

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung



**10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik
KT2012 | Residenzschloss Dresden | 14.–15. Juni 2012**

Stelzer · Grote · Brökel · Rieg · Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

Entwickeln – Entwerfen – Erleben.
Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung
10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012)

Herausgeber:

Prof. Dr. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)
Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)
Prof. Dr. Klaus Brökel (Universität Rostock)
Prof. Dr. Frank Rieg (Universität Bayreuth)
Prof. Dr. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei
ma design, Tedata, Continental, xPLM, B.I.M. Consulting und Reiss Büromöbel

ma design
//ENGINEERING

Continental 

B.I.M.
consulting

TEDATA

xPLM
Solution

REISS

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 987-3-942710-80-0

© 2012 TUDpress
Verlag der Wissenschaften GmbH
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Sandra Olbrich/Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Audi A6 Limousine © 2012 Audi AG

Cutane Mikrogewebspartikel – Lösungsansätze für eine neue Technologie zur Behandlung Schwerbrandverletzter

1 Problemstellung

Jährlich werden in Deutschland etwa 15.000 Patienten mit thermischen Verletzungen stationär behandelt, davon etwa 1.400 Fälle mit schweren und schwersten Verbrennungen intensivmedizinisch in spezialisierten Verbrennungszentren. 20-30% der Patienten sind Kinder. Obwohl die Überlebenschancen auch von Patienten mit schwersten thermischen Verletzungen (80 %–90 % verbrannte Körperoberfläche, vKOF) in den letzten Jahrzehnten deutlich erhöht werden konnte, liegt die Sterblichkeitsrate noch immer bei ca. 20 %. (Hartmann & Ottomann 2009, Pallua & von Bülow 2006)

Die chirurgische Standardtherapie zur Behandlung thermischer Verletzungen der Grade IIb und III besteht in der Entfernung der irreversibel geschädigten Haut (Nekrosektomie) und der sofortigen, permanenten Deckung der Wundflächen durch körpereigene (autologe) Haut. Studien haben gezeigt, dass eine frühzeitige Nekrosektomie die Überlebensrate Schwerbrandverletzter signifikant steigert (Burke et al. 1974). Da bei großflächigen thermischen Verletzungen jedoch keine ausreichend großen Spenderareale zur Gewinnung autologer Transplantate zur Verfügung stehen, kommen andere, kostenintensive und weniger effektive Verfahren des Hautersatzes

zum Einsatz. Dabei handelt es sich um verschiedene synthetische oder biologische temporäre Hautersatzmaterialien sowie gezüchtete autologe Keratinozytentransplantate. Keines der angewandten Verfahren ist jedoch derzeit in der Lage, eine dauerhafte Wiederherstellung der normalen Funktion der Haut zu ermöglichen. Das Problem der frühestmöglichen, dauerhaften Deckung kann trotz intensiver Forschungen auf dem Gebiet des Tissue Engineering bisher nur durch autologe Spalthaut sicher gelöst werden (Vogt et al. 2007).

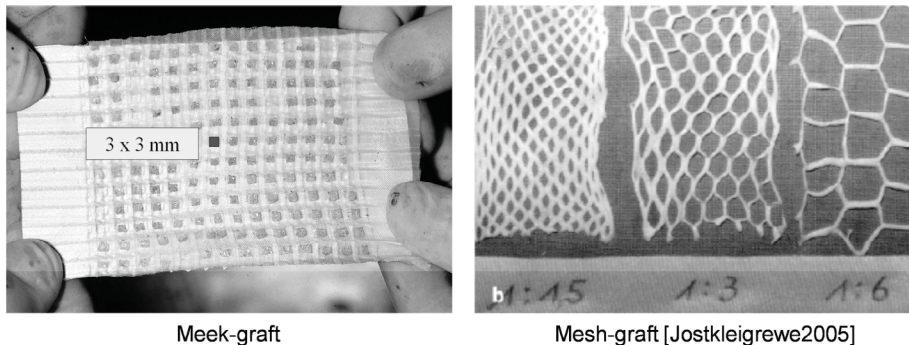
Ziel des Projektes ist daher die Verbesserung der Behandlung von Schwerbrandverletzten durch die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Generierung autologer Transplantate mit maximaler Flächenvergrößerung durch die Anwendung von Mikrogewebspartikeln.

2 Stand der Technik

Um eine Expansion von patienteneigener Spenderhaut zu erreichen, wurde seit Beginn des 20. Jahrhunderts eine Vielzahl an Methoden entwickelt, die zwar im Rahmen tierexperimenteller Studien und Einzelfällen zum Einsatz gekommen sind, aber nie in die klinische Praxis, insbesondere der Behandlung Schwerstbrandverletzter, übernommen wurden. Eine Ursache dafür ist möglicherweise die Tatsache, dass wesentliche biologische Parameter bezüglich der Wundheilung nicht oder nur unzureichend bekannt sind. Diese sind aber für eine optimale Herstellung von Hauttransplantaten notwendig.

Gegenwärtig finden bei der Behandlung von Brandverletzten im europäischen Raum zwei Verfahren zur Expansion von Spalthaut maßgeblich Anwendung. Grundlage bei beiden Verfahren ist die Entnahme der körpereigenen Haut mit speziellen Dermatomen in einer Dicke von 0,2 mm bis 0,4 mm. Im Anschluss wird die entnommene Eigenhaut mechanisch bearbeitet und expandiert auf die Wundfläche appliziert. Dabei basiert das Mesh-Verfahren nach Tanner und Vandeput auf der Erzeugung einer Gitterstruktur in der Spalthaut und deren Aufweitung zu einem Gitternetz. Bei der Methode nach Meek wird die Spalthaut in quadratische Partikel der Größe 3×3 mm zerteilt und mit Hilfe eines vorgefalteten Trägermaterials expandiert (siehe Abbildung 1 und 2, Kreis et al. 1994). Die

Abbildung 1: Verfahren zur Expansion autologer Spalthaut



Wundheilung erfolgt durch Schließen der Transplantatzwischenräume ausgehend von den Transplantaträndern durch sekundäre Epithelisierung.

Technisch sind mit beiden Verfahren Expansionen von 1,5:1 bis 9:1 möglich. Eine Erhöhung der Expansion führt zu einer Vergrößerung der Transplantatzwischenräume und bedingt damit längere Wundheilungsdauern. Eine Expansion $> 4:1$ wird daher nur in Ausnahmefällen angewandt, da sowohl die funktionellen als auch ästhetischen Ergebnisse aufgrund der langen Epithelisierungsdauer unbefriedigend sind.

Bei kleinen Expansionen wird in der klinischen Praxis überwiegend das Mesh-Verfahren eingesetzt. Die das Projekt begleitenden Mediziner begründen diesen Umstand damit, dass die Transplantate einfacher und schneller herzustellen sind. Weiterhin ist weniger Personal während der Operation bzw. Transplantation erforderlich. Die Handhabung von Mesh-Transplantaten wird jedoch mit zunehmender Expansion schwieriger («Spaghetti»). Werden Expansionen größer als 4:1 notwendig, kommt häufig das aufwendigere Meek-Verfahren zum Einsatz. Beim Meek-Verfahren wird bedingt durch die Technologie immer ein zweites Operationsteam benötigt. Der grundlegende medizinische Vorteil des Meek-Verfahrens bei großen Expansionen ergibt sich aus der Art der Expansion und ermöglicht, dass die entstehenden Transplantatabstände gegenüber dem Mesh-Verfahren bei gleicher Expansion deutlich geringer sind.

3 Zielsetzung

Im mathematischen Ansatz des Meek-Verfahrens zeigt sich, dass eine Erhöhung der Expansionsrate bei gleichbleibenden oder verringerten Partikelabständen nur durch eine Reduzierung der Partikelgröße möglich ist. Beispielsweise kann ausgehend von den bisherigen Transplantatabständen des Meek-Verfahrens bei einer Expansionsrate von 1:4 durch eine Reduzierung der Partikelgröße auf 1 mm × 1 mm bei annähernd gleichbleibendem Partikelabstand die Expansionsrate theoretisch auf 1:15, bei einer Partikelgröße von 0,5 mm × 0,5 mm sogar auf 1:50, erhöht werden (Abbildung 2). Umgekehrt reduziert sich unter Beibehaltung der Expansionsrate von 1:4 durch eine Verkleinerung der Partikel auf 1 mm × 1 mm der bisherige Partikelabstand um ca. 60 %.

Es wird daher davon ausgegangen, dass sich mit diesem Szenario des Einsatzes von »Mikrogewebspartikeln« sehr gute medizinische Ergebnisse mit schnellen Heilungsraten und verringerter Narbenbildung erzielen lassen.

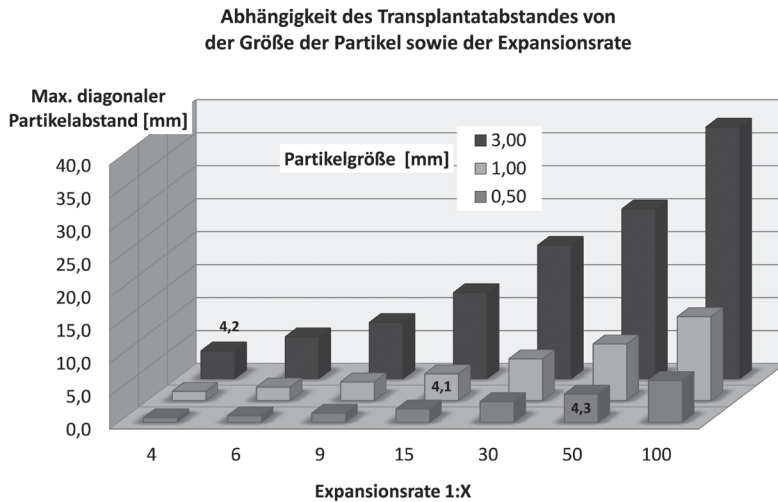


Abbildung 2: Diagonaler Partikelabstand in Abhängigkeit von Partikelgröße und Expansionsrate

Für die Erarbeitung eines technischen Konzeptes zur Realisierung einer Transplantationstechnologie auf der Basis von Mikrogewebspartikeln sind die folgenden drei operativen Schritte umzusetzen:

- Herstellung der Mikrogewebspartikel
- Expansion der Mikrogewebspartikel
- Transplantation der Mikrogewebspartikel

Eine wesentliche medizinische Anforderung bei der Herstellung ist dabei die Reduzierung bzw. Vermeidung der Schädigung der Mikrogewebspartikel. Das ist notwendig, um eine größtmögliche Vitalität und damit Proliferationsfähigkeit der Partikel zu erhalten. Die anschließende Expansion der Partikel sollte regelmäßig erfolgen. Postoperativ muss die Methode der Transplantation eine Wundbegutachtung bzw. einen frühzeitigen Verbandswechsel ermöglichen, ohne einen Verlust der Transplantate zu verursachen.

Folgende wesentliche Hauptanforderungen für eine neue Technologie zur Behandlung Schwerbrandverletzter können zusammengefasst werden:

- Vermeidung einer Gewebeschädigung in allen Schritten der zu realisierenden Prozesskette
- sicherer und genauer bzw. reproduzierbarer Verfahrensablauf/Prozess, insbesondere Erreichung der gewünschten Expansion
- Variabilität in der Expansion (und Partikelgröße)
- sichere und leichte Handhabbarkeit der Transplantate
- sichere und einfache Bedienbarkeit der Gerätetechnik
- Integration in den Operationsablauf sowie die Operationsumgebung, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Restriktionen
- Sterilisierbarkeit der Komponenten, welche Kontakt zur Spenderhaut oder sterilem Personal haben
- Erfüllung der gesetzlichen und normativen Anforderungen
- Reduzierung von Kosten bzw. Rechtfertigung von Mehrkosten durch Verbesserung von Behandlungsergebnissen (Nachweis der medizinischen Leistungsfähigkeit, Barz & Engelmann 2011)

4 Lösungsansätze und Realisierung

Die Herstellung der Mikrogewebspartikel erfordert ein geeignetes Verfahren zum Trennen des Gewebes in die gewünschte Form. Wesentliche Hauptanforderung an ein derartiges Verfahren ist die Vermeidung einer Gewebeschädigung, insbesondere an den Schnittträgern. Alle bisherigen, im klinischen Alltag zum Einsatz kommenden, Techniken arbeiten mit mechanischen Schneidwerkzeugen. Vordergründig werden Messerwalzen genutzt. Bei diesen handelt es sich um sterilisierbare Mehrwegprodukte mit einer, im Vergleich zu geschliffenen Schneiden von Skalpellern, relativ breiten Schneidkante. Ein erster Arbeitsschritt bestand daher, u. a. in der Untersuchung des Einflusses der Schneidfähigkeit mechanischer Werkzeuge auf die Vitalität und die Reepithelisierung der erzeugten Partikel.

Unter der Nutzung von mechanischen Schneidwerkzeugen wurden bzw. werden verschiedene Lösungskonzepte untersucht. Diese können in Bezug auf die Gleichförmigkeit der entstehenden Partikel in ein definiertes und undefiniertes Trennen unterschieden werden. Die Lösungsmöglichkeiten differenzieren dabei sowohl hinsichtlich der Schneidenform, Schneidenkontur und der Anzahl der Schneiden der verschiedenen Werkzeuge als auch in Bezug auf die angewandte Schnittart. Für alle Konzepte ergeben sich folgende Hauptanforderungen:

- Vermeidung bzw. Reduzierung einer Gewebeschädigung, durch entsprechend hohe Schneidfähigkeit (»Schärfe«)
- hohe Standzeit/ Schneidhaltigkeit der Werkzeuge im zeitlichen Rahmen der Operation (Auslegung als geschliffene Einwegprodukte)
- Flexibilität der Partikelgröße
- Minimierung von Werkzeugkosten bzw. zusätzlich notwendiger Verbrauchs- bzw. Verschleißmaterialien
- einfache Handhabung ohne Gefährdung des Personals

Eine wichtige Anforderung an das Herstellungskonzept ist die Erzielung einer hohen Flexibilität hinsichtlich der herstellbaren Partikelgröße. Dabei sollte nicht nur die Notwendigkeit des generellen Vorhaltens spezifischer Werkzeuge für einzelne Transplantatsze-

narien, sondern auch die Notwendigkeit eines Werkzeugwechsels im Operationsverlauf vermieden werden. Der Operateur soll in der Lage sein, die betroffenen Körperregionen entsprechend ihrer differenzierenden Anforderungen (z. B. kosmetisch wichtige oder funktionell sensible Bereiche) mit den notwendigen Transplantaten, bei Bedarf auch abweichend von der präoperativen Planung, versorgen zu können. Eine Variation der Partikelgröße innerhalb eines Transplantates stellt dabei das zu erzielende Optimum dar. Eine Problematik bei der Nutzung mechanischer Schneiden zur Zerkleinerung stellt das Anhaften der feuchten Spalthaut an den Schneiden dar. Ein möglicher Ansatz zur Lösung dieses Problems, ist die Nutzung ultraschallerregter Klingen. Durch die hochfrequente Oszillation, kann die notwendige Schnittkraft deutlich reduziert und die Standzeit des Schneidwerkzeuges erhöht werden. Gleichzeitig wird ein Anhaften der Spalthaut vermieden.

Ein Verfahren zum undefinierten Trennen durch mechanische Schneidwerkzeuge stellt das Mixen der Spalthaut mittels rotierender Schneidmesser dar. Da sich am Markt verfügbare Standardgeräte als ungeeignet für aussagkräftige Ergebnisse erwiesen, wurde ein eigenes Versuchsgerät konstruiert und gefertigt. In diesem kommen als Schneidwerk herkömmliche Skalpellmesser zum Einsatz, welche durch eine einfache Mechanik auf der Messerwelle positioniert und ausgetauscht werden können. Die Kühlung der Haut während des Trennprozesses, erfolgt durch die Zugabe von gekühlter, steriler Kochsalzlösung. Die durchgeführten Versuche zeigen die prinzipielle Machbarkeit. Die Technik erscheint zunächst von der Handhabung sehr einfach und lässt sich insbesondere im Hinblick auf die zeitlichen Restriktionen gut in den vorgegebenen Operationsablauf einbinden. Problematisch ist jedoch, dass eine Abhängigkeit der Partikelgröße von der Prozessdauer nur unzureichend definiert werden kann. Ebenso ist eine homogene Partikelgröße nicht für alle Partikelgrößen erreichbar. Damit ist die für die operative Planung notwendige Prozesssicherheit nicht gegeben. Weiterhin ist die Schädigung der Partikel insbesondere bei geringen Partikelgrößen höher. Aus diesen Gründen wird, in Abstimmung mit den das Forschungsprojekt begleitenden Medizinern, das Verfahren des Mixens von Haut gegenwärtig nicht weiterbearbeitet.

Einen völlig neuen Ansatz stellt das Abtragen mittels Laserstrahl dar. Die Technologie der Ultrakurzpulslaser ermöglicht das »kalte« Laserschneiden temperaturempfindlicher Materialien und wird bereits vielfältig in der refraktiven Chirurgie eingesetzt. Wesentlicher Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit einer sowohl in Größe als auch Form vollkommen variablen Generierung von Gewebepartikeln ohne Wärmeinfluss und entsprechender Gewebeschädigung.

Im Projekt wird dafür ein Femtosekundenlaser genutzt. Da es nicht möglich war die Lasertechnik in einer sterilen Umgebung zu installieren, mussten für die Durchführung von ersten Versuchen spezielle Versuchskammern entwickelt werden. Diese ermöglichen eine sterile Bearbeitung der Spalthautproben bei gleichzeitig sehr guter optischer Qualität des Strahlenganges. Ziel erster Versuche ist zunächst die Charakterisierung der Ablation von Hautgewebe durch Parameterstudien, um im Folgenden ein geeignetes Parameterset zur Erzielung der notwendigen Schnitttiefe bei gleichzeitig zeitlicher Optimierung des Prozesses (Maximierung der Ablationstiefe bzw. Reduzierung der notwendigen Schnittanzahl) ohne thermische Schädigung zu erarbeiten. Dabei ergaben sich in ersten Versuchen zwei grundlegende Probleme im Prozess:

- Probleme bei der Fokussierung durch starke Inhomogenitäten der Haut
- Austrocknung der Haut während der Prozessdurchführung

Ein späterer Einsatz im OP bedingt eine hohe Prozesssicherheit. Eine Definition einzuhaltender Rahmenparameter hinsichtlich der Qualität der gewonnenen Spalthaut ist aufgrund der biologische Variabilität und des Entnahmeverfahrens kaum möglich. Im Folgenden ist es daher notwendig, den Einfluss verschiedener Faktoren (z. B. Feuchtigkeit der Haut, Dickenunterschiede und Welligkeit der Hautoberfläche) sowie die Toleranzen der einzelnen Laserparameter zu ermitteln und gezielt aufeinander abzustimmen.

Prinzipiell kann die Aussage getroffen werden, dass bezüglich des ersten operativen Schrittes, die Herstellung der Mikrogewebspartikel, sowohl mechanische Schneidtechniken als auch die Lasertechnik

nik genutzt werden können. Die Problematik bei der Auswahl bzw. Weiterentwicklung erster geeigneter Konzepte besteht gegenwärtig darin, dass wesentliche, sowohl die Wundheilung als endgültige Zielgröße, als auch die Technologie beeinflussende, biologische Parameter nicht oder nur unzureichend bekannt sind. Dies sind:

- die biologisch minimale sinnvolle Partikelgröße und
- die Lage der Partikel zum Wundgrund

Beide Eigenschaften könnten, in Bezug auf ihre im Hinblick auf eine bestmögliche Wundheilung anzustrebende Ausprägung, eine die Technologie wesentlich bestimmende Restriktion darstellen. Für den Einfluss der Partikelgröße muss angenommen werden, dass sich die Epithelisierungspotenz der Partikel ab einer definierten minimalen Partikelgröße gegenläufig zu den erzielten Vorteilen der Reduzierung der Partikelabstände durch Minimierung der Größe verhalten wird. Dabei könnte die Größe der Partikel gleichzeitig einen Einfluss auf die notwendige Lage der Partikel zum Wundgrund besitzen. Zu beiden Fragestellungen finden sich in der Literatur differenzierte Aussagen.

Eine Beantwortung dieser medizinischen Fragestellungen kann jedoch nur durch in-vivo-Versuchsdurchführungen erfolgen. Daher waren sehr früh im Entwicklungsprozess erste Tierversuche notwendig, welche zunächst mit einem einfachen Versuchsaufbau zur Evaluierung von Technik und Tiermodell in kleiner Zahl durchgeführt wurden. Für eine Verifizierung der ersten Versuchsergebnisse war es notwendig eine Folgesystem zu entwickeln und zu fertigen, mit welchem eine deutlich reduzierte Herstellungszeit der Transplantate erreicht werden kann. Grundlage dafür waren u. a. die Erfahrungen aus den ersten Tierversuchen. Das System ermöglicht eine automatisierte und reproduzierbare Herstellung der verschiedenen Transplantate. Dazu wird die Spalthaut mittels eines Stanzwerkzeuges geschnitten und entsprechend dem Transplantatszenario geometrisch und lagerichtig definiert abgelegt. Aufgrund der geringen Formstabilität derart kleiner Hautpartikel sowie der starken Adhäsionsneigung war die Hauptproblematik dabei die Realisierung einer prozesssicheren und gewebeschonenden automatisierten Handhabung der Partikel.

Die Herstellung und Expansion von Mikrogewebspartikeln mit einer derartigen automatisierten Handhabungstechnologie ist sehr aufwändig und trotz der hohen Verfahrensgeschwindigkeiten sehr zeitintensiv. Das Konzept basiert jedoch auf der Idee, individuelle Transplantate zu erzeugen, deren Aufbau sich ausschließlich an den spezifischen Gegebenheiten der Wundgeometrie sowie der Körperregion orientiert. Dazu ist es notwendig mittels geeigneter Bodyscanning-Technologien, einen 3D-Datensatz der geschädigten Körperteile des Patienten zu erzeugen. Diese ermöglichen es, in Verbindung mit einer Flächenrückführungssoftware maßgeschneiderte Transplantate, etwa für Gelenkregionen, zu generieren. Hierbei kann der Operateur, je nach funktionellen und ästhetischen Erfordernissen, die Größe der Mikrogewebspartikel und die Expansionsrate variieren. Somit werden die vorhandenen Ressourcen an Spalthaut optimal genutzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Nach dem gegenwärtigen Stand der Arbeiten kann aus ersten Versuchsreihen belegt werden, dass die Nutzung cutaner Mikrogewebspartikel einen Lösungsansatz für die bessere Versorgung Schwerstbrandverletzter darstellen kann. Die mechanisch hergestellten und transplantierten Gewebspartikel sind vital und besitzen eine entsprechende Proliferationspotenz. Die mechanische Herstellung eignet sich gut, um die noch offenen medizinischen Fragestellungen in fortführenden Tierversuchen zu beantworten und erlaubt einen Vergleich zur bisher angewandten Meek-Technik.

Hinsichtlich des umzusetzenden Lösungskonzeptes bezüglich der Herstellung der Mikrogewebspartikel für den späteren OP-Einsatz, sind sowohl eine mechanische Lösung, als auch ein Trennen mittels Lasertechnologie denkbar. Ein Nachteil der mechanischen Lösung besteht in der geringeren Flexibilität gegenüber der Lasertechnik. Durch die hohe Flexibilität dieses Wirkprinzips ist es möglich, maßgeschneiderte Transplantate zu generieren. Eine Voraussetzung dafür ist die Lösung der im Punkt 4 aufgeführten Probleme. Mit der Lasertechnik können bei gleichzeitig guten funktionellen und ästhetischen Ergebnissen, die vorhandenen Ressourcen an Spalthaut,

nach dem gegenwärtigen Stand der Bearbeitung des Projektes, optimal genutzt werden. Dies wiederum kann bedeuten, dass weniger Operationen notwendig sind und die Verweilzeit in medizinischen Einrichtungen verkürzt werden kann. Eine gesicherte Aussage, welches Wirkprinzip die Grundlage für die Herstellung von Hauttransplantaten aus cutanen Mikrogewebspartikel unter OP-Bedingungen ist, kann erst nach der eindeutigen Klärung aller die Technologie beeinflussenden biologischen Parameter getroffen werden. Bezüglich des zweiten erforderlichen operativen Schrittes, der Expansion der erzeugten cutanen Mikrogewebspartikel, wurden verschiedene Lösungskonzepte erarbeitet. Dies erfolgte parallel zur Erarbeitung von Lösungen für ein geeignetes Verfahren zum Trennen des Gewebes. Welches Lösungsprinzip alle in Bezug auf die bei der Expansion zu realisierenden Anforderungen erfüllt, hängt wiederum wesentlich von der Klärung der biologischen Parameter ab. Von großer Bedeutung ist hierbei eine gesicherte Aussage über die erforderliche Lage der Partikel zum Wundgrund. Weiterhin ist es von dem gewählten Lösungskonzept zur Herstellung der Mikrogewebspartikel abhängig. Technisch ist es aber möglich, für alle Szenarien Lösungen zum späteren OP-Einsatz zu generieren. Gegenwärtig befinden sich erste Lösungsprinzipien in der Entwicklungsphase. Es ist geplant, diese im Zuge der Durchführung von weiteren Tierversuchen zu testen. Dadurch soll es möglich sein, frühzeitig Aussagen zur Prozesssicherheit der einzelnen Lösungskonzepte treffen zu können.

Literaturverzeichnis

- Barz, I. & Engelmann, F. (2011): Die effektive Behandlung großflächiger thermischer Verletzungen – eine medizinisch-technische und wirtschaftliche Herausforderung. In: Brökel, K.; Stelzer, R.; Feldhusen, J.; Rieg, F. & Grote, K.-H. (Hrsg.): *KT 2011 – 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011. Integrierte Produktentwicklung für einen globalen Markt*, Aachen: Shaker-Verlag, S. 180–187
- Burke, J. F.; Bondoc, C. C. & Quinby, W. C. 1974: Primary burn excision and immediate grafting: a method shortening illness. In: *The Journal of Trauma*, 14 (5), 389–395
- Hartmann, B. & Ottomann, Ch. 2009: *Chirurgische Therapie von Erwachsenen*. In: Kamolz, L.-P.; Herndon, D. N. & Jeschke, M. G. (Hrsg.): *Verbrennungen – Diagnose, Therapie und Rehabilitation des thermischen Traumas*, Wien: Springer-Verlag, S. 73–87

- Jostkleigrewe, F. 2005: Behandlungsstrategien bei Brandverletzungen. In: Trauma Berufskrankh, 7, S. 185–193
- Kreis, R. W.; Mackie, D. P.; Hermans, R. R. & Vloemanns, A. R. 1994: Expansion techniques for skin grafts: comparison between mesh and meek island (sandwich) grafts. In: Burns, 20, 39–42
- Pallua, N. & von Bülow, S. 2006: Behandlungskonzepte bei Verbrennungen – Teil II: Technische Aspekte. In: Chirurg, 77, 179–188
- Vogt, P. M.; Kolokythas, P.; Niederbichler, A.; Knobloch, K.; Reimers, K. & Choi, C. Y. 2007: Innovative Wundtherapie und Hautersatz bei Verbrennungen. In: Chirurg, 78, 335–342

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Engelmann
Ines Barz, M. Sc.
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena
Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen
Carl-Zeiss-Promenade 2
07745 Jena
www.wi-konstruktion.fh-jena.de