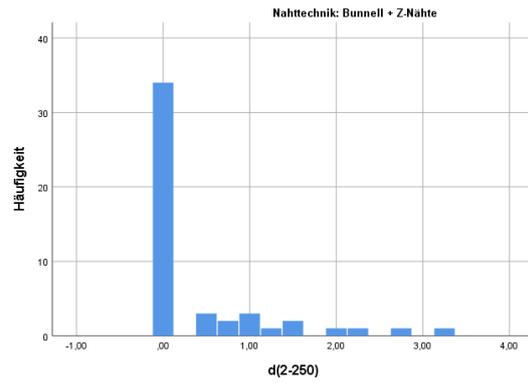


b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.10: Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 200. Zyklus in der zweiten Serie

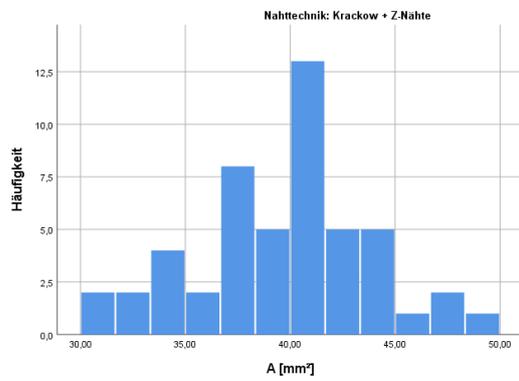


a) Krackow + Z-Nähte

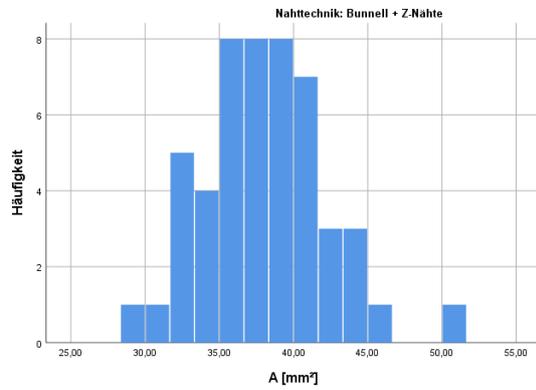


b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.11: Histogramme der gemessenen Werte der Spaltbildung d [mm] beim 250. Zyklus in der zweiten Serie



a) Krackow + Z-Nähte



b) Bunnell + Z-Nähte

Abbildung 10.12: Histogramme der Querschnittsflächen A [mm²] der Sehnen in den Hauptversuchen

10.3 Deskriptive Statistik

Tabelle 10.3: Deskriptive Statistik der verschiedenen Nahttechniken bei $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} in den Vorversuchen

Technik	$c_{initial}$			c_{3mm}			c_{5mm}		
	Krackow	Krackow + Z	Bunnell + Z	Krackow	Krackow + Z	Bunnell + Z	Krackow	Krackow + Z	Bunnell + Z
ausgewertete Fälle	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Mittelwert	1,00	46,20	104,30	4,00	114,00	289,10	25,40	135,70	318,00
SD	0,00	54,13	117,30	7,09	128,15	105,01	50,77	143,72	109,26
Median	1,00	24,50	61,00	2,00	61,00	302,50	2,00	83,00	304,50
IQR	0	97	178	2	234	106	33	296	68
Q1	1,00	1,00	6,50	1,00	1,75	244,50	1,00	4,75	303,25
Q3	1,00	98,25	184,75	2,50	235,75	350,00	33,50	301,00	371,50
Minimum	1	1	1	1	1	50	1	1	60
Maximum	1	146	311	24	301	434	164	301	462
Spannweite	0	15	310	23	300	384	163	300	402

Tabelle 10.4: Power, Effektstärke sowie errechnete Gruppengröße bei $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} in den Vorversuchen von Krackow und Bunnell + Z-Nähte im Vergleich

	$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}
Effektstärke	-	3,830	3,455
Power ($1 - \beta$)	-	>0,999	>0,999
Gruppengröße (berechnet für Power > 0,80)	-	3	3
Erwartete Power (berechnet für Power > 0,80)	-	0,907	0,848
Gruppengröße (berechnet für Power > 0,95)	-	4	4
Erwartete Power (berechnet für Power > 0,95)	-	0,990	0,972

Tabelle 10.5: Power, Effektstärke sowie errechnete Gruppengröße bei $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} in den Vorversuchen von Krackow + Z und Bunnell + Z im Vergleich

	$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}
Effektstärke	0,637	1,495	1,439
Power ($1 - \beta$)	0,259	0,868	0,842
Gruppengröße (berechnet für Power > 0,80)	42	9	10
Erwartete Power (berechnet für Power > 0,80)	0,803	0,826	0,842
Gruppengröße (berechnet für Power > 0,95)	69	14	15
Erwartete Power (berechnet für Power > 0,95)	0,952	0,960	0,960

Tabelle 10.6: Querschnittsflächen A [mm^2] der Sehnen in den Vorversuchen pro Nahttechnik

Technik	Querschnittsfläche A [mm^2]		
	Krackow	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte
ausgewertete Fälle	10	10	10
Mittelwert	42,188	36,151	43,805
SD	4,763	5,227	5,960
95 % Konfidenzintervall (95 % KI)	38,781 - 45,595	32,411 - 39,890	39,541 - 48,068
Median	41,893	33,890	45,380
IQR	8,152	9,342	11,321
Q1	37,628	32,586	36,975
Q3	45,781	41,928	48,296
Minimum	36,050	30,913	34,683
Maximum	51,459	45,632	52,025
Spannweite	15,410	14,718	17,342

Tabelle 10.7: Deskriptive Statistik von $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} in den Hauptversuchen

Technik	$c_{initial}$		c_{3mm}		c_{5mm}	
	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte
ausgewertete Fälle	50	50	50	50	50	50
Mittelwert	41,02	441,10	193,64	496,58	238,52	498,00
SD	62,652	91,796	82,190	31,157	83,949	30,713
Median	10,50	501,00	224,00	501,00	251,00	501,00
IQR	54	145	88	1	8	1
Q1	2,75	356,00	163,50	501	251,00	501,00
Q3	57,00	501,00	251,00	502	258,50	502,00
Minimum	1	256	1	286	1	286
Maximum	251	502	315	511	500	514
Spannweite	250	246	314	225	499	228

Tabelle 10.8: Deskriptive Statistik der Dehiszenz d in der ersten Serie

Technik	200. Zyklus		250. Zyklus	
	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte
ausgewertete Fälle	50	50	50	50
Mittelwert	3,10	0,0	3,66	0,0
SD	2,503	0,0	2,737	0,0
Median	2,75	0,0	3,25	0,0
IQR	2,25	0,0	2,63	0,0
Q1	1,50	0,0	1,75	0,0
Q3	3,75	0,0	4,38	0,0
Minimum	0	0	0	0
Maximum	12,5	0	14	0
Spannweite	12,5	0	14	0

Tabelle 10.9: Deskriptive Statistik der Dehiszenz d in der zweiten Serie

Technik	200. Zyklus		250. Zyklus	
	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte
ausgewertete Fälle	39	49	39	49
Mittelwert	13,01	0,32	13,62	0,42
SD	3,608	0,599	3,554	0,785
Median	14,25	0,0	14,50	0,0
IQR	5,00	0,50	5,00	0,63
Q1	10,25	0,0	11,00	0,0
Q3	15,25	0,5	16,00	0,63
Minimum	4,5	0,0	5,00	0,0
Maximum	21,5	2,5	21,75	3,25
Spannweite	17	2,5	16,75	3,25

Tabelle 10.10: Querschnittsflächen A [mm^2] der Sehnen in den Hauptversuchen pro Nahttechnik

Technik	Querschnittsflächen A [mm^2]	
	Krackow + Z-Nähte	Bunnell + Z-Nähte
ausgewertete Fälle	50	50
Mittelwert	39,639	37,995
SD	41,115	4,216
95 % Konfidenzintervall (95 % KI)	38,470 - 40,808	36,796 - 39,193
Median	40,173	37,656
IQR	5,266	5,294
Q1	37,122	35,202
Q3	42,388	40,495
Minimum	31,227	28,981
Maximum	48,996	51,459
Spannweite	17,768	22,478

Tabelle 10.11: Power und Effektstärke $c_{initial}$, c_{3mm} und c_{5mm} in den Hauptversuchen

	$c_{initial}$	c_{3mm}	c_{5mm}
Effektstärke	5,137	4,888	4,166
Power ($1 - \beta$)	>0,999	>0,999	>0,999