Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie am
Leiter: OTA Prof. Dr. B. Friemert

Wundeinlagen zur Vakuumtherapie:

Eine experimentelle in vitro Studie zum Vergleich von Wundeinlagen für die Vakuumtherapie aus Polyurethan, Polyvinylalkohol und Gaze.

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

Martin Richard Kohlschmitt
Villingen
2015

Amtierender Dekan: Prof. Dr. Thomas Wirth
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Christian Willy
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Karl Heinz Orend
Tag der Promotion: 14.06.2016

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis IV

1. Einleitung 1

2. Material und Methoden 8

2.1 Physikalische Grundlagen (Druckmessung): 8

2.2 Materialien 9

2.2.1 Wundauflagen 9

2.2.2 Folie und trac-pad connector 11

2.2.3 Vakuumtherapiesystem 11

2.2.4 Oberflächen 12

2.3 Messinstrumente 12

2.4 Datenverarbeitung und Statistik 14

2.5 Versuchsaufbau 15

2.5.1 Versuch 1 - Messung der Druckverhältnisse über eine längere Strecke 15

2.5.2 Versuch 2 - Druckverhältnisse im Grenzbereich Wundoberfläche / Schwamm bei komplizierten Wunden: 18

2.5.3 Versuch 3 - Einfluss der Wundeinlage auf die Evakuierung von Wundsekret: 20

2.5.4 Versuch 4 - Bestimmung der Durchflusszeit: 22

2.5.5 Versuch 5 - Wundmaterialien und V.A.C. Ulta 24

2.6 Bisher veröffentlichte Studienergebnisse zum Vergleich von Wundfüllern im Rahmen der Vakuumtherapie: 25

3. Ergebnisse 26

3.1 Versuch 1 - Messung der Druckverhältnisse über eine längere Strecke 26

3.2 Versuch 2 - Druckverhältnisse im Grenzbereich Wundoberfläche / Schwamm bei komplizierten Wunden – ein in vitro Experiment 31

3.3 Versuch 3 - Einfluss der Wundeinlage auf die Evakuierung von Wundsekret: 34

3.4 Versuch 4 - Bestimmung der Durchflusszeit und Druck in einer tiefen Wunde: 35
3.5. Versuch 5 - Wundmaterialien und V.A.C. Ulta 41
3.6 Literaturanalyse 43
4. Diskussion 56
4.1 Versuchsanordnungen 57
4.2 Tiefe irreguläre Wunden 60
4.3. Anwendung mit V.A.C. Ulta 61
4.4 Exsudatmanagment 62
4.5 Vorteile und Nachteile der Gaze 64
4.6 Fazit für die Praxis 68
5. Zusammenfassung 70
6. Literatur 72
7. Danksagung 78
8. Lebenslauf 79

Abkürzungsverzeichnis

mmHg = Millimeter Quecksilbersäule (Druckeinheit)
NPWT = negative pressure wound therapy
Pa = Pascal (SI-Einheit des Drucks)
PDGF = Platelet Derived Growth Factor
PU = Polyurethan
PVA = Polyvinylalkohol
V.A.C. = vacuum assisted closure
VSS = Vakuumversiegelung

1. Einleitung

Eine Wunde kann durch ein Trauma (mechanische Verletzung, Schürfwunden, Hieb-, Stich und Schnittverletzungen o.ä.), eine thermische Verletzung (Verbrennungen oder Erfrierungen), durch elektrischen Strom, chemische Reize, Strahlung, iatrogen, durch Druck auf das Gewebe (Druckgeschwür, Dekubitus) und in Folge von Erkrankungen (Diabetes mellitus, arterielle Verschlusskrankheit, chronisch venöse Insuffizienz) verursacht werden. Die adäquate Versorgung der Wunde ist wichtig, um eine Infektion zu vermeiden und optimale Bedingungen für die Wundheilung zu schaffen.

Die Wundheilung erfolgt auf verschiedenen Wegen:

1. primär: Wundränder können sauber aneinander adaptiert werden(die primäre Naht) und die Wunde ist erreger- und fremdkörperfrei.
2. verzögert primär: die akute Wunde wird vorerst mittels z.B.: feuchter Gaze offen gehalten, um eine Infektion zu vermeiden. Bei ausbleibenden Infektionszeichen und nach Säuberung der Wunde erfolgt meist 2-3 Tage später der Wundverschluss.
3. sekundär: Bei großen Wunden wird der Defekt mit Granulationsgewebe gefüllt, welches zu Narbengewebe differenziert. Oder die Wunde wird nach mehreren Tagen chirurgischerseits zugenäht.
4. regenerativ: Bei oberflächlichen Wunden kommt es nur zur Verletzung der obersten Hautschichten, die vollständig regenerieren. Eine Naht wird nicht angestrebt.

Eine besondere Herausforderung im Bereich der Wundversorgung stellen große Weichgewebsdefekte und chronische Wunden dar, da in der Regel eine Besiedelung der Wundoberfläche nicht verhindert werden kann und daraus eine chronische Infektion erfolgen könnte.
Therapeutisch erfolgt in der Regel in diesen Fällen als erste Maßnahme ein chirurgisches, mechanisches oder enzymatisches Débridement der Wunde und zusätzlich die Spülung der Wunde (Kochsalzlösung, Antiseptika) zur Reduktion der Keimbelastung und zur Entfernung von nekrotischem Gewebe.

Im Rahmen der seit den 80er Jahren standardgemäßen feuchten Wundbehandlung wird zur Förderung der Granulationsphase der Defekt mit einer feuchten Wundauflage bedeckt [30]. Diese soll für die Wunde ein ideales feuchtes Wundmilieu halten, Exsudat entfernen, vor Infektionen schützen und einen atraumatischen Verbandswechsel ermöglichen.
In den letzten Jahren wurden hierfür moderne Verbandmaterialien wie die Hydrokolloid-, Hydropolymer- und Alginatverbände, sowie zur Unterstützung der Wundheilung antiseptische Zusätze (u.a. Silberionen) entwickelt.

Eine weitere moderne Methode zur Behandlung von komplizierten Wunden stellt die Vakuumversiegelung (VVS) dar.
So wird seit Beginn der 90er Jahre in der Versorgung von akuten und chronischen Wunden die auch als Vakuumversieglungstherapie bezeichnete Therapie eingesetzt (weitere Synonyma: NPWT = negative pressure wound therapy; V.A.C.-Therapy = vacuum assisted closure – therapy). Seit den späten 80er Jahren des 20sten Jahrhunderts arbeiteten die Gruppe um L. Argenta und M .Morykwas in Winston-Salem (USA) und die Gruppe um Prof. Fleischmann in Ulm / Bietigheim an der Entwicklung der Versieglungsmethode [2, 16, 17, 48]. Diese Art der Wundversorgung etablierte sich in den Jahren 1995-1998 auch in Deutschland und findet heute sowohl unter stationären, als auch ambulanten Bedingungen ihre Anwendung.

Bei der Vakuumversieglungstherapie wird nach sorgfältigem chirurgischem Primär-Débridement ein offenporiger, genau auf die Wundsituation angepasster Polyvinylalkohol, oder (heute meist) Polyurethanschwamm in das Wundbett eingebracht. In Einzelfällen wird das Schwammmaterial mittels Klammern oder Hautnaht an die Wundränder adaptiert. Anschließend erfolgt mittels einer luftdichten, transparenten, wasserdampfdurchlässigen und erregerdichten Polyurethanklebefolie der Wundverschluss und die Versiegelung der Wunde.
Über eine externe Vakuumquelle wird ein definierter Unterdruck erzeugt, der mittels eines in das Wundmaterial eingelegten Schlauches auf die Wundeinlage übertragen wird.

Abbildung 1 : Notwendige Ausrüstung zur Durchführung der Vakuumtherapie:

1. V.A.C. Via- Vakuumtherapieeinheit
2. Polyurethanklebefolie zur Versieglung
3. trac-pad-connector
4. Granu-foam-Polyurethanschwamm

Quelle: http://www.medgadget.com/2010/04/kcis_new_portable_negative_pressure_system_going_to_market.html[45]

Typischerweise wird eine Sogstärke von -75 bis -125 mmHg angelegt, da diese sich in der Praxis bewährte und sich auch in Tierversuchen, als geeignetste Sogstärke im Hinblick auf Gewebeneubildung und Wundreinigung erwies [49].
Bei gefährdeter Gewebeperfusion oder in der unmittelbaren Nähe zu einem freiliegenden Gefäß, sowie zur Verminderung therapieinduzierter Schmerzen, wird in der Regel eher ein niedrigerer Sog verwendet.
Ist mit Hilfe der Klebefolie kein luftdichter Verschluss erreichbar, kann heute durch moderne Pumpensysteme mittels integrierter Sogstärkenmessung eine „kompensatorische“ Erhöhung des angelegten Unterdrucks erfolgen, um den gewünschten Druck zu halten.
Der Unterdruck wird wahlweise kontinuierlich, oder intermittierend an die Wundoberfläche angelegt. Der intermittierende Saugmodus zeigt sich dem kontinuierlichen bei der Granulationsgewebeneubildung, einem wichtigen Faktor für die Wundheilung, signifikant überlegen[48].

Der positive Effekt der Vakuumversiegelung auf die Wundheilung ist bedingt durch (s. Abb. 2):

- Verkleinerung der Wundfläche durch den auf den Schwamm einwirkenden Unterdruck, der die Wundränder aneinander zieht. (Wundretraktion/Makrodeformation)
- Anregen der Bildung von Granulationsgewebe in einem ideal-feuchten Wundmilieu selbst über bradytrophem Gewebe (Sehnen), Knochen und über Metallimplantaten. (Mikrodeformation)
- Fortsetzung der effektiven Wundreinigung (Absaugen kleinerer Gewebetrümmer) nach suffizientem chirurgischem Primär-Débridement der Wunde. Sicherer, kontinuierlicher Abtransport von Wundsekret (dadurch seltenere Verbandwechsel i.d.R.: alle 2-3 bis max. 7 Tage).
- Druckbedingte Minderung eines interstitiellen Ödems mit konsekutiver Verbesserung der Mikrozirkulation.
- Erhöhung der lokalen Durchblutung [48] sowie der Angiogenese im Bereich der Wundränder [60].

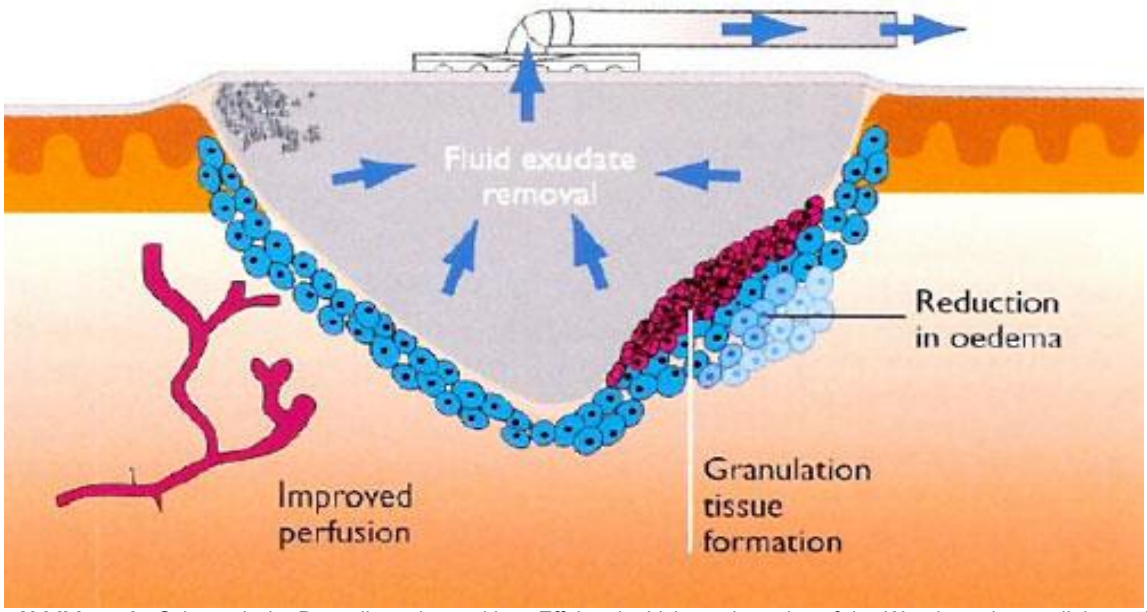

Abbildung 2 : Schematische Darstellung der positiven Effekte der Vakuumtherapie auf das Wundgewebe von links nach rechts: 1. Erhöhte Durchblutung 2. Anregung der Granulationsgewebsbildung 3. Reduktion eines interstitiellen Ödems 4. Kontinuierlicher Abtransport des Wundexsudats

Quelle : http://www.orthohyd.com/home/know-your-treatment/vac-treatment[56]

Seit Einführung der Vakuumtherapie wurden die Indikationen und Kontraindikationen für den Einsatz der Therapieoption stetig erweitert[62].

Indikationen für die Vakuumtherapie sind unter anderen:

- akute oder traumatische Wunden
- chronische Wunden
- tiefe, stark sezernierende und stark kontaminierte Wunden
- Verbrennungen
- Wundkonditionierung
- diabetischer Fuß
- temporäre Weichteildefekte ohne Möglichkeit eines Primärverschlusses
- infizierte Wunden nach chirurgischem Débridement
- Meshgraftfixation
- Sternumosteomyelitis
- Abdomen apertum
- dehiszente Wunden
- temporärer Verschluss von Fasziotomiewunden
- Dekubitus
- Ulcus cruris venosum / mixtum

Kontraindikationen der Therapie

- Karzinomwunden (Wunden im neoplastischen Gewebe)
- Gefäßanastomosen und freiliegende Gefäße
- Blutungsneigung
- unbehandelte Osteomyelitis
- Gerinnungsstörungen

In den vergangen Jahren kamen zu den beiden bisher verwendeten Wundeinlagen aus Polyurethan und Polyvinylalkohol Einlagen aus Gaze-Material hinzu [7].

Bereits 1989 hatten Mark Chariker und Katherine Jeter ein Vakuumsystem unter Verwendung von Gaze als Wundeinlage bei einem Unterdruck von - 80 mmHg beschrieben [10]. Erst 2008, durch eine retrospektive klinische Studie an 30 Patienten von Campbell et al., in der sich für die kostengünstigere Gaze eine mit den bisher für PU-Schwämme vorhandenen Daten vergleichbare Volumenreduktion ergab, wurde Gaze als weiterer möglicher Wundfüller im Rahmen der Vakuumtherapie vorgestellt [7].

Im Rahmen dieser Arbeit sollten hierfür in einem ersten Schritt die bisherige Literatur analysiert und dabei die verwendeten Materialien (Gaze, PU- und PVA-Schwämme) als Wundeinlagematerial vergleichend gegenüberstellt werden.
In mehreren Studien war bis zum heutigen Zeitpunkt bereits untersucht worden, ob die Wirkung und die positiven Effekte der Vakuumtherapie, beim Einsatz von Gaze als Wundfüller, mit den positiven Effekten, die die bisher üblichen Schwammmaterialien auf die Wundheilung haben, vergleichbar sind.

So soll die medizinische Gaze der bisherigen Literatur zufolge, gegenüber Polyurethan- und Polyvinylalkohol-Schwämmen, einige Vorteile haben.
Die Untersuchungen ergaben, dass die Gaze kostengünstiger sei, weniger Schmerzen beim Verbandswechsel bereite und bei komplizierter Wundanatomie leichter einzubringen sei [21, 22, 26].
Bislang war jedoch in keiner bisherigen Arbeit untersucht worden, ob sich bei Anwendung einer feuchten Gaze der gewünschte Sog innerhalb der Wunde gleichmäßig verteilt und auch die Exsudatmenge korrekt abtransportiert (abgeleitet) werden kann. Zur wundinternen Untersuchung der physikalischen Grundvoraussetzungen für eine Therapie wurde sich an die Erfahrungen und dem Versuchsaufbau bisheriger Untersuchungen orientiert.

In zwei in Ulm veröffentlichten Dissertationen fanden bereits 2002 (Maier, D. [32]) und 2006 (von Thun-Hohenstein, H. [59]) Vergleiche der physikalischen Eigenschaften der beiden Schwammmaterialien statt. Ein ähnlicher Vergleich zwischen den Schwammmaterialien und dem Gazematerial auf ihre physikalischen Eigenschaften soll zusätzlich in dieser experimentellen Arbeit stattfinden, da entsprechende Untersuchungen in der bisher veröffentlichten Literatur fehlen. Diese Studie soll durch die Literaturübersicht zum Vergleich der Wundfüller komplettiert werden.

Im Rahmen der experimentellen Studie sollen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Verhält sich die Gaze ähnlich den beiden Schwammmaterialien bei der Fortleitung des Unterdrucks über eine lange Strecke?
2. Verhalten sich Schwamm und Gaze in irregulären Wunden bezüglich der Weiterleitung des Unterdrucks an die Wundränder gleich?
3. Beeinflussen Schwamm und Gaze das Exsudatmanagment innerhalb einer Wunde gleichermaßen?
4. Bietet die Gaze bei der Handhabung Vorteile oder Nachteile bei der Versorgung tiefer Defekte und allgemeiner Wunden?

2. Material und Methoden

2.1 Physikalische Grundlagen (Druckmessung):

Bei der Druckmessung spielt die Druckintensität und die Fläche, auf der dieser Druck lastet, eine große Rolle, da der Druck (p) der Kraft (F) entspricht die auf eine bestimmte Fläche (A) wirkt => $p = \frac{F}{A}$.

Standardmäßig wird der Druck mit der SI-Einheit Pascal (Pa) angegeben.

1Pa entspricht der Kraft 1 Newton (N) auf eine Fläche von 1 m² => $1\ Pa = \frac{N}{m^2}$.

In der Medizin findet häufig noch die Einheit Torr oder Millimeter Quecksilbersäule (mmHg) Anwendung, wobei 1 mmHg = 133,322 Pa entspricht.
Die bei den Untersuchungen angewandte Vakuumpumpe und die Messsonden arbeiten unter Verwendung der Einheit mmHg, daher werden die Ergebnisse dieser Arbeit in mmHg angegeben.

2.2 Materialien

2.2.1 Wundauflagen

Bis vor wenigen Jahren verwandte man für die Vakuumtherapie fast ausschließlich Schwammmaterialien aus Polyvinylalkohol oder Polyurethan.
In der jüngsten Vergangenheit wurden Gaze-Kompressen als Wundfüller wiederentdeckt (s. Abb. 3) [7].
Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurden ein Polyurethan-Schwamm (*GranuFoam*, KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) und ein Polyvinylalkohol-Schwamm (*WhiteFoam*, KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) verwendet.
Ebenso wurde eine marktübliche Gaze (*Curity AMD Antimicrobial Gauze Sponges,* Smith&Nephew GmbH Wound Management, 22761 Hamburg) eingesetzt.

Abbildung 3 : Untersuchte Wundfüller. Links der weiße Polyvinylalkohol-Schwamm; Mitte der schwarze Polyurethanschwamm; Rechts die Wundgaze

Beide Schwammmaterialien und die Gaze-Kompressen werden in unterschiedlichen Größen angeboten, die mittels Skalpell oder Schere optimal der Wundgeometrie angepasst werden können. Heutzutage verzichtet man häufig auf das Einziehen von Drainagen zur Sogerzeugung in den PVA - Schwamm, da eine ausreichende Druckweiterleitung unterhalb von -150 mmHg bei der Unterdruckerzeugung mittels eines aufgesetzten Druckableitungsschlauches mit Ansaugstutzen (z.B. als trac-pad connector bezeichnet) nachgewiesen wurde [64, 66].
Die neue Generation von PU-Schwämmen bietet durch konfektionierte Perforationen die Möglichkeit, die Größe des Schwammes durch Abreißen des Materials anzupassen.

Die beiden Schwammmaterialien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Porengröße, Stabilität und Dichte.

Tabelle 1: Eigenschaften der Schwammmaterialien

	Polyurethanschwamm	**Polyvinlyalkoholschwamm**
Porengröße	400-600 µm	200-1000 µm
Stabilität	Weich; gut verformbar	Fester, weniger gut verformbar
Eigenschaften	• Offenporige Struktur zur gleichmäßigen Verteilung des Unterdrucks auf die Wunde • Hydrophob; erleichtert das Exsudatmanagment • Verbandswechsel nach 2-3 Tagen	• Hohe Dichte, dadurch Vermeidung des Einwachsen von Granulationsgewebe • Hydrophil • Verbandswechsel nach bis zu 7 Tagen
Indikation[61]	• Fibrinanteil über 35% • flockig trübes Sekret • Infizierte Wunde	• Granulationsgewebeanteil über 65% • seröses Sekret • chirurgische Wunden

Die Mikrostruktur der Gaze entspricht einem Geflecht aus Baumwollfäden mit einem Durchmesser von 200 µm, welche jeweils aus 10-20 µm großen Baumwollfasern gesponnen wurden. Die „Porengröße“ entspricht hierbei 2000 – 3200 µm [63].

Zusätzlich kamen für einzelne Versuche auch die aktuell verfügbaren hydrophileren PU-Schwammmaterialien (*V.A.C.VeraFlo* und *V.A.C.VeraFlo Cleanse*, KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) zum Einsatz. Sie besitzen ansonsten ähnliche Eigenschaften bezüglich der Porengröße wie der ursprünglich verfügbare PU-Schwamm, aufgrund erhöhter Oberflächenenergie agieren die neue Schwämme jedoch weniger hydrophob [31].

2.2.2 Folie und trac-pad connector

Zur Versiegelung der Versuchsaufbauten wurde eine wasserdampfdurchlässige, atmungsaktive und transparente Folie (Hersteller KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) verwendet. Die durch die Ausleitung der Druckmesssonden unter der Folie hinweg entstehenden Undichtigkeiten wurden mittels sehr weicher und stark haftender Modellierstreifen (Coloplast GmbH, 22045 Hamburg) abgedichtet.
Die Übertragung des Unterdrucks von der Vakuumtherapieeinheit erfolgt mittels trac-pad connector (s. Abb.1). Hierbei handelt es sich um einen Saugansatz, um den eine Klebefolie angebracht ist. Nach Einschneiden eines ca. 1-2 cm großen Lochs in die Folie wird der trac-pad connector aufgeklebt.

2.2.3 Vakuumtherapiesystem

Zur Erzeugung des Unterdrucks kamen zwei verschiedene Vakuumtherapieeinheiten (*ActiV.A.C*. und *InfoV.A.C,* KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) zum Einsatz.
Diese unterscheiden sich lediglich in Größe und Gewicht, sowie dem Volumen des Auffangkanisters (InfoV.A.C.: 500 ml ActiV.A.C.: 300 ml). Beide Systeme können einen kontinuierlichen oder intermittierenden Unterdruck von -25 mmHg bis -200 mmHg erzeugen, regelbar in Schritten von -25 mmHg.
Zur Testung der Verteilung instillierter Flüssigkeit kam eine, auch Flüssigkeit unter standardisierten Bedingungen transportierende, weitere Vakuumtherapieeinheit (*V.A.C.Ultra,* KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) zum Einsatz. Neben der Möglichkeit, wie bei den anderen Geräten einen Unterdruck von -50 mmHg bis -200 mmHg (in Schritten von -25 mmHg) zu erzeugen, ermöglicht es dieses System zusätzlich eine bestimmte Flüssigkeitsmenge über ein Dual-trac-pad connector in den Schwamm einzuleiten. Hierbei kann der Behandler ein selbst bestimmtes Instillationsvolumen wählen (10-500 ml), oder dieses unter visueller Kontrolle mittels „Fill Assist Tool“ bestimmen.
Die Befeuchtungszeit ist stufenlos zwischen 1s und 30 min wählbar.

2.2.4 Oberflächen

Sämtliche Versuche wurden in vitro auf einem Kunststofftisch durchgeführt.
Die Versuche 2 – 4 fanden entweder in einem avitalen Rinder- oder Schweinemuskel statt. Versuch 4 wurde mit Hilfe einer handelsüblichen Plastikbox durchgeführt.
Versuch 5 wurde in Melonenhälften durchgeführt, da in diesen eher realitätsnahe, unregelmäßige Wundgeometrien imitiert werden konnten.

2.3 Messinstrumente

Die Bestimmung von Flüssigkeitsmengen erfolgte mittels Messzylinder (500:5 ml Einteilung) und einer Waage (Soehnle Page 5000:1g).

Zur Ermittlung der Druckwerte dienten bei den durchgeführten Versuchen piezoresistiv messende Druckmesssonden (Mammendorfer Instituts für Physik und Medizin GmbH (MIPM), 82291 Mammendorf) (s. Abb. 4). Die eingehenden Messimpulse wurden über einen Verstärker (Argus junior MIPM GmbH, 82291 Mammendorf) verarbeitet und über eine serielle Schnittstelle, mittels eines Adapters, an den USB – Anschluss des Rechners und die entsprechende Messsoftware übermittelt. Die Software ermöglicht es, die eingehenden Messwerte direkt in dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL von Microsoft weiterzuverarbeiten. Bereits 1999 erprobten Willy et al. diese Messmethode in der Praxis [65].

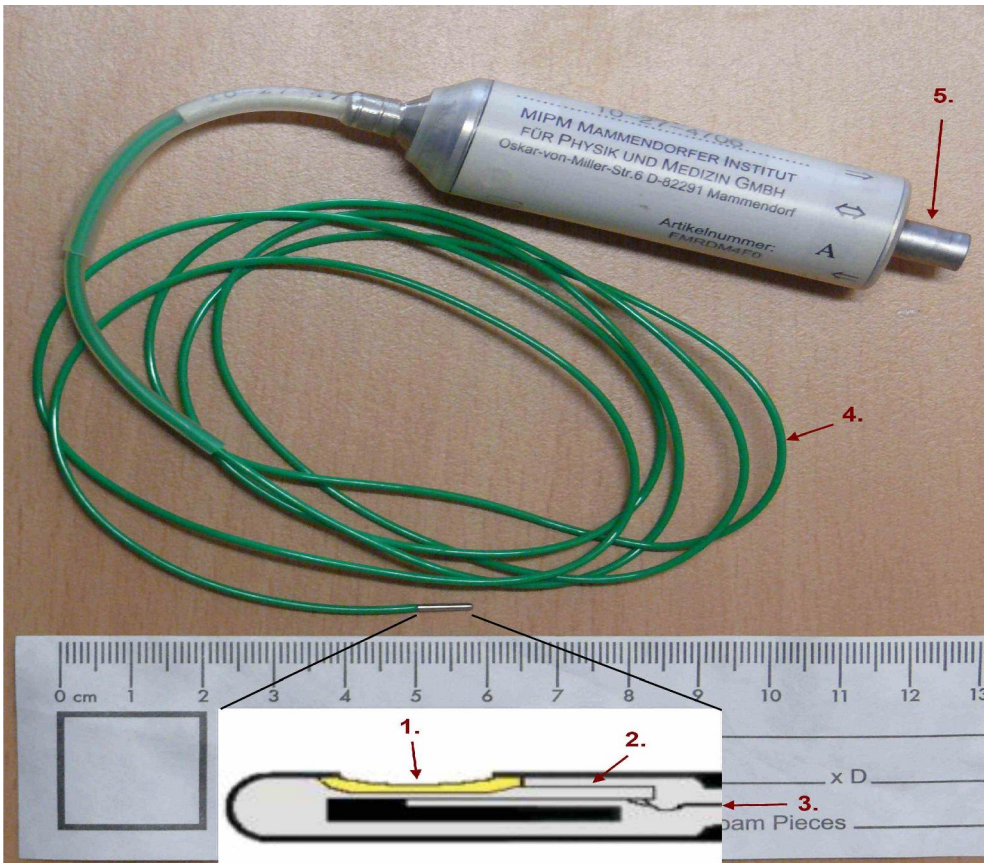

Abbildung 4 : Messkatheter

1: Messfenster mit Silikonüberzug. 2: Piezo Halbleiter mit Chip.

3: Anschlussdraht. 4: Polyurethanummanteltes Kabel zur Sondenspitze.

5: Anschluss des Katheters an den Messverstärker (Argus junior)

Die Druckänderung wird hierbei mittels der Änderung des spezifischen Widerstands bestimmter Halbleitermaterialien ermittelt. Das monokristalline Halbleitermaterial in den Messsonden dient als Druckaufnehmer und wandelt den Druck in eine elektrische Widerstandsänderung um. Die bei den Versuchen eingesetzten Drucksonden sind so abgeglichen, dass Nullpunktspannung und Nullpunktdrift in Bereichen von 20 – 40 °C nahezu Null sind. Das Ausgangssignal des Druckaufnehmers liegt im µV – Bereich, weshalb zur Vermeidung von Messfehlern höchst rauscharme Eingangsstufen mit großem Eingangswiderstand notwendig sind. Diese Präzisionsoperationsverstärker verstärken das Messsignal des Druckaufnehmers in den mV – Bereich. Das System ermöglicht eine Messung im Bereich von ±350 mmHg bei einer Auflösung von ± 1 mmHg.

Die Analogsignale der Druckaufnehmer werden über ein Vorverstärker- und Versorgungsmodul an die Empfangsstation übermittelt. Die Signale können über eine serielle Schnittstelle (mittels Adapter an den USB-Port) an die Messsoftware übermittelt werden [59, 64].

2.4 Datenverarbeitung und Statistik

Auf Grund der geringen Anzahl der einzelnen Versuche (n = 8 pro Versuchsaufbau für die Versuche 1-4, Versuch 5 n = 1) wurde von einer statistischen Auswertung der Daten abgesehen. Eine vergleichende Statistik wurde nicht notwendig, da keine Gruppenvergleiche durchgeführt wurden.
Die Messdaten wurden mittels des Tabellenkalkulationsprogramms EXCEL von Microsoft verarbeitet. Weil eine Untersuchung auf Normalverteilung nicht durchgeführt wurde, werden die Messergebnisse im Median sowie den 25% - und 75% - Quartilen angegeben.

2.5 Versuchsaufbau

2.5.1 Versuch 1 - Messung der Druckverhältnisse über eine längere Strecke

Die Streckenmessung soll ähnlich dem Versuch, der bereits von der Arbeitsgruppe Willy und Thun-Hohenstein durchgeführt worden war, erfolgen [64, 66].

Auf einem Kunststofftisch werden acht Messsonden platziert und zur Vermeidung von Lageveränderungen mittels Klebeband auf der Tischoberfläche fixiert.
Die Messsonden werden im Abstand von 7 cm fixiert, so dass sich ein maximaler Abstand vom trac-pad-connector von 49 cm ergibt.
Anschließend wird über diesen Messsonden eine 60 cm lange Polyurethan-Schwammstrecke gelegt und mittels einer Klebefolie luftdicht versiegelt. Das Messfenster ist hierbei in Richtung des Tisches gerichtet, um zu verhindern, dass sich Materialbrücken in das Messfenster der Sonden einlagern und so die Messergebnisse verfälscht werden (s. Abb. 5).

Der trac-pad connector wird mittig auf Höhe der ersten Messsonde platziert.
Mittels einer Vakuumtherapieeinheit wird nun ein kontinuierlicher Unterdruck von -25 mmHg angelegt. Die Druckverhältnisse werden etwa 1 min aufrechterhalten, bis sich keine großen Veränderungen der Messwerte mehr ergeben und nach Ablesen der Messergebnisse wird der Unterdruck in -25 mmHg Abständen schrittweise erhöht und ebenso ca. 1 min bis zum maximal erzeugbaren Druck von -200 mmHg gehalten.

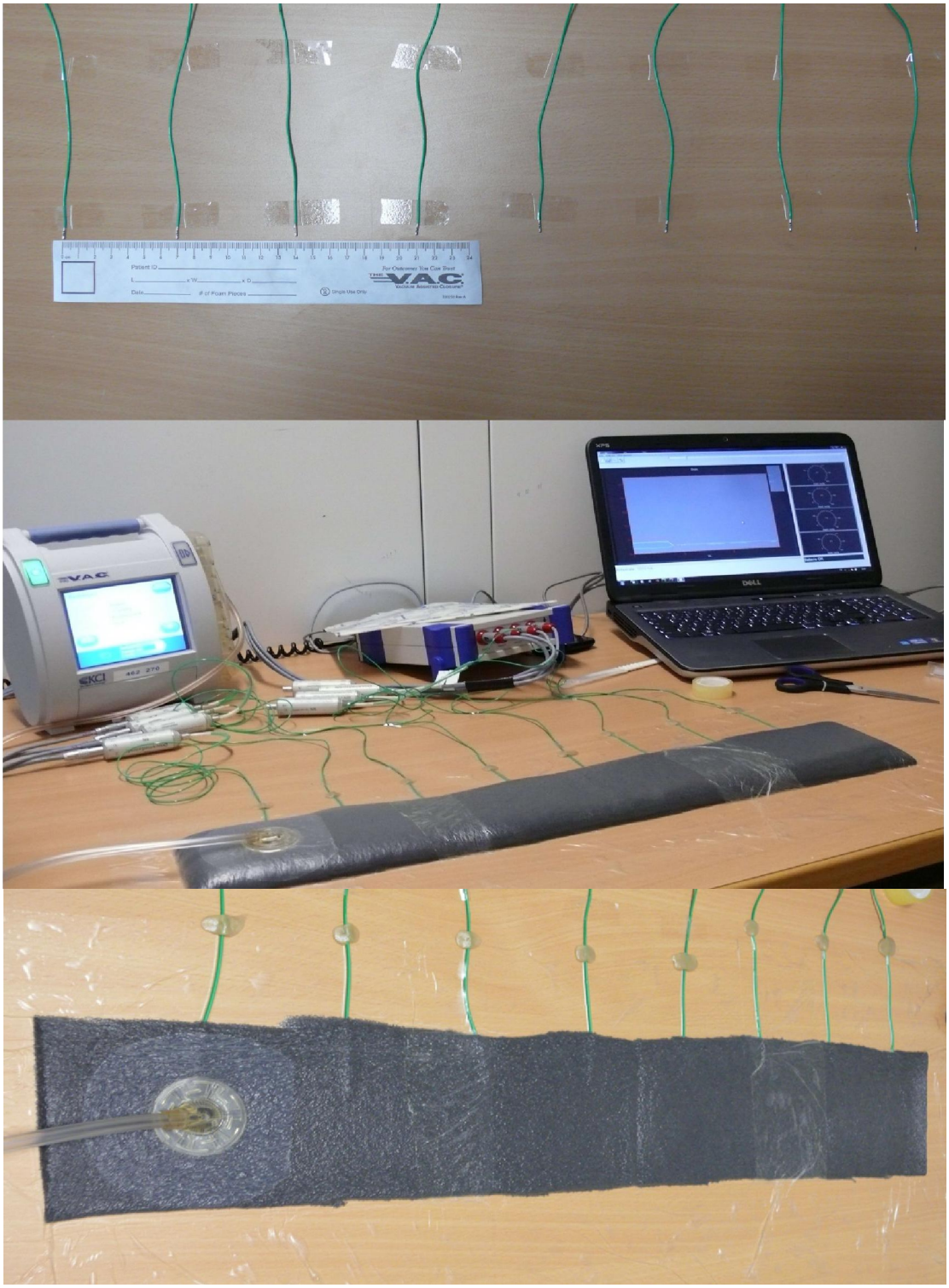

Abbildung 5: Versuch 1
Versuchsaufbau für die Messung über eine längere Strecke.
Von oben nach unten: Platzierung der Messsonden mit 7 cm Abstand und maximaler Entfernung von 49 cm.
Im mittleren Bild der Versuchsaufbau mit aufgelegtem Polyurethanschwamm, dem mittig positioniertem Messverstärker (Argus junior) sowie links die verwendete Vakuumtherapieeinheit.
Im unteren Bild der Aufbau bei angelegtem Unterdruck. Messsonde 1 unter dem trac-pad connector, Messsonde 8 in 49 cm Abstand.

Anschließend wird das Versuchssetting erneut aufgebaut und die jeweiligen Messungen 7-mal wiederholt, so dass eine Gesamtzahl des jeweiligen Versuchs von n=8 erreicht wird.

Der Versuchsaufbau wird jeweils für Gaze und ebenso den Polyvinylalkohol – Schwamm wiederholt. Bei der Gaze wird zusätzlich analysiert, ob sich das Verhalten der Unterdruckweiterleitung verändert, wenn über die Messsonden eine nicht klebende Gaze (Smith&Nephew Wound Management, 22761 Hamburg) als Zwischenschicht gelegt wird, um zu untersuchen ob sich eine Zwischenschicht auf die Unterdrucküübermittlung auswirkt.
Es wird danach noch untersucht, ob sich die Druckverhältnisse ändern wenn man die Gaze durchfeuchtet und in einem späteren Versuch noch zusätzlich komprimiert wird. Es wird vermutet, dass sich die Fasern der Gaze so aufeinander pressen, dass keine Hohlräume zwischen den Fasern bestehen und die Unterdruckweiterleitung gestört ist.

2.5.2 Versuch 2 - Druckverhältnisse im Grenzbereich Wundoberfläche / Schwamm bei komplizierten Wunden:

In einem avitalen Rindermuskel wird mittels Skalpell eine komplizierte Wunde erzeugt. Die Wundränder werden irregulär angelegt und 2 Wundtaschen geschaffen.
In die Wunde werden 4 Messsonden platziert (jeweils 2 am Eingang der Wundtaschen und 2 an deren Rändern s. Abb. 6) und mittels Klebestreifen an der jeweiligen Stelle fixiert. Die Ausrichtung der Messfenster erfolgt in Richtung des Fleischstückes.
Darauffolgend wird das Wundeinlagematerial in der Wunde platziert und der Versuchsaufbau mittels Klebefolie luftdicht versiegelt.
In der Mitte des kreierten Wundbetts wird mit Hilfe eines trac-pad connector der Unterdruck angelegt.

Analog zu Versuch 1 wird zuerst ein Druck von -25 mmHg angelegt und dieser schrittweise auf -200 mmHg erhöht.
Der Versuch wird, nach Neueinlage des Materials, für alle 3 Materialien 8-mal wiederholt.

Nach Beendigung der Versuchsreihe werden die entstandenen Deformationen makroskopisch untersucht.
Als Referenz für den Versuch wurde zusätzlich die Druckverteilung bei einem normalen Wundbett ohne Taschen untersucht. Hierbei wurden ebenfalls 2 Messsonden mittig platziert und 2 weitere an den Wundrändern.

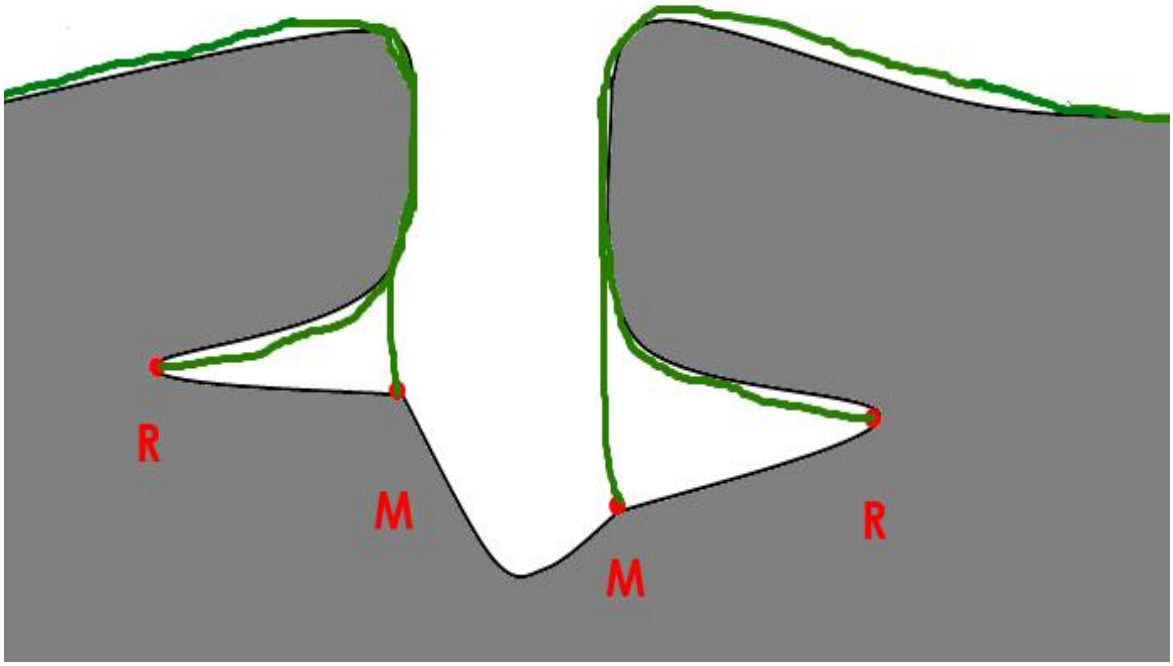

Abbildung 6: Versuch 2
Schematischer Aufbau der Messung in der Nachbildung einer komplexen Wunde mit irregulärem Wundrand und Wundtaschen. Die Wunde wurde in einen avitalen Rindermuskel geschnitten. Die Größe beträgt ca. 5 cm in der Breite, 12 cm in der Länge und 8 cm in der Tiefe. Zu erkennen ist die geschaffene komplizierte Wunde mit den beiden Wundtaschen. Mit „M“ ist die Position der beiden am Eingang der Wundtaschen platzierten Sonden markiert, mit „R“ die beiden der am Rand in der Tiefe der Wundtasche platzierten Sonden.

2.5.3 Versuch 3 - Einfluss der Wundeinlage auf die Evakuierung von Wundsekret:

Um den Einfluss des Wundmaterials auf die Passage von Wundsekret zu überprüfen, wird mittels Skalpell auf einem avitalen Rindermuskel ein Wundbett geschaffen. In dieses Wundbett werden Kanülen, die an einen Perfusor angeschlossen sind, durch das Fleisch eingebracht.
Die Kanülen dienen zur Einleitung von Kochsalzlösung, um die Absaugefähigkeit des Wundfüllers für eine mobilisierte Flüssigkeitsmenge zu untersuchen.
In das Wundbett wird ein PU-Schwamm eingebracht und mittels einer Klebefolie luftdicht versiegelt (s. Abb. 7).
Über einen trac-pad connector wird mittels eine Vakuumtherapieeinheit ein Unterdruck von zunächst -50 mmHg angelegt. Ist der Unterdruck konstant aufgebaut, wird mittels eines Infusomaten innerhalb der vorgegebenen Zeit von 6 min eine Flüssigkeitsmenge von 99,9 ml eingeleitet.
Nach Ablauf der 6 min wird der Schwamm entfernt und das Wundbett auf verbliebene Flüssigkeitsreste untersucht.

Die im Auffangbehälter der Vakuumtherapiepumpe befindliche Flüssigkeitsmenge wird mittels einer Waage gemessen, und mit der in den 6 min eingeleiteten Menge an Kochsalzlösung verglichen.
Bei der Untersuchung wird dann das Unterdruckniveau in Schritten von -25 mmHg bis zum Erreichen des max. Unterdrucks von -200 mmHg erhöht.

Anschließend erfolgt dieselbe Untersuchung für die Gazeeinlage und den Polyvinylalkohol – Schwamm.

Abbildung 7: Versuch 3
Versuchsaufbau zur Evakuierung von Wundsekret.
Links die 14 cm lange Wunde im avitalen Muskel mit eingebrachter Kanüle.
Rechts der komplette Versuchsaufbau mit eingebrachtem Polyurethan – Schwamm und angelegtem Vakuum. Im Hintergrund sind links die Vakuumtherapieeinheit und rechts der verwendete Infusiomat, mit eingestelltem Durchfluss von 99,9 ml, zu erkennen.

2.5.4 Versuch 4 - Bestimmung der Durchflusszeit:

In eine Plastikbox wird ein avitaler Rindermuskel eingebracht.
Innerhalb des Muskels wird eine irreguläre, komplizierte und tiefe Wunde simuliert.
In dieses Wundmodell werden nun 400 ml einer eingefärbten Kochsalzlösung eingebracht.
Am Wundboden wird mittels einer Messsonde, deren Messfenster in Richtung des Fleischstücks gerichtet ist, kontrolliert, welcher Unterdruck am Wundbett angelangt.
Anschließend wird in die Wunde ein Polyurethan - Schwamm eingelegt und die simulierte Wunde mit einer Klebefolie luftdicht versiegelt.
Mit einem trac-pad connector wird danach eine Vakuumtherapieeinheit angeschlossen.

Abbildung 8: Versuch 4
Versuchsaufbau für die Simulation einer komplizierten und tiefen Wunde.
Im Bild die Wundhöhle im avitalen Rindermuskel mit eingebrachter Druckmesssonde.

Zunächst wird ein Druck von -50 mmHg erzeugt und es wird untersucht:

1. ob der Unterdruck ausreicht, um das simulierte Wundsekret vollständig zu evakuieren. Zur Ermittlung des Restvolumens wird die aus der tiefen Wunde evakuierte Menge an Flüssigkeit mit der eingebrachten Menge an Kochsalzlösung verglichen.
2. ob der Unterdruck bei tiefen Wunden vollständig am Wundbett ankommt.
3. welche Zeit benötigt wird, um 100 ml der Kochsalzlösung aus dem Wundmodell zu entfernen. Hierfür wird die Zeit zwischen den Flüssigkeitsständen 100ml und 200 ml während der Evakuierung der Flüssigkeit gemessen.

Anschließend erfolgt die Erhöhung des Unterdrucks in -25mmHg Schritten bis -200 mmHg.

Der Versuch wird dann für die Gaze und den Polyvinylalkohol – Schwamm wiederholt. Zur Vermeidung von Messfehlern wird jeweils der erste Versuch jeder Messreihe verworfen, da die Materialien (mit Ausnahme des schon herstellerseitig angefeuchteten PVA-Schwammes) zunächst einen Teil der Flüssigkeit zurückhalten.

2.5.5 Versuch 5 - Wundmaterialien und V.A.C. Ulta

Mit der V.A.C.Ulta ist es neben der Unterdrucktherapie zusätzlich möglich, die Wunde in bestimmten Intervallen durchspülen zu lassen. Um zu untersuchen, wie die einzelnen Materialien für die Anwendung mit der V.A.C.Ulta geeignet sind, wurde zunächst in 5 Melonenhälften eine ca. 30 cm lange irreguläre Wunde geschaffen. In diese wird der für die V.A.C.Ulta vorgesehene hydrophile PU-Schwamm (V.A.C. VeraFlo Cleanse, KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) eingebracht und anschließend mittels der Füllhilfe manuell die Instillationsmenge bestimmt:
Eine mittels Patentblau V eingefärbte Kochsalzlösung wird, unter visueller Kontrolle, solange in die „Wunde“ bzw. den Schwamm eingeleitet, bis der Schwamm vollständig eingefärbt ist, d.h. die Lösung den Schwamm auf voller Länge durchdringt.

Die mittels Füllhilfe unter visueller Kontrolle eingeleitete Menge an Lösung, dient als Referenz für die weiteren 4 Untersuchungen mit Gaze, PVA, PU und dem V.A.C. VeraFlo-Schwamm.
Durch die Einfärbung kann anschließend visuell überprüft werden, ob die Referenzmenge an eingeleiteter eingefärbter NaCl-Lösung bei gleichem Druck, den Schwamm vollständig durchfeuchtet.

Hierbei wird untersucht, ob die bisherigen Materialien und die Gaze ebenfalls für eine Vakuuminstillationstherapie geeignet sind.

Abbildung 9: Versuch 5
Versuchsaufbau für die Anwendung im Rahmen einer Vakuuminstillationstherapie
Im Bild die 30 cm lange Wunde mit eingelegtem VeraFlo-Schwamm und angelegtem Unterdruck von -100 mmHg

2.6 Bisher veröffentlichte Studienergebnisse zum Vergleich von Wundfüllern im Rahmen der Vakuumtherapie:

Zusätzlich zu der experimentellen in vitro-Studie wurde am 01.03.2014 eine Literaturrecherche zu diesem Thema durchgeführt.
Über das Programmes EndNote X4 wurde in den Datenbank der National Library of Medicine PubMed Medline recherchiert.

Gesucht wurde nach den keywords:

- „negative pressure wound therapy“
- „vacuum assisted wound therapy“
- „gauze“
- „negative pressure wound therapy gauze”
- „vacuum assisted wound therapy gauze”

Die Studien wurden daraufhin gesichtet, ob Gaze mit den gängigen Schwammmaterialien verglichen wurde. Nur vergleichende Untersuchungen an beiden Materialien wurden für diese Arbeit als relevant betrachtet und ausgewählt.

3. Ergebnisse

3.1 Versuch 1 - Messung der Druckverhältnisse über eine längere Strecke

Der Unterdruck breitet sich bei allen 3 Materialien über die volle Länge von 49 cm zum trac-pad connector aus.
Bei niedrigen Druckwerten besteht eine nahezu vollständige Übertragung des angelegen Unterdrucks auch auf die entfernteste Messsonde.
Bei steigendem Druck (größer als -100 mmHg) und mit zunehmender Distanz zum trac-pad connector zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Materialien. Bei der Verwendung der Gaze unterscheiden sich die Messwerte im Vergleich zur trockenen Verwendung, wenn der Wundfüller befeuchtet wir und noch stärker bei zusätzlicher Kompression,.

Die Messwerte weichen beim PU-Schwamm und trockener Gaze in 49 cm Entfernung zur angelegten Vakuumquelle und bei einem Druckniveau im therapeutischen Bereich von über -75 mmHg, nur wenige mmHg vom angelegten Unterdruck ab(PU und Gaze trocken: Abb.10).
So zeigen sich Differenz-Werte von:

- Bei -75 mmHg im Median -2,25 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -4,4 / -0,725 mmHg) beim PU-Schwamm und -2,5 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -4,4 / -0,5 mmHg) bei trockener Gaze
- Bei -100 mmHg im Median -3,9 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -7,8 / -3,9 mmHg) beim PU-Schwamm und 0 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -2 / 0 mmHg) bei trockener Gaze
- Bei -125 mmHg im Median -6,5 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -8,825 / -4,6 mmHg) beim PU-Schwamm und + 0,5 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -1,5/ + 0,5 mmHg) bei trockener Gaze
- Bei -200 mmHg im Median bei PU -6,75 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -9,8 / -4,2 mmHg) und bei trockener Gaze –3 mmHg ($Q_{25\%/75\%:}$ -3,9 / -2 mmHg)

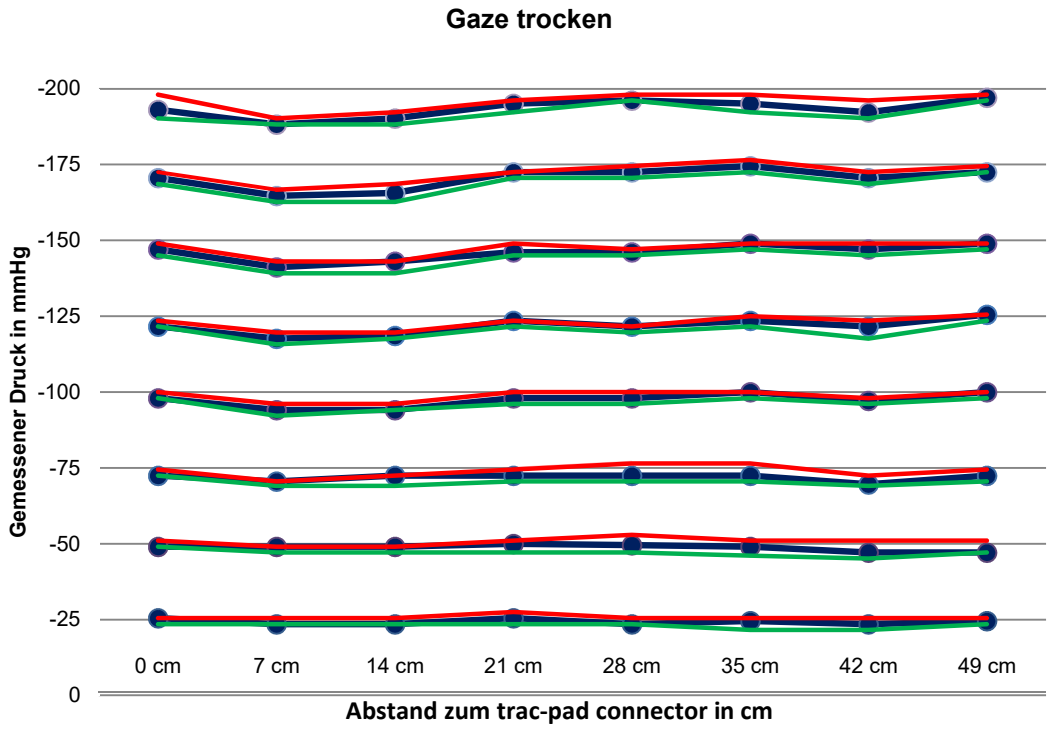

Abbildung 10.1

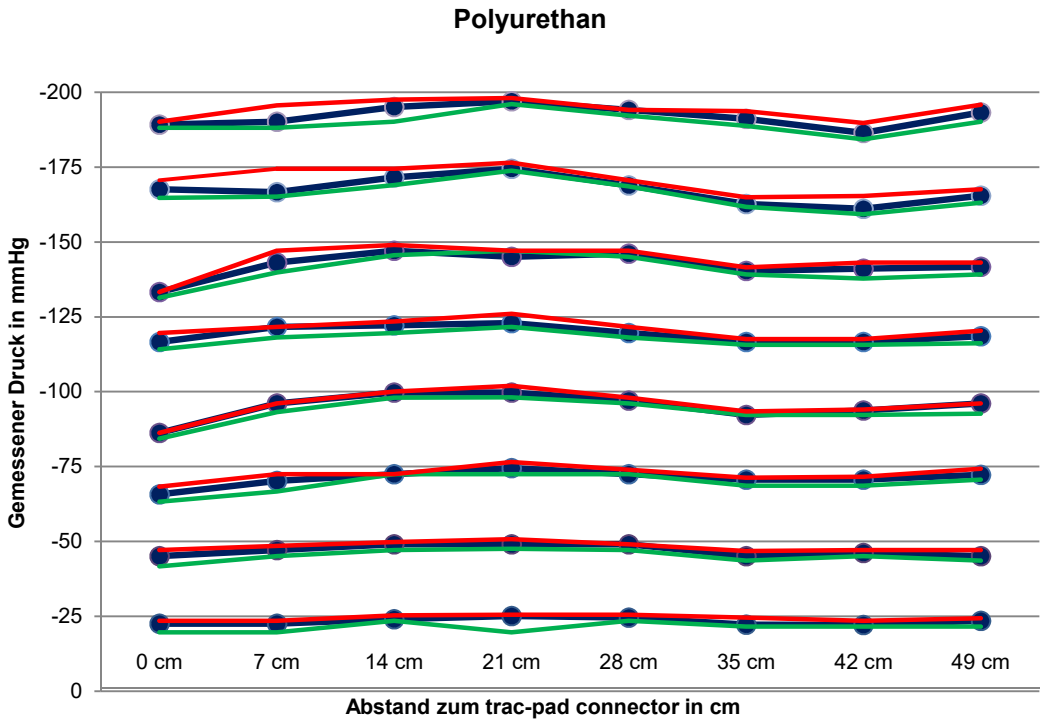

Abbildung 10.2

Abbildung 10.1 + 10.2: Druckveränderung über eine längere Strecke für trockene Gaze (10.1)und Polyurethan – Schwamm (10.2) bei einem angelegten Sog von -25 mmHg bis -200 mmHg
x-Achse: Entfernung der Messsonde von der Unterdruckquelle. y-Achse: gemessener Unterdruck in Millimeter Quecksilbersäule (mmHg).
blau = Median, grün = 25% Quartile, rot = 75% Quartile (n = 8 Messungen)

Beim PVA-Schwamm und bei Veränderung der Gaze-Einlage (anfeuchten; anfeuchten + komprimieren) zeigen sich deutliche Änderungen im gemessenen Unterdruck, vor allem bei einer Distanz > 7cm vom trac-pad connector.

So zeigte sich in maximaler Entfernung von der Sogquelle beim PVA-Schwamm und einem Unterdruck > -100 mmHg nur ein sehr geringes Ansteigen der Messwerte im Vergleich zu den Messwerten von unter -100 mmHg (s. Abb.11).

Im Median bei 49 cm:

- bei -100 mmHg einen Messwert von - 98,0 mmHg
- bei -125 mmHg einen Messwert von -105,9 mmHg
- bei -150 mmHg einen Messwert von - 108,8 mmHg
- bei -200 mmHg einen Messwert von - 114,7 mmHg

Somit sinkt der übertragene Druck bei – 200 mmHg um 85,3 mmHg, also um mehr als 40 %.

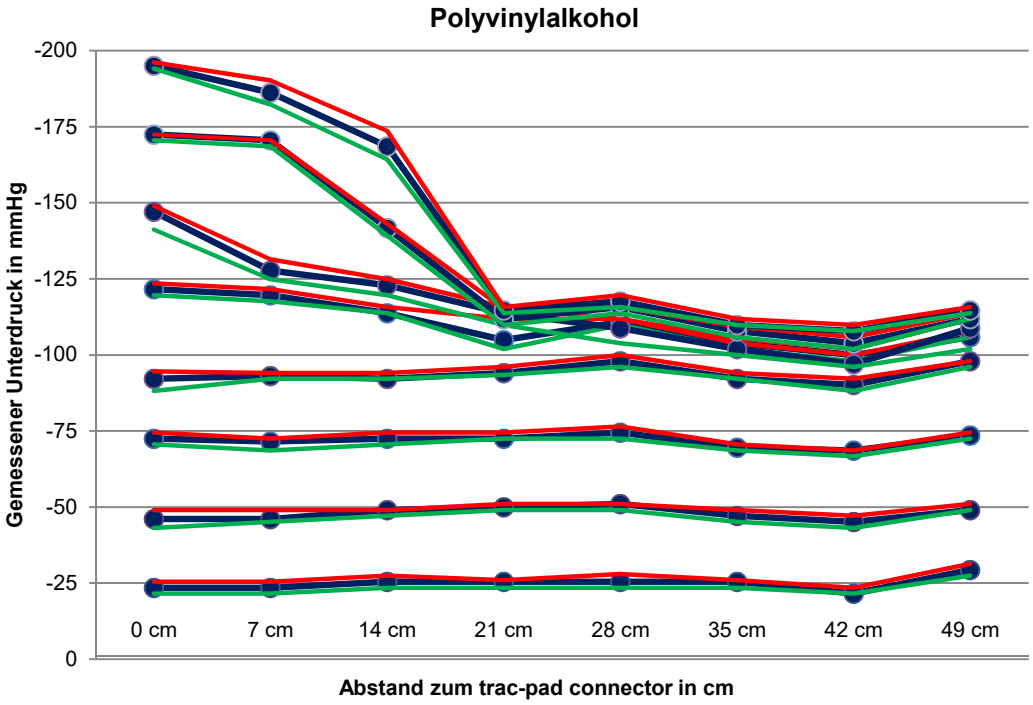

Abbildung 11: Druckveränderung über eine längere Strecke für den Polyvinylalkohol – Schwammbei einem angelegten Sog von -25mmHg bis -200 mmHg
x-Achse: Entfernung der Messsonde von der Unterdruckquelle. y-Achse: gemessener Unterdruck in Millimeter Quecksilbersäule (mmHg).
blau = Median, grün = 25% Quartile, rot = 75% Quartile (n = 8 Messungen)

Feuchtet man die Gazeeinlage an (Abb. 12), so kommt es zu einem leichten Abfall der Druckübertragung am letzten Messpunkt, im Median von

- 14,7 mmHg bei -50 mmHg;
- 14,2 mmHg bei -75 mmHg
- 17,6 mmHg bei -100 mmHg
- 21,1 mmHg bei -125 mmHg
- 16,6 mmHg bei -150 mmHg
- 21,6 mmHg bei -200 mmHg

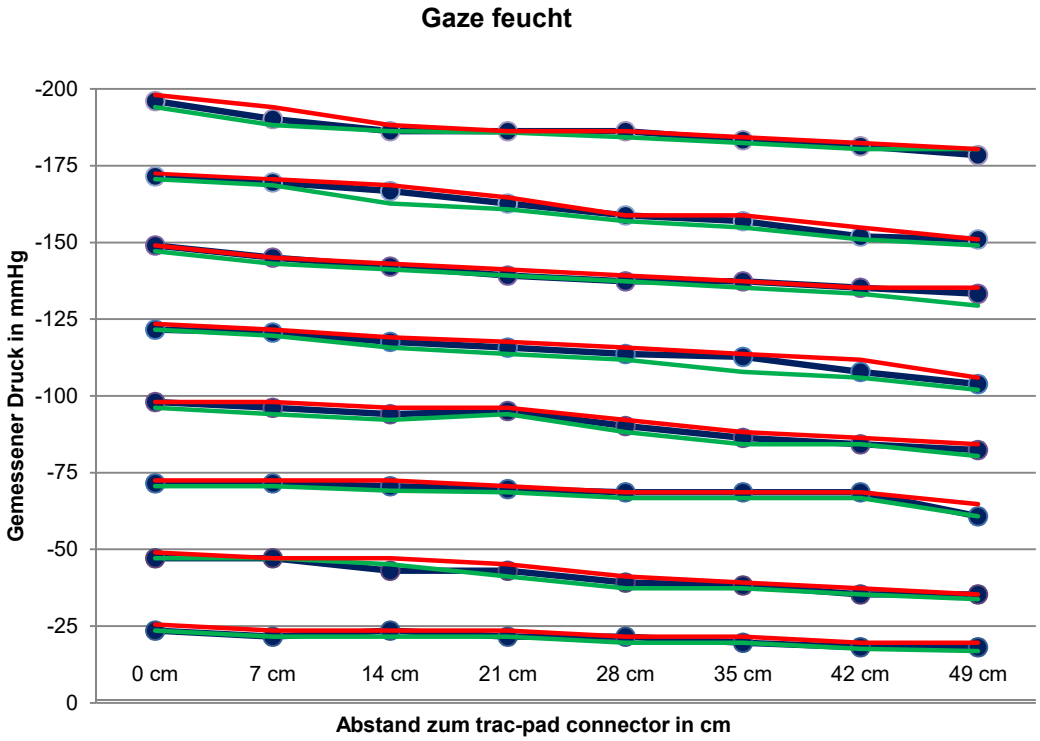

Abbildung 12: Druckveränderung über eine längere Strecke für feuchte Gaze bei einem angelegten Sog von -25mmHg bis -200 mmHg.
x-Achse: Entfernung der Messsonde von der Unterdruckquelle. y-Achse: gemessener Unterdruck in Millimeter Quecksilbersäule (mmHg).
blau = Median, grün = 25% Quartile, rot = 75% Quartile (n = 8 Messungen)

Gravierender wird die Druckminderung, wenn man die angefeuchtete Gaze noch realitätsnah zusätzlich komprimiert. Bei einem angelegten Unterdruck von -100 mmHg kommt es in 49 cm Entfernung bereits zu einer Druckminderung von 33,3 mmHg (33,3%), und bei -200 mmHg um 95,1 mmHg, was einer Druckminderung von annähernd 50% entspricht! Bereits bei 21 cm Entfernung sinkt der ankommende Unterdruck um 73,5 mmHg, also um rund 36% (s. Abb. 12).

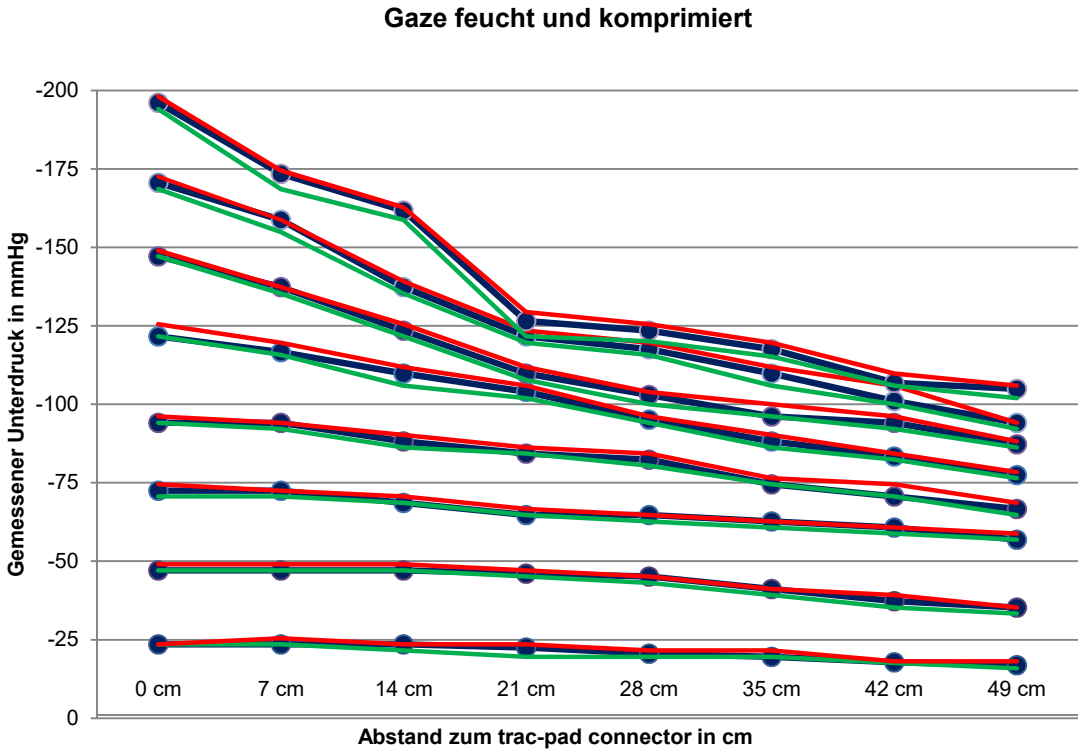

Abbildung 13: Druckveränderung über eine längere Strecke für feuchte Gaze bei einem angelegten Sog von -25 mmHg bis -200 mmHg.
x-Achse: Entfernung der Messsonde von der Unterdruckquelle. y-Achse: gemessener Unterdruck in Millimeter Quecksilbersäule (mmHg).

3.2 Versuch 2 - Druckverhältnisse im Grenzbereich Wundoberfläche / Schwamm bei komplizierten Wunden – ein in vitro Experiment

Es sollte die Qualität der Druckübertagung an die Wundoberfläche untersucht werden.

Bei allen drei Wundeinlagen (PU, PVA und Gaze) kam es, bei Erhöhung des angelegten Unterdrucks in der einfach geformten Standard-Wunde, proportional zu einer Erhöhung des gemessenen Drucks an der Wundoberfläche.

Zwischen den Materialien und der Lage der Sonde (mittig oder im Randbereich) gab es bei dieser „einfachen“ Wunde im Median kaum Unterschiede im Verlauf des Druckbereiches von -25 mmHg bis -200 mmHg (s. Abb. 14):

- Gaze (trocken): Druckanstieg am Rand von -7,8 auf 6,85 mmHg und mittig von -9,8 auf 7,8 mmHg
- PU: Druckanstieg am Rand von -13,7 auf 9,8 mmHg und mittig von -11,8 auf 9,8 mmHg
- PVA: Druckanstieg am Rand und mittig von -7,8 auf 9,8 mmHg

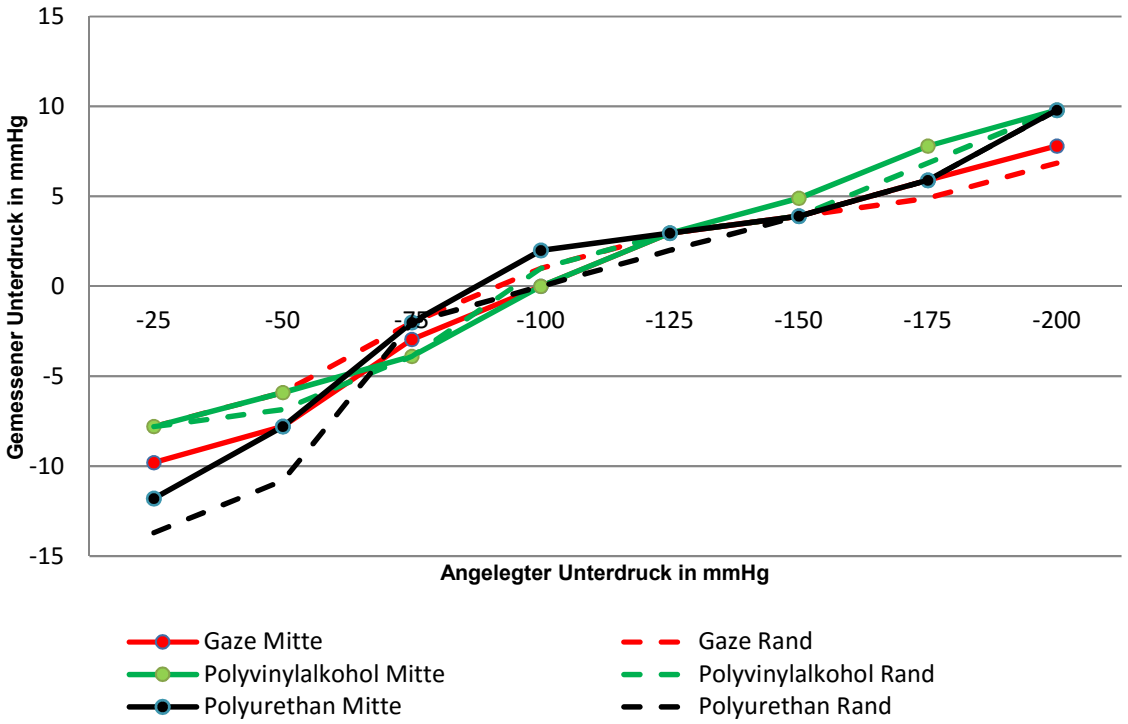

Abbildung 14: Druckentwicklung (y-Achse) in der Standardwunde bei steigendem Unterdruckniveau (x-Achse) für Gaze (rot), Polyvinylalkohol (grün) und Polyurethan (schwarz). Durchgezogene Linien für die Werte der mittleren Messsonde, gestrichelt die Werte der am Rand platzierten Sonde

Der gemessene Gewebedruck verändert sich bei allen drei Materialien nur geringfügig bei der Messung in der „komplizierten“ Wunde (s. Abb. 15):

- Gaze: Druckanstieg im Randbereich von -8,8 mmHg auf 8,8 mmHg, in der Mitte von -8,8 auf 9,8 mmHg
- PU: Druckanstieg im Randbereich von -11,8 auf 10,8 mmHg, in der Mitte von -11,8 auf 11,8 mmHg
- PVA: Druckanstieg im Randbereich von -13,7 auf 7,8 mmHg, in der Mitte von -11,8 auf 9,8 mmHg

Hier zeigten sich bei allen Materialien in der komplizierten Wunde also lediglich Druckunterschiede von ca. +/- 2 mmHg

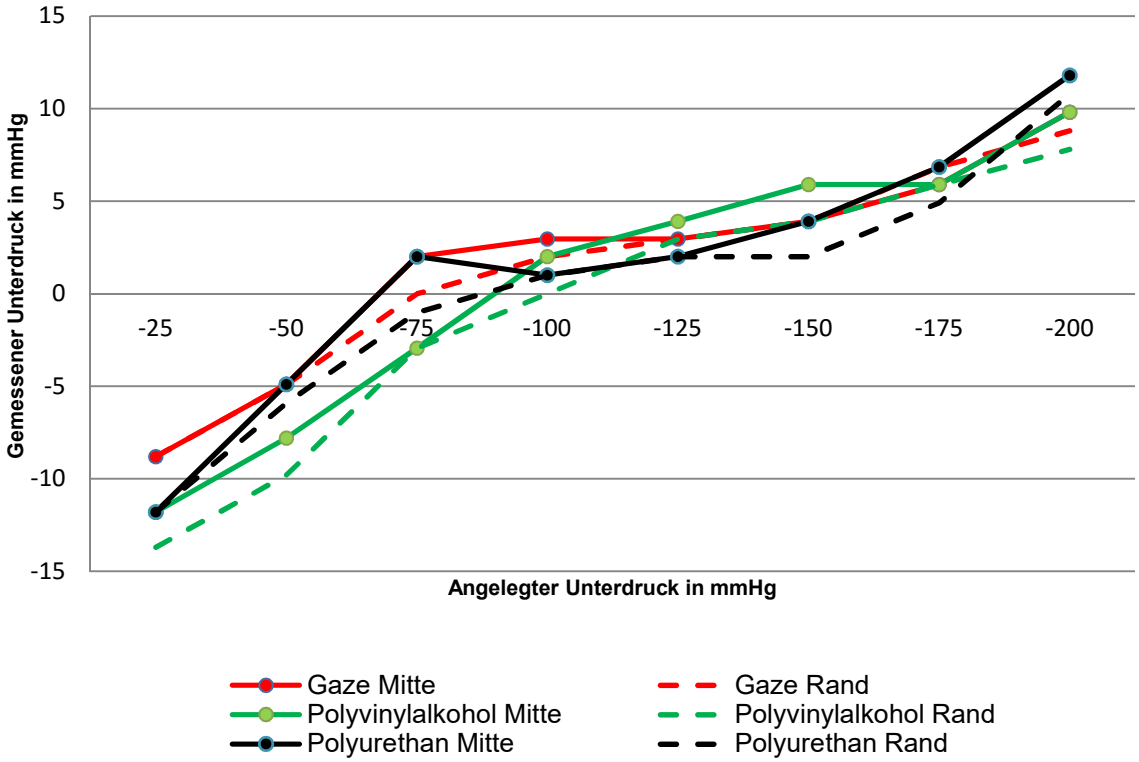

Abbildung 15: Druckentwicklung (y-Achse) in der komplizierten Wunde bei steigendem Unterdruckniveau (x-Achse) für Gaze (rot), Polyvinylalkohol (grün) und Polyurethan (schwarz). Durchgezogene Linien für die Werte der mittleren Messsonde, gestrichelt die Werte der am Rand platzierten Sonde

Ein deutlicher Unterschied zur Standardwunde zeigt sich in der komplexer geformten Wunde beim Anfeuchten des Gazematerials.

Hier fällt der Druck an der Wundoberfläche über das gesamte Inkrement deutlich ab. Im Randbereich kommt es lediglich zu einem Anstieg von -5,9 mmHg auf 5,9 mmHg, also auf ca. 52% des Wertes ohne Feuchtigkeit.

Auch in der Mitte fällt der gemessene Gewebedruck. Es kommt zu einem Druckanstieg bei der Steigerung des angelegten Sogs von -7,8 auf 3,9 mmHg. Vor allem bei der max. Sogleistung von - 200 mmHg zeigt sich hier ein deutlicher Druckabfall von über 60% im Vergleich zur nicht angefeuchteten Gaze (s. Abb. 16).

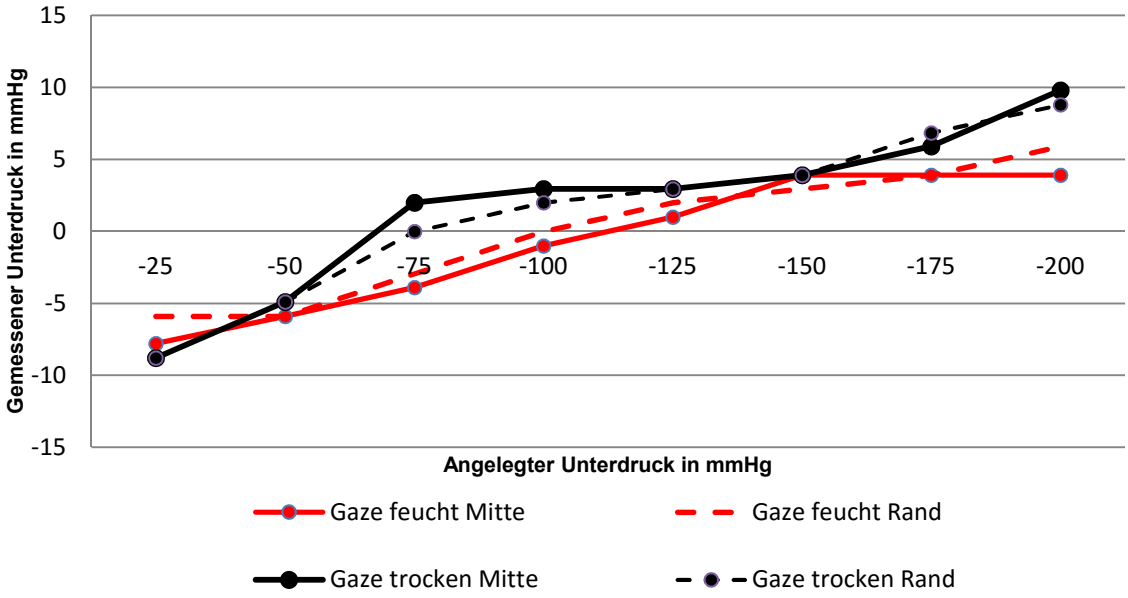

Abbildung 16: Druckentwicklung (y-Achse) in der komplizierten Wunde bei steigendem Unterdruckniveau (x-Achse) für feuchte Gaze (rot) und als Referenz trockene Gaze (schwarz). Durchgezogene Linien für die Werte der mittleren Messsonde, gestrichelt die Werte der am Rand platzierten Sonde

3.3 Versuch 3 - Einfluss der Wundeinlage auf die Evakuierung von Wundsekret:

Es zeigt sich bei der Evakuierung von Wundsekret kein signifikanter Unterschied bei den unterschiedlichen Materialien.

Sowohl bei den beiden Schwammmaterialien als auch bei der Gaze-Einlage konnte selbst beim niedrigsten Unterdruckniveau von – 25 mmHg die innerhalb der 6 min eingeleitete Flüssigkeit vollständig abgesaugt werden.

Bei allen Materialien kam es zu Messergebnissen zwischen 98 ml und 101 ml, also zu Abweichungen von lediglich 2% (s. Tab. 2).

Tabelle 2:
Menge an evakuierter Flüssigkeit in ml. Für alle 3 Materialien und alle Druckniveaus wird jeweils der Mittelwert aus n= 8 Messungen angegeben.

angelegter Unterdruck in mmHg	Abgesaugte Flüssigkeit (in ml)		
	Polyvinylalkohol	Polyurethan	Gaze
-25	99,6	99,6	99,3
-50	99,8	99,3	99,8
-75	99,6	99,6	99,5
-100	99,6	99,3	99,5
-125	100	99,6	99,7
-150	99,7	99,8	99,6
-175	99,3	99,75	99,8
-200	99,7	99,2	100

3.4 Versuch 4 - Bestimmung der Durchflusszeit und Druck in einer tiefen Wunde:

Es sollte untersucht werden wie sich die Druckverhältnisse in einer sehr tiefen Wunde am Wundboden verhalten und wie lange die Pumpen zur Evakuierung einer bestimmten Flüssigkeitsmenge (100 ml) benötigen.

Der in der Tiefe gemessene Druck unterscheidet sich bei den unterschiedlichen Einlagematerialien nur geringfügig voneinander.

Parallel zum Anstieg des angelegten Unterdrucks, steigt auch der gemessene Druck in der Tiefe. Hierbei verhält sich der Anstieg bei Gaze ähnlich wie bei dem PVA – Schwamm. Bei -50 mmHg ist der gemessene Druck bei beiden Materialien bei 11,8 mmHg, steigt bis zum Maximalwert von -200 mmHg bei der PVA auf 18,6 mmHg, bei der Gaze – Einlage um lediglich 1 mmHg weniger auf 17,6 mmHg (s. Abb. 17).

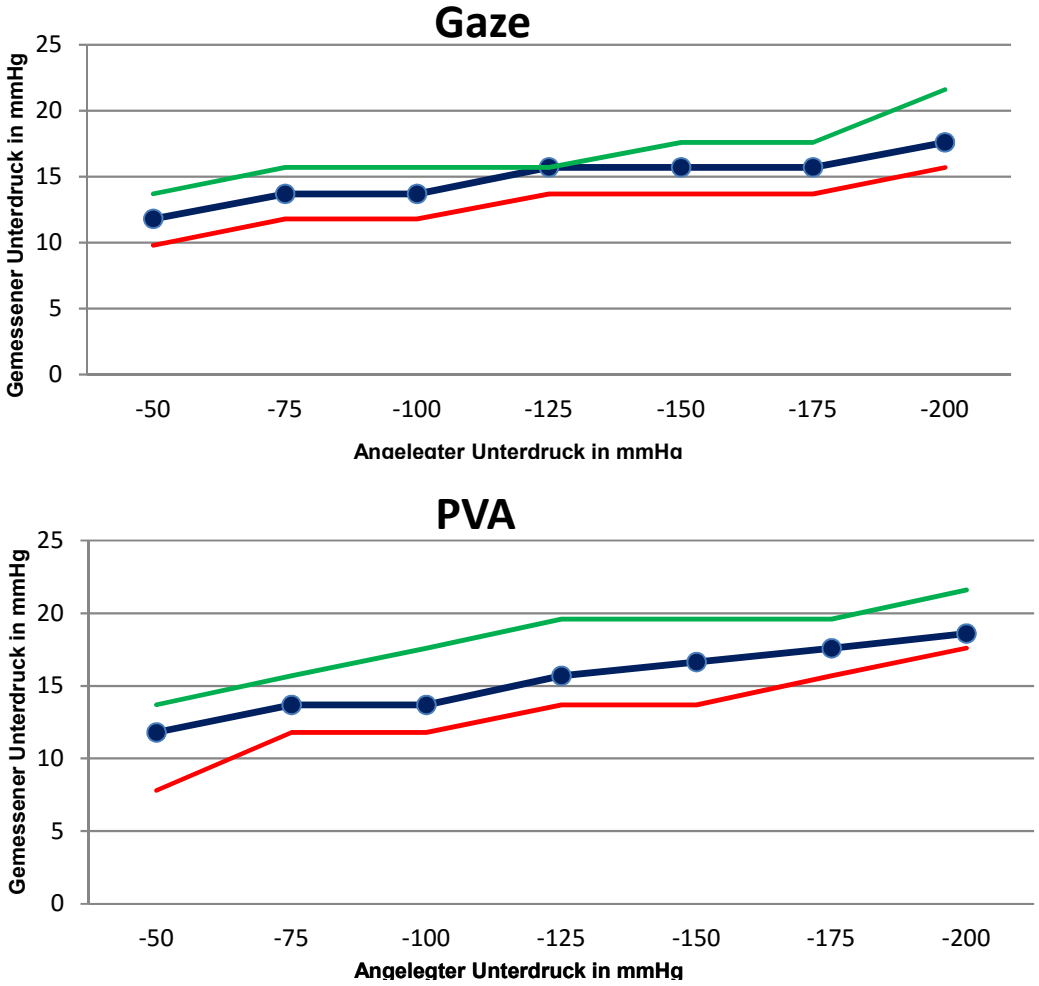

Abbildung 17: Druckveränderung in der Tiefe am avitalen Rindermuskel für Polyvinylalkohol und Gaze. blau = Median, grün = 25% Quartile, rot = 75% Quartile (n = 8 Messungen)

Auch beim Polyurethan – Schwamm kommt es nur zu geringen Unterschieden. Bei gemessenem Druck von -50 mmHg ist der ankommende Druck geringfügig schwächer bei 7,8 mmHg, steigt dafür aber beim Unterdruckmaximum von -200 mmHg auf 21,6 mmHg an (s. Abb. 18).

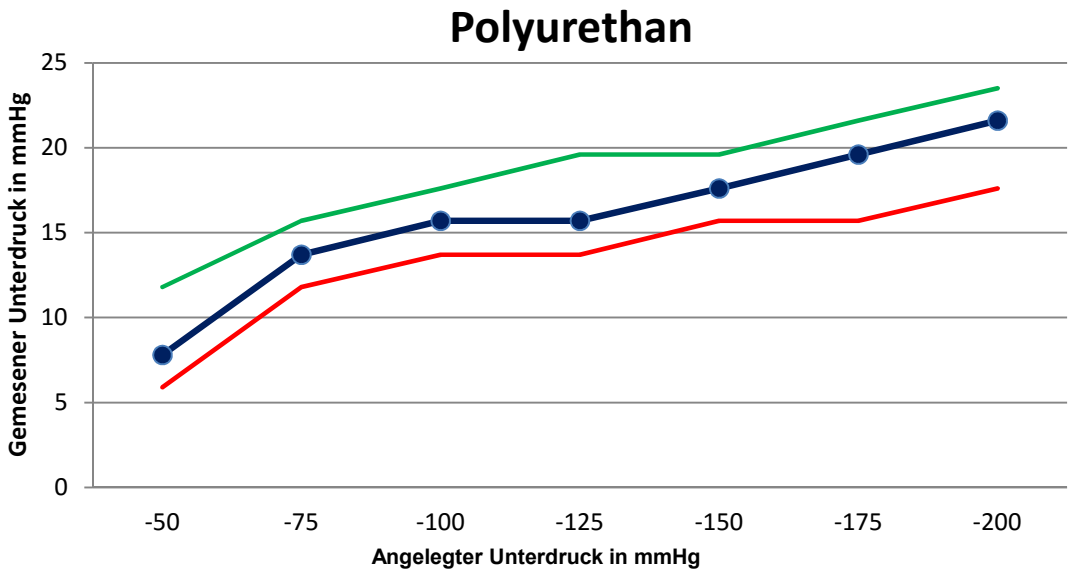

Abbildung 18: Druckveränderung in der Tiefe am avitalen Rindermuskel für Polyurethan.
blau = Median, grün = 25% Quartile, rot = 75% Quartile (n = 8 Messungen)

Bei der Beobachtung der in der präparierten Kavität zurückbleibenden Restmenge an Flüssigkeit gibt es in niedrigen Unterdruckbereichen keine nennenswerten Unterschiede zwischen Schwammeinlagen und Gaze.

Ab einem angelegten Sog von -150 mmHg zeigte sich, dass bei der Gaze als Wundfüller eine deutlich größere Flüssigkeitsmenge in der Wunde und dem Wundfüller zurück bleibt.

Bei maximalem Unterdruck von -200 mmHg verblieb bei den beiden Schwammmaterialien im Median ein Rest von 21 (PVA) bzw. 19 (PU) ml,

bei der Gazeeinlage jedoch im Median ein Rest von 26,5 ml ein Plus von 26 bzw. 39 % (s. Abb. 19).

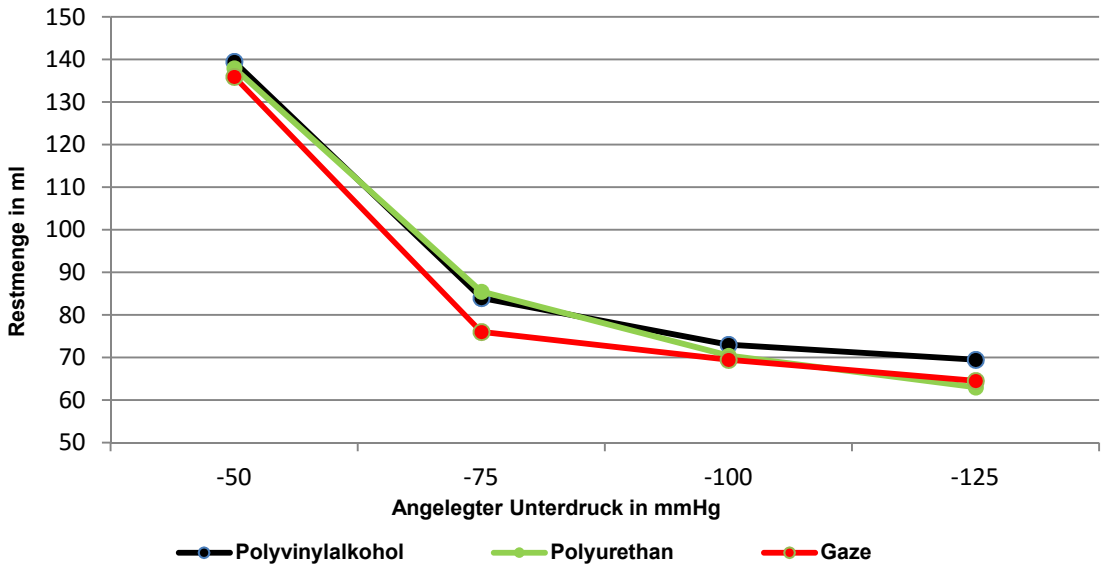

Abbildung 19: Verbleibende Restmenge der Flüssigkeit in der tiefen Wunde am avitalen Rindermuskel nach Abschluss der Evakuierung im Therapiebereich (-50 bis -125 mmHg) für Gaze (rot), Polyvinylalkohol (grün) und Polyurethan (schwarz)

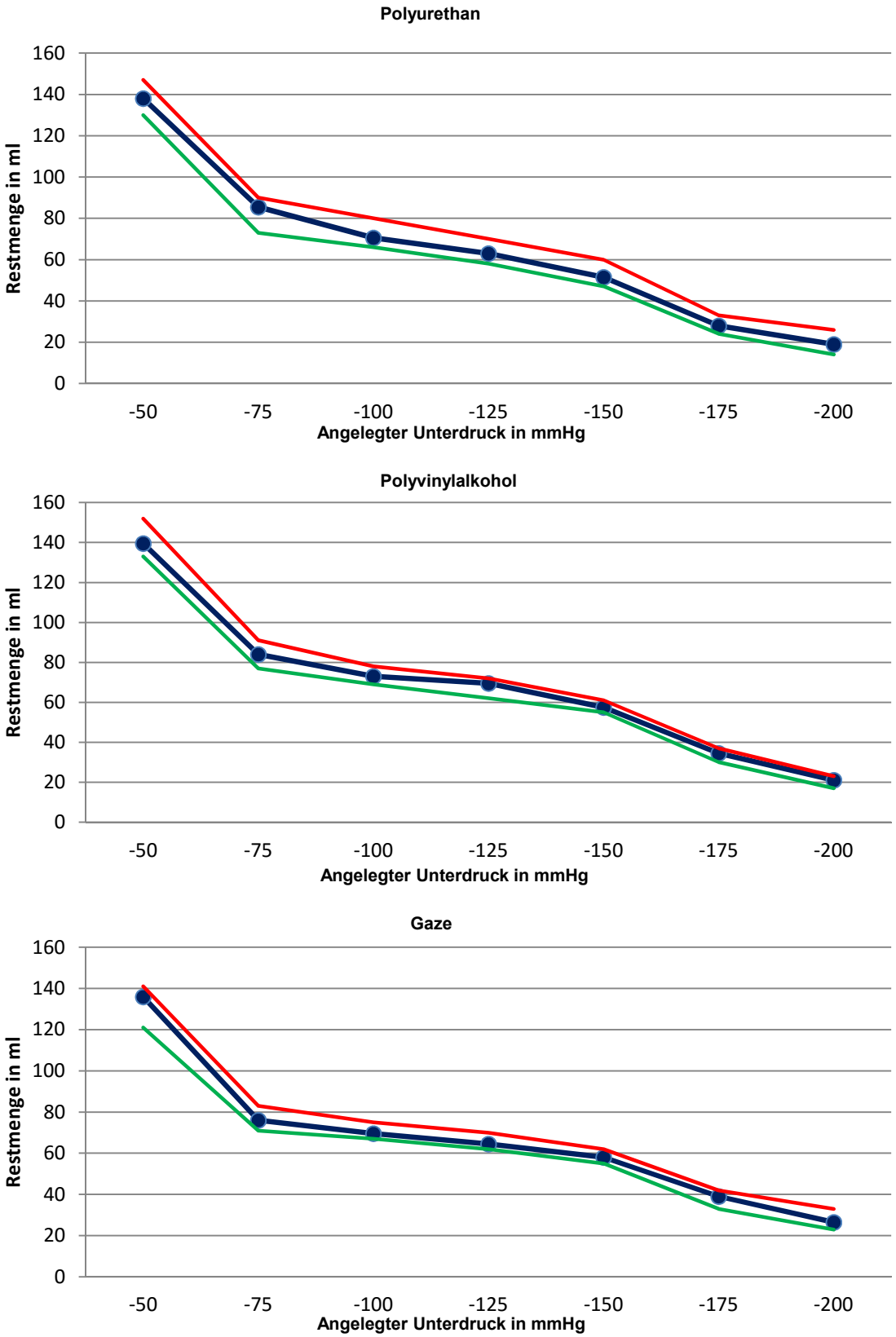

Abbildung 20: Verbleibende Restmenge der Flüssigkeit in der tiefen Wunde am avitalen Rindermuskel nach Abschluss der Evakuierung im gesamten gemessenen Intervall für Polyurethan, Polyvinylalkohol und Gaze. blau = Median, grün = 25% Quartile, rot = 75% Quartile (n = 8 Messungen)

Die Dauer der Evakuierung von 100 ml Flüssigkeit unterscheidet sich bei den drei untersuchten Materialien nahezu nicht. Nur beim anfänglichen Unterdruckniveau von -50 mmHg sind Unterschiede zu erkennen. Die 100 ml-Flüssigkeit werden im PU – Schwamm hier innerhalb von 37 s evakuiert, bei der Gaze in 45 s und bei dem PVA-Schwamm in 47 s. Mit steigendem Unterdruckniveau gleichen sich die Differenzen aber immer weiter an, von einer Evakuierungsdauer von anfänglich 37 – 47 s bei -25mmHg für 100 ml auf max. 10 s bei -200 mmHg (PVA; Gaze und PU). Das Maximum erreichen alle Einlagen bei einem Unterdruckniveau von -150 mmHg. Ein weiterer Anstieg des Unterdrucks führt zu keiner weiteren Beschleunigung der Absauggeschwindigkeit (s. Abb. 21).

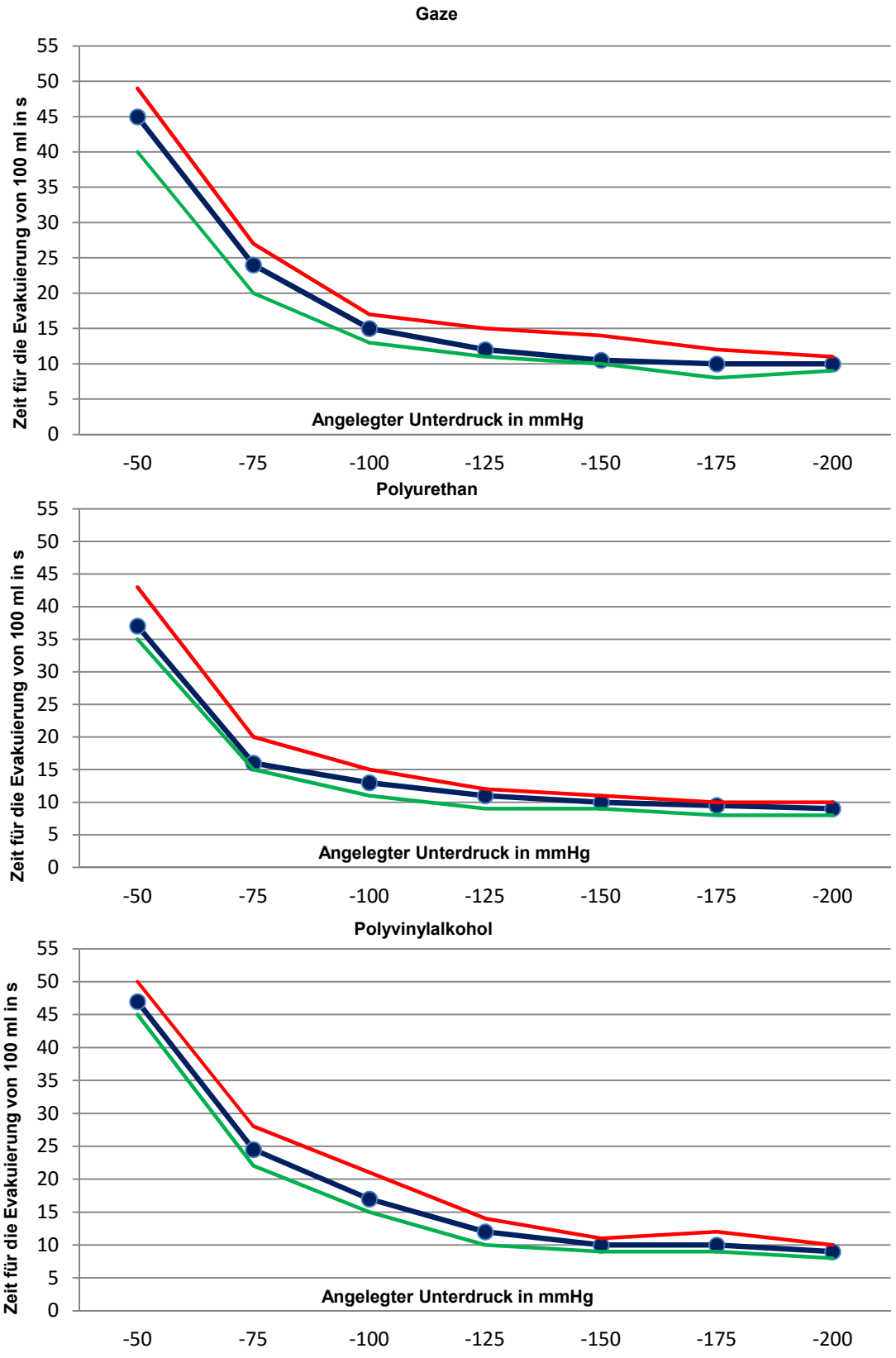

Abbildung 21: Zeitdauer für die Evakuierung von 100 ml Flüssigkeit in der tiefen Wunde am avitalen Rindermuskel für Polyurethan, Polyvinylalkohol und Gaze.
blau = Median, grün = 25% Quartile, rot = 75% Quartile (n = 8 Messungen)

3.5. Versuch 5 - Wundmaterialien und V.A.C. Ulta

Wie in den Abbildungen 22 sichtbar, bestehen deutliche Unterschiede in der Anwendbarkeit der Materialien für die Instill®-Therapie.

Bei den beiden für die Anwendung mit der modernen Vakuumtherapieeinheit (V.A.C. Ulta, KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) empfohlenen Schwämmen (hydrophile PU-Schwämme, White Foam und VeraFlo, KCI Medizinprodukte GmbH, 65203 Wiesbaden) wird das komplette Material über die vollständige Länge der komplizierten Wunde von 30 cm mit der Instillationsflüssigkeit durchtränkt. Auch bei dem PU-Schwamm kommt es zu einer vollständigen Färbung und damit Durchtränkung des Schwammes mit der eingeleiteten Flüssigkeit. Anders verhält es sich bei dem PVA-Schwamm und der Gaze. Fehlen beim PVA-Schwamm nur ca. 2 cm zur vollständigen Durchtränkung sind es bei der Gaze etwa 5 cm. Zusätzlich findet sich bei der Gaze noch ein Bereich von ca. 4-5 cm in dem das Material nur schwach von der Flüssigkeit durchtränkt wurde, erkennbar an der eher hellblauen Färbung der Einlage (s. Abb. 20.1).

Abbildung 22: Gaze (Bild 1), Polyvinylalkohol (Bild 2), VeraFlo-Schwamm (Bild 3) und Polyurethanschwamm (Bild 4) nach der Anwendung in der Instill ® -Therapie. Nach Aufbau des Unterdrucks, wurde eine blau eingefärbte Flüssigkeit eingeleitet und untersucht, wie weit diese die Materialien durchtränkt. In den Abbildungen ist deutlich die unvollständige Durchtränkung der Gaze (Bild 1) und des Polyvinylalkohols (Bild 2) zu erkennen.

3.6 Literaturanalyse

Das keyword „negative pressure wound therapy“ (title) ergab 625 Treffer, mit dem keyword „vacuum assisted wound therapy“ (title) erzielt man lediglich 67 Treffer innerhalb der Datenbank.
Das keyword „gauze“ (title) erzielt 687 Treffer.

Kombiniert man die Suchbegriffe miteinander und verwendet das keyword „negative pressure wound therapy gauze“ (title), reduziert sich die Anzahl der Treffer auf 27 Veröffentlichungen.
Eine der Studien beschäftigte sich lediglich mit dem Einsatz einer Gazeschicht unterhalb eines Polyurethan – Schwammes und wurde deshalb nicht berücksichtigt.
Zwei weitere Studien stellen nur einen Fallbericht von Wunden dar, die mittels Gazeeinlage versorgt wurden. Es wurde aber kein Vergleich angestellt. Zwei weitere Studien verglichen NPWT unter Gaze mit anderen Wundbehandlungsmethoden, oder stellten keinen Vergleich auf, sodass diese ebenfalls keine Berücksichtigung fanden.

Bei der Suche nach dem keyword „vacuum assisted wound therapy gauze“ reduziert sich die Trefferanzahl drastisch auf lediglich 4 Veröffentlichungen. Von diesen fanden in der Arbeit nur zwei Beachtung, da die anderen beiden Arbeiten nicht von Relevanz sind. Diese vergleichen lediglich die V.A.C. – Therapie mit der Versorgung der Wunde mittels feuchter Mullkompressen, ohne den Einsatz einer Unterdruckquelle.
Nach Durchsicht der Artikel mit den keywords „negative pressure wound therapy“ und „vacuum assisted wound therapy“ kamen für diese Arbeit noch 11 Veröffentlichungen hinzu, die im Zuge eines Vergleichs zwischen unterschiedlichen Wundeinlagen, der Gaze als Alternative zu den beiden bekannten Schwammmaterialien Beachtung schenken, das keyword „gauze“ aber nicht enthalten.

Insgesamt wurden 35 Veröffentlichungen als für diese Arbeit relevant betrachtet (s. Tab. 3).

Tabelle 3: Literaturergebnisse

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2007	McNulty et al. [43] *Wound Repair Regen*	*In vitro* - Untersuchung	*Apotoserate, sowie Migration und Proliferation der Zellen*	Nach 48 Stunden Vakuumtherapie (Gaze oder Polyurethan als Einlage)der Fibroblasten innerhalb der 3D-Fibrinmatrix unter konstanten Druck (-125 mmHg), zeigte sich bei der Gaze eine signifikant höhere Zelltodrate, sowie geringere Migration und Proliferation im Vergleich zu den Zellen die mit Polyurethan oder ohne Einlage und NPWT(negativ pressure wound therapy) behandelt wurden ($p < 0.05$).	Die V.A.C. ® NPWT mit GranuFoam® hat gegenüber Gaze einige Vorteile die vermutlich auf Grund der offenporingen Struktur des Schwamms entstehen.
2008	Campbell et al. [7] *Int Wound J*	n = 30; Mensch retrospektiv, chronische und chirurgische Wunden	Reduktion des Wundareals sowie des Volumens der Wunde	Untersuchung von Patienten, die unter Langzeitbedingungen mit gaze-basierter Vakuumwundtherapie versorgt wurden, ohne Vergleich zu den beiden Schwammmaterialien : Durchschnittliche Reduktion des Wundareals um 68,0% ($p < 0.001$) und des Wundvolumens um 88.0% ($p < 0.001$). Die Rate der Volumenreduktion (15,1% pro Woche) ist mit den veröffentlichen Studienergebnissen zu schaum-basierter Vakuumwundtherapie vergleichbar	NPWT(negativ pressure wound therapy) mit Gaze-basiertem Wundfüllungsmaterial ist dazu geeignet, über eine ausreichende Zeit das Volumen einer Wunde zu verringern
2008	Derrick et al. [11] *Int Wound J*	n=32; microarrays aus Ratten; 3cm Wunde dorsolateral	Genexpression	Vergleich zwischen 2-tägiger Behandlung mittels V.A.C. (vacuum-assisted closure; -125mmHg), MWH (moist wound healing) und GUS (gauze under suction; -75mmHg). V.A.C. zeigt eine 1,6 fach erhöhte Genexpression (5072) gegenüber MHW (3952) und GUS (3601).	Es zeigte sich bei der V.A.C. Behandlung eine Erhöhung der Genexpression. Angiogenese, cytoskeletale Regulation und Inflammation sind assoziiert mit erhöhter Gen-Expression
2009	Borgquist et al. [4] Wounds	n=8; Schwein experimentelle Studie	Effekte der NPWT auf das Wundbett und Kraftaufwand zur Entfernung der Einlage	Die Kraft zur Entfernung des Schwamms war deutlich höher als die Kraft zur Entfernung der Gaze. Dies beruht auf dem Einwachsen des Gewebes in den Schwamm nicht in die Gaze. Unter dem Schwamm gab es eine größere Leukozyteninfiltration, Unterbrechung des Zell-Zell-Kontakt und Unterschiede in den Zellgrößen.	Bei der Entfernung der Schwammeinlage sind größere Kräfte vonnöten, da Gewebe in den Schwamm einwächst. Durch den Abriss des Gewebes beim Wechsel erfahren viele Patienten Schmerzen.
2009	Chadwik et al.[8] *Br J Nurs*	Case - report	Kosten der NPWT Vergleich zu konventioneller Behandlung	Review der NPWT (negativ pressure wound therapy) bei der Behandlung von Ulzerationen bei Diabetikern, den entstehenden Kosten sowie die niedrige Erfolgsrate bei konventioneller Behandlung. Es findet eine Diskussion statt, ob eine Gaze- oder Schaumeinlage verwendet werden soll.	Keine Versorgung ist ein Allheilmittel, aber die NPWT ist eine kraftvolle Ergänzung für die Wundversorgung. Ob Gaze oder Schwamm sollte je nach Patient und Wundbeschaffenheit entschieden werden

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2009	Chariker et al.[9] *Plast Reconstr Surg*	n = 24; Mensch retrospektive Studie an pädiatrischen Extremitätenverletzungen	Dauer bis zur Bildung von Granulations-gewebe und Wundverschluss	Alle Patienten wurden mit Gaze basiertem NPWT(negativ pressure wound therapy), unter Verwendung der Chariker - Jeter Technik behandelt. Anschließend wurden die Wunden primär oder sekundär geschlossen. In allen Wunden wurde nach 4 Tagen Granulationsgewebe festgestellt, die Dauer der NPWT bei primärem Verschluss betrug 10 Tage, bei sekundärem Verschluss 17 Tage. Bei anschließender 24 monatiger Beobachtung wurde keine Komplikationen festgestellt	Die NPWT mit Gaze als Wundeinlange stellt eine hoch effektive Option, für die Behandlung von traumatischen Weichgewebsverletzungen an den Extremitäten von Kindern dar. Der Erfolg der NPWT hängt nicht nur von einer bestimmten Pumpe oder Einlage, sondern vom Können und der Erfahrung des Anwenders ab.
2009	Hu et al.[22] *Zhonghua Shao Shang Za Zhi*	n = 44; Mensch vergleichende Studie akute, subakute und chronische Wunden	Behandlungsdauer; Zustand der Wunde; Bakterienart in der Wunde; Nebenwirkungen; Behandlungskosten	Zufällige Zuordnung der Patienten in Gruppe A (vereinfachte NPWT(negativ pressure wound therapy) mit Gaze und kontinuierlichem Unterdruck) und Gruppe B (konventionelle NPWT mit Schwamm und intermittierendem Unterdruck) und jeweils 24 stündige Anwendung. Keine Unterschiede zwischen Gruppe A und B in Sachen Wundzustand, Behandlungsdauer [A group (29 +/- 12) d, B group (26 +/- 13) d, P > 0.05], Änderung der Bakterienarten, Überlebensrate von Hauttransplantaten [A group (98 +/- 4)%, B group (98 +/- 4)%, P > 0.05] und –lappen [A group 98%, B group 100%, P > 0.05]. Deutlich niedrigere Behandlungskosten A [group A 374 +/- 134 – group B 9825 +/- 4956 yen (P < 0. 01)] sowie vermehrt Nebenwirkungen [group A 33,3% - group B 5,0% (P < 0.05)] bei Gruppe A.	Sowohl Gaze als auch die beiden Schwammmaterialien bei der NPWT können dazu beitragen die Wundheilung zu verbessern. Wobei Gruppe A(Gaze) mehr Nebenwirkungen hat und die Gefahr einer nosokomialen Infektion beinhaltet, aber niedrigere Kosten verursacht.
2009	Jeffrey et al.[26] Eplasty	n = 3; Mensch traumatische Wunden	Wundheilung	Drei Fallbeispiele von traumatischen Extremitätenverletzungen, die mit Hilfe der Gaze-basierten Vakuumtherapie versorgten wurden unter Anwendung des Chariker-Jeter System. Bei allen Verletzungen fand eine Wundheilung vor Hauttransplantation statt.	Gaze hat vor allem bei irregulären Wunden Vorteile gegenüber den Schaummaterialien, weil es sich besser dem Wundbett anpassen lässt, es einfacher in schwierige Wunden einzubringen ist und für Patienten angenehmer und schmerzfreier bei der Entfernung empfunden wird

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2009	Malmsjö et al.[38] Ann Plast Surg	n=7; Schwein experimentelle Studie	mikrovaskulären Blutstrom im Muskelgewebe	NPWT(negativ pressure wound therapy) bei -50 bis -175 mmHg in 25 mmHg Schritten unter Verwendung von Gaze oder Schaumeinlage. Beim Vergleich des mikrovaskulären Blutstromes im Muskelgewebe, subkutan und im Wundbett, 0.5, 1 und 2.5 cm vom Wundrand entfernt mittels Laser-Doppler-Velocimetrie, kam es sowohl bei Gaze als auch bei Schaum zu ähnlichen Ergebnissen; Einer Abnahme des Blutstroms in 0.5 cm Abstand, sowie einer Zunahme in 2.5 cm Abstand.	Sowohl bei Gaze als auch beim Polyurethanschaum sind dieselben Effekte auf den Blutstrom zu beobachten, der die günstige Wirkung (Bspw. Reduktion der Wundfläche / -volumen) der NPWT unterstützt.
2009	Malmsjö et al.[37] Int Wound J	n=7; Schwein experimentelle Studie	Druck im Bereich des Wundbettes; Abstand der Wundränder zueinander	Vergleich zwischen Gaze und Schaumeinlage bei der NPWT(negativ pressure wound therapy, 12-14 Stunden Dauer) mit Drücken zwischen -50 und -175 mmHg (in -25 mmHg-Schritten). Es wurde der Druck am Wundboden mittels eines mit Kochsalzlösung gefüllten Katheters gemessen, sowie der Abstand der Wundränder. Bei beiden Wundeinlagen stieg der Druck linear zum Druck der Vakuumquelle mit leichten Abweichungen. Der Abstand der Wundränder verhält sich bei beiden Einlagen ähnlich, mit starkem Anstieg zwischen 0 und -50mmHg und anschließend nur moderaten Änderungen.	Gaze und Schaum sind ähnlich effektiv beim Erzeugen des Vakuums und bei der mechanischen Kontraktion der Wundränder
2009	McNulty et al.[44] Wound Repair Regen	*In vitro* - Untersuchung	Niveau von: Zytochrome c Oxydase Adenosin-triphosphat / Adenosindiphosphat *TGF-β* PGDF	NPWT-Vergleich (negative pressure wound therapy) zwischen GUS (gauze under suction bei -75 mmHg) und ROCF (reticulated open cell foam dressing bei -125 mmHg) an Fibroblasten innerhalb einer Fibrinmatrix. Bei ROCF war das Niveau an Zytochrome c Oxydase, die Energieladung, und Adenosintriphosphat / Adenosindiphosphat im Vergleich zu GUS erhöht ($p < 0.05$). *TGF-β* und PGDF sind bei ROCF im Vergleich zu statischen Kontrollkulturen (80 und 53%, jeweils; $p < 0.05$) erhöht, jedoch nicht bei der Anwendung von GUS. Diese Wachstumsfaktoren sind für die Wundheilung äußerst wichtig.	Der Effekt den GUS auf die Zellantwort hat entspricht nicht derjenigen von ROCF. Die Erhöhung des Energieniveaus sowie das stärkere Auftreten von *TGF-β* und PGD, sind beim ROCF vermutlich auf das robustere Granulationsgewebe zu zurückzuführen.
2009	Psoinos et al.[52] Pediatr Surg	Case - report	Versorgte Brandwunde	Fallbeispiel einer mit NPWT(negativ pressure wound therapy) mit Gaze versorgten Brandwunde bei einem 8 Monate alten Mädchen. Die Versorgung fand nach der Hauttransplantation statt. Es konnte eine 100% Anhaftung des Transplantats sowie keine bakterielle Kontamination festgestellt werden.	NPWT kann auch bei Kindern angewandt werden. Wunden die einem auf Grund von Wundflüssigkeit und Körperkonturen als schwierig erscheinen sollten von der Anwendung der Therapie nicht abschrecken

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2009	Wilkes et al.[63] J Biomech Eng	Rechnerische Studie	3-Modell der Wundeinlagen	Zum Vergleich der Wundeinlagen wurde ein 3D-Modell erstellt. Dabei zeigte sich, dass bei Schaumeinlagen die Belastung signifikant höher war als mit Gaze-Einlage, bei allen Drücken und allen Größen. Zudem zeigte sich, dass Schaumeinlagen ein höheres Maß an Mikrodeformationen erzeugt als Gaze	ROCF erzeugt in einem höheren Maß Mikrodeformationen als Gaze. Wobei sich bei der Gaze ein irregulläreres Muster darstellt.
2009	Witkowski et al.[67] Int Wound J	n=29; Mensch Nicht vergleichende prospektive Studie	Reduktion der Wundgröße sowie Fortschritt in der Heilung	29 Patienten wurden mittels gaze-basierter NPWT(negativ pressure wound therapy) behandelt, dabei war die maximale Behandlungsdauer auf 17 Tage beschränkt. Innerhalb dieser Zeit heilte keine der Wunden vollständig, jedoch zeigten 22 von 29 Patienten eine Reduzierung der Wundgröße pro Tag und lediglich 2 Patienten zeigten keine positive Reaktion auf die Behandlung.	Es benötigt noch einige gründliche Analysen des neuen Einlagematerials (Gaze) um mögliche Unterschiede zu den bisherigen Materialien zu finden.
2010	Borgquist et al.[5] Ann Plast Surg	n=8; Schwein experimentelle Studie	Wundkontraktion, mechanische Deformation	8 Schweine wurden 72 Stunden unter verschiedenen Drücken (0, -75, -125 mmHg) mit NPWT(negativ pressure wound therapy) behandelt, entweder mit Gaze- oder Schaumeinlage. Die Wundkontraktion unterscheidet sich bei beiden Einlangen nicht im Bereich von -75 und -125 mmHg Unterdruck. Der Grad der mikro- und makroskopischen Deformationen war gleich, egal welche Wundeinlage verwendet wurde.	Die makromechanische Deformation (Annäherung der Wundränder), sowie die mikromechanische (Einziehen von Gewebe in Poren bzw. Abstand zwischen Gewebe) sind bei beiden Materialien vergleichbar.
2010	Hurd et al.[24] Int Wound J	n=152; Mensch prospektive, multi-center, nicht vergleichende klinische Studie	Heilungstendenz, Geruch sowie Schmerzen an der Wunde	Vergleich von 152 Patienten, die mittels Gaze-basierter NPWT(negativ pressure wound therapy) behandelt wurden. Die durchschnittliche Behandlungsdauer betrug 18 Tage, wobei 91% gegen Ende Richtung Heilung ging. Schmerzen und Geruch der Wunden wurden signifikant reduziert ($p < 0.001$). In 80% der Fälle kam es zu keinen Schmerzen, in 96% zu keiner Beschädigung des Wundbettes während der Entfernung der Einlage. In 79% empfand man das Anlegen der Einlage als einfach bei einer durchschnittlichen Dauer von 20 min.	Beim Wechseln der Einlage kommt es nur zu geringen Schmerzen, da beim Wechseln der Einlagen das Granulationsgewebe meist unbeschädigt bleibt. Gaze stellt bei schmerzhaften Wunden daher ein probates Mittel zur Erhöhung des Patientenkomforts dar.

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2010	Malmsjö et al.[41] Int Wound J	n=6; Schwein experimentelle Studie median Sternotomie	Messung des Drucks am Wundboden sowie an beiden Seitenwänden	Bei 6 Schweinen wurde verschiedene Arten von NPWT(negativ pressure wound therapy) verglichen, mit unterschiedlicher Wundeinlage (Gaze oder Schaum), Drainagetechnik (Unperforierte Drainage auf der Einlage; perforierter Drainageschlauch eingelagert) und Drücken (0 bis -175 mmHg).	Gaze und Schaum sind bei der Übertragung des Druckes auf das Wundbett gleich effektiv. Eine eingelegte perforierte Drainage ist bei feuchten Wunden zu bevorzugen, egal welche Art von Einlage verwendet wird.
2011	Anesäter et. al.[1]	n=8 Schwein, experimentelle Studie	Einfluss von Wundmaterial und -größe auf Wundkontraktion und Weichgewebsdruck	Bei 8 Schweinen wurde eine 6 cm (im Durchmesser) große Wunde geschaffen, die entweder mit Gaze oder mit einem PU-Schwamm in 2 unterschiedliche Größen gefüllt (5 oder 7 cm Polyurethan-Schwamm, 2 oder 3 Gaze-Schwämme) wurde. Diese wurde mittels NPWT (-20 - -160 mmHg) versorgt und der Druck im Abstand von 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0cm vom Wundrand gemessen. Währen der Druck 0,1 cm entfernt sank, stieg er in 0,5 cm Abstand, im Abstand von 1,0 bzw. 2,0 cm hatte der Unterdruck keinen Einfluss. Beim PU-Schwamm kam es bei der kleineren Größe in 0,5 cm sowohl zu einem größeren Gewebsdruck, als auch zu einer größeren Wundkontraktion im Vergleich zur großen Größe. Bei der Gaze kam es zu keiner signifikanten Änderung von Kontraktion oder Druckverhältnissen.	Bei der Vakuumtherapie kommt es zur Wundkontraktion sowie zu Veränderungen im Gewebedruck, die die Heilung positiv beeinflussen und beschleunigen können. Kleine Schwammeinlagen können verwendet werden, wenn maximaler mechanische Stress, bzw. Bildung von Granulationsgewebe gewünscht wird, wohingegen ein großer Schwamm zu geringerer Wundkontraktion und somit zu geringeren Schmerzen führt.
2011	Dunn et al.[14] Int J Surg	n=131; Mensch Nicht vergleichende prospektive Studie	Wundgröße, -tiefe, -volumen und -exsudat	131 Patienten wurden mittels gaze-basierten NPWT(negativ pressure wound therapy) behandelt und die Wunden untersucht. Die prozentuale Reduzierung der Wundgröße, -tiefe und –volumen betrug 8.3%,15.8% und 20.5%($p<0.001$). Es kam zu einer Reduzierung des Wundexsudats ($p<0.001$), zu einer Erhöhung von Granulationsgewebe($p=0.007$) und einer Reduktion von totem Bindegewebe ($p<0.001$)	Gaze-basierte NPWT kann zu viele Behandlungsziele, die zu Beginn der Therapie erreicht werden sollen führen. Diese beinhalten die Reduktion des Wundvolumens, Management des Exsudat und der Infektion und der Verbesserung des Wundbettes.
2011	Dunn et al.[15] Eplasty	n=42; Mensch Nicht vergleichende prospektive Studie	Verbesserung der Wundbedingungen vor Hauttransplantation, sowie Erfolgsrate nach Hautt.	Untersuchung von gaze-basierter NPWT-Behandlung(negativ pressure wound therapy) vor und nach Hauttransplantation bei -80mmHg bei jeweils 21 Patienten. Es kam zu einer Verbesserung der Qualität im Wundbett mit einer Reduktion von totem Bindegewebe und einer Erhöhung von Granulationsgewebe bei einer durchschnittlichen Behandlung von 12 Tagen in der Gruppe, die vor der Transplantation behandelt wurde. Bei der Gruppe, die nach der Transplantation behandelt wurde, betrug die durchschnittliche Behandlungsdauer 5 Tage bei einer Erfolgsrate von 96%	NPWT kann als „Brückentherapie“ gesehen werden, wenn ein direkter Verschluss der Wunde nicht möglich ist. Gaze ist dabei genau so effektiv wie eine Schwammeinlage und dabei meist leichter einzubringen und erlaubt es vielen Patienten früher als bisher zu entlassen.

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2011	Fraccalvieri et. al.[19] Int Wound J	n=18 Mensch, klinische Studie	Nachuntersuchung von 18 Wunden die vor Hauttransplantation mittels NPWT behandelt wurden	Von 18 Wunden wurden 7 mittels Gaze- und 11 mittels schwammbasierter NPWT(negativ pressure wound therapy) behandelt. Die Anwendung mittels Gaze erfolgte bei -80 mmHg, beim Schwammmaterial mit -125mmHg. Zunächst erfolgte eine Biopsie des Granulationsgewebes bei 5 Schwamm- und 4 Gazepatienten ohne nennenswerte Unterschiede. Anschließend erfolgte eine Ultraschall- und histologische Untersuchung des Narbengewebes. Das Narbengewebe bei Schwammmaterialien betrug im Median 18 mm, bei Gaze lediglich 7 mm. Die Biopsieergebnisse zeigten bei der Gaze eine geringere Gewebedicke und Missordnung, sowie weniger sklerotische Bestandteile. In den Nachuntersuchungen zeigte sich, dass die Hauttransplantate bei schwammbasierter Behandlung weniger dehnbar waren als die mit Gaze Behandelten.	Die bei der schaumbasierte NPWT verursachte dickere Schicht von Narbengewebe kann ein Grund für die geringere Dehnbarkeit der Wundfläche sein. Welcher Faktor, ob der unterschiedliche Druck, die Dauer der Behandlung, oder die eigentliche Beschaffenheit der Materialien, dafür verantwortlich ist, kann durch die Untersuchung nicht hinreichend geklärt werden.
2011	Fraccalvieri et.al.[18] Int Wound J	n=21; Mensch Vergleichsstudie	Schmerzniveau und Feedback der Patienten	Vergleich des subjektiven Schmerzempfindens von 31 NPWT-Patienten(negativ pressure wound therapy) nach traumatischem Gewebsverlust, mittels nummerischer Bewertungsskala (1= wenig Schmerz 10= starker Schmerz). 18 erhielten einen Schwamm als Wundeinlage, 13 eine Gaze-basierte Behandlung. Bei der schwammbasierten NPWT ergab sich im Schnitt ein Wert von 6,5, bei den Gaze-Patienten ein Wert von 4,15, im Hinblick auf die Schmerzempfindung beim Austausch der Einlage. Also ein statistisch signifikanter Unterschied von 2,35 (P = 0·046). Der Unterschied in der subjektiven Schmerzempfindung der Patienten wird durch die stärkere Anlagerung des Schwammes an die Wunde erklärt, vermutlich verursacht durch das Einwachsen des Granulationsgewebe in die Poren des Schwammes.	Schwammeinlagen werden für neuropathische und querschnittsgelähmte Patienten empfohlen, Gaze als Wundeinlage für Patienten mit freiliegenden Knochen - oder Sehnenoberfläche .Gaze sollte auch bei Patienten Anwendung finden, die eine NPWT-Behandlung mittels Schwamm weniger tolerieren, bspw. in der Pädiatrie sowie bei der Behandlung älterer Patienten.
2011	Goutus et al.[21] J Wound Care	n=10; Mensch prospektive Studie	Rate der Epithelisierung	Anwendung von Gaze-basierten NPWT(negativ pressure wound therapy) bei „collagen-elastin dermal template resurfacing“. Die Methode ist effektiv für diese Art der Behandlung und führte zu einer exzellenten Rate von Epithelisierung (94%). Die Akzeptanz bei den Patienten war exzellent und die Kosten sind wesentlich geringer als bei Schaum-basierten Varianten.	Gaze-basierte NPWT stellt eine kostengünstigere Variante zu Schaum basiertem System da.

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2011	Malmsjö et al.[34] Ostomy/wound managment	n=8; Schwein kontrollierte in vivo Studie	Immunhistologische Untersuchung auf Substanz P und Calcitonin Gene-Related Peptid (CGRP) im Wundbett und Vergleich mittels arbitrary units (au)	Bei 8 Schweinen wurden jeweils 2 Wunden gefertigt. 1 wurde entweder mittels Gaze oder mittels Schwammeinlage und NPWT (negativ pressure wound therapy,- 80 mmHg) behandelt, die zweite Wunde diente als Kontrolle (Einlage ohne Unterdruck) Nach 72 Stunden wurden die Einlagen entfernt und das Wundbett immunhistologisch auf Substanz P und CGRP untersucht. Hierbei zeigte sich die Gaze dem Schwamm jeweils überlegen: CGRP.: 52 +/- 3 zu 97 +/- 5 au; Substanz P: 55 +/- 3 zu 95 */- 4 au. Der Anstieg zeigte sich vor allem in der Dermis, war aber auch subkutan und im Muskelgewebe zu beobachten.	Gaze kann ein gutes Mittel sein, um die Schmerzintensität beim Einlagenwechsel zu minimieren, da kein Granulationsgewebe in die Einlage einwächst und die Entzündungsmediatoren Substanz P und CGRP weniger vorhanden sind.
2011	Malmsjö et al.[35] JPRAS	n=16; Schwein experimentelle vergleichende Studie	Auswirkung der NPWT auf den mikrovaskulären Blutfluss an den Wundrändern.	Insgesamt wurden bei 16 Schweine auf dem Rücken Wunden geschaffen und mit unterschiedlichen Schwammeinlagen und Gaze und unter NPWT(negativ pressure wound therapy) für 12h / 72 h untersucht. Mittels Laser-Doppler-Anemometrie wurde hierbei der Blutfluss in 0,5 und 2,5 cm untersucht. Hierbei zeigte sich eine gleichmäßige Erhöhung in 2,5 cm Entfernung bei allen Einlagen. In 0,5 cm Entfernung zeigte sich ein Abfall des Blutflusses, der bei der Gaze weniger ausgeprägt war.	Der biologische Effekt der NPWT hängt auch von der verwendeten Einlage ab. Hierbei zeigte sich eine geringere Wundkontraktion und Hypoperfusion bei der Gazeeinlage. Die Wundeinlage sollte dem Wundtyp angepasst werden um die Effekte zu optimieren.
2011	Malmsjö et al.[40] J Cardiothorac Surg	n=8; Schwein experimentelle vergleichende Studie	Herzschlagfunktion unter NPWT	8 Schweine wurden nach medianer Sternotomie mittes NPWT(negativ pressure wound therapy) therapiert, entweder mit Gaze- oder Schwammeinlage. Der angelegte Unterdruck betrug -40, -70, -120 und -160 mmHg. Das Herzminutenvolumen wird durch die NPWT-Behandlung, unabhängig von der Einlage, nicht negativ beeinflusst. Bei der Schwammeinlage verringern sich der zentrale Venendruck, der Druck im linken Vorhof, sowie die Schlagfrequenz des Herzens, während bei der Gaze keine solche Veränderung beobachtet wurde.	Schaumeinlagen bei der NPWT nach medianer Sternotomie vermindern Schlagfrequenz und den Fülldruck im linken und rechten Vorhof. Gazeeinlagen beeinflussten die untersuchten hämodynamischen Parameter hingegen nicht. Gaze stellt eine Alternative zur Schaumeinlage bei der Sternotomie dar.

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2011	Malmsjö et al.[39] Interact Cardiovasc Thorac Surg	n=6; Schwein experimentelle vergleichende Studie	Auswirkung der NPWT auf die Bewegung der Wundränder und die makroskopische Gestalt von Herz und Lunge.	Nach medianer Sternotomie bei 6 Schweinen wurden diese mittels NPWT(negativ pressure wound therapy, Gaze oder Schwamm) und Druckniveaus von -40, -70, -120 und -160 mmHg behandelt. Bei der Schwammeinlage wurde eine größere Kontraktion der Wunde im Vergleich zur Gaze beobachtet (3.5 +- 0.3 cm and1.3 +- 0.2 cm, p< 0.01). Wird Zug auf die Wundränder ausgeübt, so dehnt sich die Wunde bei der Schwammeinlage wesentlich mehr (5.3 +- 0.3 cm und 3.6 +- 0.2 cm, p< 0.001). Die Oberfläche des Herzens war rot und fleckig, es konnte ein Lungenemphysem und manchmal eine Ruptur des Lungengewebes unter Schwammeinlage festgestellt werden. Unter Gaze blieben die Organoberflächen ohne Veränderung	Schaumeinlangen erlauben größere Wundkontraktion, sowie eine größere Dehnung der Wunde. Gaze bietet den Vorteil, die unter der Einlage liegenden Organe kaum zu schädigen. Zudem erlaubt Gaze eine geringere Wundkontraktion, was bevorzugt wird wenn unterliegende Organe zu groß sind für einen primären Verschluss (Bspw. vergrößertes Herz)
2011	Rajakaruna et al.[53] Int Wound J	n=1; Mensch Fallbericht	Gaze bei Sternotomie-Wunde	Fallbeispiel eines 68-jährigen Patienten, bei dem eine Sternotomie durchgeführt wurde und diese mittels Gaze-basierter NPWT(negativ pressure wound therapy) post-operativ versorgt wurde. Die Gaze wurde während der Behandlung durch Schaumeinlagen ersetzt, da sich ein Gerinnsel zwischen der Barriereeinlage und der Gaze gebildet hat. Grund war der mangelnde Abtransport des Wundexsudats, durch die zur Erzielung einer Splintwirkung nötige Menge an Gaze.	Bei tiefen Sternotomien mit Befall der Knochenstruktur wird vom Einsatz von Gaze abgeraten, da die Gazemenge die benötigt wird, um dieselbe Splintwirkung wie bei Schaumeinlage zu erzeugen, eine adäquate Entfernung des Wundexsudats behindert. Bei ausschließlich auf das Weichgewebe beschränkte Verletzungen kann Gaze-basierte NPWT erfolgreich eingesetzt werden
2012	Dorafshar et al.[12] Annals of plastic surgery	n=87; Mensch randomisierte prospektive Studie	Auswirkung von NWPT(negativ pressure wound therapy) auf Größe der Wundfläche und –volume, sowie Vergleich der Kosten, Dauer des Einlagenwechsel und Schmerzempfinden.	87 Patienten wurden aufgeteilt in 45 Patienten, die mittels Gaze und 42 Patienten, die mittels Schwamm-Einlage an vergleichbaren Armwunden behandelt wurden. Die Reduktion von Wundfläche und –volumen betrug 4,5% und 8,4% pro Tag (Gaze(P < 0.001 für beide)) und 4,9% und 9,8 % pro Tag (VAC vacuum assisted closure (P < 0.001 für beide)). Die Kosten betrugen im Durchschnitt täglich 4.22$ für die Gaze im Vergleich zu 96,51$ bei der Schwammeinlage und die Dauer für den Wechsel der Einlage war 19 min (Gaze) im Vergleich zu 31 min (Schwamm)(P<0.01 für beide)). Die Schmerzintensität betrug 0,50 in der Gaze Gruppe zu 1.73 bei der VAC Gruppe. (P=0.02)	Betrachtet man die Parameter der Reduktion der Wundflächen und –volumen steht die Gaze der VAC-Einlage in nichts nach. Gaze bietet den Vorteil, dass sie einfacher aufzutragen, weniger kostspielig und schmerzfreier ist.

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2012	Glass et al.[20] JPRAS	Literatur-recherche	Klinische und experimentelle Beweise für den Einfluss unterschiedlicher Methoden der NPWT(negativ pressure wound therapy)	Es gibt derzeit 14 verschiedene kommerziell erhältliche Vakuumtherapiesysteme. Sowohl Gaze- als auch die Schwammeinlangen übermitteln den Unterdruck effektiv. Präklinisch gibt es Hinweise, dass die Schwammeinlagen die Zellproliferation positiver beeinflussen, dennoch gibt es keinen Beweis, der einen der Wundfüller bevorzugt. Die stärkste Wundkontraktion findet in den ersten -50 mmHg statt und physiologische Optimierung bis zu -80 mmHg. Unzureichend sind die Nachweise, die NPWT mit der reduzierten Besiedlung der Wunde mit Bakterien in Verbindung bringen.	Es besteht ein dringender Bedarf darin, Evidenz basierte Untersuchungen zur NPWT durchzuführen, die die methodischen Aspekte mit dem klinischen Bedarf verknüpfen. Individuelle Strategien könnten hier zu einem verbesserten Ergebnis führen und das enorme Potential dieser Therapieform freisetzen.
2012	Malmsjö et al.[33] Eplasty	n=8; Schwein experimentelle vergleichende Studie	Effekt von variablem(VPT), intermittierender (IPT) und kontinuierlicher NPWT(negative pressure wound therapy) auf Wundkontraktion, Entstehung von Granulationsgewebe und Einwachsen in die Einlage	Bei 8 Schweinen wurde eine periphere Wunde geschaffen, die 72 Stunden mittels NPWT (-80mmHg) IPT (0 bis -80mmHg) oder VPT (-10mmHg bis -80mmHg) behandelt wurde unter Einsatz von Gaze und Schwammeinlagen. Anschließend wurden die Wundkontraktion und die Abzugskraft der Einlage gemessen. Eine Probe vom Wundbett histologisch untersucht. IPT und VPT erzeugen ähnliche Ergebnisse. Die Wundkontraktion und Formation von Granulationsgewebe zeigte sich stärker bei IPT/VPT im Vergleich zu NPWT. Das Granulationsgewebe wächst in den Schaum ein und nicht in die Gaze, unabhängig vom verwendeten Modus. Die Entfernung des Schwamms erforderte zudem mehr Kraft als bei der Gaze.	Granulationsgewebe wächst in den Schwamm ein, nicht aber in die Gaze. Die Abzugskraft, die zur Entfernung erforderlich ist, hängt ebenfalls von der Einlage ab. Die Wahl des Modus, sowie der Einlage ist entscheidend in der klinischen Routine für die Optimierung der Heilung und die Reduktion von Schmerzen
2013	Malmsjö et al.[36] Interact Cardiovasc Thorac Surg	n=16; Schwein experimentelle vergleichende Studie	Vergleich von Drucküber-tragung, Flüssigkeitsrückstände, Wundkontraktion und mikrovaskulären Blutfluss bei NPWT(negative pressure wound therapy) unter Gaze, Schwammeinlage und einer pathogen bindenden Einlage	Bei 16 Schweinen wurden Wunden mittels Gaze, Bakterien und bakterienbindenden Einlagen und Schwammeinlagen gefüllt. in 8 Schweinen wurde mittels Laser-Doppler-Anemometrie der Blutfluss bei 0 bis -120mmHg gemessen. in 8 weiteren Schweinen wurde bei NPWT zwischen -80mmHg und -120mmHg innerhalb von 72 Stunden die Wundkontraktion sowie Flüssigkeitsrückstände gemessen. Beim Blutfluss zeigte sich ein Abfall in 0,5 cm, der bei Gaze und Pathogen-bindender Einlage höher ausfällt. Die Erhöhung in 2,5 cm war bei allen Einlagen vergleichbar. Bei der Gaze blieb mehr Flüssigkeit zurück, als bei den anderen Einlagen. Die Wundkontraktion war bei der pathogen-bindender Einlage vergleichbar.	Die pathogen-bindende Einlage stellt eine gute Alternative in der NPWT dar. Sie ist vergleichbar mit der Gaze-Einlage, reduziert aber gleichzeitig die Bakterienlast, die ansonsten unter NPWT nicht reduziert wird, oder gar ansteigt.

Fortsetzung Tabelle 3:

Jahr	Autor / Journal	Methodik	Untersuchte(r) Parameter	Hauptergebnis der Studie	Folgerung der Autoren
2014	Kairinos et al.[29] Plastic and reconstructive surgery	Literatur-recherche	Einfluss der Involvierung des Herstellers bei der Anfertigung von NPWT-Studien	24 Studien, die das Chariker-Jeter System unter Anwendung von Gaze sowie Schwamm-basierte NWPT(negativ pressure wound therapy) miteinander verglichen, wurden ohne Angabe von Autor und Titel an 5 Chirurgen ausgehändigt, die die Artikel nach der Quintessenz beurteilen sollten, vor allem im Hinblick welches System bevorzugt wird. Von den 24 Studien bevorzugten 22 ein bestimmtes System. Bei 19 Studien war ein Hersteller involviert, wobei 18 Studien hierbei das System des involvierten Herstellers bevorzugten.	Die Involvierung von Hersteller bei der Anfertigung von Studien, egal welches Evidenzlevels, korreliert meistens mit der Aussage der Studie. In fast allen Fällen wird das System des involvierten Herstellers als besser angesehen.
2014	Malmsjö et al. [42] Eplasty	n=8 Schwein, experimentelle Studie	Einfluss des Einlagematerials auf die Bildung von Granulationsgewebe und das Einwachsen von Gewebe	Bei 8 Schweinen wurden auf dem Rücken Wunden geschaffen, die 72 Stunden mittels NPWT(negativ pressure wound therapy) behandelt wurden. Als Einlagen wurden hierbei bakterienbindende Kompresse, Gaze und ein Polyurethanschwamm verwendet. Die Wunden wurden hinsichtlich von Mikrodeformationen, Granulationsgewebebildung und der Kraft die zur Entfernung der Einlage notwendig ist untersucht. Die bakterienbindende Kompresse erzeugt mehr Granulationsgewebe und Leukozyteninfiltration als Gaze, aber weniger als der Schwamm. Die Mikrodeformation ist bei allen 3 Materialien vergleichbar. Die Kraft zur Entfernung der Einlage ist bei Gaze und der bakterienbindenden Einlage geringer als beim Schwamm, auf Grund von einwachsendem Gewebe in den Schwamm.	Die bakterienbindende Kompresse ist als Einlage für die NPWT gut geeignet. Sie führt zu einer deutlich stärkeren Granulationsgewebebildung als die Gaze, ohne das Problem von einwachsendem Gewebe in die Einlage wie beim Schwamm. Dies macht die pathogen-bindende Einlage zu einer interessanten Alternative für die NPWT.
2015	Nguyeng et al. [51]	n=104; Mensch prospektive, randomisierte, kontrollierte Studie.	Eignung zur Sicherung von Spalthaut-transplantaten.	154 Wunden wurden bei 104 Patienten randomisiert mittels VAC (vacuum assisted closure) oder GUSC (gauze dressing with wall suction applied) behandelt. 4 oder 5 Tage postoperativ wurden die Größe des Transplantat und nicht haftende Areale untersucht. Bei 64 von 80 Wunden in der GUSC Gruppe und 60 von 77 in der VAC Gruppe kam es zum vollständigen Anwachsen des Transplantat (P=.80). Die durchschnittliche Anwachsrate betrug bei GUSC 96,12 und bei VAC 96,21(P=.98).	Die Benutzung der Vakuumtherapie ist eine nützliche Methode zur Sicherung von Spalthauttransplantaten. Die kosteneffektive und leicht zugängliche Methode mittels Gaze-Einlage und Wandanschluss ist hierbei vergleichbar zur Anwendung eines VAC-Systems.

Tabelle 4: Übersicht der Literaturergebnisse

Eigenschaft	Interpretation	Wertung
Zelluläre Veränderungen	• Geringere Migration und Proliferation, sowie eine höhere Zellapoptoserate von Fibroblasten unter Verwendung von Gaze. • Erhöhung der Genexpression, die verantwortlich für bspw. die Angiogenese ist unter Verwendung von Schwammeinlagen. • Erhöhte Anzahl an Wachstumsfaktoren beim Schwamm, die wichtig sind für die Wundheilung. Aber geringere Anwesenheit von Entzündungsmediatoren und dadurch geringeres Auftreten von Schmerzen bei der Gaze. • Bei der Biopsie des entstehenden Granulationsgewebes gibt es zwischen den Materialien keine Unterschiede. Biopsiert man das Narbengewebe so ergeben sich Unterschiede in der Dicke (Schwamm > Gaze), sowie dem geringeren Auftreten von sklerotischen Bestandteilen bei der Gaze.	Fibroblasten, eine gute Angiogenese, sowie die Anwesenheit von Wachstumsfaktoren ,die eine wichtige Rolle in der Wundheilung spielen, sind unter der Gaze schwächer ausgeprägt. Narbengewebe ist nach Anwendung von Gaze dünner und dehnbarer. Erhöhte Gefahr von nosokomialen Infektionen bei der Gaze.
Mirko-mechanische Veränderungen	• Im Computermodell stärkere Mikrodeformationen beim Schwamm, beim Patienten jedoch ähnlich ausgeprägt, bei der Gaze jedoch mit irregulärem Muster. • In 0,1 cm Abstand zum Wundrand sinkt der gemessene Gewebedruck, in 0,5 cm Abstand steigt diese bei beiden Einlagen. • Gewebe wächst bei der Behandlung in den Schwamm ein, dadurch sind zur Entfernung größere Kräfte vonnöten. • Sowohl bei Gaze als auch beim Schwamm Abfall des Blutfluss in 0,5 cm Entfernung zur Wunde und Zunahme in 2,5 cm Entfernung. Der Abfall der Durchblutung ist bei der Gaze weniger ausgeprägt.	Durch Einwachsen des Granulationsgewebes beim Schwamm treten beim Einlagewechsel Schmerzen auf und es besteht die Gefahr des Zurückbleibens von Einlagematerial. Bei Ischämiegefahr eher Gaze, auf Grund der geringeren Hypoperfusion.
Makro-mechanische Veränderungen	• Gaze und Schwamm sind ähnlich gut bei der Übermittlung des Unterdrucks an die Wundoberfläche. Die Wundkontraktion (das Annähern der Wundränder aneinander) ist ähnlich, wobei sich diese beim Schwamm durch die Größe des Schwamms „steuern“ lässt. • Kaum Unterschiede bei der Reduktion des Wundvolumens in der Heilungsphase. • Bei Sternotomiewunden haben beide Einlagen keinen Einfluss auf das Herzminutenvolumen, beim Schwamm verringert sich der zentrale Venendruck, Schlagfrequenz und der Druck im linken Vorhof. • Unter der Gaze kaum Organschäden, bei dem Schwamm Gefahr der Schädigung von Lunge und Herz. Vermehrtes Zurückbleiben von Flüssigkeit unter Gazeanwendung.	Durch Auswahl eines Schwamms der kleiner ist als die Wunde kann eine größere Kontraktion und durch den größeren mechanischen Stress die Bildung von Granulationsgewebe angeregt werden. Bei der Gaze immer gleichmäßige Kontraktion unabhängig von der Materialmenge. Bei vergrößerten Organen (Herz) eher Gaze als Einlage.
Anwender- und Patientenkomfort	• Keine Unterschiede in der Behandlungsdauer oder der Überlebensrate von behandelten Hauttransplantaten. • Leichteres Einbringen und Verbandswechsel bei Gaze. • Zusätzlich Zeitersparnis beim Wechsel der Einlage bei der Anwendung von Gaze. • Die Anwendung von Gaze erfolgt mit deutlich niedrigeren Behandlungskosten. • Verbandswechsel und –entfernung werden bei der Gaze von den Patienten als schmerzärmer wahrgenommen.	Gerade bei irregulären oder gekrümmten Wundflächen leichtere Applikation der Gaze gegenüber Schwamm, sowie schmerzfreier und leichter beim Entferngen der Einlage.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse. Der Nutzen(Vor-/Nachteile) der einzelnen Materialien

Material	Vorteil	Nachteil
Polyurethan	+ Bessere Proliferation und Migration von Fibroblasten + Kontraktion der Wunde kann durch Schwammgröße „gesteuert“ werden + Ausbildung einer dickeren Schicht von Granulationsgewebes + Eignung auch für Therapie mit V.A.C. Ulta	– Gefahr des Einwachsens und Abreißens von Granulationsgewebe in den Schwamm – schweres Einbringen des Schwammes auf gekrümmte und irreguläre Wundoberflächen – höhere Kosten
Polyvinylalkohol	+ geringere Gefahr des Einwachsens von Granulationsgewebe + leichteres Einbringen in Wundtaschen auf Grund der höheren Dichte und stabileren Form	– schwereres Einbringen des Materials – höhere Kosten – schlechtere Druckübertragung in der Länge (allerdings außerhalb des therapeutischen Bereichs) – schlecht für V.A.C. Ulta geeignet
Gaze	+ kostengünstig + leichte Applikation auch bei schwierigen Wundverhältnissen + geringere Vernarbung durch dünneres aber dichteres Granulationsgewebe + Bessere Angiogenese + Weniger Schmerzen beim Verbandswechsel durch geringeres Einwachsen des Granulationsgewebes + geringere Gefahr der Ischämie	– deutlich schlechter Druckübertragung über eine längere Strecke, vor allem im feuchten und komprimierten Zustand – für Behandlung mit V.A.C. Ulta ungeeignet – geringere Chemotaxis von Fibroblasten und höhere Apoptoserate – Gefahr des Zurückbleibens von Flüssigkeit in tiefen Wunden bei starker Komprimierung – höhere Gefahr einer nosokomialen Infektion

4. Diskussion

Die Vakuumwundtherapie mit Schwammeinlage hat einen stark positiven Einfluss auf die Wundheilung [3, 23]. Weitere Entwicklungen versprechen eine weitere Verbesserung der Therapie. Ziel der Arbeit war es daher zu untersuchen, ob die heute als innovativer Wundfüller dargestellte Gaze als Einlage bei der Vakuumwundtherapie ähnliche Eigenschaften aufweist, wie die beiden etablierten Schwammmaterialien aus Polyvinylalkohol und Polyurethan, welche Vor- und Nachteile Einlagen aus Gazematerial bieten und ob es gravierende Unterschiede oder Einschränkungen in der Anwendung und Indikationsstellung gibt.

Hierfür wurden die bisher veröffentlichten Erkenntnisse der Gazeanwendung zusammengefasst. Zusätzlich wurden einige Gesichtspunkte, die in der Literatur bisher nicht behandelt wurden, anhand einer experimentellen in vitro Studie untersucht.
Hierbei auch das Verhalten der Gaze bei Anwendung der Vakuumtherapie über eine längere Strecke / einer großflächigen Einlage untersucht, aber auch das Verhalten der Materialien in komplizierten Wunden und Wundtaschen.

4.1 Versuchsanordnungen

Eines der Hauptprobleme der Arbeit stellte sich, wie bereits von v. Thun-Hohenstein beschrieben, im Finden eines geeigneten Wundmodells[59]. Während ältere Untersuchungen, wie z.B. die Arbeit von Maier et al.[32] noch mit sehr „einfachen“ *ex vivo* Modellen unter Zuhilfenahme von Knetmasse und Grapefruitscheiben arbeiteten, finden sich heutzutage zunehmend auch *in vivo* und tierexperimentelle Untersuchungen, vor allem aus der schwedischen Gruppe von Malmsjö et. al. [1, 5, 38, 39].
Saxena et al. [54] forschte an einem 2D-Modell, das die Gruppe um Wilkes in die dritte Dimension ergänzten [63]. Der in dieser Arbeit verwendete *in vitro* Versuchsaufbau mit avitalem Rindermuskelgewebe bietet zwar kein ideales „lebendes“ Wundmodell, zeigte sich aber bereits in der Untersuchung von Willy et al. [66] für die Analyse von Druckverhältnissen an der Wundoberfläche, als relativ wundähnlich und fand deshalb auch hier Anwendung.

In den bisherigen Versuchen fehlten vor allem Untersuchungen, die einer möglichen Druckniveauveränderung infolge des Anfeuchtens oder Kompression der Materialien, vor allem im Fall einer Gazeeinlage, Beachtung schenkten.

Um zu verhindern, dass sich Materialbrücken ins Messfenster der Sonden eindrücken und hierdurch das Messergebnis verfälschen, wurde die Ausrichtung der Messfenster in Richtung der Tischplatte gewählt. Ein Eindrücken von Schwamm- oder Gazebestandteilen konnte so vermieden werden, was sich durch regelhaft gleiche Messergebnisse bestätigte.
Um vergleichbare Messwerte für alle Materialien zu erhalten, wurde nach Platzierung der Messsonden und gleichmäßigen Ergebnissen das Setting nicht verändert, sondern lediglich das Schwamm- / Gazematerial neu aufgelegt.

Hierbei zeigte sich für alle Materialien im Bereich bis 125 mmHg in trockenem Zustand eine gleichmäßige Übertragung des Unterdrucks selbst über eine längere Strecke hinweg. Bei steigenden Unterdrücken im PVA-Schwamm von über -125 mmHg zeigte sich jedoch ein deutlicher Druckabbau. So steigt der Unterdruck in 21 cm Entfernung zum trac-pad-connector nie über -115,7 mmHg, selbst beim maximalen Unterdruck von -200 mmHg.

Hier fällt der Druckabfall mit über 40% deutlicher aus als bei v. Thun-Hohenstein[59]. Da sich der meist verwandte Therapiedruck bei - 75 mmHg bis - 125 mmHg bewegt, ergibt sich hierdurch jedoch keine relevante Änderung in der Praxis.

Feuchtet man die Gazeeinlage an, so kommt es scheinbar zu einer nahezu linearen Druckminderung (s. Abbildung 12) über die gesamte Messlänge hinweg. Gravierender und therapeutisch sicherlich entscheidender zeigt sich die Druckminderung, wenn man die Gaze gleichzeitig komprimiert (s. Abbildung 13), wie es bspw. zur Erzielung der notwendigen Splintwirkung bei Sternotomiewunden notwendig ist. Hier kommt es in 21 cm Entfernung bei -200 mmHg zu einem Druckabfall von nahezu 40%, in der maximalen Entfernung halbiert sich der ankommende Unterdruck nahezu. Im empfohlenen Druckbereich bei -125 mmHg reduziert sich der ankommende Unterdruck in maximaler Entfernung um fast 40%, bereits in 21 cm Entfernung um 16%, das heißt, bei einem Sog von 125 mmHg besteht in 21 cm Entfernung ein gemessener Unterdruck von ca. 104 mmHg, in 49 cm Entfernung von lediglich ca. 78 mmHg!

Betrachtet man den für die Anwendung der Vakuumtherapie empfohlenen Druck von -125 mmHg [25, 49] so ergibt sich für die Praxis folgendes Bild:

1. Die beiden Schwämme sind auf Grund des eher geringen Abfalls des Unterdrucks bei -125 mmHg bei der PVA Einlage und der praktisch vollständigen Unterdruckübertragung beim PU- Schwamm ohne große Einschränkungen in der Wahl des Ortes des trac-pad-connector verwendbar. Das heißt, dass der Schwamm auch (beliebig) groß sein darf.
2. Die Gaze ist sowohl im trockenen als auch im feuchten Zustand ohne Einschränkungen beim häufig verwandten Druck von -125 mmHg verwendbar, da die Reduktion des Unterdrucks bei der trockenen Gaze der des PU-Schwammes, bei der feuchten Gaze der des PVA-Schwammes entspricht.
3. Bei der feuchten und komprimierten Gaze sollte der Abstand vom trac-pad-connector auch bei -125 mmHg möglichst gering gehalten werden. Um dieselben Druckwerte wie PVA und feuchte Gaze in max. Entfernung zu erhalten, sollte der Applikationsort nicht mehr als 21 cm, bei höherem Unterdruck nicht mehr als 14 cm von den Wundrändern entfernt sein.

Eine mögliche Erklärung für den Druckverlust könnte in dem Aneinanderlegen, Pressen bzw. Verkleben von Fasern des Baumwollmaterials der Gazekompresse liegen. Hierdurch reduziert sich der „Porendurchmesser“, der sich aus dem Abstand der Fasern zueinander ergibt. Ein Hinweis dafür ergibt sich auch daraus, dass bereits bei der feuchten Gaze ein nahezu linearer Druckverlust stattfindet, sich also über die gesamte Länge der Wunde der Effekt der Porenreduktion summiert. Durch die Kompression des Materials verstärkt sich offensichtlich dieser Effekt um ein Vielfaches.

Beachtet man den von Smith&Nephew für die Therapie mit ihrem Gaze System V1STA empfohlenen Druckbereich von -40 mmHg bis -80mmHg, so zeigt sich ein eindeutiger, jedoch nicht so schwerwiegender Verlust des ankommenden Unterdrucks.

4.2 Tiefe irreguläre Wunden

Die bei den Versuchen mit der komplizierten und tiefen Wunde auftretenden positiven Druckwerte und Druckschwankungen erklären sich dadurch, dass die Messsonden hier in Richtung des Muskels ausgerichtet sind und nicht zu einem starren Untergrund wie ihn die Tischplatte darstellt. Fleischfasern lagern sich in das Messfenster ein und wirken hier als Stempel, dadurch kommt es an den eindrückenden Fasern zu positiven Druckwerten, in den Lücken zwischen den Fleischfasern zu negativen. Mit steigendem Druck werden die Messwerte immer positiver, weshalb davon ausgegangen wird, dass die Gesamtheit des Muskels als Stempel wirkt, d.h. der Effekt des Einpressens und damit Druckerhöhung durch die Fleischfasern überwiegt.
Da die tiefe Wunde in Versuch 4 nicht tiefer ist als 14 cm, kann unter Berücksichtigung von Versuch 1, der Messung über eine lange Strecke hinweg, davon ausgegangen werden(da die Messwerte in dieser Entfernung sich kaum unterscheiden), dass bei beiden Versuchen (2 und 4) derselbe Unterdruck im Bereich der Messsonde anliegen sollte. Unterschiede in den beiden Messergebnissen sind somit auf die Einlagerung von Fleischfasern zurückzuführen (der Muskel in Versuch 2 kann sich zusammenziehen, in Versuch 4 wird dies durch die Plastikbox eingeschränkt) und darauf, dass die als potentielle Saugglocken wirkenden Schwammporen durch Flüssigkeit gefüllt sind. Zusätzlich zeigte sich bereits 2009 in einer Untersuchung von Malmsjö et al [41], dass bei einer feuchten Wunde die Druckübertragung bei einem auf der Einlage platzierten Anschluss nicht so effektiv stattfindet, dies gilt es für die angefeuchtete Gaze in Versuch 2, sowie für den kompletten Versuch 4 zu berücksichtigen.

Hierdurch kommt es im Versuch mit der komplizierten Wunde zu anderen Messwerten im Vergleich zur tiefen feuchten Wunde.
Dies erklärt in einem gewissen Maße auch, warum die Messwerte bei der komplizierten Wunde (Versuch 2) im Bereich der Mitte von denen des Randbereiches abweichen. Die „Angriffsfläche“ für den Umgebungsdruck, der als eigentliche Kraft zum Kollabieren der Einlage führt, ist in der Vertikalen größer.

Der Muskel kontrahiert in dieser Richtung stärker als in der horizontalen, hierdurch erhöht sich der Stempeldruck, der auf die zentralen Messsonden wirkt, die Messungen sind leicht positiver als innerhalb der Randbereiche.
Die Ungleichheiten von Rand und Mitte ergeben sich hierbei unabhängig vom eingesetzten Einlagematerial. Lediglich beim Anfeuchten und Komprimieren der Gazeeinlage kommt es zu Unterschieden.

Der niedrigere Druck lässt sich hierbei auf 2 Faktoren zurückführen:

- Durch die Kompression kann sich der Muskel weniger kontrahieren, der Stempeldruck der Fleischfasern nimmt ab.
- Durch das Anfeuchten vermindert sich der ankommende Unterdruck.

4.3. Anwendung mit V.A.C. Ulta

Im Versuchsaufbau zur Untersuchung der neuen V.A.C. Instilltherapie zeigt sich, dass die für die Instilltherapie vorgesehenen Schwammmaterialien, sowie der PU-Schwamm, für das Durchspülen der Wundeinlage nach Anlegen eines Unterdrucks, geeignet sind. Dies gilt jedoch weniger für den PVA-Schwamm und die Gaze - Einlage. Im Gegensatz zu früheren Spül- Saug- Drainagen, die über eine Zu- und Ableitung verfügten, beruht das Prinzip der Instilltherapie darauf, dass während der Instillationsphase der Unterdruck auf -25 mmHg absinkt und die Instillflüssigkeit sich durch das Öffnen des Schwammes / der Einlage und der dadurch entstehenden Sogwirkung im Wundbett ausbreitet. Dadurch erklärt sich auch die mangelnde Ausbreitung in der Gaze, da die Rückstellkraft der Gazeeinlage im Vergleich zur großporigen Struktur der für die Therapie vorgesehenen Schwämme sowie des PU- Schwamms, deutlich vermindert ist. Beim PVA – Schwamm ist die mangelnde Eignung sicherlich der höheren Dichte, und damit der geringeren Anzahl und Größe des Porenvolumens geschuldet. Dies führt zu einer verminderten „Ansaugung“ der Spülflüssigkeit bei Wiederausbreitung des Schwammes.

Der Vorteil der Instilltherapie gegenüber der Spül- Saug-Drainage besteht darin, dass hierbei keine „Spülstraße“ in Form der kürzesten Verbindung zwischen Zu- und Ableitung entsteht, sondern das Wundbett gleichmäßiger durchspült wird. Die vollständige Durchtränkung der Wunde im Versuchsaufbau erfolgt aber nur bei den vorgesehenen hydrophileren Schwammmaterialien und des PU-Schwammes, sofern die Wunden eine Länge von 25 cm überschreiten. Bleiben beim PVA-Schwamm nur etwa die letzten 2 cm der Wundfläche unbehandelt, so sind es bei der Gaze bereits 5 cm. Zusätzlich kommt es bei der Gaze auf den 4-5 cm vor der unbehandelten Wundfläche noch zu einer schwächeren Durchtränkung des Materials. In diesem Bereich der Gaze kommt die Wundspülung eher durch den Kapillareffekt an, ähnlich wie bei einem Kerzendocht, nicht durch die Ausbreitung des Wundmaterials und des damit verbundenen Ansaugeffekt.

Gaze und PVA – Schwamm scheinen für die Anwendung mit dem V.A.C. Ulta System ungeeignet. Lediglich durch Verwendung eines Duo – Schlauchsets, mit separatem Anschluss für die Zufuhr von Instillflüssigkeit und für die Unterdruckquelle, scheint ein Einsatz von Gaze als Einlagematerial bei größeren Wundflächen möglich. Inwieweit die Ergebnisse der in vitro – Untersuchung für die Praxis relevant sind, müssen in-vivo-Experimente bestätigen.

4.4 Exsudatmanagment

In Versuchsaufbauten für die Evakuierung von Wundsekret und zur Simulation von tiefen Wunden, zeigt sich unabhängig vom Wundfüller, dass das Handling von auftretendem Wundsekret, in dem in einer solchen Wunde zu erwarten Umfang, vom Prinzip her zu bewältigen ist. Im 4. Versuch der Simulation einer tiefen Wunde wird jedoch deutlich, dass mittels der Vakuumversiegelung selbst mit nur einem Anschluss deutlich größere Flüssigkeitsmengen innerhalb von 6 min evakuiert werden können, als die in Versuch 3, der Evakuierung über 1 min, mittels des Infusomaten max. möglich eingeleiteten ca. 100ml.

Nach vollständigem Aufbau des Unterdrucks, benötigt die Vakuumpumpe für die Evakuierung von 100 ml höchsten 50 Sekunden, bei maximalem Unterdruck (-200 mmHg) bewegen sich die Zeiten sogar unter 10 Sekunden. Für die unter normalen Umständen vorkommenden Mengen an Exsudat während der Vakuumtherapie gibt es also keine Unterschiede zwischen den eingesetzten Materialien. Wie bereits von Sedlarik 1970 festgestellt [55], kommt der Reduktion von Wundsekret eine bedeutende Rolle in der Wundheilung zu.

Lediglich in der Menge der zurückbleibenden Flüssigkeit innerhalb der Wunde unterscheiden sich die Einlagen. Hierbei zeigte sich, dass bei der Gaze geringfügig größere Mengen an Sekret in der Tiefe der Wunde zurückbleiben.

Fraglich ist jedoch, wie sich die Materialien bei der Durchleitung von realem Wundsekret verhalten würden. Wie von Maier bei seinen Versuchen festgestellt, kommt es innerhalb der Schwammmaterialien durch die Blutbestandteile zur Verlagerung und letztlich zum Verschluss der Poren [32].

Zweifelsohne lässt sich dieser Effekt nicht zu 100% auf die Gaze übertragen, es ist aber anzunehmen, dass es hier zu ähnlichen Effekten kommt, sich diese durch das Verkleben der Fasern sogar schneller einstellen.

So zeigte Rajakaruna 2011, dass bei einer mittels gaze-basierter NPWT versorgten Sternotomiewunde in der Wunde zurückbleibende Wundsekret letzten Endes zum Austausch der Gaze durch eine Schwammeinlage geführt hat [53]. Dieser Umstand war sicherlich zusätzlich durch die starke Kompression der Gaze begünstigt die notwendig ist, um dieselbe Stabilität auf dem Brustbein zu erzielen, wie bei der Versorgung mit einem Polyurethan - Schwamm erzielt wird. Durch Verkleben der Fasern und Verschluss der zurückbleibenden Poren, stellt sich ein ähnlicher Effekt auch bei der Gaze ein.

4.5 Vorteile und Nachteile der Gaze

Schon in der frühen Phase der Entwicklung der Vakuumwundtherapie wurde die Gaze als Füller eingesetzt [10], erst in jüngere Vergangenheit wurden diese aber kommerziell für den klinischen Gebrauch verfügbar [6, 46]. Die positiven Effekte der Vakuumtherapie wie erhöhte Durchblutung der Wundperipherie, verringerte Bakterienlast, Entfernung des Wundsekrets, sowie Ausbildung von Granulationsgewebe beruhen sowohl auf der Wundkontraktion sowie der Unterdruckübertagung auf das Wundbett. Gerade in komplizierten Wunden zeigte sich, dass eine Druckübertragung am effektivsten in den Bereichen stattfindet, die in direktem Kontakt zur Einlage stehen [37, 58]. Nur so kann die Vakuumtherapie ihren maximalen Effekt ausüben. Hier zeigt sich für Jeffrey et al. ein Vorteil der Gaze: Diese passt sich wesentlich besser als die Schwammmaterialien an irreguläre Wundflächen an [26, 57]. Der Schwamm mit seiner glatten Oberfläche soll sich zwar bei Anlegen des Unterdrucks an die Wundfläche anpassen, tut dies aber nicht in allen Fällen vollständig, Teile der Wunde kommen nicht in Kontakt mit dem Schwamm und bleiben unbehandelt.
In den durchgeführten Experimenten mit der tiefen Wunde und der komplizierten Wunde mit Wundtaschen, zeigte sich beim Anlegen des Unterdrucks stets eine gute Druckübertragung. Im Vergleich zum regulären Wundmodell kam es nicht zu signifikanten Unterschieden in den gemessenen Druckwerten, sodass eine gleichmäßige Druckübertragung stattgefunden hat.

Vor allem in der praktischen Anwendung bei gekrümmten Wundflächen wie an den Extremitäten kommt es durch das Formgedächtnis des Schwammes zu Schwierigkeiten beim Anlegen des Vakuumverbandes. Um eine vollständige Versiegelung bei solchen Wunden zu erreichen, sind beim Schwamm mehrere Mitglieder des Behandlungsteams notwendig, um den Schwamm in Position zu halten und die Wunde mittels Folie zu versiegeln. Ein Verbandswechsel ist somit nicht leicht von nur einer Person durchführbar.
Passt man den Schwamm (durch zuschneiden oder abreißen) an irreguläre Wundoberflächen an, so besteht die Gefahr, dass kleine Bestandteile dabei verloren gehen, indem sie auf den Boden fallen, oder schlimmstenfalls in die Wunde [26].

Auch bei den eigenen Versuchsaufbauten zeigte sich die Applikation von Gaze einfacher und schneller verwendbar als die vergleichbaren Schwammmaterialien, die man gerade bei der tiefen Wunde umständlich übereinander schichten musste. Gaze sollte also gerade bei großen Wunden zum Einsatz kommen, betrachtet man die Längenmessung in Versuch 1, so zeigen sich hierbei doch Einschränkungen, gerade bei einer stark sezernierenden und dadurch feuchten Wunde. Abhilfe könnte der Einsatz einer langen perforierten Drainage anstatt eines trac-pad-connector bieten, da diese in großen feuchten Wunden langstreckiger eingelegt eine bessere Sogwirkung erzeugen kann [41].

Einer der Haupteffekte der Vakuumtherapie beruht auf der Deformation des Wundgewebes, die über eine Signalkaskade die Bildung von Granulationsgewebe auslöst [54]. Hierbei unterscheidet man die makro- (Kontraktion der Wunde) von der mikromechanischen Kontraktion (Interaktion der Einlage mit dem Wundbett) [50]. Die Makrodeformation unterscheidet sich bei Schwamm und Gaze geringfügig [4, 37], jedoch kommt es bei einem großen Schwamm zu einer geringeren Wundkontraktion im Vergleich zu einem kleinen Schwamm, die Kontraktion bei der Gaze ist unabhängig von der Menge und liegt in etwa dazwischen [1]. Somit kann über die Größe des Schwamms die Kontraktion der Wunde „gesteuert“ werden, bei der Gaze ist die Kontraktion unabhängig von der verwendeten Menge.
Schwammeinlagen zeigen sich also bspw. bei einer Fasziotomie, bei der Kontraktion gewünscht und von Vorteil ist [68], der Gaze überlegen. Hier kann ein kleinerer Schwamm (kleiner als die Wundfläche) in die Wunde eingelegt werden, durch die Applikation des Unterdrucks komm es zu einer größeren Kontraktion der Wunde. Bei der Gefahr einer Ischämie zeigen sich bei der Gaze hierdurch Vorteile, dass es durch die geringere Kontraktion zu einer weniger ausgeprägten Hypoperfusion des Gewebes kommt [35].

Betrachtet man die mikromechanischen Änderungen, so gibt es wesentliche Unterschiede.

Die 2009 von Wilkes et al.in einem Computermodell beobachteten Unterschiede in der Mikrodeformation bei Gaze und Schwamm [63], bestätigten sich in der in vivo – Untersuchung von Borgquist et al. nicht [5]. Trotz der Unterschiede in der Struktur der Materialien entsteht eine ähnliche Musterung der Wundoberfläche.

Vorteil der Gaze hierbei ist, dass es zu keinem Einwachsen von Granulationsgewebe in die Einlage kommt. Bei Entfernen des Schwammes kommt es zum Abriss von Granulationsgewebe und dadurch zu Blutungen [47] und zu Schmerzen [28], die in einigen Fällen beim Tausch des Verbandes Schmerzmedikation notwendig machen. Gerade geringeres Auftreten von Schmerzen führen viele Autoren als Argument für die Verwendung einer Gaze-Einlage an [18, 24, 33]. Hier könnte das Einbringen einer nicht adhärenten Zwischenschicht [13], oder die Verwendung des mit geringerem Porengröße ausgestatteten weißen Schwamms Abhilfe schaffen.

Die Art des ausgebildeten Granulationsgewebes ist bei der Gaze weniger dick, dafür aber dichter als bei der Schwammeinlage[4, 5, 19]. Zwar hat die Ausbildung von dickerem Granulationsgewebe Vorteile, führt aber auch zu Fibrosen und Vernarbung. Daher bietet die Gaze Vorteile in Bereichen, in denen eine Vernarbung die Mobilität einschränken würde oder ein kosmetisch gutes Ergebnis erzielt werden soll. Zusätzlich erlaubt das Fehlen sklerotischer Komponenten ein besseres Einwachsen von Blutgefäßen, diese sind bei der Gaze zahlreicher, größer im Durchmesser und ähnlicher der physiologischen Form der Blutgefäße[5, 19, 37].

Auf mikroskopischer Ebene zeigt die Gaze leichte Nachteile. So kommt es unterhalb des Schwammes zu einer besseren Migration und Proliferation von Fibroblasten, welche wichtig für die frühe Wundheilung sind [43]. In der frühen Wundheilung müssen Fibroblasten aus der Umgebung einwandern, dies geschieht effektiver unter der Schwammeinlage. Bei der Gazeeinlage kommt es zu einer geringeren Chemotaxis der Fibroblasten und zu einer signifikant höheren Apoptoserate [44].

Die Anwendung der Vakuumtherapie ist teuer, führt aber bspw. zu einem verkürzten Aufenthalt innerhalb eines Klinikums. Auch hier zeigt sich ein kleiner Vorteil für die Anwendung für Gaze, da diese kostengünstiger ist als eine Schwammeinlage [21, 22].

4.6 Fazit für die Praxis

Es zeigt sich sowohl in den eigenen Versuchen, als auch in der Literatur, dass bei der Anwendung von Schwammeinlagen, sowie bei der Anwendung einer Gaze-Einlage ähnliche Verhältnisse bei der Übermittlung des Unterdrucks herrschen. Auch über längere Distanzen sind die Chirurgen in der Lage, im therapeutisch relevanten Druckbereich, die Wahl der Applikationsstelle des trac-pad connector und die Wahl des Einlagematerials frei zu treffen. Lediglich bei einer stark sezernierenden Wunde und einer Kompression des Einlagematerials sollte der trac-pad connector bei der Anwendung einer Gaze-Einlage nicht mehr als 7 cm von den Wundrändern entfernt liegen.

Generell bietet die Gaze gegenüber den Schwamm-Wundfüllern aus PU und PVA vergleichbare Ergebnisse, hat aber ihnen gegenüber sowohl Vor- als auch Nachteile.
So zeigt sich bei großen Wunden, gerade bei gekrümmten Wundflächen, oder komplizierten Wunden die deutlich leichtere Applikation des Gazematerials, hier ist die Applikation der Einlage auch durch eine Person möglich, gerade bei gekrümmten Wundflächen ist dies bei den Schwämmen deutlich schwieriger, durch die Rückstellkraft des Schwammes. Zudem bietet die Gaze einen erhöhten Patientenkomfort und führt zu einer Gewebeheilung, die mit einer geringeren Induration infolge geringer ausgeprägter Fibrosierung einhergeht.
In Wunden, die eine Kontraktion erfordern (bspw. Fasziotomiewunden), zeigt die Gaze jedoch Nachteile gegenüber dem Schwamm, da dieser stärkere Kontraktionen zulässt (durch die Wahl der Schwammgröße). In den Phasen der frühen Wundheilung und in Sachen Angiogenese zeigt sich der Schwamm ebenfalls überlegen.

Für die Praxis bedeutet dies, dass die Wahl der Einlage nach den folgenden Gesichtspunkten getroffen werden sollte:

- Wundtyp: Kontraktion erwünscht (Schwamm) oder unerwünscht (Gaze), Ischämiegefahr (Gaze oder größerer Schwamm), stark sezernierende Wunde (Schwamm)
- Patient: Diabetespatienten oder Patienten mit athereosklerotischen Vorerkrankungen (Gaze oder großer Schwamm), Reduktion von Schmerzen beim Verbandswechsel (Gaze).
- Anatomische Region: komplizierte Wunde mit irregulären Wundrändern oder gekrümmte Wundfläche bspw. an den Extremitäten (Gaze), ästhetischer Bereich (Gaze)

Die möglichen Modifikationen des üblichen Handelns, um die einzelnen Vor- und Nachteile der Materialien zu nutzen, sollten bei der Erstellung des individuellen Therapiekonzeptes berücksichtigt werden. Hierzu zählt bspw. die von Jeffrey et al. untersuchte Anwendung einer Zwischenschicht beim PU-Schwamm [27], oder die Anwendung des PVA-Schwamms zur Vermeidung des Einwachsens von Granulationsgewebe in den Schwamm, sowie die Reduktion des Unterdrucks, um starke Hypoperfusionen an den Wundrändern zu vermeiden. Auch eine Kombination der beiden Einlagen ist denkbar. So könnte die Therapie mit einer Gazeeinlage gestartet werden, wenn die Wundfläche noch empfindlich ist und zu einem späteren Zeitpunkt auf die Schwammeinlage gewechselt werden [24]. Somit sollten sich die jeweiligen Kliniken bzw. Anwender darum bemühen, beide Wundfüllermaterialien zur Anwendung verfügbar zu haben.

5. Zusammenfassung

Einleitung: Die Vakuumwundtherapie wird seit ihrer Einführung 1997 genutzt, um die Wundheilung zu fördern und zu beschleunigen. Bereits 1989 beschrieb Chariker eine alternative Einlage aus medizinischem Gazematerial. Diese findet seit 2007 neben den beiden Schwammmaterialien Polyvinylalkohol und Polyurethan als Wundeinlage zunehmend Anwendung. Wichtig für die Anwendung ist, ob es für die Einlagen Unterschiede bei der Anwendung und Funktion gibt, gerade bei großen, tiefen, stark sezernierenden und komplizierten Wunden. Ziel dieser Arbeit war es, die Frage zu beantworten, ob es Unterschiede gibt und wie diese sich auf die Anwendung auswirken. Zudem sollte eine Literaturübersicht dargestellt werden.

Methodik: Hierfür kam eine glatte Tischoberfläche zur Messung des Drucks über weite Distanzen zum Einsatz, sowie avitale Rindermuskulatur als simuliertes Modell- Wundgewebe. Auf diese Wundmodelle wurden Schwämme aus Polyvinylalkohol und Polyurethan, sowie Gaze aufgebracht. Mittels zweier kommerziell erhältlichen Vakuumpumpen (ActiV.A.C./ InfoV.A.C., KCI, 65203 Wiesbaden) wurde über einen Ansaugstutzen ein Unterdruck angelegt, dieser wird in 25 mmHg Schritten erhöht bis zum Zieldruck von -200mmHg. In fünf Versuchen wurde hierbei untersucht, inwieweit die Druckübertragung durch Änderung der Wundeinlage beeinflusst wird. Die Druckwerte wurden dazu von piezoresistiven Sonden (MIPM, 82291 Mammendorf) gemessen. Versuch 1: Druckmessung unter den Einlagen bei einer Einlagenstrecke von 49 cm Versuch 2: Untersuchung der Druckverhältnisse im Randbereich und am Wundbett einer komplizierten Wunde. Versuch 3: Einfluss der Einlage auf die Evakuierung von Wundsekret. Versuch 4: Druckmessung und Wundsekret-Evakuierung bei einer tiefen Wunde. Versuch 5: Einsatz der Wundeinlagen mit der Instilltherapie.
Zusätzlich wurde die bisher veröffentlichte Literatur nach Vor- und Nachteilen, sowie Unterschieden zwischen den Materialien untersucht.

Ergebnisse: Bei Versuch 1 zeigte sich hierbei im trockenen Zustand keine signifikanten Unterschiede zwischen der Gazeeinlage und dem Polyurethanschwamm, lediglich der Polyvinylalkoholschwamm zeigt ab einem Unterdruck über -125 mmHg einen Druckabfall. Bei Anfeuchtung und

Komprimierung des Gazematerials kam es zu einem sehr starken Abfall der gemessenen Druckwerte, ab einer Entfernung von mehr als 14 cm zur Sogquelle und einem Unterdruck von über -75 mmHg. Für die Anwendung in tiefen (Versuch 4), sowie in irregulären Wunden (Versuch 2) zeigten sich ebenfalls nur Druckunterschiede bei der Anfeuchtung und Komprimierung von Gazematerial. Hier fällt der gemessene Druck um teilweise mehr als 50% ab.
Beim Handling von auftretendem Wundsekret (Versuch 3 und 4) kam es zu keinen Unterschieden zwischen den 3 verwendeten Materialien. Sowohl bei der Dauer der Evakuierung von 100 ml Flüssigkeit (Versuch 3 und 4) als auch bei dem zurückbleibenden Flüssigkeitsrest in der tiefen Wunde (Versuch 4) kam es zu keinen signifikanten Unterschieden zwischen den verwendeten Materialien.

In der bisherigen Literatur zeigten sich vor allem Vorteile in der praktischen Anwendung der Gaze. Diese ist leichter einzubringen und auch auf gekrümmten Wundflächen anwendbar. Im Gegensatz zum Polyurethanschwamm kommt es nicht zum Einwachsen von Granulationsgewebe in die Gaze, was sich positiv auf den Patientenkomfort auswirkt. Ein wesentlicher Unterschied findet sich in der Art des Granulationsgewebes, dieses ist bei der Gaze dünner, aber stabiler als bei der Schwammeinlage. Zwar heilt das dickere Gewebe etwas schneller, es treten aber auch vermehrt Probleme auf. Zudem finden sich weniger sklerotische Komponenten nach Gaze-Anwendung. Dies führt zu einem leichteren Einwachsen von Blutgefäßen und einer geringeren Narbenbildung. Im Gegensatz zur Schwammeinlage lässt sich die Kontraktion nicht über die Größe der Einlage steuern, gerade bei Wunden, die einer Kontraktion bedürfen (Fasziotomiewunden), zeigen sich hier Nachteile. Unter dem Schwamm passen sich die Zellen besser den Bedürfnissen der frühen Wundheilung an, während es bei der Gaze zu einer höheren Apoptoserate kommt.

Schlussfolgerung: Generell sollte die Wahl des Einlagematerials je nach Wundbeschaffenheit, nach Art des Patienten und dessen Vorerkrankungen, sowie nach anatomischer Region getroffen werden. Hierbei sollte jedoch vermieden werden, das Gazematerial zu stark anfeuchten und zu komprimieren. Dies führt zu einem Druckabfall, der die Therapie negativ beeinflussen würde. Eine Kombination der Einlagematerialien, also Start der Therapie mit Gaze und Fortsetzung der Therapie mit Schwammeinlage kann eine Alternative darstellen.

6. Literatur

[1] Anesater E, Borgquist O, Hedstrom E, Waga J, Ingemansson R, and Malmsjo M. The influence of different sizes and types of wound fillers on wound contraction and tissue pressure during negative pressure wound therapy. Int Wound J 8: 336-342 (2011)

[2] Argenta LC, and Morykwas MJ. Vacuum-assisted closure: a new method for wound control and treatment: clinical experience. Ann Plast Surg 38: 563-577 (1997)

[3] Argenta LC, Morykwas MJ, Marks MW, DeFranzo AJ, Molnar JA, and David LR. Vacuum-assisted closure: state of clinic art. Plast Reconstr Surg 117: 127-142 (2006)

[4] Borgquist O GL, Ingemansson R, Malmsjoe M. Tissue ingrowth into foam but not into gauze during negative pressure wound therapy. Wounds 21: 302-309 (2009)

[5] Borgquist O, Gustafsson L, Ingemansson R, and Malmsjo M. Micro- and macromechanical effects on the wound bed of negative pressure wound therapy using gauze and foam. Ann Plast Surg 64: 789-793 (2010)

[6] Campbell PE. Surgical wound case studies with the versatile 1 wound vacuum system for negative pressure wound therapy. J Wound Ostomy Continence Nurs 33: 176-185; discussion 185-190 (2006)

[7] Campbell PE, Smith GS, and Smith JM. Retrospective clinical evaluation of gauze-based negative pressure wound therapy. Int Wound J 5: 280-286 (2008)
[8] Chadwick P. The use of negative pressure wound therapy in the diabetic foot. Br J Nurs 18: 12-16 (2009)

[9] Chariker ME, Gerstle TL, and Morrison CS. An algorithmic approach to the use of gauze-based negative-pressure wound therapy as a bridge to closure in pediatric extremity trauma. Plast Reconstr Surg 123: 1510-1520 (2009)

[10] Chariker ME, Jeter K.F., Tintle T.E., Bottsford J.E. Effective management of incisional and cutaneous fistulae with closed suction wound drainage. Contemp Surg 34: 59–63 (1989)

[11] Derrick KL, Norbury K, Kieswetter K, Skaf J, and McNulty AK. Comparative analysis of global gene expression profiles between diabetic rat wounds treated with vacuum-assisted closure therapy, moist wound healing or gauze under suction. Int Wound J 5: 615-624 (2008)

[12] Dorafshar AH, Franczyk M, Gottlieb LJ, Wroblewski KE, and Lohman RF. A prospective randomized trial comparing subatmospheric wound therapy with a sealed gauze dressing and the standard vacuum-assisted closure device. Ann Plast Surg 69: 79-84 (2012)

[13] Dunbar A, Bowers DM, and Holderness H, Jr. Silicone net dressing as an adjunct with negative pressure wound therapy. Ostomy Wound Manage 51: 21-22 (2005)

[14] Dunn R, Hurd T, Chadwick P, Cote J, Cockwill J, Mole T, and Smith J. Factors associated with positive outcomes in 131 patients treated with gauze-based negative pressure wound therapy. Int J Surg 9: 258-262 (2011)

[15] Dunn RM, Ignotz R, Mole T, Cockwill J, and Smith JM. Assessment of gauze-based negative pressure wound therapy in the split-thickness skin graft clinical pathway-an observational study. Eplasty 11: e14 (2011)

[16] Fleischmann W, Lang E, and Kinzl L. Vacuum assisted wound closure after dermatofasciotomy of the lower extremity. Unfallchirurg 99: 283-287 (1996)

[17] Fleischmann W, Strecker W, Bombelli M, and Kinzl L. Vacuum sealing as treatment of soft tissue damage in open fractures. Unfallchirurg 96: 488-492 (1993)

[18] Fraccalvieri M, Ruka E, Bocchiotti MA, Zingarelli E, and Bruschi S. Patient's pain feedback using negative pressure wound therapy with foam and gauze. Int Wound J 8: 492-499 (2011)

[19] Fraccalvieri M, Zingarelli E, Ruka E, Antoniotti U, Coda R, Sarno A, Bocchiotti MA, and Bruschi S. Negative pressure wound therapy using gauze and foam: histological, immunohistochemical and ultrasonography morphological analysis of the granulation tissue and scar tissue. Preliminary report of a clinical study. Int Wound J 8: 355-364 (2011)

[20] Glass GE, and Nanchahal J. The methodology of negative pressure wound therapy: separating fact from fiction. J Plast Reconstr Aesthet Surg 65: 989-1001 (2012)

[21] Goutos I, and Ghosh SJ. Gauze-based negative pressure wound therapy as an adjunct to collagen-elatin dermal template resurfacing. J Wound Care 20: 55-60 (2011)

[22] Hu KX, Zhang HW, Zhou F, Yao G, Shi JP, Wang LF, and Hou ZQ. [A comparative study of the clinical effects between two kinds of negative-pressure wound therapy]. Zhonghua Shao Shang Za Zhi 25: 253-257 (2009)

[23] Hunter JE, Teot L, Horch R, and Banwell PE. Evidence-based medicine: vacuum-assisted closure in wound care management. Int Wound J 4: 256-269 (2007)

[24] Hurd T, Chadwick P, Cote J, Cockwill J, Mole TR, and Smith JM. Impact of gauze-based NPWT on the patient and nursing experience in the treatment of challenging wounds. Int Wound J 7: 448-455 (2010)

[25] Isago T, Nozaki M, Kikuchi Y, Honda T, and Nakazawa H. Effects of different negative pressures on reduction of wounds in negative pressure dressings. J Dermatol 30: 596-601 (2003)

[26] Jeffery SL. Advanced wound therapies in the management of severe military lower limb trauma: a new perspective. Eplasty 9: e28 (2009)

[27] Jeffery SL. The use of an antimicrobial primary wound contact layer as liner and filler with NPWT. J Wound Care 23: S3-14 (2014)

[28] Jones SM, Banwell PE, and Shakespeare PG. Interface dressings influence the delivery of topical negative-pressure therapy. Plast Reconstr Surg 116: 1023-1028 (2005)

[29] Kairinos N, Pillay K, Solomons M, Hudson DA, and Kahn D. The influence manufacturers have on negative-pressure wound therapy research. Plast Reconstr Surg 133: 1178-1183 (2014)

[30] Kannon GA, and Garrett AB. Moist wound healing with occlusive dressings. A clinical review. Dermatol Surg 21: 583-590 (1995)

[31] Lessing C, Slack P., Hong KZ, Kilpadi D., McNulty A. Negative pressure wound therapy with controlled saline instillation (NPWTi): Dressing properties and granulation response in vivo. Wounds 23(10): 309-319 (2011)

[32] Maier D. Untersuchung über die physikalischen Grundlagen der Vakuumversiegelung. Universität Ulm Diss (2002)

[33] Malmsjo M, Gustafsson L, Lindstedt S, Gesslein B, and Ingemansson R. The effects of variable, intermittent, and continuous negative pressure wound therapy, using foam or gauze, on wound contraction, granulation tissue formation, and ingrowth into the wound filler. Eplasty 12: e5 (2012)

[34] Malmsjo M, Gustafsson L, Lindstedt S, and Ingemansson R. Negative pressure wound therapy-associated tissue trauma and pain: a controlled in vivo study comparing foam and gauze dressing removal by immunohistochemistry for substance P and calcitonin gene-related peptide in the wound edge. Ostomy Wound Manage 57: 30-35 (2011)

[35] Malmsjo M, and Ingemansson R. Effects of green foam, black foam and gauze on contraction, blood flow and pressure delivery to the wound bed in negative pressure wound therapy. J Plast Reconstr Aesthet Surg 64: e289-296 (2011)

[36] Malmsjo M, Ingemansson R, Lindstedt S, and Gustafsson L. Comparison of bacteria and fungus-binding mesh, foam and gauze as fillers in negative pressure wound therapy--pressure transduction, wound edge contraction, microvascular blood flow and fluid retention. Int Wound J 10: 597-605 (2013)

[37] Malmsjo M, Ingemansson R, Martin R, and Huddleston E. Negative-pressure wound therapy using gauze or open-cell polyurethane foam: similar early effects on pressure transduction and tissue contraction in an experimental porcine wound model. Wound Repair Regen 17: 200-205 (2009)

[38] Malmsjo M, Ingemansson R, Martin R, and Huddleston E. Wound edge microvascular blood flow: effects of negative pressure wound therapy using gauze or polyurethane foam. Ann Plast Surg 63: 676-681 (2009)

[39] Malmsjo M, Lindstedt S, and Ingemansson R. Effects of foam or gauze on sternum wound contraction, distension and heart and lung damage during negative-pressure wound therapy of porcine sternotomy wounds. Interact Cardiovasc Thorac Surg 12: 349-354 (2011)

[40] Malmsjo M, Lindstedt S, and Ingemansson R. Effects on heart pumping function when using foam and gauze for negative pressure wound therapy of sternotomy wounds. J Cardiothorac Surg 6: 5 (2011)

[41] Malmsjo M, Lindstedt S, and Ingemansson R. Influence on pressure transduction when using different drainage techniques and wound fillers (foam and gauze) for negative pressure wound therapy. Int Wound J 7: 406-412 (2010)

[42] Malmsjo M, Lindstedt S, Ingemansson R, and Gustafsson L. Use of bacteria- and fungus-binding mesh in negative pressure wound therapy provides significant granulation tissue without tissue ingrowth. Eplasty 14: e3 (2014)

[43] McNulty AK, Schmidt M, Feeley T, and Kieswetter K. Effects of negative pressure wound therapy on fibroblast viability, chemotactic signaling, and proliferation in a provisional wound (fibrin) matrix. Wound Repair Regen 15: 838-846 (2007)

[44] McNulty AK, Schmidt M, Feeley T, Villanueva P, and Kieswetter K. Effects of negative pressure wound therapy on cellular energetics in fibroblasts grown in a provisional wound (fibrin) matrix. Wound Repair Regen 17: 192-199 (2009)

[45] Medgadet. http://www.medgadget.com/2010/04/kcis_new_portable_negative_pressure_system_going_to_market.html. (06.06.2016)

[46] Miller MS, and Lowery CA. Negative pressure wound therapy: "a rose by any other name". Ostomy Wound Manage 51: 44-46, 48-49 (2005)

[47] Mooney JF, 3rd, Argenta LC, Marks MW, Morykwas MJ, and DeFranzo AJ. Treatment of soft tissue defects in pediatric patients using the V.A.C. system. Clin Orthop Relat Res 26-31 (2000)

[48] Morykwas MJ, Argenta LC, Shelton-Brown EI, and McGuirt W. Vacuum-assisted closure: a new method for wound control and treatment: animal studies and basic foundation. Ann Plast Surg 38: 553-562 (1997)

[49] Morykwas MJ, Faler BJ, Pearce DJ, and Argenta LC. Effects of varying levels of subatmospheric pressure on the rate of granulation tissue formation in experimental wounds in swine. Ann Plast Surg 47: 547-551 (2001)

[50] Morykwas MJ, Simpson J, Punger K, Argenta A, Kremers L, and Argenta J. Vacuum-assisted closure: state of basic research and physiologic foundation. Plast Reconstr Surg 117: 121S-126S (2006)

[51] Nguyen TQ, Franczyk M, Lee JC, Greives MR, O'Connor A, and Gottlieb LJ. Prospective randomized controlled trial comparing two methods of securing skin grafts using negative pressure wound therapy: vacuum-assisted closure and gauze suction. J Burn Care Res 36: 324-328 (2015)

[52] Psoinos CM, Ignotz RA, Lalikos JF, Fudem G, Savoie P, and Dunn RM. Use of gauze-based negative pressure wound therapy in a pediatric burn patient. J Pediatr Surg 44: e23-26 (2009)

[53] Rajakaruna C, and Marchbank A. Gauze-based negative pressure wound therapy to infected deep sternotomy wound complicated by cardiac tamponade: a case report. Int Wound J 8: 96-98 (2011)

[54] Saxena V, Hwang CW, Huang S, Eichbaum Q, Ingber D, and Orgill DP. Vacuum-assisted closure: microdeformations of wounds and cell proliferation. Plast Reconstr Surg 114: 1086-1096; discussion 1097-1088 (2004)

[55] Sedlarik K. Comparative clinical study on wound resorption. Zentralbl Chir 95: 601-606 (1970)

[56] Skand K. http://www.orthohyd.com/home/know-your-treatment/vac-treatment. (06.06.2016)

[57] Taylor CJ, Chester DL, and Jeffery SL. Functional splinting of upper limb injuries with gauze-based topical negative pressure wound therapy. J Hand Surg Am 36: 1848-1851 (2011)

[58] Torbrand C, Ingemansson R, Gustafsson L, Paulsson P, and Malmsjo M. Pressure transduction to the thoracic cavity during topical negative pressure therapy of a sternotomy wound. Int Wound J 5: 579-584 (2008)

[59] von Thun-Hohenstein H. Druckverhältnisse im Bereich der Grenzschicht Schwamm / Gewebe während der Anwendung der Vakuumversiegelung. Universität Ulm Diss (2006)

[60] Walgenbach KJR, A.W. ; Andree, C. ; Galla, T.J., Schäfer, D.J. ; Kopp, J. ; Bannasch, H. ; Voigt, M. ; Horch, R.E. ; Stark, G.B. Induktion von Angiogenese durch Vakuumversiegelung. Klinische und histologische Untersuchungen. ZfW 13: 9-10 (2000)

[61] Wild T, Schoettel, M. , Renner, B., Zeugswetter, S., Fitzal, F., Rinder, H., Hölzenbein, T. Schwarzer oder weißer Schwamm. Eur Surg 35: 43-44 (2003)

[62] Wild T, Wetzel-Roth W, and Zoch G. Consensus of the German and Austrian Societies for Wound Healing and Wound Management on vacuum closure and the V.A.C. treatment unit. Zentralbl Chir 129 Suppl 1: S7-11 (2004)

[63] Wilkes R, Zhao Y, Kieswetter K, and Haridas B. Effects of dressing type on 3D tissue microdeformations during negative pressure wound therapy: a computational study. J Biomech Eng 131: 031012 (2009)

[64] Willy C. *Die Vakuumtherapie: Grundlage, Indikation, Fallbeispiele, praktische Tipps*. Lindqvist Book Publishing; Auflage: 1., Aufl, 2005, p. 4.

[65] Willy C, Gerngross H, and Sterk J. Measurement of intracompartmental pressure with use of a new electronic transducer-tipped catheter system. J Bone Joint Surg Am 81: 158-168 (1999)

[66] Willy C, von Thun-Hohenstein H, von Lubken F, Weymouth M, Kossmann T, and Engelhardt M. [Experimental principles of the V.A.C.-therapy -- pressure values in superficial soft tissue and the applied foam]. Zentralbl Chir 131 Suppl 1: S50-61 (2006)

[67] Witkowski W, Jawien A, Witkiewicz W, and Zon B. Initial multi-centre observations upon the effect of a new Topical Negative Pressure device upon patient and clinician experience and the treatment of wounds. Int Wound J 6: 167-174 (2009)

[68] Zannis J, Angobaldo J, Marks M, DeFranzo A, David L, Molnar J, and Argenta L. Comparison of fasciotomy wound closures using traditional dressing changes and the vacuum-assisted closure device. Ann Plast Surg 62: 407-409 (2009)

7. Danksagung

Ich danke allen Menschen, durch die die Erstellung dieser Arbeit möglich wurde

Insbesondere meinem Doktorvater Prof. Dr. Christian Willy für die Überlassung des Themas und die stets gute Betreuung, Motivation und Geduld, trotz meiner Fachfremdheit und der geographischen Hindernisse.

Den Korrekturlesern der Arbeit, auch wenn ich nicht alle Ratschläge umgesetzt habe.

Meinem Bruder Robert Kohlschmitt für seinen Ehrgeiz, der mich immer wieder dazu motivierte „Nachzuziehen“

Den Firmen KCI und Smith & Nephew, sowie dem Bundeswehrkrankenhaus Ulm für die Bereitstellung der Gerätschaften, Räumlichkeiten und Materialien, sowie bei der Organisation der unzähligen Papers.

Besonderen Dank gilt meiner gesamte Familie und meinen Freunde für die Unterstützung und Ratschläge während der Erstellung dieser Arbeit. Vor allem meinen Eltern für die Ermöglichung meines Zahnmedizinstudiums und den stetigen Rückhalt.

Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt