Chirurgische Klinik
Bundeswehrkrankenhaus Ulm
(Klinikleiter OTA Dr. R. Steinmann)

Druckverhältnisse im Bereich der Grenzschicht Schwamm / Gewebe während der Anwendung der Vakuumversiegelung.

- Eine klinisch-experimentelle Studie -

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

Vorgelegt von Hinnerk von Thun-Hohenstein
Osnabrück

2006

Diese Dissertation ist
Herrn Professor Dr. H. Gerngroß
gewidmet.

..

Amtierender Dekan:Prof. Dr. Klaus-Michael Debatin

1. Berichterstatter: PD Dr. Christian Willy

2. Berichterstatter: PD Dr. Michael Kramer

Tag der Promotion:14.12.2006

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis **6**

1 Einleitung **7**

2 Material und Methoden **14**
2.1 Materialien 14
2.1.1 Oberflächen 14
2.1.2 Wund-Einlagen 15
2.1.3 Abdeckfolien und Abdichtung 17
2.1.4 Unterdruckerzeugung 17
2.2 Messtechnik 19
2.2.1 Messplatz und Sonden 19
2.3 Datenverarbeitung und Statistik 21
2.4 Versuche 22
2.4.1 Modellversuche zur Darstellung der Druckverhältnisse unter PVA- und PU-Schwämmen bei Variation der Messfensterausrichtung. 22
2.4.2 Messung über größere Entfernungen 25
2.4.3 Messung im Rindermuskel 28
2.4.4 Messung im humanen Musc. tibialis anterior 30

3 Ergebnisse **32**
3.1 Druckverhältnisse im Modellversuch bei Variation der Messfensterausrichtung. 32
3.2 Druckweiterleitung durch den Schwamm über längere Entfernung 37
3.3 Druckverhältnisse in vitro am Schwamm/Muskel-Interface 39
3.4 Druckverhältnisse in vivo am Schwamm/ Muskel-Interface 41
3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse 42

4 Diskussion **43**
4.1 Diskussion der Versuchssettings 43
4.2 Druckmuster am Interface Schwamm/Wunde und Auswirkung des Vakuums auf das Gewebe 48
4.3 Fazit für die Praxis 55

5 Zusammenfassung **56**

6 Literatur 58

7 Abbildungsverzeichnis 66

8 Danksagung 67

Abkürzungsverzeichnis

Abb Abbildung

F French = Größeneinheit für den Durchmesser von Kathetern.
Alternativ im englischen Sprachraum zu Charrière (Charr) verwandt.
1 Charr / 1 F = 1/3 mm.

MIPM Mammendorfer Institut für Physik und Medizin

mmHg Millimeter Quecksilbersäule (Einheit für Druck)

Pa Pascal (SI-Einheit für Druck)

PU Polyurethan

PVA Polyvinylalkohol

T.R.A.C. therapeutic related accurate care, im Rahmen dieser Arbeit auch als *trac* verwandt. (*trac-pad connector*)

V.A.C. Vacuum Assisted Closure

VVS Vakuumversiegelung

1 Einleitung

Trotz des allgemeinen Fortschritts in allen Bereichen der Chirurgie bleiben einige Gebiete dieser Disziplin noch häufig frustrierend oder zumindest zäh im Entwickeln eines Behandlungserfolges: die Therapie von chronischen und / oder infizierten Wunden. Die Palette an Behandlungsansätzen reicht von aggressiv-chirurgischen Maßnahmen über physiologisch-biochemische Wege mittels lokaler Applikation von Wachstumsfaktoren oder elektrischer Stimulation oder systemischen Antibiotikatherapien bis hin zu naturheilkundlich orientierten Therapien. Je nach Methode kann das kosmetische Outcome frustrierend und die Rezidivrate recht hoch sein, insbesondere stellt sich ein Behandlungserfolg häufig - wenn überhaupt - erst schleppend ein. Eine neue Option in der Versorgung solcher schwierigen Wunden stellt die Vakuumversiegelung (VVS) dar. Diese recht junge Therapiemöglichkeit erzeugt sehr gute Behandlungsergebnisse, was schon die Beobachtungen der Gruppen um W. Fleischmann in Ulm und Bietigheim [19, 15, 20, 16] und um M. Morykwas und L. Argenta [39, 38, 40, 4, 5] in Winston-Salem seit 1989 immer wieder zeigen und gegenwärtig mit zunehmender Bekanntheit der Vakuumversiegelung auch in anderen Arbeiten wiedergegeben wird [43, 2, 6].

Grundsätzlich wird bei der Vakuumversiegelung eine Wunde nach sorgfältiger chirurgischer Säuberung gegebenenfalls mit Débridement zunächst mit einem möglichst genau angepassten offenporigen Schwamm aus Polyvinylalkohol(PVA) oder Polyurethan (PU) ausgefüllt, der Schwamm wird dabei nach Möglichkeit an den Wundrändern fixiert. Danach wird das Wundgebiet mittels einer atmungsaktiven, semipermeablen, Wasser abweisenden Polyurethanfolie abgedeckt und dadurch luftdicht versiegelt. Anschließend wird an das Wunde-Schwamm-Folie Gebilde ein Unterdruck angelegt. Zur Unterdruckerzeugung werden idealerweise kommerziell erhältliche Vakuumpumpen genutzt. Die Unterdruckapplikation an und im

Schwamm kann direkt durch die PU-Folie mittels *trac-pad connector* oder zum Beispiel durch in den Schwamm eingebrachte Redondrainagen mit trans- oder epicutaner Ausleitung erfolgen [18, 17]. Einzelne Autoren empfehlen die Auswahl eines bestimmten Schwamm-Materials nach folgenden Gesichtspunkten [56]:

Tabelle 1: Indikationen zum Einsatz der einzelnen Schwammsorten [56]

schwarzer Schwamm (PU)	**weißer Schwamm (PVA)**
Fibrinanteil über 35%	Granulationsgewebeanteil über 65%
Flockiges, trübes Sekret	Seröses Sekret
Infizierte Wunden	Chirurgisch gesetzte Wunden

In der folgenden Tabelle (Tab. 2) sind die Indikationen und Kontraindikationen zur Vakuumversiegelung zusammengefasst. Sie sind auf Konsensuskonferenzen in den USA, der Schweiz, Österreich und in Deutschland in dieser Form anerkannt [26, 54].

Tabelle 2: Indikationen und Kontraindikationen der V.A.C.® Therapie.

Indikationen	**Kontraindikationen**
• Akute oder traumatische Wunde	• Karzinomwunden
• Chronische Wunden	• Gefäßanastomosen
• Dehiszente Wunden	• Freiliegende Gefäße
• Wundkonditionierung	• Blutungsneigung
• Verbrennungen	• Gerinnungsstörungen
• Meshgraftfixation	-
• Ulcus cruris venosum / Mixtum	-
• Diabetischer Fuß	-
• Temporäre Weichteildefektdeckung	-
• Infizierte Wunden nach chirurgischem	-
Debridement/Infektöffnung	-
• Abdomen apertum	-
• Lappenpräfabrikation	-
• Dekubitus	-
• Sternumosteomyelitis	-

Die Anwendung bei frei exponierten Gefäßprothesen und Gefäßanastomosen ist derzeit noch umstritten, zunehmend mehr klinische Beobachtungsstudien berichten jedoch über die erfolgreiche Anwendung der V.A.C.®-Therapie bei frei liegenden Grafts und Gefäßanastomosen [25, 30, 45]. Auch bei Karzinomwunden kann in Palliativsituationen eine Vakuumversorgung durchaus indiziert sein, da auch bei solchen Wunden zumindest eine Reduktion der Verbandswechselfrequenz bei hygienisch einwandfreiem Wundverhältniss ohne Sezernierung in das Verbandmaterial erreicht werden kann.

Als Ursachen des guten Outcomes unter Vakuumtherapie werden vor allem die Induktion der Granulationsgewebeneubildung und die Wundflächenverkleinerung genannt. Diese Effekte wurden selbst bei Wunden in bradytrophem Gewebe, über Knochen und über Metallimplantaten beobachtet.

Diese günstige Wirkung soll bedingt sein durch:

- Anregung der Granulationsgewebebildung [41, 22, 32],
- Erhöhung der Gewebeperfusion und des Wundrandgewebes. (In einigen Arbeiten wird eine Induktion eines bis zu 400% erhöhten lokalen Blutfluss berichtet [9, 31, 38, 46, 50, 58]),
- Anregung der Angiogenese [52],
- Verbesserung des lokalen Milieus in der Wunde [42],
- eine positive Beeinflussung von endothelialen Zellfunktionen, Endozytose, Zytoskelettsynthese und der Zelloberflächeneigenschaften [49],
- kontinuierliche Ableitung von Wundsekret,
- Reduktion des Gewebeödems durch Reduktion interstitieller Flüssigkeit [52, 37, 38],
- Reduzierung der Keimbesiedlung der Wunde [11, 12, 23, 38, 44, 53, 1, 8],
- und die Auswirkungen der mechanischen Kräfte, die auf die betroffenen Zellen einwirken und zu einer Stimulation der Zellproliferation führen sollen [27].

Die Vakuumversiegelung wird dabei allgemein als eine recht nebenwirkungsarme Therapie angesehen. An Nebenwirkungen der Vakuumversiegelung sind zu nennen:

- Mazeration und Druckschäden der angrenzenden Hautareale [7, 29],
- Einwachsen von Granulationsgewebe in den Schwamm und Verbleib von Schwamm-Material in der Wunde nach Verbandswechsel [3, 21, 33],
- Schmerzen durch den applizierten Unterdruck und beim Wechsel des Verbandes,
- Durchblutungsminderung durch mechanische Faktoren [51].

In der Literatur finden sich jedoch nur wenige Reports über wirklich ernsthafte Nebenwirkungen oder Zwischenfälle unter Vakuumtherapie. So ist ein Fall beschrieben, bei dem es aufgrund eines unbemerkten Sekretstaus unter dem Vakuumverband zur Ausbildung eines *toxic shock syndrome* kam [24]. Weiter sind zwei Fälle von hypovolämischen Schocksituationen beschrieben, die betroffenen Patienten verloren Vakuumtherapie-bedingt massiv Flüssigkeit [10]. Die Arbeitsgruppe um White berichtet den Fall einer arteriellen Erosionsblutung mit einem konsekutiven Blutverlust von etwa 2 Litern unter dem Vakuumverband [55]. In einem weiteren beschriebenen Fall kam es im Verlauf der Vakuum-Behandlung in der Wunde zu einer Veränderung der bakteriellen Kolonisation dahingehend, dass sich ein *shift* von einer gemischten hin zu einer anaeroben Flora ergab und eine anaerobe Sepsis verursachte [13]. Hierbei sei jedoch zu erwähnen, dass keiner der genannten 4 Fälle letale Folgen hatte und sämtliche Vakuumverbände unter Verwendung einer Redon-Ableitung angelegt wurden.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Fachwelt sich mittlerweile über den Nutzen und die Anwendung der Vakuumtherapie einig ist. Allerdings bringt Wackenfors noch 2004 die Situation der Grundlagenforschung zur Vakuumtherapie auf den Punkt, indem er sagt: *The physiological and molecular biological mechanism by which VAC therapy accelerates wound healing are to a large extent unknown.*

Es gibt derzeit noch relativ wenig Literatur zu den grundlegend physiologischen Vorgängen in einer vakuumversiegelten Wunde. Es findet sich lediglich eine Arbeit (eine Dissertation mit dazugehöriger Veröffentlichung) zu den physikalischen Grundlagen der Vakuumversiegelung [36, 35]. In dieser Arbeit wird auf die Druckverhältnisse unter einer Vakuumversiegelung eingegangen, weiter wird nach dem optimalen Behandlungsdruck gefragt und das Verhalten eines Vakuumschwammes im Einsatz unter verschiedenen Anwendungsdrücken wird aufgezeigt. Allerdings liegt der Schwer-

punkt dieser Forschungsarbeit vorwiegend auf dem Verhalten unterschiedlicher Polyvinylalkohol (PVA)-Schwämme. Der allgemein ebenfalls mit großem Erfolg eingesetzte Polyurethan (PU)-Schwamm wird in der Studie nur bei Flowratenuntersuchungen beobachtet. Bei den Druckmessungen im Schwamm und an der Grenzfläche werden nur PVA-Schwämme untersucht. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass bereits Leitlinien vorbereitende Studien zum zeitlichen Ablauf einer kombinierten PU-PVA-Schwamm-Versorgung vorliegen [56], wäre eine ähnlich gelagerte Betrachtung des PU-Schwamms sicherlich von Interesse gewesen. Mayer berichtet in seiner Arbeit das Auftreten ausschließlich positiver Druckwerte bei Messungen innerhalb des Schwamms unter Unterdruck sowie bei Versuchsanordnungen zur Wundsimulation mittels Grapefruits oder direkt auf einer Holzplatte. Lediglich in einer Versuchsanordnung, in der die Drucksonde keinerlei Kontakt zu umgebenden Strukturen wie Folie, Schwamm oder Untergrund hatte, wurden negative Druckwerte ermittelt. Hier war die Druckmess-Sonde in eine Höhle aus Knetgummi eingearbeitet worden, die eine Wundtasche simulieren sollte. Mayer erklärt diese Messergebnisse durch einen durch den Verband aufgebauten Anpressdruck auf den Messkatheter und somit auf die behandelte Wunde. Aus den erhobenen Messergebnissen schlussfolgert Mayer, dass der positive Effekt einer Vakuumversiegelung hauptsächlich in der Reduktion des Wundsekretes liegt. In den elektronenmikroskopischen Untersuchungen der einzelnen Schwamm-Materialen zeigt er, dass grade bei hohen Unterdruckwerten von 600 mm-Hg die Poren der Schwämme groß genug bleiben, um einen suffizienten Abfluss sämtlicher auch korpuskulären Wundsekretanteile zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur jeweils an einer Stelle im Vakuumverband gemessen, ein räumliches Bild der möglichen und wahrscheinlichen Druckgradienten innerhalb eines Schwammverbandes ist somit noch nicht bekannt. Eine zusätzliche Limitierung der Aussagekraft der Ergeb-

nisse von Mayer ergibt sich aus der benutzten Messtechnik. Die verwandte Druckmess-Sonde war für einen Druckbereich von -200 bis +3000 mmHg ausgelegt, eingesetzt wurden jedoch bis zu 900 mmHg Unterdruck, erzeugt aus Redon-Flaschen.

In der hier vorliegenden Arbeit soll auf die Druckverteilung im Schwamm und am Interface Schwamm-Wunde eingegangen sowie die Druckverteilung über größere Distanzen betrachtet werden. Wobei hier sowohl das Verhalten des PU- als auch des PVA-Schwamms beleuchtet wird.

Gemäß der Lehre Otto von Guerickes (1602 - 1686) ist Druck (und somit auch ein Vakuum) ein Skalar und hat keine Richtung. Für 'masselose' Gase ist der Druck (p) an jedem Punkt in einem gasgefüllten Raum von gleicher Größe, das bedeutet P = KONSTANT. Basierend auf diesem Grundsatz sollten auch in einem vakuumversiegelten Wundgebiet an allen Stellen gleiche Druckverhältnisse vorliegen. Die Druckverhältnisse an und vor allem im an die Wundoberfläche angrenzenden Gewebe sind jedoch bei der Vakuumversiegelung bisher nicht bekannt, außerdem gibt es widersprüchliche Theorien von negativen bis hin zu positiven Druckwerten an unterschiedlichen Stellen unter dem Verband. Weiter ist der Einfluss des verwendeten Schwamm-Materials (PU und PVA) bisher nicht untersucht worden. Ebenfalls soll geklärt werden, welche Druckverhältnisse bei großflächigen Vakuumversiegelungen über den gesamten Verbandbereich bestehen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher auf die folgenden Fragen eingegangen werden:

- ⇒ Wird der Unterdruck durch den Schwamm hindurch ungehindert auf die Wundoberfläche übertragen?
- ⇒ Gilt dies auch in einem Verband über 50 cm Länge?
- ⇒ Welche Sog-/Druckverhältnisse bestehen an der Wundoberfläche und im oberflächennahen Gewebe?

2 Material und Methoden

Grundsätzliches

Die SI-Einheit des Drucks ist das Pascal (Pa). Es definiert sich als der auf eine Fläche gleichmäßig wirkende Druck, bei dem senkrecht auf die Fläche 1 m^2 die Kraft 1 N ausgeübt wird.

Es gilt 1 Pa = 1 N m^{-2} = 1 m^{-1} kg s^{-2}.

In der Medizin wird jedoch fast immer anstelle der SI-Einheit Pa das traditionelle mmHg (Millimeter Quecksilber) genutzt, so auch in dieser Arbeit. 1 mmHg entspricht 133,322387 Pa.

Mit Überdruck werden im allgemeinen regionale Druckverhältnisse bezeichnet, die höher sind als der sie umgebende atmosphärische Druck, mit Unterdruck konsequenterweise die tieferen Druckverhältnisse.

2.1 Materialien

2.1.1 Oberflächen

Für die Versuche zur Unterdruckbestimmung im Schwamm wurde die Oberfläche eines Kunststofftisches benutzt. Bei der Messung im Gewebe wurde ein avitaler Rindermuskel genutzt. Die in Vivo Messung fand im Musc. tibialis anterior eines Patienten mit Kompartmentsyndrom statt. Zu diesem Versuch lag die Genehmigung der Ethikkommission vor, weiter war der Patient komplett über das geplante Vorgehen informiert und gab nach dokumentierter Aufklärung seine Einverständniserklärung in schriftlicher Form ab.

2.1.2 Wund-Einlagen

Für sämtliche Versuche wurden die kommerziell erhältlichen Schwämme V.A.C. VersaFoam® (Polyvinylalkohol, PVA) und V.A.C. GranuFoam® (Polyurethan, PU) der Firma KCI benutzt. Die Herstellerfirma gibt die Eigenschaften für die Produkte gemäß der folgenden Tabelle an:

Tabelle 3: Eigenschaften der Schwämme; Quelle: Herstellerangaben KCI, 2003

	V.A.C. VersaFoam®	**V.A.C. GranuFoam®**
Material	Polyvinylalkohol befeuchtet mit sterilem Wasser	Polyurethan
Porengröße	0,7 - 1,5 mm	0,4 - 2 mm
Porenstruktur	Nicht retikulierte Porenstruktur (Abb. 1)	Retikulierte Porenstruktur (Abb. 2)
Dichte	65 kg/m^3	25 kg/m^3

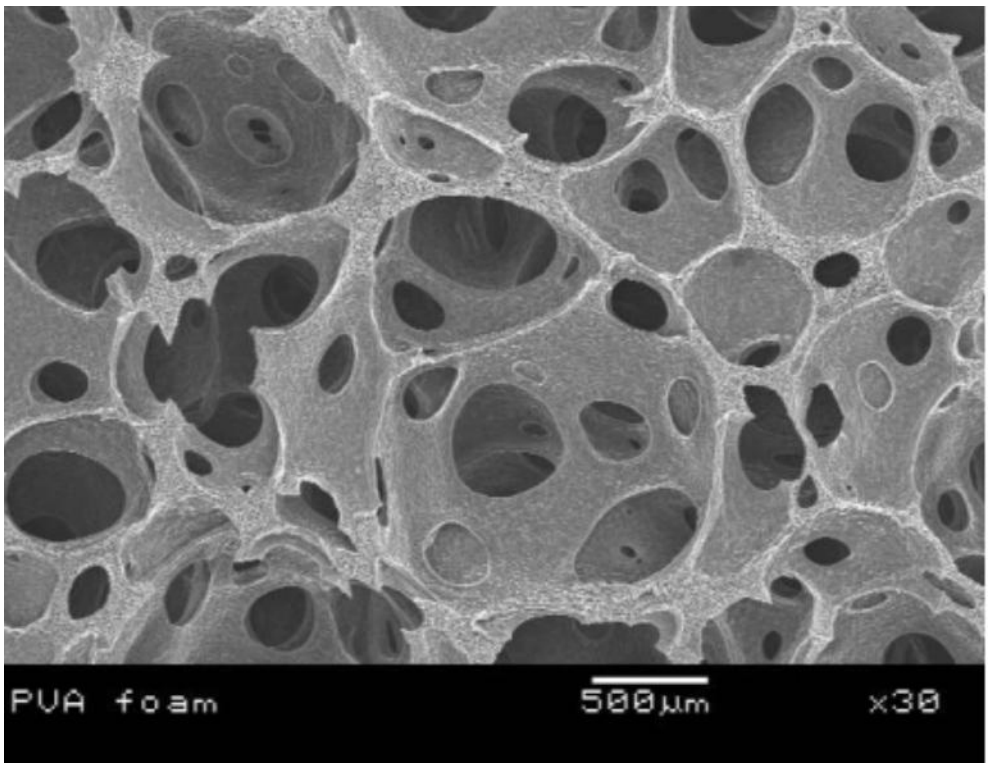


Abbildung 1: Elektronenmikroskopische Aufnahme des PVA-Schwamms, Quelle KCI.

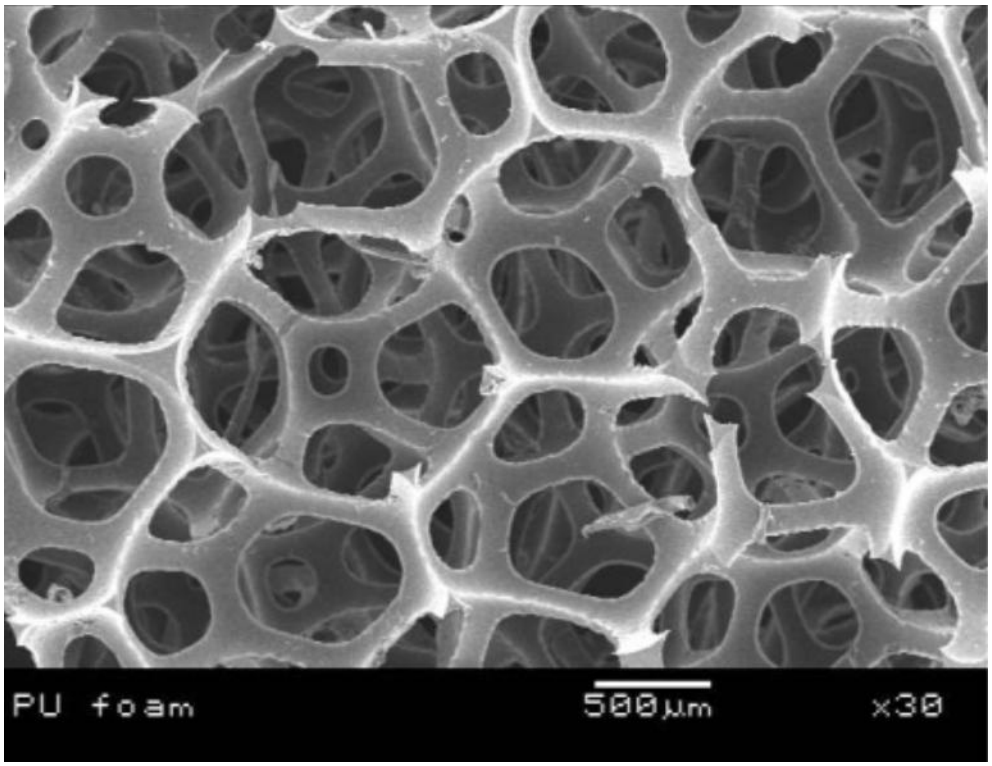


Abbildung 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme des PU-Schwamms, Quelle KCI.

2.1.3 Abdeckfolien und Abdichtung

Zur Versiegelung wurde die ebenfalls von KCI vertriebene wasserdampfdurchlässige V.A.C.® Drape PU-Folie benutzt. Um Druckverluste entlang der Sondenkabel zu verhindern, wurden diese in Gelkissen (Vacuseal® Gel) eingebettet.

2.1.4 Unterdruckerzeugung

Zur Unterdruckerzeugung wurde die V.A.C.®^{ATS} Therapieeinheit von KCI benutzt. Mittels dieses Gerätes können sowohl konstant als auch intermittierend Unterdrücke zwischen 50 und 200 mmHg in Schritten von 25 mmHg erzeugt werden.

Die Unterdrucktransmission von Therapieeinheit zum Schwamm-Verband erfolgt mittels *trac-pad connector*. Dieses ist ein Schlauchsystem, an dessen Ende eine elastische Kunststoffplatte angebracht ist. Nachdem zunächst die Abdeckfolie des Schwamm-Verbandes an beliebiger Stelle inzidiert wurde, wird diese Kunststoffplatte über dem entstandenen Loch platziert und durch eine ebenfalls am Schlauchsystem befestigte Klebefolie luftdicht mit dem Verband konnektiert (Abb. 3).

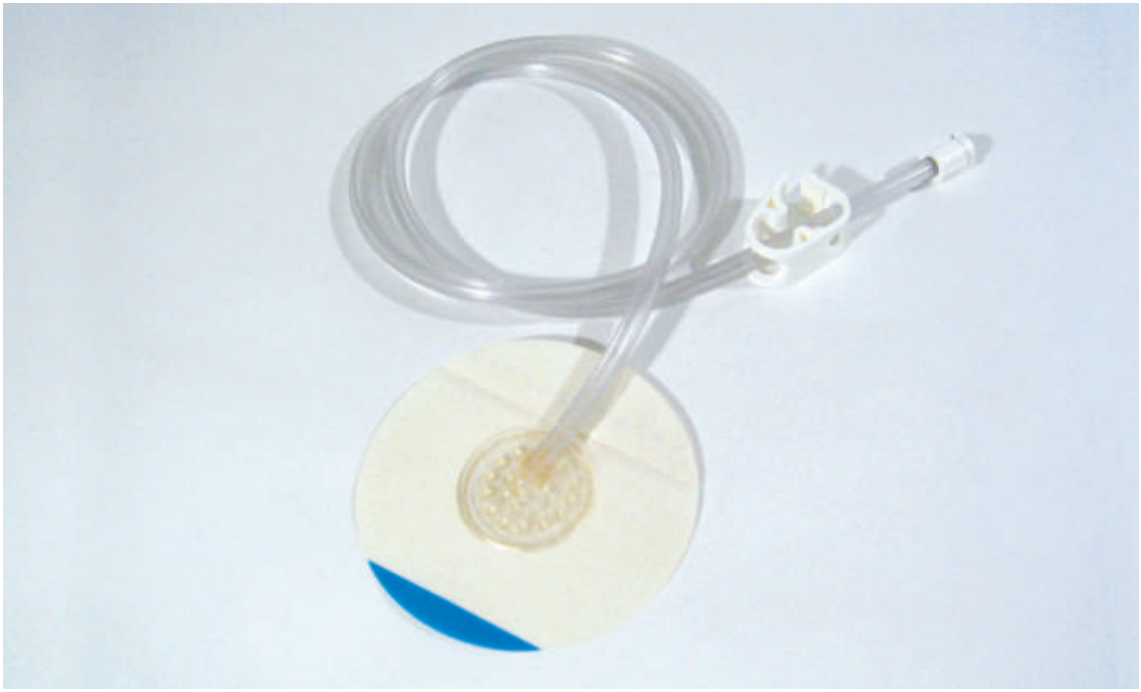


Abbildung 3: *trac-pad connector* zur Unterdrucktransmission zwischen Therapieeinheit und Schwamm-Verband.

2.2 Messtechnik

2.2.1 Messplatz und Sonden

Zur Aufnahme der Druckwerte wurde mit 4-8 piezoresistiven Drucksonden (Abb. 4) der Firma MIPM (Mammendorfer Institut für Physik und Medizin) gearbeitet. Verarbeitet wurden die Messimpulse über einen Verstärker (Argus Junior, MIPM). Dieser konnte über die serielle Schnittstelle mit einem Computer verbunden werden, die Mess-Software auf dem Rechner übergab die ermittelten Werte in einem Format, das direkt mit der Tabellenkalkulation EXCEL von Microsoft weiterverarbeitet werden konnte. Dieses Messgerät wurde bereits 1999 durch Willy et al. als praxistauglich getestet [57].
Die Messmethode beruht darauf, dass bestimmte Halbleiter unter Druck ihren spezifischen Widerstand ändern. Als Druckaufnehmer dient ein monokristallines Halbleitermaterial, mit dem die Druckübertragung direkt in eine elektrische Widerstandsänderung gewandelt wird. Die beim eingesetzten PC-Mess-System verwendeten Sonden sind so abgeglichen, dass sowohl die Nullpunktspannung als auch die Nullpunktdrift im Bereich von 20 °C bis 40 °C nahezu Null ist. Das Ausgangssignal des Druckaufnehmers (Halbleiterbrücke) liegt im μV-Bereich. Zur Vermeidung von Messfehlern sind deshalb höchst rauscharme Eingangsstufen mit großem Eingangswiderstand notwendig. Diese Präzisionsoperationsverstärker verstärken das Mess-Signal des Druckaufnehmers in den mV-Bereich. Mit dem System ist eine Messung im Bereich von ± 350 mmHg bei einer Auflösung von ± 1 mmHg möglich. Ein Vorverstärker- und Versorgungsmodul führt die Analogsignale des Druckaufnehmers der Empfangsstation zu.

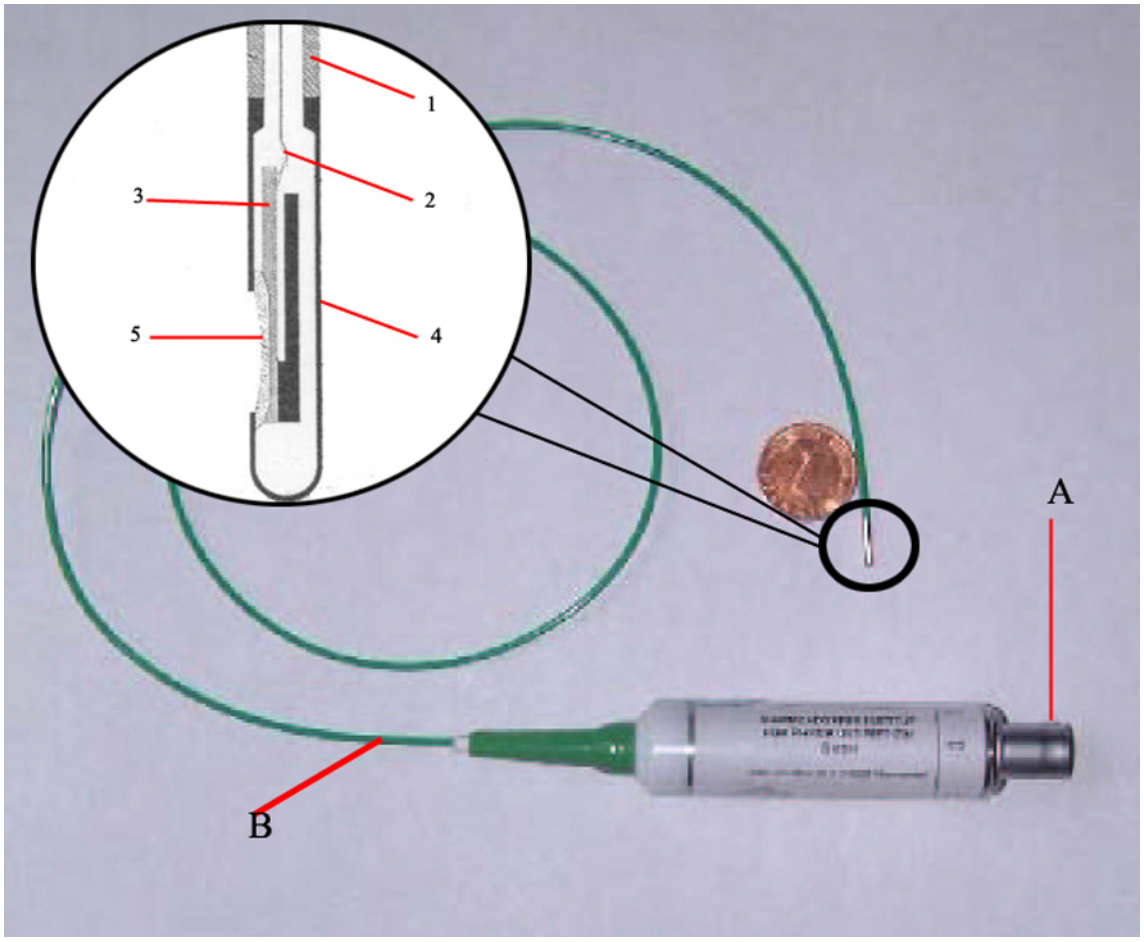


Abbildung 4: Ein zur Druckabtastung benutzter Messkatheter. Zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse befindet sich ein 1 Pfennig-Geldstück neben der Sondenspitze. Im Vergrösserungsbereich schematische Darstellung der Sondenspitze. 1: Polyurethanummantelung des ca. 60 cm langen Katheters. 2: Anschlussdrähte. 3: Monokristalliner Piezo-Halbleiter mit Chip. 4: Gehäuse aus rostfreiem Stahl. 5: Silikonüberzogenes Messfenster. A: Anschluss des Katheters zum Verstärker. B: Polyurethankatheter. Druckveränderungen werden nur in einem durch die Größe des Messfensters limitierten Bereich registriert. Quelle des Photos MIPM.

2.3 Datenverarbeitung und Statistik

Die ermittelten Daten wurden mittels der Tabellenkalkulation *EXCEL* der Firma Microsoft gesammelt und aufgearbeitet. Da eine Überprüfung auf Normalverteilung nicht durchgeführt wurde, erfolgte die graphische Darstellung unter Darstellung des Medians sowie der 25%- und 75%-Quartilen.

Aufgrund des geringen Umfangs der Messungen (n=8 pro Versuchsaufbau) wurde von einer statistischen Auswertung abgesehen, hinzu kommt, dass keine Gruppenvergleiche durchgeführt wurden, so dass eine vergleichende Statistik nicht notwendig wurde.

2.4 Versuche

2.4.1 Modellversuche zur Darstellung der Druckverhältnisse unter PVA- und PU-Schwämmen bei Variation der Messfensterausrichtung.

Auf einem Kunststofftisch wurden die Mess-Sonden in regelmäßigen Abständen zueinander angebracht, wobei die Messfenster der Sonden in Richtung der Unterlage zeigten. Um eine Dislokation der Sonden unter dem Schwamm zu vermeiden, wurden diese mittels Klebeband auf der Unterlage fixiert (Abb. 5). Es wurde zunächst der PVA-Schwamm (Abb. 6) aufgelegt und das gesamte Arrangement mit der V.A.C.® Drape PU-Folie luftdicht abgedeckt. Der *trac-pad connector* wurde mittig platziert. Hierauf erfolgte der Nullabgleich der Mess-Sonden. Es wurden dann durch die V.A.C.®^{ATS} Therapieeinheit ein Unterdruck von 50 mmHg erzeugt und für ca. 60 s aufrecht erhalten. Daraufhin wurde der Sog um 25 mmHg erhöht und erhalten. Die Sogerhöhung in 25 mmHg-Schritten erfolgte bis zum Erreichen des maximal erreichbaren Soges von 200 mmHg. Nach diesem Vorgehen erfolgten acht Messungen mit jeweilig kompletter Neuanordnung des Versuchssettings (n=8). Dann wurde in der folgenden Mess-Serie der PU-Schwamm als Auflage bei ansonsten analogem Vorgehen (Abb. 7) untersucht. Nach Beendigung der Versuchsreihen wurden die Sonden gedreht, so dass die Messfenster nun Richtung Schwamm zeigten, ansonsten wurde das oben beschriebene Vorgehen jeweils acht mal mit den beiden Schwammsorten wiederholt.



Abbildung 5: Applikation und Fixation der Sonden auf dem Tisch. Die Sonden sind mittels Klebestreifen auf der Unterlage fixiert, um ein unabsichtliches Drehen zu vermeiden, wobei die Messfenster frei gelassen wurden.



Abbildung 6: Versuchssetting mit dem PVA-Schwamm.
Das Bild zeigt den Schwamm unter Applikation eines Unterdrucks von 200 mmHg.

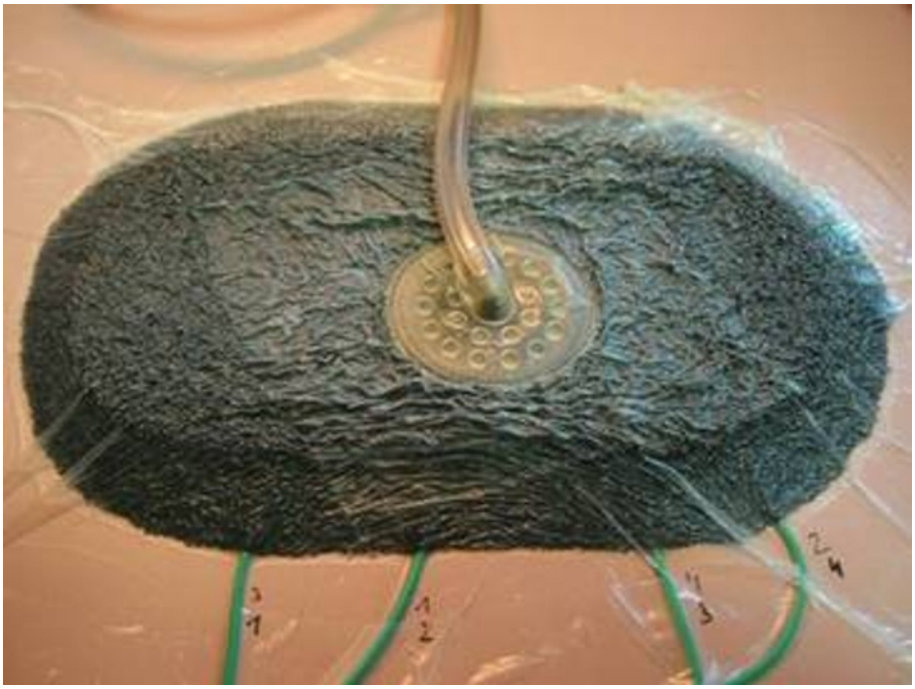


Abbildung 7: Versuchssetting mit dem PU-Schwamm.
Das Bild zeigt den Schwamm unter Applikation eines Unterdrucks von 200 mmHg.

2.4.2 Messung über größere Entfernungen

Auf einem Kunststofftisch wurden zunächst acht Mess-Sonden in jeweils 7,5 cm Abstand zueinander über eine Distanz von 52,5 cm angebracht, wobei das Messfenster der Sonden Richtung Schwamm zeigte. Jetzt wurde eine 60 cm lange PU-Schwamm- Strecke über die Sonden gelegt und mit der Folie luftdicht abgedeckt. Der *trac-pad connector* wurde am äußersten Ende der Strecke platziert. Hierauf erfolgte der Nullabgleich der Mess-Sonden. Es wurden dann durch die V.A.C.®^{ATS} Therapieeinheit ein Unterdruck von 50 mmHg erzeugt und für ca. 60 s aufrecht erhalten. Daraufhin wurde der Sog um 25 mmHg erhöht und erhalten. Die Sogerhöhung in 25 mmHg-Schritten erfolgte bis zum Erreichen des maximal erreichbaren Soges von 200 mmHg. Die Messungen wurden nach jeweiliger Neuanlage des Schwamms achtmal durchgeführt (n=8) (Abb. 8).

Zum gleichen Setting - diesmal mit dem PVA-Schwamm - wurde eine 60 cm lange Schwammstrecke, bestehend aus vier 7,5 x 15 cm PVA-Schwammstücken, über die Sonden gelegt und mit der Folie luftdicht abgedeckt. Ansonsten analoges Vorgehen wie bei der Messung unter dem PU-Schwamm. Die Messungen wurden ebenfalls nach Neuanlage der Schwämme achtmal durchgeführt (n=8) (Abb. 9).

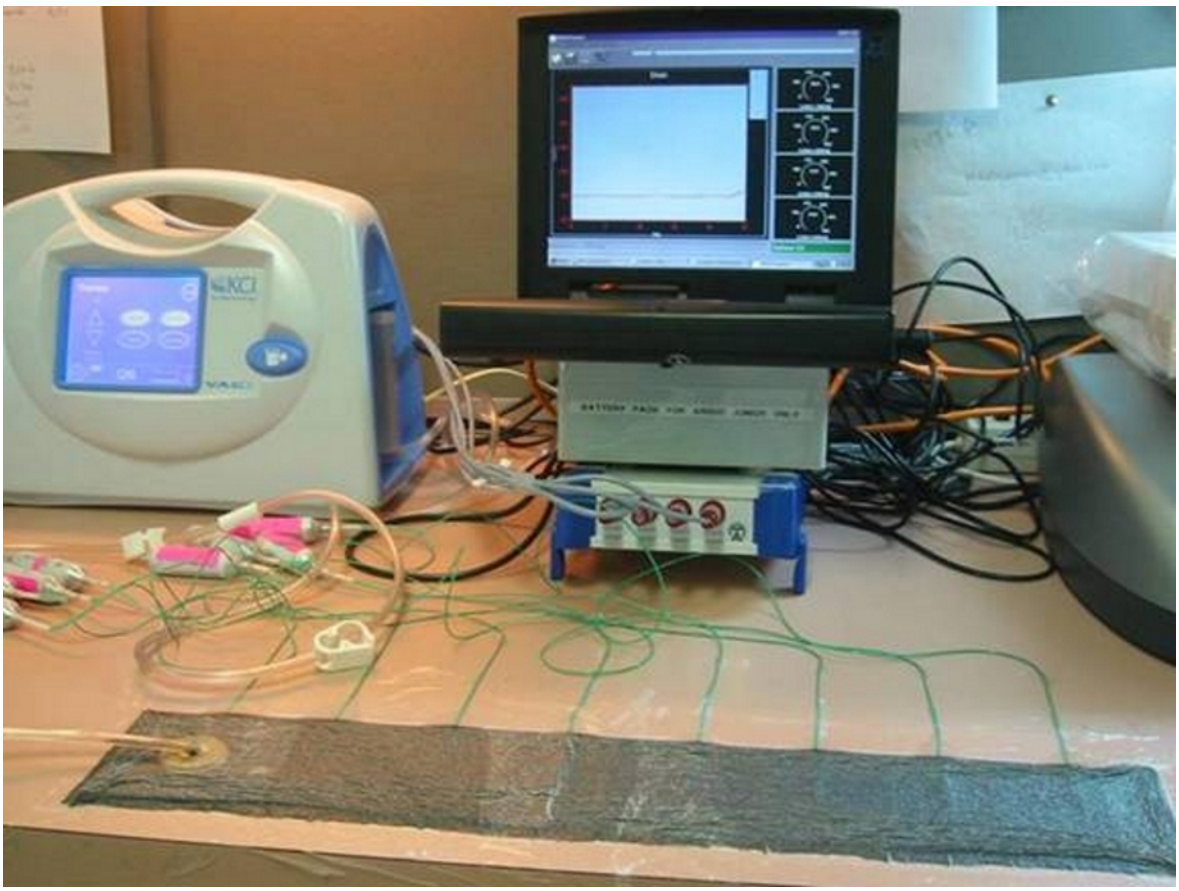


Abbildung 8: Versuchssetting über eine größere Entfernung mit dem PU-Schwamm. Länge des Schwamms 60 cm, Abstand der Sonden zueinander 7,5 cm. Mess-Station 1 (links) bei 0 cm Abstand zum *trac-pad connector*, Mess-Station 8 bei 52,5 cm Abstand zum *trac-pad connector*.



Abbildung 9: Versuchssetting über eine größere Entfernung mit PVA-Schwämmen. Länge der aneinander gereihten Schwämme 60 cm, Abstand der Sonden zueinander 7,5 cm. Mess-Station 1 (vorne im Bild) bei 0 cm Abstand zum *trac-pad connector*, Mess-Station 8 bei 52,5 cm Abstand zum *trac-pad connector*.

2.4.3 Messung im Rindermuskel

Um den Druck in verschiedenen Gewebeschichten abhängig vom angelegten Sog zu bestimmen, wurden - eine Wundoberfläche simulierend - jeweils vier Sonden an der Oberfläche, in ca. 0,5-2 mm Tiefe und in 3-8 mm Tiefe in einem Stück Rindermuskel fixiert. Die Messfenster wurden an der Oberfläche gegen das Fleischstück ausgerichtet (Abb. 10 und 11). Es wurden beide Schwammsorten getestet. Jede Messung wurde nach Lösen und Neuauflage des jeweiligen Schwamms insgesamt achtmal durchgeführt (n=8).



Abbildung 10: Versuchssetting am Rindermuskel. In dieser Abbildung sind die Druckmess-Sonden in 0,5-2 mm Gewebetiefe platziert.

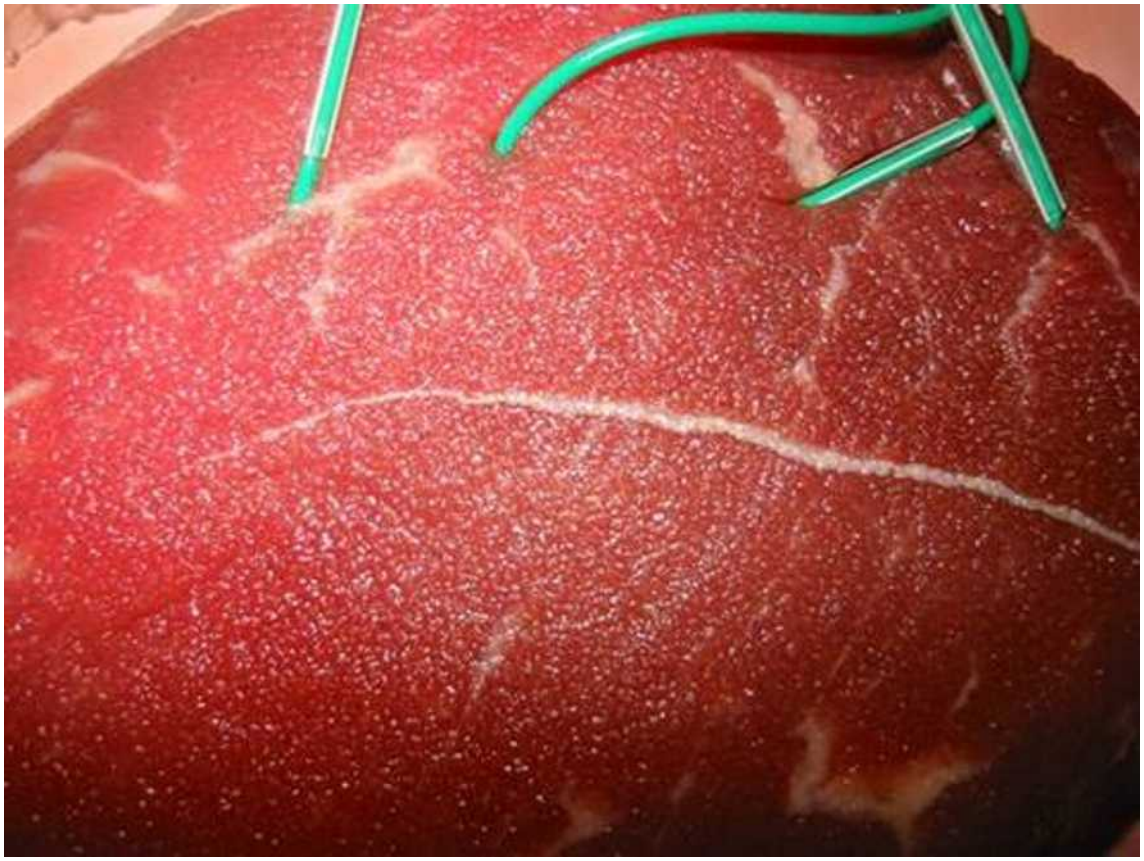


Abbildung 11: Versuchssetting am Rindermuskel. In dieser Abbildung sind die Druckmess-Sonden in 3-8 mm Gewebetiefe platziert.

2.4.4 Messung im humanen Musc. tibialis anterior

Um die Druckverhältnisse in verschiedenen Gewebeschichten auch in vitalem Gewebe bestimmen zu können, wurden im Rahmen der Versorgung eines Patienten mit einem Kompartmentsyndrom des Unterschenkels vier Druckmess-Sonden in ca. 2-3 mm Gewebetiefe über eine Länge von 5 cm im Musculus tibialis anterior implantiert. Die einzelnen Schritte der Sondenimplantation sind ausführlich beschrieben worden [57]. Kurz dargestellt erfolgte hierzu unter OP-Bedingungen drei Tage nach Fasziotomie wegen Unterschenkelkompartmentsyndrom nach breitflächiger Desinfektion der Haut das Einführen von vier 14-Gauge (⊘ 2,1 mm)-PTFE-Kanülen (Venenverweilkanülen) ohne zusätzliche Hautinzisionen in einem Einstichwinkel von 30°. Die Faszie des Musculus tibialis anterior wurde dabei durchstochen und die Nadelspitzen in der Tiefe des Wundgrundes ca. 2-3 mm unter der Wundoberfläche platziert. Anschließend mussten die Sonden mit steriler 0.9%-iger Kochsalzlösung benetzt, der Anschluss an das PC-Meßsystem durch Konnektion mit dem Verstärkermodul durchgeführt und nachfolgend, softwaregesteuert, der Offset-Abgleich für den Druckabgleich initiiert werden (Software-Selbsttest und Kalibration). Anschließend erfolgte das Entfernen der Trokare, das Vorschieben der 4-French-Drucksonden über die Braunülenspitze hinweg bis zur Nadelspitze. Abschließend wurden die Venenverweilkanülen über das Sondenkabel zurückgezogen, die Einstichstellen steril abgedeckt und die Sondenkabel mit Pflasterstreifen ohne Druckausübung auf den Weichteilen fixiert. Die Messungen wurden ausschließlich unter einem PU-Schwamm durchgeführt und erfolgten nach induziertem Sogverlust ohne Neuanlage des Schwamms insgesamt achtmal (n=8). (Abb. 12).

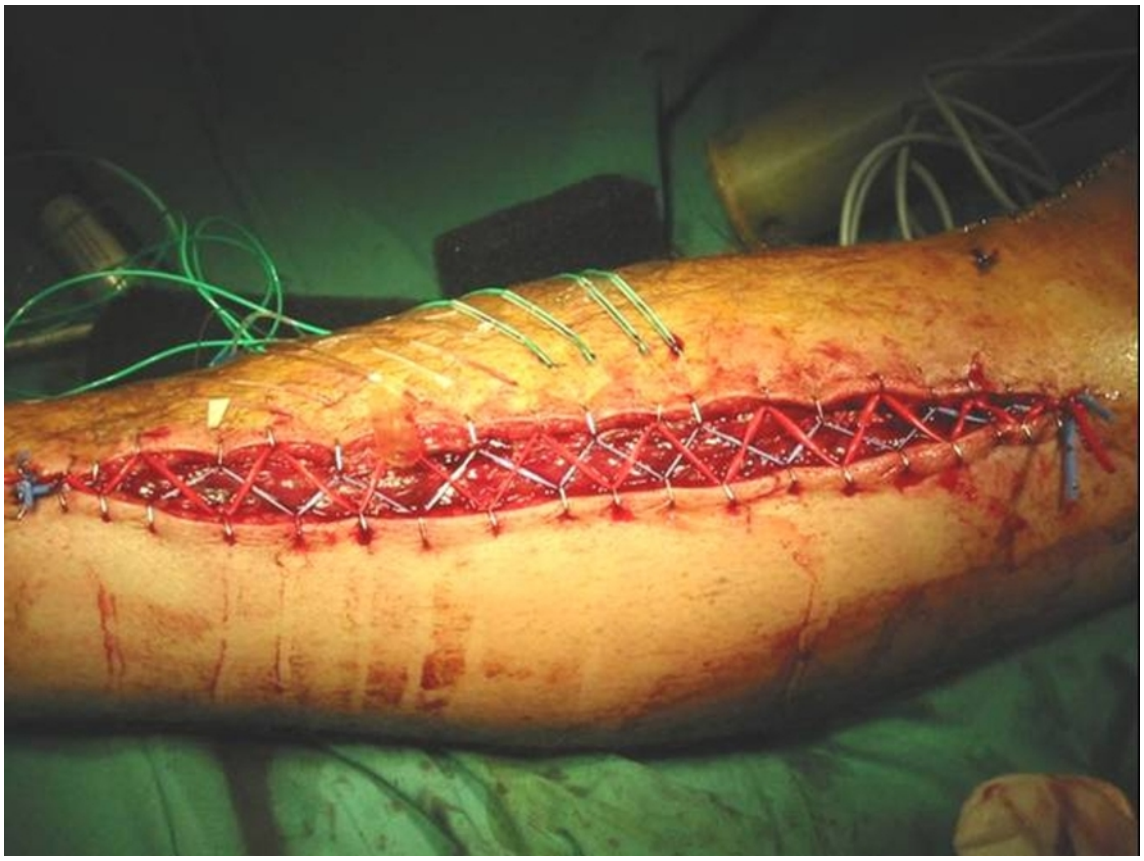


Abbildung 12: Shoelace-Technik zur Versorgung eines Patienten mit Kompartmentsyndrom im Musc. tibialis anterior. Die Faszioto-miewunde wird dabei zur Druckmessung unter Vakuumversiegelung genutzt. Die Druckmess-Sonden werden percutan ausgeleitet.

3 Ergebnisse

3.1 Druckverhältnisse im Modellversuch bei Variation der Messfensterausrichtung.

Ist das Messfenster des Druckmesskatheters gegen eine glatte harte Unterlage (Tisch) gerichtet und drückt somit kein Schwamm-Material und kein Weichteil in das Messfenster hinein auf den Druckaufnehmer, zeigt sich eine nahezu 1:1 Druckübertragung durch den Schwamm in die Tiefe an die Tischoberfläche. Dies gilt besonders für den PU-Schwamm, bei dem die 25%- und 75%-Quartilen über den gesamten Sogbereich von 50 - 200 mmHg nur zwischen -0.9 und 1.9 mmHg vom Median abweichen und auch die Minimal- und Maximalwerte in der Regel nur zwischen -2.5 und 3.5 mmHg vom Median verschieden sind (n = 8 Messungen) (Abb. 13).

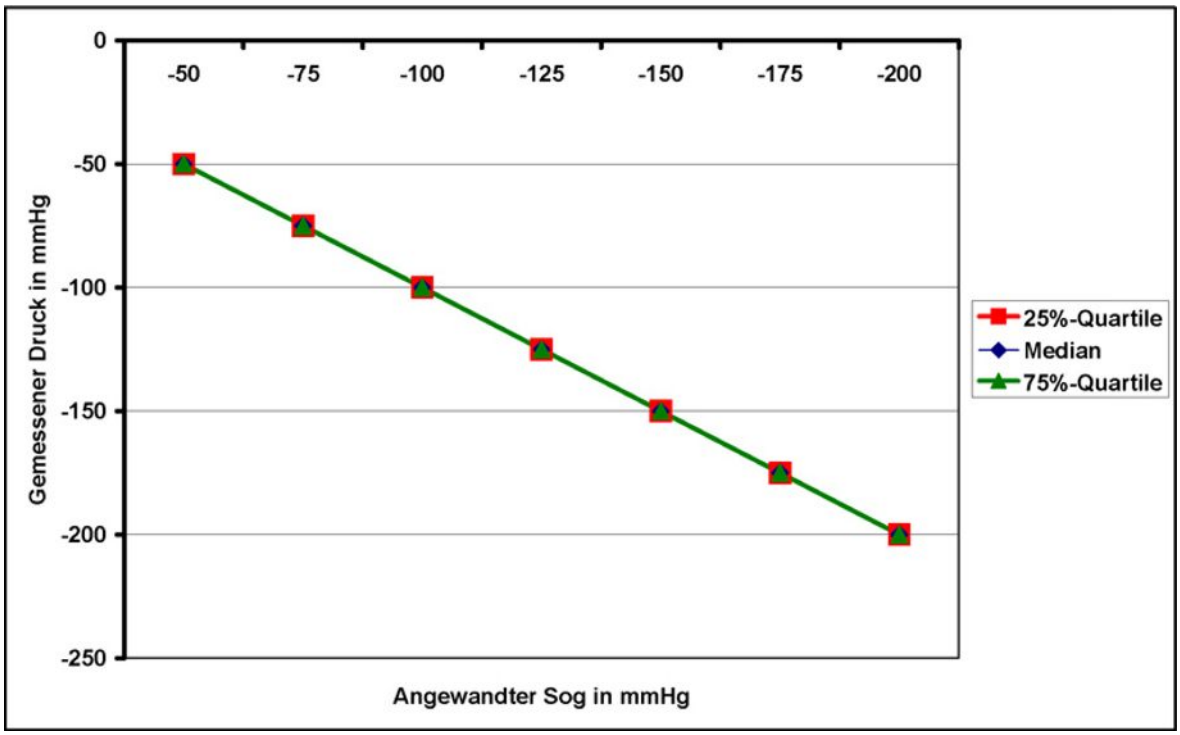


Abbildung 13: Beziehung zwischen angewandtem Sog (x-Achse) und an der Tischoberfläche gemessenen Druck (y-Achse) bei in Richtung auf den Tisch zeigendem Messfenster im PU-Schwamm. Werte angegeben als Median (blau), 25%-Quartile (rot) und 75%-Quartile (grün) sowie Minimal- und Maximalwerte (schwarz) (n = 8 Messungen).

Geringgradig größere Abweichungen ergeben sich beim Einsatz des PVA-Schwamms, bei dem die 25%- und 75%-Quartilen über den gesamten Sogbereich von 50 - 200 mmHg zwischen -6.5 und 8.4 mmHg vom Median abweichen (n = 8 Messungen) (Abb. 14).

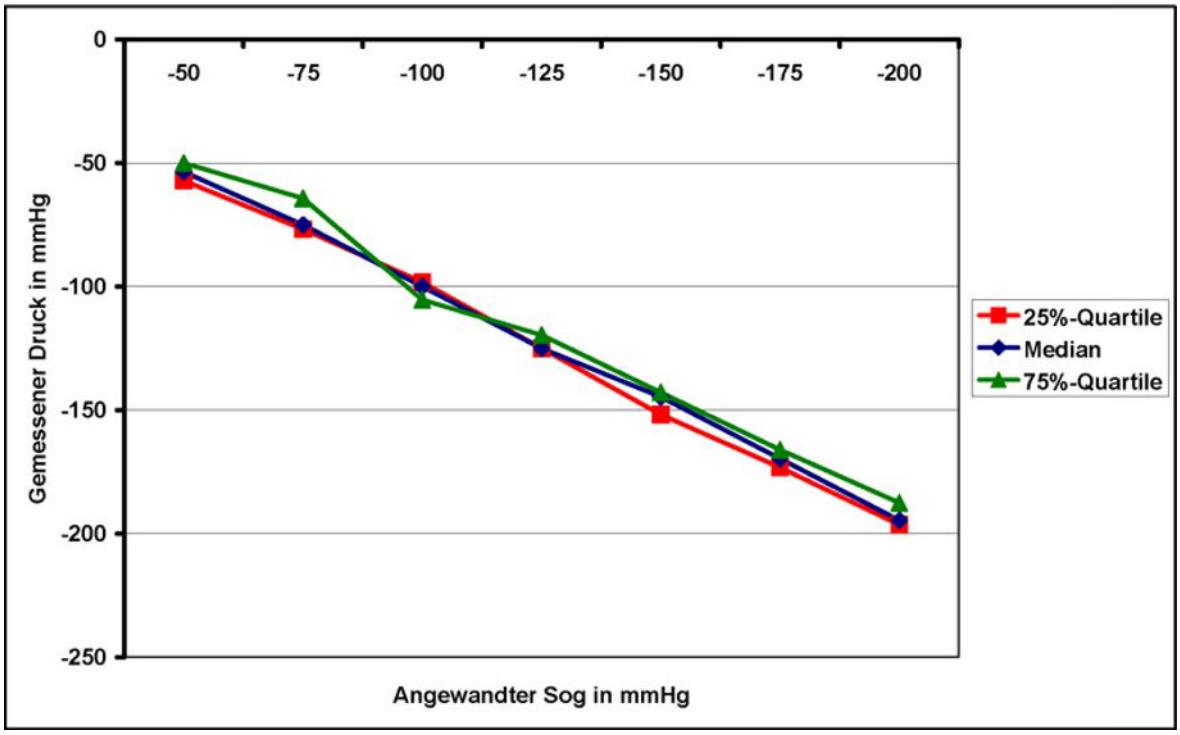


Abbildung 14: Beziehung zwischen angewandtem Sog (x-Achse) und an der Tischoberfläche gemessenen Druck (y-Achse) bei in Richtung auf den Tisch zeigendem Messfenster im PVA-Schwamm. Werte angegeben als Median (blau), 25%-Quartile (rot) und 75%-Quartile (grün) sowie Minimal- und Maximalwerte (schwarz) (n = 8 Messungen).

Wird das Messfenster des Druckmesskatheters allerdings in Richtung des Schwamms gedreht, zeigen beide Schwammsorten deutlichere Unterschiede. Im PU-Schwamm wird ein Zunehmen des Unterdrucks bei Anstieg

der angelegten Sogstärke verzeichnet, im Median jedoch auf höchstens -95 mmHg unter 200 mmHg angelegtem Druck bei deutlicher Abweichung der 25% - und 75%-Quartilen (-100 mmHg / 180 mmHg). Der Median der Unterdruckwerte entspricht eher einer Winkelhalbierenden zwischen der 75%- und 25%-Quartile.(Abb. 15)

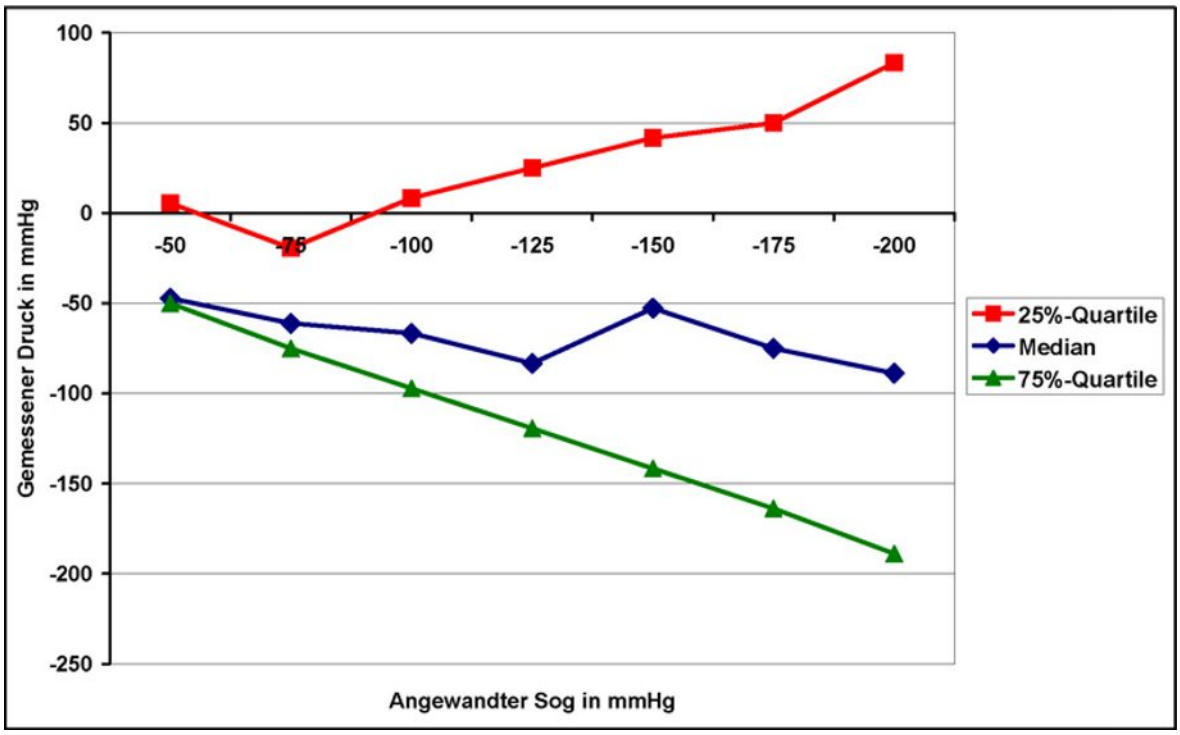


Abbildung 15: Beziehung zwischen angewandtem Sog (x-Achse) und an der Tischoberfläche gemessenen Druck (y-Achse) bei in Richtung auf den Schwamm zeigendem Messfenster im PU-Schwamm. Werte angegeben als Median (blau), 25%-Quartile (rot) und 75%-Quartile (grün) sowie Minimal- und Maximalwerte (schwarz) (n = 8 Messungen).

Der PVA-Schwamm stellt sich hier in seinem Druckverhalten etwas konstanter als der PU-Schwamm dar, über alle Sogstärken bleibt der Median

bei -25 mmHg, die 25%- und 75%-Quartilen weichen weniger drastisch als beim PU-Schwamm bei steigender Sogstärke vom Median ab (bei maximalem Sog von 200 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -120/70 mmHg), jedoch nimmt der Median der Unterdruckwerte im Schwamm eben nicht bei steigender Sogstärke zu sondern spielt sich bei - 25 mmHg ein. (Abb. 16)

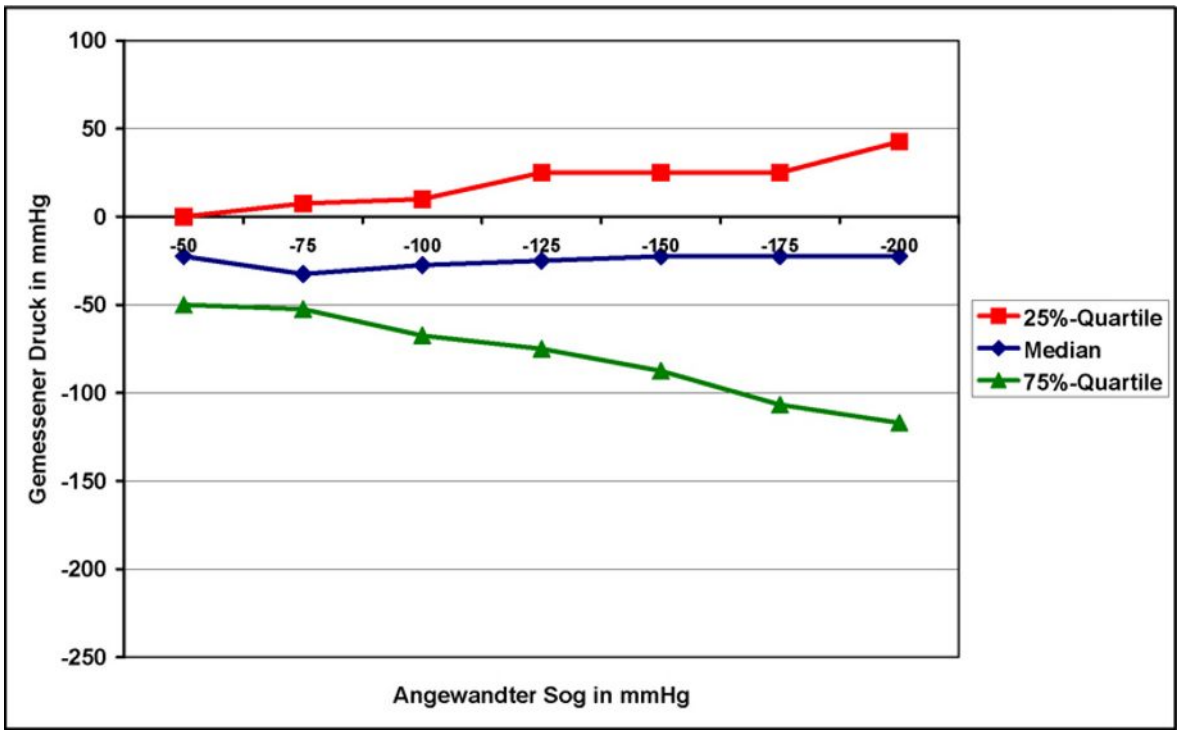


Abbildung 16: Beziehung zwischen angewandtem Sog (x-Achse) und an der Tischoberfläche gemessenen Druck (y-Achse) bei in Richtung auf den Schwamm zeigendem Messfenster im PVA-Schwamm. Werte angegeben als Median (blau), 25%-Quartile (rot) und 75%-Quartile (grün) sowie Minimal- und Maximalwerte (schwarz) (n = 8 Messungen).

3.2 Druckweiterleitung durch den Schwamm über längere Entfernung

Die Ausdehnung des Sogs besteht in beiden Schwämmen bis in ca. 52,5 cm Entfernung vom *trac-pad connector*. Nahezu ein 1:1 Transfer besteht bei Sogwerten von unter 150 mmHg. Bei höheren Sogwerten und einer Distanz von über 15 cm von der Sogapplikationsstelle bestehen jedoch erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Schwamm-Materialien (PU und PVA; Abb. 17). Im Polyurethanschwamm weichen die gemessenen Druckwerte bei Sogwerten von über 100 mmHg selbst über die gesamte Distanz von bis zu 50 cm entfernt vom *trac-pad connector* in aller Regel nur wenige mmHg ab, so z.B.bei 125 mmHg im Median -2,2 ($Q_{25\%/75\%}$: -3,7/-1,1 mmHg) bei 175 mmHg im Median -3,6 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -5,3/-2,0 mmHg).

Im Polyvinylalkoholschwamm hingegen zeigt sich schon in geringer Entfernung von nur 7,5 cm vom *trac-pad connector* bei Sogwerten größer als 150 mmHg eine erhebliche Verminderung des effektiven Unterdrucks. In größerer Entfernung von 52,5 cm zeigt sich eine Reduktion im Median:

- bei einem Sogwert von 150 mmHg von 9,5 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: 10,5/7,9 mmHg)
- bei einem Sogwert von 175 mmHg von 24,4 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: 26,1/21,9 mmHg) und
- bei 200 mmHg eine Minderung von 48,9 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: 52,2/46,9 mmHg)!

Hierdurch sinkt der übertragene Unterdruck bei einem angelegten Sog von 200 mmHg auf einen Wert von ca. 150 mmHg, was einer Sogleistungsminderung von rund 25 % entspricht (dies schon ab ca. 20 cm Entfernung).

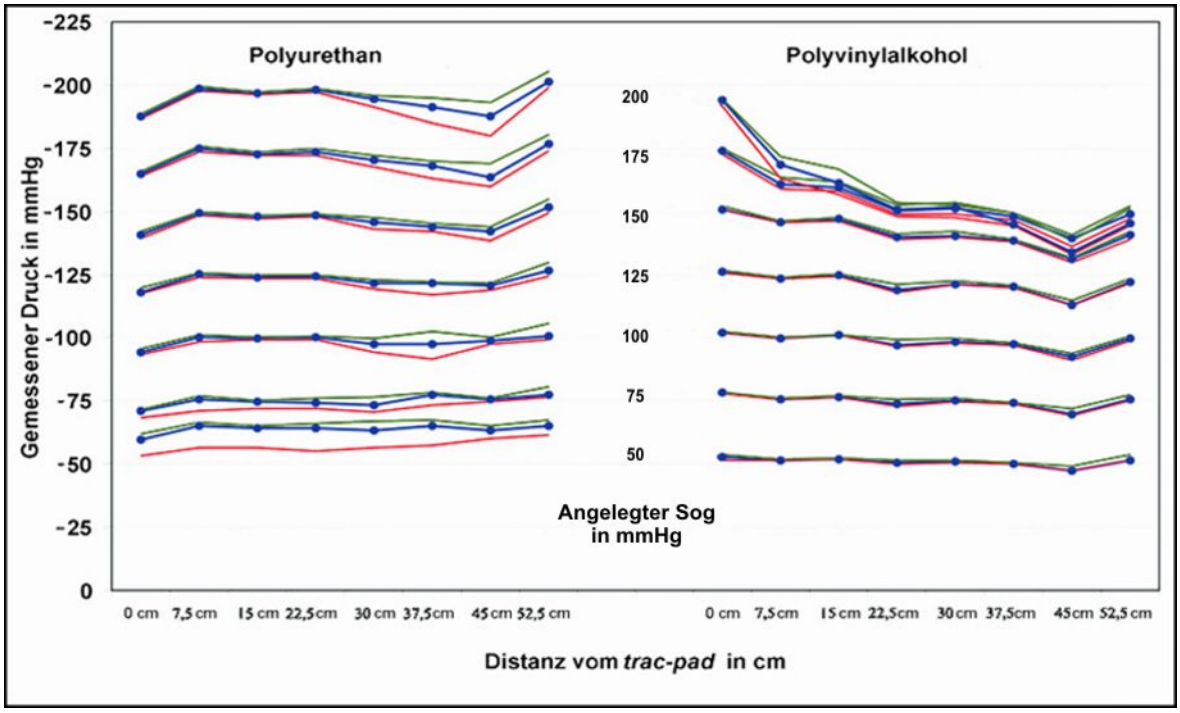


Abbildung 17: Druckverlauf bei Messungen über eine längere Distanz. Abszisse: Entfernung vom *trac-pad connector* in cm. Ordinate außen: Gemessener Druck in mmHg. Ordinate innen: Angelegter Sog an den Schwamm. blau=Median, rot = 25%-Quartile, grün = 75%-Quartile. (n = 8)

3.3 Druckverhältnisse in vitro am Schwamm/Muskel-Interface

In allen drei Tiefen (oberflächlich, 0,5 - 2 mm und 3-8 mm tief) zeigte sich eine Zunahme des Gewebedruckes parallel zur Erhöhung des Sogs (Inkrement 25 mm von 50 - 200 mmHg; Abb. 18). So zeigte sich an der Fleischoberfläche ein Anstieg von im Median - 5,9 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -21,6/-2,0; Sog: 50 mmHg) auf 11,8 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -5,9/-2,0; Sog: 200 mmHg), in 0,5 - 2 mm Gewebetiefe ein Anstieg von im Median -5,7 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -8,3/-3,8; Sog: 50 mmHg) auf -0,7 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -3,9/3,5; Sog: 200 mmHg), und in 3-8 mm Tiefe von -5,8 mmHg
($Q_{25\%/75\%}$: -13,8/-4,1; Sog: 50 mmHg) auf -2,2 mmHg
($Q_{25\%/75\%}$: -5,9/0,1; Sog: 200 mmHg).

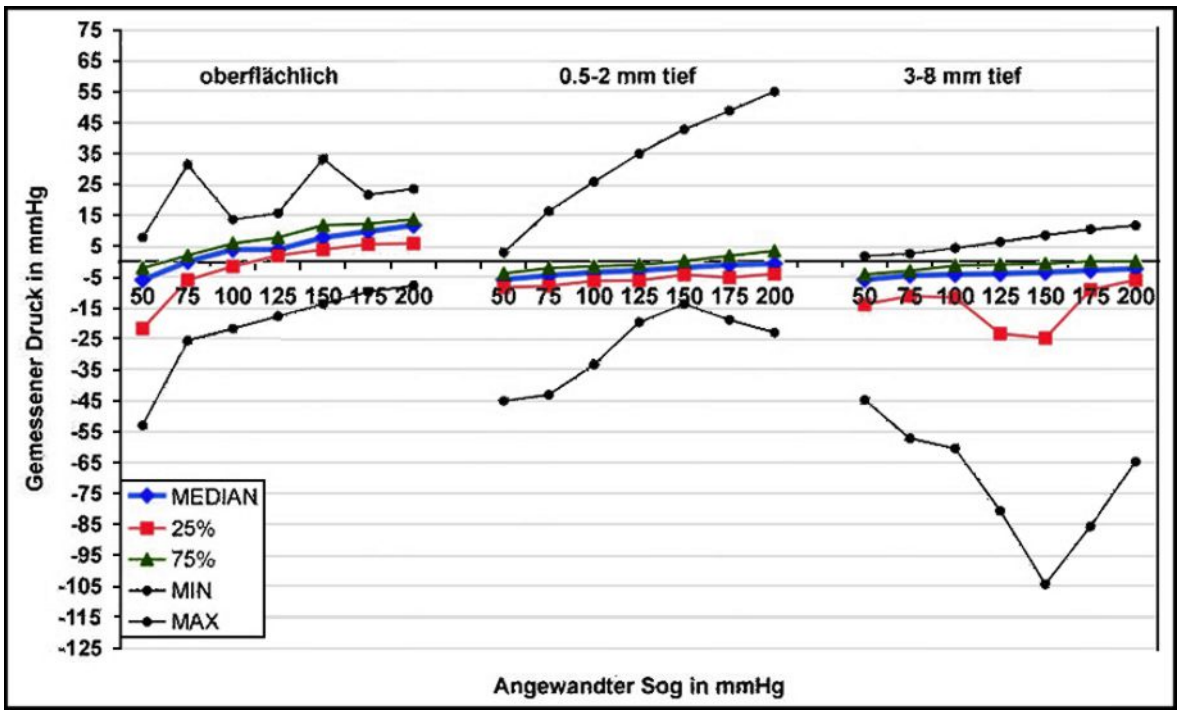


Abbildung 18: Beziehung zwischen angewandtem Sog (x-Achse) und gemessenen Druck (y-Achse) im avitalen Rindermuskel bei Messung in drei unterschiedlichen Gewebetiefen (oberflächlich, 0,5 - 2 mm und 3 - 8 mm Gewebetiefe). Werte angegeben als Median (blau), 25%-Quartile (rot) und 75%-Quartile (grün) sowie Minimal- und Maximalwerte (schwarz) (n = 8 Messungen).

3.4 Druckverhältnisse in vivo am Schwamm/ Muskel-Interface

An der Grenzfläche Schwamm/ tib.ant. Muskel in 2-3 mm Gewebetiefe ergaben sich bei Anlegen des Sogspektrums zwischen 50 und 200 mmHg ein Anstieg der Werte im Median von 0,0 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -0,8/ 4,6; Sog: 50 mmHg) auf 5,5 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -1,5/ 7,8; Sog: 200 mmHg) und bei der üblicherweise eingesetzten Sogstärke von 125 mmHg Werte im Median von 3,4 mmHg ($Q_{25\%/75\%}$: -1,9/ 7,4 mmHg) (Abb. 19).

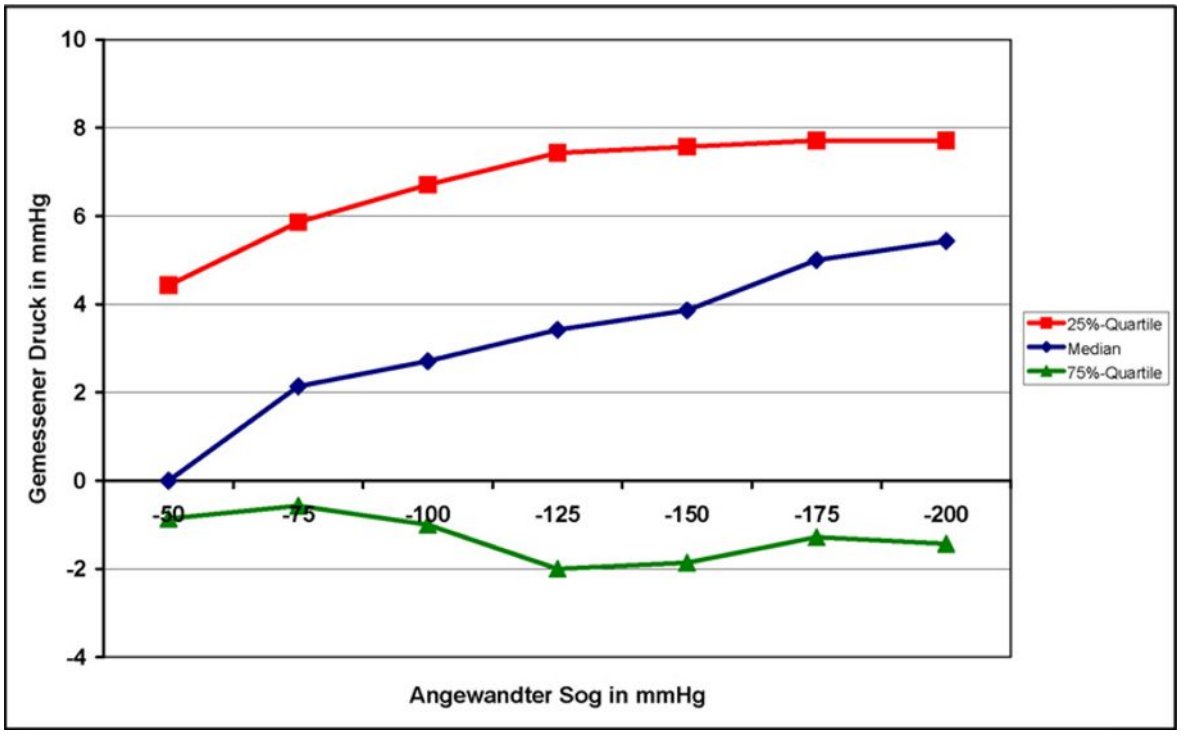


Abbildung 19: Druckverlauf im humanen musc. tibialis anterior. Alle Werte in mmHg, blau=Median, rot/grün=25%/75%-Quartile (n = 1, 8 Messungen)

3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der angelegte Sog wird, unabhängig vom verwandten Schwamm-Material, 1:1 von der Pumpe bis an die Wundoberfläche übertragen. Bei Verwendung von PVA-Schwämmen über größere Distanzen ist ein deutlicher Sogabfall nachweisbar. Dieser Effekt zeigt sich jedoch erst bei einem angelegten Sog von über 125 mmHg. An der Wundoberfläche werden schwankende Drücke zwischen -121 und +27 mmHg gemessen (Sog 125 mmHg). In den Schichten unterhalb der Wundoberfläche bestehen sowohl leicht positive als auch leicht negative Druckwerte. Die Messungen in vivo bestätigen die Messergebnisse am Rindermuskel.

4 Diskussion

Ziel der einzelnen Versuchsreihen war es, die Druckverhältnisse im Bereich der Grenzschicht Schwamm/ Gewebe während der Anwendung der Vakuumtherapie zu untersuchen. Es sollte kontrolliert werden, ob der angelegte Unterdruck sich auch über eine längere räumliche Strecke hinweg bei Einsatz eines größerflächigen Schwamms unvermindert auswirken kann. Von Interesse war hierbei auch, ob wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Schwamm-Materialien Polyurethan und Polyvinylalkohol bestanden.

4.1 Diskussion der Versuchssettings

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, sind die Verhältnisse, die letztendlich zu dem vorteilhaften Outcome einer mittels Vakuumversiegelung versorgten Wunde führen, noch nicht in Gänze verstanden und beschrieben worden. Es fehlen Untersuchungen zu den Unterdruckverhältnissen direkt vor Ort. Daher wurden in dieser Untersuchung schwerpunktmäßig in vitro Settings gewählt, um einen genaueren Einblick in die *vakuumversiegelte Wunde* zu erlangen.

Im Rahmen der Versuchsreihen mit dem PU-Schwamm und dem PVA-Schwamm auf einer Tischoberfläche wurde die Messrichtung der Sonden modifiziert, um einen Eindruck davon zu gewinnen, wie sich das Schwamm-Material in seiner Unterdruckweiterleitung verhält und um eine etwas genauere Vorstellung über die Druckverhältnisse an der Wundoberfläche zu bekommen. Wie in der Einleitung beschrieben, ist der Druck als Skalar ohne Richtung und sollte somit an jeder Stelle in einem umschlossenen Raum den gleichen Betrag haben. Letztendlich stellt auch der Raum unter einer Vakuumversiegelung einen solchen umschlossenen

Raum dar. In der derzeit einzigen Arbeit mit Messungen des Drucks am Wunde-Schwamm-Interface [36, 35] wurden jedoch in den Versuchssettings, in denen die Mess-Sonden direkten Kontakt zu den verwendeten Schwämmen hatten, positive Druckwerte (also ein *Überdruck*) bei Anlage eines Vakuums gesehen. Auch in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messreihen zeigten sich wiederholt positive Messwerte an einzelnen Abnahmestationen, jedoch nie über den gesamten Schwamm hinweg. Aufgrund des Aufbaus der Mess-Sonde und der geringen Größe des Messfensters von ca. 5 x 2 mm (Mess-Sondengröße (4F) von ca. 15 x 2 mm) wird die Druckdifferenz nur an einer Stelle der Sonde gemessen, es wird somit nur eine punktuelle Messung vorgenommen. Damit lassen sich positive Messwerte durch in das Messfenster der Sonden eindrückende Materialbrücken der Schwämme erklären. Eine Erklärung für die durchgängig positiven Messwerte von Mayer et al. ist es allerdings nicht. Durch die Variation der Messrichtung der Sonden in Richtung des Tisches konnten dann keine Materialbrücken aus dem Schwamm ins Messfenster der Sonde hinein drücken. Ein Messfehler der Sonden konnte dadurch ausgeschlossen werden, dass bei unverändertem Mess-Setting (unveränderte Lage der Sonden unter dem unveränderten Schwamm) regelhaft gleiche Messergebnisse, bei veränderter Sondenposition jedoch auch andere Werte zu finden waren. Generell ist als Schlussfolgerung aus diesen Versuchen jedoch zu sagen, dass der erzeugte Unterdruck nahezu ungemindert auf die Grenzoberfläche zwischen Schwamm und Wunde übertragen wird.

Auch bei den Messungen über eine längere Entfernung in den Schwämmen stand im Vordergrund der Beweis, dass beide Schwammsorten eine nahezu verlustfreie Unterdrucktransmission ermöglichen. Denkbar wären zum Beispiel abnehmende Unterdruckwerte in zunehmender Distanz vom Applikationsort des Sogs bedingt durch den Porenaufbau des Schwamms. Auch mit nur einem *trac-pad connector* gelingt in den hier durchgeführten Versuchen aber eine nahezu verlustfreie Druckübertragung im Sogbereich

zwischen 50 und 200 mmHg beim Polyurethanschwamm selbst über 50 cm Entfernung hinweg. Bei Verwendung des PVA-Schwamms zeigt sich bei Sogwerten von größer als 150 mmHg eine relevante Sogstärkenreduktion mit zunehmender Distanz zum *trac-pad connector* von 25 % schon ab 20 cm Abstand zum Applikationsort. Eine wirkliche Beeinträchtigung für die Wahl des PVA-Schwamms für größerflächige Wunden bedeutet dies jedoch nicht, da nach einigen tierexperimentellen Arbeiten die für die Wundreinigung und Gewebeneubildung optimale Sogstärke bei 125 mmHg liegt [27, 41]. Bei dieser Sogstärke ist auch im PVA-Schwamm der Druckverlust über eine längere Distanz nur sehr gering.

Diese Erkenntnis ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig und hilfreich, dass der Operateur bei der Versorgung einer Wunde mittels Vakuumversiegelung in der Wahl des Druckapplikationsortes bei Einsatz eines PU-Schwamms annähernd frei ist und somit einen vor dem Hintergrund der besseren Bedienbarkeit durch das medizinische Personal und Bequemlichkeit für den Patienten gewählten Applikationsort auswählen kann, egal wie groß der Schwamm ist.

Offen ist jedoch die Frage, ob ein derart großer Verband in einer realen Wunde mit der zu erwartenden größeren Menge an Wundsekret wirklich mit nur einer Ableitung suffizient abgesaugt werden kann. Die von Mayer et al. [35, 36] durchgeführten Flowratenbestimmung unter Verwendung von Wundflüssigkeit in den PVA- und PU-Schwämmen zeigen nämlich, dass die Poren im Schwamm durch Blutbestandteile verlegt werden. In diesen in vitro Versuchen konnten die verschlossenen Poren zwar durch eine Spülflüssigkeit wieder durchgängig gemacht werden, die Drainagefähigkeit konnte aber nur noch für kurze Zeit aufrecht erhalten werden. Bei Anlage eines hohen Unterdrucks neigt der PVA-Schwamm zwar erst nach einer wesentlich höheren Menge an Wundsekret zum Verschluss, allerdings zeigt sich dieser Effekt erst bei Werten, die deutlich über den

von Morykwas et al. und Isago et al. empfohlenen 125 mmHg Sog liegen [27, 41].

Das große Problem der Grundlagenforschung zur Vakuumtherapie ist das Fehlen eines geeigneten Wundmodells, dieses Manko zieht sich wie ein roter Faden durch die gesamte V.A.C.- spezifische Literatur. In der eher theoretischen Arbeit von Mayer et al. wurden zur Wundsimulation Grapefruitscheiben und Knetmasse genutzt, Saxena et al. arbeiteten mit einem Computermodell. Auch im Rahmen dieser Arbeit wurde die ideale Modellwunde nicht dargestellt. Allerdings konnte bei Verwendung eines avitalen Rindermuskels relativ *wundähnliche* Druckverhältnisse an der Wundoberfläche und in der Gewebetiefe erfasst und verglichen werden. Es zeigt sich dabei eine Druckzunahme in den oberflächennahen Gewebeschichten unter der Anwendung des Vakuums. Der Vakuumverband scheint somit auf die unter der Wunde gelegenen Gewebeschichten wie ein Kompressionsverband zu wirken. Der unter der Folie versiegelte Schwamm kollabiert aufgrund des höheren Umgebungsdrucks außerhalb des Verbands. Wundseitig bildet der gesamte Körper die Barriere, die die Grenze zwischen den Bereichen mit atmosphärischem Druck und Unterdruck darstellt. Die - wenn man so will - den Druckverband ausmachende eigentliche *Anpressrichtung* kommt dabei durch das angrenzende Gewebe. Zur Anschaulichkeit seien hier die Magdeburger Halbkugeln von Otto von Guericke erwähnt. Im Rahmen dieses Experiments von 1654 wurde die Luft aus dem Inneren zweier aneinander liegenden metallischen Halbkugeln evakuiert. Die daraufhin eine Einheit bildenden Halbkugeln konnten nicht einmal durch Pferde auseinander gezogen werden. Hierbei ist allerdings nicht das Vakuum innerhalb der Kugeln der Kraftgeber sondern der auf beide Halbkugeln von außen lastende Luftdruck. Auch in der vakuumversiegelten Wunde drückt der umgebende Luftdruck auf den evakuierten Schwamm.

Eine weitere interessante Erkenntnis brachte die Arbeit mit dem Rinder-

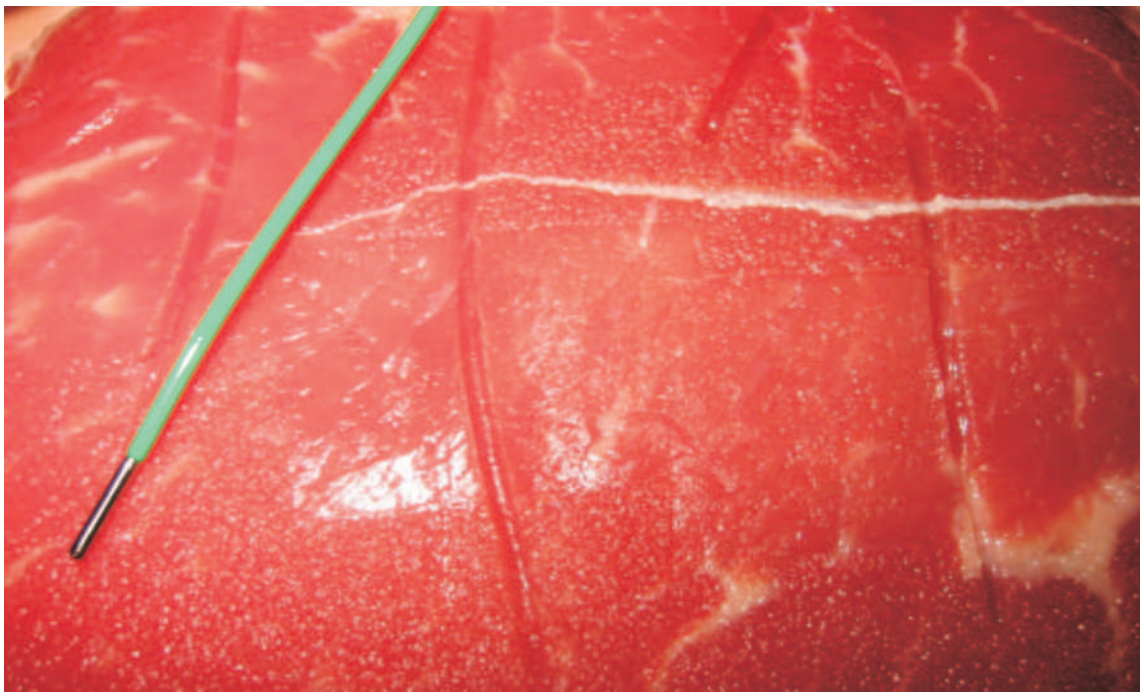


Abbildung 20: Avitaler Rindermuskel nach Vakuumversiegelung. Deutlich ist vor allem im unteren linken Bildbereich die für vakuumversiegelte Gewebe typische *Stippchenbildung* zu sehen.

muskel eigentlich eher unbeabsichtigt. Wie auf der Abbildung 20 zu sehen ist, finden sich auch auf dem avitalen Muskel die für vakuumversiegelte Gewebe typische *Stippchenbildung* nach Lösen der Versiegelung. Dieser Effekt ist somit eher als ein Sog- und Druckphänomen rein physikalischer Natur einzuordnen und nicht die Folge beginnender Granulationsgewebeneubildung.

Aufgrund des erwähnten Mangels an geeigneten Wundmodellen muss eine Evaluation der in vitro gewonnenen Erkenntnisse zwingend in vivo erprobt werden. Hierbei ist natürlich eine Messreihe mit n=1 in der eigenen Arbeit nicht repräsentativ; allerdings spiegeln die hierbei gewonnenen Ergebnisse bereits die in den theoretischen Versuchen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse wider, eine Messreihe in vivo mit einem größeren n ist sicherlich dringend nötig, sollte aber keine größeren Überraschungen im Sinne von völlig anderen Ergebnissen als in dieser Studie bergen.

4.2 Druckmuster am Interface Schwamm/Wunde und Auswirkung des Vakuums auf das Gewebe

Die durch Mayer et al. durchgeführten Versuche zeigten bei sehr hohem Unterdruck (900 mmHg erzeugt mittels Redon-Flaschen) durchweg positiven Druck am Applikationsort. Diese Arbeit ist außer der eigenen die einzige, in der direkt Werte im *Wundmilieu* ermittelt wurden. Weitere direkte Untersuchungen existieren derzeit nicht, aus den Arbeiten von Wackenfors et al. und Saxena et al. lassen sich nur indirekte Vorstellungen über das Druckmuster an der Wundoberfläche ableiten [50, 47]. Das Team um Wackenfors beschreibt in seiner tierexperimentellen Arbeit die Existenz von hypo- und hyperperfundierten Arealen im Gewebe, deren Ausmaß von der Gewebeart (Subkutangewebe, Muskel) und von der Höhe des im Rahmen der Vakuumtherapie genutzten Sogs abhängig ist. So beobachtete das Wackenfors-Team eine direkt an die Wunde angrenzende hypoperfundierte/ ischämische Raumschale im Subkutangewebe von bis zu 2,5 cm Dicke (50 mmHg: 1,8 cm; 100 mmHg: 2,1 cm; 200 mmHg: 2,5 cm). An diese Schale konnte eine hyperperfundierte Schale bis zu 4,5 cm vom Wundrand entfernt nachgewiesen werden. Außerhalb dieses Areals kam es zu keinen Veränderungen der Mikrozirkulation. Auch im Muskelgewebe fand sich eine ähnliche Schalenstruktur, hier waren die einzelnen Bereiche jedoch kleiner (Hypoperfusionsschale bei 50 mmHg angelegtem Sog 1 cm dick, bei 100 mmHg 1,4 cm, bei 200 mmHg 1,7 cm. Die Hyperperfusionsschale war hier 2 cm dick.).

Die Arbeitsgruppe von Saxena näherte sich der hier erörterten Problematik auf eine vollkommen anderen Art und Weise. Sie berechneten mittels Computersimulation das Ausmaß der Zellmikrodeformation unter dem Einfluss des auf die Wunde angepressten Schwamms. Sie berechneten das Vorliegen einer Stauchung (*Quetschung* bis 10%) der Zelle im Bereich der Porenwand, eine extreme Dehnung (größer als 100%) in den Randberei-

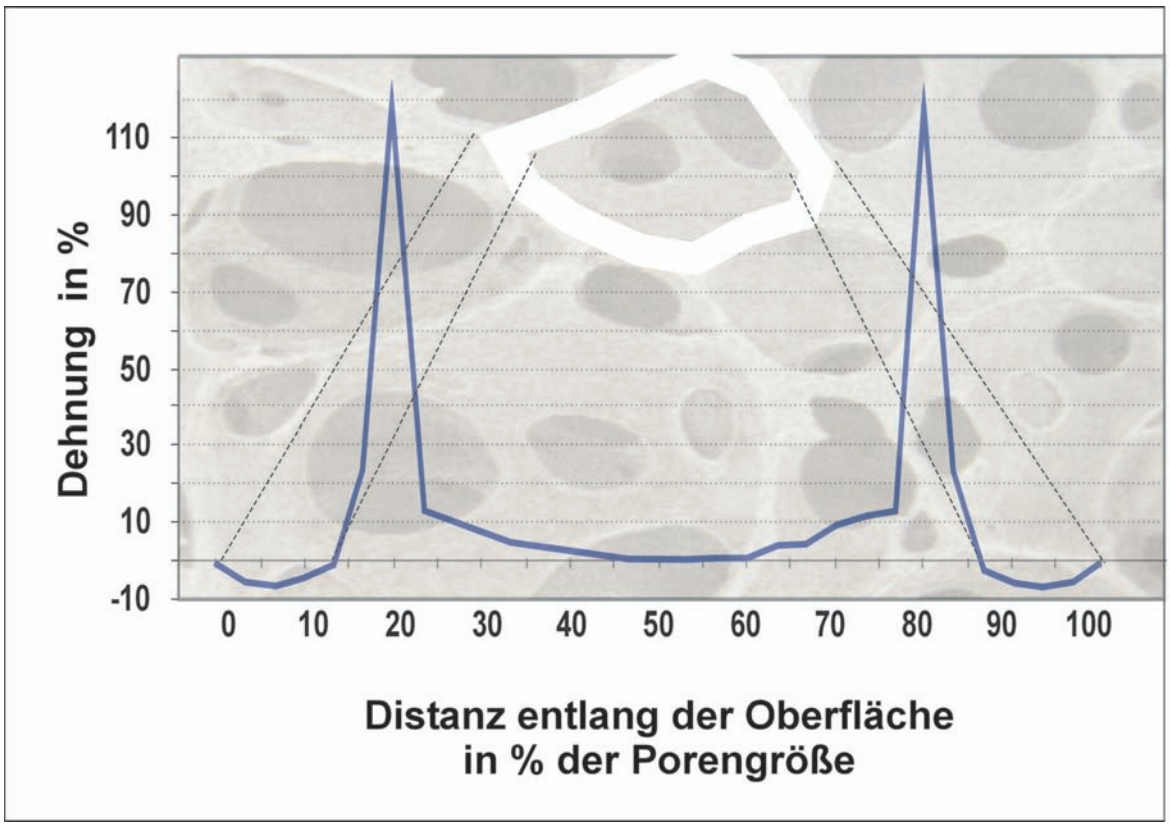


Abbildung 21: Dehnungsverhalten einzelner Zellen im Wundgrund unter Vakuumapplikation. Weiß markiert die Porenwand im Schwamm, die schwarz gestrichelte Linie stellt die Projektion der Porenwand auf die entsprechenden Deformationswerte dar (Modifiziert nach Saxena et al. [47]).

chen der Porenwand und eine mäßig ausgeprägte Zelldehnung (5 bis 20 %) im Bereich der Porenkuppel (Abb. 21).

Führt man nun die Erkenntnisse beider Arbeiten zusammen, lässt sich ein Druckmuster analog der Abb. 22 ableiten. Wie hier zu erkennen ist, finden sich im Gewebe nun durch den Vakuumverband induzierte Druckgradienten.

Versucht man dementsprechend aus den vorliegenden vier Studien eine einheitliche Hypothese der tatsächlichen Druck- und Sogzustände abzuleiten, erscheint es sinnvoll, sich zunächst der Limitierungen der einzelnen Studien bewusst zu werden.

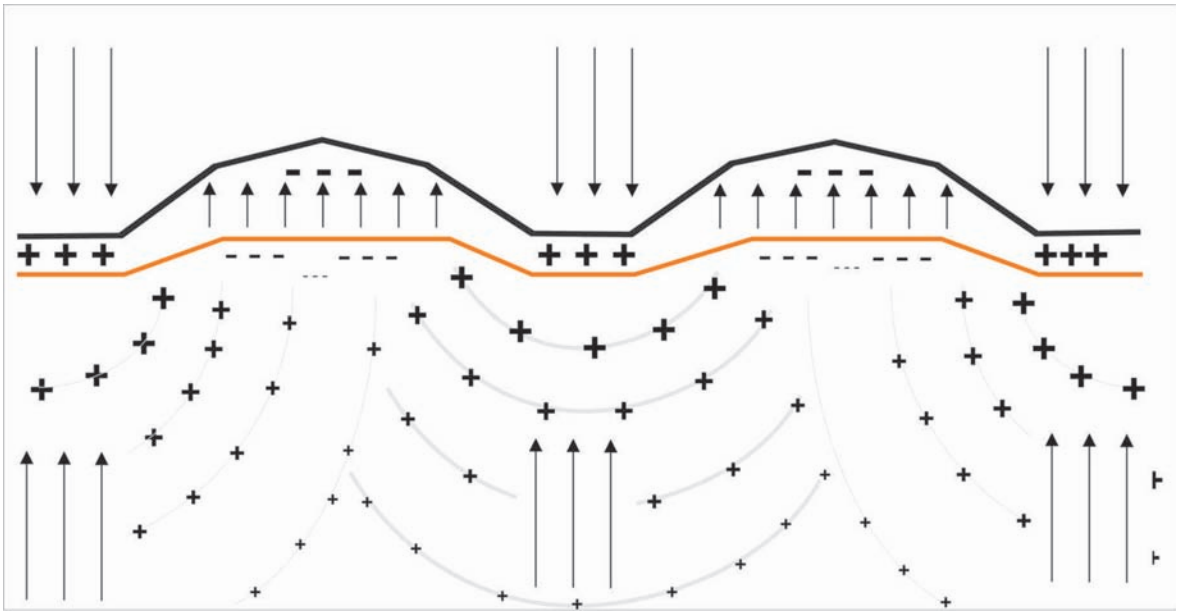


Abbildung 22: Druckverteilung im Gewebe unter dem Einfluss der Vakuumtherapie. Schwarze Linie = Schwammgrenze, gelbe Linie = oberste Wundschicht. +/- = Druckdifferenz zum Umgebungsdruck.

In der Studie von Maier et al. und der eigenen wurde eine unidirektional ausgerichtete Mess-Sonde mit dem Messfenster in Richtung *Wunde* positioniert. Bei einer Mess-Sondengröße (4F) von ca. 15 x 2 mm (Messfenstergröße ca. 5 x 2 mm) bedeutet dies, dass der über ihr liegende Schwamm trotz zahlreicher Poren und Porenwände in seiner Gesamtheit als Stempel wirkend, die Sonde in das Gewebe drückt. Allein auf den Bereich des eigentlichen Messfensters projizieren sich ca. 50 bis 250 Porenkuppeln und ihre dazugehörenden Wände. In der Anpresszone, abhängig von Druck und Schwamm-Material, sind die Poren deformiert, so dass die Porengröße nur noch ca. 50 bis 400 μm beträgt und die Porenwand ca. 80 bis 250 μm oder breiter wird. Die gemessenen Daten spiegeln somit nicht den Messwert in einer potentiellen Saugglocke (Pore) oder unter einer Porenwand wider sondern eher die Werte, die in den unmittelbar tiefer liegenden Gewebeschichten bestehen.

Während somit diese beiden Untersuchungen keine detaillierten Informa-

tionen über die reale Heterogenität der Druckverteilung unter dem abgepressten Schwamm ergeben, kann dies aus den Ergebnissen der Computersimulation der Arbeitsgruppe um Saxena jedoch abgeleitet werden. Diese Studie wiederum ist dadurch in ihrer Aussagekraft limitiert, dass sie sich in der Analyse auf die oberste Wundzellschicht beschränken muss. Man erhält keine Informationen über Veränderungen in größerer Tiefe. Zudem berücksichtigen sie nicht die reale Schwammarchitektur in der Gewebe/ Schwamm- Kontaktschicht unter dem Einfluss des Druckes. Die Effekte der Vakuumtherapie in der Tiefe des Gewebes können nun anhand der Ergebnisse der Gruppe um Wackenfors abgeschätzt werden, deren Einzelmesswerte jedoch im Verhältnis zur Porengröße nur in riesigen Distanzen um die Wunde herum erworben wurden. Trotz der genannten Einschränkungen ergänzen sich die vorliegenden Daten und können durch daran anknüpfende Überlegungen dazu beitragen, eine Hypothese zur Druckverteilung an der Gewebe/ Schwamm- Kontaktschicht unter Vakuumeinfluss zu formulieren. Hierfür sollen zunächst die *gesicherten* Informationen zusammengestellt werden:

- Auf die oberste Schicht der Wunde (Gewebe/ Schwamm- Kontaktschicht) wirken positive und negative Druckwerte ein.
- Die Höhe dieser Druckwerte ist abhängig von der Sogstärke der Vakuumquelle.
- Die Masse der registrierten Druckwerte liegt zwischen -25 mmHg und + 15 mmHg (Abb. 18).
- Die beobachteten Spitzendruckwerte bewegen sich zwischen -105 mmHg und + 55 mmHg (Abb. 18).
- Positive Druckwerte bestehen dort, wo solide Schwammanteile in Kontakt zur Wunde kommen (Porenwand).
- Negative Druckwerte bestehen dort, wo die Poren-*kuppel* ausreichend weit ausladend ist, kein Gewebekontakt besteht und der Sog ungehindert auf die Oberfläche einwirken kann.

- Die Verteilung der positiven und negativen Druckwerte ist abhängig von der Schwammarchitektur (flächenmäßiger Anteil von Porenwand und Pore). Die Analyse von rasterelektronenoptischen Bildern verschiedener Schwämme unter unterschiedlichen Druckbedingungen ergab ein Flächenverhältnis von Wand zu Pore von 1 zu 1 bis 1 zu 4.

Es befinden sich somit im Gewebe unter einer Vakuumversiegelung Bereiche mit unterschiedlichem Druck. An den Stellen, an denen die Porenwand des Schwamms direkt auf die Wundoberfläche aufliegt, werden die höchsten Werte ermittelt. Von hier ausgehend in den Körper gemessen, wird die Druckdifferenz zum Umgebungsdruck immer geringer. Daraus ergibt sich, dass im direkten Umfeld der vakuumversiegelten Wunde ein Druckgefälle von der Wundoberfläche bis in die Tiefe des Gewebes existiert. Führt man nun die mechanisch induzierten Effekte zusammen, ergibt sich - betrachtet von der Wundoberfläche in das Körperinnere - folgendes Bild: Naheliegend ist, dass an der Wundoberfläche ob des hohen Drucks eine Abnahme der Perfusion zu verzeichnen ist, entsprechend den von Wackenfors et al. erhobenen Befunden [50]. Hier findet eine druckbedingte Kompression kleiner Blutungen mit dem Effekt einer Blutstillung, ähnlich einem Druckverband, statt. Ebenfalls an der Wundoberfläche, im Bereich der Kontaktzone (Schwamm / Wundgrund), kommt es zu einer mechanischen Deformierung von Zellen. Diesen *Quetsch- und Dehnungsreizen* wird durch das Team um Saxena hypothetisch eine zellproliferationsfördernde Wirkung zugesprochen [47]. Ca. 1 - 2 cm um die eigentliche Wunde herum findet sich eine druckbedingte, sogstärke- und gewebe-abhängige Hypoperfusionszone [51], woraus ein druckbedingtes Abdrängen interstitieller Flüssigkeit aus dem unmittelbar an die Wunde anschließenden Geweberaum erfolgt. Daran schließt sich ein Gebiet mit reaktiver Hyperperfusion bis ca. 3,5 cm Entfernung von der Wunde an. Noch weiter entfernt folgt dann Gewebe ohne Reaktion auf die Vakuumtherapie.

Eine vielfach angenommene direkt der Therapie zuzuschreibende verbesserte Durchblutung des Wundrandgewebes wird somit durch die bisherigen Arbeiten nicht bestätigt. Es erscheint dagegen plausibel, dass vielmehr das Gegenteil auftritt: Ein schmales Areal einer Hypoperfusion, das bei sehr hoch angelegtem Druck sogar ischämisch werden kann. Es erscheint jedoch naheliegend, dass einer der wesentlichen positiven Effekte der Vakuumtherapie neben einem stark angiogenetischen Reiz [52] und einer deutlichen Anregung der Gewebeneubildung [22, 32, 34, 38] die Reduktion interstitieller Flüssigkeit in der Wunde ist. Ausgeprägt ist dies bei Handverbrennungen unter Einsatz des Vakuumhandschuhs zu beobachten [14]. Dieser ist allerdings schon durch seine zirkuläre Anlage als Kompressionsverband anzusehen, welcher den Lymphabfluss nach proximal hin fördert. Bei planar abgedeckten Wunden erzeugt die Vakuumtherapie eine heterogene Druckverteilung mit dem Entstehen eines Druckgradienten im Gewebe, dem der interstitielle Flüssigkeitsstrom folgen kann. Schwamm-Porenwand naher - und somit oberflächennaher - positiver Druck wird interstitielle Flüssigkeit in Richtung der negativen Druckzone austreiben, wo sie nach Erreichen der Wundoberfläche sogleich abgesaugt werden kann. Die nun entlastete oberflächennahe Zone wird durch Flüssigkeit aus der Tiefe wieder aufgefüllt und wird - bei weiterhin konstantem Anpressdruck im Bereich der Porenwand - nun diese Flüssigkeitsportion wiederum in Richtung Oberfläche weiterführen. Die bisherigen Überlegungen integrieren jedoch nicht die Beobachtung von Wackenfors et al., dass wundfern des hypoperfundierten Areals ein hyperperfundiertes Areal besteht. Setzt man voraus, dass diese Beobachtung auch beim Menschen besteht, kann vermutet werden, dass sich hier ebenfalls die Möglichkeit des Abtransportes interstitieller Flüssigkeit findet. Zunächst nimmt der in das Gewebe übertragene Druck in Richtung dieser hyperperfundierten Zone ab. Hierdurch entsteht ein zweiter Druckgradient mit Druckabfall von der Wunde weg. Entlang dieses Gefälles wird interstitielle Flüssigkeit in die Tiefe des

Gewebes verdrängt. Aufgrund der hier vorliegenden Hyperperfusion kann diese Flüssigkeit dann erleichtert abtransportiert werden. Folge dieser beiden Flüssigkeitsströme ist die Reduktion des interstitiellen Ödems. Aufgrund dieses direkten Effektes kann infolge geringeren Gewebedruckes die Durchblutung als sekundäre Folge der Vakuumtherapie zunehmen. Dieser eben indirekte Mechanismus der Durchblutungssteigerung durch Reduktion des interstitiellen Ödems war auch von der Arbeitsgruppe von Isago et al. angenommen worden [27, 28] im Gegensatz zu der von Morykwas vermuteten direkten Durchblutungserhöhung [38].

Die Reduktion des Gewebeödems kann wohl als einer der Hauptgründe für die guten Therapieergebnisse der Vakuumversiegelung angesehen werden. Bereits 1970 schreibt Sedlarik [48] der Sekretminderung im Wundgebiet einen hoher Stellenwert zur Förderung der Wundheilung zu.

4.3 Fazit für die Praxis

Es konnte gezeigt werden, dass der mittels Vakuumpumpe erzeugte Sog annähernd ungemindert auf die Grenzoberfläche zwischen Schwamm und Wunde übertragen wird. An der Wundoberfläche kann es jedoch sowohl zu positivem als auch negativem Druck kommen. Dieser Umstand lässt sich dadurch erklären, dass teilweise Schwamm-Materialbrücken und teilweise Schwammporen selbst der Wundoberfläche anliegen.

Die Übertragung des Sogs bei großflächigen Wunden mit nur einem *trac-pad Connector* ist durchaus möglich, ohne dass ein relevanter Druckabfall über die Fläche zu erwarten ist. Hierbei zeigte der Polyurethanschwamm leichte Vorteile in der Druckweiterleitung gegenüber dem Polyvinylalkoholschwamm, jedoch nur bei hohen Sogwerten. Ob sich die Ergebnisse der diesbezüglich vorgestellten Untersuchung auf eine in vivo Situation mit Wundsekret übertragen lassen, muss jedoch noch nachgewiesen werden.

In den Gewebeschichten unterhalb der Wundoberfläche kommt es sowohl zu positivem als auch zu negativem Druck, und eben nicht - wie häufig erwartet - zu ausschließlich negativem Druck. Allerdings eben auch nicht, wie andernorts gesehen, nur zu einem positiven Anpressdruck. Aus diesen Druckgradienten im Gewebe folgt ein vereinfachter Abfluss von Wundsekreten und somit zu einer konsekutiven Reduktion des Gewebeödems, was allgemein als wichtig bei der Wundheilung angesehen wird.

Für die Praxis bedeuten die hier erhobenen Messergebnisse und deren Interpretation, dass der Therapeut nicht in der Wahl des Schwamms begrenzt ist, ein Einsatz entsprechend der Indikationen zur Verwendung der jeweiligen Schwammsorten ist somit ohne Rücksicht auf eventuelle Druckverluste in der Transmission möglich. Auch die Anlage des Schwamms mit Applikationsort des *trac-pad Connectors* kann ganz nach Gesichtspunkten der Patientenbequemlichkeit und der Effizienz ausgeführt werden.

5 Zusammenfassung

Einleitung / Problemstellung: Die Vakuumversiegelung (VVS) kommt im Laufe des letzten Jahrzehnts zunehmend zum Einsatz. Dabei ist eine deutlichen Ausweitung der Indikationsbereiche zu beobachten. Dennoch ist noch wenig über die physikalischen und physiologischen Grundlagen des Erfolges der VVS bekannt. Es sollte im Rahmen der vorliegenden Arbeit beantwortet werden, welche Druckverhältnisse im Schwamm, an der Grenzschicht Schwamm-Wunde und im oberflächennahen Gewebe herrschen.

Methodik: Als Wundsimulation werden sowohl auf einer glatten Tischoberfläche als auch an einem avitalen Rindermuskel VVS mit Polyvinylalkohol (PVA)- oder Polyurethan (PU)-Schwämmen angelegt. Zur Messung des Druckes werden bis zu acht unidirektional messende, piezoresistive Sonden (Mammendorfer Institut für Physik und Medizin) verwendet. Der Sog wird über eine kommerziell erhältliche Pumpe (ATS) der Firma KCI erzeugt. Die Übertragung des Sogs erfolgt mittels *trac-pad connector*. Der Sog wird in 50 mmHg-Schritten gesteigert bis zu einem Maximum von 200 mmHg. Setting I: Druckmessung unter PU- und PVA-Schwämmen mit Variation der Messrichtung der Sonden. Setting II: Druckmessung unter Schwämmen von 60 cm Länge. Setting III: Messungen an einem avitalen Rindermuskel an der Oberfläche, in Tiefen von 0,5 - 2 mm und 3 - 8 mm unter der Wundoberfläche. Setting IV: Messungen an einem Patienten mit Kompartmentsyndrom am Unterschenkel in einer Gewebetiefe von 2-3 mm.

Ergebnisse: Die Transmission des angelegten Sogs durch beide Schwamm-Materialen auf die Oberfläche erfolgt nahezu 1 : 1. Bei Ausrichtung der Sonden auf den Schwamm bei einem Sog von 125 mmHg werden negative und positive Druckwerte gemessen (-121 bis +27 mmHg). Bei der Drucktransmission über eine größere Distanz sind beide Schwamm-Materialien

bei Sogwerten bis 125 mmHg annähernd gleichwertig. Bei Sogwerten größer als 150 mmHg kommt es im PVA-Schwamm zu einer Verminderung des Unterdruckes. Bei einem Sog von 200 mmHg zeigt sich ab einer Entfernung von 7,5 cm vom Ort der Druckübertragung auf den Verband eine Reduktion im Median von 25 mmHg (12,5%), bei einer Entfernung von 52,5 cm eine Reduktion im Median von 48,9 mmHg (25%). Die Messungen im Gewebe unter einer VVS ergaben im direkt an die Wundoberfläche angrenzenden Gewebe bei steigendem Sog sowohl positive als auch negative Druckwerte. Der gemessene Druck variiert an der Oberfläche zwischen -5,9 (Sog: 50 mmHg) und +11,8 mmHg (Sog: 200 mmHg). In einer Gewebetiefe von 2-3 mm Tiefe können Druckwerte zwischen -5,7 und -0,7 mmHg gemessen werden. In noch tiefer gelegenen Schichten (5-8 mm) schwanken die gemessenen Druckwerte zwischen -5,8 und -2,2 mmHg. Am M. tibialis anterior zeigen sich in ca. 1-3 mm Tiefe Sog-/Druckwerte von im Median 0,0 mmHg (Sog: 50 mmHg) bis +5,5 mmHg (Sog: 200 mmHg). Bei dem in der Literatur empfohlenen Sog von 125 mmHg wird im Median ein Druck von 3,4 mmHg (Q25%/75%: -1,9/+7,4 mmHg) gemessen.

Schlußfolgerung: Es wurde gezeigt, dass der erzeugte Sog nahezu ungemindert auf die Grenzfläche zwischen Schwamm und Wunde übertragen wird. An der Wundoberfläche unter einer VVS finden sich sowohl Bereiche mit positivem als auch mit negativem Druck. Die Erklärung für das Vorliegen positiver Druckbereiche ist im Anliegen von Materialbrücken auf die Gewebeoberfläche zu suchen, negative Druckbereiche finden sich in den Schwammporen. Die Versuche mit grossflächigen Schwämmen ergaben weiterhin, dass bei Sogwerten bis 125 mmHg eine verlustfreie Drucktransmission über längere Strecken mit beiden Schwamm-Materialien möglich ist. Es sind im Gewebe unter einer VVS Druckgradienten vorhanden, entlang derer ein erleichterter Abtransport von Wundsekret sowohl in den Verband als auch in den Körper möglich ist.

6 Literatur

[1] Adams, T.S.T. ; Herrick, S. ; McGrouther, D.A.: VAC-Therapy alters the Number and Distribution of Neutrophils in acute Dermal Wounds. Banwell, P. (Hrsg.) ; Teot, L. (Hrsg.): *TXP Communications* European Tissue Repair Society, 2004, 212

[2] Antony, S. ; Terrazas, S.: A retrospective study: clinical experience using vacuum-assisted closure in the treatment of wounds. *J Natl Med Assoc* 96 (2004), 1073–1077

[3] Argenta, A. ; Simpson, J. ; Morykwas, M.J.: Vertical Growth tunnels in Dressings for Use with Topical Negative Pressure. Topical Negative Pressure (TNP) Focus Group, 2004, 213

[4] Argenta, L. C. ; Morykwas, M. J.: Vacuum-assisted closure: a new method for wound control and treatment: clinical experience. *Ann Plast Surg* 38 (1997), 563–577

[5] Argenta, L.C.: Vacuum device can speed wound healing. *Wound Care* 29 (1997)

[6] Argenta, P. A. ; Rahaman, J. ; Gretz, H. F. 3rd ; Nezhat, F. ; Cohen, C. J.: Vacuum-assisted closure in the treatment of complex gynecologic wound failures. *Obstet Gynecol* 99 (2002), 497–501

[7] Armstrong, D. G. ; Lavery, L. A. ; Abu-Rumman, P. ; Espensen, E. H. ; Vazquez, J. R. ; Nixon, B. P. ; Boulton, A. J.: Outcomes of subatmospheric pressure dressing therapy on wounds of the diabetic foot. *Ostomy Wound Manage* 48 (2002), 64–68

[8] Banwell, P. ; Herrick, S. ; Tyler, M. ; Roberts, A. ; McGrouther, D.: Topical negative pressure (TNP) attenuates burn depth progression in humans via selective modulation of neutrophil

extravasation. Banwell, P. (Hrsg.) ; Teot, L. (Hrsg.): *TXP Communications* European Tissue Repair Society, 2004, 214

[9] Banwell, P. E. ; Jones, S. ; Evison, D.: Topical negative pressure modulates dermal microvascular blood flow dynamics and temperature profiles at the wound dressing interface. *J Wound Care* (Publikation in Vorbereitung)

[10] Barringer, C. B. ; Gorse, S. J. ; Burge, T. S.: The VAC dressing-a cautionary tale. *Br J Plast Surg* 57 (2004), 482

[11] Bischoff, M., Kinzl, L., Frei, P., Trautmann, M.: Bactericidal activity of wound fluid in traumatic wounds treated by vacuum sealing. *Zentralbl Chir* 125 (2000), 83

[12] Buttenschoen, K. ; Fleischmann, W. ; Haupt, U. ; Kinzl, L. ; Buttenschoen, D.C.: The influence of vacuum-assisted closure on inflammatory tissue reactions in the postoperative course of ancle fracture. *Foot Ankle Surg* 7 (2001), 165–173

[13] Chester, D. L. ; Waters, R.: Adverse alteration of wound flora with topical negative-pressure therapy: a case report. *Br J Plast Surg* 55 (2002), 510–511

[14] Ferbert, T. ; Kuhfuss, I. ; Ziegler, U. E.: Treatment of soft tissue defects on hand and forearm with vacuum assisted closure. *Zentralbl Chir* 129 (2004), 57–58

[15] Fleischmann, W ; Becker, U. ; Bischoff, M. ; Hoekstra, H: Vacuum sealing:indication, technique, and results. *Eur J Orthop Surg Trauma* 5 (1995), 37–40

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

[17] Fleischmann, W. ; Lang, E. ; Russ, M.: Treatment of infection by vacuum sealing. *Unfallchirurg* 100 (1997), 301–304

[18] Fleischmann, W. ; Russ, M.: Die Vakuumversiegelungstechnik Zur Behandlung Chronischer Wunden. *Klinikarzt* 25 (1996), 188–190

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

[20] Fleischmann, W., Kinzl, L: Gewebeproliferation durch Vakuumversiegelung. *Langenbecks Arch Chir Suppl Kongressbd* (1995), 256

[21] Fox, A. ; Tadros, A. ; Perks, A. G.: An unusual complication of Vacuum Assisted Closure in the treatment of a pressure ulcer. *J Wound Care* 13 (2004), 344–345

[22] Genecov, D. G. ; Schneider, A. M. ; Morykwas, M. J. ; Parker, D. ; White, W. L. ; Argenta, L. C.: A controlled subatmospheric pressure dressing increases the rate of skin graft donor site reepithelialization. *Ann Plast Surg* 40 (1998), 219–225

[23] Gouttefangeas, C. ; Eberle, M. ; Ruck, P. ; Stark, M. ; Muller, J. E. ; Becker, H. D. ; Rammensee, H. G. ; Pinocy, J.: Functional T lymphocytes infiltrate implanted polyvinyl alcohol foams during surgical wound closure therapy. *Clin Exp Immunol* 124 (2001), 398–405

[24] Gwan-Nulla, D. N. ; Casal, R. S.: Toxic shock syndrome associated with the use of the vacuum-assisted closure device. *Ann Plast Surg* 47 (2001), 552–554

[25] Heller, G ; Savolainen, H ; Widmer, MK ; Makaloski, V ; Carrel, T ; Schmidli, J: Die gefäßchirurgische Problemwunde

inguinal und die vacuumassistierte Therapie. *Eur Surgery ACA* 35 (2003), 34–35

[26] Horch, R. E.: Basics foundation and results of the vacuum therapy in the reconstructive surgery. *Zentralbl Chir* 129 (2004), 2–5

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

[28] Isago, T. ; Nozaki, M. ; Kikuchi, Y. ; Honda, T. ; Nakazawa, H.: Negative-pressure dressings in the treatment of pressure ulcers. *J Dermatol* 30 (2003), 299–305

[29] Jones, S. M. ; Banwell, P. E. ; Shakespeare, P. G. ; Tiernan, E.: Complications of topical negative pressure therapy in small-diameter wounds. *Plast Reconstr Surg* 114 (2004), 815–817

[30] Karl, T. ; Modic, P. K. ; Voss, E. U.: Indications and Results of V.A.C. Therapy Treatments in Vascular Surgery - State of the Art in the Treatment of Chronic Wounds. *Zentralbl Chir* 129 (2004), 74–79

[31] Karnolz, L.P. ; Andel, H. ; Haslik, W. ; Winter, W. ; Meissl, G. ; Frey, M.: Use of Subatmospheric Pressure Therapy to Prevent Burn Wound Progression in Human: First Experiences. *Burns* 30 (2004), 253–258

[32] Kopp, J. ; Hoff, C. ; Rosenberg, B. ; Von Buelow, S. ; Kilpadi, D.V. ; Schroeder, W. ; Pallua, N. ; Horch, R.: Application of VAC Therapy Upregulates Growth Factor Levels in Neuropathic Diabetic Foot Ulcers. *Wound Repair Regen* 11 (2003), 0.007

[33] Krasner, D. L.: Managing wound pain in patients with vacuum-assisted closure devices. *Ostomy Wound Manage* 48 (2002), 38–43

[34] Kremers, L. ; Kearns, M. ; Hammon, D. ; C.A., Scott ; Daniel, L.: Involvment of Mitogen Activated Proteases Kinases in Wound Healing During Subatmospheric Pressure Therapy. *Wound Repair Regen* 11 (2003), 0.009

[35] Maier, D: *Untersuchung über die physikalischen Grundlagen der Vakuumversiegelung.*, Universität Ulm, Diss., 2002

[36] Maier, D., Becker, U., Kinzl, L., Bischoff, M.: Physikalische Grundlagen der Vakuumversiegelung. *Zentralbl Chir* 82 (2000)

[37] Morykwas, M. J. ; Argenta, L. C.: Nonsurgical modalities to enhance healing and care of soft tissue wounds. *J South Orthop Assoc* 6 (1997), 279–288

[38] Morykwas, M. J. ; Argenta, L. C. ; Shelton-Brown, E. I. ; McGuirt, W.: Vacuum-assisted closure: a new method for wound control and treatment: animal studies and basic foundation. *Ann Plast Surg* 38 (1997), 553–562

[39] Morykwas, M. J. ; Argenta, L. C. ; Shelton-Brown, E. I. ; McGuirt, W.: Vacuum-Assisted Closure: A new Method for Wound Control and Treatment: Clinical Experience. *Ann Plast Surg* 38 (1997), 563–577

[40] Morykwas, M. J. ; David, L. R. ; Schneider, A. M. ; Whang, C. ; Jennings, D. A. ; Canty, C. ; Parker, D. ; White, W. L. ; Argenta, L. C.: Use of subatmospheric pressure to prevent progression of partial-thickness burns in a swine model. *J Burn Care Rehabil* 20 (1999), 15–21

[41] Morykwas, M. J. ; Faler, B. J. ; Pearce, D. J. ; Argenta, L. C.: Effects of varying levels of subatmospheric pressure on the

rate of granulation tissue formation in experimental wounds in swine. *Ann Plast Surg* 47 (2001), 547–551

[42] Morykwas, M. J. ; Howell, H. ; Bleyer, A. J. ; Molnar, J. A. ; Argenta, L. C.: The effect of externally applied subatmospheric pressure on serum myoglobin levels after a prolonged crush/ischemia injury. *J Trauma* 53 (2002), 537–540

[43] Moues, C. ; Stijnen, Th. ; Heule, F. ; HOVIUS, S.E.R: Is vacuum therapy superior to conventional moist treatment in promoting wound healing? A midterm report of a prospective randomised trial. *European Pressure Ulcer Advisory Panel* 5 (2003), 25–26

[44] Moues, C. M. ; Vos, M. C. ; Bemd, G. J. d. ; Stijnen, T. ; Hovius, S. E.: Bacterial load in relation to vacuum-assisted closure wound therapy: a prospective randomized trial. *Wound Repair Regen* 12 (2004), 11–17

[45] Nitschmann, K. ; Chrostek, J. ; Hupp, T.: Wound treatment throughout time. *Zentralbl Chir* 129 (2004), 71–73

[46] Rejzek, A. ; Weyer, F.: Der Einsatz des $V.A.C^{TM}$ Systems in der Therapie von Ulcus Cruris und diabetischer Gangrän. *Acta Chir Austriaca* 150 (1998), 12–13

[47] Saxena, V. ; Hwang, C. W. ; Huang, S. ; Eichbaum, Q. ; Ingber, D. ; Orgill, D. P.: Vacuum-assisted closure: microdeformations of wounds and cell proliferation. *Plast Reconstr Surg* 114 (2004), 1086–1098

[48] Sedlarik, K: Vergleichende Klinische Untersuchung der Wundresorption. *Zentralblr Chir* 20 (1970), 601–606

[49] Vogt, P. M. ; Kall, S. ; Boorboor, P. ; Lahoda, L. U.: Several aspects of foam materials and their possible interactions with the

wound surface in the vacuum therapy. *Zentralbl Chir* 129 (2004), 92–94

[50] Wackenfors, A. ; Sjogren, J. ; Algotsson, L. ; Gustafsson, R. ; Ingemansson, R. ; Malmsjo, M.: The effect of vacuum-assisted closure therapy on the pig femoral artery vasomotor responses. *Wound Repair Regen* 12 (2004), 244–251

[51] Wackenfors, A. ; Sjogren, J. ; Gustafsson, R. ; Algotsson, L. ; Ingemansson, R. ; Malmsjo, M.: Effects of vacuum-assisted closure therapy on inguinal wound edge microvascular blood flow. *Wound Repair Regen* 12 (2004), 600–606

[52] Walgenbach, K.J. ; Riabikhin, A.W. ; Andree, C. ; Galla, T.J. ; Schaefer, 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 (2000), 9–10

[53] Weed, T. ; Ratliff, C. ; Drake, D. B.: Quantifying bacterial bioburden during negative pressure wound therapy: does the wound VAC enhance bacterial clearance? *Ann Plast Surg* 52 (2004), 276—280

[54] Wetzel-Roth, W. ; 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 (2004), 7–11

[55] White, R. A. ; Miki, R. A. ; Kazmier, P. ; Anglen, J. O.: Vacuumassisted Closure Complicated by Erosion and Hemorrhage of the Anterior Tibial Artery. *J Orthop Trauma* 19 (2005), 56–59

[56] Wild, T. ; Schöttel, M. ; Renner, B. ; Zeugswetter, S. ; Fitzal, F. ; Rinder, H. ; Hölzenbein, T.: Schwarzer oder weisser Schwamm? *Eur Surg* 35 (2003), 43–44

[57] Willy, C. ; Gerngross, H. ; Sterk, J.: Measurement of Intracompartmental Pressure with Use of a New Electronic Transducer-Tipped Catheter System. *J Bone Joint Surg Am* 81 (1999), 158–168

[58] Zöch, G.: V.A.C.-therapy and laser-induced fluorescence of indocyanine-green (IC-view), an assessment of wound perfusion in diabetic foot syndrome. *Zentralbl Chir* 129 (2004), 80–81

7 Abbildungsverzeichnis

1 Elektronenmikroskopische Aufnahme PVA-Schwamm . . . 16
2 Elektronenmikroskopische Aufnahme PU-Schwamm 16
3 *trac-pad connector* zur Unterdrucktransmission 18
4 Darstellung der Drucksonde. 20
5 Applikation und Fixation der Sonden auf dem Tisch. . . . 23
6 Versuchssetting mit dem PVA-Schwamm. 24
7 Versuchssetting mit dem PU-Schwamm. 24
8 Versuchssetting über größere Entfernung PU-Schwamm . . 26
9 Versuchssetting über größere Entfernung PVA-Schwamm . 27
10 Versuchssetting am Rindermuskel. 28
11 Versuchssetting am Rindermuskel. 29
12 Messung im M. tibialis ant. 31
13 Druckverlaufsgraph PU-Schwamm Messrichtung Tisch . . 33
14 Druckverlaufsgraph PVA-Schwamm Messrichtung Tisch . 34
15 Druckverlaufsgraph PU-Schwamm Messrichtung Schwamm 35
16 Druckverlaufsgraph PVA-Schwamm Messrichtung Schwamm 36
17 Druckverlauf bei Messungen über eine längere Distanz. . . 38
18 Druckverlauf im avitalen Rindermuskel. 40
19 Druckverlauf im humanen musc. tibialis anterior. 41
20 Avitaler Rindermuskel nach Vakuumversiegelung. 47
21 Dehnungsverhalten einzelner Zellen im Wundgrund. . . . 49
22 Druckverteilung im Gewebe unter dem Einfluss der Vakuumtherapie. 50

8 Danksagung

- Meiner Frau, weil sie mich positiv begleitet.
- Meinen Eltern dafür, dass sie meine beruflichen Pläne stets unterstützt haben.
- Robert Lee Humble, MD, weil er meine Begeisterung zur Urologie geweckt, sowie Dr. Klaus Kult, der diese vertieft vertieft hat.
- Meinem Doktorvater PD Dr. Christian Willy, dass er trotz meiner fachfremden Begeisterung mit mir gearbeitet hat.
- Stuart C. Schmidt, indem er mir die Arbeit mit Dr. Humble ermöglichte.
- Dr. Mark Jeschonneck für die Hilfe beim Korrekturlesen im Literaturverzeichnis.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Hinnerk Sebastian von Thun-Hohenstein
Schlossstr. 17/1
89233 Neu - Ulm / Reutti

Tel.: (0731) 940 2994
E-Mail: HvThun@web.de

Geb. am 01. 07. 1968 in Osnabrück
Staatsangehörigkeit deutsch

Schulbildung

08/1974–06/1978	Johannis-Grundschule in Wallenhorst
08/1978–06/1980	Thomas-Morus-Schule (Orientierungsstufe) in Osnabrück - Haste
08/1980–06/1988	Gymnasium Angelaschule in Osnabrück - Haste (Leistungskurse Mathematik und Biologie)

Studium

04/1991–11/1998	Studium der Humanmedizin an der Universität Hamburg

Praktika und Famulaturen

10/1988 - 1990	Krankenpflegeausbildung am BwK Osnabrück, dort Einsatz in der Ultraschalldiagnostik und in der Chirurgie
02/1992	Krankenpflegepraktikum in der Urologie des BwK Hamburg
07/1993	Famulatur im Sanitätszentrum Schwanewede (Allgemeinmedizin)

07/1994	Famulatur in der Kinderklinik des Universitätsklinikum Eppendorf (Nephrologie)
07 - 09/1995	Famulatur in der Street Clinic / Parkview Hospital in Vicksburg, Mississippi, USA (Pädiatrie, Urologie, Gynäkologie)
02/1996	Famulatur in der Urologie des BwK Hamburg
03/1996	Famulatur in der Radiologie des Bwk Hamburg
08/1996	Famulatur bei Prof. Dr. Dr. Jendt-Rossmann, Hamburg. (Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie)

Beruflicher Werdegang

01.07.1988	Einberufung als GWDL zum SanBtl 3 in Hamburg
10/1988–06/1990	Ausbildung zum und Einsatz als Sanitätsunteroffizier am SanAusbZentr 3/3 (WHNS) in Osnabrück
07/1990–03/1991	Übernahme in die Laufbahn der SanOA und Offiziersausbildung
12/1998–06/2000	Arzt im Praktikum in der Abteilung für Urologie am BwK Hamburg (Ltd. Arzt FLA Dr. Hartmann)
07/2000–03/2001	Assistenzarzt in der Abteilung für Chirurgie am BwK Hamburg (Ltd. Arzt OTA Dr. Gatzka)
04/2001–09/2002	Einsatz als Truppenarzt an der Universität der Bundeswehr in München
10/2002–03/2003	Assistenzarzt in der Abteilung für Chirurgie am BwK Ulm (Ltd. Arzt OTA Prof. Dr. Gerngroß)
04/2003–06/2004	Einsatz als Schiffsarzt an Bord der Fregatte Brandenburg
seit 07/2004	Assistenzarzt in der Abteilung für Urologie am BwK Ulm (Ltd. Arzt OTA PD. Dr. Sparwasser)

Ulm, den 24.01.2006 Hinnerk Thun-Hohenstein