

**Diplomarbeit**

**Die Behandlung von Verbrennungswunden im Kindes-  
und Jugendalter  
im Vergleich zur Therapie bei Erwachsenen**

eingereicht von

**Christian Gallistl**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der gesamten Heilkunde**

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

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde Graz**

**Pädiatrische Intensivstation und Brandverletzteneinheit**

unter der Anleitung von

**Priv.-Doz. Dr. med. univ. Klaus Pfurtscheller**

**Ass. Prof. Dr. Ludwik Branski**

Graz, am 03.12.2020

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

*Graz, am 03.12.2020*

*Christian Gallistl eh.*

## **Vorwort**

Wie die Überschrift dieser Arbeit verrät, handelt es sich um die Darstellung der verschiedenen Behandlungsmethoden bei Brandverletzungen, allerdings wollte ich darüber hinaus ein universales Bild dieser Thematik erstellen, welches vom anatomischen Aufbau der Haut bis zur psychologischen Betreuung nach der Behandlung von Verbrennungswunden reicht.

Nachdem ich mich zum damaligen Zeitpunkt noch nicht auf ein passendes Thema für eine Diplomarbeit festsetzen konnte, fasste ich nach langer Bedenkzeit und gründlicher Überlegung den Entschluss, diese auf der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde zu verfassen. Zwar konnte ich bereits durch eine Pflichtfamulatur an der klinischen Abteilung für Plastische, Ästhetische und Rekonstruktive Chirurgie erste Einblicke in die Komplexität der Versorgung von Brandverletzungen gewinnen, meine endgültige Entscheidung wurde aber erst nach den informativen Übungseinheiten „Verbrennungen und Verbrühungen“ des Moduls 19 des Diplomstudiums Humanmedizin von Priv.-Doz. Dr. med. univ. Klaus Pfurtscheller getroffen. Nachdem mein Interesse geweckt wurde, stand für mich bezüglich der Diplomarbeit kein anderes Gebiet mehr zur Debatte. Auch die Lernunterlagen bezüglich dieser Übungseinheiten waren sehr akkurat und edukativ.

Weiters hatte das NAW-Praktikum im Rahmen des Speziellen Studien Moduls „Von der Theorie zur Praxis: Chirurgische Operationslehre“ dazu beigetragen, dem Thema der Verbrennungswunden Beachtung zu schenken, da es hierbei zum Rettungseinsatz bezüglich einer Brandverletzung gekommen ist. Damals kam ich bereits mit ersten Behandlungsmethoden bezüglich dieser Verletzungen in Kontakt, welche später auch in den Lehrveranstaltungen im Rahmen des Moduls 19 abgehandelt wurden.

Nicht zuletzt kam ich im Rahmen meiner Tätigkeit als Zivildienstler an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde immer wieder in Verbindung mit pädiatrischen Patientinnen und Patienten und deren Anamnese, sodass mir erstmals die Bedeutsamkeit dieses Faches bewusst wurde.

## **Danksagungen**

Ich möchte mich hierbei bei allen Menschen bedanken, die mich während meines Studiums unterstützt, begleitet und das Gelingen dieser Arbeit möglich gemacht haben.

Bei Herrn Priv.-Doz. Dr. med. univ. Klaus Pfurtscheller bedanke ich mich für die Betreuung meiner Diplomarbeit und für die Bereitstellung des Themas. Außerdem möchte ich einen herzlichen Dank aussprechen, dafür dass er jederzeit für Fragen zur Verfügung stand. Bei Herrn Ass. Prof. Dr. Ludwik Branski bedanke ich mich für die Zweitbetreuung meiner Diplomarbeit.

Außerdem bedanke ich mich bei meinen Eltern und bei meinem Bruder, welche mir durch viel Geduld moralisch zur Seite standen.

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Vorwort.....	II
Danksagungen .....	III
Abkürzungen und deren Erklärung.....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	IX
Zusammenfassung .....	X
Abstract.....	XI
1 Einleitung .....	1
1.1 Zielsetzung.....	1
2 Material und Methoden .....	1
3 Ergebnisse.....	2
3.1 Geschichte der Versorgung von Brandwunden .....	2
3.2 Versorgungsstrukturen.....	7
3.3 Allgemeiner Überblick über Verbrennungen bei Erwachsenen und Kindern .....	9
3.4 Mechanismen der Verletzung .....	18
3.5 Anatomischer Aufbau der Haut .....	22
3.6 Pathophysiologie der Verbrennungskrankheit.....	25
3.7 Relevante Faktoren für die Beurteilung von Brandverletzungen .....	28
3.7.1 Spezielle Epidemiologie.....	28
3.7.2 Ausdehnung.....	30
3.7.3 Tiefe.....	33
3.8 Therapieoptionen .....	35
3.8.1 Konservative Wundbehandlungen.....	35
3.8.2 Chirurgische Techniken.....	37
3.9 Intensivtherapie bei Schwerbrandverletzten .....	43
3.9.1 Vorteil einer Brandverletzteneinheit .....	43
3.9.2 Organersatz-Niere.....	44
3.9.3 Organersatz-Lunge .....	47
3.9.4 Intensivbehandlung.....	47
3.10 Komplikationen.....	49

3.11	Spezielle Kapitel .....	54
3.11.1	Schmerztherapie .....	54
3.11.2	Spezielle chirurgische Techniken .....	55
3.11.3	Vollhautinterponate .....	55
3.11.4	Gewebeexpansion .....	56
3.11.5	Hydrotherapie .....	56
3.12	Narben .....	57
3.13	Interdisziplinäre Behandlung Brandverletzter .....	60
4	Diskussion .....	63
5	Literaturverzeichnis .....	70

## Abkürzungen und deren Erklärung

ARDS	acute respiratory distress syndrome
BSA	Body Surface Area
BRFSS	Behavioral Risk Factor Surveillance System
cm	Zentimeter
ECMO	extrakorporale Membranoxygenierung
FiO <sub>2</sub>	inspiratorische Sauerstofffraktion
h	Stunde
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht
KOF	Körperoberfläche
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
ml	Milliliter
NaCl	Natriumchlorid
PDGF	Platelet-derived growth factor
PEEP	positive endexpiratory pressure
SIRS	Systemisches inflammatorisches Response-Syndrom
St.p.	Status post
TBSA	Total Body Surface Area
Verbrennung 1. Grades	Verbrennung der Epidermis/ erstgradige Verbrennung
Verbrennung 2. Grades	Verbrennung von oberflächlich und tief dermalen Strukturen/ zweitgradige Verbrennung
Verbrennung Grad 2a	oberflächlich dermale Verbrennung

Verbrennung Grad 2b	tief dermale Verbrennung
Verbrennung 3. Grades	ganz dermale Verbrennung/ drittgradige Verbrennung
Verbrennung 4. Grades	Verkohlung/ viertgradige Verbrennung
VKO	verbrannte Körperoberfläche
°C	Grad Celsius
/	pro
%	Prozent
<	kleiner
>	größer

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geschlechtsverteilung thermischer Verletzungen im Erwachsenenalter in Österreich im Jahr 2018 [35] .....	9
Abbildung 2: Fettverbrühung vom Grad 2b mit weißlichem Wundgrund [46] .....	12
Abbildung 3: Verbrühung unterschiedlicher Tiefe der Schulter und Brust eines Kindes durch verschütteten, heißen Tee. S= Verbrennung Grad 2a, I= Verbrennung Grad 2b, D= Verbrennung 3. Grades [47].....	13
Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung thermischer Verletzungen bei Kindern und Erwachsenen in Österreich im Jahr 2018 [35].....	16
Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung thermischer Verletzungen im Kindes- und Jugendalter in Österreich im Jahr 2018 [35].....	17
Abbildung 6: Geschlechtsverteilung bei thermischen Verletzungen im Kindes- und Jugendalter in Österreich im Jahr 2018 [35] .....	17
Abbildung 7: Histologischer Aufbau der Haut [68] .....	25
Abbildung 8: Neunerregel nach Wallace für Erwachsene und Kinder [79].....	31
Abbildung 9: Berechnetes Ausmaß der Brandverletzungen mittels BurnCase 3D [87] .....	33
Abbildung 10: Verbrennungsgrade in Bezug auf die Hautschichten [89].....	34
Abbildung 11: Gemeshes Spalthaut-Transplantat an Handrücken und Unterarm [98].....	39
Abbildung 12: Wunddeckung unter Verwendung von Meek-Grafts [101].....	41
Abbildung 13: Wunddeckung des Musculus biceps brachii mittels Spalthaut (links), Matriderm® und Spalthaut (Mitte), Integra® und Spalthaut (rechts) [108] .....	43
Abbildung 14: Vier Patientinnen- und Patientenfälle, welche das Anfangsstadium des geschädigten Gewebes und das Endresultat nach dreiwöchiger Hydrotherapie repräsentieren [143].....	57

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Hauptunterschiede zwischen epidermaler und dermaler Hautschicht [65] .....	23
Tabelle 2: Kriterien zum Transfer in ein Brandverletzenzentrum [46] .....	30

## Zusammenfassung

Die Therapie von Brandverletzungen im Kindes- und Jugendalter spielt in der Intensivmedizin nach wie vor eine besonders große Rolle, stellen doch Verbrennungswunden ein massives epidemiologisches Problem im Gesundheitssystem dar, welches mit hoher Morbidität assoziiert ist. Es fließen dabei viele unterschiedliche Pathomechanismen zusammen, die letzten Endes das Bild der Verbrennungskrankheit entstehen lassen. Brandverletzungen gehen mit gravierenden Komplikationen, wie beispielsweise Multiorganversagen sowie Sepsis, einher. Demnach erfordern diese Verletzungsmuster eine sofortige intensivmedizinische und chirurgische Behandlung.

Die Intention dieser Übersichtsarbeit besteht darin, die unterschiedlichen Möglichkeiten der Therapie von Brandopfern zu untersuchen und dabei herauszufinden, ob signifikante Unterschiede hinsichtlich der Behandlung von Kindern und Erwachsenen bestehen. Ebenso wird ein großes Augenmerk auf die Morbiditäts- und Mortalitätsrate von Kindern und Erwachsenen gelegt, wofür neben einer Literaturrecherche auch eine Auswertung von Daten der Statistik Austria aus dem Jahr 2018 durchgeführt wurde.

Kinder differenzieren sich nicht nur durch ihre dünnere Hautschicht von Erwachsenen, sondern weisen auch ein größeres Verhältnis von Körperoberfläche zu Masse auf. Demnach können Berechnungsmethoden für die verbrannte Körperoberfläche von Erwachsenen nur modifiziert bei pädiatrischen Patientinnen und Patienten angewandt werden. Der Umfang der verbrannten Körperoberfläche ist ausschlaggebend für die weiterfolgende Behandlungsprozedur. Die Formeln für den Flüssigkeitsersatz bei erwachsenen Brandopfern unterscheiden sich ebenfalls von jenen, die bei Kindern verwendet werden. Würde man bei Kindern dieselben Formeln wie für das Erwachsenenalter verwenden, hätte dies Unter- und Übertherapien zufolge.

Sofern die Tiefe von Verbrühungen bei Kindern noch nicht den dritten Grad erreicht hat, lassen sich diese mehrheitlich konservativ behandeln. Demgegenüber steht die chirurgische Exzision bei tiefergelegenen Brandverletzungen.

Erwachsene stellen durch ihre größere Körperoberfläche auch ein größeres Spenderareal für die Entnahme von Spalt- oder Vollhautinterponaten zur Verfügung, grundsätzlich lassen sich jedoch sämtliche Operationsmethoden für die Wunddeckung der Brandverletzungen bei Erwachsenen auch bei Kindern anwenden.

## **Abstract**

The management of burn injuries in children and adults plays a very important role in intensive care medicine because burn wounds represent a huge epidemiological problem in the health system, which is associated with high morbidity. Various pathomechanisms determine the image of the burn disease. Multiple organ failure and sepsis are complications that are associated with burn wounds, so immediate intensive care and surgical treatment is urgent.

The goal of this review is to inspect the various treatment options for people with burn injuries and to explore whether there are important diversities between the therapy of children and grown-ups. Special attention is paid to the morbidity and mortality rate of children and adults, for which, in addition to a literature search, an evaluation of data from Statistik Austria from 2018 was assessed.

Children separate themselves from grown-ups through their thinner skin layer but their body surface area to mass ratio is bigger as well. Methods for the calculation of the burned body surface area for adults must be modified to be used for children. The ensuing treatment procedure depends on the extent of the burned body surface and the formulas for fluid resuscitation in adult burn victims distinguish from those used in children. The results for children after using formulas for adults would represent too much or too little fluid replacement.

As long as the depth of scalds in children has not reached the third degree yet, most of them can be treated conservatively. On the other hand surgical excision must be performed for deeper burn wounds.

Adults provide a larger donor site area for the removal of split- or full-thickness skin grafts, but principally all surgical procedures for covering burn wounds that can be used in adults can be used in children as well.

# **1 Einleitung**

## **1.1 Zielsetzung**

Bei dieser Diplomarbeit handelt es sich um ein Review, also eine Literaturrecherche. Sie umfasst die wichtigsten Aspekte der Behandlung von Brandverletzungen im Kindes- und Jugendalter und versucht dabei eine Korrelation zur Therapie bei Erwachsenen zu erstellen. Dabei wird nicht zu sehr auf jedes Detail der Verbrennungskrankheit eingegangen, sondern vielmehr eine allumfassende Illustration dieses Themas erarbeitet, welche unter anderem Ätiologie, Determination und Pathophysiologie betrifft. Mithilfe der Ermittlung von Fachliteratur und durch Auswertung von Daten der Statistik Austria aus dem Jahr 2018 bezüglich dieser Thematik wird versucht, einen Überblick über die Therapie von Verbrennungswunden zu schaffen und dadurch ein besseres Verständnis zu vermitteln.

## **2 Material und Methoden**

Nachdem es sich bei dieser Abschlussarbeit um ein Review handelt, beruht diese auf der Untersuchung und Recherche von Fachliteratur, die bezüglich der Fragestellung und Thematik verglichen wird sowie der Auswertung von Daten der Statistik Austria aus dem Jahr 2018. Da die Arbeit Aspekte der Geschichte bis zu den Zukunftsaussichten der Therapie von thermischen Verletzungen umfasst, reichen die Zitate der verwendeten Literatur vom Jahr 1944 bis in das Jahr 2020. Unter Zuhilfenahme der Datenbanken Pubmed und Google Scholar wurden hauptsächlich englischsprachige Artikel recherchiert, des Weiteren kamen Fachbücher in englischer und deutscher Sprache zum Einsatz sowie deutsche Fachliteratur. Des Öfteren wurde mit den Literaturangaben weitergearbeitet, die in den Fachbüchern vermerkt waren. Teilweise wurden Fachbücher der Medizinischen Universität Graz entliehen, der Großteil wurde käuflich erworben. Google Scholar kam seltener zum Einsatz als Pubmed.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Geschichte der Versorgung von Brandwunden**

Die größten Meilensteine in der Versorgung von Brandwunden entstanden in den Jahren zwischen 1942 und 1952. Zu dieser Zeit führten Schock, Sepsis und Multiorganversagen bei Kindern, deren Brandverletzungen 50% ihrer Total Body Surface Area betrafen, zu einer Mortalitätsrate von 50% [1].

Mittlerweile können beinahe 100% der verbrannten Kinder überleben. Sichere Kontrolle von septischer und respiratorischer Aggravation, souveräne Primärversorgung, unmittelbare Exzision der Wunden sowie Hautdeckung wie auch die Therapie des Hypermetabolismus tragen dazu bei [2].

Die Grundlage der heutigen Flüssigkeits- und Elektrolyttherapie basiert auf den Forschungsarbeiten des Professors für Pharmakologie und Toxikologie Frank P. Underhill, welcher erkannte, dass die Zusammensetzung der Flüssigkeit in Brandblasen derjenigen im Plasma gleicht. Er bewies, dass Verbrennungsoffer nicht wie zuvor vermutet aufgrund von Toxinen verstarben, sondern wegen des Flüssigkeitsverlustes. Im Jahre 1944 wurden von Lund und Browder verbrannte Hautareale beurteilt sowie Diagramme diesbezüglich erstellt, wodurch Ärztinnen und Ärzte die verbrannten Hautareale vereinfacht darstellen konnten. Die Prozentangaben der Total Body Surface Area ließen sich dadurch quantitativ ableiten. Somit entstanden die Strategien der Flüssigkeitstherapie in Bezug auf die verbrannten Hautareale [3].

Die Wertigkeit einer multidisziplinären Teamarbeit bei der Therapie von Brandverletzungen bewies Dr. Truman G. Blocker Jr. und setzte sein Team für die Behandlung der Opfer der Texas-City-Explosion im Jahre 1947 ein, die bis heute als katastrophalster Industrieunfall der amerikanischen Geschichte gilt. Auf dem Gebiet der Verbrennungsmedizin galt er als Pionier und behandelte Kinder, indem er deren Brandwunden desinfizierte, untersuchte und anschließend die Kinder mit ausreichend Nährstoffen versorgte. Sein Engagement für die Behandlung brandverletzter Kinder führte 1962 zur Gründung des ersten Brandverletzententrums für Kinder in Galveston, Texas, ermöglicht durch die Shriners of North America [4].

Die neueste Errungenschaft in der Behandlung größerer Verbrennungswunden war eine Verbesserung der damit einhergehenden verringerten Lungenfunktion.

Rauchgasintoxikation und Pneumonie in Kombination mit fortgeschrittenem Alter und Größe der Brandverletzung erhöhten die Mortalität von Verbrennungsoffern massiv, wie Shirani, Pruitt und Mason berichteten [5].

Die Erkenntnis, dass die behandelnde Ärztin beziehungsweise der behandelnde Arzt keinen unzureichenden Flüssigkeitserersatz bei Verbrennungsoffern mit Inhalationstrauma applizieren soll, wurde von Navar et al. und Herndon et al. betont [6, 7].

In den ersten 24 Stunden nach dem Verbrennungsunfall benötigt eine Patientin oder ein Patient mit größerem Inhalationstrauma 2 ml Flüssigkeit/kg/% verbrannter Körperoberfläche zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Urinausscheidung sowie Organdurchblutung. Um die Inzidenz des Barotraumas zu verringern, befürworten multizentrische Studien, die sich auf erwachsene Patientinnen und Patienten mit Atemwegserkrankungen beziehen, respiratorische Unterstützung mit niedrigem Spitzendruck.

Die Einstellung des Atemzugvolumens auf 6-8 ml/kg mit einem positiven endexpiratorischen Druck von 7,5 mmHg und Spitzendrücken auf einem Minimum, um den  $pCO_2 < 60$  und den  $pH < 7,25$  zu halten, zählt heutzutage zur Standardtherapie bei Patientinnen und Patienten mit Rauchgasintoxikation. Cioffi [8] und Cortiella et al. [9] plädierten für den Einsatz der hochfrequenten Oszillationsbeatmung, welche den Vorteil hatte, dass durch die Druckbeatmung bei niedrigen Atemzugvolumina eine Oszillation entstand, welche eingedicktes Sputum nach proximal aus den Atemwegen beförderte. Des Weiteren konnte durch den Einsatz von N-Acetylcystein, Heparin und Bronchodilatoren zumindest die Mortalitätsrate bei pädiatrischen Patientinnen und Patienten gesenkt werden [10, 11].

Bezüglich Inhalationstraumata wurde auch die verbesserte Oxygenierung und Beatmung infolge der Lagerung der Patientinnen und Patienten in Bauchlage bewiesen. Dabei konnte während der PEEP-Titration eine gleichmäßige Verteilung der Ventilation in beatmungsabhängigen sowie beatmungsunabhängigen Lungenarealen mithilfe der Elektrischen Impedanz-Tomographie dargestellt werden, sofern sich die zu untersuchenden Personen in Bauchlage befanden. Es existieren nicht-invasive Maßnahmen, um den idealen und individuellen PEEP zur Öffnung und Offenhaltung kollabierter Alveolen zu bestimmen und ohne die Lunge zu überblähen. Es wurde bestätigt, dass der alveoläre Totraum dem Lungenshunt entspricht, welcher durch Lungenüberblähung oder Atelektasen

hervorgerufen wurde. Um den idealen PEEP beim akuten Atemnotsyndrom zu bestimmen, kann die Erfassung der dynamischen Compliance und des alveolären Totraumes mithilfe der Kapnographie beitragen sowie die Veranschaulichung der Ventilation mittels Elektrischer Impedanz-Tomographie [12].

Eine weitere Errungenschaft in der Versorgung von Brandverletzungen war die Infektionstherapie, wodurch die Mortalitätsrate gesenkt werden konnte. 60-80% aller Patientinnen und Patienten, deren Körperoberfläche mehr als 50% verbrannt war, verstarben in den Jahren 1966 bis 1975 an einer bakteriellen Sepsis. Dank der Einführung von antimikrobiellen Substanzen konnte die Anzahl der Sepsis-Erkrankungen, welche durch Verbrennungswunden hervorgerufen wurden, gesenkt werden. Ebenso wurde die Sepsis-Rate durch frühe Exzision und Wundabdeckung verringert. Im Jahre 1965 schlug Carl Moyer die Verwendung von 0,5% Silbernitrat als wirkungsvolle, antimikrobielle Substanz vor. Ebenso empfahl er den Einsatz kristalloider Lösungen und gehörte zu den Ersten, welche hypertone Salzlösungen testeten [13].

In Deutschland wurde ein Mittel namens Mafenidacetat, auch bekannt als Sulfamylon, in der Behandlung von offenen Wunden im Zweiten Weltkrieg eingesetzt. Diese Therapie wurde von dem Mikrobiologen Robert Lindberg in Zusammenarbeit mit John Moncrief am Institute of Surgical Research in San Antonio für die Behandlung von Verbrennungswunden übernommen [14].

Bei Verbrennungen dritten Grades wirkt dieses Antibiotikum, ebenso konnte eine besonders effektive Wirkung in der Behandlung von Sepsis beobachtet werden. In New York entwickelte Charles Fox zur selben Zeit Silbersulfadiazin (Silvadene). Dieses war beinahe genauso wirkungsvoll und bewirkte eine geringere Anzahl an Komplikationen als Sulfamylon. Allerdings konnte Sulfamylon, verglichen mit Silvadene, effektiver den Wundschorf durchdringen. Jedoch handelt es sich bei Sulfamylon um einen Carboanhydrasehemmer, der eine metabolische Azidose bewirkt mit kompensatorischer Hyperventilation. Weiters kann es zur Entstehung eines Lungenödems kommen. Silbersulfadiazin wurde wegen des Erfolges in der Behandlung von Infektionen bei Verbrennungswunden und der geringen Nebenwirkungsrate zur tragenden Säule der topischen, antimikrobiellen Behandlung. Auch Candida-Infektionen ließen sich durch den Einsatz von Silvadene in Kombination mit Nystatin therapieren [15].

Als wasserlösliche Salbe kommt 0,2% Nitrofurazol zur Anwendung. Die Substanz zeichnet sich durch die In-Vitro-Aktivität gegen eine Vielzahl von pathogenen Erregern bei Verbrennungswunden aus, darunter auch Staphylokokken. Allerdings bleibt eine erhebliche Wirkung gegen Pseudomonaden aus. Weiters können schwere kutane Arzneimittelreaktionen auftreten. Bei der Therapie von invasiven Infektionen der Brandwunden, die durch *Enterobacter cloacae* ausgelöst werden, kann diese Substanz wirkungsvoll sein [16].

Die rasche Exzision der Wunden und deren Abdeckung entwickelten sich zunehmend als Therapiestandard für Brandverletzungen. Als Zielsetzung steht dabei der Wundverschluss unter Verwendung von Spalthauttransplantaten. Für die vorübergehende Versorgung von schweren Brandverletzungen ist Spenderhaut in Form von Allografts oder Homografts unerlässlich [17].

Obwohl bereits im 17. Jahrhundert Hauttransplantationen beschrieben wurden, bedeutete 1949 die Gründung der US Navy Skin Bank in Bethesda, Maryland, die Entstehung der modernen Hautbank [18].

In den 1960er Jahren arbeitete Zora Janžekovič alleine in Jugoslawien und entwickelte durch tangentielle Nekrektomie mit einem einfachen Rasiermesser eine Technik, um tiefe Verbrennungswunden 2. Grades zu behandeln. 2615 Patientinnen und Patienten mit tiefen, zweitgradigen Verbrennungen wurden von ihr mittels tangentialer Nekrektomie zwischen dem 3. und 5. Tag nach dem Verbrennungsunfall therapiert. In etwa einer Woche nach der Verletzung konnten die Patientinnen und Patienten zurück an ihren Arbeitsplatz kehren, nachdem Janžekovič die exzidierten Wunden mit Autografts abdeckte [19].

Dr. John Burke, der am Massachusetts General Hospital in Boston arbeitete, beschrieb die Überlebensraten bei Kindern mit Brandverletzungen über 80% ihrer verbrannten Körperoberfläche als unvergleichlich, sofern zuvor eine großflächige Wundexzision auf der Ebene der Muskelfaszie durchgeführt wurde [20].

Die frühzeitige Wundexzision von Verbrennungswunden wandte er in den frühen 1970er und 1980er Jahren an, indem er die tangentielle Nekrektomie (Technik nach Janžekovič) für Wunden geringer Größe und die Wundexzision auf der Ebene der Muskelfaszie für großflächige Brandverletzungen durchführte. Er bewies, dass die Aufenthaltsdauer in den Krankenhäusern wie auch die Mortalitätsrate von Patientinnen und Patienten

schwerwiegender Brandverletzungen herabgesetzt wurde. Die tangentielle Nekrektomie wurde mit der konservativen Therapie bei Verbrennungswunden unbestimmten Grades von Lauren Engrav et al. verglichen [21].

Bei tiefen Verbrennungen 2. Grades, welche weniger als 20% der verbrannten Körperoberfläche betrafen, zeigte deren 1983 durchgeführte, randomisierte prospektive Studie, dass die betroffenen Patientinnen und Patienten früher an den gewohnten Arbeitsplatz zurückkehren konnten. Außerdem wurde die hypertrophe Narbenbildung reduziert und der stationäre Aufenthalt verkürzt. Eine Verringerung der Mortalitätsrate konnten Herndon et al. bei erwachsenen Verbrennungsoptionen mit Verbrennungen 3. Grades beweisen, nachdem diese mit rascher Wundexzision der Brandverletzung versorgt wurden, anstatt konservativ behandelt zu werden [22].

Herndon et al. bestätigten, dass Kinder mit schwerwiegenden Verbrennungswunden, deren Körperoberfläche zu 95% verbrannt war, zur damaligen Zeit eine Überlebensrate von 50% aufwiesen, nachdem die Wunden frühzeitig exzidiert wurden [23].

In Bezug auf die parenterale Ernährung belegten Herndon et al., dass diese sowohl die Mortalitätsrate als auch die Immunschwäche erhöhte. Demnach empfahl er die kontinuierliche enterale Ernährung hinsichtlich Verbrennungswunden [24].

In Graz musste 1987 ein Kind mit schwerwiegenden Verbrennungswunden mit dem Rettungshubschrauber nach Laibach geflogen werden, weil es in Österreich noch nicht angemessen versorgt werden konnte. Dies war der Beweggrund für die Gründung der Kinderbrandverletzteneinheit am 4. Mai 1987 an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde des LKH Graz. Eine spezielle Abteilung für die Behandlung von Verbrennungswunden war zum damaligen Zeitpunkt nicht vorhanden. Von nun an konnten Kinder mit Verbrennungswunden eine angemessene Behandlung in dafür eingerichteten Räumlichkeiten erhalten. In ganz Österreich gilt diese Einrichtung bis heute als einmalig. Pro Jahr werden hier in etwa 50 pädiatrische Patientinnen und Patienten stationär behandelt und rund 200 ambulant versorgt. In der Zeit von 1980 bis 1984, vor Gründung der Brandverletzteneinheit für Kinder in Graz, verstarben 70% der Kinder, welche mehr als 30% VKO aufwiesen. Seitdem die Kinderbrandverletzteneinheit gegründet wurde, wurden 2000 pädiatrische Patientinnen und Patienten stationär therapiert. In den vergangenen 28 Jahren verstarben lediglich vier [25].

### 3.2 Versorgungsstrukturen

Trotz der ständigen Fortschritte auf dem Gebiet der Versorgung von Brandverletzungen handelt es sich bei Verbrennungswunden weiterhin um eine nennenswerte Ursache von Traumata der pädiatrischen Patientinnen und Patienten, welcher große Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Grazer Studien zeigen eindeutig unveränderte Zahlen angesichts des prozentualen Ausmaßes der verbrannten Hautoberfläche oder Inzidenzdichte bezüglich der Aufnahmen brandverletzter Kinder. Weiters wurde eine verringerte Aufenthaltsdauer im Krankenhaus und eine niedrige Mortalitätsrate aufgezeigt [26].

In Entwicklungsländern und low income countries treten Brandverletzungen vermehrt auf. Durch die beachtlichen Fortschritte der Therapie von Verbrennungswunden der vergangenen Jahrzehnte hätten die Inzidenzrate und der Schweregrad der Brandunfälle in diesen Ländern reduziert werden müssen [27].

High income countries bieten durch die Ausstattung von kostspieligen Zentren für Brandverletzte hervorragende Versorgungsmöglichkeiten für die Therapie von Verbrennungswunden. Ein Privileg, das die meisten low und middle income countries nicht haben [28].

Damit auch diese Länder eine zufriedenstellende Bilanz hinsichtlich der Therapie von Brandverletzungen erhalten können, benötigen diese ausreichend ausgestattete Operationsräumlichkeiten, eine angemessene Administration der Krankenhäuser, grundlegende chirurgische Techniken, Fachwissen wie auch einsatzfähige Ärztinnen und Ärzte, Pflegepersonal sowie Therapeutinnen und Therapeuten. Es besteht die Notwendigkeit, das Know-how über Prophylaxe, Therapie, Rehabilitation und Recherche zu verbessern. Um regionale Brandverletzteneinheiten in low und middle income countries zu gründen, ist in Anbetracht der hohen Kosten für diese Zentren wie auch der Ausstattung sowie dem Defizit an qualifiziertem Personal und finanziellen Ressourcen Unterstützung von Hilfsorganisationen anderer Länder nötig. Besonders hinsichtlich schwerwiegender Brandkatastrophen muss ausdrücklich auf diese Einrichtungen zurückgegriffen werden können [29, 30].

In Hinblick auf Brandunfälle weisen Kinder mit zunehmendem Alter eine geringere Mortalitätsrate auf. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die Weiterentwicklung ihres Organ- und Immunsystems zurückzuführen. Bei Seniorinnen und Senioren hingegen steigt mit

Zunahme des Alters auch die Mortalitätsrate. Ergebnisse bei Erwachsenen weisen einige Ungenauigkeiten auf, weil diese Altersgruppe von 18-60-Jährigen ein hohes Ausmaß an Patientinnen und Patienten inkludiert, was die Resultate der Gruppen von Kindern (Altersgruppe <18 Jahre) und Seniorinnen und Senioren (Altersgruppe >60 Jahre) in den Hintergrund rücken lässt [31].

Es wurde bewiesen, dass kardiovaskuläre, pulmonale, renale, hepatische und neurologische Erkrankungen eine bedeutende Auswirkung auf die Dauer des Krankenhausaufenthaltes sowie der Mortalität hatten, Komorbiditäten somit einen determinierenden Faktor angesichts der Sterblichkeitsrate von Erwachsenen darstellten. Je mehr Komorbiditäten ein Brandopfer aufwies, desto länger war der Krankenhausaufenthalt und desto größer war die Mortalitätsrate [32].

Eine Übersichtsarbeit, die 103 Kinder mit  $\geq 80\%$  verbrannter Körperoberfläche über einen Zeitraum von 15 Jahren inkludierte, zeigte eine Mortalitätsrate von 33% und 69 Überlebenden. Betrug die verbrannte Körperoberfläche mehr als 95% und waren die Kinder jünger als 2 Jahre, war die Mortalitätsrate am höchsten. Die Dauer, bis ein intravenöser Zugang gelegt werden konnte, war ein weiterer bedeutungsvoller Anhaltspunkt. Brandopfer, die innerhalb der ersten Stunde eine Flüssigkeitstherapie erhielten, wiesen eine bedeutend höhere Überlebensrate auf [33]. Zum Zeitpunkt der Aufnahme konnte bei keinem Kind vorhergesagt werden, ob dieses überleben würde, unabhängig von Alter, Art des Inhalationstraumas oder der Größe der Verbrennungswunde. Nachdem Kinder ein größeres Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpergewicht aufweisen, ist der Flüssigkeitsverlust bei ihnen anteilmäßig größer. Die normale Gesamtblutmenge eines Kindes beträgt ungefähr 80 ml/kg Körpergewicht, bei einem Erwachsenen beträgt das normale Blutvolumen 60 ml/kg. Der Flüssigkeitsverlust bei einer verbrannten Körperoberfläche von 20% eines zehnjährigen Kindes beträgt 475 ml oder 60% der Gesamtblutmenge. Verbrennungswunden gleicher Größe verursachen bei einem Erwachsenen mit 70 kg Körpergewicht einen Flüssigkeitsverlust von 1100 ml beziehungsweise 25% des Blutvolumens [34].

Im Jahr 2018 sind in der Steiermark 3 Brandopfer an ihren Verletzungen verstorben, es handelte sich hierbei ausschließlich um Männer ab dem vollendeten 45. Lebensjahr. Nach der Versorgung der thermischen Verletzungen konnten 119 erwachsene Patientinnen und Patienten mit Brandverletzungen in der Steiermark entlassen werden. In ganz Österreich

erlitten 576 Männer (67%) und 282 Frauen (33%) thermische Verletzungen, die in Krankenhäusern versorgt werden mussten. Im Jahr 2018 sind in Österreich insgesamt 18 Personen an den Folgen von thermischen Verletzungen verstorben. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, war ein deutliches Überwiegen des männlichen Geschlechts hinsichtlich thermischer Verletzungen im Jahr 2018 zu verzeichnen [35].

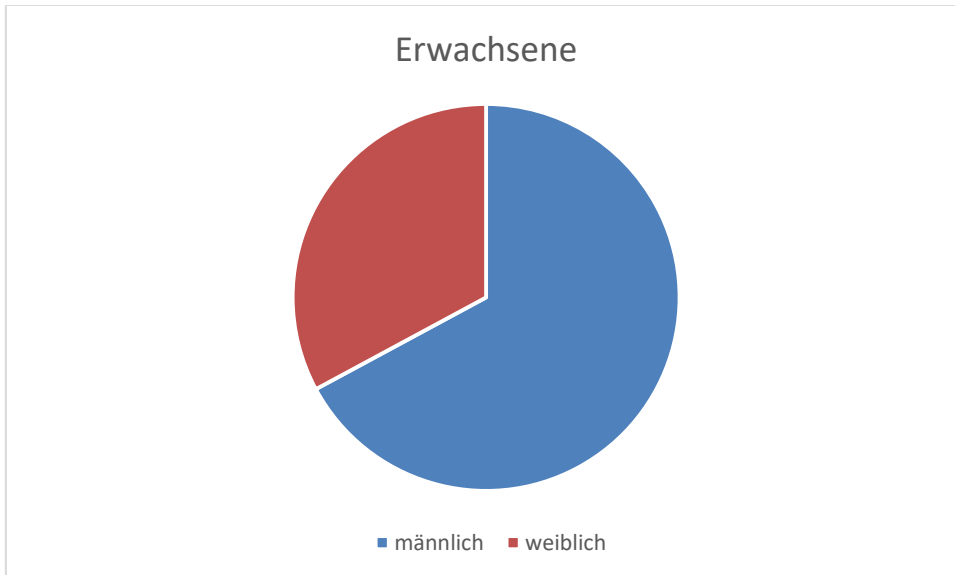


Abbildung 1: Geschlechtsverteilung thermischer Verletzungen im Erwachsenenalter in Österreich im Jahr 2018 [35]

### 3.3 Allgemeiner Überblick über Verbrennungen bei Erwachsenen und Kindern

Die Mortalitätsrate bezüglich Haus- und Wohnungsbrände wird wesentlich von der territorialen Lage beeinflusst. Dies ist wahrscheinlich auf die örtlichen Abweichungen der Baukonstruktionen und Heizgerätschaften sowie der wirtschaftlichen Lage zurückzuführen. Im Osten der Vereinigten Staaten von Amerika, genaugenommen im Südosten, kommen Haus- und Wohnungsbrände mit letalem Ausgang häufiger vor als im Westen der USA. Einer von zehn Todesfällen durch einen Haus- oder Wohnungsbrand ist auf das Experimentieren mit Streichhölzern, Feuerzeugen oder anderer Zündvorrichtungen zurückzuführen [36].

Mortalitätsraten bei Haus- und Wohnungsbränden zeigen geringgradige Unterschiede in Bezug auf das Geschlecht, abgesehen von der Altersgruppe der zwei-bis fünfjährigen Buben, die eine erhöhte Inzidenzrate aufweisen. Diese Altersgruppe zeigt auch die höchste

Rate an Brandunfällen ohne letalem Ausgang durch das unbeaufsichtigte Spielen mit Streichhölzern auf [37].

Bei Kindern unter zehn Jahren zählt das Spielen mit dem Feuer zur Haupttodesursache betreffend Haus- und Wohnungsbrände. Für gewöhnlich ist dabei das Rauchen für einen von vier Todesfällen bei Haus- und Wohnungsbränden verantwortlich [38].

Die zweithäufigste Ursache von Haus- und Wohnungsbränden mit letalem Ausgang ist die Brandstiftung. Kaputte oder unsachgemäß verwendete Zündvorrichtungen zählen zum dritthäufigsten Auslöser für einen von sechs Todesfällen bei Bränden im Eigenheim oder der Wohnung und sind besonders in Arealen, deren Bewohner ein niedriges Einkommen aufweisen, zu verzeichnen [38].

In den Vereinigten Staaten von Amerika hat sich während der Zeitspanne von 1991 bis 1995 die Mortalitätsrate hinsichtlich Brandunfälle im Haushalt von 1,3 auf 1,1 pro 100000 Einwohnerinnen und Einwohner verringert. Fortschritte in der Bauweise der Häuser, die Benutzung sicherer Gerätschaften und Zündvorrichtungen wie auch der angestiegene Gebrauch von Rauch- und Feuermeldern haben diese Veränderung bewirkt. In mehr als 78% der amerikanischen Haushalte aller 50 Staaten kommt es zum Einsatz von Rauchmeldern laut Daten des BRFSS. Letztendlich hatten 93,6% aller Haushalte der Vereinigten Staaten von Amerika im Jahre 1995 zumindest einen Rauchmelder [39].

Im Gegensatz zu den Todesfällen, die sich auf Brandunfälle beziehen, kann die exakte Anzahl der Verbrennungsverletzungen, die in den Vereinigten Staaten von Amerika auftreten, nicht dokumentiert werden. Es wird von 21 Staaten verlangt, dass die Zahlen über sämtliche Verbrennungswunden erfasst werden, wohingegen zwei Staaten nur die Dokumentation der Zahlen bezüglich Verbrennungen bei Körperverletzung und Brandstiftung erfordern. Eine alleinige Aufzeichnung der Daten im punkto Brandverletzungen, die mehr als 15% VKO aufweisen, wird von sieben Staaten gefordert [40].

Die Daten einer Übersichtsarbeit aus Pennsylvania von 1994 über Entlassungen von Patientinnen und Patienten nach dem Krankenhausaufenthalt belegte, dass 3173 Personen zuvor eine Brandverletzung erlitten. Dies entspricht einer Rate von 263 Brandopfern pro 100000 Einwohnerinnen und Einwohnern [41].

Eine weiße Hautfarbe wiesen 70% der Betroffenen auf und 68% waren männlich. Die Zahlen betreffs Entlassungen aus den Krankenhäusern zeigten drei ausgeprägte Spitzenwerte. Zum einen bei Brandopfern unter fünf Jahren, weiters bei Patientinnen und Patienten von 25 bis 39 Jahren und schließlich bei der Altersgruppe von Betroffenen über 65 Jahre. Bei dunkelhäutigen Menschen wurde auf eine mehr als doppelt so hohe Rate in punkto Entlassungen hingewiesen, wie bei hellhäutigen und bei Männern war sie mehr als doppelt so hoch wie bei Frauen. Es konnten bei 58% der Betroffenen Verbrühungen und erhitztes Material als Ursache der Verbrennungen belegt werden. Bei 34% der Verbrennungen war Feuer der Auslöser, wobei davon 15% der verbrannten Kleidung, 12% den Großbränden und 7% den beaufsichtigten Bränden zugeschrieben wurde. Von den Brandverletzungen bezogen sich 2% auf die Folgen von Körperverletzung und 2% waren selbstverschuldet. Laut Angaben der American Burn Association werden kleinere Gruppen von schätzungsweise 20000 Verbrennungsopfern, welche schwergradige Brandverletzungen erlitten haben, am besten in Brandverletzteneinheiten behandelt [42].

Brandverletzungen größeren Ausmaßes wiesen von diesen Patientinnen und Patienten 42 pro 1 Millionen Einwohnerinnen und Einwohner auf, wohingegen 40 pro 1 Millionen Einwohnerinnen und Einwohner kleinere Brandwunden aufzeigten, allerdings in Kombination mit gravierenden Begleitsymptomen [43].

In den Vereinigten Staaten von Amerika stehen 139 Brandverletzteneinheiten zur Verfügung, wohingegen Kanada mit 17 dieser Einrichtungen ausgestattet ist. Die Zentren für Brandverletzte dieser beiden Länder sind nach den Verhältnissen zur jeweiligen Bevölkerungsdichte aufgeteilt und sind mit 2120 Betten ausgestattet [44].

In den Vereinigten Staaten von Amerika wurden in den Notaufnahmen für Brandverletzungen im Jahr 1997 Schätzungen nach zu urteilen 83000 Kinder im Alter von 14 Jahren oder jünger therapiert. Verbrühungen machten dabei 24000 dieser Wunden aus und 59000 repräsentierten Verbrennungen. Die Kinder im Alter von 4 Jahren und jünger stellten beinahe die gesamte Mortalitätsrate der Kinder in einem Jahr dar, die an den Folgen von Verbrühungen verstarben [45]. In der nachfolgenden Abbildung 2 ist eine Verbrühung des Grades 2b mit weißlichem Wundgrund abgelichtet, welche durch heißes Fett verursacht wurde.



Abbildung 2: Fettverbrühung vom Grad 2b mit weißlichem Wundgrund [46]

Brandwunden in Folge von Verbrühungen machen bei Kindern im Alter von 4 Jahren und jünger 65% aller thermischen Verletzungen aus, die in Krankenhäusern behandelt werden. Kontaktverbrennungen stellen 20% dar und direkte Flammeneinwirkung bezieht sich auf den Restbestand. Heiße Speisen und Flüssigkeiten, vor allem Kaffee, der bei einer Temperatur von 82,2°C serviert und oft in der Küche oder anderen Räumlichkeiten verschüttet wird, stellen den Großteil der Verbrühungen bei Kindern dar. Besonders betroffen sind jene im Alter von 6 Monaten bis 2 Jahren [45].

Die nachfolgende Abbildung 3 verdeutlicht die Heterogenität einer Verbrühung der Schulter und Brust eines Kindes durch verschütteten, heißen Tee. Hierbei sind oberflächlich dermale (S), tief dermale (I) und ganz dermale (D) Verbrennungen zu erkennen.

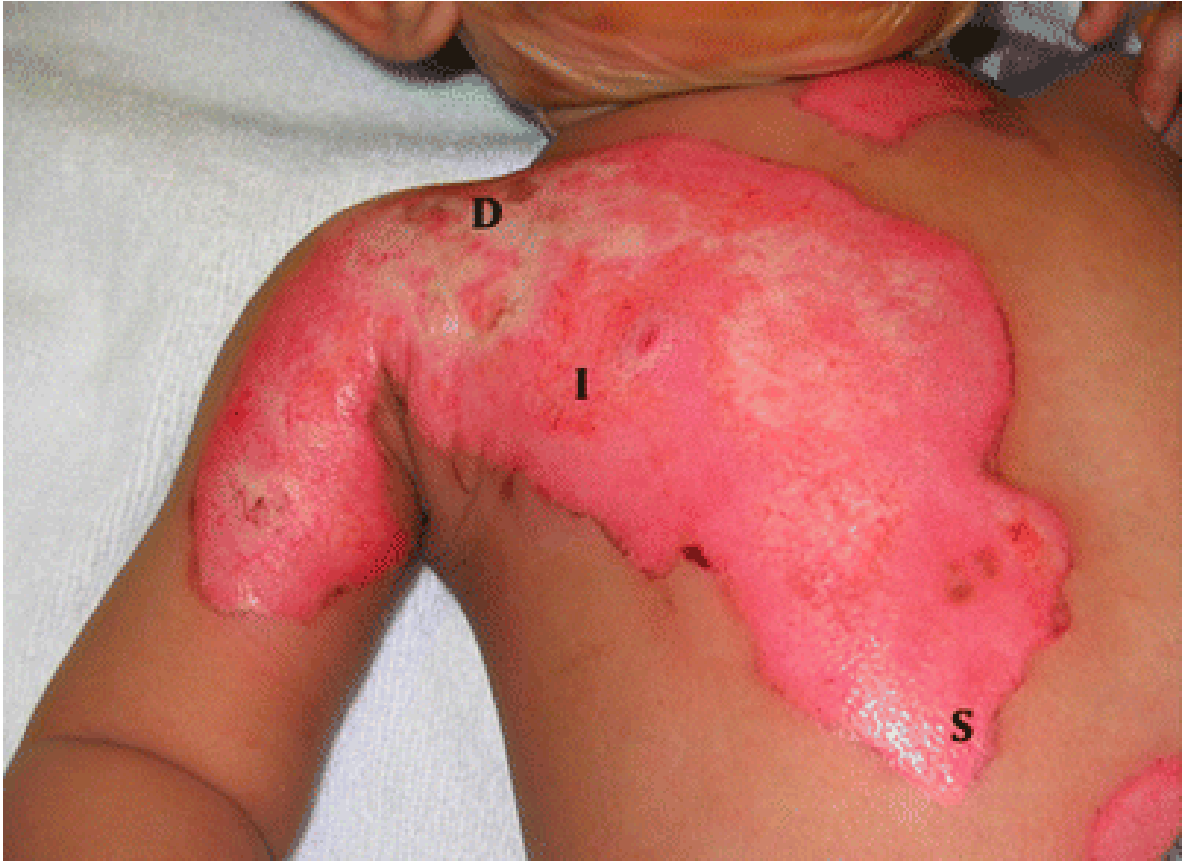


Abbildung 3: Verbrühung unterschiedlicher Tiefe der Schulter und Brust eines Kindes durch verschütteten, heißen Tee. S= Verbrennung Grad 2a, I= Verbrennung Grad 2b, D= Verbrennung 3. Grades [47]

Es wird Verbrühungen durch erhitztes Leitungswasser, die sich üblicherweise im Badezimmer ereignen, auch ein schlimmeres Ausmaß und ein größerer Anteil der betroffenen Körperoberfläche im Vergleich zu Verbrühungen anderer Ursachen zugeschrieben. Diese Art von thermischen Verletzungen erfasst beinahe ein Viertel aller Verbrühungen bei Kindern und geht, verglichen mit anderen erhitzten Flüssigkeiten, als Ursache für Verbrühungen mit einer höheren Mortalitätsrate sowie längeren Aufenthaltsdauer im Krankenhaus einher. Verbrühungen, die durch das Vergießen erhitzter Speisen oder Flüssigkeiten entstehen, machen 95% aller thermischen Verletzungen durch den Gebrauch von Mikrowellenherden aus. Artikelbezogene Brandverletzungen sind bei pädiatrischen Patientinnen und Patienten im Alter von 14 Jahren und jünger überwiegend auf Feuerwerkskörper, Herde und Öfen, Benzin, Bügeleisen, Lockenwickler und Lockenstäbe sowie Heizgeräte zurückzuführen [45].

Strom- und Verlängerungskabel in der Hausgemeinschaft sind bei Kindern bis 12 Jahre annähernd 2 Drittel aller Elektrounfälle zuzuschreiben. Zusätzliche 14% dieser Verletzungen werden aufgrund des Stromflusses durch die Haut beim Berühren der Steckdosen hervorgerufen. Kinder bis zum vollendeten 4. Lebensjahr oder Kinder, welche an einer Behinderung leiden, sind dem höchsten Risiko ausgesetzt, Verletzungen und Tod infolge Verbrennungen zu erleiden, vor allem wenn diese durch Kontaktverbrennungen und Verbrühungen hervorgerufen wurden. Des Weiteren zeigen Buben im Vergleich zu Mädchen ein größeres Verletzungs- und Mortalitätsrisiko angesichts Verbrennungen auf [45].

Die Disposition für Brandverletzungen ist bei übergewichtigen Knaben höher als bei jenen mit normalem Körpergewicht. Eine retrospektive Studie belegte, dass von 372 Kindern, die in einer einzelnen Brandverletzteneinheit von Jänner 1991 bis Juli 1997 aufgenommen wurden, Knaben in der Gesamtheit der Brandopfer übermäßig stark vertreten waren, wenn sie in ihrer Altersgruppe als übergewichtig oder zu groß galten. Knaben, deren Körpergewicht auf der 5. Perzentile oder darunter lag sowie Knaben und Mädchen, deren Körperlänge maximal bis zur 5. Perzentile reichte, waren unter den Verbrennungsoptionen überraschenderweise ebenfalls auffallend stark vertreten, wie dieselbe Studie darlegte. Gewissermaßen sollten letztgenannte Untersuchungsergebnisse die Wirkung von Verwahrlosung und Mangelernährung repräsentieren [48].

Ein zunehmender Teilbereich der Bevölkerung wird von Seniorinnen und Senioren vertreten. Diese Altersgruppe weist, verglichen mit jüngeren Patientinnen und Patienten, neben einer höheren Morbiditäts- und Mortalitätsrate auch ein gesteigertes Risiko auf, Brandverletzungen zu erleiden. Die Daten einer Übersichtsarbeit bezüglich Verbrennungsoptionen, welche in einer Brandverletzteneinheit versorgt wurden, erfasste man in einer Zeitspanne von 7 Jahren. Dabei wurde belegt, dass 221 Personen (11%) der 1557 Aufnahmen mindestens das 59. Lebensjahr vollendet hatten [49]. In dieser Gruppe waren 97 Frauen inkludiert, was einem Prozentsatz von 44% entspricht und den höheren Frauenanteil unter Seniorinnen und Senioren widerspiegelt. Durch Explosionen oder direkte Flammeneinwirkung wurden zwei Drittel der Verbrennungswunden hervorgerufen. Verbrühungen erzeugten 20%, Stromunfälle 6% der Verletzungen, wohingegen 2% durch Chemikalien und 6% durch weitere Ursachen ausgelöst wurden. Das Schlafzimmer und/oder das Wohnzimmer galten mit 41% als die Räumlichkeiten, welche die meisten Brandunfälle zu verzeichnen hatten. Darauf folgten der Arbeitsplatz beziehungsweise

Areale im Freien mit 28% sowie die Küche mit 18%, das Badezimmer mit 8% und der Keller oder die Garage mit 5%. An mindestens einer Vorerkrankung litten 77% der Patientinnen und Patienten. Eine Rauchgasvergiftung konnte bei 64 Seniorinnen und Senioren diagnostiziert werden, Mobilität und Urteilsvermögen waren bei 57% der Patientinnen und Patienten vermindert. Bei der toxikologischen Untersuchung wurden 10% der Brandopfer positiv auf Ethanol getestet. Bei 29% der getesteten Personen konnten andere Pharmaka nachgewiesen werden. Ein geringeres Ausmaß der verbrannten Körperoberfläche, jüngeres Alter, das Ausbleiben einer Rauchgasvergiftung und keinerlei vorbestehende Erkrankungen gingen mit einer erhöhten Überlebensrate einher. Es wurden außerdem 111 80-jährige Verbrennungsoffer im Rahmen einer Übersichtsarbeit untersucht, die von 1983 bis 1993 in einer Brandverletzteneinheit aufgenommen wurden. Dabei wurde belegt, dass Verbrühungen 32% der Verletzungen auslösten, direkte Flammeneinwirkung erzeugte 30%. Weiters war der Kontakt mit erhitzten Gegenständen für 29% der Brandwunden verantwortlich. Das Eintauchen in erhitztes Badewasser bewirkte 7%, Stromunfälle 2% und heißes Öl 1% der thermischen Verletzungen [50].

In einer retrospektiven Studie von Trop et al. wurde die Epidemiologie von brandverletzten Kindern und Jugendlichen beschrieben, die zwischen dem 1. Januar 1988 bis zum 31. Dezember 2012 in der Brandverletzteneinheit der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde therapiert wurden. Die Brandverletzteneinheit in Graz verzeichnete über eine Zeitspanne von 25 Jahren insgesamt 1586 Aufnahmen pädiatrischer Patientinnen und Patienten, welche thermische Verletzungen erlitten. Als Akutaufnahmen wurden 1451 Kinder versorgt, 64 nahm man sekundär auf. Um die Kriterien einer Patientin oder eines Patienten für die Akutaufnahme zu erfüllen, muss man zumindest einen ganzen Tag in der Brandverletzteneinheit versorgt worden sein, was auf 71 Patientinnen und Patientinnen nicht zutraf. Es wurden 930 männliche Brandverletzte der 1451 Kinder und Jugendlichen dokumentiert, was einem Prozentsatz von 64% entspricht und 521 weibliche (36%). Das männliche Geschlecht überwog in allen Altersgruppen. Im Zeitraum von 1998 bis 2012 hat sich die Bevölkerungsgruppe von Kindern und Jugendlichen in der Steiermark verringert. Die Anzahl der Aufnahmen brandverletzter Kinder und Jugendliche hat sich über diesen Zeitraum nicht verändert. Die verringerte Rate an Aufnahmen thermisch verletzter Patientinnen und Patienten auf die Brandverletzteneinheit ist einzig auf die Abnahme der Bevölkerungsdichte von Kindern und Jugendlichen zurückzuführen und ist nicht durch

Präventionsmaßnahmen oder den Wechsel stationärer Behandlungsmethoden hinwärts ambulanter Therapien bedingt [26].

Die gewonnenen Daten der Statistik Austria über das Jahr 2018 beziehen sich auf alle neun Bundesländer der Republik Österreich. Dabei kamen Daten mit dem Stand vom 01.01.2019 zur Verwendung. Im Jahr 2018 erlitten 555 Kinder und 858 Erwachsene thermische Verletzungen, die eine Einweisung ins Krankenhaus erforderten. Im Jahr 2018 wurde die Mehrheit der Brandopfer nach thermischen Verletzungen in Österreich von Erwachsenen repräsentiert, wie Abbildung 4 zu entnehmen ist [35].

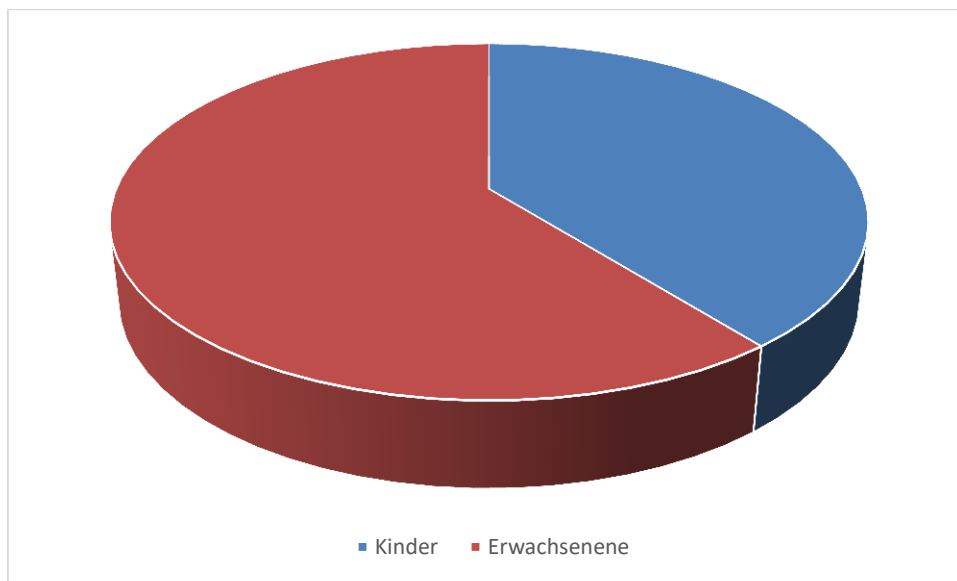


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung thermischer Verletzungen bei Kindern und Erwachsenen in Österreich im Jahr 2018 [35]

Bei 309 Kindern (56%) der Altersgruppe von 1-4 Jahren hatte bezüglich thermischer Verletzungen eine Versorgung im Krankenhaus zu erfolgen, womit diese Altersgruppe am stärksten vertreten war. Die Gruppe der 858 Erwachsenen hingegen teilte sich in 576 Männer (67%) und 282 Frauen (33%) auf, bei denen Verbrennungswunden behandelt werden mussten [35].

In Abbildung 5 ist die Häufigkeitsverteilung von Verletzungen durch Verbrennungen und Verbrühungen im Kindes- und Jugendalter in Österreich im Jahr 2018 aufgeführt.

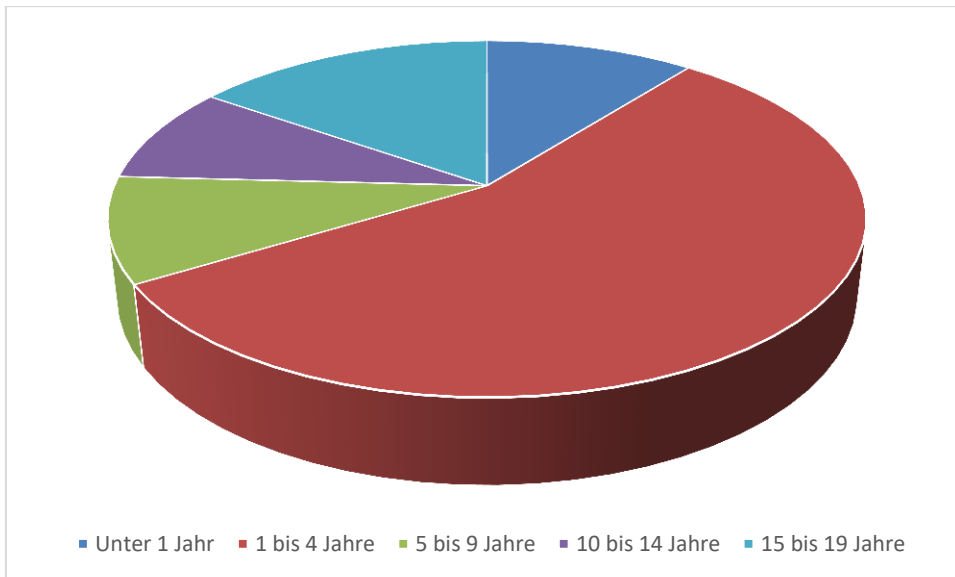


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung thermischer Verletzungen im Kindes- und Jugendalter in Österreich im Jahr 2018 [35]

Sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen war das männliche Geschlecht häufiger von Brandverletzungen betroffen. Unter den 555 Kindern erlitten 340 Buben (61%) und 215 Mädchen (39%) thermische Verletzungen. In der nachfolgenden Abbildung 6 wird das Überwiegen des männlichen Geschlechts bei thermischen Verletzungen im Kindes- und Jugendalter in Österreich im Jahr 2018 dargestellt [35].

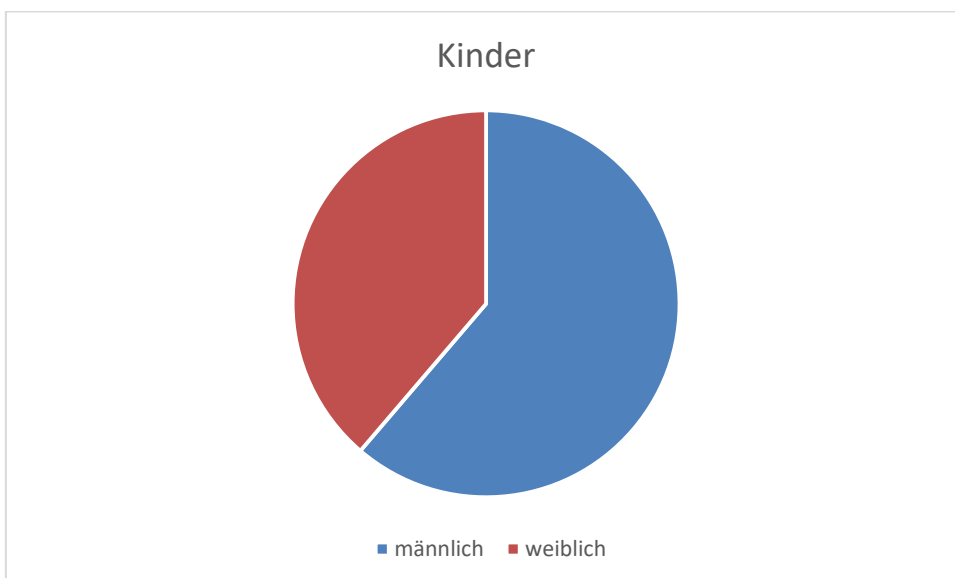


Abbildung 6: Geschlechtsverteilung bei thermischen Verletzungen im Kindes- und Jugendalter in Österreich im Jahr 2018 [35]

### 3.4 Mechanismen der Verletzung

Rund 100 Todesfälle pro Jahr sind in den Vereinigten Staaten von Amerika auf Verbrühungen und den Kontakt mit erhitzten Gegenständen zurückzuführen [36]. Obwohl wenig dokumentierte Todesfälle bezüglich Verbrühungen vorhanden sind, was höchstwahrscheinlich durch die geringe Ausbreitung und Tiefe dieser thermischen Verletzungen bedingt ist, stellen Verbrühungen vor allem bei Kindern vor dem vollendeten 5. Lebensjahr sowie bei Seniorinnen und Senioren einen großen Faktor für Morbidität und damit einhergehenden Kosten für das Gesundheitswesen dar. Für dunkelhäutige Menschen gehen Verbrühungen mit dreifach erhöhten Mortalitätsraten sowie Krankenhausaufenthalten im Vergleich zu Kaukasiern einher, obwohl Todesfälle aufgrund Verbrühungen in der Altersgruppe der 5 bis 64-Jährigen verhältnismäßig selten sind [51].

Die Flammeneinwirkung gilt besonders in der Altersgruppe der Erwachsenen als überwiegender Auslöser für thermische Verletzungen, die in Brandverletzteneinheiten versorgt werden, wenngleich 30% der in Krankenhäusern zu behandelnden Brandopfer Verbrühungen durch erhitzte Flüssigkeiten erleiden [52, 53].

Die meisten Aufnahmen in der Altersgruppe der Teenager und jungen Erwachsenen im Alter von 15-24 Jahren standen mit dem Gebrauch von Kraftfahrzeugen in Verbindung. Als häufigste Ursachen wurden der Hautkontakt mit erhitzten Bestandteilen des Auspuffes und Motors, die Entzündung von Treibstoff infolge eines Zusammenstoßes und Dämpfe des Kühlers genannt [53].

Patientinnen und Patienten erlitten während dem Bedienen eines Fahrzeuges Verbrennungen, welche mehr als 30% ihrer gesamten Körperoberfläche betrafen. Insbesondere Frakturen und andere mechanisch bedingte Traumata wurden mit diesem Verletzungsmechanismus in Verbindung gebracht, wohingegen sich Brandverletzungen im Zuge einfacher Wartungsarbeiten auf Areale von weniger als 30% der gesamten Körperoberfläche erstreckten [54].

Flammeneinwirkung auf Kleidung wird in allen Altersgruppen als der zweithäufigste Grund für Aufnahmen in ein Zentrum für Brandverletzte dokumentiert. Darüber hinaus beeinflusst Armut den Anteil von Brandverletzungen durch Flammeneinwirkung auf Kleidung und steht in einem indirekt proportionalen Verhältnis zum Einkommen. Thermische Verletzungen durch verbrannte Kleidung haben nach Haus- und

Wohnungsbränden und den damit einhergehenden Verbrennungswunden die meisten Todesopfer zu verzeichnen [53].

Nachdem erhitzte, synthetische Materialien schmelzen, an der Hautoberfläche haften und schwerkraftbedingt nach distal abrinnen, sind damit assoziierte Verbrennungsverletzungen, im Vergleich zu Verbrennungen durch andere erhitzte Stoffe, auch von tieferem Ausmaß. In der Altersgruppe der Brandopfer mit vollendetem 64. Lebensjahr sind mehr als drei Viertel der Todesfälle auf verbrannte Kleidung zurückzuführen [36].

War verbrannte Kleidung damals noch ein häufiger Grund für erhöhte Mortalitätsraten vornehmlich bei jungen Mädchen, ist mittlerweile die Anzahl der Todesfälle gesunken, hat sich doch auch der Modegeschmack bezüglich Kleidung geändert mit nur mehr geringgradigen Unterschieden zwischen Jungen und Mädchen. Schlafbekleidung für Kinder mit einer Körperlänge bis einschließlich 130 cm musste im Jahre 1975 durch direkte Flammeneinwirkung getestet werden und diesen Test mit Erfolg absolvieren. Erst als 1999 diese Verordnung widerrufen wurde, sank auch die Anzahl der thermischen Verletzungen durch verbrannte Schlafbekleidung bei Kindern bis zur Vollendung des 12. Lebensjahres von 55% auf 27%. Brandverletzungen, die im Zusammenhang mit Schlafbekleidung stehen, werden genau untersucht, um die Auswirkungen nach Lockerung der Vorsichtsmaßnahmen für Schlafbekleidung und den damit assoziierten Verbrennungen zu beobachten [53, 55].

Es entfallen 20-25% aller gravierender Brandverletzungen auf Arbeitsunfälle. Im Jahr 1985 betrafen 6% aller am Arbeitsplatz ereigneten Brandverletzungen Jugendliche im Alter von 16-19 Jahren, was durch eine Recherche des Amtes für Arbeitsstatistik belegt werden konnte [56]. Durch Studienergebnisse des Staates Ohio wurde bewiesen, dass sich am Arbeitsplatz die meisten Brandverletzungen bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen ereigneten, die im Krankenhaus zu versorgen waren [57].

Im Jahr 1988 wurden in den Vereinigten Staaten von Amerika 236200 Patientinnen und Patienten mit Verletzungen durch Chemikalien in der Notaufnahme versorgt. Darunter betrug die Anzahl der Kinder, welche chemische Verbrennungen erlitten und das 5. Lebensjahr noch nicht vollendet hatten, 6500 beziehungsweise 5%, wohingegen die Altersgruppe der Erwachsenen, die sich chemische Brandverletzungen zuzogen, sämtliche Altersstufen miteinbezog und 35000 Personen beziehungsweise 15% aufwies. Nachdem nur 800 beziehungsweise 2% der Verbrennungen durch Chemikalien eine Aufnahme in

einer Brandverletzteneinheit erforderten, ist die Signifikanz chemischer Substanzen in Bezug auf Verbrennungen überschaubar. Angesichts des Schweregrades chemischer Verletzungen ist klar ersichtlich, dass das Alter eine übergeordnete Rolle spielt, schließlich hatten 400 der brandverletzten Personen, welche Behandlungen in einer Brandverletzteneinheit benötigten, das 5. Lebensjahr noch nicht vollendet. Insbesondere sehr junge Kinder neigen dazu, den auslösenden Wirkstoff erst verspätet von der Hautoberfläche zu entfernen [58].

Dem größten Risiko für Verletzungen durch starke Säuren sind Patientinnen und Patienten ausgesetzt, die im Herstellungsprozess von Düngemittel und Metallüberzügen beteiligt sind, während Personen, die an der Fabrikation von Seifen mitwirken oder im Eigenheim Ofenreiniger nutzen, dem höchsten Risiko für Verletzungen durch starke Laugen unterliegen. Die Produktion von Farb- und Kunststoffen, Düngemittel und Sprengstoff birgt das größte Verletzungsrisiko durch Phenole. Mit dem höchsten Verletzungsrisiko durch Fluorwasserstoffsäure gehen Vorgänge beim Ätzen, Reinigungsarbeiten für Klimaanlageanlagen und das Raffinieren von Erdöl einher. Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer in landwirtschaftlichen Betrieben sind der Gefahr von Verletzungen durch wasserfreies Ammoniak ausgesetzt, demgegenüber betreffen Verätzungen durch Zement vorwiegend Baufacharbeiterinnen und Baufacharbeiter. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Militärs erleiden meist Verletzungen durch Senfgas und weißen Phosphor, im Gegensatz dazu führt gereinigtes Petroleum, welches aus Proteinen die Lipidgruppen entfernt, bei Beschäftigten der Raffinierung und Tanklager zu Verletzungen [59].

Derzeit ereignen sich in den Vereinigten Staaten von Amerika circa 1000 Stromunfälle mit letalem Ausgang, wobei ein Viertel dieser Unglücksfälle auf Industriegelände oder Gehöften zustande kommen und ein Drittel im Eigenheim [53].

Durch das Einführen von unisolierten Gegenständen in Steckdosen sowie das zu Munde führen und Kauen von unter Spannung stehenden Stromkabel haben momentan junge Kinder die häufigsten Unfälle durch elektrische Haushaltsgerätschaften zu verzeichnen [43].

Im Sommer vollziehen sich bei Erwachsenen aufgrund von Konstruktionsarbeiten und dem Hantieren mit elektrischen Anlagen im Außenbereich die meisten Stromunfälle [37].

Eine weitere Ursache für Brandverletzungen, die von der Jahreszeit abhängig ist, stellen Feuerwerkskörper dar. Versorgung in Notaufnahmen waren im Jahr 1996 bei circa 3000 Kindern mit vollendetem 14. Lebensjahr nötig, die Verletzungen durch Feuerwerkskörper erlitten haben. Es stellten sich etwa 60% dieser Traumata als Brandverletzungen dar, welche in erster Linie Augen, Kopf und Hände involvierten. Juli gilt als der Monat, an dem sich wie vermutet 75% dieser Unfälle zutragen, da in diesem Zeitraum der Tag der Unabhängigkeit in den Vereinigten Staaten von Amerika gefeiert wird. Verletzungen, die durch Sprühkerzen ausgelöst wurden, finden sich in der Altersgruppe der Kinder bis zum vollendeten 4. Lebensjahr, wohingegen männliche Patientinnen und Patienten vor allem im Alter von 10 bis 14 Jahren dem höchsten Risiko von Brandverletzungen durch Feuerwerkskörper ausgesetzt sind [45].

Verbrennungswunden müssen nicht immer irrtümlich zustande kommen, denn sie können auch mutwillig oder durch Körperverletzung entstehen. In einem lokalen Zentrum für Brandverletzte wurden laut Angaben einer retrospektiven Studie über eine Zeitspanne von 12 Jahren 5758 Brandopfer therapiert. Es konnte eine Gruppe aus 51 Patientinnen und Patienten beschrieben werden, welche sich aus 25 Frauen und 26 Männern zusammensetzte und die Diagnose Verbrennungen durch Selbstverschulden erhielt. Handelte es sich hierbei, wie im Falle von 42 Patientinnen und Patienten, um einen Suizidversuch, reichte der Anteil der verbrannten Körperoberfläche von 1% bis zu 84%. Durchschnittlich beschränkte sich die Ausdehnung der Brandverletzungen auf 22%. Ein letaler Ausgang der thermischen Verletzungen war bei 12 beziehungsweise 28% dieser Brandopfer zu verzeichnen. Als eine Art Automutilation wurden die Verletzungen von 9 Patientinnen und Patienten in Betracht gezogen, wobei die Ausdehnung bezüglich der verbrannten Körperoberfläche von 1% bis 5% reichte und im Durchschnitt auf 1,4% begrenzt war. Es ereigneten sich 14% all dieser Brandverletzungen während des Aufenthaltes in einer psychiatrischen Einrichtung, wohingegen 43% der Traumata im Eigenheim vonstattengingen. In der Anamnese wiesen 73% der Betroffenen eine psychiatrische Vorerkrankung auf. Persönlichkeitsstörungen zeigten dabei die Patientinnen und Patienten aus der Gruppe mit Automutilation auf, während Schizophrenie und Affektstörungen in der Gruppe mit Suizid am häufigsten vorkamen. Unter den Todesfällen durch Suizid gab es bei 55% bereits einen Suizidversuch. Personen, die sich durch Automutilation Brandwunden zuzogen, wollten davor schon zumindest einmal

Selbstverstümmelung vollziehen. Brandverletzungen durch Selbstverschulden erfordern demnach laut Meinung der Autoren der Studie ein psychiatrisches Gutachten [60].

Eine spezielle Art der Brandverletzungen stellen Kindesmisshandlungen dar. In erster Linie werden diese von den Eltern verrichtet, jedoch auch von Beschäftigten der Kindertagesstätten oder Geschwistern ausgeführt. Eltern im Jugendalter, alleinerziehende Personen und geistige Retardierung der Delinquentin/ des Delinquenten oder des Kindes stehen mit Kindesmisshandlungen in enger Verbindung. Ein niedriger sozialer Status wird ebenfalls mit Kindesmissbrauch assoziiert, obwohl dieser in allen sozialen Schichten auftreten kann. Neben den Verbrennungswunden weisen diese Kinder, insbesondere jene vor vollendetem 2. Lebensjahr, Zeichen der Vernachlässigung, Mangelernährung und schlechte Körperhygiene auf [61].

Zigaretten stellen als häufigster Auslöser für Kindermisshandlung durch Verbrennungen schätzungsweise ein Drittel der Ursachen dar, jedoch müssen diese Brandverletzungen aufgrund ihrer geringgradigen Ausbreitung selten in Krankenhäusern behandelt werden [62]. Misshandlungen durch Brandverletzungen können ebenfalls Seniorinnen und Senioren widerfahren. Im Jahr 1991 wurde in einem Bericht im Rahmen eines Kongresses verdeutlicht, dass jedes Jahr 2 Millionen amerikanische Einwohnerinnen und Einwohner höheren Alters Verletzungen infolge eines Übergriffs erleiden. Die Prävalenz hinsichtlich Vernachlässigung beziehungsweise Misshandlung reicht schätzungsweise von 4% bis 10% [63]. Eine retrospektive Studie inkludierte 28 Seniorinnen und Senioren mit vollendetem 60. Lebensjahr, welche während eines Jahres in einer einzelnen Brandverletzteinheit versorgt wurden. Vernachlässigung durch andere wurde bei 3 der Patientinnen und Patienten dokumentiert, Selbstverwahrlosung bei 7 der untersuchten Personen und lediglich 1 Person war Opfer von Misshandlungen durch andere. Aufgrund mangelnder Erkenntnisse hinsichtlich der Risikofaktoren und unzureichender Beachtung sämtlicher Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Gesundheitswesens konkludierten die Autoren, dass Misshandlungen unzureichend rapportiert werden [64].

### **3.5 Anatomischer Aufbau der Haut**

Die Hautoberfläche eines Erwachsenen erstreckt sich auf eine Größe von 1,5-2,0 m<sup>2</sup>, wohingegen die Oberfläche der Haut Neugeborener lediglich 0,2-0,3 m<sup>2</sup> einnimmt.

Zwei Schichten bilden zusammen die Cutis (Haut). Es handelt sich dabei einerseits um die Epidermis, welche im Bereich der Augenlider eine Dicke von 0,05mm und an den Plantae mehr als 1mm aufweist und andererseits um die Dermis, deren Dicke mindestens das Zehnfache der Epidermis darstellt. Die Dicke der Haut beträgt durchschnittlich 1-2mm, während Frauen herkömmlich eine geringere Hautdicke als Männer besitzen. Kinder zeichnen sich durch eine äußerst dünne Haut aus. Diese nimmt bis zum Alter von 30 oder 40 Jahren an Dicke zu, bis sie darauf im Alter fortschreitend an Dicke abnimmt. Die Epidermis entwickelt sich aus dem Ektoderm und besteht vorwiegend aus Epithelzellen, insbesondere den Keratinozyten sowie aus anderen Zelltypen. Die Unterschiede zwischen Epidermis und Dermis mit deren verschiedenen Ursprüngen, Gefäßversorgungen, Eigenschaften und Zellen sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

<b>Hautschicht</b>	<b>Ursprung</b>	<b>Vaskularität</b>	<b>Charakteristik</b>		<b>Zellen</b>
EPIDERMIS	Ektoderm	avaskulär	Geschichtetes Epithel mit Keratinozyten		Melanozyten Keratinozyten
DERMIS	Mesoderm	vaskulär	Enthält extrazelluläre Matrix und Hautanhangsgebilde		Fibroblasten Adipozyten
			Superfiziell = Papillär	Hohe vaskuläre Dichte	Makrophagen
			Tief = Retikulär	Weniger vaskuläre Dichte	

Tabelle 1: Hauptunterschiede zwischen epidermaler und dermaler Hautschicht [65]

Dazugehörig auch Melanozyten, welche der UV-Protektion durch Pigmentproduktion dienen. Merkelzellen dienen der Umwandlung mechanischer Reize in elektrische Signale, wobei Langerhans-Zellen das Immunsystem unterstützen. Als Stratum germinativum wird die Unterschicht der Keratinozyten bezeichnet, welche heranwachsende Zellen mit hoher mitotischer Aktivität und die Produktion epithelialer Zellschichten gewährleistet, die im Laufe der Zeit an die Außenseite der Cutis wandern. Dabei bilden diese Zellen das Stratum spinosum, in dem zwar Proteinsynthese aber keinerlei mitotische Aktivität mehr vorzufinden ist. Die Keratinproduktion ist in der nächst außengelegenen Zellschicht vorherrschend, welche als Stratum granulosum bezeichnet wird. Darauf folgt das Stratum lucidum, das sich durch die Abflachung der Zellen und deren Zellkernverlust auszeichnet, bis sich daraus eine Zellschicht aus abgestorbenen Zellen entwickelt, das Stratum corneum. Der gesamte Reifungsvorgang der basalen Zellschicht aus Epithelzellen bis zum Prozess der Abschilferung nimmt circa 2 bis 4 Wochen in Anspruch. Haarfollikel, Schweiß- und Talgdrüsen stellen zwar als Hautanhangsgebilde eigenständige Zelltypen dar, werden jedoch ebenso mit Zellen der Epidermis assoziiert. Hautanhangsgebilde dehnen sich von der Epidermis in Richtung der inneren Hautschichten aus, bis sie schließlich in der Dermis inserieren. Das dickere Stratum reticulare bildet zusammen mit dem darüberliegenden und dünneren Stratum papillare die Lederhaut. Die verhältnismäßig breite Dermis setzt sich aus Bindegewebe zusammen und entwickelt sich aus dem Mesoderm. Fibroblasten gelten als vorherrschender Zelltyp der Dermis, welcher in erster Linie an der Synthese von Kollagen und Elastin beteiligt ist und eine niedrige Teilungsrate aufweist. Abtragung, Umformung und Produktion von Kollagen wird in hohem Maße im Laufe des Heilungsprozesses oder während mechanischer Reizung der Haut vollzogen. Ist das Integumentum commune hingegen unbelastet, werden diese Vorgänge seltener durchgeführt. Die fundamentalen und charakteristischen Funktionen der Haut veranschaulichen die Bedeutung als eigenständiges Organ, wenn auch häufig nicht als ein solches definiert. In Hinblick auf das Immunsystem unterstützt sie dieses durch Antigenpräsentation, wohingegen antibakterielle Wirkung durch die Produktion von Talg gewährleistet wird. Dies ist auf das große Maß an langkettigen Fettsäuren, insbesondere Ölsäure, zurückzuführen. Weiters stellt die Haut durch den Vorgang der Abschilferung die Beseitigung von Bakterien sicher, die Epithelbarrieren durchdringen können [66].

Als sogenannte Unterhaut wird die Subcutis bezeichnet, welche neben der Funktion als Wärmeisolator und Energiespeicher auch als Dämpfer für Druckkräfte fungiert.

Nerven und Blutgefäße durchziehen die Subcutis, eine Grundsubstanz aus Hyaluronan und Proteoglykanen bettet die Bindegewebsfasern von Subcutis und Dermis ein. Einzig durch die reibungslose Interaktion sämtlicher Komponenten der Haut kann diese ihre Aufgaben erfüllen [67]. Eine übersichtliche Darstellung der histologischen Hautschichten ist in Abbildung 7 dargestellt. Hier werden auch die einzelnen Schichten der Epidermis abgebildet.

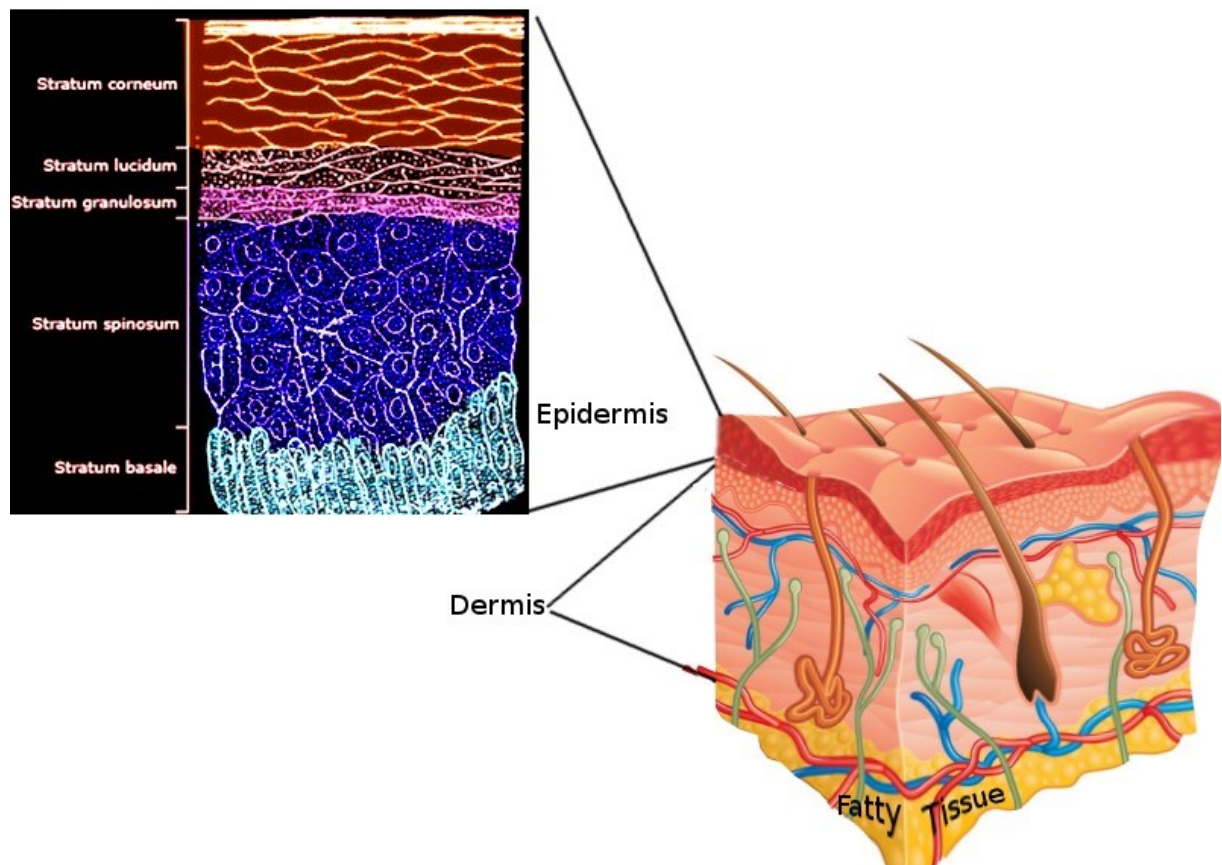


Abbildung 7: Histologischer Aufbau der Haut [68]

### 3.6 Pathophysiologie der Verbrennungskrankheit

Eine Erscheinungsform von ungeordneter kinetischer Energie auf molekularer Ebene wird als thermische oder auch Wärmeenergie bezeichnet. Durch den Vorgang der Konduktion kann diese Energie von Molekülen höherer Temperatur in Richtung niedrigerer übertragen werden, sofern sie miteinander in Kontakt stehen. Sind bei diesem Prozess Strömungen eines Fluids beteiligt, wird dies Konvektion genannt, beispielsweise das Abkühlen eines erhitzten Gegenstandes im kalten Wind.

Gibt ein Molekül kinetische Energie durch Transformation in Strahlungsenergie ab, wird der Mechanismus der elektromagnetischen Strahlung beschrieben. Der Wärmetransport wird von all diesen Vorgängen beeinflusst, die thermische Energie an Zellgewebe abgeben oder entziehen können. Wie das Beispiel der verbrannten Kleidung wiedergibt, führen in der Regel mehr als nur einer der beschriebenen Vorgänge zu Brandverletzungen. Von einem Auslöser für Verbrennungen wird Infrarotstrahlung emittiert, über Konduktion gelangt Wärme vom erhitzten Gegenstand zur Haut und durch Konvektion erfolgt eine Hauterwärmung durch erhitzte Gase, die aufgrund der Flammeneinwirkung entstehen. Es muss stets die Einwirkzeit der Temperatur auf die Zelle wie auch die Höhe der Temperatur selbst berücksichtigt werden, wenn man den Einfluss von Wärmeenergie auf Zellen untersuchen möchte. Der Schweregrad der thermischen Schädigung einer Zelle wird maßgeblich von diesen beiden Einflussgrößen bestimmt. Das Zusammenspiel von Temperatur und Zeit in Hinblick auf Verbrennungswunden wurde von Moritz und Henriquez elaboriert.

Die vorzeitige Denaturierung von Proteinen sowie die Funktionsstörung unterschiedlicher Enzyme wird durch fortdauernde Temperaturen zwischen 40°C und 44°C bewirkt [69].

Durch die Störung der Natrium-Kalium-Pumpe wie auch anderen Zellfunktionen sammelt sich intrazellulär vermehrt Natrium an, was eine Schwellung der Zellen zur Folge hat. Bei Temperaturen von mindestens 44°C und ausreichender Einwirkzeit unterliegen zelluläre Reparaturvorgänge den agglomerierten Zellschäden, was die Bildung von Nekrosen induzieren kann. Nachdem für 60 Minuten eine Temperatur von 45°C auf die Zellen einwirkte, konnten Umwandlungen der Zellmembran dokumentiert werden, welche für die Erzeugung von Nekrosen ausreichend waren. Des Weiteren ist die Bildung freier Radikale an der Schädigung von Zellen beteiligt, einer Gruppe von Sauerstoffmolekülen, für die jeweils ein ungepaartes Elektron charakteristisch ist [70].

Gewebsschädigung ist der entscheidende Mechanismus, um eine systemische Entzündungsreaktion auszulösen. Diese kann durch Schäden infolge einer Wiederherstellung der Perfusion nach vorausgegangener Minderdurchblutung erzeugt werden, etwa wegen Transmittern wie freien Radikalen. Mechanische oder thermische Verletzungen stellen ebenfalls potenzielle Ursachen für Gewebsschädigung dar. Proinflammatorische Zytokine werden aufgrund des Verletzungsmechanismus unmittelbar emittiert.

Handelt es sich um eine Brandverletzung schweren Ausmaßes, etwa ab 20% verbrannter Körperoberfläche, kommt es zur Entstehung des Systemischen inflammatorischen Response-Syndroms, hervorgerufen durch die gravierende Ausschüttung von Zytokinen. Die Anpassungsfähigkeit des Wirts an diese Inflammation hängt entscheidend von dessen Leistungsvermögen sowie der Dauer und dem Schweregrad der Entzündungsreaktion ab. Eine unzureichende Flüssigkeitssubstitution im Anfangsstadium nach dem Trauma, fortbestehende Nekrosen von Gewebe, der Transport von Endotoxinen aus dem Intestinum sowie anhaltende oder diskontinuierliche Infektionen sind als Aspekte zu nennen, welche mit der Ausdehnung eines SIRS assoziiert werden [33, 71].

Eine unkontrollierte Entzündungsreaktion, die meist auf eine Infektion zurückzuführen ist, beeinflusst den Ablauf von Organfehlfunktionen, welche für das Multiorganversagen charakteristisch sind [72].

Minderdurchblutung von Organen, eingeschränkte Barrierefunktionen des Intestinums, Sepsis sowie offene Brandwunden stehen mit dem Multiorganversagen eng in Verbindung. Es wird von gemeinsamen Berührungspunkten dieser Pathologien ausgegangen, sind sich diese letztlich in ihren Reaktionen äußerst ähnlich. Diese Mechanismen haben über unterschiedliche Transmitter Auswirkungen auf verschiedene Organe, deren Synergien zu Beginn [73] noch unzureichend erforscht waren, allerdings durch den Einsatz von Antikörpern, Rezeptorantagonisten und löslichen Rezeptoren veranschaulicht werden konnten [74].

Obwohl der Ablauf eines Multiorganversagens häufig im Vorhinein absehbar ist, kann durch unterschiedliche Therapieoptionen, wie etwa mittels H<sub>2</sub>-Rezeptorantagonisten, in den Pathomechanismus eingegriffen werden. Zwei Prozesse spielen in Hinblick auf Verbrennungsoffer eine bedeutende Rolle [75]: Das akute Atemwegssyndrom, Leber- und Nierenversagen, Darminfarkt, Ausfall des Blutflusses in den Gefäßen, Infektionen und erfolglose Reanimation kennzeichnen die Faktoren des zu Beginn eintretenden Prozesses. Ateminsuffizienz, eingeschränkte Strömungsmechanik des Blutes, Darminfarkt sowie Nieren- und Leberversagen werden in den spät eintretenden Prozess inkludiert. Ausfall der Vasomotorik und Exitus letalis markieren gehäuft die Endpunkte beider Prozesse. Zudem geht eine steigende Anzahl von funktionslosen Organsystemen mit einem Anstieg der Mortalitätsrate einher. Ein letaler Ausgang ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% zu verzeichnen, sobald Ausfälle von drei Organen eintreten.

Dennoch wurden Fälle dokumentiert, als Patientinnen und Patienten selbst mehr als drei Ausfälle von Organen vorwiesen [76]. Schlussendlich präsentieren 8% der Patientinnen und Patienten mit Brandverletzungen ein Multiorganversagen [75].

### **3.7 Relevante Faktoren für die Beurteilung von Brandverletzungen**

#### **3.7.1 Spezielle Epidemiologie**

In der Brandverletzteneinheit der Grazer Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde werden jährlich über 200 Patientinnen und Patienten ambulant und zwischen 50 und 80 Patientinnen und Patienten stationär therapiert. Diese Zahlen belaufen sich auf das 5 bis 6-Fache in allen Bundesländern Österreichs zusammen. Die statistische Auswertung von 665 Patientinnen und Patienten zeigte folgende Aufteilung: Es hatten davon 74% der Kinder das 4. Lebensjahr noch nicht vollendet, als diese stationär aufgenommen wurden. Eine Verbrühung war bei 67% der Patientinnen und Patienten zu verzeichnen und Knaben waren 3-mal häufiger als Mädchen verletzt [2].

Verbrühungen durch erhitztes Öl oder Wasser gelten als die häufigsten Auslöser thermischer Verletzungen, insbesondere im Kleinkindesalter. Aufgrund unberechenbarer Verhaltensweisen kommt es rasch zum Herunterziehen eines mit kochend heißem Wasser gefüllten Kochtopfes, was eine Verbrühung des Gesichtes und Körpers nach sich zieht. Eine Therapie im Krankenhaus ist österreichweit bei circa 8500 Personen jährlich nötig, welche thermische Verletzungen im Haushalt erleiden, wobei sich 43% der Betroffenen vor Vollendung des 5. Lebensjahres befinden. Nachdem die Summe von 8500 Opfern thermischer Verletzungen 3700 Kleinkinder inkludiert, widerfahren täglich 10 Kleinkindern thermische Verletzungen im Haushalt. Für Patientinnen und Patienten mit Verbrennungswunden wurde in Wien im Jahre 2006 insgesamt 295-mal die Rettung verständigt. Haus- und Wohnungsbrände erfordern deutlich öfter den Einsatz von Rettungskräften, Verbrennungstherapien von Patientinnen und Patienten gehen mit diesen Brandgeschehen selten einher. Kommt es dabei zwar gehäuft zur Rauchgasinhalation, werden Flammenverbrennungen nur in Ausnahmefällen beobachtet [77].

Eine besondere Herausforderung in Hinblick auf die Therapie von Brandverletzungen stellen Kontaktverbrennungen dar, etwa nach Berührung von erhitztem Glas, Plastik, Metall oder glühenden Holzkohlestücken.

Kontaktverbrennungen sind zwar auf ein geringes Areal der verbrannten Körperoberfläche begrenzt, jedoch ist die Ausdehnung tief reichend. Patientinnen und Patienten im vorübergehenden Zustandsbild nach Alkohol- oder Drogenaufnahme sowie neurologisch erkrankte Personen, beispielsweise Menschen mit Epilepsie, präsentieren sich sehr häufig mit Kontaktverbrennungen. Die Dauer des Kontaktes mit dem erhitzten Medium sowie dessen Temperatur sind für die Tiefe der Brandwunde entscheidend. So kommt es bei Industrieunfällen durch den Hautkontakt mit geschmolzenen Materialien unmittelbar zu einer Verletzung, welche sich bis unter die Lederhaut erstreckt. Sofern eine ohnmächtige Person die ganze Nacht in liegender Position auf einer Heizdecke verweilt, wird sich diese ebenfalls Verbrennungen zuziehen, welche bis ins Fettgewebe oder zuweilen auch ins Muskelgewebe reichen. In Bezug auf Verbrühungen hängt die Tiefe der Verletzung ebenso von der Einwirkzeit der Flüssigkeit, deren Temperatur wie auch der Hautdicke ab. Eine tiefe Verbrühung wird nach 3 Sekunden erzeugt, wenn erhitztes Wasser mit einer Temperatur von 60°C mit der Hautoberfläche in Berührung kommt. Dasselbe Verletzungsausmaß ist schon nach 1 Sekunde bei einer Temperatur des Wassers von 69°C zu verzeichnen. Sofern die Kontaktdauer des kochenden Wassers nicht ausgesprochen kurz ist, sind diese Verbrühungen fast immer tiefreichend. Auch erhitzte Soßen und Suppen rufen Verbrühungen hervor, die tief in die Haut ragen, da sich diese Flüssigkeiten durch eine dickere Konsistenz auszeichnen und demnach länger auf der Oberfläche der Haut verweilen. Weiters wird das Schadensausmaß von der Kleidung beeinflusst, schließlich speichert das Gewand die thermische Energie und garantiert die längere Kontaktdauer zwischen Flüssigkeit und Hautoberfläche. Meist setzten sich Verbrühungen aus oberflächlichen und tiefreichenden Verletzungen zusammen. Öl- und Fettverbrühungen rufen für gewöhnlich Verbrühungen des Grades 2b oder 3 hervor, wohingegen heißer Asphalt und Teer eine spezielle Gruppe von Verbrühungen darstellen und in der Regel mit Verletzungen 3. Grades einhergehen [77].

Die Entscheidung, ob Kinder und Jugendliche mit thermischen Verletzungen eine Versorgung in einer Brandverletzteneinheit benötigen, ist nicht immer einfach zu treffen. Deshalb sind die Kriterien für den Transfer in ein Brandverletztenzentrum in Tabelle 2 genau aufgeführt.

<b>Säuglinge und Kleinkinder &gt;5 %, Schulkinder und Jugendliche &gt;10 % verbrannter Körperoberfläche, unabhängig von der Tiefe</b>
Tiefe Verbrennungen (Grade 2b und 3) – evtl. chirurgische Behandlung notwendig
Verbrennungen von Kopf, Hals, Händen, Füßen, Anogenitalregion
Elektro- oder chemische Verbrennungen
Verdacht auf Inhalationstrauma
Verbrennung als „Zweiterkrankung“ z. B. Gastroenteritis, respiratorische Infektion
V. a. Misshandlung

Tabelle 2: Kriterien zum Transfer in ein Brandverletztzentrum [46]

### 3.7.2 Ausdehnung

Um die Ausdehnung von Verbrennungen bei Kindern und Erwachsenen zu beurteilen, bestimmt man die verbrannte Körperoberfläche und gibt diese in Prozent an (VKO). Nachdem sich die Körperproportionen von Kindern im Alter ändern, verlangt die Beurteilung der Ausdehnung von Brandverletzungen altersadaptierte Schemata. Als Körperpartien werden Kopf mit Hals, Arme, Rumpf, Beine und Damm beurteilt. So weist ein Kind vor Vollendung des 1. Lebensjahres eine Hautoberfläche des Kopfes von 18-20% auf. Ein Erwachsener hat im Verhältnis zu seinen anderen Körperproportionen nur eine Hautoberfläche von 9%. Allerdings weisen Kinder relativ kurze Beine auf, weshalb sie in dieser Kategorie 28% und Erwachsene 36% Hautoberfläche besitzen [2]. Dieses Körperschema zur Beurteilung der verbrannten Körperoberfläche ist als Neunerregel nach Wallace bekannt. Der Name lässt sich auf die einfache Beurteilung der Körperpartien bei Erwachsenen mit jeweils 9% zurückführen. Somit nimmt die Hautoberfläche des Kopfes 9% ein. Brust und Bauch umfassen jeweils 9%, was in Summe 18% für die Vorderseite des Rumpfes ergibt. Demnach entspricht dessen Rückseite ebenfalls 18%. Ein Arm umfasst auch ein Areal von 9%. Die Vorderseite eines Beines beträgt 9% genauso dessen Rückseite. Der Damm entspricht 1% der Körperoberfläche [78]. Wie aus der Arbeit von Trop et al. ersichtlich, muss dieses Beurteilungstool modifiziert werden, wenn man es bei Kindern anwenden möchte. Die unterschiedlichen Körperregionen und deren Relation zur gesamten Körperoberfläche für die Anwendung der Neunerregel nach Wallace bei Erwachsenen und Kindern sind in der folgenden Abbildung 8 abgeleitet.

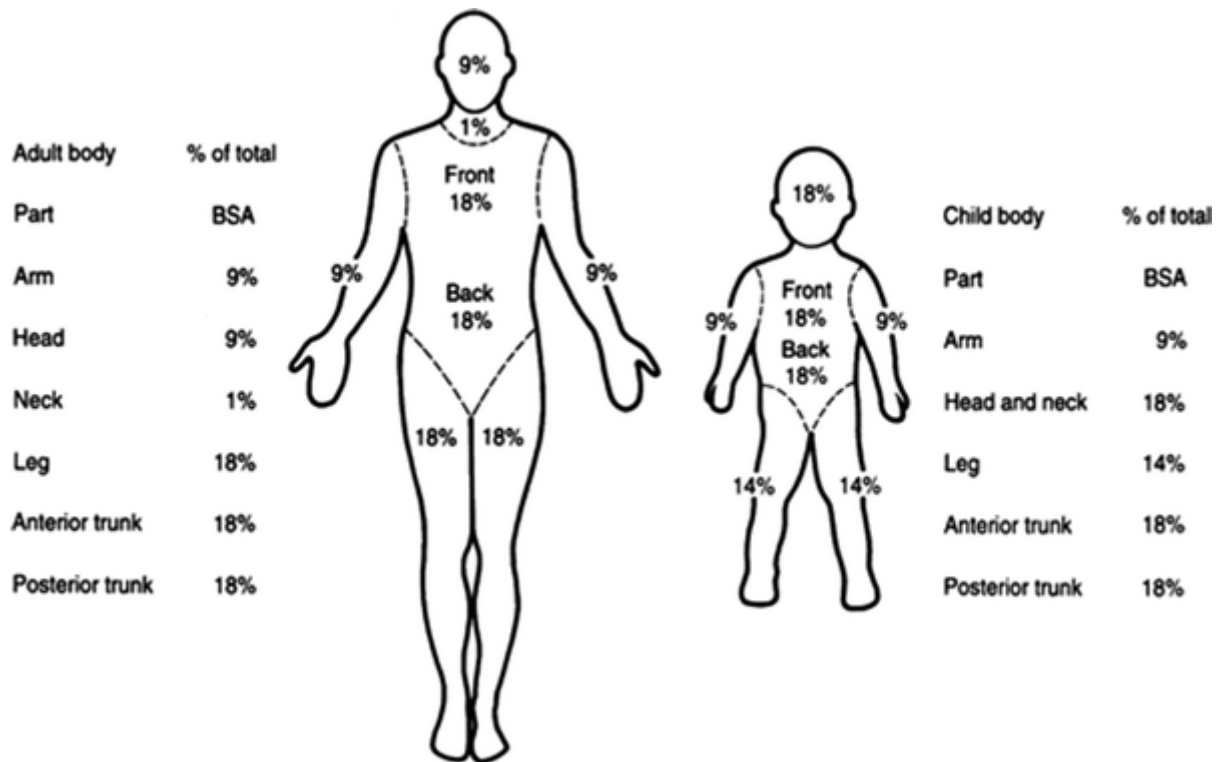


Abbildung 8: Neunerregel nach Wallace für Erwachsene und Kinder [79]

Ein weiteres Schema zur Beurteilung des Verbrennungsausmaßes ist die Handflächenregel. Dabei entspricht die Handfläche inklusive der Finger der Patientin beziehungsweise des Patienten 1% der Körperoberfläche, allerdings kann bei Gebrauch dieser Methode das konkrete Verbrennungsausmaß um 10-20% überschätzt werden. Im Erwachsenenalter nimmt die Handfläche 0,78% +/- 0,08% der Hautoberfläche des Körpers ein [80]. Auch in Bezug auf das Geschlecht unterscheidet sich die Handfläche bei Männern mit 0,8% von der Handfläche bei Frauen mit 0,7% in Relation zur gesamten Körperoberfläche.

Bei Männern umfasst der Handteller 0,5%, bei Frauen hingegen 0,4% [81]. Die Handfläche von Kindern beträgt 0,92%, der Handteller nimmt 0,52% der Körperoberfläche ein [82].

Die Entwicklung von Apps und Devices bietet weitere Möglichkeiten, das Ausmaß von Brandverletzungen zu beurteilen. Dafür stehen momentan Systeme wie Sage II, Burn Vision 3D [83], und BurnCase 3D [84, 85] zur Verfügung. Bei Burn Vision 3D sowie BurnCase 3D handelt es sich um dreidimensionale Systeme, Sage II ist hingegen zweidimensional.

Eine ausführliche Berichterstattung über die Brandverletzung und deren Auswertung ist einzig durch dreidimensionale Systeme gewährleistet. Eine besondere Herausforderung stellt die Darstellung der lateralen Körperpartien dar, welche in den herkömmlichen Diagrammen meist nur unvollständig dargestellt werden können. Beispielsweise stellt die geringe Auflösung des Systems BurnVision ein Defizit dar. Ausschließlich das System BurnCase 3D [85], ein Forschungsprojekt der RISC Software GmbH, bietet eine Darstellung von Körpergröße, Körpergewicht sowie Körperbautyp und ermöglicht die Auflösung von  $1 \text{ cm}^3$ . Um eine exakte Darstellung gewährleisten zu können, müsste zuvor die Körperform mithilfe eines 3D-Scanners festgehalten werden, was sich jedoch in der Praxis nicht als zweckdienlich erwies. Ebenso konnte anhand einer retrospektiven Datenanalyse im Rahmen einer Diplomarbeit an der Medizinischen Universität Graz bewiesen werden, dass sich herkömmliche Evaluierungsmethoden von BurnCase 3D statistisch nicht signifikant unterscheiden. Allerdings wurde bewiesen, dass die Differenz der Auswertungsergebnisse der klinischen Evaluierung und BurnCase 3D absolut gesehen anstieg, wenn die Größe der Verbrennungswunde zunahm. Dies ist von großer klinischer Relevanz bezüglich Flüssigkeitssubstitution, Transferentscheidungen und nachfolgender Therapie [86].

In Abbildung 9 wird das Ausmaß der Brandverletzungen, welches mithilfe von BurnCase 3D berechnet wurde, dargestellt. Anhand von Daten des Brandopfers bezüglich des Geschlechts, Alters, Körpergröße, Körpergewichts, Vorhandensein eines Inhalationstraumas mit dessen Klassifizierung sowie der verwendeten Formel zur Einschätzung der BSA werden die am Computermodell eingetragenen Flächen als thermische Verletzungen mit den unterschiedlichen Graden der Verbrennung kategorisiert. Das Programm berechnet TBSA, VKO, Body-Mass-Index, Abbreviated Burn Severity Index für die Überlebenswahrscheinlichkeit und den Baux Score für die Vorhersage der Mortalitätsrate. Auch die Menge für den Flüssigkeitsersatz wie auch der tägliche Energiebedarf werden berechnet.

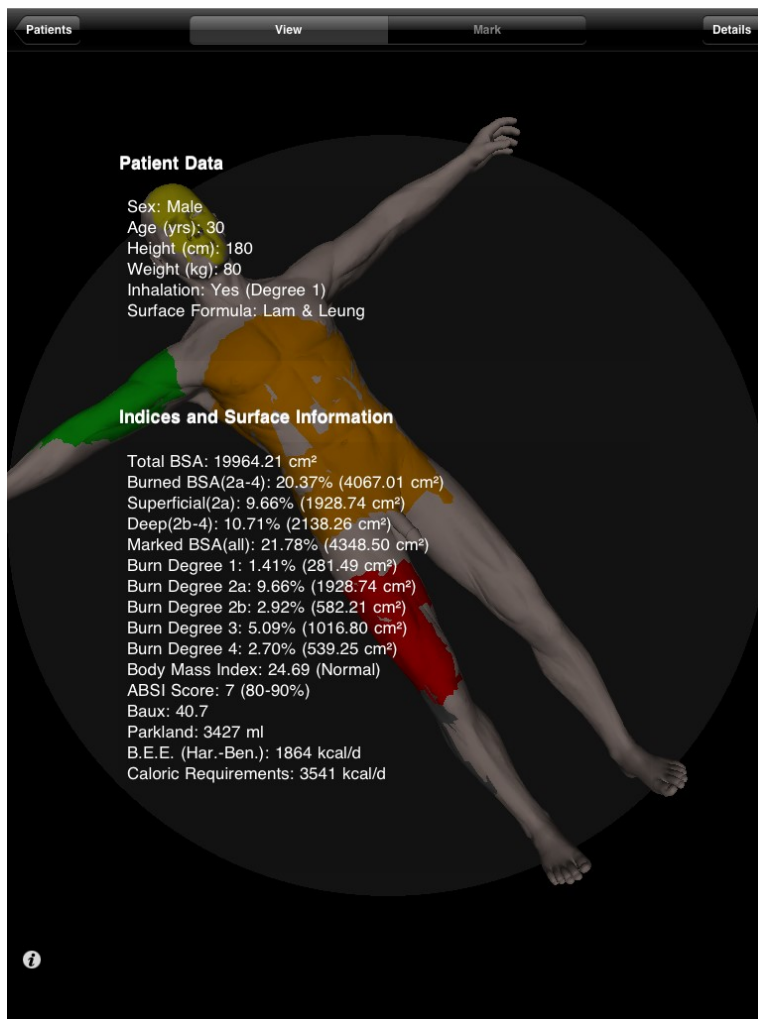


Abbildung 9: Berechnetes Ausmaß der Brandverletzungen mittels BurnCase 3D [87]

### 3.7.3 Tiefe

Einen weiteren Faktor für die Beurteilung der Ausdehnung einer Verbrennungswunde stellt deren Tiefe dar. Diese lässt sich anfangs selbst durch die erfahrenste Ärztin beziehungsweise den erfahrensten Arzt nicht immer sicher einschätzen. Gerade im Kleinkindesalter ist besonders bei Verbrühungen die endgültige Tiefe erst nach 3-5 Tagen erreicht. Bei Verbrennungen unterscheidet man klassischerweise 3 Grade. Als erstgradige Verbrennung ist das typische Beispiel des Sonnenbrandes zu nennen. Das charakteristische Hauterythem kommt durch die Destruktion der oberflächlichen Epidermis zustande. Patientinnen und Patienten präsentieren sich mit Schmerzen, nach etwa 7 Tagen tritt die narbenfreie Abheilung ein. Verbrennungen zweiten Grades werden in oberflächlich und tief dermal gegliedert. Die oberflächliche Verbrennung (zweitgradig a) zeichnet sich durch starke Schmerzen, Blasenbildung und einer homogenen Rötung des Untergrundes aus.

Geschädigt ist die gesamte Epidermis und Anteile der Dermis. Verbrennungen des Grades 2a heilen narbenfrei ab. Auch bei Brandverletzungen des Grades 2b kommt es zur Blasenbildung, die Schmerzhaftigkeit ist allerdings aufgrund der Destruktion der Nervenendigungen herabgesetzt, des Weiteren wird eine nicht wegdrückbare Rötung beobachtet und die Verbrennungswunde heilt unter Narbenbildung ab. Klassische Auslöser für Brandverletzungen 2. Grades sind Stichflammenverbrennungen sowie Verbrühungen. Weißes, trockenes beziehungsweise verkohltes Gewebe ist für die drittgradige Verbrennung spezifisch. Epidermis und Dermis sind vollständig und irreversibel destruiert, was infolge zur Narbenbildung führt und der Wundgrund ist schmerzfrei. Chemische Verbrennungen und Flammeneinwirkung zählen neben Stromunfällen zu den gängigen Ursachen [2, 77].

Unterscheidet man zwar in der deutschen Literatur meist nur 3 Verbrennungsgrade, wurde historisch auch ein vierter Grad angegeben. Dabei kommt es durch chemische Destruktion zur Lyse oder Verkohlung der Subcutis und tieferer Schichten, wie eventuell der Muskulatur. Ebenso können Sehnen, Knochen und Gelenke betroffen sein [88]. Die unterschiedlichen Verbrennungsgrade mit der entsprechenden Tiefenausdehnung sind aus Abbildung 10 zu entnehmen.

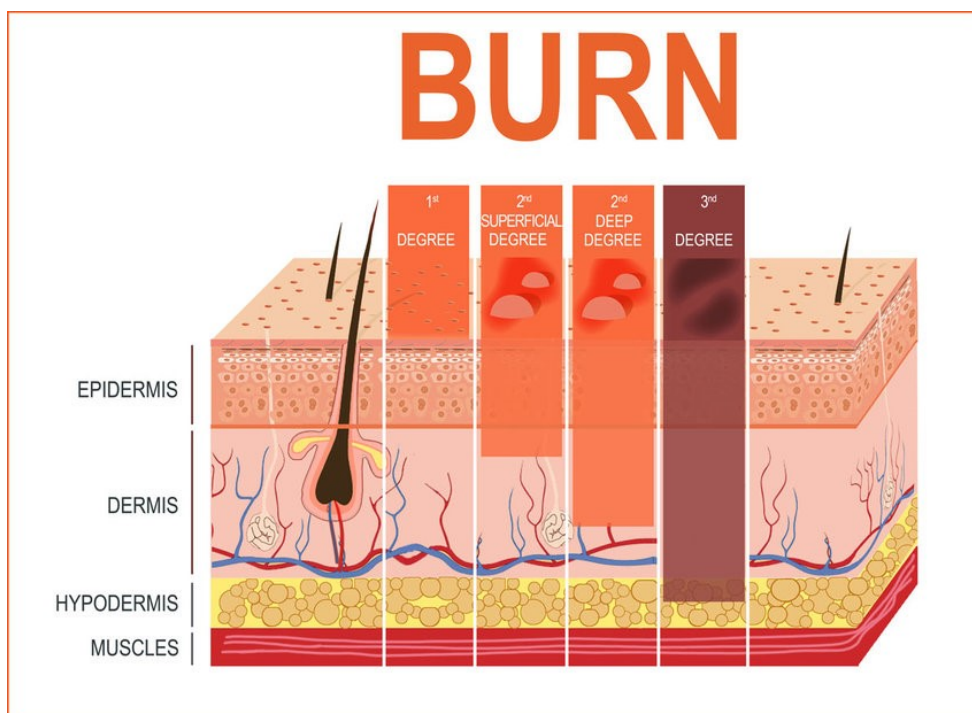


Abbildung 10: Verbrennungsgrade in Bezug auf die Hautschichten [89]

### **3.8 Therapieoptionen**

Kinder mit thermischen Verletzungen präsentieren zumeist ein Mischbild aus oberflächlich und tief dermalen Verbrühungen, welche durch inhomogene Hitzeeinwirkung auf die Hautoberfläche zustande kommen. Sofern das Kind in guter Verfassung ist, kann der Zeitraum bis zur Abgrenzung von gesundem und nekrotischem Gewebe abgewartet werden [90].

Wunden infolge von Verbrühungen, welche noch nicht den 3. Grad erreicht haben, werden bei pädiatrischen Patientinnen und Patienten vorzugsweise konservativ versorgt. Bestehen Zweifel hinsichtlich der Ausdehnung nach der initialen Untersuchung der Verletzung, erlaubt die spätere Wundexzision eine verbesserte Beurteilung der Tiefe. Eine späte Wundexzision geht mit einem geringeren Ausmaß von exzidiertem Wundgewebe, Narbenbildung und Funktionseinschränkung der Haut einher. Der verringerte Blutverlust bei später Exzision ist durch die Reduktion des abzutragenden Wundgewebes bedingt. Das Leitbild der Versorgung von Verbrühungen sollte sich aus konservativer Therapie für Wundareale mit Spontanheilung und früher Exzision sowie Hauttransplantationen für Wundgebiete, die ausschließlich deformiert abheilen, zusammensetzen [91].

#### **3.8.1 Konservative Wundbehandlungen**

Zur Lokalbehandlung von akuten und chronischen Brandverletzungen wurde im Laufe der Jahre eine große Anzahl von silberhaltigen Wundauflagen hergestellt. In erster Linie konnte sich Silbersulfadiazin (Flammazine<sup>®</sup>) als wirkungsvolles Therapeutikum bezüglich der Versorgung thermischer Verletzungen behaupten. Mittlerweile hat sich bei der Anwendung des international am häufigsten verwendeten Oberflächentherapeutikums Flammazine<sup>®</sup> ein Verbandwechsel pro Tag als ausreichend erwiesen. Zuvor kam es zwei- bis dreimal täglich zum Wechsel der Verbände, was gehäuft zur Schmerzpotenzierung und nachfolgender Stressbelastung für die Kinder führte [92].

Durch den Fortschritt in der Entwicklung von silberhaltigen Wundauflagen hat sich inzwischen die Notwendigkeit des täglichen Verbandwechsels erübrigt. Die Vermeidung der Wundinfektion konnte trotz der langen Zeitabschnitte zwischen den Verbandwechseln aufgrund verschiedener antiseptischer Wundauflagen mit Silberzusatz vermieden werden. Polyurethanschäumverbände wie Mepilex<sup>®</sup> Transfer Ag oder Contreet<sup>®</sup>, Sandwich-

Verbände wie Bactigras<sup>®</sup> oder Acticoat<sup>®</sup>, Gele wie das Silberalginat Askina<sup>®</sup> Calgitrol<sup>®</sup> und Hydrokolloidnetze wie Urgotül<sup>®</sup> S.Ag seinen an dieser Stelle als wichtige Oberflächentherapeutika erwähnt. Selbst Keimfreiheit kontaminierter Verbrennungswunden kann durch diese antiseptischen Wundauflagen erzielt werden. Silber zeichnet sich durch eine bakterizide Wirkung auf Hautkeime sowie die Problemkeime *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, und Enterokokken aus [93].

Die gestörte Proteinbiosynthese und DNA-Replikation der Bakterien sowie die Destruktion der Zellmembran zählen zu den Wirkmechanismen von Silber. Weiters entwickeln Bakterien keine Resistenz gegen dieses Übergangsmetall. Eine längere Regenerationszeit, insbesondere im Frühstadium der Brandverletzung, wie auch ein geringerer Bedarf an Analgetika lässt sich durch den langen Zeitabstand zwischen den Verbandwechseln erklären, welcher 3-5 Tage betragen kann. Der Wechsel des Verbandes kann unter geringer Analgesie durch das schwache Anhaften der Wundauflagen am Wundgebiet gewährleistet werden. Die initiale Verabreichung von Paracetamol ist für die Analgesie von Kindern mit leicht- bis mittelschweren Brandverletzungen geeignet. Alternativ kommt das Präparat Talvosilen<sup>®</sup>, welches die Wirkstoffe Paracetamol und Codein enthält, zur Anwendung. Auch die orale Gabe von Ibuprofen ist geeignet, welches ein geringeres Spektrum an Nebenwirkungen und eine längere Wirkungsdauer aufweist. Zur Schmerzbehandlung im Rahmen eines Verbandwechsels hat sich die rektale Verabreichung von Midazolam und Ketanest<sup>®</sup>-S als ausgesprochen effektiv erwiesen [94].

Vornehmlich bei Brandverletzungen 2. Grades kommen biogene Folienverbände zur Anwendung, wie beispielsweise Amnion, DIZG und Biobrane<sup>®</sup>. Als synthetischer, alloplastischer Hautersatz hat inzwischen Suprathel<sup>®</sup> Einzug gehalten. Dabei handelt es sich um eine selbstresorbierende Membran, welche wie die biogenen Folienverbände zusammen mit den aseptischen Wundauflagen als Primärverband fungiert und auf der Wunde verweilt, bis diese abheilt und damit Schmerzfreiheit im Rahmen der anschließenden Behandlungsmaßnahmen gewährleistet ist [77].

Am Universitätsklinikum Graz konnten durch den Einsatz von Suprathel<sup>®</sup> bei einem 3 Monate altem Säugling St.p. toxisch epidermaler Nekrolyse äußerst zufriedenstellende Resultate hinsichtlich Reepithelialisierung der offenen Hautläsionen erzielt werden [95].

### 3.8.2 Chirurgische Techniken

Die Prozedur der Nekrosektomie beschreibt eine tangentielle Entfernung nekrotischer Schichten der Haut unter Erhaltung des vitalen, gut perfundierten Gewebes an der Unterseite. Punktförmige Hämorrhagien aus dem dermalen Gefäßplexus sind charakteristisch für den gut durchbluteten Wundgrund. Während manche Einrichtungen für die tangentielle Exzision Elektrodermatome aus dem Anwendungsgebiet der Entnahme von Spalthaut bevorzugen, findet in der Regel das Goulian-(Weck-)Messer für dieses operative Verfahren Anwendung, welches durch verschiedene Größen von Schablonen (0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm) die Entfernung von Gewebsschichten unterschiedlicher Dicke ermöglicht. Auch bei Brandverletzungen, welche die Subcutis inkludieren, ist die tangentielle Nekrosektomie mithilfe des Humbsystems durchführbar. Mittels tangentialer Exzision bleiben Nervengewebe und Venen der Unterhaut unversehrt und die Bewahrung des dermalen Wundbettes begünstigt die Regenerationsfähigkeit der Haut. Auch die Konturen der Körperareale bleiben besser aufrechterhalten. Dennoch treten gehäuft starke Hämorrhagien als unerwünschte Begleiterscheinung auf. Diesbezüglich bietet die epifasziale Exzision durch die rasche Blutstillung mit geringgradigen Hämorrhagien einen Vorteil. Nach Abtragung sämtlicher Hautschichten kranial der Muskelfazie unter Erhaltung der kapillarreichen Verschiebeschicht kommt es bei dieser operativen Technik jedoch gehäuft zu Narbenbildung sowie Konturverlust, wodurch die epifasziale Nekrosektomie in der modernen Verbrennungsmedizin in den Hintergrund gerückt ist. In der chirurgischen Behandlung von Brandverletzungen sollte demnach die tangentielle Nekrosektomie mit vorübergehender Versorgung der Subcutis durch Wundauflagen, speziell Fremdhaut, als initiale Therapiemaßnahme Einzug halten [77].

Nehmen Brandverletzungen ein großes Areal der Hautoberfläche ein, muss sich die entnommene Eigenhaut ausdehnen können, um eine Abdeckung großflächiger Wundgebiete sicher zu stellen. Mittels eines Meshdermatoms wird durch parallel versetzte Schlitzungen in die Haut ein Gitter- beziehungsweise Netztransplantat erzeugt (Meshgraft). Dadurch wird eine Erweiterung des Transplantats im Verhältnis 1:1,5, 1:3, 1:6 und 1:9 ermöglicht. Im klinischen Alltag werden diese Ausdehnungsmaße in der Regel allerdings nicht erreicht. Nach behutsamer Auflage des Meshgrafts auf die Wunde erfolgt dessen Fixierung mittels Klammern oder Nähten und nachfolgender Auftragung von zwei Wundauflagen Fettgaze. Letztlich wird ein Wundverband mit Saugfähigkeit angelegt, welcher die Wundauflagen leicht zusammendrückt, aber nicht daran festhaftet. Im Bereich

der Kniekehle oder Axilla handelt es sich um Areale mit ungünstiger Lokalisation für Transplantate und deren Ruhigstellung. Diesbezüglich kann unter Zuhilfenahme einer Vakuumversiegelung über dem Meshgraft eine Fixierung dessen bewerkstelligt werden [96].

Die Vollhauttransplantation wird insbesondere für rekonstruktive Eingriffe im Gesichtsbereich eingesetzt und nachdem dieses Transplantat sämtliche Schichten der Dermis enthält, wird das vollständige Reservoir für die benötigte Wundheilung geboten. Dies äußert sich postoperativ in geringgradiger bis nicht vorhandener Wundkontraktion. Verglichen mit der Spalthauttransplantation ist die Vollhauttransplantation angesichts der Farbabstimmung mit der umgebenen Haut bedenklich, da der endgültige Farbton im Vorhinein nicht abgewägt werden kann. Um eine Farbabstimmung des Vollhauttransplantates mit der umgebenen Haut im Gesicht zu gewährleisten, sollte die Entnahme dieser Transplantate nicht im Areal distaler Körperregionen erfolgen, sondern ebenfalls im Gesichtsbereich. Nach vollständiger Narbenrevision im Gesichtsbereich finden Vollhauttransplantate die beste Verwendung zur Wiederherstellung der ästhetischen Einheiten. Für gewöhnlich werden als Entnahmestellen hierbei Wangen, Kinn mit Unterlippe, Oberlippe, Nase sowie Unterlieder verwendet. Großflächige Vollhauttransplantate werden hingegen im Bereich der oberen Vorderseite der lateralen Brust entnommen, worauf die Hautentnahmestellen einer anschließenden Spalthautdeckung bedürfen [97]. Als Beispiel für ein gemeshes Spalthaut-Transplantat sei an dieser Stelle auf die nachfolgende Abbildung 11 zu verweisen, welche ein Meshgraft an Handrücken und Unterarm darstellt.



Abbildung 11: Gemeshtes Spalthaut-Transplantat an Handrücken und Unterarm [98]

Bevor die Reepithelialisierung von den Kanten des Transplantates aus erfolgt, kann das offene Wundgebiet nach der Übertragung großflächiger Meshgrafts ( $>1:3$ ) austrocknen und eine Superinfektion zustande kommen. Deshalb können großflächige Gitter- oder Netztransplantate mit allogener Fremdhaut, welche kryo- oder glycerolkonserviert wurde, als Kombinationsverfahren entsprechend der Sandwich-Technik nach Alexander transplantiert werden. Nach Reepithelialisierung des Wundbettes löst sich die Fremdhaut sukzessive ab [99].

Als C.P. Meek im Jahre 1958 das Meek-Wall-Dermatom präsentierte, welches kleinflächige Hauttransplantate mit der Größe einer Briefmarke erzeugte, fand diese Prozedur zur Entnahme von Spalthaut nach Etablierung der Meshgraft-Technik international keine Anerkennung mehr. Nach Abänderung des zuvor verwendeten Dermatoms wurde dieses nun mit Pressluft angetrieben und eine Ausweitung des Transplantats im Verhältnis von 1:2 bis 1:9 war daraufhin möglich. Raff et al. dokumentierten 1994 des Weiteren, dass ein Kombinationsverfahren aus allogener Fremdhaut und dem Spalthauttransplantat bis zu Ausweitungen im Verhältnis 1:4 unnötig sei. Im Unterschied zur autologen Spalthauttransplantation mit einem Meshgraft werden bei der Meek-Methode die Ausdehnungsverhältnisse des Grafts auch in der Praxis erreicht. Ebenso können Meek-Grafts von geringer Fläche verwendet werden und für die Entnahme kommen sogar Spenderareale mit ungünstigen Lokalisationen in Betracht. Allerdings geht die Anfertigung dieser Transplantate mit höheren Kosten durch einen Anstieg des Bedarfes an Personal sowie des zeitlichen Aufwandes einher [100].

Zweckgemäß sind zwei parallel arbeitende Operationsteams am Herstellungsprozess von Meek-Grafts beteiligt, wobei das erste Operationsteam die Brandverletzungen für die Transplantation anpasst und die Entnahme des Grafts vom Spenderareal vornimmt und das zweite Operationsteam die Anfertigung des Meek-Grafts durchführt. Vor Auflegung der entnommenen Spalthaut auf eine Korkplatte muss diese gemäß den Größenverhältnissen der Korkplatte zugeschnitten werden. Nachdem durch den Einsatz des Meek-Dermatoms kleine Quadrate in das Graft geritzt wurden, klebt man dieses anschließend mittels Sprühkleber auf vorgefaltete Nylongazen. Nach etwa 2 bis 5 Minuten kann die Korkplatte entfernt werden. Die Ausdehnung der Nylongazen erfolgt durch Zug an allen vier Seiten wodurch die eigentliche Erweiterung des Spalthauttransplantates bewerkstelligt wird. Nach Entfernung überschüssiger Ränder des Gewebeplissées werden die Meekfolien am Wundgrund mittels Tacker festgeklammert. Die anschließende Vorgehensweise hinsichtlich Anlage des Druckverbandes gleicht jener bei Mesh-Grafts [77]. Eine großflächige Wunddeckung mittels durch Klammern fixierter Meek-Grafts ist in Abbildung 12 abgelichtet.



Abbildung 12: Wunddeckung unter Verwendung von Meek-Grafts [101]

Als provisorische Wundauflagen stellt die allogene Spalthaut beziehungsweise Bank- oder Fremdhaut das Mittel der Wahl dar. Schon im Jahre 1872 wurde der Heilungsvorgang von Brandverletzungen nach Transplantationen von Allografts dokumentiert, jedoch fungierten diese nur für den provisorischen Wundverschluss, da die Leichenhaut abgestoßen wurde und sich das Wundgebiet entzündete [102].

Aufgrund kostspieliger Analysen hinsichtlich etwaiger übertragbarer Infektionskrankheiten der Haut wie auch dem geringen Angebot potentieller Spender handelt es sich bei kryo- oder glycerolkonservierter humaner Leichenhaut um die teuerste Wundaufgabe. Allografts menschlicher Haut zeichnen sich durch die Reduktion von Keimen wie auch des Schmerzempfindens aus und beschränken den Verlust von Proteinen und Wundsekret. Darüber hinaus regen sie den Heilungsvorgang der Verbrennungswunden an. Als Xenograft wird ein Transplantat einer anderen biologischen Spezies bezeichnet, welches als kryokonservierte, xenogene Schweinehaut in Europa zur Verfügung steht. Nachdem

Xenografts schon nach 3-6 Tagen auszutauschen beziehungsweise abzulösen sind, beträgt die Beständigkeit von Allografts 14 Tage. Sogar präparierte Froschhaut kommt in einigen Entwicklungsländern als Xenograft zur Anwendung. Prinzipiell weisen auch Xenografts in abgeschwächter Form die elementaren Funktionen der menschlichen Fremdhaut auf. Allem Anschein nach sind biologische Wundaufgaben jedoch nur noch auf bestimmte Indikationen beschränkt, wie beispielsweise für die Sandwich-Technik oder die Präparation des Wundgrundes vor Keratinozyten-Transplantation. Synthetische Materialien, wie etwa Epigard<sup>®</sup>, werden nicht zuletzt aufgrund der geringeren Kosten und Risiken bevorzugt [77].

Der definitive Wundverschluss spalthauttransplantierter Brandverletzungen dritten Grades mit Destruktion von dermalen Gewebsschichten resultiert aus verstärkter Narbenbildung und Wundkontraktion. Verminderte Flexibilität und Regenerationsfähigkeit sind ebenso wie die Volumenvergrößerung des Gewebes durch den Verlust der Lederhaut zurückzuführen, welche ausgenommen von Barrierefunktion und Wärmeisolation quasi sämtliche Aufgaben der Haut erfüllt. Als dermale Matrix steht Integra<sup>®</sup> Dermal Regeneration Template zur Verfügung, das einem dreidimensional angeordneten Membransystem aus zwei Schichten entspricht. Eine Kombination aus Rinderkollagen und dem Glykosaminoglykan Chondroitin-6-Sulfat bildet die Innenschicht des Materials mit einer Porengröße von 70-200µm, die für den schrittweisen, biologischen Abbau ausgelegt ist. Die Vernetzung aus Rinderkollagen und Glykosaminoglykan besitzt eine geringe biologische Aktivität, allerdings entsteht nach dem Heilungsprozess des Wundbettes mit dem Transplantat eine schwache Entzündungsreaktion mit fibrovaskulärem Einwachsen von Bindegewebe und dem Eindringen von Endothelzellen, was zur kompletten Abtragung der Matrix nach mehreren Monaten führt [103].

Eine dünne (0,23 mm) Polysiloxanschicht fungiert ähnlich der Epidermis als Schutz vor Keimeindringung und Austrocknung des transplantierten Wundbettes. Drittgradige Verbrennungswunden mit vollständiger Destruktion der Lederhaut gelten als Indikation für den dermalen Hautersatz. Die Übertragung des Integra<sup>®</sup> auf das Wundgebiet resultiert in verbesserter Wiederherstellung dermalen Hautschichten und reduzierter Bildung von Narbengewebe [104].

Das Wundbett wird mit dem Integra<sup>®</sup> bedeckt und die äußere Polysiloxanschicht wiederum mit einem ultradünnen Autograft überzogen [105].

Zur Transplantation in lediglich einer Sitzung ist die Substanz mittlerweile auch ohne Polysiloxanschicht erhältlich. Die Vernetzung aus Elastin und Rinderkollagen steht seit Januar 2005 als dreidimensionale Matrix für die Restitution dermalen Hautbestandteile (Matriderm®) zur Verfügung. Nachdem dieses dermale Substitut eine geringere Dicke als Integra aufweist und lediglich in einer Operation transplantiert und simultan mit autologer Spalthaut überzogen werden kann, ist Matriderm® gegenüber Integra® im Vorteil. Die Behandlungsergebnisse nach der Verwendung von Matriderm® sind seither besonders aussichtsreich [106, 107]. Unterschiedliche Ergebnisse der Wunddeckung mithilfe von ausschließlich Spalthaut, der Kombination von Spalthaut und Matriderm® sowie der Kombination von Integra® und Spalthaut eines Musculus biceps brachii sind in Abbildung 13 veranschaulicht.



Abbildung 13: Wunddeckung des Musculus biceps brachii mittels Spalthaut (links), Matriderm® und Spalthaut (Mitte), Integra® und Spalthaut (rechts) [108]

### 3.9 Intensivtherapie bei Schwerbrandverletzten

#### 3.9.1 Vorteil einer Brandverletzteneinheit

Zur Versorgung von thermischen und nicht-thermischen Verletzungen sollte idealerweise eine etablierte Brandverletzteneinheit in Zusammenarbeit mit einem ausgewiesenen Traumazentrum auch über eine Intensivstation für Schwerbrandverletzte verfügen. Diese muss sich nicht unbedingt im selben Traumazentrum befinden, welches Patientinnen und Patienten nicht-thermischer Verletzungen behandelt. Um Verbrennungswunden adäquat

versorgen zu können, bedarf es spezieller Gerätschaften, wie beispielsweise Duschliegen, wie auch Überkopfwärmer, weshalb separate Behandlungsräume für Schwerbrandverletzte optimal sind. Bei vorgeschriebenen Richtlinien für den Transfer in die Intensivstation für Schwerbrandverletzte, kann sich diese auch in einem anderen Krankenhaus befinden [109].

Sämtliche Aspekte einer akkuraten Therapie für Schwerbrandverletzte lassen sich dennoch besser umsetzen, wenn sich alle Spezialistinnen und Spezialisten in derselben Einrichtung befinden, womit eine vollständige Untersuchung der Patientinnen und Patienten in kürzerer Zeit und mit weniger Kosten ermöglicht wird, als dies in verschiedenen Einheiten realisierbar wäre. Die kurzen Entfernungen kommen vielen Patientinnen und Patienten zugute, müssen schließlich viele von ihnen weite Distanzen von zuhause für Nachuntersuchungen zurücklegen [110].

Sympathikusmodulierte Schmerzsyndrome im Rahmen einer Brandverletzung bewirken eine Gefäßverengung, ähnlich wie Hypothermie eine Vasokonstriktion der Gefäße in der Haut hervorruft. Zwar gilt das Abkühlen von Verbrennungswunden unter 20% VKO mit Leitungswasser bei 20°C als Initialtherapie, um Analgesie und lokalisierte Reduktion von Ödemen zu erzielen, zieht das Abkühlen von Brandverletzungen mit hoher VKO quasi stets eine Hypothermie nach sich. Ein angepasstes Temperaturmanagement ist daher bei Transfervorgängen, initialen Behandlungsmaßnahmen im Spital und sämtlichen operativen Eingriffen unerlässlich, um den Zustand der Hypothermie zu vermeiden. Die aus Unterkühlung resultierenden gestörten Heilungsvorgänge der Wunden sowie Gefäßverengungen lassen sich abhängig von Ausbreitung und Intensität der Brandverletzung durch Umgebungstemperaturen bis zu 45°C verhindern [77].

### **3.9.2 Organersatz-Niere**

Das akute Nierenversagen gilt als mögliche letale Komplikation der Verbrennungskrankheit. Neben der Korrektur des Wasser- und Elektrolythaushaltes stellt die Beseitigung der möglichen Ursache die Initialtherapie des akuten Nierenversagens dar, welches sich durch verminderte Harnausscheidung bemerkbar macht. Eine Abnahme der ausgeschiedenen Urinmenge  $<0,5 \text{ mL/kg KG/h}$  über 6 Stunden kennzeichnet den Beginn des akuten Nierenversagens.

Verminderte Durchblutung der Nieren infolge von Minderperfusion gilt als prärenalere Auslöser dieses Krankheitsbildes, wohingegen Sepsis oder Medikamente als intrarenale Ursachen zu nennen sind. Mittels Laboruntersuchungen lassen sich die verschiedenen Ätiologien nachweisen. Die renale Minderdurchblutung sollte bei prärenalere Auslösern mittels Flüssigkeitssubstitution ausgeglichen werden, welche unter invasivem Monitoring und körperlicher Untersuchung überwacht wird. Sowohl die Erhöhung der Flüssigkeitszufuhr als auch deren Reduktion können mit verheerenden Folgen für die Nierenfunktion einhergehen. Hat die Nekrose der Nierentubuli bereits eingesetzt, kann auch die Hydratation keine Wiederherstellung der renalen Funktion bewirken. Dennoch bleibt sie die wirkungsvollste Prophylaxe des Nierenversagens und stellt gleichzeitig die Initialmaßnahme dar [111].

Nachdem ein angemessener Volumenstatus erreicht wurde, müssen sämtliche Nephrotoxine abgesetzt beziehungsweise entfernt werden. Anionenaustauscherharze, Insulin und Glukose dienen der Medikation bei Hyperkaliämie sowie Natriumbikarbonat bei aufgetretener metabolischer Azidose. Eine Anpassung der Pharmaka, welche über die Nieren ausgeschieden werden, ist obligat [112].

Steht die Diagnose des akuten Nierenversagens fest, kann eine forcierte Diurese in Erwägung gezogen werden, insbesondere bei Hypervolämie. Bei Schwerbrandverletzten kann durch Flüssigkeitsrestriktion ebenfalls ein Volumenüberschuss ausgeglichen werden. Der insensible Flüssigkeitsverlust über die Wundflächen kann grob mittels  $3750 \text{ ml/m}^2$  TBSA der Brandwunden plus  $1500 \text{ ml/m}^2$  TBSA der gesamten Körperoberfläche berechnet werden. Einige Komplikationen hinsichtlich des Volumenüberschusses ließen sich durch die Reduktion der infundierten Volumina sowie der enteralen Ernährung unter jene der Volumina der insensiblen Flüssigkeitsverluste vermeiden. Weiters kann ein gestörter Elektrolythaushalt durch die erhöhte orale Verabreichung von Bikarbonat und verminderte Kaliumzufuhr über die enterale Ernährung ausgeglichen werden. Eine exogene Kaliumzufuhr ist bei Schwerbrandverletzten quasi stets indiziert, da es zum Kaliumverlust aufgrund der erhöhten Aldosteronsekretion kommt. Demnach stellt eine Hyperkaliämie sogar bei Patientinnen und Patienten mit Niereninsuffizienz eine Rarität dar. Als standardisierte Ersatztherapie kommt bei akutem Nierenversagen auch die intermittierende Dialyse zum Einsatz, wobei Volumenüberschuss und Abweichungen des Elektrolythaushaltes, welche durch andere Therapiemaßnahmen nicht auszugleichen sind, als Indikationen für die Dialyse gelten.

Bei Patientinnen und Patienten mit lebensbedrohlichem Zustandsbild hat sich ebenso die kontinuierliche Dialyse als Nierenersatzverfahren etabliert [113].

Die kontinuierliche Dialyse ist der intermittierenden Dialyse aufgrund der akkurateren Kontrolle des Stoffwechsels und des Volumenstatus wie auch angesichts der reduzierten Hämodynamik und verbesserten Möglichkeit, schädigende Zytokine abzutransportieren, überlegen [114]. Vorausgesetzte Antikoagulation und genauere Überwachung stellen die Nachteile der kontinuierlichen Dialyse dar, wobei Blutungen eine dominierende Komplikation bei antikoagulierten Schwerbrandverletzten darstellen [115]. Untersuchungsergebnisse konnten bis heute noch keine signifikanten Vorteile der kontinuierlichen Dialyse gegenüber der herkömmlichen intermittierenden Dialyse belegen [116].

Für Patientinnen und Patienten mit akutem Nierenversagen schweren Ausmaßes durch Verbrennungswunden steht als weitere Therapiealternative die Peritonealdialyse zur Verfügung [117]. Elektrolytstörungen und Volumenüberschuss können ausgeglichen werden, indem ein Katheter am Krankenbett in die Bauchhöhle eingebracht wird und dadurch einen beinahe kontinuierlichen Stoffaustausch bewirkt. Außerdem stellt die Peritonealdialyse eine kostengünstige Therapiemaßnahme dar. Abweichungen der Kalium- und Bikarbonat Spiegel werden korrigiert sowie hypertone Lösungen zum Ausgleich des Flüssigkeitsüberschusses verabreicht. Das Dialysat verbleibt für 30 Minuten im Abdomen, während der Prozess der Drainage ebenfalls 30 Minuten in Anspruch nimmt. Dieser Vorhang lässt sich zyklisch wiederholen. Während der akuten Phase sind täglich 4 bis 6 dieser Zyklen mit einer Verlängerung der Verweildauer des Dialysates auf 1 Stunde zielführend. Insbesondere bei Patientinnen und Patienten mit Erhalt der Harnausscheidung kann die Nierenfunktion nach der eingeleiteten Dialyse wieder eintreten. Demnach sind diese meist nicht lebenslang an die Dialysetherapie gebunden. Verminderte Harnausscheidung nach begonnener Dialyse ist klinisch beobachtet worden, dennoch kann diese nach einigen Tagen bis Wochen wieder ansteigen, sobald sich der akute Heilungsprozess der Verbrennungswunde dem Abschluss nähert.

### **3.9.3 Organersatz-Lunge**

Intubation und künstliche Lungenventilation mittels Beatmungsgeräten sind nur für eine bestimmte Gruppe von Brandverletzten als Indikation angezeigt. Eine möglichst rasche Intubation hat bei Patientinnen und Patienten mit thermischen Verletzungen der oberen Atemwege sowie bei manifestem Inhalationstrauma zu erfolgen. Bei Brandopfern mit thermischen Verletzungen schweren Ausmaßes erzielt wie bei den übrigen Brandverletzten das konservative Prozedere die besten Resultate. Sofern keine kontrollierte Beatmung erfolgt, sind auch die Endergebnisse der Behandlung herausragender. Ob eine Intubation erforderlich ist, muss subjektiv entschieden werden. Liegt kein Inhalationstrauma vor, hat eine Intubation erst ab ca. 60% VKO durchgeführt zu werden. Als maschinelle Beatmung bezeichnet man die Erzeugung eines Überdruckes im Epipharynx mit nachfolgendem Druckgefälle hinwärts der Lungenbläschen. Ist die Inspiration abgeschlossen, erhöht sich der intrathorakale Druck aufgrund des Überdrucks. Nachfolgend tritt ein Abfall der Vorlast des Herzen ein. Der Mittelwert von endexpiratorischen und endinspiratorischen Lungenvolumina lässt sich durch den positiven endexpiratorischen Druck erhöhen, wodurch das endexpiratorische Lungenvolumen ansteigt oder bei verminderter Dehnbarkeit der Lunge aufgrund von Atelektasen wieder Normwerte annimmt. Bei künstlicher Lungenventilation mittels Beatmungsgeräten wie auch bei der Spontanatmung erfolgt die Expiration passiv infolge der von elastischen Fasern der Lunge erzeugten Retraktionskräfte. Demnach erzeugt die maschinelle Beatmung unphysiologische Druckverhältnisse, da während des gesamten Atemzyklus eine intrapleurale Druckerhöhung herrscht [118].

### **3.9.4 Intensivbehandlung**

Intubation und künstliche Lungenventilation mittels Beatmungsgeräten gilt bei Brandverletzten ohne Inhalationstrauma erst als Indikation, wenn sich ein Kapillarlecksyndrom gebildet hat und durch Ödembildung die Funktionalität der Lunge beeinträchtigt wird, wodurch die Atemarbeit ansteigt. Das Beatmungsgerät muss abhängig von der geleisteten Atemarbeit diese vollständig (full ventilatory support) oder teilweise (partial ventilatory support) ersetzen. Der maschinelle Organersatz der Lunge stellt somit den alveolären Gasaustausch durch vollständigen oder teilweisen Ersatz der Atemarbeit sicher.

Ebenso wird ein Atemwegsschutz gewährleistet sowie eine Überblähung der Lunge verhindert. Ein hoher PEEP und geringer Druck bei der Inspiration ermöglichen niedrige Druckamplituden mit geringen hämodynamischen Nebenwirkungen. Die Destruktion von Lungengewebe durch die pulmonale Sauerstofftoxizität wird mittels lungenprotektiver Beatmung mit niedrigem  $\text{FiO}_2$  verhindert [118].

Obwohl eine erhöhte Gefäßpermeabilität der Mikrogefäße infolge thermischer Schädigung für mehrere Tage gegeben ist, gehen davon deutlich weniger zugrunde als in den ersten 24 Stunden. Die Verbrennungsödeme nehmen zu diesem Zeitpunkt quasi ihr höchstes Ausmaß an und der Zwischenzellraum kann erhöhte Natriumkonzentrationen aufweisen. Die zusätzliche Flüssigkeitstherapie hängt vom initial verabreichten Flüssigkeitsersatz ab. Die Verabreichung hypertonen Kochsalzlösungen während der gesamten Phase des Verbrennungsschocks zieht eine erhöhte Wasserzufuhr nach sich, um den Extrazellarraum von einem hyperosmolaren Zustand in einen isoosmolaren Zustand überzuführen. Eine Proteinzufuhr ist oftmals vonnöten, wenn keine kolloidale Lösung im Rahmen des Verbrennungsschocks zugeführt wurde und der intravasale Eiweißmangel eine Erniedrigung des kolloidosmotischen Drucks bewirkte. Die zu verabreichende Menge an Proteinen schwankt mit dem zuvor verwendeten Flüssigkeitsersatz. In den ersten 24 Stunden beschreibt die initiale Gabe von 2 ml/kg/% Ringer-Laktat-Lösung bei Erwachsenen und 3 ml/kg/% bei Kindern ohne kolloidale Lösung die modifizierte Brooke-Formel. Anschließend wird in den darauffolgenden 24 Stunden 5%iges Albumin in kolloidalen Lösungen in der Dosierung von 0,3-0,5 ml/kg/TBSA verabreicht.

Bei der Parkland-Formel werden in den ersten 24 Stunden ebenfalls keine kolloidalen Lösungen zum Ausgleich des Plasmavolumens eingesetzt, sondern 4 ml Ringer-Laktat-Lösung/kg KG/% VKO. Der Verlust des Plasmavolumens kann 20- 60% des Volumens des gesamten Blutplasmas betragen. Der Ersatz des Plasmavolumens erfolgt in den nächsten 24 Stunden mit kolloidalen Lösungen, welche 20% des zirkulierenden Blutplasmas entsprechen. Zusätzlich zu den kolloidalen Lösungen sind die Patientinnen und Patienten auf eine Flüssigkeitszufuhr zur Aufrechterhaltung des Wasserhaushaltes angewiesen, um den Effekt des Flüssigkeitsverlustes über Verdunstung auszugleichen. Der Erhaltungsbedarf für Flüssigkeiten beträgt  $1500 \text{ ml/m}^2$ . Der Flüssigkeitsverlust über Verdunstung lässt sich durch folgende Formel berechnen:  $[(25+\% \text{ VKO}) \cdot \text{m}^2 \cdot 24]$ . ( $\text{m}^2$  steht für TBSA in Quadratmeter). Die Summe aus Erhaltungsbedarf und Verlust über Verdunstung ergibt die Gesamtmenge des Flüssigkeitsbedarfs zur Aufrechterhaltung des

Wasserhaushaltes. Dieser Ersatz von Flüssigkeiten erfolgt über enterale Ernährung oder intravenöser Applikation, wobei halbisotone Kochsalzlösungen mit Kaliumzusatz verwendet werden sollten. Bei erwachsenen Brandverletzten gilt die Kaliumzufuhr von 120 mmol/Tag als angemessen, um den im Rahmen des Verbrennungsschocks entstehenden intrazelluläre Kaliumverlust auszugleichen. Nachdem Kinder ein anderes Verhältnis von Körperoberfläche zu Gewicht als Erwachsene aufweisen, benötigen diese vermehrt Flüssigkeit und ein erhöhtes Harnvolumen zur Ausscheidung von Stoffwechselendprodukten. Das Shriners Hospital for Children in Cincinnati empfiehlt eine Zufuhr von Flüssigkeiten von 1500 ml/BSA pro Tag für den Erhaltungsbedarf. Der Verlust von Flüssigkeit über Verdunstung benötigt einen Ausgleich von  $(35+\% \text{ VKO}) \cdot \text{BSA} \cdot 24$ . Die Harnausscheidung ist in der Initialphase 24-48 Stunden nach der zugezogenen Brandverletzung ein ungenauer Marker, um die Zulänglichkeit des Flüssigkeitsersatzes zu beurteilen. Schwerbrandverletzte Kinder bedürfen üblicherweise einer Harnausscheidung von 3-4 ml/kg/h, wohingegen Erwachsene mit Brandverletzungen schweren Ausmaßes 1500-2000 ml/Tag benötigen [119].

Als Modifikation der Parkland-Formel konnte sich die sogenannte Ludwigshafener-Formel in der Verbrennungsmedizin bewähren. Hierbei werden die ersten 24 Stunden in vier Perioden aufgeteilt. Diese entsprechen 4, 4, 8 und 8 Stunden. Dabei wird initial pro Periode ausschließlich 1 ml/kg KG/% VKO Ringer-Laktat-Lösung appliziert. In den darauffolgenden 24 Stunden wird zusätzlich 5% Humanalbumin abwechselnd mit freier Flüssigkeit verabreicht [77].

### **3.10 Komplikationen**

Für gewöhnlich versterben Schwerbrandverletzte aufgrund von zwei Ursachen. Ein rasch eintretender letaler Ausgang wird durch den Verbrennungsschock hervorgerufen, während ein spät auftretender Exitus letalis aus Multiorganversagen und Sepsis resultiert. Die suffiziente Anwendung der Flüssigkeitstherapie bei Patientinnen und Patienten mit Verbrennungswunden großen Ausmaßes löste den Verbrennungsschock als Haupttodesursache thermischer Verletzungen ab, welcher nun von Sepsis und damit einhergehendem Multiorganversagen ersetzt wurde. Viele Schwerbrandverletzte, welche Sepsis und Multiorganversagen entwickeln, versterben nicht abrupt, sondern sind auf Intensivtherapie, das Personal und die technische Ausstattung in den dafür spezialisierten

Einheiten für die lebenswichtige Unterstützung der Organfunktionen bis zur Genesung angewiesen. Die Begriff Verbrennungskrankheit wurde für gewöhnlich mit dem Terminus Sepsis assoziiert. In den Vereinigten Staaten von Amerika entwickelten 17,5% der schwerbrandverletzten Kinder mit Brandverletzungen von über 80% TBSA eine durch Bakteriämie nachgewiesene Sepsis. Die Mortalitätsrate der gesamten Altersgruppe belief sich auf 33%, wovon die meisten an Multiorganversagen verstarben. Bei vereinzelt Patientinnen und Patienten konnten sowohl eine Bakteriämie als auch eine Sepsis diagnostiziert werden, allerdings nicht in der Gesamtheit der untersuchten Personen. Diese Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass die Entstehung einer Verbrennungskrankheit und eines Multiorganversagens häufig mit dem Terminus Sepsis in Verbindung gebracht werden können, aber keinesfalls mit dieser einhergehen müssen. Das Hauptaugenmerk sollte auf die Entzündung gelegt werden, denn bei schweren Verbrennungen ist der Entzündungsvorgang für die Heilung der massiven Hautverletzung unumgänglich. Man geht davon aus, dass zwischen Multiorganversagen und dem Systemischen inflammatorischen Response-Syndrom ein Kontinuum besteht [120].

Die SIRS-Kriterien, welche von der Konsensuskonferenz des American College of Chest Physicians und der Society of Critical Care Medicine bestimmt wurden, erfüllen beinahe alle Verbrennungspatientinnen und Verbrennungspatienten [121]. Demnach überrascht auch nicht bei Schwerbrandverletzten die Entwicklung einer Verbrennungskrankheit sowie eines Multiorganversagens. Unter den Patientinnen und Patienten, welche ein akutes Lungenversagen entwickeln, stellen Schwerbrandverletzte eine Minderheit dar. Generell löst Rauchgasintoxikation eine direkte Schädigung des Lungengewebes aus, die Betroffenen leiden infolgedessen unter Ateminsuffizienz und relativer Hypoxie aufgrund der erhöhten Kapillarpermeabilität, Fehlfunktion des Flimmerepithels und interstitieller Ödeme.

Der klinische Zustand verschlimmert sich infolgedessen nach wenigen Tagen, da die Anhäufung des geschädigten und nekrotischen respiratorischen Epithels eine Verstopfung der Bronchien mit Atelektasenbildung induziert. Die Entwicklung eines ARDS mit schwerer Hypoxie ist 4-6 Tage nach dem Verletzungsgeschehen dennoch bei Verbrennungsoptionen ungewöhnlich. Diese Gegebenheit ähnelt jener bei anderen Patientinnen und Patienten mit akutem Lungenversagen, beispielsweise nach Polytrauma infolge stumpfer Gewalteinwirkung sowie abdomineller Sepsis [97].

Eine Vielzahl von Brandverletzungen mit letalem Ausgang geht auf Inhalationstraumata und daraus resultierenden Infektionen zurück. Bezüglich isolierter Verbrennungsverletzungen weisen Kinder eine Mortalitätsrate von 1-2% auf. Thermische Verletzungen in Kombination mit einem Inhalationstrauma lässt die Sterblichkeitsrate von Kindern allerdings auf 40% ansteigen. Nach Rauchgasintoxikation ist eine Kohlenmonoxidvergiftung in Kombination mit Hypoxie die häufigste Todesursache. Sämtliche Verletzungen durch Flammeneinwirkung müssen bezüglich eines Inhalationstraumas untersucht und frühzeitig therapiert werden. Die Diagnosestellung lässt sich mittels Bestimmung des Carboxyhämoglobin-Wertes in der arteriellen oder venösen Blutgasanalyse erleichtern. Außerdem hat eine Versorgung des Brandopfers mit 100%igem Sauerstoff zu erfolgen. Kinder müssen nicht alle Anzeichen eines Inhalationstraumas präsentieren, inhalieren sie schließlich kältere und tiefergelegene Luft wegen ihrer geringeren Körpergröße. Die rasche Bestimmung des Carboxyhämoglobin-Wertes sowie die direkte Inspektion der Atemwege stellen bei Erwachsenen und bei Kindern sichere Methoden zur Diagnosestellung dar. Verbrennungen im Gesicht, erhöhte Carboxyhämoglobin-Werte >10%, versengte Nasenhaare, rußiges Sputum, benommener oder aufgeregter Gemütszustand wie auch Atembeschwerden stellen Hinweise eines potentiellen Inhalationstraumas dar [122].

Carboxyhämoglobin-Werte >60% nehmen zu mehr als 50% einen letalen Ausgang. Medikamentöse Therapie, Beatmung mit gegebenenfalls Intubation sowie die Sekretmobilisation stellen Behandlungsmöglichkeiten des Inhalationstraumas dar. Desai et al. bewiesen, dass eine Gruppe von Kindern mit inhalativ verabreichtem Heparin und Acetylsalicylsäure verglichen mit der Kontrollgruppe wesentlich seltener reintubiert werden musste, weniger Atelektasenbildung auftrat und die Mortalitätsrate geringer war [11].

Die Indikation der Intubation und künstlichen Lungenventilation mittels Beatmungsgeräten ist nur für eine bestimmte Gruppe von Brandopfern angezeigt. Bei Patientinnen und Patienten mit manifestem Inhalationstrauma sowie bei thermischen Verletzungen der oberen Atemwege hat jedoch eine möglichst rasche Intubation zu erfolgen [118].

Trotz beachtlicher Fortschritte auf dem Gebiet des Atemwegsmanagements bei Patientinnen und Patienten mit Inhalationstrauma sind viele Brandopfer auf die extrakorporale Membranoxygenierung angewiesen, da sie mittels Respirator nicht beatmet

werden können. Die Morbiditäts- und Mortalitätsrate des Inhalationstraumas ließ sich mithilfe der konventionellen extrakorporalen Membranoxygenierung reduzieren [123, 124]. Allerdings mussten andere Formen der extrakorporalen Lungenunterstützung in Erwägung gezogen werden, da sich die Handhabung der ECMO und die damit einhergehenden Risiken als unvorteilhaft erwiesen. An einem Schafsmodell wurde eine Vorrichtung zur extrakorporalen arteriovenösen CO<sub>2</sub>-Reduktion getestet [125], dadurch ließ sich das Atemminutenvolumen und der maximale Inspirationsdruck der Tiere reduzieren [126]. Der Einsatz dieser Vorrichtungen ist auf die Verwendung von Heparin angewiesen, demnach muss die Effektivität der extrakorporalen Lungenunterstützung auch mit der Wirkung von Heparin in Verbindung gebracht werden. Momentan werden multizentrische Studien über Kinder mit Inhalationstrauma durch Brandunfälle durchgeführt, welche die Therapie mithilfe dieser Gerätschaften untersuchen.

Die rasche Begutachtung einer infizierten Verbrennungswunde ist für die Diagnose und Therapie von Infektionen unerlässlich. Betrifft das Wundgebiet einen beziehungsweise mehrere Herde oder hat es generell eine violette, dunkelbraune oder schwarze Färbung angenommen, spricht dies für die häufigsten lokalen Indikatoren einer Infektion der Verbrennungswunde [127]. Ein zusätzlicher, zuverlässiger Indikator in der akuten Phase ist der Übergang einer Verbrennungswunde 2. Grades zu einer Nekrose 3. Grades. Der Untergang von Gewebe eines Areales nach Wundexzision, dessen Wundbett zuvor eine gute Hämoperfusion aufwies, deutet auf eine lokale Infektion in der Spätphase hin. Farbwechsel der Unterhaut, der Nachweis des grünen Farbstoffes Pyoyanin im Subkutangewebe, violette Färbung unversehrter Haut und/ oder Ödeme am Rand des Wundgebietes sprechen ebenfalls für eine Infektion. Löst sich der Wundschorf unerwartet früh, was vermutlich auf die Verflüssigung von Fett zurückzuführen ist und entstehen vom Zentrum zur Peripherie ausbreitende subkutane Ödeme mit zentralem, ischämischen Gewebsuntergang, sind dies lokale Indikatoren für eine Infektion der Verbrennungswunde durch Pilze [128].

Herpes-simplex-Virus Typ I Infektionen werden charakterisiert durch bläschenartige Veränderungen bei Brandverletzungen 2. Grades mit fortlaufendem oder abgeschlossenem Heilungsprozess und dem Nachweis von gezackten Wundrändern mit Krustenbildung zweitgradiger Verbrennungswunden im Bereich des Gesichts, insbesondere im nasolabialen Areal [129].

Die Anlage von Kulturen ist bei klinischem Verdacht auf eine Infektion unerlässlich. Zur Bestimmung der Organismen auf dem Wundgebiet und der Besiedlung des Biofilms wird von Oberflächenkulturen Gebrauch gemacht. Eine Besiedlung von Keimen kann selbst mittels quantitativer Kulturen nicht von einer Infektion differenziert werden. Das Vorhandensein oder Fehlen einer Infektion lässt sich in der klinischen Routine mithilfe der quantitativen Bakterienanzahl ermitteln. Mit einem erhöhten Invasionsrisiko sind Bakterienkulturen des Wundabstriches assoziiert, welche über  $1 \cdot 10^5$  Organismen/ Gramm Gewebe aufweisen [130].

Wird ein für Brandverletzungen gewöhnlicher Ausbreitungsgrad des Erythems überschritten, kann dies auf Zellulitis hindeuten. Diese resultiert aus Infektion des unversehrten Gewebes der Umgebung und wird von erhöhter Sensibilität, Wärme und Schmerzempfinden sowie fortschreitender Schwellung oder Verhärtung begleitet. Mitunter kann eine Lymphangitis auftreten, dies allerdings nur selten [131].

Des Weiteren ist nach Hauttransplantationen oder vor Wundverschluss die infektiöse Impetigo als Krankheitsbild bei Verbrennungen zu nennen. Hierbei können Brandverletzungen 2. Grades nach Spontanheilung sowie Spenderareale von Spalthauttransplantaten ulzerieren wie auch die Destruktion bereits befestigter Hauttransplantate eintreten. Sofern der oftmals in Kulturen identifizierte Keim *Staphylococcus aureus* das toxische Schocksyndrom Toxin 1 bildet, spricht dies für eine systemische Reaktion großen Ausmaßes [77].

Schwerwiegende Verbrennungswunden gehen bei Kindern und Erwachsenen mit einer langen Aufenthaltsdauer auf Intensivstationen einher. Durch die Immobilisation wird Knochen- und Muskelmasse abgebaut. Nachdem diese Patientinnen und Patienten einen gesteigerten Stoffwechsel aufweisen, verstärkt sich dadurch der Abbau. In einer retrospektiven Studie wurden 24 Kinder mit schwerwiegenden Brandverletzungen in Bezug auf die Veränderungen der Körperkomposition untersucht, die zwischen 2000 und 2016 im Shriners Hospital for Children in Galveston/ Texas therapiert wurden. Dabei wurde eine deutliche Abnahme der Lean Body Mass und Gesamtmasse der oberen Extremitäten im Vergleich zu den unteren Extremitäten während des Aufenthaltes auf der Intensivstation aufgezeigt [132].

## **3.11 Spezielle Kapitel**

### **3.11.1 Schmerztherapie**

Nachdem die Schmerztherapie von Brandverletzten auf die Erfordernisse sämtlicher Altersgruppen abgestimmt sein muss, wird ein großes Augenmerk sowohl auf besonders junge als auch alte Patientinnen und Patienten hinsichtlich Analgesie gelegt. Da sich junge Schwerbrandverletzte kaum über Schmerzen beklagen, neigt man dazu, diesen weniger Medikation zu verabreichen. Diese Ansicht wird durch zurückgezogenes, anstelle von schreiendem Verhalten mancher Kinder erklärt, welche Schmerzen erleiden. Jedoch empfindet ein Kind im Alter von 3 Monaten denselben Schmerz wie ein Erwachsener im Alter von 30 Jahren, daher sind bei Kindern nach Anpassung auf Körpergröße und Alter die gleichen therapeutischen Optionen angebracht. Einen besonderen Aspekt in der Schmerztherapie junger Kinder stellt das Risiko der Opiatgabe dar. Beispielsweise wurde 1998 in Seattle berichtet, dass drei Kinder Atemdepressionen erlitten, nachdem sie mit der Standarddosierung für Opiate anderer Altersgruppen therapiert wurden. Ähnliches ereignete sich im Shriners Hospital in Galveston. Hierbei konnte in allen Fällen eine erfolgreiche Antagonisierung der Opiate mittels Naloxon erreicht werden. Womöglich reagieren junge Kinder auf die atemdepressive Nebenwirkung von Opiaten sensibler [133].

Als initiale Therapie wird Brandverletzten Remifentanyl und Morphin sowie S-Ketamin verabreicht, um die Opioidgabe gering zu halten. Intensivmedizinische Maßnahmen werden durch die Sedierung nach Gabe von S-Ketamin vereinfacht. Darüber hinaus stellen Brandverletzungen >70% VKO, Inhalationstraumata, ein reduzierter Allgemeinzustand wie auch zusätzliche Traumata, welche operativ behandelt werden müssen, Intubationsindikationen dar. An erster Stelle steht jedoch der Wiedereintritt der Spontanatmung mit Aufrechterhaltung des Schutzreflexes. Eine Tracheotomie wird oftmals bei respiratorischen Komplikationen mit beschwerlichen Beatmungsmaßnahmen in Erwägung gezogen [134-136].

### **3.11.2 Spezielle chirurgische Techniken**

Durch ellipsenförmige Exzision einer alten Narbe mit damit einhergehender Verlängerung aller Wundseiten oder mittels Ergänzung von Gewebe im Rahmen einer Z-Plastik, einer Hauttransplantation oder einer Lappenplastik lässt sich eine Verlängerung der Kontrakturlinie ermöglichen. Dies wird bewerkstelligt, indem zwei dreiecksförmige Lappen in ihrer Lokalisation ausgetauscht werden, um zu Ungunsten des angrenzenden Gewebes entlang einer Hautfalte oder Narbe eine Verlängerung zu erreichen [137]. Durch die häufige Anwendung dieser Technik in der operativen Versorgung von Verbrennungswunden kann man sie nahezu als Verlängerung des direkten Wundverschlusses bezeichnen. Die Z-Plastik ermöglicht die Auflösung von Kontrakturen unter Zunahme der Länge, eine Verlagerung der Lappen an Stellen mit unzureichendem Gewebe, eine Richtungsänderung der Narbe und damit eine bedeutende Technik der Narbenrevision [138]. Können durch Exzision und direktem Wundverschluss keine erfolgsversprechenden Ergebnisse erzielt werden, kommen Vollhautinterponate zum Einsatz [137]. Durch breitflächige Retraktion der Wundränder nach In- oder Exzision der Narbenkontraktur entsteht ein Mangel an Gewebe, welcher durch Spalthaut- oder Vollhautinterponate ersetzt werden kann. Diese können auch an Arealen mit Narben oder bereits durchgeführten Hauttransplantationen minderwertiger Qualität oder schlechtem Farbabgleich der Haut eingesetzt werden [137]. Vollhautinterponate ähneln der normalen Haut mehr als Spalthautinterponate, gehen sie schließlich ohne Wundkontraktion an der Stelle des Empfängerareals, einer besseren Polsterung und Körperbehaarung sowie einem zufriedenstellenderen Farbabgleich der Haut einher.

### **3.11.3 Vollhautinterponate**

Eine Empfängerstelle mit hervorragender Vaskularisation ist für das ideale Anwachsen und Verheilen des Transplantats Voraussetzung. Zur Entwicklung der Gefäßversorgung ist aufgrund der Dicke des Vollhautinterponats eine erhöhte Nährstoffzufuhr erforderlich. Nachdem das Spenderareal aufgrund der nicht vorhandenen Hautanhangsgebilde keine Spontanheilung induzieren kann, stellt dieser Aspekt den gravierenden Nachteil dieser Transplantate dar. Ein direkter Wundverschluss muss nach Entnahme aus dem Spenderareal möglich sein, deshalb ist die Größe des Interponats limitiert. Wird diese Vorschrift nicht eingehalten, muss bei großflächigen Vollhautinterponaten eine Versorgung des Spendergebiets mit Spalthautdeckung erfolgen [139]. In der chirurgischen

Therapie von Verbrennungswunden kommt diese Prozedur selten vor, zumal Spenderareale unversehrter Haut bei Brandverletzten limitiert sind.

### **3.11.4 Gewebeexpansion**

Die allmähliche Hautdehnung resultiert in einem geringgradigen Risiko für Gewebnekrose und Ruptur dermalen Gewebsschichten, während Epithelzellen und die Dicke der Epidermis grundsätzlich unverändert bleiben. Die Anzahl der Fibroblasten und Myofibroblasten steigt an, indessen die Lederhaut an Dicke verliert. Sowohl unter als auch über dem Hautexpander wird eine Muskelatrophie verzeichnet, zudem erfolgt eine Ausdünnung des Subkutangewebes. Keine dieser Gewebsveränderungen wirkt sich nachteilig auf den Gebrauch von Haut-Expander zur Gewebsrekonstruktion aus [137, 140], welche schon bei jungen Kindern nach Vollendung des dritten Lebensjahres zur Anwendung kommen können. Vereinzelt ist sogar Verwendung bei Kindern noch jüngerer Altersgruppen gegeben, vorzugsweise scheint das Alter vor Einschulung zu sein [141].

### **3.11.5 Hydrotherapie**

Hydrotherapie beschreibt den Einsatz von Wasser zur raschen Wundreinigung oder für Behandlungen von Rötungen und Narbenbildung, Hypertrophien, Farbabweichungen der Haut und Anzeichen eines Entzündungsvorganges. Dabei kommt heißes, mit Mineralien angereichertes Quellwasser zum Einsatz sowie in unterschiedlichen Wasserdrücken auf die Hautareale applizierte Druckstrahlgüsse. Die hydromechanische Stimulation der verbrannten Körperregionen kommt bei der heilkundlichen Bademethode zum Einsatz [142].

Auf die Behandlungserfolge nach dem dreiwöchigen Einsatz von Hydrotherapie auf brandgeschädigtes Gewebe bei vier Patientinnen- und Patientenfällen verweist die nachfolgende Abbildung 14.

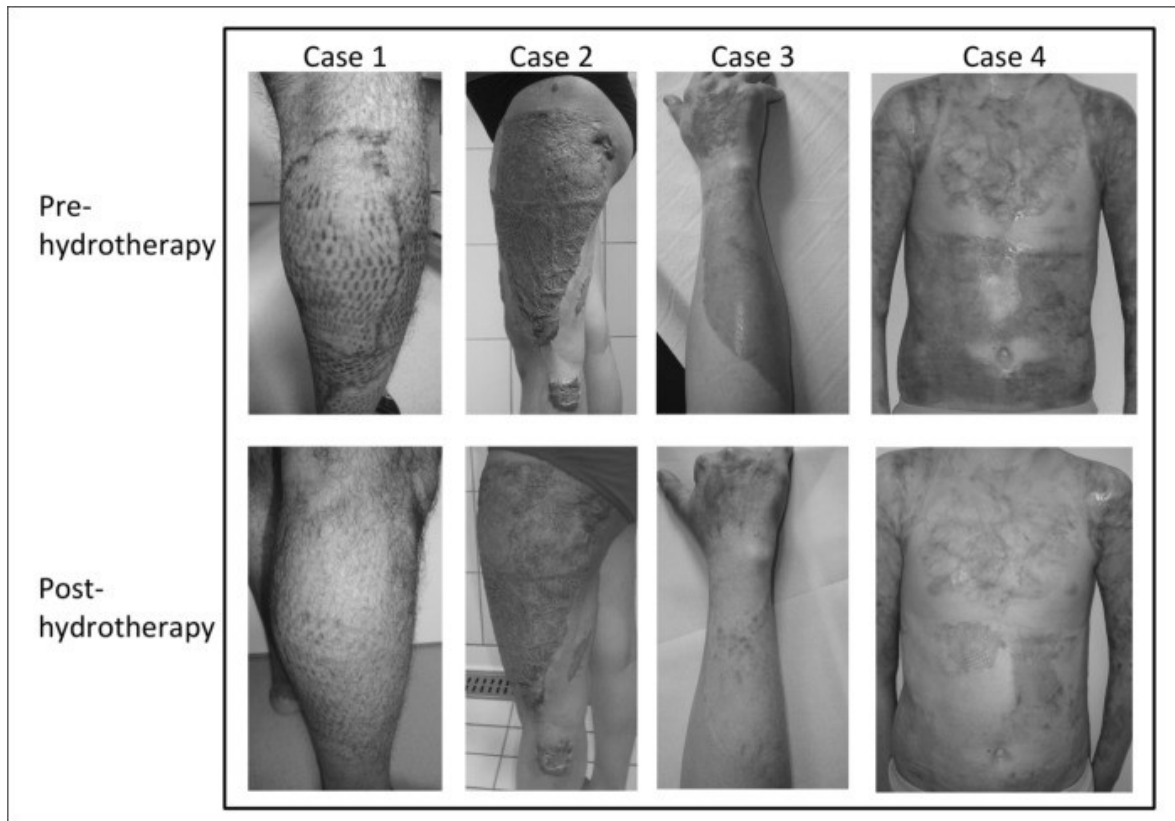


Abbildung 14: Vier Patientinnen- und Patientenfälle, welche das Anfangsstadium des geschädigten Gewebes und das Endresultat nach dreiwöchiger Hydrotherapie repräsentieren [143]

### 3.12 Narben

Die Wiederherstellung der physischen und psychischen Funktionen, wie auch die soziale Reintegration stellen das behandelnde Burn-Team für Brandverletzte aufgrund der Therapie von Verbrennungsnarben vor eine immense Aufgabe. Narben entsprechen nicht dem Schönheitsideal und werden als unansehnlich und beeinträchtigend angesehen. Neben Einschränkungen der Körperfunktionen verursachen Narben psychosoziale Störungen und emotionale Probleme. Um ungestörte anatomische Funktionsweisen wiederherzustellen, kann der Zustand *Restitutio ad integrum* bei der Regeneration des Hautorgans infolge von Traumata und Entzündungsprozessen niemals erreicht werden, außer im Fetalalter [144]. Im Vergleich zu unversehrter Haut weist die Narbenhaut variierte Merkmale auf. Obwohl noch nicht alle Details bezüglich der Reifung von Narben geklärt sind, hat sich die frühestmögliche Kompressionsbehandlung mit eigens dafür angefertigter Kompressionskleidung, fallweise ergänzend mit Pelotten, als wirkungsvoll erwiesen. Vornehmlich flächige Verbrennungsnarben lassen sich mit dieser Methode effektiv

behandeln. Dadurch werden sowohl funktionelle als auch ästhetische Einschränkungen optimiert, was das Erfordernis nachfolgender rekonstruktiver Operationen verringert. Solange der Reifungsprozess von Narben nicht abgeschlossen ist, lassen sie sich mithilfe der Kompressionsbehandlung modulieren. Ansehnliche und vorteilhafte Resultate sind bei 85% der Patientinnen und Patienten mit hypertrophen Narben zu verzeichnen [145-147]. Die mittels fortlaufender Druckapplikation erzielte Verminderung der Hämoperfusion lässt sich durch die Verengung und Verminderung der intraläsionalen Blutgefäße erklären [147], welche eine Ablassung der Narbe bewirken [148].

Die mit reduzierter Vermehrung von Fibroblasten einhergehende Reduktion der Kollagensynthese geht auf die verminderte Durchblutung und Hypoxie zurück [149]. Allerdings wirkt sich nicht bei allen Verbrennungsnarben eine Kompressionstherapie vorteilhaft auf das Behandlungsergebnis aus. Heilen die Brandverletzungen innerhalb von 7-14 Tagen ab, ist keine Kompressionsbehandlung indiziert. Nimmt die Wundheilung hingegen 14-21 Tage in Anspruch, sollte neben genauer Beobachtung gegebenenfalls die Anweisung prophylaktischer Kompressionskleidung erfolgen. Bei Verbrennungswunden, welche nach 21 Tagen verweilen, ist die Kompressionsbehandlung indiziert. Der ideale Kompressionsdruck zur Reduktion von hypertrophen Narben konnte noch nicht festgelegt werden. Es wird angenommen, dass Drücke über 40 mmHg zu Parästhesien und Gewebsdestruktion führen, wohingegen Drücke im Bereich von 10 mmHg für den Umbauvorgang des Narbengewebes genügen [150]. Elastische Bandagen wie Tubigrip<sup>TM</sup> finden Verwendung, sobald der Vorgang des Wundverschlusses beinahe beziehungsweise komplett abgeschlossen ist. Damit die frisch übertragenen Hauttransplantate sowie die empfindliche Haut nicht beschädigt werden, ist beim Anlegen dieser tubulären Bandagen Vorsicht geboten [151]. Hände und Finger lassen sich mittels frühzeitiger Druckapplikation dünner, elastischer und selbsthaftender Bandagen wie Coban<sup>TM</sup> behandeln. Für die Reduktion der Ödembildung stellt diese Variante der Kompressionstherapie eine exzellente Wahl für Kinder und Erwachsene dar, zumal sie Unterstützung bei der frühzeitigen Narbenbehandlung der Hände bietet, wenn die Wirkungen von Kompressionshandschuhen nicht erträglich sind. Verformungen der Handknochen gehen aus der zu straffen Anlage von Coban-Bandagen hervor, wohingegen zu lockere Bandagen in der Kombination mit elastischer Kompressionskleidung für die Arme zu Schwellungen führen. Die tägliche Entfernung der Bandagen ist durch behutsames Aufschneiden dieser indiziert.

Eine maßangefertigte Kompressionskleidung sollte 3-4 Wochen nach Wundverschluss angefertigt werden, da ab diesem Zeitpunkt eine Stabilisierung des Körpergewichts, eine Ödemreduktion wie auch eine höhere Belastbarkeit der Haut gegeben ist. Eine genaue Beobachtung der Wirksamkeit einer Kompressionstherapie nach Brandverletzungen ist bei Kindern aufgrund des Wachstums obligat [152].

Das Behandlungsregime der Verbrennungsnarben lässt sich durch die Narbenmassage erweitern, nachdem diese eine gewisse Reifung vollendet haben und strapazierbar sind. Sobald auf die Narbe Reibung ausgeübt werden kann, können senkrechte, rotierende und parallele Massagebewegungen durchgeführt werden. Mindestens zweimal täglich sollte für 5-10 Minuten jede Verbrennungsnarbe massiert werden. Bevorzugt werden täglich 3-5 Massagen für jeweils eine Verbrennungsnarbe durchgeführt. Hitzeapplikation und ein elektrisches Massagegerät können zusammen mit einem Narbenöl angewandt werden, lässt sich schließlich eine bessere Elastizität der Narbe durch den kombinierten Einsatz von Hitze und Massage erzielen. Mittels Hot Packs, Paraffinwachs, Fluidotherapie und durch Ultraschall übertragener Hitze reduziert sich die Spannung des Gewebes, wodurch erhöhte Elastizität zur verbesserten Modulation der Verbrennungsnarbe hervorgeht [153, 154].

Silikon lässt als Silikongel-Folienauflage hypertrophe Narben abflachen, beugt die Schrumpfung frisch übertragener Hauttransplantate vor und erhöht die Elastizität der Narbe und damit einhergehend wird die Bewegungseinschränkung der betroffenen Gelenke reduziert. Patientinnen und Patienten berichten über einen beruhigenden Effekt auf die Haut wie auch eine Schmerzlinderung. Die okklusive Wirkung bewirkt oftmals eine Anreicherung von Flüssigkeit an der Unterseite der Folie, wodurch das Gewebe aufgeweicht wird. Daher ist ein regelmäßiger Wechsel der Folien zur Säuberung und zum Abtrocknen der Haut unabdingbar. Die hohen Kosten und die kurze Haltbarkeit dieser Silikongel-Folien stellen den gravierenden Nachteil dieser Methode zur Narbenbehandlung dar [155-157].

Zur Behandlung von Keloiden kann ebenfalls Laserstrahlung zur Anwendung kommen. Dabei wird von gepulsten Laserstrahlen, wie beispielsweise CO<sub>2</sub>- oder Nd-Yag-Laser, Gebrauch gemacht. Mittels Lasertherapie lässt sich eine analgetische sowie antipruriginöse Wirkung auf das hypertrophe Narbengewebe erzielen [158]. Die ausschließliche Verwendung der Laserstrahlung bietet geringe Erfolgsaussichten hinsichtlich der Entfernung von Pigmentstörungen des Narbengewebes. Hierfür gewährleistet der

gemeinsame Einsatz des Nd-Yag-Lasers mit Silikongel-Folienauflagen beziehungsweise mit Kortisonapplikationen bessere Behandlungsergebnisse. Die versorgenden Narbengefäße werden mittels Photodermolyse intravaskulär koaguliert, wodurch eine sterile Vaskulitis mit nachfolgender Obliteration sowie Ruptur der Gefäße entsteht, mit abschließender Reduktion des Narbengewebes [159]. Darüber hinaus geht die Narbenbehandlung unter Zuhilfenahme von Laserstrahlung mit einer Denaturierung wie auch Reduktion der Synthese von Kollagen einher.

### **3.13 Interdisziplinäre Behandlung Brandverletzter**

Die Tatsache, dass Menschen speziell nahen Angehörigen oder hilflosen Kindern sowie Seniorinnen und Senioren schwerwiegende Verletzungen zufügen, stellt sich für den Großteil der Bediensteten im Gesundheitswesen als unglaublich dar. Trotz des unbehaglichen Maßes an Klarheit bezüglich der Aufklärung von Misshandlungen und Vernachlässigung sowie der fehlenden Bestätigung des Verdachts seitens der Familienmitglieder besteht eine erdrückende Beweislast angesichts brutalen, fremdverletzenden Verhaltens gegenüber Familienmitgliedern. Auch das Zufügen von Brandverletzungen an Kinder beinhaltet in manchen Fällen dieses Verhalten, welches seit Jahren in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert wird. [160].

Junge Kinder vor Vollendung des dritten Lebensjahres sind dem größten Risiko ausgesetzt, Misshandlungen durch Brandverletzungen wie Kontaktverbrennungen oder Verbrühungen zu widerfahren [62, 161-163]. Für gewöhnlich leben diese mit zwei oder mehreren Geschwistern in einem Haushalt alleinerziehender Eltern an der Armutsgrenze [62, 161, 163, 164].

Eine erhöhte Morbiditäts- sowie Mortalitätsrate geht mit Kindesmisshandlungen ebenso einher wie verlängerte Krankenhausaufenthalte [165-167]. Nachdem fürsorgliche Eltern spontan jegliche Einzelheiten über den Verletzungsvorhang ihrer Kinder schildern und Besorgnis angesichts der Behandlung und Prognose äußern, können suspektere Verhaltensweisen der Eltern Anzeichen für Kindesmisshandlungen sein. Eltern, welche ihre Kinder misshandeln, geben keine Informationen freiwillig preis. Ihre Behauptungen sind widersprüchlich und ausweichend, dem Kind gegenüber sind sie kritisch und wütend, da diesem Verletzungen zugezogen wurden. Reue und Schuldgefühle werden dabei nicht

empfundener. Es wird kein Interesse hinsichtlich Verletzungsvorgang, Behandlung und Prognose gezeigt, außerdem besuchen sie ihr Kind kaum und spielen ebenfalls nicht mit jenem. Über den Termin der Entlassung oder Hinweise bezüglich der Nachsorge wird nicht gefragt. Dem Kind gegenüber wird eine Art Gleichgültigkeit ausgedrückt, da sich die Eltern nur mit sich selbst beschäftigen. Fürsorgliche Eltern fühlen sich hingegen schuldig, besuchen ihr Kind öfter und beschenken dieses. Weiters erkundigen sie sich nach dem Entlassungstermin wie auch der Nachsorge [168].

Es besteht eine Korrelation zwischen präexistenten, psychiatrischen Erkrankungen und mutwillig oder versehentlich zugeführten Brandverletzungen schweren Ausmaßes, die stationäre Behandlungen erfordern. Der Zusammenhang zwischen schweren psychiatrischen Krankheitsbildern und dem Drang zu selbstverletzendem Verhalten ist eindeutig bewiesen [169]. Die Therapie und Handhabung von Verbrennungswunden kann sich bei psychiatrisch erkrankten Patientinnen und Patienten erheblich erschweren, gehen diese Krankheitsbilder schließlich mit unberechenbarem und abnormalem Verhalten und damit gefährdeter Genesung der Betroffenen einher. Es bestehen Schwierigkeiten seitens der psychiatrisch erkrankten Personen, die medizinischen und pflegerischen Anweisungen zu befolgen beziehungsweise anschließende klinische Maßnahmen einzuhalten. Ein verlängerter Krankenhausaufenthalt resultiert aus den sozialen Problemen der Betroffenen und den damit einhergehenden Schwierigkeiten bei der Entlassung. Edwards et al. bewiesen, dass Depressions- und Angstzustände bedeutende Hinweise auf verstärktes Schmerzempfinden, körperliche Fehlfunktionen und vermehrte Müdigkeit darstellen [170].

Für die Versorgung thermischer Verletzungen ist neben chirurgischen Fachgebieten die Einbeziehung anderer Berufsgruppen für die Entwicklung eines multidisziplinären Teamsettings unerlässlich. Dies lässt sich durch die Komplexität von Brandverletzungen erklären. Über die erforderlichen Kenntnisse und Fähigkeiten zur bestmöglichen Versorgung von Brandverletzten kann niemals eine einzelne Spezialistin oder ein einzelner Spezialist verfügen. Demnach vertraut man einer Gruppe von Expertinnen und Experten, um durch interdisziplinäres Teamsetting eine strukturierte Organisation zu gewährleisten.

Intensivmedizinerinnen und Intensivmediziner stellen einen bedeutenden Aspekt bei der Therapie von Brandverletzungen dar. Ihre Kenntnisse und Fähigkeiten ermöglichen eine Verbesserung der Beatmung, die Beurteilung der Lungenmechanik sowie eine Reduktion des Komplikationsrisikos. Dies beinhaltet die diagnostische Bronchoskopie und die

Begünstigung des Atemwegsmanagements im Falle eines Inhalationstraumas, die arterielle Blutgasanalyse, die optimierte Einstellung des Respirators wie auch die Verringerung der Atelektasenbildung und Reduktion des Risikos einer Pneumonie mittels verordneter Physiotherapie des Thorax. Klinisch kann die Beurteilung des Brandopfers die Auswertung einer indirekten Kalorimetrie zur Ermittlung des Energieverbrauchs im Ruhezustand sowie Lungenfunktionstests inkludieren [110].

Des Weiteren bilden Anästhesistinnen und Anästhesisten einen wichtigen Anteil des Burn-Teams. Patientinnen und Patienten mit Inhalationstraumata und damit einhergehenden beeinträchtigten Atemwegen bedürfen einer frühzeitigen Intubation und profitieren von erfahrenen Anästhesistinnen und Anästhesisten im Gebiet der fiberoptischen Intubation sowie einer genauen Beurteilung durch anschließende Bronchoskopie. Auf der Brandverletzteneinheit verfügen sie über Kenntnisse der Analgesie und Unterstützung der maschinellen Beatmung, Flüssigkeitstherapie und Kreislaufbeschwerden.

Die operative Versorgung von Brandverletzten wird von Spezialistinnen und Spezialisten aus dem Fachgebiet der Plastischen Chirurgie übernommen. Die leitende Plastische Chirurgin und der leitende Plastische Chirurg müssen gegebenenfalls Aufgaben an unterschiedliche Mitglieder delegieren und deren Unterstützung sowie klare Kommunikationsfähigkeit gewährleisten.

Der größte Anteil des Burn-Teams wird vom Pflegepersonal gebildet, welches täglich für die konsequente Versorgung der Verbrennungspatientin und des Verbrennungspatienten zuständig ist [110].

Somit erfordert die Primärversorgung sowie Nachbetreuung von Brandverletzten die bestmögliche Zusammenarbeit zwischen Intensivmedizinerinnen und Intensivmedizinern, Chirurginnen und Chirurgen, Anästhesistinnen und Anästhesisten und dem Pflegepersonal. Darüber hinaus wird das interdisziplinäre Teamsetting durch Spezialistinnen und Spezialisten aus dem Gebiet der Rehabilitationsmedizin sowie Physiotherapeutinnen und Physiotherapeuten, Ergotherapeutinnen und Ergotherapeuten, Psychologinnen und Psychologen, Logopädinnen und Logopäden wie auch Bandagistinnen und Bandagisten erweitert [171].

## 4 Diskussion

Obwohl sich die Pathophysiologie thermaler Verletzungen bei Kindern und Erwachsenen ähnelt, gibt es Unterschiede bezüglich Größenverhältnisse, Metabolismus und damit auch angesichts der Therapieformen. Pädiatrische Patientinnen und Patienten mit Wunden nach thermischer Einwirkung zeigen gehäuft ein Mosaik aus oberflächlich und tief dermalen Verbrühungen [90]. Sofern diese Verletzungen noch nicht den 3. Grad erreicht haben, lassen sich diese bevorzugt konservativ therapieren [91]. Erwachsene Verbrennungsoffer hingegen profitieren von der raschen und radikalen Exzision des verbrannten Gewebes mit anschließendem Wundverschluss [77]. In Anbetracht der untersuchten Literatur lässt sich allerdings nicht einfach sagen, dass Kinder konservativ und Erwachsene chirurgisch in Hinblick auf thermale Verletzungen zu versorgen sind, sondern dass die Rolle des Ausbreitungsgrades der Verletzung die Entscheidung für die jeweilige Therapiemaßnahme unterstreicht. Demnach muss jede Verletzung genau untersucht und beurteilt werden, um nachfolgend eine zufriedenstellende Behandlung gewährleisten zu können.

Das Verhältnis der Körperoberfläche zum Körpergewicht beträgt bei Kindern beinahe das Dreifache eines Erwachsenen. Daher gehen Brandverletzungen bei Kindern auch mit einem ausgeprägteren Flüssigkeitsverlust einher. Der Flüssigkeitsverlust durch Verdunstung ist bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen verhältnismäßig größer. Das größere Verhältnis der Körperoberfläche zum Körpergewicht begünstigt bei Kindern ebenfalls die Entstehung einer Hypothermie, welche durch ein angepasstes Temperaturmanagement es zu vermeiden gilt [172]. Tiefe zweitgradige Verbrennungen sowie Verbrennungen 3. Grades werden in sämtlichen Altersgruppen der Erwachsenen durch Exzision des nekrotischen Gewebes mit anschließender Transplantation eines Autografts versorgt. Im Grunde genommen können jedoch auch bei Kindern sämtliche operative Verfahren zur Wunddeckung in Anspruch genommen werden, welche auch bei Erwachsenen zum Einsatz kommen. Als Spenderareal zur Entnahme von Spalthaut hat sich bei Kindern der Kopf bewährt. Bei Kindern nimmt der Kopf 18-20% der gesamten Körperoberfläche ein und steht somit im Vergleich zu Erwachsenen in einem größeren Verhältnis [173].

Eine zufriedenstellende Einheilungsrate kann bei pädiatrischen Brandopfern sowohl nach gemeshter als auch nach ungemeshter Spalthauttransplantation verzeichnet werden. Darüber hinaus findet eine Vielzahl der synthetischen Hautersatzmaterialien für

Erwachsene ebenso in der Pädiatrie Verwendung. Synthetisch hergestellte Wundauflagen, wie beispielsweise Matriderm<sup>®</sup> und Integra<sup>®</sup> erzielen auch bei Kindern sowohl ästhetisch als auch funktionell verbesserte Resultate. Matriderm<sup>®</sup> lässt sich unmittelbar nach Auflage auf das exzidierte Wundgebiet mit Spalthaut abdecken, während Integra<sup>®</sup> einen drei- bis vierwöchigen Einheilungsprozess durchläuft und erst in einer zweiten operativen Sitzung mit Spalthaut abgedeckt werden kann [77]. Die Aussageabsicht der Autoren lautet daher, dass es keine Operationsmethode für erwachsene Brandopfer gibt, die man nicht auch bei Kindern anwenden kann. Hier sollte jedoch berücksichtigt werden, dass Kinder über deutlich weniger Spenderareal für die Entnahme von Spalt- oder Vollhauttransplantaten verfügen als Erwachsene. Zwar heilt das Wundgebiet entnommener Spalthaut des Kopfes schnell ab, erwähnt werden jedoch nicht die nachfolgenden Resultate der Entnahmestellen angesichts Ästhetik und Kosmetik. Darüber hinaus wird nicht erläutert, ob unterschiedliche Eigenschaften der entnommenen Spalt- oder Vollhauttransplantate im Vergleich derer von Erwachsenen bestehen. Zumal sich die Haut von Kindern und Erwachsenen unterscheidet, müssten demzufolge auch bei den jeweiligen Transplantaten Abweichungen zu verzeichnen sein.

Mortalitätsraten bei Brandunfällen im Haushalt deuten auf minimale Unterschiede bezüglich des Geschlechts, abgesehen von der Altersgruppe der zwei- bis fünfjährigen Buben, welche eine erhöhte Inzidenzrate aufweisen. In dieser Altersgruppe ist ebenfalls die höchste Rate an Brandunfällen ohne letalem Ausgang durch das unbeaufsichtigte Spielen mit Streichhölzern dokumentiert worden [37].

Seniorinnen und Senioren nehmen einen immer größer werdenden Anteil der Bevölkerungsdichte ein. Neben einer erhöhten Morbiditäts- und Mortalitätsrate weist diese Altersgruppe ebenso ein erhöhtes Risiko auf, Verbrennungswunden zu erleiden [49]. Hinsichtlich Brandunfälle zeichnen sich Seniorinnen und Senioren sowie Säuglinge durch die höchste Mortalitätsrate aus. Kinder verzeichnen mit zunehmendem Alter eine geringere Mortalitätsrate aufgrund von Brandverletzungen, was vermutlich auf die Weiterentwicklung des Immun- und Organsystems zurückzuführen ist. Seniorinnen und Senioren zeigen hingegen mit zunehmendem Alter auch eine erhöhte Mortalitätsrate auf [31].

Kardiovaskuläre, pulmonale, renale, hepatische wie auch neurologische Krankheitsbilder beeinflussen nicht nur die Dauer des Krankenhausaufenthaltes, sondern ebenso die

Mortalität. Im Erwachsenenalter bilden Komorbiditäten somit einen determinierenden Faktor hinsichtlich der Sterblichkeitsrate. Durch Zunahme der Anzahl von Komorbiditäten konnte ein Anstieg der Mortalitätsrate und eine erhöhte Dauer des Krankenhausaufenthaltes bei Erwachsenen verzeichnet werden [32]. Hier wird auf Patientinnen und Patienten mit Komorbiditäten im fortgeschrittenen Alter eingegangen. Auffällig ist, dass keinerlei Bezug auf Brandopfer mit Komorbiditäten im jungen oder erwachsenen Alter genommen wird. Zweifelsohne steht in diesen Altersgruppen weniger Patientinnen- und Patientengut zur Verfügung, allerdings ist nicht klar ersichtlich, ob die Komorbiditäten alleine oder die Kombination aus Komorbiditäten und fortgeschrittenem Alter die erhöhten Mortalitätsraten nach Brandunfällen bedingen.

Die Haut einer erwachsenen Person nimmt eine Fläche von 1,5 bis 2,0 m<sup>2</sup> ein, demgegenüber besitzen Neugeborene lediglich eine Hautoberfläche von 0,2 bis 0,3 m<sup>2</sup>. Die Cutis (Haut) setzt sich aus zwei Schichten zusammen. Die Epidermis nimmt als Oberhaut an Arealen der Augenlider eine Dicke von 0,05 mm und an den Fußsohlen mehr als 1 mm ein.

Die darunterliegende Hautschicht wird als Dermis bezeichnet und beträgt zumindest das Zehnfache der Epidermis. Frauen weisen eine geringere Hautdicke als Männer auf und Kinder besitzen eine weitaus dünnere Haut als Erwachsene. Bis zur Vollendung des 30. oder 40. Lebensjahres nimmt die Dicke der Haut zu, anschließend nimmt die Dicke im Alter kontinuierlich wieder ab [97].

Demnach ist die Zeit der Einwirkung thermischer Energie, welche Hautschädigung hervorruft, bei Kindern kürzer. Ein durchschnittlicher Erwachsener weist eine Hautdicke von 2,50 mm auf, während die Haut von Kindern vor Vollendung des 5. Lebensjahres eine Dicke von 0,56 mm aufweist. Je nach betroffener Hautdicke kann sich eine Verbrennungswunde epidermal (Grad 1), oberflächlich (Grad 2a) beziehungsweise tief (Grad 2b) dermal sowie ganz dermal (Grad 3) ausbreiten. Eine Verbrennungswunde dritten Grades wird bei einem Erwachsenen bei einer Wassertemperatur von 54°C nach 31 Sekunden ausgelöst, bei einem Kleinkind allerdings schon nach 10 Sekunden. Beträgt die Wassertemperatur 65°C, kommt es beim Kleinkind bereits nach einer halben Sekunde Einwirkzeit zu einer Verbrennung dritten Grades. Verbrühungen im Kleinkindesalter weisen initial eine kirschrote Farbe auf, wie oberflächlich dermal und haben sich meist erst nach 3-5 Tagen endgültig in die Tiefe der Haut ausgebreitet. Weiters geht die geringere

Hautdicke von Kindern gehäuft mit Dehydratation einher, welche infolge der reduzierten Reservekapazität, der gesteigerten Verdunstung von Wasser und des gesteigerten Bedarfs an Flüssigkeit entsteht. Auch die Kontrolle der Temperatur und damit assoziierter Hypo- oder Hyperthermie ist bei Kindern problematischer als bei Erwachsenen. Die Haut von Kindern neigt verstärkt zur hypertrophen Narbenbildung mit prolongiertem Reifungsprozess des Narbengewebes, außerdem neigen im Kindesalter Hautentnahmestellen ebenfalls zur hypertrophen Narbenbildung [2]. Auf histologischer Ebene gibt jeder Autor eine unterschiedliche Hautdicke für Kinder an, man sollte auf eine einheitliche Durchschnittsgröße verweisen können. Daran anschließend ergibt sich nebst dem ein weiterer Streitpunkt. Die Verfasser setzten sich stets mit den Unterschieden bei Brandverletzungen zwischen Kindern und Erwachsenen auseinander, jedoch wird kein Augenmerk auf die Geschlechter gelegt. Entsprechend müssten Frauen aufgrund ihrer dünneren Hautdicke im Vergleich zu Männern abweichende Erscheinungsbilder nach thermischen Verletzungen präsentieren. Auch die Lokalisationen werden ungenügend thematisiert. Eine Verbrühung der Fußsohle und eine Verbrühung der Haut im Gesicht werden bei gleicher Wassertemperatur und Einwirkzeit nicht das gleiche Verletzungsausmaß bewirken.

Das Flüssigkeitsmanagement bei brandverletzten Kindern stellt sich als besonders anspruchsvoll dar, da die Therapie bei Kindern exakter erfolgen muss als bei Erwachsenen mit Brandverletzungen vergleichbaren Ausmaßes. Die größte Aufmerksamkeit sollte dabei auf das Kapillarlecksyndrom gerichtet werden, welches in der akuten Phase der Verbrennung entsteht. Je größer das Ausmaß der Verbrennungswunde ist, desto höher ist der Verlust von Flüssigkeit aufgrund des Kapillarlecks. Erfolgt ein suffizienter Volumenersatz, regeneriert sich für gewöhnlich das kapilläre System nach ca. einem Tag [77].

Brandverletzungen gehen bei Kindern mit einem größeren Verlust von Flüssigkeit einher, da die Relation von Körpergewicht zu Körperoberfläche geringer ist als bei Erwachsenen. Die Gesamtblutmenge eines Neugeborenen beträgt 85-90 ml/kg KG, Kinder weisen ein Blutvolumen von 80 ml/kg KG auf und Erwachsene besitzen ein Volumen von 70 ml/kg KG zirkulierenden Blutes [174].

Eine Verbrennung mit 20% VKO resultiert bei einem 10-jährigen Kind in einem Flüssigkeitsverlust von 475 ml, was 60% der Gesamtblutmenge entspricht.

Ein Erwachsener mit einem Körpergewicht von 70 kg erleidet bei gleichem Verbrennungsausmaß 1100 ml Flüssigkeitsverlust beziehungsweise lediglich einen Verlust von 25% der Gesamtblutmenge. Zwar steht der Verlust von Flüssigkeit nach thermischen Verletzungen in einem direkt proportionalen Verhältnis zur VKO, dennoch lässt die bei Erwachsenen und Jugendlichen angewandte Neunerregel nach Wallace nicht korrekt auf die Körperoberfläche bei Kindern vor Vollendung des 15. Lebensjahres schließen. Die Schädeloberfläche von Kindern ist größer bei kleinerer Oberfläche der Extremitäten. Des Weiteren besteht keine direkt proportionale Relation zwischen Körpergewicht und Körperoberfläche, schließlich beträgt das Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpergewicht eines Kindes das Zwei- bis Dreifache eines Erwachsenen. Demzufolge sind bei thermisch verletzten Kindern Flüssigkeitsformeln anzuwenden, welche auf deren Körperoberfläche adaptiert sind. In der Verbrennungsmedizin kommen bei Kindern mit Verbrennungswunden bevorzugt zwei Formeln für den Volumenersatz zur Anwendung. Mithilfe der Galveston Shriners Burns Hospital-Formel lässt sich der Bedarf an Flüssigkeit in den ersten 24 Stunden aus  $5000 \text{ ml/m}^2 \text{ VKO}$  mit zusätzlichen  $2000 \text{ ml/m}^2 \text{ KOF}$  errechnen. Dabei sind 50% in den ersten 8 Stunden zu transferieren und die verbleibenden 50% in den darauffolgenden 16 Stunden [34, 175]. Am nächsten Tag werden  $3750 \text{ ml/m}^2 \text{ VKO}$  zuzüglich  $1500 \text{ ml/m}^2 \text{ KOF}$  als Erhaltungsmenge verabreicht.

Die Flüssigkeitsformel nach Cincinnati Shriners Burns Hospital entspricht der Baxter-Parkland-Formel [176] plus zusätzlich verabreichter Erhaltungsfüssigkeit.

Dies entspricht  $4 \text{ ml/kg/\% VKO}$  mit einer Ergänzung von  $1500 \text{ ml/m}^2 \text{ KOF}$  in den ersten 24 Stunden [177]. Die initiale Applikation von  $2 \text{ ml/kg/\% Ringer-Laktat-Lösung}$  bei Erwachsenen und  $3 \text{ ml/kg/\%}$  bei Kindern ohne kolloidale Lösung beschreibt die modifizierte Brooke-Formel in den ersten 24 Stunden. Anschließend wird in den darauffolgenden 24 Stunden 5%iges Albumin in kolloidalen Lösungen in der Dosierung von  $0,3\text{-}0,5 \text{ ml/kg/TBSA}$  verabreicht. In der Verbrennungsmedizin konnte sich außerdem die sogenannte Ludwigshafener-Formel als Modifikation der Parkland-Formel bewähren. Hierbei erfolgt eine Aufteilung der ersten 24 Stunden in vier Perioden.

Diese entsprechen 4, 4, 8 und 8 Stunden. Zu Beginn wird pro Periode ausschließlich  $1 \text{ ml/kg KG/\% VKO Ringer-Laktat-Lösung}$  verabreicht, in den darauffolgenden 24 Stunden erfolgt die zusätzliche Applikation von 5%igem Humanalbumin abwechselnd mit freier Flüssigkeit [77].

Ein Elektrolytmangel lässt sich durch den Flüssigkeitsersatz ebenfalls ausgleichen, allerdings sollte dieser im Falle einer intravenösen Applikation isoton sein. Zumeist wird initial eine Ringer-Laktat-Lösung verabreicht, wodurch der Elektrolytverlust aufgehoben wird.

Es handelt sich allerdings bei den genannten Formeln, gleichermaßen wie bei Erwachsenen, einzig um Richtlinien für die zu transfundierende Menge an Flüssigkeit. Die akkurate Flüssigkeitsmenge muss auf die jeweilige Patientin und den jeweiligen Patienten sowie den klinischen Bedarf abgestimmt werden. [77]. Die Literatur verweist zusammenfassend darauf, die größtmögliche Angleichung der Flüssigkeitsmenge an propagierte Formeln zu verabreichen, um keine Über- oder Unterinfusionen zu erzielen. Gerade aber das Prozedere bei Notfallsituationen nach Über- oder Unterinfusionen wird nicht erläutert. An dieser Stelle wären Schemata als Orientierungshilfen für die Vorgehensweisen in der jeweiligen Situation angebracht.

Die Brandverletzteneinheit der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde stellt österreichweit ein einzigartiges Zentrum für die Versorgung und Therapie schwerbrandverletzter Kinder dar. Sie ist gekennzeichnet durch die jahrzehntelange Erfahrung der spezialisierten Therapie und Nachbetreuung von pädiatrischen Patientinnen und Patienten mit Brandverletzungen wie auch durch wissenschaftliche Leistungen auf diesem Gebiet. Durch die effiziente Zusammenarbeit innerhalb des Burn-Teams gewährleisten Verbrennungsspezialistinnen und Verbrennungsspezialisten jedes Jahr die stationäre Therapie von 40-60 Kindern mit großflächigen Verbrennungen. Eine ambulante Versorgung erfolgt jährlich bei 200 Kindern und Jugendlichen.

Erwachsene Patientinnen und Patienten mit Verbrennungswunden werden auf der klinischen Abteilung für Plastische, Ästhetische und Rekonstruktive Chirurgie behandelt beziehungsweise auf assoziierten anästhesiologischen Intensiveinheiten. Spezialisierte Einrichtungen für Erwachsene mit Brandverletzungen sind am Universitätsklinikum Wien sowie am Landeskrankenhaus Linz vorhanden. Länder ohne ausreichende Kapazität für die Versorgung von Brandverletzten müssen eine Selektion zwischen thermischen Verletzungen, welche eine Versorgung in Verbrennungszentren benötigen und Verbrennungswunden geringgradigen Ausmaßes, welche auch in peripheren Krankenhäusern von Allgemeinchirurginnen und Allgemeinchirurgen versorgt werden können, treffen [178].

In der Entwicklung von temporärem oder permanentem Hautersatz werden in den folgenden Jahren bemerkenswerte Fortschritte zu verzeichnen sein. Temporärer Hautersatz wird sich nicht nur durch verbesserte synthetische Materialien oder Hautbanken etablieren, sondern ebenfalls durch allogenes Gewebe, welches Wachstumsfaktoren für die Stimulation der Wundheilung sezerniert. Es besteht inzwischen die Möglichkeit, Fibroblasten genetisch zu modifizieren, um eine Überexpression von PDGF, Wachstumshormonen, IGF-1 und anderer Wachstumsfaktoren zu erreichen [179]. Zumal sich die Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Verbrennungsmedizin lebensrettend für viele Brandopfer mit großflächigen Verbrennungswunden auswirkt, wird rasche Verfügbarkeit eines beständigen permanenten Hautersatzes immer dringender. Dadurch ließe sich nicht nur eine Reduktion der Symptomatik mittels frühzeitigeren Wundverschluss, sondern auch eine Erleichterung von zeitnahen Wiederherstellungsoperationen umsetzen. Eine In-vitro-Kombination aus dermalen Hautersatzmaterialien, autologen Keratinozyten sowie Fibroblasten und/ oder Endothelzellen scheint dafür am geeignetsten zu sein [97].

Trotzdem bleiben kultivierte Hautersatzmaterialien momentan lediglich ein Hoffnungsschimmer, da noch Verbesserungen erforderlich sind, um die Qualität von Spalt- oder Vollhautinterponaten zu erreichen [77].

Darüber hinaus gilt auch der Einsatz von Stammzellen neben nahezu allen medizinischen Fachgebieten in der Verbrennungsmedizin als aussichtsreicher Ansatz. Stammzellen von Kindern unterscheiden sich von jenen der Erwachsenen, demnach hat stets eine Kontrolle der Ursprünge der verwendeten Stammzellen zu erfolgen. Die Bildung kleiner Blutgefäße lässt sich beispielsweise aus Fruchtwasser-abgeleiteten Stammzellen induzieren [180]. Die Verabreichung von Stammzellen bei Verbrennungswunden soll eine verbesserte Qualität der Wundheilung ermöglichen, indem ein frühzeitigerer Wundverschluss, ein rascherer Heilungsvorgang, eine Vorbeugung von Kontrakturen sowie Narbenbildung und womöglich eine Regeneration der Haut samt ihrer Anhangsgebilde erzielt wird. Der Einsatz von Stammzellen bei Verbrennungsoptionen resultiert weiters in einer Verminderung der Entzündungsreaktion und damit einhergehend einer Reduktion von Infektionskomplikationen [181]. In Anbetracht der genannten Aspekte müsste die Stammzelltherapie längst in der Verbrennungsmedizin etabliert sein. So erfolgversprechend diese Therapieansätze durch die Verwendung von Stammzellen

auch seien mögen, wurden die erwähnten Resultate größtenteils an Tiermodellen erzielt und ließen sich noch nicht eindeutig auf Menschen übertragen.

## 5 Literaturverzeichnis

1. Bull, J.P. and A.J. Fisher, *A study of mortality in a burns unit: a revised estimate*. Ann Surg, 1954. **139**(3): p. 269-74.
2. Trop, M., *Das brandverletzte Kind*. Monatsschrift Kinderheilkunde, 2002. **150**(10): p. 1238-1251.
3. Lund, C.C. and N.C. Browder, *The estimation of areas of burns*. Surgical Gyn Obstet, 1944. **79**: p. 352-358.
4. Blocker, T.G.J., *Talk given to plastic surgery residents*. October 1, 1981, Galveston, Texas: unpublished.
5. Shirani, K.Z., B.A. Pruitt, Jr., and A.D. Mason, Jr., *The influence of inhalation injury and pneumonia on burn mortality*. Ann Surg, 1987. **205**(1): p. 82-7.
6. Navar, P.D., J.R. Saffle, and G.D. Warden, *Effect of inhalation injury on fluid resuscitation requirements after thermal injury*. Am J Surg, 1985. **150**(6): p. 716-20.
7. Herndon, D.N., et al., *Extravascular lung water changes following smoke inhalation and massive burn injury*. Surgery, 1987. **102**(2): p. 341-9.
8. Fitzpatrick, J.C. and W.G. Cioffi, Jr., *Ventilatory support following burns and smoke-inhalation injury*. Respir Care Clin N Am, 1997. **3**(1): p. 21-49.
9. Cortiella, J., R. Mlcak, and D. Herndon, *High frequency percussive ventilation in pediatric patients with inhalation injury*. J Burn Care Rehabil, 1999. **20**(3): p. 232-5.
10. Herndon, D.N., D.L. Traber, and P. Pollard, *Pathophysiology of inhalation injury*. Total Burn Care, ed. H. DN. 1996, London: WB Saunders Co. 175-183.
11. Desai, M.H., et al., *Reduction in mortality in pediatric patients with inhalation injury with aerosolized heparin/N-acetylcystine [correction of acetylcystine] therapy*. J Burn Care Rehabil, 1998. **19**(3): p. 210-2.
12. Pfurtscheller, K., et al., *Effect of body position on ventilation distribution during PEEP titration in a porcine model of acute lung injury using advanced respiratory monitoring and electrical impedance tomography*. Intensive Care Med Exp, 2015. **3**(1): p. 38.
13. Moyer, C.A., et al., *Treatment of Large Human Burns with 0.5 Per Cent Silver Nitrate Solution*. Arch Surg, 1965. **90**: p. 812-67.
14. Lindberg, R.B., et al., *The successful control of burn wound sepsis*. J Trauma, 1965. **5**(5): p. 601-16.
15. Wilmore, D.W., et al., *The gut: a central organ after surgical stress*. Surgery, 1988. **104**(5): p. 917-23.
16. Munster, A.M., *Treatment of invasive Enterobacter cloacae burn wound sepsis with topical nitrofurazone*. J Trauma, 1984. **24**(6): p. 524-5.
17. Baxter, C.R., J.A. Marvin, and P.W. Curreri, *Early management of thermal burns*. Postgrad Med, 1974. **55**(1): p. 131-9.
18. Trier, W.C. and K.W. Sell, *United States Navy skin bank*. Plast Reconstr Surg, 1968. **41**(6): p. 543-8.

19. Janzekovic, Z., *A new concept in the early excision and immediate grafting of burns*. J Trauma, 1970. **10**(12): p. 1103-8.
20. Burke, J.F.e.a., *Primary burn excision and immediate grafting: a method of shortening illness*. J Trauma, 1974. **14**: p. 389-395.
21. Engrav, L.H., et al., *Early excision and grafting vs. nonoperative treatment of burns of indeterminant depth: a randomized prospective study*. J Trauma, 1983. **23**(11): p. 1001-4.
22. Herndon, D.N., et al., *A comparison of conservative versus early excision. Therapies in severely burned patients*. Ann Surg, 1989. **209**(5): p. 547-52; discussion 552-3.
23. Herndon, D.N., et al., *Determinants of mortality in pediatric patients with greater than 70% full-thickness total body surface area thermal injury treated by early total excision and grafting*. J Trauma, 1987. **27**(2): p. 208-12.
24. Herndon, D.N., et al., *Increased mortality with intravenous supplemental feeding in severely burned patients*. J Burn Care Rehabil, 1989. **10**(4): p. 309-13.
25. Trop, M., *Vortrag von Univ.-Prof. Dr. Marija Trop, LKH/Univ.-Klinikum Graz im Rahmen der ÖGPÄRC-Jahrestagung*. 16. September 2017: Graz.
26. Trop, M., et al., *The past 25 years of pediatric burn treatment in Graz and important lessons been learned. An overview*. Burns, 2015. **41**(4): p. 714-20.
27. Smolle, C., et al., *Recent trends in burn epidemiology worldwide: A systematic review*. Burns, 2017. **43**(2): p. 249-257.
28. Fadaak, H., *The management of burns in a developing country: an experience from the republic of Yemen*. Burns, 2002. **28**(1): p. 65-9.
29. Rajabian, M.H., S. Aghaei, and V. Fouladi, *Analysis of survival and hospitalization time for 2057 burn patients in Shiraz, southwestern Iran*. Med Sci Monit, 2007. **13**(8): p. CR353-5.
30. Branski, L.K., et al., *Amnion in the treatment of pediatric partial-thickness facial burns*. Burns, 2008. **34**(3): p. 393-9.
31. Taylor, S.L., et al., *Predicting mortality from burns: the need for age-group specific models*. Burns : journal of the International Society for Burn Injuries, 2014. **40**(6): p. 1106-1115.
32. Akhtar, M., et al., *Burn injury associated with comorbidities: Impact on the outcome*. Indian Journal of Burns, 2014. **22**(1): p. 51-55.
33. Wolf, S.E., et al., *Mortality determinants in massive pediatric burns. An analysis of 103 children with > or = 80% TBSA burns (> or = 70% full-thickness)*. Ann Surg, 1997. **225**(5): p. 554-65; discussion 565-9.
34. Carvajal, H.F., *A physiologic approach to fluid therapy in severely burned children*. Surg Gynecol Obstet, 1980. **150**(3): p. 379-84.
35. Bundesanstalt Statistik Austria. *Auszug aus der Spitalsentlassungsstatistik*. 2018. [cited 2020, September 01].
36. Baker, S.P., et al., *Fire, burns and lightning. Chapter 12, in The Injury Fact Book*. 1992: New York: Oxford University Press. p. 161-173.
37. Baker, S.P., et al., *Unintentional injury. Chapter 4, in The Injury Fact Book*. 1992: New York: Oxford University Press. p. 39-64.
38. *Fire in the United States, 1983 to 1990, in National Fire Data Center*. October 1993: Emmitsburg, MD.
39. Centers for Disease, C. and Prevention, *Deaths resulting from residential fires and the prevalence of smoke alarms--United States, 1991-1995*. MMWR Morb Mortal Wkly Rep, 1998. **47**(38): p. 803-6.

40. Hammond, J., *The status of statewide burn prevention legislation*. J Burn Care Rehabil, 1993. **14**(4): p. 473-5.
41. Forjuoh, S.N., *The mechanisms, intensity of treatment, and outcomes of hospitalized burns: issues for prevention*. J Burn Care Rehabil, 1998. **19**(5): p. 456-60.
42. *Resources for optimal care of patients with burn injury*, in *Resources for Optimal Care of Injured Patient*. Chapter 14. 1990, The American College of Surgeons: Chicago, IL.
43. Pruitt, B.A., Jr., A.D. Mason, Jr., and C.W. Goodwin, *Epidemiology of burn injury and demography of burn care facilities*. Problems in General Surgery, 1990. **7**(2): p. 235-251.
44. *Burn Care Resources in North America*, in *American Burn Association*. 1999-2000, 625 N Michigan Ave, Ste 1530, Chicago, IL 60611.
45. *Burn Injury Fact Sheet*, in *National Safe Kids Campaign*. 1301 Pennsylvania Avenue NW, Suite 1000, Washington DC, 20004-1707.
46. Pfurtscheller, K., C. Cimenti, and L.P. Kamolz, *Thermisch verletztes Kind*. Monatsschrift Kinderheilkunde, 2016. **164**(9): p. 746-757.
47. Enoch, S., A. Roshan, and M. Shah, *Emergency and early management of burns and scalds*. Bmj, 2009. **338**: p. b1037.
48. Barillo, D.J., et al., *Body habitus as a predictor of burn risk in children: do fat boys still get burned?* Burns, 1998. **24**(8): p. 725-7.
49. McGill, V., A. Kowal-Vern, and R.L. Gamelli, *Outcome for older burn patients*. Arch Surg, 2000. **135**(3): p. 320-5.
50. Cadier, M.A. and P.G. Shakespeare, *Burns in octogenarians*. Burns, 1995. **21**(3): p. 200-4.
51. Rossignol, A.M., et al., *Hospitalized burn injuries in Massachusetts: an assessment of incidence and product involvement*. Am J Public Health, 1986. **76**(11): p. 1341-3.
52. Clark, W.R. and B.S. Fromm, *Burn mortality. Experience at a regional burn unit. Literature review*. Acta Chir Scand Suppl, 1987. **537**: p. 1-126.
53. Baker, S.P., B. O'Neil, and R.S. Karpf, *The Injury Fact Book*. 1984, Lexington, MA: Lexington Books. p. 139-154.
54. Barillo, D.J., W.G. Cioffi, and W.F. McManus, *Vehicle-related burn injuries*, in *Proceedings of Association for the Advancement of Automotive Medicine 1993*: 2340 Des Plaines Avenue, Suite 106, Des Plaines. p. 209-218.
55. *Eighth Annual Flammable Fabrics Report*, in *Consumer Product Safety Commission*. 1980: Washington, DC.
56. *Occupational burns among restaurant workers-Colorado and Minnesota*. Morb Mortal Wkly Rep, 1993. **42**: p. 713-716.
57. Chatterjee, B.F., B. J.I., and R.B. Fraianne, *Northeastern Ohio Trauma Study V. Burn injury*. J Trauma, 1986. **26**: p. 844-847.
58. *Acute chemical hazards to children and adults*, in *NEISS Data Highlights*. January-December 1988: Washington, DC. Directorate for Epidemiology, US Consumer Product Safety Commission.
59. Mazingo, D.W., et al., *Chemical burns*. J Trauma, 1988. **28**(5): p. 642-7.
60. Sonneborn, C.K. and P.M. Vanstraelen, *A retrospective study of self-inflicted burns*. Gen Hosp Psychiatry, 1992. **14**(6): p. 404-7.
61. O'Neill, J.A., Jr., et al., *Patterns of injury in the battered child syndrome*. J Trauma, 1973. **13**(4): p. 332-9.

62. Showers, J. and K.M. Garrison, *Burn abuse: a four-year study*. J Trauma, 1988. **28**(11): p. 1581-3.
63. Elder abuse: what can be done? Select Committee on Aging, US House of Representatives, Washington DC, Government Printing Office, 1991.
64. Bird, P.E., et al., *Elder abuse: a call to action*. J Burn Care Rehabil, 1998. **19**(6): p. 522-7.
65. Arno, A., et al., *Stem Cell Therapy: A New Treatment for Burns?* Pharmaceuticals (Basel, Switzerland), 2011. **4**(10): p. 1355-1380.
66. Ricketts, C.R., J.R. Squire, and E. Topley, *Human skin lipids with particular reference to the self-sterilising power of the skin*. Clin Sci, 1951. **10**(1): p. 80-110.
67. Lüllmann-Rauch, R. and E. Asan, *Taschenlehrbuch Histologie*. 2015: Thieme.
68. Agarwal, S. and K. Krishnamurthy, *Histology, Skin*, in *StatPearls*. 2020: Treasure Island (FL).
69. Moritz, A.R. and F.C. Henriques, *Studies of Thermal Injury: II. The Relative Importance of Time and Surface Temperature in the Causation of Cutaneous Burns*. Am J Pathol, 1947. **23**(5): p. 695-720.
70. Bass, H., J.L. Moore, and W.T. Coakley, *Lethality in Mammalian Cells Due to Hyperthermia under Oxidic and Hypoxic Conditions*. International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine, 1978. **33**(1): p. 57-67.
71. Kelly, J.L., et al., *Is circulating endotoxin the trigger for the systemic inflammatory response syndrome seen after injury?* Ann Surg, 1997. **225**(5): p. 530-41; discussion 541-3.
72. Fry, D.E., et al., *Multiple system organ failure. The role of uncontrolled infection*. Arch Surg, 1980. **115**(2): p. 136-40.
73. Cerra, F.B., *The systemic septic response: concepts of pathogenesis*. J Trauma, 1990. **30**(12 Suppl): p. S169-74.
74. Dinarello, C.A., *The proinflammatory cytokines interleukin-1 and tumor necrosis factor and treatment of the septic shock syndrome*. J Infect Dis, 1991. **163**(6): p. 1177-84.
75. Goodwin, C.W., *Multiple organ failure: clinical overview of the syndrome*. J Trauma, 1990. **30**(12 Suppl): p. S163-5.
76. Huang, Y.S., et al., *Serial experimental and clinical studies on the pathogenesis of multiple organ dysfunction syndrome (MODS) in severe burns*. Burns, 1998. **24**(8): p. 706-16.
77. Kamolz, L.P., D.N. Herndon, and M.G. Jeschke, *Verbrennungen: Diagnose, Therapie und Rehabilitation des thermischen Traumas*. 2010: Springer Vienna.
78. Moore, R.A., A. Waheed, and B. Burns, *Rule of Nines*, in *StatPearls*. 2020: Treasure Island (FL).
79. Besner, G.E., *Burns*, in *Fundamentals of Pediatric Surgery*, P. Mattei, Editor. 2011, Springer New York: New York, NY. p. 123-133.
80. Amirshaybani, H.R., et al., *The natural history of the growth of the hand: I. Hand area as a percentage of body surface area*. Plast Reconstr Surg, 2001. **107**(3): p. 726-33.
81. Rossiter, N.D., P. Chapman, and I.A. Haywood, *How big is a hand?* Burns, 1996. **22**(3): p. 230-1.
82. Nagel, T.R. and J.E. Schunk, *Using the hand to estimate the surface area of a burn in children*. Pediatr Emerg Care, 1997. **13**(4): p. 254-5.

83. Neuwalder, J.M., et al., *A review of computer-aided body surface area determination: SAGE II and EPRI's 3D Burn Vision*. J Burn Care Rehabil, 2002. **23**(1): p. 55-9; discussion 54.
84. Dirnberger, J., et al., *Modelling human burn injuries in a three-dimensional virtual environment*. Stud Health Technol Inform, 2003. **94**: p. 52-8.
85. Haller, H., *Data collection in burn injuries-rationale for BurnCase 3D*. Osteo Trauma Care, 2007. **15**: p. 34-41.
86. Lingitz, R., *VERBRANNT KÖRPEROBERFLÄCHE HAT EINE AUSSAGEKRAFT Dokumentation der verbrannten Körperoberfläche mit neuen Kindermodellen der BurnCase 3D Software. Eine retrospektive Analyse.*, in *Universitätsklinik für Kinder- und Jugendheilkunde Graz Pädiatrische Intensivstation und Brandverletzteneinheit*. 2018, Medizinischen Universität Graz: Graz.
87. iMedicalApps. *BurnCase 3D Mobile Edition is an innovative app that allows 3D documentation of burns*. 2012, October 22. [cited 2020, September 24]; Available from: <https://www.imedicalapps.com/2012/10/burncase-3d-mobile-innovative-app-documentation-burns/>.
88. Steen, M., *Leitlinien Verbrennungsbehandlung der Deutschen Gesellschaft für Verbrennungsmedizin*. Ref Type: Internet Communication, 1-2-2002.
89. Abdel-Sayed, P., et al., *Cell therapies for skin regeneration: an overview of 40 years of experience in burn units*. Swiss Med Wkly, 2019. **149**: p. w20079.
90. Hüging, M. and K. Rothe, *Das thermisch verletzte Kind*. Monatsschrift Kinderheilkunde, 2017. **165**(9): p. 817-832.
91. Desai, M.H., R.L. Rutan, and D.N. Herndon, *Conservative treatment of scald burns is superior to early excision*. J Burn Care Rehabil, 1991. **12**(5): p. 482-4.
92. Stoddard, F.J., et al., *Treatment of pain in acutely burned children*. J Burn Care Rehabil, 2002. **23**(2): p. 135-56.
93. Lansdown, A., et al., *Silver dressings: absorption and antibacterial efficacy*. Nurs Times, 2005. **101**(46): p. 45-6.
94. Jester, I., et al., *Comparison of two silver dressings for wound management in pediatric burns*. Wounds, 2008. **20**(11): p. 303-8.
95. Pfurtscheller, K., et al., *Use of Suprathel dressing in a young infant with TEN*. Pediatr Dermatol, 2008. **25**(5): p. 541-3.
96. Roka, J., et al., *[Use of V.A.C. Therapy in the surgical treatment of severe burns: the Viennese concept]*. Handchir Mikrochir Plast Chir, 2007. **39**(5): p. 322-7.
97. Herndon, D.N., *Total Burn Care*. 2002: W.B. Saunders.
98. Braza, M.E. and M.P. Fahrenkopf, *Split-Thickness Skin Grafts*, in *StatPearls*. 2020: Treasure Island (FL).
99. Alexander, J.W., et al., *Treatment of severe burns with widely meshed skin autograft and meshed skin allograft overlay*. J Trauma, 1981. **21**(6): p. 433-8.
100. Raff, T., et al., *Experience with the modified Meek technique*. Acta Chir Plast, 1996. **38**(4): p. 142-6.
101. Houschyar, K.S., et al., *Five Years Experience With Meek Grafting in the Management of Extensive Burns in an Adult Burn Center*. Plastic surgery (Oakville, Ont.), 2019. **27**(1): p. 44-48.
102. Brown, J.B., et al., *Postmortem homografts as biological dressings for extensive burns and denuded areas; immediate and preserved homografts as life-saving procedures*. Ann Surg, 1953. **138**(4): p. 618-30.
103. Heimbach, D., et al., *Artificial dermis for major burns. A multi-center randomized clinical trial*. Ann Surg, 1988. **208**(3): p. 313-20.

104. Wainwright, D., et al., *Clinical evaluation of an acellular allograft dermal matrix in full-thickness burns*. J Burn Care Rehabil, 1996. **17**(2): p. 124-36.
105. Stern, R., M. McPherson, and M.T. Longaker, *Histologic study of artificial skin used in the treatment of full-thickness thermal injury*. J Burn Care Rehabil, 1990. **11**(1): p. 7-13.
106. Haslik, W., et al., *First experiences with the collagen-elastin matrix Matriderm as a dermal substitute in severe burn injuries of the hand*. Burns, 2007. **33**(3): p. 364-8.
107. Ryssel, H., et al., *The use of MatriDerm in early excision and simultaneous autologous skin grafting in burns--a pilot study*. Burns, 2008. **34**(1): p. 93-7.
108. Hever, P., *Matriderm vs Integradermal Regeneration Template Single Layer as a Dermal Substitute for Synchronous Autologous Skin Grafting in Necrotising Fasciitis – a Case Study*. Advances in Plastic and Reconstructive Surgery, 2017. **01**.
109. *Committee on Trauma American Surgeons. Guidelines for the operation of burn units*. Resources for the optimal care of the injured patient, 1999: p. 55-62.
110. Al-Mousawi, A.M., et al., *Burn teams and burn centers: the importance of a comprehensive team approach to burn care*. Clinics in plastic surgery, 2009. **36**(4): p. 547-554.
111. Conger, J.D., *Interventions in clinical acute renal failure: what are the data?* Am J Kidney Dis, 1995. **26**(4): p. 565-76.
112. Thadhani, R., M. Pascual, and J.V. Bonventre, *Acute renal failure*. N Engl J Med, 1996. **334**(22): p. 1448-60.
113. Bellomo, R., et al., *A prospective comparative study of continuous arteriovenous hemodiafiltration and continuous venovenous hemodiafiltration in critically ill patients*. Am J Kidney Dis, 1993. **21**(4): p. 400-4.
114. Bellomo, R., P. Tipping, and N. Boyce, *Continuous veno-venous hemofiltration with dialysis removes cytokines from the circulation of septic patients*. Crit Care Med, 1993. **21**(4): p. 522-6.
115. Leblanc, M., Y. Thibeault, and S. Querin, *Continuous haemofiltration and haemodiafiltration for acute renal failure in severely burned patients*. Burns, 1997. **23**(2): p. 160-5.
116. Swartz, R.D., et al., *Comparing continuous hemofiltration with hemodialysis in patients with severe acute renal failure*. Am J Kidney Dis, 1999. **34**(3): p. 424-32.
117. Pomeranz, A., et al., *Acute renal failure in a burn patient: the advantages of continuous peritoneal dialysis*. Burns Incl Therm Inj, 1985. **11**(5): p. 367-70.
118. Andel, H. and A. Werba, *Atmen – Atemhilfen*, in *Atemphysiologie und Beatmungstechnik*. 2008, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York.
119. Warden, G.D., et al., *Hypernatremic state in hypermetabolic burn patients*. Arch Surg, 1973. **106**(4): p. 420-7.
120. Baue, A.E., R. Durham, and E. Faist, *Systemic inflammatory response syndrome (SIRS), multiple organ dysfunction syndrome (MODS), multiple organ failure (MOF): are we winning the battle?* Shock, 1998. **10**(2): p. 79-89.
121. Muckart, D.J. and S. Bhagwanjee, *American College of Chest Physicians/Society of Critical Care Medicine Consensus Conference definitions of the systemic inflammatory response syndrome and allied disorders in relation to critically injured patients*. Crit Care Med, 1997. **25**(11): p. 1789-95.
122. Herndon, D.N., et al., *Inhalation injury in burned patients: effects and treatment*. Burns Incl Therm Inj, 1988. **14**(5): p. 349-56.

123. Brown, M., et al., *The use of venovenous extracorporeal membrane oxygenation in sheep receiving severe smoke inhalation injury*. Burns Incl Therm Inj, 1987. **13**(1): p. 34-8.
124. Zwischenberger, J.B., et al., *Pathophysiology of ovine smoke inhalation injury treated with extracorporeal membrane oxygenation*. Chest, 1993. **103**(5): p. 1582-6.
125. Brunston, R.L., Jr., et al., *Total arteriovenous CO2 removal: simplifying extracorporeal support for respiratory failure*. Ann Thorac Surg, 1997. **64**(6): p. 1599-604; discussion 1604-5.
126. Tao, W., et al., *Significant reduction in minute ventilation and peak inspiratory pressures with arteriovenous CO2 removal during severe respiratory failure*. Crit Care Med, 1997. **25**(4): p. 689-95.
127. Pruitt, B.A., Jr., et al., *Current Approach to Prevention and Treatment of Pseudomonas aeruginosa Infections in Burned Patients*. Reviews of Infectious Diseases, 1983. **5**(Supplement\_5): p. S889-S897.
128. Pruitt, B.A., Jr., *The diagnosis and treatment of infection in the burn patient*. Burns Incl Therm Inj, 1984. **11**(2): p. 79-91.
129. Foley, F.D., et al., *Herpesvirus Infection in Burned Patients*. New England Journal of Medicine, 1970. **282**(12): p. 652-656.
130. McManus, A.T., et al., *Comparison of quantitative microbiology and histopathology in divided burn-wound biopsy specimens*. Arch Surg, 1987. **122**(1): p. 74-6.
131. Norbury, W., et al., *Infection in Burns*. Surgical infections, 2016. **17**(2): p. 250-255.
132. Cambiaso Daniel, J., et al., *Änderung der Körperzusammensetzung in schwerbranntverletzten Kindern während des Intensivstaion-Aufenthaltes*, in *36. Jahrestagung der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Verbrennungsbehandlung (DAV 2018)*. 2018.
133. Lynn, A.M. and J.T. Slattery, *Morphine pharmacokinetics in early infancy*. Anesthesiology, 1987. **66**(2): p. 136-9.
134. Hogan, Q.H., et al., *Mechanism of mesenteric venodilatation after epidural lidocaine in rabbits*. Anesthesiology, 1994. **81**(4): p. 939-45.
135. Bhatti, N., et al., *Percutaneous dilation tracheotomy in intensive care unit patients*. Otolaryngol Head Neck Surg, 2007. **136**(6): p. 938-41.
136. Succo, G., et al., *[Complications of tracheostomy in critically ill patients: comparison of dilation and surgical techniques]*. Acta Otorhinolaryngol Ital, 2002. **22**(4 Suppl 71): p. 1-11.
137. Robson, M.C., et al., *Prevention and treatment of postburn scars and contracture*. World J Surg, 1992. **16**(1): p. 87-96.
138. Koss, N., *The mathematics of flap design*. Krizek T.J., Hoopers J.E., eds. Symposium on Basic Science in Plastic Surgery. St Louis: CV Mosby, 1976: 274.
139. Robson, M.C. and R.W. Parsons, *Reconstructive and plastic surgery*. Cushieri A, Giles GR, Mossa AR, eds. Essential Surgical Practice. Bristol, England: John Wright and Sons, Ltd, 1982: Chapter 22.
140. Robson, M.C., D.J. Smith, and J.P. Heggors, *Innovations in burn wound management*. Habal MB, Morain WD, Lewin ML, Parson RW, Woods JE, eds. Advances in Plastic Surgery. Chicago: Yearbook Medical, 1987:149.
141. Oestreich, K., et al., *[The balloon dissector in expander treatment: A ten-year experience in plastic and reconstructive surgery]*. Handchir Mikrochir Plast Chir, 2006. **38**(4): p. 240-5.

142. Moufarrij, S., et al., *How important is hydrotherapy? Effects of dynamic action of hot spring water as a rehabilitative treatment for burn patients in Switzerland.* Ann Burns Fire Disasters, 2014. **27**(4): p. 184-91.
143. Moufarrij, S., et al., *How important is hydrotherapy? Effects of dynamic action of hot spring water as a rehabilitative treatment for burn patients in Switzerland.* Annals of burns and fire disasters, 2014. **27**(4): p. 184-191.
144. Koller, J., *AOD-Leitlinien: Therapie pathologischer Narben (hypertrophe Narben und Keloide).* Landesklinik für Dermatologie, Landeskliniken für Salzburg, 2001.
145. Ahn, S.T., W.W. Monafo, and T.A. Mustoe, *Topical silicone gel: a new treatment for hypertrophic scars.* Surgery, 1989. **106**(4): p. 781-6; discussion 786-7.
146. Katz, B.E., *Silicone gel sheeting in scar therapy.* Cutis, 1995. **56**(1): p. 65-7.
147. Rockwell, W.B., I.K. Cohen, and H.P. Ehrlich, *Keloids and hypertrophic scars: a comprehensive review.* Plast Reconstr Surg, 1989. **84**(5): p. 827-37.
148. Garcia-Velasco, M., et al., *Compression treatment of hypertrophic scars in burned children.* Canadian Journal of Surgery, 1978. **21**(5): p. 450-452.
149. Kischer, C.W., *The microvessels in hypertrophic scars, keloids and related lesions: a review.* J Submicrosc Cytol Pathol, 1992. **24**(2): p. 281-96.
150. Reid, W.H., et al., *Hypertrophic scarring and pressure therapy.* Burns, 1987. **13**: p. S29-S32.
151. Rose, M.P. and E.A. Deitch, *Rehabilitation: The Effective Use of a Tubular Compression Bandage; Tubigrip; for Burn Scar Therapy in the Growing Child.* The Journal of Burn Care & Rehabilitation, 1983. **4**(3): p. 197-201.
152. Cheng, J.C.Y., et al., *Pressure therapy in the treatment of post-burn hypertrophic scar—A critical look into its usefulness and fallacies by pressure monitoring.* Burns, 1984. **10**(3): p. 154-163.
153. Miles, W.K., Grigsby, and L. de Linde, *Remodeling of scar tissue in the burned hand.* Hunter JM, et al. eds. Rehabilitation of the hand, edn 4, Vol II. St. Luis: CV Mosby, 1995: p. 1267-94.
154. Wood, E.C., *Beard's massage: Principles and techniques.* edn 2. Philadelphia: WB Saunders, 1974: p. 48-59.
155. Van den Kerchhove, E., W. Boeckx, and A. Kochuyt, *Silicone patches as a supplement for pressure therapy to control hypertrophic scarring.* J Burn Care Rehabil, 1991. **12**(4): p. 361-9.
156. McNee, J., *The Use of Silicone Gel in the Control of Hypertrophic Scarring.* Physiotherapy, 1990. **76**(4): p. 194-197.
157. Quinn, K.J., *Silicone gel in scar treatment.* Burns Incl Therm Inj, 1987. **13** Suppl: p. S33-40.
158. Alster, T.S. and T.O. McMeekin, *Improvement of facial acne scars by the 585 nm flashlamp-pumped pulsed dye laser.* J Am Acad Dermatol, 1996. **35**(1): p. 79-81.
159. Henderson, D.L., T.A. Cromwell, and L.G. Mes, *Argon and carbon dioxide laser treatment of hypertrophic and keloid scars.* Lasers Surg Med, 1984. **3**(4): p. 271-7.
160. Bowden, M.L., et al., *The elderly, disabled and handicapped adult burned through abuse and neglect.* Burns, 1988. **14**(6): p. 447-450.
161. Weimer, C.L., I.W. Goldfarb, and H. Slater, *Multidisciplinary approach to working with burn victims of child abuse.* J Burn Care Rehabil, 1988. **9**(1): p. 79-82.
162. Hight, D.W., H.R. Bakalar, and J.R. Lloyd, *Inflicted burns in children. Recognition and treatment.* JAMA, 1979. **242**(6): p. 517-20.
163. Kumar, P., *Child abuse by thermal injury--a retrospective survey.* Burns Incl Therm Inj, 1984. **10**(5): p. 344-8.

164. Bakalar, H.R., J.D. Moore, and D.W. Hight, *Psychosocial dynamics of pediatric burn abuse*. Health Soc Work, 1981. **6**(4): p. 27-32.
165. Watkins, A.H., R.J. Gagan, and J.M. Cupoli, *Child abuse by burning*. J Fla Med Assoc, 1985. **72**(7): p. 497-502.
166. Campbell, J.L., L.J. La Clave, and G. Brack, *Clinical depression in paediatric burn patients*. Burns Incl Therm Inj, 1987. **13**(3): p. 213-7.
167. Purdue, G.F., J.L. Hunt, and P.R. Prescott, *Child abuse by burning--an index of suspicion*. J Trauma, 1988. **28**(2): p. 221-4.
168. Justice, B. and R. Justice, *The abusing family, Rev. ed.* The abusing family, Rev. ed. 1990, New York, NY, US: Insight Books/Plenum Press. xiv, 297-xiv, 297.
169. Joory, K., A. Farroha, and N. Moiemem, *Is a self-inflicted burn part of a repeated self-harm pattern?* Annals of burns and fire disasters, 2015. **28**(3): p. 223-227.
170. Edwards, R.R., et al., *Symptoms of distress as prospective predictors of pain-related sciatica treatment outcomes*. Pain, 2007. **130**(1-2): p. 47-55.
171. Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin. *Empfehlungen zur Rehabilitation Brandverletzter*. 2020. [cited 2020, September 28]; Available from: <https://www.verbrennungsmedizin.de/leitlinien-rehabilitation-brandverletzter>.
172. Sharma, R.K. and A. Parashar, *Special considerations in paediatric burn patients*. Indian J Plast Surg, 2010. **43**(Suppl): p. S43-50.
173. Chang, L.Y., et al., *Use of the scalp as a donor site for large burn wound coverage: review of 150 patients*. World J Surg, 1998. **22**(3): p. 296-9; discussion 299-300.
174. Mariscalco, M.M., *Multiple trauma* McMillan JA, Feigin, RD, DeAngelis C, Jones MD (eds) Oski' pediatrics. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA, 2006.
175. Carvajal, H.F., *Fluid therapy for the acutely burned child*. Compr Ther, 1977. **3**(3): p. 17-24.
176. Baxter, C.R., *Fluid volume and electrolyte changes of the early postburn period*. Clin Plast Surg, 1974. **1**(4): p. 693-703.
177. Warden, G., *Fluid resuscitation and early management*. 2007. p. 107-118.
178. Mackie, D., *Mass burn casualties: a rational approach to planning*. Burns, 2002. **28**(5): p. 403-404.
179. Morgan, J.R., et al., *Expression of an exogenous growth hormone gene by transplantable human epidermal cells*. Science, 1987. **237**(4821): p. 1476-9.
180. Williams, C. and R.E. Guldberg, *Tissue Engineering for Pediatric Applications*. Tissue Eng Part A, 2016. **22**(3-4): p. 195-6.
181. Butler, K.L., et al., *Stem cells and burns: review and therapeutic implications*. J Burn Care Res, 2010. **31**(6): p. 874-81.