

**Diplomarbeit**

**VERBRENNUNGEN DER HAND  
STATE OF THE ART**

eingereicht von

**Anna Erker**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktorin der gesamten Heilkunde**

**(Dr.in med. univ.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**klinischen Abteilung für**

**Plastische, Ästhetische und Rekonstruktive Chirurgie**

unter der Anleitung von

**Dr. med. univ. Janos Cambiaso-Daniel**

und

**Univ.- Prof. Dr. med. Lars-Peter Kamolz, MSc.**

Graz, 12. März 2020

*Eidesstattliche Erklärung*

*Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, an der als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.*

*Graz, am 12. März 2020*

*Anna Erker eh*

# Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	VI
TABELLENVERZEICHNIS .....	VII
ZUSAMMENFASSUNG .....	VIII
ABSTRACT .....	X
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 DIE HAUT .....	1
1.1.1 <i>Epidermis</i> .....	1
1.1.2 <i>Dermis</i> .....	2
1.1.3 <i>Dermoepidermale Verbindungszone</i> .....	3
1.1.4 <i>Subkutis</i> .....	3
1.2 WUNDHEILUNG .....	4
<b>2 DIE ROLLE DER HAND.....</b>	<b>5</b>
<b>3 PATHOGENESE DER VERBRENNUNG .....</b>	<b>7</b>
3.1 FLAMMENVERBRENNUNG .....	7
3.2 VERBRÜHUNG.....	7
3.3 KONTAKTVERBRENNUNG.....	7
3.4 CHEMISCHE VERBRENNUNG .....	8
3.5 ELEKTROVERBRENNUNG.....	8
<b>4 PATHOPHYSIOLOGIE DER VERBRENNUNG .....</b>	<b>9</b>
<b>5 VERBRENNUNGSGRAD.....</b>	<b>10</b>
5.1 GRAD 1 (SUPERFICIAL EPIDERMAL INJURY) .....	10
5.2 GRAD 2A (SUPERFICIAL DERMAL BURN).....	10
5.3 GRAD 2B (DEEP DERMAL BURN) .....	11
5.4 GRAD 3 (FULL THICKNESS BURN).....	11
5.5 GRAD 4 (VERKOHLUNG) .....	12
<b>6 VERBRENNUNG DER HAND.....</b>	<b>12</b>
<b>7 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>13</b>
<b>8 WUNDTIEFENDIAGNOSTIK.....</b>	<b>14</b>
<b>9 DEBRIDEMENT .....</b>	<b>15</b>
<b>10 KLASSISCHE ESCHAROTOMIE .....</b>	<b>19</b>

<b>11</b>	<b>ENZYMATISCHE ESCHAROTOMIE .....</b>	<b>24</b>
<b>12</b>	<b>AUTOLOGE HAUTTRANSPLANTATE .....</b>	<b>26</b>
<b>13</b>	<b>VERBÄNDE UND HAUTERSATZMATERIALIEN .....</b>	<b>27</b>
13.1	VERBÄNDE MIT LOKALEN ANTISEPTIKA .....	27
13.1.1	<i>Acticoat</i> ® .....	27
13.1.2	<i>Mepilex Ag</i> ® .....	28
13.2	BIOLOGISCHE HAUTERSATZMATERIALIEN .....	29
13.2.1	<i>Allogen</i> .....	29
13.2.2	<i>Biosynthetisch</i> .....	31
13.3	DERMISERSATZ .....	33
13.3.1	<i>Integra</i> ® .....	33
13.3.2	<i>Matriderm</i> ® .....	34
<b>14</b>	<b>NEGATIVE PRESSURE WOUND THERAPY DER HAND (NPWT) .....</b>	<b>34</b>
<b>15</b>	<b>NARBENMANAGEMENT UND KONTRAKTUREN .....</b>	<b>38</b>
<b>16</b>	<b>REKONSTRUKTION .....</b>	<b>42</b>
16.1	KRALLENHAND .....	43
16.2	DIGITALE BEUGEKONTRAKTUR.....	45
16.3	SYNDAKTYLIE .....	47
<b>17</b>	<b>OUTCOME.....</b>	<b>49</b>
<b>18</b>	<b>CONCLUSIO.....</b>	<b>51</b>
<b>19</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>53</b>

## Abkürzungsverzeichnis

TGF- $\alpha$	Transforming growth factor alpha
TGF- $\beta$	Transforming growth factor beta
IGF-1	Insuline like growth-factor-1
EGF	Epidermal growth factor
LDI	Laser Doppler Imaging
MIM	Minimal invasive modality
BICS	Burn Induced Compartment Syndrome
NPWT	Negative pressure wound therapy
V.A.C.	Vacuum Assisted Closure
PU	Polyurethan
DASH	Disability of Arm, Shoulder and Hands
STSG	Split thickness skin graft
FTSG	Full thickness skin graft
VSS	Vancouver Scar Scale
K-Draht	Kirschner-Draht
MCP	Metacarpophalangealgelenk
PIP	Proximales Interphalangealgelenk
DIP	Distales Interphalangealgelenk
ROM	Range of Motion
JTHFT	Jabson-Taylor-Hand-Function-Test
ADL	Activities of Daily Life
TEMPA	Test d'Evaluation des Membre Supérieurs des Personnes Agée
MHQ	Michigan Hand Quastionnaire

# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 AUFBAU DER HAUT .....	4
ABBILDUNG 2 GREIFFORMEN DER HAND.....	6
ABBILDUNG 3 VERBRENNUNGSZONEN NACH JACKSON .....	10
ABBILDUNG 4 SCHEMA DER ESCHAROTOMIE INZISIONEN.....	23
ABBILDUNG 5 V.A.C.® GRANUFOAM HAND DRESSING KIT .....	36
ABBILDUNG 6 "INTRINSIC-PLUS"-POSITION DER HAND .....	37
ABBILDUNG 7 KOMPRESSIOBSBEKLEIDUNG FÜR DIE HAND.....	40
ABBILDUNG 8 KRALLENHAND NACH VERBRENNUNGSVERLETZUNG .....	44
ABBILDUNG 9 Z-PLASTIK.....	46

# Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 VANCOUVER SCARE SCALE.....	39
TABELLE 2 NARBENKONTRAKTUR DER HAND NACH MCCAULEY .....	42
TABELLE 3 EINTEILUNG INTERDIGITALER KONTRAKTUREN .....	48

# Zusammenfassung

## **Hintergrund:**

Die Hand ist bei einem Großteil der Verbrennungsoffer ein beteiligtes Organ. Trotz ihres geringen Anteils an der Körperoberfläche zieht die Verbrennung der Hand große Folgen für den Einzelnen nach sich. Der Erhalt der Funktion der Hand ist eng mit dem Erhalt der Selbstständigkeit und Arbeitsfähigkeit der PatientInnen verbunden. Daher sind eine Diagnostik und Behandlung nach den aktuellsten Erkenntnissen der Wissenschaft unerlässlich.

## **Material und Methoden:**

Bei dieser Diplomarbeit handelt es sich um eine Überblicks-Literaturrecherche. Es wurden Bücher, E-Books sowie Publikationen aus „PubMed“ und „Google Scholar“ für die Ausarbeitung des Themas herangezogen. Die Auswahl der einbezogenen Quellen wurde auf Publikationen aus den letzten 15 Jahren beschränkt. Klinisch relevante Themen wurden übersichtlich ausgearbeitet und Widersprüche gegenübergestellt.

## **Ergebnisse:**

Die aktuelle Datenlage zeigt die Wichtigkeit der exakten Diagnostik, um die anschließende Weiterbehandlung auf das Verletzungsausmaß anpassen zu können. Die Invasivität der Therapie soll immer auf das zu erwartende Outcome abgestimmt werden, um für die PatientInnen das bestmögliche Ergebnis zu erzielen. Als besonders vorteilhaft stellte sich das enzymatische Debridement sowie die Vakuum-Therapie der Hand heraus. Nach wie vor bleibt die autologe Vollhauttransplantation Goldstandard in der Deckung der Hand obwohl zahlreiche Hautersatzmaterialien am Markt verfügbar sind, die den anatomischen Gegebenheiten angepasst wurden. Bei der Rekonstruktion folglicher Handdeformitäten soll die Hand als Funktionseinheit betrachtet werden, um funktionell zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen.

**Diskussion:**

Bezüglich der Objektivierung des Outcomes nach Verbrennungen der Hand herrscht in der Literatur bis dato noch keine einheitliche Form, dies Bedarf künftiger Studien.

# **Abstract**

## **Background:**

In most burn victims the hand is a major organ involved. Despite its small proportion on the surface of the body, hand burns have major consequences for the individuals. The preservation of the hand's function is closely linked to the preservation of the patient's independence and ability to work. Therefore, diagnosis and treatment according to the latest scientific findings are indispensable.

## **Methods:**

The technique of this diploma thesis is an overview literature research. Books, e-books and publications derived from "PubMed" and "Google Scholar" were used for research. The selection of the sources included was limited to publications from the last 15 years. Clinically relevant topics were clearly elaborated and contradictions were compared.

## **Results:**

Current data underlines the importance of exact diagnostics to ensure the subsequent treatment is applied to the extent of the injury. The invasiveness of the therapy should always be adapted to the expected outcome to achieve the best possible result for the patient. Enzymatic debridement and vacuum therapy of the hand proved to be particularly beneficial. Autologous full-thickness skin transplantation remains the gold standard in covering the hand although numerous skin replacement materials are available on the market that have been adapted to the anatomical conditions of the hand. When reconstructing subsequent hand deformities, the hand should be considered as a functional unit in order to achieve functionally satisfactory results.

## **Discussion:**

As far as the objectivisation of the outcome is concerned, there is no standard yet. There is a need for future research. There is a need for future research.

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Haut

Die Haut ist das größte Organ des menschlichen Körpers und bedeckt diesen in seiner Gesamtheit. Sie hat vielseitige Funktionen, unter anderem bietet sie Schutz vor thermischen, mechanischen, chemisch-toxischen und mikrobiellen Schäden. Sie dient der Sinneswahrnehmung, der Temperaturregulation und schützt vor Flüssigkeitsverlust (1). Die Haut kann grundsätzlich in zwei Schichten unterteilt werden. Die Kutis und die direkt darunter liegende Subkutis (siehe Abb. 1). Die Kutis lässt sich weiter in die Epidermis und Dermis unterteilen. Die verschiedenen Schichten haben unterschiedliche Aufgaben und Funktionen. Die Kutis dient der Sinneswahrnehmung, der Temperaturregulation und schützt vor Wasserverlust. Die Subkutis sorgt vorwiegend für die Temperaturisolierung und den mechanischen Schutz. Man kann außerdem die sogenannte Felderhaut von der Leistenhaut unterscheiden. Die Felderhaut befindet sich am Großteil des Körpers, während die Leistenhaut nur auf den Handflächen und Fußsohlen zu finden ist. Aus der Haut gehen auch einige Hautanhangsgebilde hervor. Dazu zählen Haare, Nägel und Hautdrüsen. Auch die Brustdrüse wird den Hautanhangsgebilden zugeordnet (2).

### 1.1.1 Epidermis

Die Epidermis ist die äußerste Schicht der Haut und besteht hauptsächlich aus Keratinozyten. Sie bilden ein verhorntes, mehrschichtiges Plattenepithel. Es werden fünf Schichten unterschieden, die durch die verschiedenen Differenzierungsstadien gekennzeichnet sind (3). Die Differenzierung der Keratinozyten von der innersten Schicht, dem Stratum basale, bis zur äußersten Schicht, dem Stratum corneum, geschieht in einem circa vierwöchigen Prozess (1). Neben den Keratinozyten befinden sich auch Melanozyten, Langerhans-Zellen und Merkel-Zellen in der Epidermis (3). Da die Epidermis vom Ektoderm abstammt, ist diese zur regenerativen Heilung fähig (4).

Im Stratum basale bilden die einlagig angeordneten Keratinozyten basale Füßchen aus, die zur Verankerung in der Dermis dienen. In dieser Schicht findet man zahlreiche teilungsfähige Stammzellen, die sich vor allem über den Papillen der

Dermis befinden. Außerdem stellt das Stratum basale gemeinsam mit dem Stratum spinosum den Lieferanten des Vitamins D<sub>3</sub> dar (1,3).

Das Stratum Spinosum ist aus mehreren Zellschichten aufgebaut, die durch Desmosomen in Verbindung stehen (5). Auch hier finden in der basalen Schicht noch Mitosen statt. Aufgrund dessen werden das Stratum basale und das Stratum spinosum gemeinsam auch als Stratum germinativum bezeichnet (3).

Im Stratum granulosum, welches durch ein bis drei Zellschichten aufgebaut ist, beginnt der Verhornungsprozess (2). Durch die vorhandenen Tight Junctions entsteht eine Barriere, die einen Verlust von Wasser und somit eine Austrocknung verhindert. Ein Verlust dieser Barrierefunktion führt bei Verbrennungen zum Flüssigkeitsverlust.

Eine weitere Schicht der Epidermis, das Stratum lucidum, gibt es nur in der Leistenhaut, also an Handflächen und Fußsohlen. Sie stellt den Übergang zwischen vitalem und avitalem Gewebe dar. Schlussendlich findet man noch die Hornschicht, das Stratum corneum. Sie besteht aus kernfreien, avitalen Korneozyten und ist aus mehreren Zellschichten aufgebaut. Sie dient als maßgebliche Barriere gegen äußere Einflüsse (5). Zu den funktionell wichtigen Bestandteilen der Epidermis zählen auch Melanozyten, Langerhans-Zellen, sowie Merkelzellen. Erstere sind unter anderem für die Pigmentierung der Haut verantwortlich und befinden sich in der Basalschicht der Epidermis. Sie scheitern das Pigment Melanin aus, welches sich in den Keratinozyten in Vesikeln über dem Zellkern sammelt, um ihn so vor der schädlichen Wirkung der Sonneneinstrahlung zu schützen (5). Langerhans-Zellen sind noch unreife, antigenpräsentierende dendritische Zellen, die sich hauptsächlich im Stratum spinosum der Epidermis befinden. Wenn sie mit Antigenen in Kontakt kommen, wandern sie in regionale Lymphknoten aus, um dort den T-Lymphozyten als antigenpräsentierende Zelle zu dienen (1). Merkel-Zellen kommen vor allem im Stratum basale der Epidermis vor (5). Durch große sensible Nervenendigungen an ihrer Oberfläche dienen sie als Mechanorezeptoren (1).

### **1.1.2 Dermis**

Die bindegewebige Schicht sorgt für die Festigkeit und Elastizität der Haut. Sie lässt sich in zwei Schichten einteilen. Das zellreiche Stratum papillare bildet Bindegewebspapillen, die in die Epidermis hineinragen. Hier befinden sich viele Blutkapillaren, die der Versorgung der Epidermis dienen (1). Die erhöhte Bioaktivität

des Stratum papillare bedingt eine schnellere Heilung von oberflächlichen Verbrennungen zweiten Grades als von tieferen Verbrennungen zweiten Grades (6). In den Papillen befindliche Nervenendigungen vermitteln Schmerz- und Juckempfindungen. In der Leistenhaut, vornehmlich an den Fingerspitzen, findet man dort zusätzlich Meissner-Tastkörperchen, die unter anderem für den feinen Tastsinn verantwortlich sind. Das darunterliegende, kollagenreiche Stratum reticulare macht die Dermis reißfest und reversibel dehnbar. Es handelt sich überwiegend um Typ I Kollagen (2). In der Dermis verlaufen viele Blutgefäße, es gibt Haarfollikel, vegetative und sensible Nerven, außerdem Schweiß- und Talgdrüsen (5). Da die Dermis vom Mesoderm stammt, kann keine regenerative Heilung stattfinden, sondern nur Fibrosierung und Narbenbildung (4).

### **1.1.3 Dermoepidermale Verbindungszone**

Zwischen den Reteleisten der Epidermis und den Papillen der Dermis befindet sich die Basalmembran. Sie verbindet die beiden Schichten durch zahlreiche Haftmechanismen. Vor allem die von Keratinozyten abstammenden Ankerfibrillen, welche aus Kollagen VII bestehen, wirken stabilisierend. Bei der Heilung von Verbrennungswunden brauchen die Ankerfibrillen Wochen bis Monate, um erneut auszureifen. Daher können in der Heilungsphase geringe Scherkräfte zu Blasenbildung und Verlust von Epidermis führen (4).

### **1.1.4 Subkutis**

Die Subkutis ist zum Großteil aus Fettgewebe aufgebaut, welches mit Bindegewebssepten durchzogen wird, in denen sich Nerven, Blut- und Lymphgefäße befinden. Sie sorgt für die Verschieblichkeit der Haut und dient einerseits als Druckpolster, andererseits als Wärmeisolation (1).

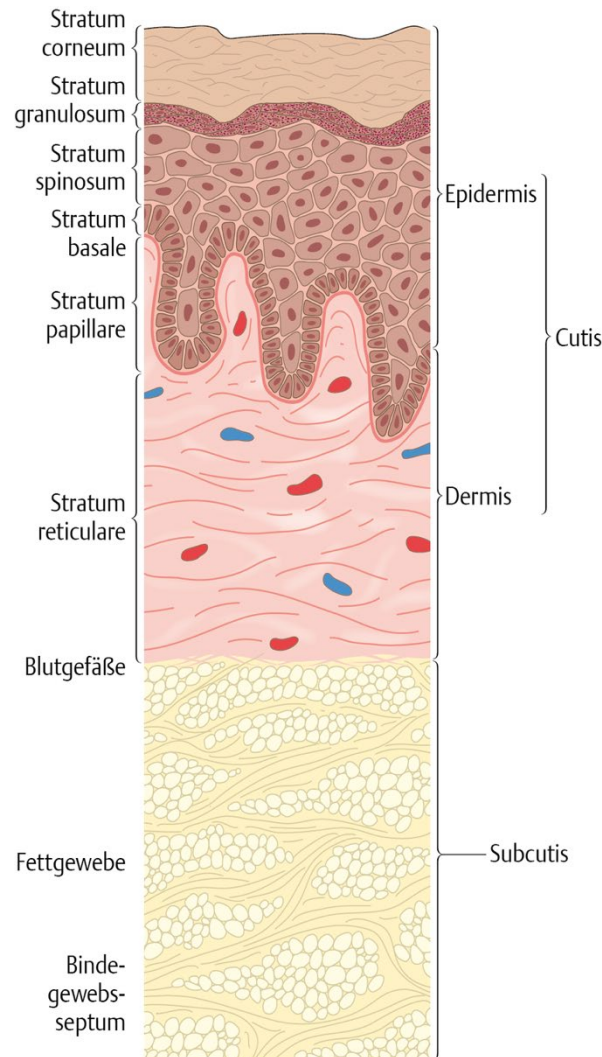


Abbildung 1 Aufbau der Haut

(7)

## 1.2 Wundheilung

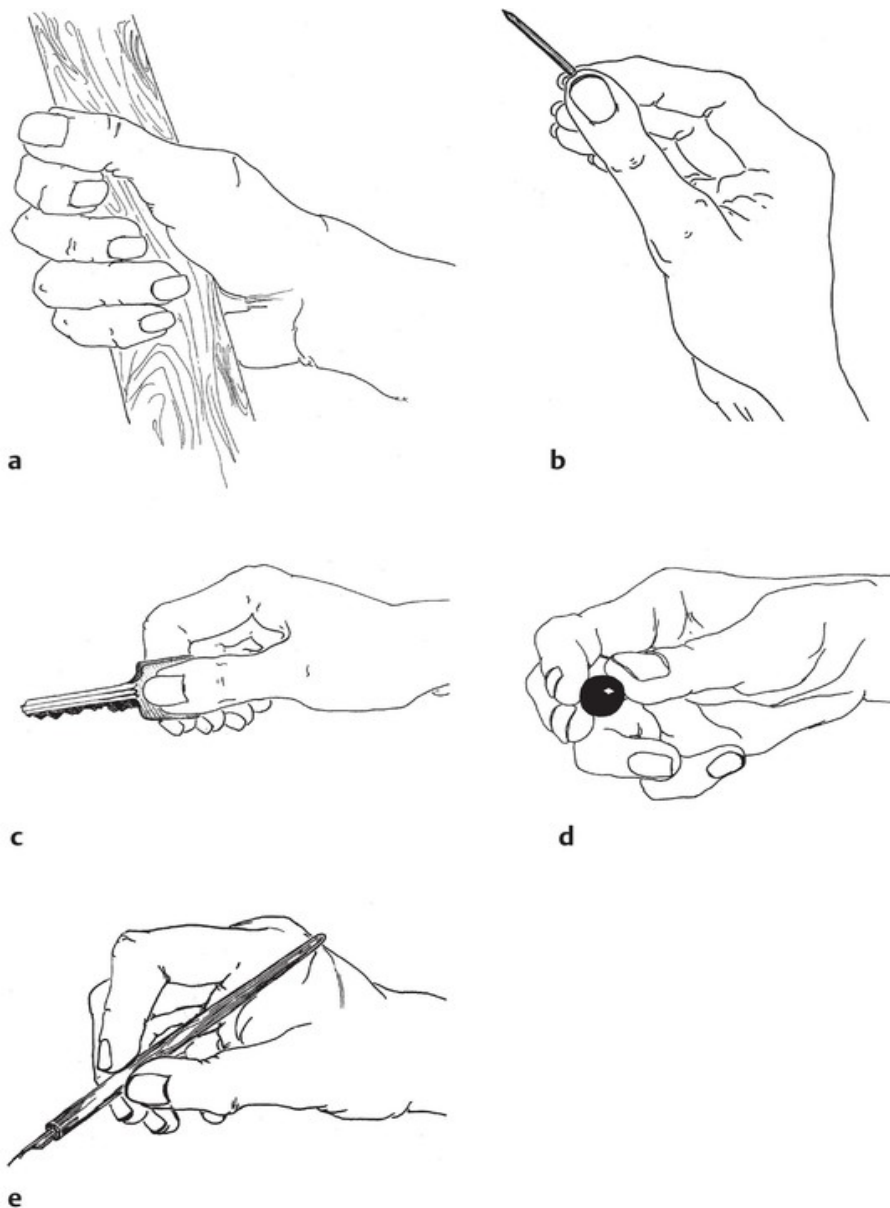
Die Wundheilung ist ein komplizierter Vorgang, der aus mehreren, ineinandergreifenden Schritten besteht. Ziel ist es, das zerstörte beziehungsweise verletzte Gewebe zu ersetzen. Dieser Vorgang hat ab einer Verletzungstiefe bis zum Stratum reticulare eine Narbe zu Folge. Wenn eine Verletzung oder Verbrennung geschieht, geben die in den Thrombozyten enthaltenen Zytokine den Anstoß für die folgende Wundheilung. Es entsteht ein provisorischer Verschluss durch ein Fibrinkoagulum. Durch Chemotaxis werden neutrophile Granulozyten angelockt, die sich schon nach wenigen Minuten in der Wunde befinden. Sie phagozytieren Bakterien und schütten proinflammatorische Zytokine aus. Später

wandern auch Makrophagen ein, die unter anderem eine Aktivierung des umgebenden Gewebes verstärken, indem Zytokine und Wachstumsfaktoren ausgeschüttet werden (8). Einige Stunden nach der Verletzung beginnt die Einwanderung von Epidermalzellen aus dem Wundrand unter das Blutgerinnsel, welches zunehmend zu einem trockenen Schorf wird (9). Die Migration der Epidermalzellen und die Mitose in den hinteren Zellreihen wird durch verschiedene Wachstumsfaktoren, wie beispielsweise den Transforming Growth Factor alpha und beta (TGF- $\alpha$  und TGF- $\beta$ ), Insuline-Like-Growth-Factor-1 (IGF-1) und dem Epidermal Growth Factor (EGF) stimuliert (8,9). Die Bildung des Granulationsgewebes beginnt, indem Fibroblasten eine kollagenreiche Matrix bilden und in das Fibrinkoagulum einwandern. Bei der folgenden Angiogenese wandern Gefäßsprossen aus den umgebenden Kapillaren in die neugebildete Dermis ein. Nachdem das Fibrinkoagulum vollständig von Fibroblasten durchwandert ist, wandeln sich einige Fibroblasten in Myofibroblasten um, die zur Annäherung der Wundränder beitragen bis die Wunde vollständig verschlossen ist. Die Umwandlung geschieht unter Einfluss von TGF- $\beta$  (8).

## **2 Die Rolle der Hand**

Die menschliche Hand spielt durch ihre vielseitigen Funktionen eine große Rolle im Bewältigen alltäglicher Aufgaben. Sie dient einerseits als Greifwerkzeug und andererseits als tastendes Organ. Außerdem ist der ästhetische Aspekt nicht zu unterschätzen. Bezüglich des Greifens unterscheidet man „nichtgreifende“ und „greifende“ Aktionen. „Nichtgreifend“ sind zum Beispiel das Schieben und Heben von Gegenständen. Bei den „greifenden“ Aktionen werden verschiedene Griffformen unterschieden. Der Hakengriff ist die einfachste Form des Greifens, die sogar ohne Daumen und mit fehlenden Langfingern ausgeführt werden kann. Weiters gibt es den Spitzgriff, bei dem ein Gegenstand zwischen zwei Langfingern gefasst wird. Zur Ausführung des sogenannten Schlüsselgriffes ist die Adduktion des Daumens an den Zeigefinger nötig. Um den Grob- beziehungsweise Kraftgriff auszuführen, muss eine Opposition des Daumens möglich sein. Mit diesem Griff können größere Gegenstände gefasst werden. Bei den Präzisionsgreifformen unterscheidet man den palmaren Spitzgriff vom Fingerkuppenspitgriff, wobei

ersterer am häufigsten angewendet wird. Diese Greifformen dienen vor allem dem präzisen Greifen und Führen von Gegenständen mit geringer Kraftanstrengung. Als Übergangsform zwischen Grob- beziehungsweise Kraftgriff und den Präzisionsgreifformen wird der Feingriff angesehen, bei dem je nach Größe des Gegenstandes mehr Merkmale der einen oder anderen Greifform übernommen werden. Die sensorische Funktion der Hand ist für das Ausführen der Feingriffe unerlässlich. Nicht zuletzt hat die Hand eine große Rolle im sozialen Leben. Gestik ist ein großer Bestandteil der Kommunikation, das Alter ist an einer Hand abzulesen und zahlreicher Schmuck findet auf der Hand seinen Platz (10,11).



(12)

Abbildung 2 Greifformen der Hand.

Grobgriff (a), palmarer Spitzgriff (b), Schlüsselgriff (c), Feingriff (d), Schreibgriff (e)

### **3 Pathogenese der Verbrennung**

Verbrennungswunden entstehen durch verschiedene Mechanismen. Die Pathogenese der Verbrennung ist von hoher Bedeutung, da sie die Art der Behandlung beeinflussen kann.

#### **3.1 Flammenverbrennung**

Der überwiegende Teil der Verbrennungswunden wird durch direkte Flammeneinwirkung verursacht. Da Erwachsene die Hände meist schützend vor das Gesicht halten, ist bei ihnen vorwiegend der Handrücken betroffen (13).

#### **3.2 Verbrühung**

Die Verbrühung ist nach der Verbrennung die zweithäufigste Pathogenese. Vor allem Kinder betrifft diese Art von Trauma (14). Die Ausprägung der Verletzung ist von der Temperatur der Flüssigkeit, der Kontaktdauer und der Dicke der Haut abhängig. Wasser mit einer Temperatur von 60°C verursacht in drei Sekunden dieselbe Verletzungsausprägung wie 69°C heißes Wasser schon in einer Sekunde oder 45°C warmes Wasser in einer Stunde. Auch die Konsistenz der Flüssigkeit hat Einfluss auf die Verletzung, da dickere Flüssigkeiten länger auf der Hautoberfläche verweilen und dadurch tiefere Verletzungen hervorrufen. Nasse Kleidung sollte schnellstmöglich entfernt werden, da diese die Hitze speichert und so die Einwirkzeit ebenfalls verlängert (6). Da Verbrühungen anfangs in ihrer Ausprägung häufig unterschätzt werden, sollte man hier besonderes Augenmerk auf die Verlaufskontrolle legen (15).

#### **3.3 Kontaktverbrennung**

Kontaktverbrennungen entstehen häufig durch heißes Metall, Kunststoff, Teer, Glas, Plastik oder heiße Kohle. Das Verletzungsausmaß ist auch hier von der Dauer der Einwirkung und der Temperatur abhängig. Die Verletzung ist meist lokal begrenzt, jedoch beispielsweise bei flüssigem Metall oder Kunststoff sehr tief, da die Einwirkdauer durch die Konsistenz sehr lang ist (6,14). Kontaktverbrennungen bei Kleinkindern im sogenannten Greifalter betreffen vorwiegend die Palmarseite der Hand (13). Außerdem kann es vorkommen, dass kleine Kinder beim

Ausbalancieren aus Versehen heiße Oberflächen, zum Beispiel Ofentren, berühren (16).

### **3.4 Chemische Verbrennung**

Obwohl die Verletzungen durch starke Säuren und Laugen klassischen Verbrennungsverletzungen stark ähneln, gibt es einige wichtige Unterschiede. Die Zerstörung des Gewebes schreitet bei chemischen Verletzungen fort, bis das Agens vollständig entfernt oder neutralisiert ist (17). Verletzungen durch Säuren sind eher selbstlimitierend als die durch Laugen, da Laugen mit den Lipiden der Haut reagieren und diese verseifen. Sie können dadurch weiter in die Haut eindringen und tieferen Schaden anrichten. Es entsteht eine Kolliquationsnekrose.

Säuren führen im Gegensatz dazu zu einer Koagulationsnekrose. Sie gerben quasi die Haut und führen durch die entstandene Barriere zu einem weniger tiefen Eindringen in das Gewebe, als es bei Laugen der Fall ist. Größtenteils passieren Verletzungen dieser Art im Rahmen von Arbeitsunfällen durch Beton, Zement oder Flusssäure. Die Entfernung des Agens und der womöglich kontaminierten Kleidung muss sehr rasch geschehen, da die Schädigung sonst weiter fortschreitet. Frühes Spülen mit reinem Wasser stellt die beste initiale Behandlungsstrategie dar. Weiters stehen verschiedenen Antidots zur Verfügung. Diese haben aber viele Nebenwirkungen und stehen daher stark in Diskussion (6,14).

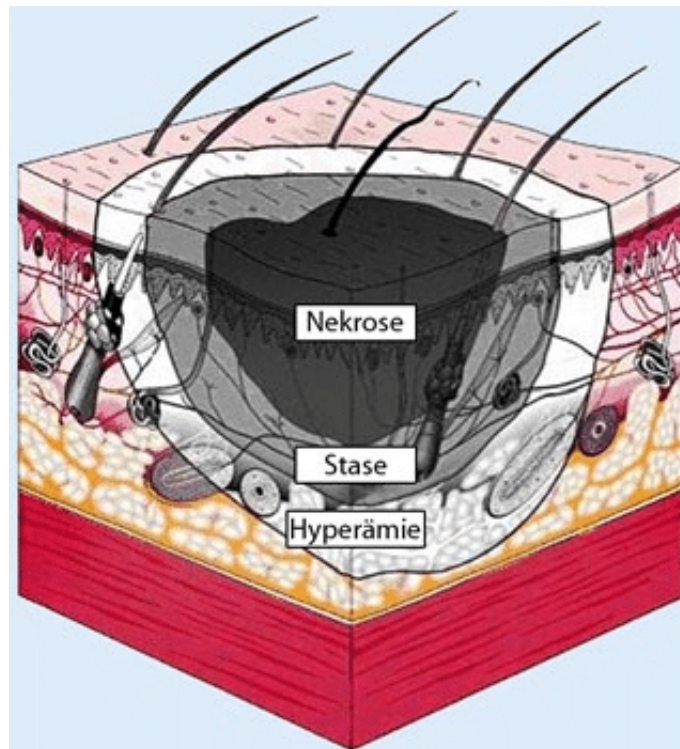
### **3.5 Elektroverbrennung**

Da der menschliche Körper einen elektrischen Widerstand darstellt, entsteht beim Auftreffen von elektrischem Strom Hitze. Bei weniger als 440 Volt spricht man von niedriger Spannung. Hierdurch entstehen an der Kontaktstelle Verletzungen im Ausmaß einer 2b-gradigen Verbrennung. Bei über 1000 Volt spricht man von Hochspannung (6). Es entstehen beträchtliche Verletzungen, welche bis zur Muskulatur und dem Knochen reichen können. Durch die kardiotoxische Wirkung des elektrischen Stroms und des durch den massiven Gewebsuntergang freigesetzte Myoglobin, kommt es auch zu systemischen Komplikationen (14). Hände und Finger können aufgrund ihres geringen Volumens nur wenig Strom ableiten. Es entsteht dadurch mehr Hitze und folgend mehr Zerstörung des Gewebes bis hin zu amputationspflichtiger Extremität (6,14).

## 4 Pathophysiologie der Verbrennung

Auf zellulärer Ebene führt Hitzeeinwirkung zu einer Denaturierung von Proteinen. Fast zeitgleich kommt es dadurch zu einer Aktivierung von Entzündungsmediatoren (6). Meistens kommt es folglich zu einer Koagulationsnekrose. Die Verbrennungswunde kann nach Jackson in drei Zonen eingeteilt werden. Die Form entspricht einem schalenförmigen Aufbau. Im Zentrum befindet sich die Nekrosezone, welche durch eine irreversible Schädigung gekennzeichnet ist. In der Stasezone befinden sich geschädigte vitale und avitale Zellen nebeneinander. Dort werden vasokonstriktive Mediatoren sowie Entzündungsmediatoren ausgeschüttet. Beim sogenannten „Nachbrennen“ kann dieser Bereich teilweise oder vollständig in eine Koagulationsnekrose übergehen (14). Der Zelltod in der Stasezone geschieht durch Apoptose und Nekrose. Die Apoptose wird durch verschiedenste Faktoren, wie zum Beispiel durch oxidativen Stress, Entzündung und verminderte Durchblutung durch Mikrothrombosen beeinflusst und setzt sich zumindest für 23 Tage nach der initialen Verletzung fort. Diese Gegebenheit bietet ein recht großes Zeitfenster, in dem therapeutisch eingegriffen werden könnte (18). Derzeit sucht man nach Möglichkeiten, das „Nachbrennen“ therapeutisch zu beeinflussen. Um die sensible Stasezone zu schützen, muss ausreichend Flüssigkeit substituiert werden, die Gabe von vasokonstriktiven Medikamenten sollte vermieden werden und Infektionen muss vorgebeugt werden (4).

Der äußerste Bereich der Verbrennungswunde wird Hyperämiezone genannt. Hier findet durch Vasodilatation eine vermehrte Durchblutung statt. Diese Rötung ist im Gegensatz zur Rötung der Stasezone wegdrückbar (15). Durch die Zerstörung von Kollagenverbindungen kommt es bei Verbrennungswunden zur lokalen Ödembildung. Auch Entzündungsmediatoren beeinflussen die Entstehung des lokalen Ödems (6).



(19)

Abbildung 3 Verbrennungszonen nach Jackson

## 5 Verbrennungsgrade

Die Tiefe der Verbrennung wird in vier Grade eingeteilt. Die Diagnose ist sehr schwierig, weil oft Übergangsformen vorliegen. Selbst erfahrene ChirurgInnen können oft die Tiefe initial nicht richtig einschätzen.

### 5.1 Grad 1 (superficial epidermal injury)

Die Verbrennung ersten Grades beschränkt sich auf die Epidermis. Es kommt zur Rötung und Schwellung durch Vasodilatation. Die Haut ist in diesem Bereich erhöht nozizeptiv. Nach längstens sieben Tagen heilt die Verbrennung unter Schuppung narbenfrei ab.

### 5.2 Grad 2a (superficial dermal burn)

Hier sind die Epidermis und das Stratum papillare der Dermis betroffen. Es kommt zur Blasenbildung durch Exsudation aus geschädigten Gefäßen der Dermoepidermalen Verbindungszone. Diese treten aber nicht immer unmittelbar

nach der Verletzung auf, sodass womöglich zu Beginn von einer Verbrennung ersten Grades ausgegangen wird. Unter der Blase ist der rosa gefärbte Wundgrund feucht und stark nozizeptiv. In circa zwei bis drei Wochen heilen Verbrennungen dieser Tiefe durch Reepithelisierung aus den Basalzellen der Hautanhangsgebilde narbenfrei ab. Eine operative Behandlung ist nicht nötig.

### **5.3 Grad 2b (deep dermal burn)**

Die Epidermis und beide Schichten der Dermis sind verletzt, Nozizeptoren sind Großteils zerstört. Auch diese Verbrennungen bilden Blasen, jedoch ist der Wundgrund rosa-weiß gefleckt. Die Rekapillarisierungszeit ist verlängert bis nicht vorhanden. Der Heilungsverlauf dauert über drei Wochen. Es kann zu einer hypertrophen Narbenbildung kommen. Das Schmerzempfinden ist durch die teilweise Zerstörung der Nozizeptoren variabel. Die PatientInnen klagen eher über Druckgefühl und allgemeines Unwohlsein. Wenn ein prolongierter Heilungsverlauf über drei Wochen vorherzusehen ist, besteht die Indikation zur Operation. Die erhöhte Bioaktivität des Stratum papillare bedingt eine schnellere Heilung von oberflächlichen Verbrennungen zweiten Grades, als tieferen Verbrennungen zweiten Grades (6).

### **5.4 Grad 3 (full thickness burn)**

Die Epidermis und die Dermis sind in diesem Fall vollständig zerstört. Die Verletzung kann bis ins Subkutangewebe reichen. Daher sind auch die Nozizeptoren betroffen und die Wunde ist damit schmerzfrei. Die Diagnose kann, wenn keine Verkohlungen vorliegt, sehr schwierig sein, da der Wundgrund wie bei Verbrennungen des Grades 2b gefleckt sein kann. Oft ist die Wunde trocken und weiß. Es kann zum Durchscheinen von Gefäßen kommen, in denen das Blut geronnen ist. Verbrühungen und Kontaktverbrennungen dritten Grades können ein gerötetes Aussehen haben und dadurch mit einer oberflächlichen Verletzung verwechselt werden. Die Reepithelisierung geschieht bei Verbrennungen dritten Grades vom Wundrand aus, jedoch heilen die Wunden spontan immer unter hypertropher und gelegentlich kontraktiver Narbenbildung. Um dies zu verhindern ist eine frühzeitige operative Behandlung angezeigt (4,15).

## **5.5 Grad 4 (Verkohlung)**

Bei Verbrennungen vierten Grades sind zusätzlich Muskeln, Sehnen und Knochen betroffen. Sie entstehen häufig bei Verbrennungen durch offenes Feuer oder Starkstrom und ziehen komplizierte Rekonstruktionsoperationen, bis hin zur Amputation, nach sich (20).

## **6 Verbrennung der Hand**

Die feine Anatomie der Hand, welche die komplexe Funktionsweise ermöglicht, bietet wenig Schutz gegen Verletzung. Verglichen mit der palmaren Haut, ist vor allem die dorsale Haut der Hand sehr flexibel und dünn. Sie bietet damit geringen Schutz für die darunterliegenden Strukturen (21). Sehnen und Gelenke liegen sehr knapp unter der Hautoberfläche. Sie sind potentiell gefährdet von der Hitzeeinwirkung in Mitleidenschaft gezogen zu werden. Zusätzlich ist das Verhältnis von Hautoberfläche zu Gewebsvolumen im Gegensatz zu anderen Körperregionen zugunsten der Hautoberfläche verschoben. Ein Kubikzentimeter Volumen am Finger steht im Verhältnis zu  $2,5\text{cm}^2$  Haut. Zum Vergleich entspricht das Verhältnis am Unterarm bereits  $1\text{cm}^3$  Gewebe zu  $0,5\text{cm}^2$  Haut. Die Hand bietet somit trotz ihrer geringen Größe viel Angriffsfläche für Verbrennungen (13). Die palmare und interdigitale Haut ist anfällig für Kontrakturen obwohl sie recht dickes subkutanes Gewebe aufweist. Bei größeren Verbrennungstraumata besteht die Gefahr eines dermalen Kompartmentsyndroms der Finger, da hier nur eine geringfügige Möglichkeit der Ausdehnung besteht. Bezüglich der Häufigkeit der Beteiligung der Hand bei Verbrennungen gibt es verschiedene Daten. Soni et al. sprechen von einer Handbeteiligung von bis zu 90% bei größeren Verbrennungen (22). McKee geht von einer geschätzten Zahl zwischen 50 und 70% der Handbeteiligung bei Verbrennungen aus (20).

## 7 Material und Methoden

Bei der vorliegenden Diplomarbeit handelt es sich um eine allgemeine Übersichtsarbeit zum Thema Verbrennungen der Hand. Die Literaturrecherche hat zum Ziel, einen Überblick über fundiertes Fachwissen und aktuelle Wissenserkennnisse zu schaffen. Am Ende soll ein Leitfaden mit den wichtigsten Eckpunkten des Themas geschaffen werden, der in den Unterkapiteln einerseits Grundwissen und den damit verbundenen aktuellen Stand der Wissenschaft überblicksmäßig darstellt. Es wurde darauf geachtet, nur Themen einzubeziehen, die für den klinischen Alltag von Relevanz sind. Widersprüchliche Publikationen wurden gegenübergestellt und deren Diskrepanz diskutiert. Primär wurden Eckpunkte der Ätiologie, Diagnostik und Therapie von Verbrennungen der Hand erarbeitet, dadurch die Kapitel definiert und anschließend eine Literaturrecherche über „PubMed“ und „Google Scholar“ begonnen. Einbezogen wurden Publikationen, die in den letzten 15 Jahren publiziert wurden. Ältere Publikationen wurden nur einbezogen, wenn sie historisches Wissen darstellten oder die medizinisch geschichtliche Entwicklung zur Erläuterung des Themas relevant waren. Darüber hinaus fanden Fachbücher und Herstellerempfehlungen Eingang in die Ausarbeitung des Themas. Begonnen wurde die Recherche auf „PubMed“ über eine MESH-Suche mit den Begriffen „Burn“ AND „Hand“. Die anschließende Suche wurde spezifisch zu den jeweiligen Kapiteln der Arbeit über „PubMed“ und „Google Scholar“ getätigt. Sprachlich wurden deutsche, englische und französische Publikationen einbezogen. Anhand der Abstracts wurde entschieden, ob Studien miteinbezogen werden oder nicht. Da es bezüglich der Themen zahlreiche Publikationen mit unterschiedlichsten Herangehensweisen gibt, wurde versucht diese möglichst übersichtlich und prägnant gegenüber zu stellen, um der/dem LeserIn schlussendlich noch ein eigenes Urteil zu gewähren. Für die Durchführung dieser Diplomarbeit war kein Ethik-Konsil vonnöten, da ausschließlich bereits bestehende Literatur zur Ausarbeitung herangezogen wurde.

## 8 Wundtiefendiagnostik

Um eine der Verletzung entsprechende Therapie zu beginnen, muss die Tiefe der Wunde festgestellt werden. Wie oben bereits beschrieben, ist dies visuell anhand der Wundkriterien möglich. Eine erstgradige Verbrennung ist gut von einer drittgradigen zu unterscheiden. Die Schwierigkeit liegt in der Differenzierung zwischen 2a- und 2b-gradigen Verbrennungen. Diese Unterscheidung ist sehr wichtig, da sie therapeutische Konsequenzen nach sich zieht. Eine 2a-gradige Verbrennung kann konservativ behandelt werden. Eine 2b-gradige Verbrennung führt in den meisten Fällen zu einer Operationsindikation. Eine falsche Einschätzung kann einerseits zu verzögerter Therapie oder andererseits zu einer nicht notwendigen operativen Behandlung führen (23). Selbst erfahrene Ärzte schätzen die Wundtiefe nur in 64% bis 76% richtig ein (24,25). Vor allem in den ersten 48 Stunden ist die Rate der falschen Einschätzungen hoch. Unerfahrene ChirurgInnen schätzen die Wunde sogar nur in 50% der Fälle richtig ein (26). Aufgrund dieses Problems ist man vermehrt auf der Suche nach objektiven, möglichst nicht invasiven Möglichkeiten, die Wundtiefe festzustellen.

In der Vergangenheit wurden viele Möglichkeiten ausprobiert und untersucht, schlussendlich aber doch wieder verworfen. Dazu zählen unter anderem: nukleare Bildgebung, Photometrie, Thermometrie, Laser-Doppler-Flowmetrie und verschiedene Arten der Sonographie. Keine dieser Techniken stellte sich als neuer „Goldstandard“ heraus. Die große Schwierigkeit scheint in der Dynamik der Wunde zu liegen, die vor allem in den ersten 48 Stunden eine genaue Prognose quasi unmöglich macht (27).

Im Jahr 2018 haben Jaspers et al. in einer systematischen Literatursuche verschiedene Techniken zur Diagnostik der Verbrennungstiefe und des Heilungspotentials verglichen. Es wurden Laser-Doppler-Techniken von thermografischen und anderen Messtechniken unterschieden. 36 einbezogene Artikel ergaben, dass Laser-Doppler-Imaging (LDI) eine zu favorisierende Messmethode zu sein scheint (28).

Hier wird die mikrozirkulatorische Durchblutung und Perfusion der Kapillaren durch Absorption und Streuung von Licht gemessen. Aufgrund der Durchblutungssituation kann auf das Heilungspotential geschlossen werden (29).

Jaspers et al. empfehlen allerdings die Zuverlässigkeit von LDI in weiteren, groß angelegten Studien zu untersuchen. Sie weisen darauf hin, dass es von großer Wichtigkeit ist, in Zukunft einheitliche Messparameter zu verwenden, Messfehler eindeutig zu bestimmen und zu vermessende Oberflächen genau zu beschreiben, um qualitativ hochwertige Studienergebnisse zu erlangen und somit die Behandlung von Verbrennungen zu verbessern (28).

## 9 Debridement

Wenn eine Verbrennung passiert, wird durch das verbrannte, avitale Gewebe eine Entzündungsreaktion im darunterliegenden, vitalen Gewebe hervorgerufen. Im Schorf siedeln sich Bakterien an, welche zur Proliferation von Leukozyten, proteolytischen Enzymen und weiteren Entzündungsmediatoren führen. Im Normalfall führt dies einerseits zum Zerfall des Schorfs und andererseits zur Bildung von Granulationsgewebe. Ist jedoch ein großer Anteil der Körperoberfläche betroffen, kann die lokale Entzündungsreaktion auch systemisch werden. Dies führt zu einer hypermetabolischen Stoffwechsellage, die eine verschlechterte Wundheilung und eine ineffektive Immunantwort nach sich zieht (30,31).

Die operative Behandlung von Brandwunden war daher ein Meilenstein in der Geschichte der Brandverletztenversorgung (32). Bereits 1974 haben Burke et al. gezeigt, dass die frühzeitige Exzision der Brandwunde Vorteile bezüglich Mortalität, Komplikationen und Dauer der Wundheilung mit sich bringt (33). Heutzutage ist das frühzeitige Debridement Standard in der chirurgischen Behandlung von Verbrennungsoffern (34-37).

Das Ziel des Debridements ist, nicht zu viel und nicht zu wenig Gewebe zu exzidieren. Eine exakte Tiefenbestimmung ist, wie bereits erwähnt, vor allem bei zweitgradigen Verbrennungsverletzungen vor der Operation oft nur schwer möglich. Daher sollte ein tangenciales Debridement angestrebt werden. Hierbei wird Schicht für Schicht das abgestorbene Gewebe abgetragen bis punktförmige Blutungen die Vitalität des Gewebes anzeigen. Durch die Identifikation des durchblutenden Plexus kann eine exakte Tiefenbestimmung und damit folglich eine tiefenspezifische Deckung erreicht werden. Die Durchblutung wird durch den subpapillären, kutanen oder subdermalen Plexus gewährleistet.

Um das tangentielle Debridement durchzuführen, bieten sich instrumentarisch mehrere Möglichkeiten an. Die sogenannte scharfe Abtragung kann mit dem Guilan-Messer oder dem Humbey-Messer durchgeführt werden. Bei großflächigen Verbrennungen kommt auch das Dermatom zum Einsatz. Verbrennungen der Hand stellen durch die diffizile Anatomie und die sowohl konvexen als auch konkaven Oberflächen eine schwierige Grundlage für die exakte Exzision des verbrannten Gewebes dar. Wichtige Strukturen liegen nahe beieinander und der Schutz durch subkutanes Fettgewebe ist in der Hand nicht in dem Maße gegeben, wie an anderen Körperstellen (38,39). Gurfinkel et al. haben 2010 festgestellt, dass es sich nur bei 50% des operativ entfernten Eschars tatsächlich um nekrotisches Gewebe handelt (40).

Ein Verfahren, welches das exakte Debridement erleichtert, ist die sogenannte Hydrochirurgie. Rappl T. et al. haben 2007 die Indikationen und die Anwendung des Hydrochirurgie-Systems Versajet® zusammengefasst. Es handelt sich um ein Instrument, welches einen Hochgeschwindigkeitswasserstrahl produziert, mit dem Gewebe tangential abgetragen werden kann. Durch das Bernoulli-Prinzip wird gleichzeitig ein Unterdruck erzeugt, der für die Absaugung der sterilen Kochsalzlösung und des abgetragenen Gewebes sorgt. Die Wunde wird dadurch gleichzeitig, ohne große Aerosolbildung, gespült. Die Stärke der Abtragung kann stufenweise durch Druckveränderung des Wasserstrahls gesteuert werden. Der/Die OperateurIn kann die Abtragungstiefe zudem durch die Haltung des Instruments, den Anpressdruck und die Geschwindigkeit, mit der er es führt, bestimmen (38,39). Rappl T. et al. fassen 2007 die Indikation für die Hydrochirurgie zur Nekrosektomie wie folgt zusammen: Für drittgradige Verbrennungen wird das scharfe Debridement als effizienter erachtet, hier lässt sich die Hydrochirurgie nur für die Grenzzonen und deren Feinschliff sinnvoll einsetzen. Bezüglich zweitgradiger Verbrennungen wird der Vorteil vor allem für anatomisch diffizile Regionen hervorgehoben. Als zu beachtender Faktor in der Anwendung der Hydrochirurgie wird die Kostenfrage in den Raum gestellt, da es sich bei dem Versajet-System® um ein Einmalprodukt handelt. Andererseits ist Erfahrung in der Handhabung des Instruments notwendig (38).

Eine weitere Möglichkeit, schonende Nekrosektomie an diffizilen Körperregionen wie der Hand durchzuführen, wurde im enzymatischen Debridement gefunden.

Im Dezember 2012 wurde NexoBrid® am europäischen Markt eingeführt. Es handelt sich hierbei um die aus Ananaspflanzenstielen gewonnene Cysteinprotease Bromelain, welche proteolytische Eigenschaften vorweist. NexoBrid® wird als Pulver bereitgestellt, welches mittels eines Transportgels auf die betroffenen Stellen aufgetragen werden kann und für vier Stunden dort belassen wird. Die Anwendung ist derzeit auf Verbrennungsausmaße bis maximal 15% der Körperoberfläche begrenzt und darf laut Hersteller nur bis zu 73 Stunden nach dem Verbrennungsereignis durchgeführt werden. Das aktive Enzym kann nicht in vitales beziehungsweise intaktes Keratin eindringen und wirkt spezifisch auf verbrennungsbedingten Schorf. Diese Eigenschaften machen das Produkt sicher und selektiv (41). Vorteile der Selektivität des Produkts sind, dass im Vorhinein nicht die Tiefe der Verbrennung diagnostiziert werden muss und das vitale Gewebe maximal geschützt werden kann. Das dermale und epidermale Regenerationspotential kann maximal ausgenützt werden und die autogene Hauttransplantation bleibt somit Verbrennungen ab dem Grad 2b vorbehalten, welche keinerlei Spontanheilungspotential aufweisen. Diese Art der Verbrennungsbehandlung bildet die Grundlage der „MIM“ (minimal invasive modality) (42).

Schulz et al. haben 2016 deren Lernprozess in der Anwendung enzymatischen Debridements verbrannter Hände publiziert. Anfängliche Tücken und daraus gezogene Lehren wurden zu einem Behandlungs-Algorithmus zusammengefasst. Die Arbeitsgruppe hat 20 PatientInnen mit Verbrennungen der Hand mit NexoBrid® behandelt. Die Behandlungsmethode wurde hinsichtlich der Anästhesie beziehungsweise des Schmerzmanagements, des Anwendungsalgorithmus und der wichtigsten Pitfalls bewertet und beschrieben. Für die Anwendung des enzymatischen Debridements wurde schlussendlich entgegen der Herstellerempfehlung eine Aufteilung auf drei Tage empfohlen. Die Autoren beschrieben diesbezüglich eine bessere Integrität in den klinischen Alltag und eine verbesserte Wundheilung. Am ersten Tag wird primär eine mechanische Wundreinigung und anschließend die erste „Feucht-Phase“ mit antiseptischer Polihexamid-Wundspülung durchgeführt. Der Hersteller empfiehlt diese Phase für mindestens zwei Stunden. Die Autoren der angeführten Studie bevorzugten diese allerdings über Nacht für circa zwölf Stunden, um den Ablauf zu vereinfachen. Dann wird die Wunde mit Natriumchlorid gespült, randständig Vaseline zum Schutz der

gesunden Haut aufgetragen, und ebenso das gelförmige NexoBrid® in einer Stärke von 1,5mm – 3,0mm. Darüber wird ein Okklusionsverband mit einer elastischen Binde unter leichtem Druck angebracht. Diese Phase des enzymatischen Debridements dauert vier Stunden. Hierbei haben Schulz et al. 2016 festgestellt, dass die Compliance der PatientInnen in dieser Phase äußerst wichtig ist, da in deren Studie die vorgegebene Handhaltung von zwei PatientInnen nicht eingehalten wurde und dies anschließend ein insuffizientes Debridement ergeben hat. Das Ziel der vorgegebenen Handhaltung muss ein dauerhafter Kontakt des Gels mit der Wunde sein. Die fehlerhafte Handhaltung bedingt in der besagten Studie eine Effizienz des Debridements von 90% bei einer diesbezüglichen Compliance von ebenfalls 90%. Man kann sich also bei einer guten Compliance eine 100-prozentige Effizienz erwarten (41).

Nach der vierstündigen Einwirkzeit wird der gelöste Schorf mit einem sterilen Löffel oder Spatel entfernt, die Wunde gründlich mit Natriumchloridlösung gespült und anschließend der Wundgrund mit einer Bürste bearbeitet bis punktförmige Blutungen zu erkennen sind. Die folgende „Feucht-Phase“ mit in antiseptischer Wundspülung getränkten Wickel wurde von anfänglichen zwei Stunden auf circa zwölf Stunden ausgeweitet. Neben dem verbesserten Workflow wurden in der Lernkurve vor allem die besseren Wundverhältnisse hervorgehoben. Durch die verlängerte „Feucht-Phase“ über Nacht ergibt sich eine sogenannte „wet-to-try“-Technik. Die Kompresse trocknet auf der Wunde und klebt dadurch auf der unebenen Wundoberfläche. Der verbleibende gelöste Schorf klebt am nächsten Tag auf der Kompresse und kann auf einfache Weise entfernt werden. Die gesteigerte Effizienz der Schorfentfernung konnte histologisch nachgewiesen werden (41). Dieselbe Arbeitsgruppe hat 2017 Vorteile bezüglich Selektivität, Effizienz, Heilungsdauer und Narbenqualität des enzymatischen Debridements gegenüber der traditionellen tangentialen Methode präsentiert. In der Studie wurde bei jeweils 20 PatientInnen mit zweit- bis drittgradiger Verbrennung der Hand enzymatisches beziehungsweise traditionell chirurgisches Debridement durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass in der Gruppe „enzymatisches Debridement“ einerseits früher mit der Behandlung begonnen werden konnte und andererseits diese auch durch die schnellere Arbeitsweise früher abgeschlossen wurde. Bezüglich des Erhalts von vitalem Gewebe zur optimalen Ausnützung der Regenerationsfähigkeit, konnte ebenso das enzymatische Debridement vorteilhaft

gegenüber der klassischen tangentialen Methode abschneiden. In der Gruppe der klassischen Methode waren mehr Interventionen nötig, um ein zufriedenstellendes Debridement zu erreichen. Auch bezüglich der Wundheilungszeit war die enzymatische Methode der klassischen Methode überlegen (43).

2017 wurden in einem europäischen Konsensus-Meeting 68 Statements bezüglich der Indikation, Schmerzmanagement, Applikationstechnik und -zeitpunkt, Nachbehandlung, Hautersatz, Blutverlust, Lernprozesse und zukünftig nötige Forschungsbereiche des enzymatischen Debridements mit NexoBrid® aufgestellt und geprüft. Das entstandene Konsensus-Dokument kann als eine Anwendungsempfehlung interpretiert werden. Eindeutig vorteilhaft gegenüber chirurgisch tangentialem Debridement und Hydrochirurgie wurde die Anwendung von NexoBrid® an anatomisch diffizilen Regionen wie Hand, Fuß und Gesicht bewertet. Hand und Fuß werden als idealer Beginn der Lernkurve beschrieben, da sich das gelförmige Produkt leicht mit einem Okklusivverband an Ort und Stelle fixieren lässt (44).

## **10 Klassische Escharotomie**

Bei Verbrennungen kommt es zur Verlagerung von intravasaler Flüssigkeit in den Extrazellulärraum. Es kommt zum interstitiellen Ödem, welches einen erhöhten Gewebedruck nach sich zieht. Vor allem bei zirkumferentiellen, drittgradigen Verbrennungen kann das verbrannte Gewebe nicht dem interstitiellen Druck weichen und führt dadurch zu erhöhten Gewebedrücken, die sowohl durchblutungsmindernd als auch nervenschädigend sein können. Um trotzdem eine ausreichende Durchblutung des Gewebes zu gewährleisten, muss bei erhöhtem Gewebedruck eine sogenannte Escharotomie vorgenommen werden. Dabei handelt es sich um entlastende Inzisionen bis zum subkutanen Fettgewebe, die zu einer wieder ausreichenden Perfusion des Gewebes führen sollen. Diese wird nach einem bestimmten Schema durchgeführt (13). Bereits im Jahr 1955 hat A. B. Wallace Inzisionen beschrieben, die er an verbrannten Extremitäten durchführte, um eine Druckentlastung zu erzielen. Er beschrieb diese zwar noch nicht als Escharotomie, das Prinzip war aber dasselbe (45). Die Entscheidung, eine Escharotomie durchzuführen, muss frühzeitig getroffen werden um dauerhafte

Gewebsschäden zu verhindern. Laut Lawton und Dheansa sind Dekompressionsverfahren zur Rettung von verbrannten Gliedmaßen unerlässlich. Sie sind der Meinung, dass Escharotomie zu den ersten Maßnahmen zählen sollte, welche im „Advanced Trauma Life Support“ in Bezug auf Verbrennungen erwähnt werden. Bereits nach zwölf bis 24 Stunden können Nerven irreversibel geschädigt werden. Muskeln sind schon nach vier bis zwölf Stunden betroffen (46). Vor allem bei zirkumferentiellen oder nahezu zirkumferentiellen Verbrennungen, sehr tiefen Traumata und Stromunfällen mit Hochspannungsstrom sind die ausreichende Durchblutung der Hand durch Ödembildung und verringerte Elastizität des Schorfs gefährdet. Handschin et al. konnten zeigen, dass die Escharotomie-Rate bei Verbrennungsverletzungen durch Hochspannungsstrom mit 47% signifikant höher ist, als bei thermischen Verbrennungsverletzungen. Dort liegt die Escharotomie Rate nur bei 21% (47).

Die Indikation, eine Escharotomie bei Verbrennungen der Extremitäten beziehungsweise der Hände durchzuführen, definieren Autoren verschieden. Orgill und Piccolo definieren beispielsweise die Abwesenheit des Pulsoxymeter- oder Dopplersignals, plötzlich auftretende neurologische Symptome oder einen erhöhten Kompartimentdruck als Indikation für eine Escharotomie. Wenn die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung unter 95% fällt, sollte laut den Autoren sofort eine Escharotomie durchgeführt werden. Sie heben allerdings hervor, dass vor allem Erfahrung und das klinische Gesamtbild die Entscheidung maßgeblich beeinflussen (48).

Eine gute Diagnostik ist diesbezüglich auch sehr wichtig, da auf folgende subtile Zeichen geachtet werden muss weil trotz palpabler Pulse eine Perfusionsstörung vorliegen kann:

- Temperatur und Hautfarbe der Hand
- der pulsatile Blutfluss sollte mit Doppler am Palmarbogen und digital geprüft werden
- Signal der Pulsoxymetrie (32).

Kamolz et al. empfehlen eine sofortige Escharotomie bei jeder zirkumferentiellen oder nahezu zirkumferentiellen tieferen Verbrennung mit zunehmender

Ödembildung. Eine verspätete Escharotomie würde einen Nervenschaden sowie Muskelnekrose und damit einhergehender Funktionseinschränkung nach sich ziehen. Die Entscheidung, eine Escharotomie der Hand durchzuführen oder nicht, ist selbst für erfahrene ChirurgInnen schwer. Wenn allerdings Finger zirkulär prall gespannt imponieren, der Handrücken verblasst ist, die Rekapillarierungszeit am Nagelbett stark prolongiert ist oder Sensibilität in diesem Gebiet verloren geht, ist laut den Autoren eine Escharotomie unumgänglich (49).

Schulze et al. fasst die Indikationsstellung für Escharotomie als sogenannten P's der neurovaskulären Komprimierung zusammen:

- Poikilothermia (Angleichen der Hauttemperatur an die Umgebungstemperatur)
- Pallor (Blässe)
- Paresthesia (Parästhesie)
- Pulselessness (Pulslosigkeit) (50).

Bezüglich des richtigen Zeitpunkts um eine Escharotomie durchzuführen, gibt es verschiedene Ansätze. Spätestens bei den oben aufgeführten klinischen Zeichen ist an eine operative Entlastung zu denken. Saffle et al. haben bereits 1980 eine zweimalig gemessene intramuskuläre Drucksteigerung über 30mmHg oder ein nicht vorhandenes palmares oder digitales Doppler-Ultraschall Signal als Indikation definiert. Sie empfehlen die Inzision primär ulnar bis zur Faszie durchzuführen. Erst wenn dies keine Besserung ergeben sollte, empfehlen die Autoren eine weitere radiale Inzision. Von einer prophylaktischen Escharotomie kurz nach dem Ereignis nehmen Saffle et al. eher Abstand (51). Bardakjian et al. empfehlen die Escharotomie durchzuführen, wenn die mit dem Pulsoxymeter gemessene Sauerstoffsättigung unter 95% sinkt, da laut den Autoren die Sauerstoffsättigung schon sinkt bevor klinische Zeichen erkennbar werden. Nach der Entlastung sollte diese schnell wieder auf normale Werte ansteigen (52). Yogishwarappa et al. erwähnen des Weiteren eine Klauenposition der Hand und deren eingeschränkten Bewegungsumfang als Indikation für eine Escharotomie. Für die Durchführung der Escharotomie finden sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze. Yogishwarappa et al. empfehlen für die Entlastung des Unterarms eine longitudinale Schnittführung mit einem Elektrokauter oder Skalpell jeweils radial und ulnar bis zur Höhe des

ersten beziehungsweise fünften Metacarpophalangealgelenks (53). Andere Autoren empfehlen nur die Inzision mittels Elektrokauter (32). Für die Entlastung der Hand empfehlen Yogishwarappe et al. die Schnittführung zwischen den Metacarpalknochen von der Basis der Hand bis zum Köpfchen des Os metacarpale. Dabei ist darauf zu achten keine Sehnen freizulegen. Die Entlastung der Finger erfolgt laut deren Ausführungen durch radiale Inzisionen an kleinem Finger und Daumen, und ulnaren Inzisionen an den anderen Fingern. Die korrekte Lokalisation der Inzision kann gefunden werden, indem man den Finger maximal beugt, die laterale Ausdehnung der Flexionsfalten als Orientierungspunkt wählt und anschließend durch diese Punkte die Inzision führt (32). Diese Schnittführung wird gewählt da die genannten Lokalisationen zu den funktional unwichtigsten Regionen gezählt werden und somit eine mögliche Freilegung der Nerven zu einem möglichst geringen funktionalen Defizit führen soll. Die Schnittführung kann zusätzlich laut den Autoren bis auf den Handrücken fortgeführt werden, um eine maximale Druckentlastung zu erreichen (53). Bevor zur Escharotomie der Hand übergegangen wird, sollte nach der möglichen Druckentlastung des Ober- und Unterarms zuerst geprüft werden, ob dadurch bereits eine ausreichende Perfusion erreicht wurde (32). Die operative Escharotomie der Finger ist recht umstritten. Eine Studie von Salisbury et al. aus dem Jahr 1976 konnte allerdings eine verminderte Amputationsrate nach durchgeführter digitaler Escharotomie bei zirkumferentiellen Verbrennungen der Finger zeigen (54). Piccolo et al. beschreiben in einer Arbeit aus dem Jahr 2007 eine andere Vorgehensweise. Sie empfehlen die Schnittführung seitlich am Arm und an der Hand über dem zweiten beziehungsweise vierten Metacarpalknochen. Auch bezüglich der Schnittführung an den Fingern empfehlen die Autoren ein anderes Vorgehen. Hier wird eine ulnare Inzision am zweiten und dritten Finger empfohlen und bei den anderen Fingern eine radiale Inzision. Sollte die Dekompression nicht zum gewünschten Ergebnis führen, sollten jeweils kontralateral weitere Inzisionen vorgenommen werden. Diese Autoren begründen die Schnittführung mit der nicht gewollten Narbenbildung an den Seiten der Finger, welche aufgrund der physiologischen Benutzung der Hand am häufigsten in Kontakt mit Objekten sind. Dazu zählen sie die ulnare Seite des Unterarms, welche meist beim Aufstützen benutzt wird. Weiters die ulnare Seite des ersten, vierten und fünften Fingers, sowie die radiale Seite des zweiten und dritten Fingers (55).

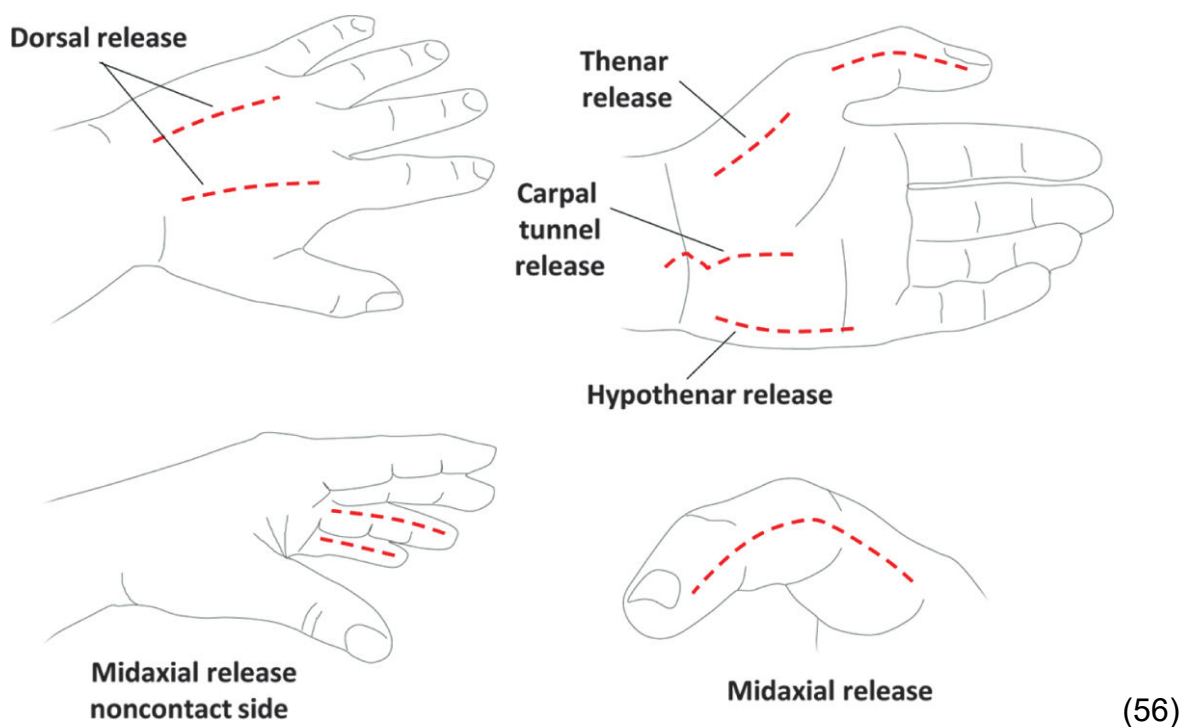


Abbildung 4 Schema der Escharotomie Inzisionen

Sollte die Escharotomie nicht zum gewünschten Ergebnis führen, kann eine Fasziotomie durchgeführt werden. Hier werden im Gegensatz zur Escharotomie die Schnitte nicht nur bis zum subkutanen Fettgewebe geführt, sondern es wird zusätzlich die Muskelfaszie eröffnet. Idealerweise werden die Inzisionen der zuvor durchgeführten Escharotomie dafür verwendet (50). Nach Piccolo et al. sollte am anterioren Unterarm eine kurvenförmige Schnittführung gewählt werden, welche eine distale Schnitterweiterung zu einem Karpaltunnel-Release ermöglicht (55). Vor allem Starkstromverletzungen führen häufig zur Fasziotomie. Trotzdem sollte die Operation selektiv stattfinden. Mann et al. konnten diesbezüglich eine erhöhte Amputationsrate nach nicht selektiver, binnen 24 Stunden nach Verletzung stattfindender Fasziotomie nach Stromverletzungen feststellen. Die Arbeitsgruppe empfiehlt erst bei klinischen Zeichen zu operieren, um möglicherweise Gewebe zu schützen, da eine Fasziotomie ein starkes Weichteiltrauma darstellt (57). Bei Stromverletzungen sind Hände erwachsener Menschen extrem häufig betroffen, da es sich meistens um Arbeitsunfälle handelt. Die äußerlich sichtbare Verletzung scheint oft klein. Nach dem Debridement zeigt sich jedoch das Ausmaß der Verletzung. Die Einwirkung des Stroms führt zu thermalen Nekrosen von Muskeln,

Sehnen, Nerven und Blutgefäßen. Verletzungen dieses Ausmaßes können trotz aggressiver operativer Behandlung mit Debridement, Escharotomie und Fasziotomie zur Amputation führen (58).

## **11 Enzymatische Escharotomie**

Ein weiterer Ansatz, die Druckentlastung des Gewebes zu erzielen, ist die Behandlung mittels enzymatischen Debridements, welche gleichermaßen zu einer ausreichenden Therapie des BICs (Burn Induced Compartment Syndrome) führen soll. Die proteolytische Entfernung des rigiden Eschars ermöglicht dem Gewebe, wie auch die Inzisionen dessen, sich ausdehnen zu können, ohne von außen komprimiert zu werden. Krieger et al. haben anhand von artifiziell herbeigeführten zirkumferentiellen Verbrennungen an Schweineextremitäten die klassische operative Escharotomie und jene mittels enzymatischen Debridements verglichen. Die Autoren heben hervor, dass die klassische operative Escharotomie ein traumatisches Vorgehen darstellt und dabei wichtige Strukturen verletzt werden können. Es bedarf eines erfahrenen Chirurgen/ einer erfahrenen Chirurgin, um Komplikationen möglichst unwahrscheinlich zu machen. Diese optimalen Bedingungen sind jedoch in Realität oft nicht zum nötigen Zeitpunkt realisierbar. Zudem wird ein möglicherweise erhöhtes Risiko für eine Sepsis, hohen Blutverlust und die invasivere Anästhesie bei klassisch operativer Escharotomie erwähnt. Die Arbeitsgruppe sieht in der Behandlung des Verbrennungsinduzierten Kompartmentsyndroms durch enzymatisches Debridement die Möglichkeit, PatientInnen bei denen einerseits die Gegebenheiten eine optimale Versorgung nicht ermöglichen beziehungsweise bei denen nicht eindeutig festgestellt werden kann, ob ein Kompartmentsyndrom bereits besteht oder sich noch entwickeln wird, trotzdem eine adäquate Therapie anbieten zu können. Es konnte gezeigt werden, dass durch enzymatisches Debridement mittels Debridase® (alter Handelsname von NexoBrid®) ein Gewebsdruckabfall unter 30mmHg innerhalb der ersten 30 Minuten nach dem Behandlungsbeginn erzielt werden kann. Vorteil der klassischen Methode ist natürlich, dass sich im Moment der Inzision eine Druckentlastung einstellt, was bei der enzymatischen Methode einer halben Stunden bedarf. Die enzymatische Escharotomie sehen die Autoren vor allem dann als Alternative, wenn

kein/e VerbrennungsspezialistIn verfügbar ist, Großschadensereignisse mit vielen Opfern passieren oder wenn sich nicht genau diagnostizieren lässt, ob eine BICS bereits vorliegt oder sich noch entwickeln könnte (59).

Eine weitere Studie aus dem Jahr 2019 stellt die enzymatische Escharotomie als eine Möglichkeit dar, welche die operative Escharotomie verhindern soll. Fischer et al. konnten zeigen, dass durch frühzeitiges enzymatisches Debridement eine operative Escharotomie verhindert werden kann. In der Studie kamen zwischen den Jahren 2015 und 2017 insgesamt 24 PatientInnen mit 35 zirkumferentiell verbrannten Extremitäten für die Teilnahme in Frage. Vierzehn Extremitäten wurden aufgrund trockener Verbrennungsoberflächen ausgeschlossen, welche laut den Autoren sofortiger operativer Entlastung bedurften und daher die notwendige Feucht-Phase vor der Anwendung von NexoBrid® nicht einhaltbar gewesen wäre. Es wurden also nur Verbrennungsverletzungen mit feuchter Wundoberfläche in die Studie inkludiert. Eine weitere Extremität wurde ausgeschlossen, weil es sich um eine Verbrennungsverletzung durch elektrischen Strom handelte, bei der eine Fasziotomie durchgeführt werden musste (60).

Diese Tatsache wurde von David G. Greenhalgh in einem Kommentar stark kritisiert, da laut ihm hiermit genau jene PatientInnen ausgeschlossen werden, die das höchste Risiko haben, ein verbrennungsinduziertes Kompartmentsyndrom zu entwickeln. Er vergleicht das oben beschriebene Vorgehen mit dem Ausschluss von PatientInnen mit Appendizitis aus einer Appendektomie-Studie. Des Weiteren kritisiert David G. Greenhalgh, dass in der oben genannten Studie die operative Escharotomie als eine zu verhindernde Maßnahme dargestellt wird. Er argumentiert, dass es keinen Anhaltspunkt dafür gäbe, dass die operative Escharotomie ein höheres Infektionsrisiko habe, als die enzymatische. Außerdem ist laut ihm eine Escharotomie außerhalb eines Verbrennungszentrums selten nötig, da die Entwicklung des verbrennungsinduzierten Kompartmentsyndroms einiger Stunden bedarf (61). Die Anwendung der enzymatischen Escharotomie ist wie oben beschrieben laut Fischer et al. eines der großen Vorteile gegenüber der operativen Therapie, da diese auch unerfahrene ChirurgInnen ohne erhöhtes Komplikationsrisiko anwenden können (60).

## 12 Autologe Hauttransplantate

Autologe Hauttransplantate stellen den Goldstandard der Defektdeckung dar (62,63). Man unterscheidet Spalthaut- (STSG) von Vollhauttransplantaten (FTSG), wobei Spalthaut als sogenanntes Sheet-Graft oder Mesh-Graft angewendet werden kann. Vollhauttransplantate bestehen aus Epidermis und Dermis. Die Verwendung ist limitiert, da Entnahmestellen knapp sind. In den ersten 24 Stunden nach der Transplantation werden Hauttransplantate durch Diffusion ernährt, danach durch Vaskularisierung (64). Bei großflächigen Verbrennungen wird meist gemeshete Spalthaut zur Deckung genutzt, da Entnahmestellen knapp bemessen sind. Sie bieten außerdem den Vorteil, dass Wundsekret und Blut gut abfließen können. Sheet-Grafts bergen hingegen die Gefahr, dass sich darunter Wundsekret und Blut sammelt und das Transplantat daher nicht einheilt (15). Durch Stichinzisionen mit dem Skalpell kann dem vorgebeugt werden. Eine weitere Möglichkeit ist ein im Verhältnis 1:1,5 gemeshetes Spalthauttransplantat in nicht expandiertem Zustand zu verwenden. Salisbury et al. konnten bei Sheet-Grafts und nicht expandierter gemesheter Spalthaut dasselbe funktionelle Ergebnis erzielen (65).

Bei Verbrennungen der Hand wird aufgrund des besseren Outcomes von zahlreichen Studien die Verwendung von Vollhauttransplantaten empfohlen (20,22,53). Chandrasegaram et al. verglichen den Outcome nach der Transplantation von Spalthaut und Vollhaut an unterschiedlichen Regionen der Hand. Im Gesamten konnten sie bei über 150 teilnehmenden PatientInnen zeigen, dass es in 24% der Fälle nach Spalthauttransplantation zu einer Kontraktur kommt. Nach Transplantation von Vollhauttransplantaten kommt es nur in 2% der Fälle zu einer Kontraktur. Aufgrund der Ergebnisse empfiehlt die Arbeitsgruppe, vor allem bei palmaren Verbrennungen und Beteiligung der volaren Seite der Finger, nach Möglichkeit auf Vollhauttransplantate zurückzugreifen (66).

Generell sei erwähnt, dass die frühe Deckung einer Verbrennungswunde Vorteile in Bezug auf die Dauer des Krankenhausaufenthalts und den funktionellen Outcome hat (67).

## 13 Verbände und Hautersatzmaterialien

Als Hautersatzmaterialien versteht man Produkte, die zum temporären oder permanenten Verschluss von Verletzungen, im gegebenen Fall Verbrennungen der Haut, verwendet werden. Im Idealfall sollten diese Hautersatzmaterialien folgende Eigenschaften haben:

- Schutz gegen Infektion
- Atmungsaktiv
- Kostengünstig
- Leichte Anwendung
- Einfache Lagerung
- Verfügbarkeit verschiedener Größen und Stärken
- Hypoallergen
- Langfristige Wundstabilität
- Ersatz für Epidermis und Dermis
- Widerstandsfähig gegen Scherkräfte
- Weitgehende Verfügbarkeit

Keines der heutzutage erhältlichen Produkte erfüllt alle angeführten Eigenschaften, jedoch gibt es ein breites Spektrum an Wahlmöglichkeiten. Im Folgenden sind die bei Verbrennungen der Hand am häufigsten verwendeten Materialien angeführt und erläutert. Einige der angeführten Produkte wurden auch für die anatomischen Gegebenheiten der Hand optimiert (68).

### 13.1 Verbände mit lokalen Antiseptika

#### 13.1.1 Acticoat®

Acticoat® ist eine antimikrobielle Wundauflage, die durch kontinuierliche Freisetzung von nanokristallinem Silber potentielle Wundkeime abtötet. Diese Wundauflage wird seit über zwanzig Jahren bei Verbrennungswunden, Spalthautentnahmestellen und sonstigen Wunden eingesetzt. Ein Nachteil von

silberhaltigen Wundaufgaben ist die mögliche zytotoxische Wirkung von Silberionen auf die einwachsenden Keratinozyten. Dadurch kann die Wundheilung zeitlich verzögert werden (69). Im Jahr 2019 konnte in einer Studie, die Acticoat® und Biobrane bei zweitgradigen Verbrennungen kindlicher Torsos verglich, festgestellt werden, dass die Heilungszeit beider Produkte gleich ist. In der genannten Studie konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass in der Gruppe, die mit Acticoat® behandelt wurde, im Median weniger Verbandswechsel nötig waren, als in der Gruppe die mit Biobrane® behandelt wurde (69). Diese Zahl muss allerdings kritisch gesehen werden, da Biobrane® im Normalfall bis zur Reepithelisierung auf der Wunde verbleibt und daher keine tiefen Verbandswechsel vorgesehen sind. In der erwähnten Studie wurde nicht zwischen tiefen und oberflächlichen Verbandswechseln unterschieden.

Im Jahr 2006 publizierten Kok et al. eine Methode, Acticoat® für Verbrennungen der Hand einzusetzen, indem man eine Art Handschuh daraus formt und diesen mit Hautklammern in seiner Form fixiert (70). Wichtig ist es, dabei auf die Separierung der Finger zu achten, da sonst die potentiell gesunde Haut geschädigt werden kann (71).

### **13.1.2 Mepilex Ag®**

Mepilex Ag® ist ein Schaumverband, der durch die Imprägnierung mit Silbersulfat-Partikeln antimikrobiell auf die Wunde wirkt. Der Hersteller empfiehlt eine Anwendung für schwach bis mäßig exsudierende Verbrennungswunden zweiten Grades (72). Die Silikonoberfläche haftet auf gesunder Haut und ermöglicht dadurch einen schmerzfreien Verbandswechsel. Auf der Wundoberfläche haftet der Verband nicht. Dies führt zu einem atraumatischen Verbandswechsel (73-75). Matsumura et al. konnten zeigen, dass Verbandswechsel von adhäsiven Verbänden durch die oberflächliche Traumatisierung zu einer verzögerten Reepithelisierung führen können (76). Dahingehend stellt sich MepilexAg® als vorteilhaft dar. Bezüglich der Frequenz der Verbandswechsel gibt es in der Literatur unterschiedliche Herangehensweisen. Gee Kee et al. führen einen Wechsel alle drei bis fünf Tage durch (75). Hundeshagen et al. empfehlen ein etwas größeres Fenster von drei bis sieben Tagen bis die Wundheilung komplett abgeschlossen ist (77). In einer Publikation von Kaartinen und Kuokkanen aus dem Jahr 2011 wird

Mepilex® und Suprathel® in der Anwendung auf Spalthautentnahmestellen verglichen. Die Autoren erwähnen, dass beide Produkte auf der Wunde verbleiben können, bis sie sich von selbst lösen (78). Hierbei ist zu hinterfragen, inwieweit Mepilex® und MepilexAg® vergleichbar sind und ob die Selbstlösung eines an der gesunden Haut haftenden Produkts einen Verbandswechsel indizieren kann. Innerhalb der ersten 24 Stunden nach Applikation des Verbands, ist die Freisetzung der Silberionen vollendet (79). Daher sollten lange Perioden der Verbandswechsel kritisch hinterfragt werden. Die potentiell minimierte antimikrobielle Wirkung könnte sich negativ auf die Wunde auswirken.

Hundeshagen et al. verglichen die Anwendung von MepilexAg® und Suprathel® bei Verbrennungen zweiten Grades. Bezüglich der Heilungszeit stellte sich keines der beiden Produkte als vorteilhaft gegenüber dem anderen heraus. Suprathel® konnte allerdings eine höhere Schmerzreduktion als MepilexAg® erwirken (77). Bis dato gibt es in der Literatur keine spezifischen Untersuchungen über die Anwendung von MepilexAg® bei Verbrennungen der Hand. Der Hersteller empfiehlt jedoch bei kleinen Defekten, das Produkt mindestens ein bis zwei Zentimeter über den Wundrand hinaus anzubringen, um einer Mazeration der gesunden Haut vorzubeugen. Inwieweit die anatomischen Gegebenheiten der Hand diese Empfehlung zulassen, ist fraglich und mit Sicherheit vom Einzelfall abhängig.

## **13.2 Biologische Hautersatzmaterialien**

### **13.2.1 Allogen**

Allogene Produkte, also vom Menschen abstammende Hautersatzmaterialien, werden in der Regel nur bei 2b-gradigen oder drittgradigen Verbrennungswunden eingesetzt. Sie können sowohl als temporärer als auch permanenter Hautersatz bei akuten Verbrennungen oder Reonstruktion der daraus folgenden Narben eingesetzt werden (80). Voraussetzung für den Einsatz von Kadaverhaut ist die korrekte Aufbereitung dieser. Die zellulären Bestandteile, also die Epidermis, sowie die Zellen der Dermis, müssen entfernt werden. Die Extrazellulärmatrix mit Kollagen- und Elastinfasern bleibt danach über (81). Histologische Studien haben gezeigt, dass vollständige immunogene Abstoßungen nur sehr selten auftreten, auch wenn

leichte Entzündungsreaktionen vorkommen können (82,83). AlloDerm® ist das derzeit am meisten untersuchte und verbreitetste allogene Dermis-Ersatzprodukt. Dieses wird vor der Benutzung mit einer antibiotischen Kochsalzlösung befeuchtet, anschließend gemesht und mit dünner, gemeshter Spalthaut bedeckt. Das genaue debridieren des Wundgrundes zur Erschaffung eines gut durchbluteten Wundbettes ist äußerst wichtig für das Einwachsen der Spalthaut. Das Meshen des AlloDerm®, meistens im Verhältnis 1:1, sorgt für die verbesserte Ernährung und Revaskularisierung des darüber liegenden Spalthauttransplantates. Das Dermis-Ersatzprodukt ermöglicht die Spenderareale für die Spalthaut möglichst klein und wenig traumatisiert zu belassen, da die Spalthaut in diesem Fall rein als Keratinozytenquelle dienen soll. Die geringe Stärke des Transplantates hat außerdem den Vorteil, dass der metabolische Bedarf dadurch geringer ist, und so die Nährstoffversorgung der Epidermiszellen dadurch verhältnismäßig optimiert wird (84). Bereits 1997 konnten Lattari et al. ausgezeichnete Ergebnisse bei der Verwendung von AlloDerm® bei Verbrennungen der Hand erzielen. Anhand zweier die Hand betreffende Fallbeispiele konnte die Arbeitsgruppe zeigen, dass selbst bei der Anwendung über Gelenken ein äußerst zufriedenstellender Bewegungsumfang erzielt werden kann, und somit die Arbeitsfähigkeit der PatientInnen erhalten werden kann. Auch das ästhetische Ergebnis wurde als exzellent beschrieben (85). Nachteil der azellulären dermalen Matrix ist die anspruchsvolle operative Technik, welche beim Debridement ein vitales Wundbett mit sorgfältig durchgeführter Hämostase erfordert. Außerdem stellt AlloDerm® wie oben beschrieben quasi ein Hindernis zwischen Wundbett und Spalthauttransplantat dar, welches die Revaskularisierung dessen erschwert. Ein weiterer Nachteil ist die längere Ruhigstellung, welche nach der Behandlung eingehalten werden muss. Hier werden mindestens fünf, und bis zu zehn Tage und mehr empfohlen (82). AlloDerm® ist in Europa weder als Medizinprodukt noch als Arzneimittel zugelassen, was die Verfügbarkeit stark einschränkt. Als Alternative zu AlloDerm® kann Epiflex® genannt werden. Eine Studie aus dem Jahr 2011 konnte die Sicherheit des Produkts bezüglich Stabilität, Sterilität, Zellfreiheit, Rehydrierungseigenschaften, Struktur und Permeabilität bestätigen (86). Studien bezüglich der spezifischen Verwendung bei Verbrennungen der Hand wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht publiziert.

## **13.2.2 Biosynthetisch**

In der Behandlung von 2a-gradigen Verbrennungen werden biosynthetische Hautersatzmaterialien standardmäßig eingesetzt.

### **13.2.2.1 Biobrane®**

Biobrane® ist ein temporärer Epidermis-Ersatz, der bei Verbrennungen zweiten Grades eingesetzt wird. Auch bei Verbrennungen dritten Grades findet das Produkt als vorübergehende Deckung bei nicht sofort verfügbarem Autograft Verwendung. Bei großflächigen Verbrennungen wird an Stellen mit unklarer Tiefe Biobrane® zur Reduktion des Transplantatbedarfs angewendet (87). Biobrane® besteht aus einem Nylonnetz, an dem sich wundseitig Typ-1 Schweinekollagen und an der äußeren Membran eine Silikonschicht befindet. Diese Zusammensetzung sorgt für die Drainage von Wundexsudat, den Schutz vor bakterieller Infektion und Austrocknen der Wunde (88). Das Hautersatzmaterial verbleibt nach einmaliger Applikation auf der Wunde und löst sich mit der Reepithelisierung des Gewebes. Sobald sich Teile zu lösen beginnen, sollten diese entfernt werden (89). Da das Produkt durchsichtig ist, kann man einen darunterliegenden Sekretstau, welcher eine Wundinfektion hervorrufen und die Heilung negativ beeinflussen kann, schnell erkennen und wenn nötig intervenieren. Biobrane® gibt es auch in Form eines Handschuhes, der die Anwendung bei Verbrennungen der Hand erleichtern soll. Dieser wird in verschiedenen Größen angeboten, wobei der kleinste einer jugendlichen Handgröße entspricht. Bei Kindern ist laut Rajayogeswaran et al. die Anpassung des Handschuhes in der kleinsten Größe nicht ausreichend möglich. Daher empfiehlt die Arbeitsgruppe bei Kindern auf Biobrane® im Standardformat zurückzugreifen und dieses anzupassen (90). Bezüglich der Kosten konnten Busche et al. aufzeigen, dass Biobrane® im Gegensatz zur konservativen Therapie ohne Hautersatzmaterialien, doppelt so viel Kosten erzeugt. Allerdings ist der Zeitaufwand über vierzehn Tage hinweg bei der Behandlung mit Biobrane® um fünf Stunden geringer (91). Ein Vergleich bezüglich Ergebnissen, Kosten und Anwendung von Biobrane® in Handschuhform und jenem in Standardform wurde in der Literatur bisher nicht getätigt.

### 13.2.2.2 Suprathel®

Bei dem biosynthetischen Hautersatzmaterial Suprathel® handelt es sich um eine flexible resorbierbare Membran bestehend aus Polylactid, was Polymilchsäure entspricht, Trimethylencarbonat und  $\epsilon$ -Copolacton. Suprathel® ist ein temporärer Epidermisersatz, welcher auf der Wunde verbleibt, bis die Epithelisierung eingesetzt hat und dieser sich von selbst löst. Dadurch können häufige, schmerzhafte Verbandswechsel vermieden werden. Das Hautersatzmaterial wird bei Verbrennungen zweiten Grades und den Entnahmestellen von Spalthaut eingesetzt (77). Schwarze et al. verglichen die Anwendung von Suprathel® mit Jelonet® auf Spalthautentnahmestellen. In die Studie wurden 22 PatientInnen eingeschlossen. Die Arbeitsgruppe konnte bezüglich der Heilungszeit und der Reepithelisierungszeit keinen Vorteil für eines der beiden Produkte feststellen. Der Schmerzgrad war bei den PatientInnen, die mit Suprathel® behandelt wurden signifikant geringer. Auch das Handling war bei Suprathel® einfacher, da das Material besser an der Wunde haftet und sich besser an den Wundgrund anpassen lässt. Dies ist vor allem bei anatomisch herausfordernden Körperstellen wie der Hand von Vorteil. Die Transparenz von Suprathel® lässt auf einfache Weise ein Wundmonitoring zu. Die Materialkosten sind bei Jelonet® geringer, es bedarf jedoch eines erhöhten personellen Aufwands für die frequentierten Verbandswechsel, sowie eine erhöhte Gabe von Schmerzmedikation. Im Gesamtüberblick machen diese Faktoren die Behandlung mit Suprathel®, trotz der höheren Materialkosten von Jelonet®, kostengünstiger (92). Suprathel® existiert auch als handförmiges Produkt. Die vorgefertigte Form soll die Anwendung erleichtern. Schiefer et al. konnten zeigen, dass die Verwendung von handförmigem Suprathel® zu einem wesentlich geringeren Materialüberschuss führt. Wenn das Standardprodukt für Hände angewendet wird, wird bis zu 40% verworfen. Bei dem an die Hand angepassten Produkt sind nur noch 0% - 5% überschüssig. Die Applikationszeit konnte auch durch das vorgeformte Produkt deutlich verringert werden. Die Applikation kann in der sogenannten „Sandwich-Technik“ erfolgen. Eine Einheitsgröße kann durch die Elastizität des Materials laut Hersteller für alle Handgrößen angewendet werden (93). Da das handförmige Produkt teurer ist, muss man die Wirtschaftlichkeit dessen hinterfragen. Als kostensparenden Faktor kann man die verkürzte Operationsdauer

durch die schnellere Applikation sehen. Inwiefern sich jedoch der Zeitfaktor in der Gesamtrechnung niederschlägt, wurde noch nicht untersucht.

### **13.3 Dermisersatz**

#### **13.3.1 Integra®**

Integra® ist ein häufig genutztes dermales Hautersatzprodukt. Es handelt sich um eine zweischichtige Membran, welche einerseits aus einem auf Rinderkollagen basierendem dermalen Analogon, und andererseits aus einer semipermeablen Membran, welche ein temporäres epidermales Ersatzmaterial darstellt, besteht. Die großen Poren des Materials erleichtern das Einwachsen der Zellen (89). Die Silikonschicht schützt das darunterliegende Gewebe vor Austrocknung und Bakterien. Integra® wird sowohl bei der Akutbehandlung von Verbrennungen eingesetzt als auch bei Korrekturoperationen von bewegungseinschränkenden Narben (94). Die Anwendung von Integra® verläuft zweiphasig. Im ersten Operationsschritt wird das Produkt auf die Wundfläche aufgebracht. Nach zwei bis drei Wochen wird der zweite Schritt vorgenommen, in dem die zuvor beschriebene Silikonschicht entfernt, und die gebildete Neodermis mit einem Hauttransplantat gedeckt wird. Zahlreiche Studien konnten bereits die Funktionalität bezüglich der Elastizität der Haut und die Sicherheit von Integra® bei Verbrennungen der Hand belegen (80,94-96). Selbst bei freiliegenden Sehnen ohne Paratenon, wie es bei Verbrennungen vierten Grades der Fall sein kann, wurde das dermale Ersatzmaterial bereits eingesetzt und konnte gute Ergebnisse erzielen. Mit dem Material versucht man die Gleiteigenschaft des Paratenon zu imitieren und somit die Funktion der Hand so gut als möglich zu erhalten und Adhäsionen zu vermeiden. Shores et al. konnten zeigen, dass das Bewegungsausmaß der Hand nach dem Einsatz von Integra® und anschließender Spalthautdeckung mit dem nach der Sehnendeckung mittels fasziokutanem Lappen vergleichbar ist (97).

### **13.3.2 Matriderm®**

Matriderm® ist ein weiteres Dermis-Ersatzprodukt, welches im Gegensatz zu Integra® einer einphasigen Anwendung bedarf. Es handelt sich um einen einschichtigen Hautersatz, der aus Elastin und Rinderkollagen besteht. Durch die geringe Stärke des Produkts kann die Wunde in einem Schritt mit Matriderm® und Spalthaut gedeckt werden. Der Hersteller hebt hervor, dass der enge Kontakt zwischen Wundgrund, Matriderm® und vorzugsweise ungemeshter Spalthaut besonders wichtig ist (80,89). Die einphasige Anwendung ist gegenüber Integra® als Vorteil zu sehen. Bei Vergleichen zwischen Matriderm® und Integra® zeigte sich bezüglich der Vaskularisierung, Transplantatverlust und Narbenqualität bis dato keines der beiden Produkte dem anderen überlegen (98,99). Integra® konnte bei der Narbenqualität, Kontraktionsrate und dem langfristigen Bewegungsausmaß bessere Ergebnisse als Matriderm® hervorbringen. Histoarchitektonisch ist die Neodermis bei beiden Produkten nicht zu unterscheiden (100). Alvo et al. empfehlen bei Verbrennungswunden, für die im ersten Schritt bereits ein Spalthauttransplantat zur Verfügung steht, auf die einphasige Behandlung mit Matriderm® zurückzugreifen. Bei großflächigen Verbrennungen, die eine ausreichende Entnahme von Spalthaut im ersten Schritt nicht zulassen, kann laut der Arbeitsgruppe die zweiphasige Anwendung von Integra® als Vorteil genutzt werden (101).

## **14 Negative Pressure Wound Therapy der Hand (NPWT)**

Die Unterdruck-Therapie spielt bei Verbrennungen der Hand eine äußerst wichtige Rolle. NPWT wird zur temporären Wundbehandlung vor und nach Hauttransplantationen angewandt und sorgt gleichzeitig zur Schienung der Hand. Aufgrund der vielseitigen Vorteile wird dem Thema in dieser Literaturrecherche ein eigenes Kapitel gewidmet. Der Einsatz von Unterdruck-Therapie bei Weichteilverletzungen hat bereits im letzten Jahrtausend Einzug in die medizinische Literatur gefunden. Fleischmann et al. konnten im Jahr 1993 bei PatientInnen mit offenen Frakturen mittels Schaumverbänden und Unterdruck die Bildung von Granulationsgewebe induzieren und somit die Abheilung beschleunigen (102). Vier Jahre später konnten Morykwas und Argenta mit Tierexperimenten die Wichtigkeit

des feinporigen Polyurethan-Schaumes, welcher zu einer gleichmäßigen Druckverteilung führt, aufzeigen. Daraufhin kam es zur Entwicklung des V.A.C.®-Systems (Vacuum Assisted Closure) (103).

Bezüglich Verbrennungswunden konnte ebenso eine positive Wirkung der Unterdruck-Therapie festgestellt werden. Kamolz et al. konnten im Jahr 2004 zeigen, dass die Vakuum-Therapie einerseits der Ödembildung entgegenwirkt und andererseits zu einer Hyperperfusion führt. Beide Faktoren spielen eine wichtige Rolle bezüglich der Progression der Verbrennungswunde in der Stasezone. In besagter Studie wurden PatientInnen mit zweitgradigen Verbrennungen beider Hände eingeschlossen und die klinisch stärker betroffene Hand der Vakuum-Therapie zugeführt. Die andere Hand wurde mit einer Silber-Sulfadiazin-Creme behandelt. Mittels Indocyaningrün (ICG)-Videoangiographie wurde die Perfusion beider Hände verglichen. Anhand dieser Daten konnte der vorteilhafte Nutzen der Unterdrucktherapie bei Verbrennungen zweiten Grades aufgezeigt werden. Die Autoren hoben außerdem hervor, dass der Zeitfaktor bei der Behandlung zu beachten ist. Sie erachten den Beginn der Vakuumtherapie innerhalb der ersten sechs Stunden nach dem Ereignis als sinnvoll, da die fortschreitende Entwicklung der Verbrennungswunde in den ersten drei Stunden beginnt, und nach zwölf bis 24 Stunden die maximale Komprimierung der Mikrozirkulation eintritt. Da die Entwicklung der Verbrennungswunde bis zu 48 Stunden nach dem Ereignis fortschreitet, sollte die Vakuum-Therapie für mindestens diesen Zeitraum belassen werden (104). Der Einsatz der Unterdruck-Therapie nach dem Debridement der Verbrennungswunde führt zu einer verbesserten Bildung von Granulationsgewebe. Durch das vorbereitete Wundbett kann die folglich applizierten Hauttransplantate besser einheilen. Die anatomischen Gegebenheiten der Hand führen bei Verbrennungen auch zum Freiliegen von Knochen und Bändern. Auch hier kommt es durch die Unterdruck-Therapie zur Bildung von Granulationsgewebe, die folglich das Einheilen der Spalthaut ermöglicht und dadurch auch der Notwendigkeit einer freien Lappenplastik vorbeugen kann (105,106). Auch nach dem Applizieren des Spalthauttransplantats zeigt die Verwendung der Vakuum-Therapie äußerst positive Wirkung in der Fixierung des Transplantats, wie in einigen Studien bereits publiziert wurde (105,107,108). Der Polyurethan-Schaum passt sich durch den Unterdruck jeglicher Oberflächenkontur an und ist daher besonders in schwierigen Bereichen wie der Hand ein äußerst gutes Mittel, um Hauttransplantate an Ort und

Stelle zu fixieren. Petkar et al. verglichen die Transplantatannahme bei Fixierung des Spalthauttransplantates mit normalem Standardverband mit der Fixierung durch Unterdruck-Therapie. Sie konnten zeigen, dass die Annahme des Spalthauttransplantates in der Gruppe der Vakuum-Therapie signifikant höher war (108). In der Praxis können das Anlegen und Fixieren des PU-Schaumpolsters sehr zeitaufwendig sein. Für die Durchführung an der Hand gibt es mehrere Ansätze. Der Hersteller des PU-Schaumpolsters bietet eine handschuhförmige Ausführung an, welche das Anlegen der Vakuum-Therapie erleichtern soll (109).

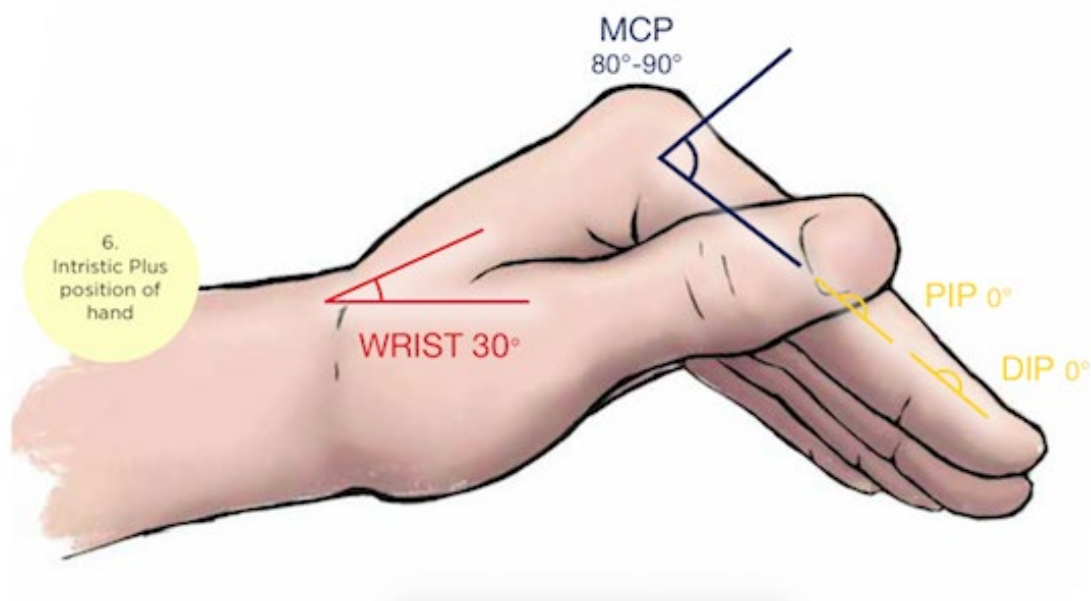


(110)

*Abbildung 5 V.A.C.® Granufoam Hand Dressing Kit*

Kamolz und Lumenta haben im Jahr 2013 die sogenannte „Sterile Glove Technique“ publiziert, bei der ein passender steriler Handschuh für die Fixierung des PU-Schaumes verwendet wird. Wichtig ist bei dieser Technik, dass das am proximalen Ende des Handschuhs befindliche elastische Band entfernt wird, da sonst Druckstellen entstehen können. Als vorteilhaft erwähnen die Autoren die besonders einfache und vor allem schnelle Handhabung dieser Methode (111). In einer weiteren Studie, welche die funktionellen Ergebnisse nach Vakuum-Wundtherapie untersuchte, wurde eine dritte Methode beschrieben. Die Arbeitsgruppe fertigt aus dem PU-Schaumstoff einen modifizierten Verband an, indem an der palmaren und

dorsalen Seite der Hand PU-Schaumstoff in Form eines Fäustlings platziert wird. Anschließend werden die Finger durch Schaumstoffkeile getrennt. Der Schaumstoff kann mit einem Klammergerät unter Ausparung der Haut fixiert werden. Die Fingerspitzen werden nicht vom Schaumstoff bedeckt, um ein besseres Perfusionsmonitoring zu gewährleisten. Die selbstklebende Folie wird am Schluss über die gesamte Hand geklebt. Die Vorteile dieser Anwendungsart sind laut den Autoren neben dem optimierten Monitoring durch die Aussparung der Fingerspitzen vor allem die Kostenersparnis gegenüber dem vom Hersteller vorgefertigten PU-Schaum für die Hand. Um die Hand zu schienen, kann der negative Druck der lokalen Vakuum-Therapie ausgenutzt werden. Es ist keine weitere Schienung notwendig, um die Hand in der sogenannten „Intrinsic-plus“-Stellung zu fixieren (112).



(113)

Abbildung 6 "Intrinsic-plus"-Position der Hand

Ehrl et al. konnten 2017 zeigen, dass die langfristigen Ergebnisse nach einer lokalen Unterdruck Behandlung äußerst gut sind, und es sich bei dieser Therapie um eine sichere und effektive Methode der Behandlung von Verbrennungen der Hand handelt. 30 PatientInnen mit 47 Handverbrennungen und einem durchschnittlichen

Follow-up von 35 Monaten wurden in der Studie berücksichtigt. Keiner der PatientInnen zeigte Taubheitsgefühle, Parästhesien, Narbenschmerz oder Anzeichen für die Bildung von Neuomen. 85,1% der Hände hatten keine Restriktion der Dorsalextension und bei 78,8% der Hände war ein aktiver Faustschluss möglich. Des Weiteren wurde der sogenannte DASH-Score (Disability of Arm, Shoulder and Hands) erhoben, bei dem die PatientInnen Fragen bezüglich alltäglicher Einschränkungen beantworten müssen. Das Ergebnis des DASH-Scores kann von 0 bis 100 reichen, wobei ein höherer Wert eine höhere Behinderung im Alltag darstellt. In der beschriebenen Studie konnte ein mittlerer DASH-Score von 13,8 bei einer Range von 0 bis 35 erreicht werden (112).

## **15 Narbenmanagement und Kontrakturen**

Auch bei optimaler medizinischer Versorgung in der Akutphase von Handverbrennungen können hypertrophes Narbenwachstum und Narbenkontrakturen die Folge sein. Dies hat bei der Hand zur Folge, dass nicht nur die Funktion eingeschränkt sein kann, sondern auch die für die PatientInnen ständig sichtbare Ästhetik stark darunter leidet. Das funktionelle Defizit kann bei handwerklichen Berufen bis zur Arbeitsunfähigkeit führen (114,115). Der Handrücken ist durch die geringe Dicke der Haut für hypertrophe Narben prädestiniert. Eine geringere Hitzeeinwirkung führt dadurch im Vergleich zu anderen Körperstellen zu tieferen Verletzungen. Zusätzlich wird die Hand oft als Schutz vor das Gesicht gehalten, wodurch der Handrücken umso mehr der Hitzeeinwirkung ausgesetzt wird (116). Je tiefer die Verbrennung, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der hypertrophen Narbenbildung und anschließender Deformierung (20,115-117). Im Jahr 1995 konnten Sheridan et al. in einer Studie mit 1047 beobachteten Handverbrennungen zeigen, dass bei bis zu 2a-gradigen Verbrennungen in 97% der Fälle eine normale Funktion der Hand erreicht werden konnte. Bei tieferen Verbrennungen konnten nur 81% der beobachteten Verbrennungen eine normale Funktion der Hand zurückgewinnen (118). Um die Qualität, der aus Verbrennungsverletzungen folgenden Narben vergleichen beziehungsweise definieren zu können, wurden zahlreiche Möglichkeiten der Klassifikation publiziert. Die am häufigsten in der Literatur verwendete Methode ist

die sogenannte „Vancouver Scar Scale“, abgekürzt „VSS“, bei der 0 – 13 Punkte erreicht werden können, wobei 0 am ehesten der normalen Haut entspricht. Die Methode lässt die Narbenqualität sehr gut objektivieren, spiegelt allerdings nicht die persönlich empfundene Einschränkung der PatientInnen wider (119).

Durchblutung	Pigmentierung	Geschmeidigkeit	Höhe	Punkte
normal	normal	normal	flach	0
rosa	hypopigmentiert	geschmeidig	<2mm	1
rot	hyperpigmentiert	nachgiebig	2-5mm	2
violett		fest	>5mm	3
		steif		4
		hart		5
		kontrakt		6

*Tabelle 1 Vancouver Scar Scale*

Um diesen funktionsbeeinträchtigenden und ästhetisch störenden Narben möglichst vorzubeugen, muss nicht nur die akute Therapie bestmöglich verlaufen, sondern die mittelfristige bis langfristige Versorgung optimiert werden. Dahingehend wurden schon zahlreiche Therapiemöglichkeiten publiziert. Bereits seit den 1970er Jahren wird die Kompressionstherapie angewendet (120). Man geht davon aus, dass die Kompression zu einer verringerten Durchblutung führt, und dabei für ein vermindertes Einwandern von Myofibroblasten sorgt. Dadurch soll die Narbenbildung minimiert werden (15). Der exakte Wirkmechanismus der Kompressionstherapie ist bis heute ungeklärt (121). Es wird angenommen, dass die Kompressionstherapie nicht nur zu einer Verringerung der Narbenhöhe führt, sondern dass sie auch Kontrakturen reduziert, sowie Schmerzen und Juckreiz lindern kann. Auf die Narbenpigmentierung und Elastizität scheint sie keinen Einfluss zu haben (121). Die Kompressionstherapie wird bei Verbrennungen mit prolongierter Heilungsdauer über 21 Tage angewendet. Bei 14 bis 17 Tagen Heilungszeit wird eine engmaschige Observanz der Narben oder eine prophylaktische Kompressionstherapie empfohlen. Verbrennungswunden mit einer Heilungszeit zwischen sieben und 14 Tagen müssen keiner Kompressionstherapie

zugeführt werden (122). Die Empfehlungen bezüglich des Drucks, der auf die Narben einwirken soll, variieren zwischen 24 bis 30 mmHg (121). Für die Durchführung dieser Behandlung stehen am Markt verschiedenste Produkte zur Verfügung. Tubigrip® ist eine schlauchförmige elastische Bandage, die in verschiedenen Größen angeboten wird und sich gut für die Anwendung bei nahezu vollständigem oder völligem Verschluss der Wunde eignet. Die Art der Herstellung bedingt eine Veränderung der Druckverteilung, wenn in den Verband Löcher geschnitten werden. Darauf muss speziell bei Verbrennungen der Hand geachtet werden, wenn zum Beispiel eine Aussparung für den Daumen nötig ist. Für die frühzeitige Kompressionstherapie der Hand und der Finger eignen sich besonders selbsthaftende elastische Bandagen, wie zum Beispiel Coban®. Hierbei muss der Anwender darauf achten, mit angemessenem Druck zu wickeln, da sonst bei zu fester Wickelung Gewebe geschädigt werden kann oder bei zu lockerer Anwendung die gewünschte Wirkung nicht erreicht wird. Coban® ist in der Anwendung recht aufwendig, da ein täglicher Wechsel der Bandagen empfohlen wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Qualität des Ergebnisses vom Können des Anwenders abhängig ist (123). Zahlreiche Hersteller bieten auch angepasste Kompressionsverbände in Handschuhform an, welche die Anwendung deutlich erleichtern. Es kann auch gezielt Druck auf die Zwischenfingerfalten ausgeübt werden, wenn dies nötig ist (49). Damit diese Verbände verwendet werden können, muss die Wunde vollständig geheilt sein, da beim Anziehen Scherkräfte auf die Haut wirken und diese potentiell die empfindliche Wunde schädigen könnten (49,123).



(124)

Abbildung 7 Kompressionsbekleidung für die Hand

Ein weiterer Ansatz, der hypertrophen Narbenbildung vorzubeugen, sind Silikoneinlagen. Sie haben den ähnlichen Wirkmechanismus wie die zuvor oben beschriebene Druckbekleidung. Die Silikoneinlagen werden in Kombination mit der Kompressionsbekleidung eingesetzt, um noch gezielteren Druck ausüben zu können. Sie werden über drei bis sechs Monate mindesten zwölf Stunden pro Tag angewendet (121,125). Besonders bei Verbrennungen der Hand wird diese Kombination häufig eingesetzt (121).

Die korrekte Schienung ist eine weitere Therapie, die einer Narbenkontraktur und anschließender Deformität vorbeugen soll. Wie bereits beschrieben, soll die Schienung zu Beginn der Behandlung für eine Ruhigstellung sorgen, um das Einheilen potentiell vorhandener Hauttransplantate zu erleichtern. Im weiteren Verlauf dient die Schienung der Vorbeugung von kontrakturbedingten Deformitäten. Die Hand wird dabei in die Intrinsic-Plus-Position gebracht (siehe Abbildung 6). Für die gezielte Behandlung des Daumens werden auch reine Daumen-Abduktionsschienen verwendet, um eine funktionelle Gelenksstellung zu erreichen (126).

## 16 Rekonstruktion

Auch bei optimaler Behandlung der Verbrennungsverletzungen können Deformitäten der Hand die Folge sein. Achauer hat diese im Jahr 1987 wie folgt klassifiziert:

- Krallenhand
  - komplett
  - inkomplett
- Palmare Kontraktur
- Deformität der Zwischenfingerfalten
  - Kontraktur des Spatiums interdigitale
  - Adduktionskontraktur
  - Syndaktylie
- Hypertrophe Narben
- Amputationsdeformität
- Nagelwalld deformität (127).

McCauley hat eine andere Klassifikation für Deformitäten nach Handverbrennungen vorgenommen. Diese definiert Grade der Narbenkontraktur der Hand (128).

<b>Grad I</b>	Symptomatische Spannung; ohne Bewegungseinschränkung; normale Architektur
<b>Grad II</b>	Milde Bewegungseinschränkung ohne Beeinträchtigung des täglichen Lebens; normale Architektur
<b>Grad III*</b>	Funktionelle Beeinträchtigung; leichte Architekturstörung
<b>Grad IV*</b>	Verlust der Handfunktion und Architekturstörung
<b>*Subklasse A</b>	Flexionskontraktur
<b>*Subklasse B</b>	Extensionskontraktur
<b>*Subklasse C</b>	Flexions- und Extensionskontraktur

*Tabelle 2 Narbenkontraktur der Hand nach McCauley*

Die ausgeprägte Schädigung der Hand kann eine bedeutende Funktionseinschränkung, welche die Arbeitsfähigkeit eines Menschen beeinträchtigen kann, zur Folge haben. Auch der ästhetische Faktor der Hand darf hierbei nicht unterschätzt werden. Ob und inwiefern eine Rekonstruktion der Hand vorgenommen werden kann oder soll, muss anhand rekonstruktiver Grundprinzipien entschieden werden:

- Art, Lokalisation und Schweregrad der Deformität
- Lokalisation und Beschaffenheit des gesunden, für die Rekonstruktion nutzbaren Gewebes
- Ziele und Anforderungen der PatientInnen (129).

Germann et al. publizierten hierzu folgende fünf Fragen, die vor der Planung einer operativen Rekonstruktion beantwortet werden sollten:

1. Um was für eine Kontraktur oder funktionseinschränkende Narbenbildung handelt es sich?
2. Sind darunterliegende Gelenke beteiligt (Bänder, Gelenkscapsel, Knorpel)?
3. Sind Weichteilkorrekturen ausreichend?
4. Welche Defektdeckung ist anschließend möglich bzw. angezeigt?
5. Wo können Hauttransplantate oder Lappen gewonnen werden? (130)

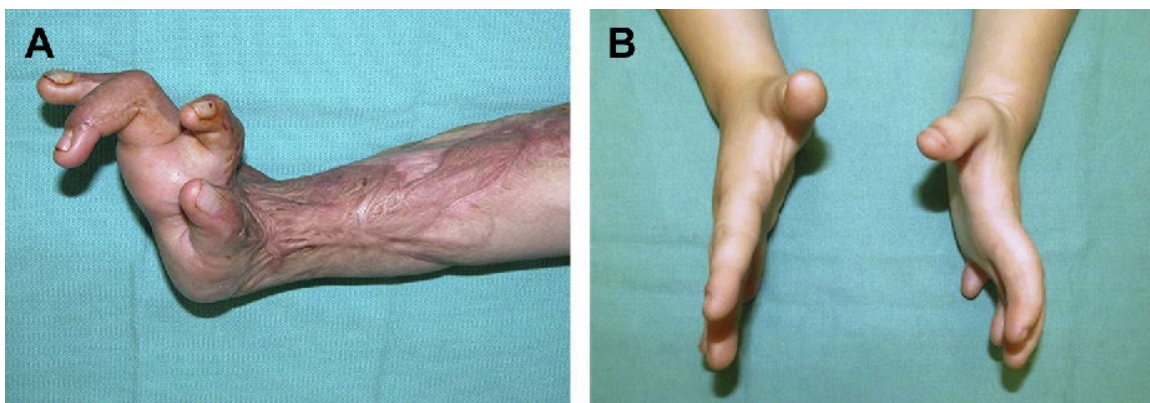
Die Aufgabe der Chirurgin/ des Chirurgen sollte sein, primär die Funktion der Hand so weit als möglich zurückzugewinnen, und nicht das maximale Bewegungsmaß in jedem einzelnen Gelenk zu erzielen (62). Im Folgenden werden die drei häufigsten und funktionell einschränkenden Deformitäten ausgearbeitet. Diese erfordern unterschiedliche Rekonstruktionsmethoden, die übersichtlich dargestellt werden. Auch Kombinationen dieser Deformitäten können die Folge einer Handverbrennung sein.

## **16.1 Krallenhand**

Die Krallenhand ist die Deformität, die die Funktion der Hand am meisten beeinträchtigt (131). Sie entsteht durch eine Hyperextension des

Metacarpophalangealgelenks und eine Flexionskontraktur des proximalen Interphalangealgelenks. Die Hyperextension der Metacarpophalangealgelenke kommt meist durch hypertrophe Narben am Handrücken zustande. Die ungewollte Flexion bei versuchter Streckung in den proximalen Interphalangealgelenken entsteht durch ein Abgleiten der Seitenzüge nach palmar. Dadurch wird die Bewegungsachse des Gelenks verändert. German (130) hat im Gegensatz zu Achauer eine Unterteilung in eine langzeitige, schon fixierte Krallenhand, die auch mit Bänderverkürzungen einhergeht, und eine Krallenhand, die rein durch Hautbeziehungsweise Narbenveränderungen in diese Position gedrängt wird, vorgeschlagen. Erstere Gruppe muss laut dem Autor einer Arthrolyse zugeführt werden, die sowohl palmar als auch dorsal durch eine dorsale Inzision durchführbar sind (13,130).

Bezüglich der Rekonstruktion der MCP-Hyperextension, wurden durch Exzision des Narbengewebes und anschließendem Einsatz von Matriderm® als Dermisersatz und Spalthautdeckung äußerst zufriedenstellende Ergebnisse erreicht (132). Germann empfiehlt bei Handrekonstruktionen, wenn möglich, auf Vollhauttransplantate zurückzugreifen und Spalthauttransplantate nur zu verwenden, wenn erstere nicht verfügbar sind. Wenn das Hautdefizit nach der Arthrolyse und Entfernung des kontraktiven Gewebes zu groß ist, kann auch eine Lappenplastik nötig sein (130).



(133)

Abbildung 8 Krallenhand nach Verbrennungsverletzung

## 16.2 Digitale Beugekontraktur

Die Beugekontraktur der Finger ist die häufigste Deformität der verbrannten Hand, die meist durch die Verwendung von insuffizienten oder zu dünnen Hauttransplantaten, hypertrophe Narbenbildung, inadäquate Rehabilitationsübungen oder schlechte Schienung bedingt ist (134,135). Die Funktionalität der Finger, und somit der gesamten Hand wird dadurch beeinträchtigt. Kurtzman und Stern haben eine Klassifikation der Beugekontraktur der Finger wie folgt definiert:

- Typ I: Nur die Haut ist betroffen, Metacarpophalangealgelenk (MCP) passiv flektiert, proximales Interphalangealgelenk (PIP) kann voll extendiert werden.
- Typ II: palmare Kapselstrukturen sind mitbetroffen, MP Gelenk passiv flektiert, passive Extension im PIP nicht möglich.
- Typ III: Weichteil- und Gelenksstrukturen sind betroffen, PIP Gelenk unabhängig von der MP Gelenksstellung nicht beweglich (136).

Primär führt die kontraktionsbedingte Hautknappheit zur Einschränkung der Extensionsbewegung. Wenn das Ausmaß der Kontraktur eine sogenannte Z-Plastik zulässt, wird diese bevorzugt, da so auf eine Gewebstransplantation verzichtet werden kann (130). Dies ist bei linearen Kontrakturen meistens der Fall. Dabei wird durch eine Gewebsrotation in lateraler Richtung zur Narbe Länge gewonnen. Je mehr Lappen gewonnen werden, und je größer der Rotationswinkel ist, desto mehr Länge wird generiert. Danach muss auf die Durchblutung des jeweiligen Fingers in gestrecktem Zustand geachtet werden, da sie durch die Zugkraft an den Gefäßen gestört sein kann (137). Das Prinzip der Z-Plastik, wie in Abbildung 9 dargestellt, kann nicht nur in einfacher Form genutzt werden, sondern wie zum Beispiel von Woolf und Broadbent publiziert wurde, als 4-Lappen-Z-Plastik, um noch mehr Länge zu generieren (138).

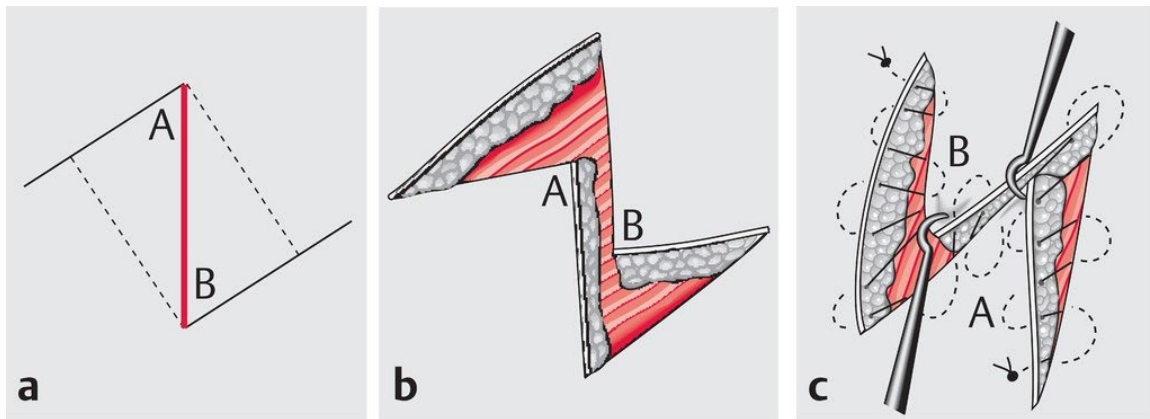


Abbildung 9 Z-Plastik

(139)

Stern et al. konnten in einer Studie, die 233 beugekontraktile Finger in unterschiedlicher Ausprägung untersuchte, zeigen, dass die operativ korrigierte Beugekontraktur in 88% der Fälle als erfolgreich anzusehen ist. Als zufriedenstellendes Ergebnis definiert die Arbeitsgruppe eine postoperativ bleibende Beugekontraktur von bis zu 20° (140).

Stark ausgeprägte Beugekontrakturen können durch die Korrektur ein Hautdefizit nach sich ziehen, welches gedeckt werden muss (130). Zahlreiche Studien konnten zeigen, dass zur Deckung der palmaren Haut die plantare Leistenhaut aufgrund der starken Ähnlichkeit besonders gut geeignet ist (141-144). Ähnliches Gewebe mit Ähnlichem zu decken, ist ein Grundprinzip der rekonstruktiven Chirurgie und bietet den Vorteil, dass die Beschaffenheit und Farbe der Haut besser zu den Gegebenheiten passt (129). Cauley et al. empfehlen vor der Spalthautentnahme an der Planta pedis eine Tumescenz-Anästhesie durchzuführen, um die Entnahme zu erleichtern. Vorwiegend sollte das Spalthauttransplantat von der nicht gewichtstragenden Fläche der Fußsohle gewonnen werden (129). Die Arbeitsgruppe verfolgt die bereits 1999 publizierte Arbeitsweise, von derselben Stelle zwei gleich dicke Transplantate zu entnehmen. Das tiefere wird zur Defektdeckung an der Hand benutzt, das oberflächliche Transplantat zum Verschluss des an der Planta pedis generierten Defekts (129,145).

Nach der Korrektur der Beugekontraktur, muss der Finger in maximaler Extension fixiert werden, um mögliche Scherkräfte zu verhindern und erneuten Kontrakturen vorzubeugen. Standardmäßig wird dazu eine Fixierung mittels Kirschner-Draht gewählt (146-149). Diese invasive Methode kann zu Komplikationen führen. K-

Drähte können das umgebende Gewebe tangieren und folglich verletzen, auch Sehnenrupturen sind möglich und nicht zuletzt kann es zur Drahtwanderung kommen (147). Laut Germann et al. ist der invasive K-Draht nur indiziert, wenn nach der Operation eine elastische Resistenz des kontraktiven Gelenks verbleibt und die PatientInnen diese Resistenz nicht selbstständig überwinden können (130).

Um die invasive Fixierung mit dem K-Draht und die damit verbundenen Komplikationen zu umgehen, haben Huang et al. die Methode der Draht-Rahmen-Fixierung publiziert. Dafür wird aus einem K-Draht ein dreidimensionaler Rahmen geformt, der mit den Nähten, die auch das Hauttransplantat fixieren, verbunden wird und so einerseits zu einer Schienung des Gelenks und andererseits zu einer Fixierung des Transplantats führt. Die Autoren empfehlen eine Entfernung des Draht-Rahmens bereits nach sieben Tagen, also bevor die Nähte entfernt werden. Komplikationen wie Dislokationen des Draht-Rahmens, Infektion, Einblutung, Nekrose des Transplantats, Druck-Ulzera oder Hypoxie des Fingers konnten in dieser Studie nicht festgestellt werden. Die Methode ist besonders für Kinder gut geeignet, da die Epiphyse nicht geschädigt wird und die Entfernung im Gegensatz zum invasiven K-Draht schmerzfrei ist. Die Kosten und der Zeitaufwand sind laut dieser Publikation mit dem des invasiven K-Drahtes vergleichbar (147). Da in die Studie nur 15 Fälle involviert wurden, sind für aussagekräftigere Ergebnisse noch weitere Untersuchungen dieser Methode nötig.

### **16.3 Syndaktylie**

Verbrennungen der Zwischenfingerräume können zur Syndaktylie führen. Dies führt zu einer Einschränkung der Fingerabduktion (137). Gulgonen et Ozer haben die interdigitalen Deformitäten des zweiten bis vierten Fingers in drei Gruppen eingeteilt. Diese können anhand objektiverer Maße differenziert werden. Die zwei entscheidenden Maße sind einerseits der Neigungswinkel der Zwischenfingerfalte von palmar nach dorsal, und andererseits das Längenverhältnis zwischen Handfläche und Mittelfingerlänge. Der interdigitale Steigungswinkel ist im Normalfall circa 45° und das von palmar betrachtete Längenverhältnis von Handfläche zu Mittelfinger beträgt 5:4. Anhand dieser Kriterien unterscheidet man die dorsale, palmare und interdigitale Zwischenfingerkontraktur. Diese bedürfen verschiedener Rekonstruktionsverfahren (150).

<b>Definition</b>	<b>Zwischenfingerwinkel (45°)</b>	<b>Handfläche:Mittelfinger (5:4)</b>
Dorsale Zwischenfingerkontraktur	Erhöht	Normal
Palmare Zwischenfingerkontraktur	Erniedrigt	Erhöht
Interdigitale Kontraktur	Erhöht	Erhöht

*Tabelle 3 Einteilung interdigitaler Kontrakturen*

Die Einteilung vereinfacht die Beurteilung der Kontraktur und Planung der Rekonstruktionen von komplizierten Deformitäten. Zur Rekonstruktion der Syndaktylie wird die interdigitale Kontraktur bis zum normalen Bewegungsausmaß gelöst und anschließend werden die Gewebsdefekte mit lokalen Schwenklappen oder Vollhauttransplantaten gedeckt (137). Die dorsale Kontraktur soll laut Gulgonen et Ozer mit einem rechtwinkligen Lappen korrigiert werden. Hierbei wird die dorsale Kontraktur linear bis ein Zentimeter distal des Caput metacarpale inzidiert. Ein rechtwinkliger Lappen wird anschließend an der nicht betroffenen interdigitalen Haut generiert und anschließend in die neu generierte Zwischenfingerfalte geschwenkt. Der überbleibende Defekt wird mit Vollhaut gedeckt. Die Länge des Lappens entscheidet hierbei über die Tiefe und den Winkel der Zwischenfingerfalte, die Breite des Lappens ist für die Weite der Falte verantwortlich (150). Dies hat den Vorteil, dass mit dieser Methode sowohl starke als auch schwache Kontrakturen korrigiert werden können.

Zur Rekonstruktion der palmaren Syndaktylie wurden in der Literatur mehrere Methoden ausführlich diskutiert. Duretti et al. empfehlen sich an der Ausprägung der palmaren Zwischenfingerkontraktur zu orientieren. Die normale Zwischenfingerfalte liegt genau in der Mitte der proximalen Phalanx. Liegt die Zwischenfingerfalte noch auf Höhe der proximalen drei Viertel der proximalen Phalanx, so ist laut der Arbeitsgruppe eine lokale Rekonstruktion realisierbar. Sollte die Zwischenfingerfalte distaler der proximalen drei Viertel der proximalen Phalanx liegen, so wird in besagter Publikation auf einen dorsalen Uhrglaslappen zurückgegriffen (151). Es handelt sich hierbei um einen gestielten

Transpositionsflappen, der vom Dorsum manus generiert wird. Der entstandene Defekt am Handrücken kann direkt, ohne Einsatz von Hauttransplantaten, verschlossen werden (152).

Gulgonen et Ozer empfehlen für die Rekonstruktion der palmaren Syndaktylie quere Inzisionen über dem MCP, PIP sowie DIP. Die Inzision über dem MCP wird auf bis zu 270° zirkulär ausgedehnt, um auch das Spreizen der Finger zu ermöglichen. Dabei wird nur die dorsale Haut intakt belassen. Diese Technik berücksichtigt durch die Inzisionen über den Interphalangealgelenken eine einhergehende Flexionskontraktur der Finger. Die generierten Defekte werden anschließend mit Vollhauttransplantaten gedeckt (150) Brown et Chung präferieren nach Möglichkeit den Einsatz lokaler Gewebsplastiken. Die 5-Lappen-Plastik ist laut den Autoren eine äußerst geeignete Möglichkeit, die Interdigitalfalte zu korrigieren. Das Prinzip entspricht dem einer Z-Plastik. Die Schnitte sind dabei nicht zu kurz zu wählen und können auch bei Notwendigkeit intraoperativ verlängert werden. Die darunterliegende Narbe muss aufgrund der anatomischen Nähe zur Arteria digitalis communis und ihrer Bifurkation vorsichtig mit der Schere gelöst werden (137,153).

## 17 Outcome

Um die Beurteilung des Outcomes nach Verbrennungsverletzungen der Hand zu objektivieren und vergleichbar zu machen, werden in der Literatur verschiedene Beurteilungsformen verwendet. Diese können an objektiven Maßen orientiert sein oder das Empfinden der PatientInnen in den Mittelpunkt stellen. Ein häufig verwendetes Maß ist die sogenannte „Range of Motion“ (ROM). Hierbei werden Bewegungsausmaße einzelner Gelenke oder ganzer Funktionseinheiten gemessen. Diese Messung kann aktiv oder passiv durchgeführt werden. Inwiefern dies die Funktion der Hand darzustellen vermag ist bis jetzt unklar, da es hierfür kein einheitliches System gibt (154,155). Eine weitere Möglichkeit die Handfunktion zu objektivieren, ist die Griff- und Kneifkraft zu messen. Dazu werden das Jama-Dynamometer und das Preston Pinch Gauge verwendet. Die Methode ist objektiv und einfach anzuwenden (154). Holavanahalli et al. konnten einen Zusammenhang zwischen der Griff- und Kneifkraft und der subjektiven Handfunktion feststellen (156). Der Nachteil dieser Messmethode ist, dass sie bei Verbrennungsoptern oft

nicht durchführbar ist, da sie die Messgeräte durch Verbände, Schienen oder Kontrakturen nicht halten können (154).

Der Jabson-Taylor-Hand-Function-Test (JTHFT) ist einer der am häufigsten benutzten Tests nach Handverbrennungen (67,156-160). Hierbei geht es um die Schnelligkeit, in der sieben Aktivitäten des täglichen Lebens (ADL) von den PatientInnen durchgeführt werden können. Die Aufgaben dürfen nur mit einer Hand durchgeführt werden. Dies stellt die Anwendbarkeit für Verbrennungen in Diskussion, da dies für Verbrennungsoffer durch das eingeschränkte Bewegungsausmaß nur mit zwei Händen durchführbar ist. Es ist daher fraglich, ob der JTHFT die Einschränkungen im täglichen Leben gut darstellen kann (154). Außerdem stellen die Aufgaben laut Mathiowetz die Aktivitäten des täglichen Lebens nicht adäquat dar (154,161).

Auch der „Test d'Evaluation des Membre Supérieurs des Personnes Agées“ (TEMPA) wurde bereits zur Objektivierung des Outcomes nach Handverbrennungen herangezogen (162,163). Dieser Test beinhaltet sowohl bilaterale als auch unilaterale Aufgaben, welche die PatientInnen durchführen müssen. Die Bewertung erfolgt aufgrund der Schnelligkeit, der Autonomie der PatientInnen und einer Aufgabenanalyse durch eine Punkteskala. Ursprünglich wurde der Test für ältere Menschen gestaltet und auf diese Altersgruppe abgestimmt. Daher steht er in Kritik, für Verbrennungsverletzungen nicht validiert worden zu sein (154). Umraw et al. empfehlen hingegen den Test zur Beurteilung der Handfunktion nach Verbrennungsverletzungen, da sie eine gute Reliabilität und Validität des Tests feststellen konnten (164). Die Arbeitsgruppe empfiehlt eine Kombination mit dem „Michigan Hand Questionnaire“ (MHQ), da sich die beiden Tests gut zu ergänzen scheinen (163,164). Der MHQ ist ein patientInnenzentrierter Fragebogen, in dem Fragen beantwortet werden müssen, welche die allgemeine Handfunktion, Aktivitäten des täglichen Lebens, Schmerzen, Arbeitsfähigkeit, Ästhetik und die Zufriedenheit betreffen (154). Holavanahalli et al. konnten eine signifikante Korrelation zwischen dem JTHFT und dem MHQ feststellen (156). Falder et al empfehlen den MHQ trotzdem nur als Screening-Methode, um zu erkennen ob weitere Untersuchungen nötig sind oder nicht. Es bedarf laut dieser Arbeitsgruppe noch mehreren Studien mit einer größeren PatientInnenzahl, um diesen Test für die Evaluierung der Handfunktion nach Verbrennungen zu empfehlen (155).

## 18 Conclusio

Das Ziel der Arbeit war, einen konzentrierten Überblick über ein Thema zu schaffen, das äußerst vielseitig und umfangreich ist. Es ist somit ein Leitfaden entstanden, der sowohl wichtiges Grundwissen als auch aktuellste Erkenntnisse der Wissenschaft berücksichtigt. Die Literaturrecherche hat ergeben, dass primär eine gründliche Wundtiefendiagnostik durch eine erfahrene Chirurgin/ einen erfahrenen Chirurgen essentiell ist, jedoch nur in 64% bis 76% der tatsächlichen Verbrennungstiefe entspricht. Als zukunftsweisende objektive Methode stellt sich dabei das Laser-Doppler-Imaging heraus. Das Debridement stellt sich bei der Hand aufgrund der anatomischen Gegebenheiten als ein herausfordernder Schritt der Therapie dar. Hierbei zeigt sich das enzymatische Debridement mit Bromelainhaltigen Produkten äußerst vorteilhaft, da eine überschießende Schorfexzision verhindert wird und eine vorangehende exakte Wundtiefendiagnostik nicht nötig ist. Goldstandard der folgenden Wunddeckung ist nach wie vor die Verwendung von autologer Vollhaut. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Hautersatzprodukte, wobei einige in spezieller Ausführung für die anatomischen Gegebenheiten der Hand angeboten werden. Um den funktionellen Outcome zu optimieren, ist der Einsatz von synthetischen oder auch allogenen Dermis-Ersatzprodukten von großer Bedeutung. Die Gleitfähigkeit von Sehnen, die bei tiefen Verbrennungsverletzungen möglicherweise freiliegen, kann durch den Einsatz von Dermis-Ersatzprodukten wiederhergestellt werden. Als weiteren wichtigen Punkt in der Therapie ergab die Recherche eine Ruhigstellung der Hand in funktioneller Position. Dies kann unter anderem durch eine Unterdruck-Therapie erreicht werden, die sich sowohl vor als auch nach einer Hauttransplantation positiv auf die Verbrennungswunde auswirkt. Einigkeit in der Literatur herrscht auch über die positive Auswirkung von Kompressionsbekleidung, obwohl die genaue Wirkungsweise auf die Narbenentwicklung noch nicht im Detail erforscht wurde. Trotz optimaler Therapie nach aktuellem Wissensstand können sich Hände nach einem Verbrennungstrauma durch die Narbenkontraktur und überschießende Narbenbildung deformieren. Rekonstruktionsoperationen stellen einen wichtigen Schritt im Erhalt der Arbeitsfähigkeit dar. Diesbezüglich ist die Literatur äußerst mannigfaltig. Am häufigsten wird die Z-Plastik erwähnt, die eine grundlegende

Operationstechnik in der Rekonstruktion von deformierten Händen ist, und deren Prinzip die Grundlage vieler Rekonstruktionsmethoden bildet. Es stellte sich heraus, dass die Funktion der Hand letztendlich nicht vom Bewegungsumfang der einzelnen Gelenke abhängt, sondern die Hand in ihrer funktionellen und ästhetischen Gesamtheit betrachtet werden muss. Um schlussendlich den funktionellen Outcome der Hand objektiv zu beurteilen und Vergleiche zu ermöglichen, werden in der Literatur zahlreiche Methoden erwähnt. Diesbezüglich herrscht noch keine Einigkeit. Als vielversprechend stellte sich die Kombination eines objektivierbaren Tests mit einem patientInnenzentrierten Fragebogen dar.

## 19 Quellenverzeichnis

- (1) Welsch U. Haut. In: Welsch U, Kummer W, editors. Lehrbuch Histologie. 4. Auflage ed.: Urban und Fischer; 2014. p. 539-557.
- (2) Lüllmann-Rauch R. Haut und Hautanhangsgebilde. In: Lüllmann-Rauch R, editor. Taschenlehrbuch Histologie. 5. Auflage ed.: Thieme; 2015. p. 580-600.
- (3) Hartmann M, Pabst M, Dohr G. Haut und Hautanhangsgebilde. In: Hartmann M, Pabst M, Dohr G, editors. Zytologie, Histologie und mikroskopische Anatomie Licht- und elektronenmikroskopischer Bildatlas. 5. Auflage ed.: Facultas; 2011. p. 128-134.
- (4) Lewis GM, Heimbach DM, Gibran NS. Evaluation of the burn wound: management decisions. In: Herndon DN, editor. . 4. Auflage ed.: Elsevier; 2012. p. 125-130.
- (5) Junqueira LCU, Carneiro J, Gratzl M. Haut. In: Gratzl M, editor. Histologie. 6. Auflage ed.: Springer; 2005. p. 306-318.
- (6) Gauglitz GG, Herndon DN, Kamolz L, Jeschke MG. Pathophysiologie von Verbrennungswunden. In: Kamolz L, Herndon DN, Jeschke MG, editors. Verbrennungen: Springer; 2009. p. 5-23.
- (7) Aufbau der Haut. Available at: <https://viamedici.thieme.de/lernmodule/histologie/aufbau+der+haut>. Accessed Juli, 2018.
- (8) Fritsch P, Schwarz T. Aufbau und Funktion der Haut. In: Fritsch P, Schwarz T, editors. Dermatologie Venerologie. 3. Auflage ed.: Springer; 2018. p. 67-68.
- (9) Mescher AL. Skin. In: Mescher AL, editor. JUNIQUEIRA'S Basic Histology Text and Atlas. 14. Ausgabe ed. Bloomington, Indiana: McGraw-Hill; 2016. p. 388-391.
- (10) Strassmair M, Wilhelm K, Hierner R. Angeborene Fehlbildungen der Hand. In: Berger A, Hierner R, editors. Plastische Chirurgie Extremitäten: Springer; 2009. p. 6-9.
- (11) Hierher R, Towfigh H, Berger A. Hand; Allgemeines. In: Schmit-Neuerburg K-, Towfigh H, Letsch R, editors. Tscherne Unfallchirurgie: Springer; 2001. p. 293-294.

- (12) Greifformen der Hand. Available at: [https://eref.thieme.de/images/l/1538994\\_25.jpg](https://eref.thieme.de/images/l/1538994_25.jpg). Accessed Interent Juli, 2018.
- (13) Kitzinger HB, Karle B, Frey M. Verbrennungen der Hand. In: Kamolz L, Herndon DN, Jeschke MG, editors. Verbrennungen. 1. Auflage ed.: Springer; 2009. p. 95-110.
- (14) Bergmann PA, Siemers F. Verbrennungswunden. In: Lehnhardt M, Hartmann B, Reichert B, editors. Verbrennungschirurgie. 1. Auflage ed.: Springer; 2016. p. 38-44.
- (15) Kolokythas P, Aust MC. Verbrennungsverletzungen. In: Vogt PM, editor. Praxis der plastischen Chirurgie: Springer; 2011. p. 650-666.
- (16) Norbury WB, Herndon DN. Management of Acute Pediatric Hand Burns. Hand Clin 2017(33):237-242.
- (17) Robinson EP, Chhabra AB. Hand Chemical Burns. J Hand Burg Am 2014;40(3):605-612.
- (18) Shupp JW, Nasabzadeh TJ, Rosenthal DS, Jordan MH, Fidler P, Jeng JC. A Review of the Local Pathophysiologic Bases of Burn Wound Progression. J Burn Care Res 2010;31:849-873.
- (19) Verbrennungszonen nach Jackson. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/263406583\\_Akutversorgung\\_des\\_brandverletzten\\_Kindes\\_Rettung\\_Transport\\_Schockraum\\_Anasthesie\\_OP/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/263406583_Akutversorgung_des_brandverletzten_Kindes_Rettung_Transport_Schockraum_Anasthesie_OP/figures?lo=1). Accessed 19.8, 2018.
- (20) McKee DM. Acute Management of Burn Injuries to the Hand and Upper Extremity. JHS 2010;35:1542-1544.
- (21) Pan BS, Vu AT, Yakuboff KP. Management of the Acutely Burned Hand. J Hand Surg Am 2015;40(7):1477-1484.
- (22) Soni A, Pham TN, Ko JH. Acute Management of Hand Burns. Hand Clin 2017;33(2):229-236.

- (23) Burmeister DM, Ponticorvo A, Yang B, Becerra SC, Choi B, Durkin AJ, et al. Utility of spatial frequency domain imaging (SFDI) and laser speckle imaging (LSI) to non-invasively diagnose burn depth in a porcine model. *Burns* 2015;41:1242-1252.
- (24) Heimbach D, Afromowitz M, Engrav L, Marvin J, Perry B. Burn depth estimation - man or machine. *J Trauma* 1984;24:373-378.
- (25) Brown R, Rice P, Bennet N. The use of laser Doppler imaging as an aid in clinical management decision making in the treatment of vesicant burns. *Burns* 1998;24:692-698.
- (26) Hlava P, Moserova J, Konigova R. Validity of clinical assessment of the depth of a thermal injury. *Acta Chir Plast* 1983;25:202-208.
- (27) Jaskille AD, Shupp JW, Jordan MH, Jeng JC. Critical Review of Burn Depth Assessment Techniques: Part I. Historical Review. *J Burn Care Res* 2009;30(6):937-947.
- (28) Jaspers MEH, van Haasterecht L, van Zuijlen, Paul P M, Mekkink LB. A systematic review on the quality of measurement techniques for the assessment of burn wound depth or healing potential. *Burns* 2018.
- (29) Jaskille AD, Ramella-Roman J, Shupp JW, Jordan MH, Jeng JC. Critical Review of Burn Depth Assessment Techniques: Part II. Review of Laser Doppler Technology. *J Burn Care Res* 2010;31(1):151-157.
- (30) Herndon D, Tompkins R. Support of the metabolic response to burn injury. *Lancet* 2004;363(9424):1895-1902.
- (31) Lee J, Herndon D. Modulation of the post-burn hypermetabolic state. In: Cynober L, Moore F, editors. *Nutrition and critical care*. 8th ed. Switzerland: Nestec; 2003. p. 38-56.
- (32) Lee JO, Dibildox M, Jimenez CJ, Gallagher JJ, Sayed S, Sheridan RL, et al. Operative wound management. In: Herndon DN, editor. *Total Burn Care*. forth edition ed.: Elsevier; 2012. p. 157-172.
- (33) Burke JF, Bondoc CC, Quinby WC. Primary burn excision and immediate grafting: A method shortening illness. *J Trauma* 1974;14(5):389-395.

- (34) Xiao-Wu W, Herndon DN, Spies M. Effects of delayed wound excision and grafting in severely burned children. *Arch Surg* 2002 Sep;137(9):1049-1054.
- (35) Tompkins RG, Burke JF, Schönfeld DA. Prompt eschar excision: a treatment system contributing to reduced burn mortality. A statistical evaluation of burn care at the Massachusetts General Hospital (1974-1984). *Ann Surg* 1986 Sep;204(3):272-281.
- (36) Herndon DN, Barrow R E, Rutan R L. A comparison of conservative versus early excision. Therapies in severely burned patients. *Ann Surg* 1989 May;109(5):547-553.
- (37) Pietsch JB, Netscher DT, Nagaraj HS. Early excision of major burns in children: effect on morbidity and mortality. *J Pediatr Surg* 1985 Dec;20(4):754-757.
- (38) Rappl T, Regauer S, Wiedner M, Wittgruber G, Schindler M, Scharnagl E. Klinische Erfahrungen mit dem Versajet-System in der Verbrennungsbehandlung - Indikation und Anwendung. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2007;39:308-313.
- (39) Legemate CM, Goei H, Gostelie OFE, Nijhuis THJ, van Baar ME, van der Vlies, C H. Application of hydrosurgery for burn wound debridement: An 8-year cohort analysis. *Burns* 2018;45(1):88-96.
- (40) Gurfinkel R, Rosenberg L, Cohen S. Histological assessment of tangentially excised burn eschar. *Can J Plast Surg* 2010;18.
- (41) Schulz A, Perbix W, Shoham Y, Daali S, Charalampaki C, Fuchs PC, et al. Our initial learning curve in the enzymatic debridement of severely burned hands - Management and pit falls of initial treatments and our development of a post debridement wound treatment algorithm. *Burns* 2016.
- (42) Krieger Y, Bogdanov-Berezovsky A, Gurfinkel R, Silberstein E, Sagi A, Rosenberg L. Efficacy of enzymatic debridement of deeply burned hands. *Burns* 2011;38:108-112.
- (43) Schulz A, Shoham Y, Rosenberg L, Rothmund I, Perbix W, Fuchs PC, et al. Enzymatic versus traditional surgical debridement of severely burned hands: A comparison of selectivity, efficacy, healing time, and three-month scar quality. *J Burn Care Res* 2017;38(4):745-755.

- (44) Hirche C, Citterio A, Hoeksema H, Koller J, Lehner M, Martinez J, et al. Eschar removal by bromelain based enzymatic debridement (Nexobrid) in burns: AN European consensus. *Burns* 2017;43:1640-1653.
- (45) Wallace A. Assessment and emergency treatment of burns. *Br Med J* 1955;2:1136-1138.
- (46) Lawton G, Dheansa B. The management of major burns - a surgical Perspective. *Curr Anaesthes Critical Care* 2008;19:275-281.
- (47) Handschin AE, Vetter S, Jung FJ, Guggenheim M, Künzi W, Giovanoli P. A case-matched controlled study on high voltage electrical injuries vs thermal burns. *J Burn Care Res* 2009;30:400-407.
- (48) Orgill DP, Piccolo N. Escharotomy and decompressive therapies in burns. *J Burn Care Res* 2009;30:759-768.
- (49) Kamolz L, Kitzinger HB, Karle B, Frey M. The treatment of hand burns. *Burns Invalid date Invalid date*:327-337.
- (50) Schulze SM, Weeks D, Choo J, Cooney D, Moore AL, Sebens M, et al. Amputation Following Hand Escharotomy in Patients with Burn Injury. *ePlasty* 2016(16):105-112.
- (51) Saffle J, Zeluff G, Warden G. Intramucular pressure in the burned arm: measurement and response to escharotomy. *Am J Surg* 1980;9:825-831.
- (52) Bardakjian V, Kenney J, Edgerton M, Morgan R. Pulse oximetry for vascular monitoring in burned upper extremities. *J Burn Care Rehabil* 1988;9:63-65.
- (53) Yogishwarappa CN, Ishwar M, Vijayakumar A. Management of acute Hand Burns. *Journal of Advanced Plastic Surgery Research* 2016(2):44-50.
- (54) Salisbury R, Taylor J, Levine N. Evaluation of digital escharotomy in burned hands. *Plast Reconstr Surg* 1976;58(4):440-443.
- (55) Piccolo NS, Piccolo MS, Piccolo PDP, Piccolo-Daher R, Piccolo NDP, Piccolo MTS. Escharotomies, Fasciotomies and Carpal Tunnel Release in Burn Patients - Review of the

Literature and Presentation of an Algorithm for Surgical Decision Making. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2007;39:161-167.

(56) Burn Critical Care. 2016; Available at: <https://aneskey.com/burn-critical-care/>. Accessed 01/, 2020.

(57) Mann R, Gibran N, Engrav L, Heimbach D. Is immediate decompression of high voltage electrical injuries to the upper extremity always necessary? *J Trauma* 1996;40(4):584-587.

(58) Vogt PM, Niederbichler D, Jokuszies A. Electrical injuries: reconstructive problems. In: Herndon D, editor. *Total burn care*. fourth edition ed.: Elsevier; 2012. p. 441-448.

(59) Krieger Y, Rosenberg L, Lapid O, Gelsinger O, Bogdanov-Berezovsky A, Silberstein E, et al. Escharotomy with an Enzymatic Debridement for Treating Experimental Burn-Induced Compartment Syndrome in an Animal Model. *J Trauma* 2005;58(6):1259-1264.

(60) Fischer S, Haug V, Die Y, Rhodius P, Cordts T, Schmidt V, et al. Feasibility and safety of enzymatic debridement for the prevention of operative escharotomy in circumferential deep burns of the distal upper extremity. *Burns* 2019;165:1100-1105.

(61) Greenhalgh DG. Commentary: Enzymatic escharotomy: A step backward? *Surgery* 2019;165:1106-1107.

(62) Sabapathy S, Bajantri B, Bharathi R. Management of post burn hand deformities. *Indian J Plast Surg* 2010;43:72-79.

(63) Skouge J. *Skin grafting*. New York: Churchill Livingstone; 1991.

(64) Smith MA, Munster AA, Spence RJ. Burns of the hand and upper limb - a review. *Burns* 1998(24):493-505.

(65) Salisbury R. Acute care of the burned hand. In: Saunders W, editor. *Plastic surgery* Philadelphia; 1990. p. 5399-5417.

(66) Chandrasegaram M, Harvey J. Full-thickness vs. split-skin grafting in pediatric hand burns - a 10-year review of 174 cases. *J Burn Care Res* 2009;30(5):867-871.

- (67) Omar M, Hassan A. Evaluation of hand function after early excision and skin grafting of burns versus delayed skin grafting: A randomized clinical trial. *Burns* 2011;37:707-713.
- (68) Shores J, Gabriel A, Gupta S. Akin substitutes and Alternatives: A review. *Adv Skin Wound Care* 2007;20(9):493-508.
- (69) Selvarajah D, Bollu B, Harvey J, Jacques M, Jehangir S, Fuller E, et al. Acticoat versus Biobrane: a retrospective review on the treatment on paediatric mid-dermal torso burns. *Int J Burn Trauma* 2019;9(4):82-87.
- (70) Kok K, Georgeu G, Wilson V. The acticoat glove - an effective dressing for the completely burnt hand: how we do it. *Burns* 2006;32(4):487-489.
- (71) Sakata A, West S, McBride C, Taylor R. Incorrect Acticoat application causing iatrogen injury to a child with a palmar burn. *Emerg Med Australas* 2008;20:183-184.
- (72) Molnlycke Health Care AB. Mepilex Ag. 2020; Available at: <https://www.molnlycke.at/produkte-losungen/mepilex-ag/>. Accessed 03/, 2020.
- (73) Chadwick P, Taherinejad F, Hamberg K, Waring M. Clinical and scientific data on a silver-containing soft-silicone foam dressing: an overview. *J Wound Care* 2009;18:483-490.
- (74) Morris C, Emsley P, Marland E, Meuleneire F, White R. Use of wound dressings with soft silicone adhesive technology. *Pediatr Nurs* 2009;21:38-43.
- (75) Gee Kee E, Kimble R, Cuttle L, Khan A, Stockton K. Randomized controlled trial of three burns dressings for partial thickness burns in children. *Burns* 2015;41(5):946-955.
- (76) Matsumura H, Imai R, Ahmatjan N, Ida Y, Gondo M, Shibata D. Removal of adhesive wound dressing and its effect on the stratum corneum of the skin: comparison of eight different adhesive wound dressings. *Int Wound J* 2012;11:50-54.
- (77) Hundeshagen G, Collins V, Kurzer P, Sherman W, Voigt C, Cambiaso-Daniel J, et al. A Prospective, Randomized, Controlled Trial Comparing the Outpatient Treatment of Pediatric and Adult Partial-Thickness Burns with Suprathel or Mepilex Ag. *J Burn Care Res* 2017.

- (78) Kaartinen I, Kuokkanan H. Suprathel causes less bleeding and scarring than Mepilex Transfer in the Treatment of donor sites of split-thickness skin grafts. *J Plast Surg Hand Surg* 2011;45:200-203.
- (79) Rigo C, Roman M, Munivrana I, Vindagni V, Atzen B, Barbante C. Characterization and evaluation of silver release from four different dressings used in burns care. *Burns* 2012;38:1131-1142.
- (80) van Zuijlen, Paul P M, Gardien K, Jaspers MEH, Bos E, Baas D, van Trier A, et al. Tissue engineering in burn scar reconstruction. *Int J Burn Trauma* 2015;3(18).
- (81) Wainwright D, Bury S. Acellular Dermal Matrix in the Management of the Burn Patient. *Asthet Surg J* 2011;31(7):13-23.
- (82) Wainwright D. Use of an acellular allograft dermal matrix (AlloDerm) in the management of full.thickness burns. *Burns* 1995;21:243-248.
- (83) Badylak S, Gilbert T. Immune response to biologic scaffold materials. *Semin Immunol* 2008;20:109-116.
- (84) Ellis CV, Kulber DA. Acellular Dermal Matrices in Hand Reconstruction. *Plast Reconstr Surg* 2012;5S(2):256S-269S.
- (85) Lattari V, Jones L, Varcelotti J, Latenter B, Sherman H, Barrette R. The Use of a permanent dermal allograft in Full-Thickness Burns of the Hand and Foot: A report of three cases. *J Burn Care Rehabil* 1997;18:147-155.
- (86) Rössner E, Smith M, Petschke B, Schmidt K, Vitacolonna M, Spring C, et al. Epiflex: A new decellularised human skin tissue transplant: manufacture and properties. *Cell Tissue Bank* 2011;12:209-217.
- (87) Schiefer J, Rath R, Ahrens E, Grigutsch D, Gräfe I, Stromes J-, et al. Evaluation of scar quality after treatment of superficial burns of the hands and face with Dressilk or Biobrane - An intra-individual comparison. *Burns* 2018;44(2):305-317.

- (88) Whitaker I, Browse S, Potokar T. A critical evaluation of the use of Biobrane as a biological skin substitute: a versatile tool for the plastic and reconstructive surgeon. *Ann Plast Surg* 2008;60(3):333-337.
- (89) Sando I, Chung K. The Use of Dermal Skin Substitutes for the Treatment of the Burned Hand. *Hand Clin* 2017;33(2):269-276.
- (90) Rajayogeswaran B, Bhatti A, Giblin A. Treatment of hands scalds in the paediatric age group: A novel Biobrane glove. *Burns* 2008;34:1006-1007.
- (91) Busche MN, Herold C, Schedler A, Knobloch K, Vogt PM, Rennekampff H-. Der Biobrane-Handschuh bei Verbrennungen der Hand. Bewertung des funktionellen und kosmetischen Ergebnisses und Kostenvergleich zur konventionellen Therapie. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 2009;41:348-354.
- (92) Schwarze H, Küntscher M, Uhlig C, Hierlemann H, Prantl L, Noack N, et al. Suprathel, a new skin substitute, in the management of donor sites of split-thickness skin grafts: Results of a clinical study. *Burns* 2007(33):850-854.
- (93) Schiefer J, Rahmanion-Schwarz A, Schaller HE, Manoli T. A novel Hand-Shaped Suprathel Simplifies the Treatment of Partial-Thickness Burns. *Adv Skin Wound Care* 2014;27(11):513-516.
- (94) Cuadra A, Correa G, Roa R, Pineros J, Norambuena H, Searle S, et al. Functional results of burned hands treated with Integra. *J Plast Reconstr Aest* 2012;65:228-234.
- (95) Danin A, Georgosco G, Touze A, Penaud A, Quiqnon R, Zakine G. Assessment of burned hands reconstructed with Integra by ultrasonography and elastometry. *Burns* 2012;38(7):998-1004.
- (96) Weigert R, Choughri H, Casoli V. Management of severe hand wounds with Integra dermal regeneration template. *J Hand Surg Eur* 2011;36(3):185-193.
- (97) Shores J, Hiersche M, Gabriel A, Gupta S. Tendon coverage using an artificial skin substitute. *J Plast Reconstr Aest* 2012;65:1544-1550.

- (98) Philandrianos C, Antrag-Meyer L, Mordon S, Feuerstein J, Sabatier F, Veran J. Comparison of five dermal substitutes in full-thickness skin wound healing in a porcine model. *Burns* 2012;38(6):820-829.
- (99) Schneider J, Biedermann T, Widmer D, Montano I, Meuli M, Reichmann E. Matriderm versus Integra: a comparative experimental study. *Burns* 2009;35(1):51-57.
- (100) Vana L, Battlehner C, Ferreira M, Caldini E, Alonso N. Comparative long-term study between two dermal regeneration templates for the reconstruction of burn scar contractures in huans: Clinical and histological results. *Burns* 2019.
- (101) Alvo R, Serror K, Bern R, Chaouat M, Mimoun M, Boccara D. Alternative à la greffe de peau pour la couverture des brûlures profondes de la face dorsale de la main en aigu: revue de la littérature. *Ann Burn Fire Disasters* 2017;30(4):296-302.
- (102) Fleischmann W, Strecker W, Bombelli M. Vacuum sealing as treatment of soft tissue damage in open fractures. *Unfallchirurg* 1993;96(9):488-492.
- (103) Morykwas M, Argenta L, Shelton-Brown E. Vacuum assisted closure: a new method for wound control and treatment: animal studies and basic foundations. *Ann Plast Surg* 1997;38(6):552-562.
- (104) Kamolz L, 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* 2004(30):253-258.
- (105) Teng S. Use of negative pressure wound therapy in burn patients. *Int Wound J* 2016;13:15-18.
- (106) Sahin I, Eski M, Acikel C, Kapaj R, Alhan D, Isik S. The role of negative pressure wound therapy in the treatment of fourth-degree burns. Trends and new horizons. *Ann Burn Fire Disasters* 2012;25:92-97.
- (107) Waltzman J, Bell D. Vacuum-assisted closure device as a split-thickness skin graft bolster in the burn population. *J Burn Care Res* 2014;35:338-342.

- (108) Petkar K, Dhanraj P, Kingsly P, Sreekar H, Lakshmanarao A, Lamba S, et al. A prospective randomized controlled trial comparing negative pressure dressing and conventional dressing methods on split-thickness skin grafts in burned patients. *Burns* 2011;37:925-929.
- (109) KCI Medizinprodukte GmbH. V.A.C. Therapie Klinische Richtlinien. 06/15; Available at: <https://www.acelity.com/-/media/Project/Acelity/Acelity-Base-Sites/shared/PDF/2-b-128-emea-dea-vac-clinical-guidelines-de.pdf>. Accessed 02/20 .
- (110) V.A.C.® Granufoam Dressing Kits. Available at: <https://www.acelity.com/healthcare-professionals/global-product-catalog/catalog/vac-granufoam-dressing-kits>. Accessed 02/20 .
- (111) Kamolz L, Lumenta D. Topical negative pressure therapy for skin graft fixation in hand and feet defects: A method for quick and easy dressing application - The "sterile glove technique". *Burns* 2013;39:814-815.
- (112) Ehrl D, Heidekrueger P, Broer N, Erne H. Topical Negative Pressure Wound Therapy of Burned Hands: Functional Outcomes. *J Burn Care Res* 2018;39(1):121-128.
- (113) Courtney C. Distal Radius Fractures: Reducing the Confusion. 02/15; Available at: <https://epmonthly.com/article/distal-radius-fractures-reducing-the-confusion/>. Accessed 01/20 .
- (114) Fife D, Chuang S, Yang J. Postburn contractures of the hand. *J Hand Surg Am* 2014;39(9):1869-1876.
- (115) Hegge T, Henderson M, Amalfi A. Scar contractures of the hand. *Clin Plastic Surg* 2011;38(4):591-606.
- (116) Sorkin M, Cholok D, Levi B. Scar Management of the Burned Hand. *Hand Clin* 2017;33(2):305-315.
- (117) Bhattacharya S. Avoiding unfavorable results in postburn contracture hand. *Indian J Plast Surg* 2013;46(2):434-445.

- (118) Sheridan R, Hurley J, Smith M, Ryan C, Bondoc C, Quinby W. The acutely burned hand: Management and outcome based on a ten-year experience with 1047 acute hand burns. *J Trauma* 1995;38:406-411.
- (119) Sullivan T, Smith J, Kermod J. Rating the burn scar. *J Burn Care Rehabil* 1990;11:256-260.
- (120) Macintyre L, Baird M. Pressure garments for use in the treatment of hypertrophic scars - a review of the problems associated with their use. *Burns* 2006;32(1):10-15.
- (121) Kwan P, Tredget E. Biological Principles of scar and Contracture. *Hand Clin* 2017;33(2):277-292.
- (122) McDonald W, Deitch E. Hypertrophic skin grafts in burn patients: a prospective analysis of variables. *J Trauma* 1987;27:147-150.
- (123) Serghiou M, Ott S, Whitehead C, Cowan A, McEntire S, Suman O. Comprehensive rehabilitation of the burn patient. In: Herndon DN, editor. *Total Burn Care*. 4th Edition ed.: Elsevier; 2012. p. 517-549.
- (124) Burn Garments. 2019; Available at: <https://www.compressionmanagement.com/our-products/burn-garments/>. Accessed 02/20 .
- (125) Momeni M, Hafezi F, Rahbar H. Effects of silicone gel on burn scars. *Burns* 2009;35(1):70-74.
- (126) Williams T, Berenz T. Postburn Upper Extremity Occupational Therapy. *Hand Clin* 2017;33:293-304.
- (127) Schauer B. *Management of the burned patient*. East Norwalk: Appleton & Lange; 1987.
- (128) McCauley R. Reconstruction of the pediatric burned hand. *Hand Clin* 2009;25(4):545.
- (129) Cauley R, Helliwell L, Donelan M, Eberlin K. Reconstruction of the Adult and Pediatric Burned Hand. *Hand Clin* 2017;33:333-345.

- (130) Germann G. Hand Reconstruction after Burn Injury: Functional Results. *Clin Plastic Surg* 2017;44(4):833-844.
- (131) Cartotto R, Cicuto B, Kiwanuka H, Bueno E, Pomahac B. Common Postburn Deformities and Their Management. *Surg Clin N Am* 2014;94(4):817-837.
- (132) Haslik W, Kamolz L, Nachschlagen G. First experiences with the collagen-elastin matrix Matriderm as a dermal substitute in severe burn injuries of the hand. *Burns* 2007;33:364-368.
- (133) Brown M, Chung K. Postburn Contractures of the Hand. 2017; Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Postburn-Contractures-of-the-Hand.-Brown-Chung/3d37878ef9830259933d28fb3efa03ddf3d843f8>. Accessed 02/20 .
- (134) Green D, Hotchkiss R, Pederson W. Green's Operative Surgery. 4th Edition ed. Philadelphia: Churchill Livingstone; 1999.
- (135) Huang T, Larson D, Lewis S. Burned Hands. *Plast Reconstr Surg* 1975;56:21.
- (136) Kurtzman L, Stern P. Upper extremity burn contractures. *Hand Clin* 1990;6:261-279.
- (137) Brown M, Chung K. Postburn Contractures of the Hand. *Hand Clin* 2017;33(2):317-331.
- (138) Woolf R, Broadbent T. The four-flap Z-plasty. *Plast Reconstr Surg* 1972;49(1):48-51.
- (139) Bühren V, Keel M, Marzi I. Checkliste Traumatologie: Z-Plastik. Available at: [https://eref.thieme.de/ebooks/1280935#/ebook\\_1280935\\_SL54913476](https://eref.thieme.de/ebooks/1280935#/ebook_1280935_SL54913476). Accessed 03/20 .
- (140) Stern P, Neale H, Graham T, Warden G. Classification and treatment of postburn proximal interphalangeal joint flexion contractures in children. *J Hand Surg* 1987;12A:450-457.
- (141) Milner C, Thirkannad S. Resurfacing glabrous skin defects in the hand: the thenar base donor site. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2014;18(2):89-91.
- (142) Bunyan A, Matter B. Medium thickness plantar skin graft for the management of digital and palmar flexion contractures. *Burns* 2000;26:575-580.

- (143) Iwuagwu F, Wilson D, Bailie F. The use of skin grafts in postburn contracture release: a 10 year review. *Plast Reconstr Surg* 1999;103(1):198-204.
- (144) Bauer B, Vicar I, Richard M. Expanded full-thickness skin grafts in children: case selection, planning, and management. *Plast Reconstr Surg* 1993;92:59-69.
- (145) Sheridan R, Baryza M, Pessina M. Acute hand burns in children: management and long-term outcome based on a 10-year experience with 698 injured hands. *Ann Surg* 1999;229(4):558-564.
- (146) Chen X, Huang T, Nugent N, Shen Y, Qin F. Care of a burned hand and reconstruction of the deformities. In: Herndon DN, editor. *Total burn care*. 4. Auflage ed.: Elsevier; 2012. p. 645-659.
- (147) Huang C, Ogawa R, Hyakusoku H. External wire-frame fixation of digital skin grafts: A non-invasive alternative to the K-wire insertion method. *Burns* 2014;40(5):981-986.
- (148) Sungur N, Ulusoy M, Boyacgil S, Ortaparmak H, Akyüz M, Ortak T, et al. Kirschner-wire fixation for postburn flexion contracture deformity and consequences on articular surface. *Ann Plast Surg* 2006;56:128-132.
- (149) Moon J, Kihm C, Perez D, Dowling L, Alder D. Digital arthodesis: current fixation techniques. *Clin Podiatr Med Surg* 2011;28:769-783.
- (150) Gulgonen A, Ozer K. The Correction of Postburn Contractures of the Second Through Fourth Web Space. *J Hand Surg* 2007;32A:556-564.
- (151) Fufa D, Chuang S, Yang J. Postburn Contractures of the Hand. *J Hand Surg Am* 2014;39:1869-1876.
- (152) Mabrouk Aboul Wafa A. Hourglass Dorsal Metacarpal Island Flap: A New Design for Syndactylized Web Reconstruction. *J Hand Surg* 2008;33A:905-908.
- (153) Richards W, Vergara E, Dalaly D, Coady-Fariborzian L, Mazingo D. Acute Surgical Management of Hand Burns. *J Hand Surg Am* 2014;39(10):2075-2085.

- (154) Lin S, Chang J, Chen P, Mao H. Hand function measures for burn patients: A literature review. *Burns* 2013;39:16-23.
- (155) Falder S, Browne A, Edgar D, Staples E, Fong J, Rea S. Core outcomes for adult burn survivors: a clinical overview. *Burns* 2009;35:618-641.
- (156) Holavanahalli R, Helm P, Gorman A, Kowalske K. Outcomes after deep full-thickness hand burns. *Arch Phys Med Rehabil* 2007;88:30-35.
- (157) Va Zuijlen P, Kreis R, Vloemans A, Groenevelt F, Mackie D. The prognostic factors regarding long-term functional outcome of full-thickness hand burns. *Burns* 1999;25:709-714.
- (158) Tredget E, Shankowski H, Tilley W. Electrical injuries in Canadian burn care: identification of unsolved problems. *Ann NY Acad Sci* 1999;888:75-87.
- (159) Weinstock-Zlotnick G, Torres-Gray D, Segal R. Effects of pressure garment work gloves on hand function in patients with hand burns: a pilot study. *J Hand Ther* 2004;17:368-376.
- (160) O'Brian K, Weinstock-Zlotnick G, Hunter H, Yurt R. Comparison of positive pressure gloves on hand function in adults with burns. *J Burn Care Res* 2006;27:339.
- (161) Mathiowetz V. Role of physical performance component evaluations in occupational therapy functional assessment. *Am J Occup Ther* 1993;47:225.
- (162) Desrosiers J, Hebert R, Bravo G, Dutil E. Upper extremity performance test for the elderly (TEMPA): normative data and correlates with sensorimotor parameters. *Arch Phys Med Rehabil* 1995;76:1125-1129.
- (163) Cowan A, Stegink-Jansen C. Rehabilitation of hand burn injuries: Current updates. *Int J Care Injured* 2013;44:391-396.
- (164) Umraw N, Chan Y, Gomez M, Cartotto R, Fish J. Effective hand function assessment after burn injuries. *J Burn Care Rehabil* 2004;25:134-139.