

Aus der Klinik und Poliklinik für Kinderchirurgie  
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Stromunfälle im Kindes- und Jugendalter  
- Eine retrospektive Analyse mit Erwachsenen als Vergleichsgruppe -

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin  
der Universitätsmedizin  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Betül Günal  
aus Flörsheim am Main

Mainz, 2023

Wissenschaftlicher Vorstand:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion:

28. Juni 2023

Für meine Eltern

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Ziel der Arbeit.....</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund.....	1
1.2	Ziel der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>Literaturdiskussion .....</b>	<b>3</b>
2.1	Stromunfälle.....	3
2.2	Verbrennungen.....	4
2.2.1	Verbrennungsausmaß und Verbrennungstiefe.....	4
2.2.2	Abbreviated Burn Severity Index (ABSI) .....	6
2.3	Versorgung von Stromverletzten in Deutschland.....	7
2.3.1	Präklinische Versorgung.....	7
2.3.2	Stationäre Versorgung.....	8
2.3.3	Komplikation akutes Nierenversagen .....	10
<b>3</b>	<b>Methoden.....</b>	<b>12</b>
3.1	Studiendesign.....	12
3.1.1	Patientenkollektiv.....	12
3.1.2	Einschluss- und Ausschlusskriterien .....	12
3.1.3	Bereitstellung der Daten .....	13
3.1.4	Ethische Aspekte.....	13
3.2	Statistische Auswertung.....	13
3.3	Methodik.....	14
3.3.1	Prüfung auf Normalverteilung.....	14
3.3.2	Varianzanalyse .....	14
3.3.3	Testverfahren bei kategorialen Variablen.....	14
3.3.4	Testverfahren bei stetigen Variablen.....	14
3.3.5	Cox-Regression .....	15
3.4	Analyse der Daten .....	15
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>16</b>
4.1	Patientenkollektiv.....	16
4.2	Behandlungszentrum.....	18
4.3	Demografie.....	19
4.3.1	Alter .....	19
4.3.2	Geschlecht.....	23
4.4	Unfallzusammenhang .....	25
4.5	Unfallursache.....	27

4.5.1	Unfallursache Lichtbogen .....	28
<b>4.6</b>	<b>Zuweisungsdauer .....</b>	<b>29</b>
<b>4.7</b>	<b>Verletzungsprofil .....</b>	<b>30</b>
4.7.1	Verbrennungsausmaß und Verbrennungstiefe.....	30
4.7.2	Betroffene Körperregionen .....	33
<b>4.8</b>	<b>Präklinische Behandlung und Aufnahme .....</b>	<b>35</b>
4.8.1	Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt.....	35
4.8.2	Kühlungsmaßnahmen .....	37
4.8.3	Glomeruläre Filtrationsrate und Kreatinin .....	39
<b>4.9</b>	<b>Stationäre Behandlung .....</b>	<b>42</b>
4.9.1	Liegedauer.....	42
4.9.2	Anzahl der Operationen.....	45
4.9.3	Nekrektomie .....	46
<b>4.10</b>	<b>Outcome .....</b>	<b>48</b>
4.10.1	Komplikationen .....	48
4.10.2	Abbreviated Burn Severity Index (ABSI) .....	49
4.10.3	Mortalität.....	51
4.10.4	Einflussfaktoren der Mortalität: Multivariate Analyse.....	52
<b>4.11</b>	<b>Unvollständigkeit der Daten .....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>53</b>
5.1.1	Demografie .....	53
5.1.2	Unfallmechanismus .....	56
5.1.3	Zuweisungsintervall .....	58
5.1.4	Verbrennungsausmaß und Verbrennungstiefe.....	60
5.1.5	Betroffene Körperregionen .....	64
5.1.6	Körpertemperatur und Durchführung Kaltwassertherapie .....	66
5.1.7	Liegedauer.....	71
5.1.8	Nekrektomie .....	73
5.1.9	Komplikationen .....	75
5.1.10	Mortalität.....	77
<b>5.2</b>	<b>Diskussion der Studienkonzeption.....</b>	<b>79</b>
5.2.1	Limitationen .....	79
5.2.2	Bedeutung der Studie und Ausblick .....	80
5.2.3	Prävention .....	81
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>82</b>

<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>84</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>90</b>
8.1.1	Unfallursache Lichtbogen .....	90
8.1.2	Körpertemperatur und Durchführung Kaltwassertherapie .....	91
	<b>Danksagung .....</b>	<b>92</b>
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>93</b>

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
ABSI	Abbreviated Burn Severity Index
AKIN	Acute Kidney Injury Network
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
DGV	Deutsche Gesellschaft der Verbrennungsmedizin
EKG	Elektrokardiogramm
et al.	et alia
etc.	et cetera
GFR	Glomeruläre Filtrationsrate
h	Stunde
HS	Hochspannung
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht
KOF	Körperoberfläche
m	männlich
Max	Maximum
mg/dl	Milligramm pro Deziliter
min	Minute
Min	Minimum
Mio	Millionen
ml	Milliliter
MW	Mittelwert
NS	Niederspannung
ns	nicht signifikant
OP	Operation
RIFLE	Risk, Injury, Failure, Loss, End Stage Kidney Disease
s.	siehe
S.	Seite
SD	Standardabweichung
Std.	Stunde
u. a.	unter anderem
V	Volt
VKOF	Verbrannte Körperoberfläche
VR	Verbrennungsregister
w	weiblich
z. B.	zum Beispiel
ZNS	Zentrales Nervensystem

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Aufbau der Haut. Schematische Darstellung der Verbrennungsgrade nach [24]</i>	5
<i>Abbildung 2: Balkendiagramm; Fallzahlen der Kinder und Erwachsenen (2015-2018)</i>	16
<i>Abbildung 3: Kreisdiagramm; Fallzahlen der niederspannungs- und hochspannungsverletzten Kinder und Erwachsenen</i>	17
<i>Abbildung 4: Kreisdiagramm; Unterteilung des Patientenkollektivs in Art des Behandlungszentrums</i>	18
<i>Abbildung 5: Balkendiagramm; Alters- und Geschlechterverteilung der Kinder und Jugendlichen am Unfalltag</i>	19
<i>Abbildung 6: Balkendiagramm; Alters- und Geschlechterverteilung der Erwachsenen am Unfalltag in 5-Jahres-Gruppen</i>	20
<i>Abbildung 7: Boxplots; Altersverteilung der Kinder und Erwachsenen in Abhängigkeit vom Geschlecht</i>	20
<i>Abbildung 8: Balkendiagramm; Altersverteilung der Kinder und Jugendlichen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i>	21
<i>Abbildung 9: Balkendiagramm; Altersverteilung der Erwachsenen in 5-Jahres-Gruppen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i>	22
<i>Abbildung 10: Boxplots; Altersverteilung der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i>	22
<i>Abbildung 11: Kreisdiagramm; Geschlechterverteilung [%] der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen</i>	23
<i>Abbildung 12: Kreisdiagramm; Geschlechterverteilung [%] der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i>	24
<i>Abbildung 13: Kreisdiagramm; Unfallursache bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen</i>	25
<i>Abbildung 14: Kreisdiagramm; Unfallursache bei Kindern und Jugendlichen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i>	26
<i>Abbildung 15: Kreisdiagramm; Unfallursache bei Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i>	26
<i>Abbildung 16: Balkendiagramm; Unfallursache bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen</i>	27
<i>Abbildung 17: Boxplots; Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in der Hochspannungsgruppe</i>	32
<i>Abbildung 18: Prozentuale Häufigkeit der verletzten Körperregionen bei Kindern und Jugendlichen</i>	33
<i>Abbildung 19: Balkendiagramm; verletzte Körperregionen bei Kindern und Jugendlichen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i>	34

<i>Abbildung 20: Boxplots; Vergleich der Körpertemperaturen am Ohr zum Aufnahmezeitpunkt [°C] zwischen Überlebenden und im Verlauf Verstorbene</i> .....	36
<i>Abbildung 21: Balkendiagramm; Kaltwasserbehandlungen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen</i> .....	37
<i>Abbildung 22: Boxplots; Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt [°C] in Abhängigkeit von einer stattgehabten Kühlung</i> .....	38
<i>Abbildung 23: Boxplots; GFR [ml/min] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen; 0= nicht verstorben; 1= verstorben</i> .....	40
<i>Abbildung 24: Boxplots; Kreatininwerte [mg/dl] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen, 0= nicht verstorben; 1= verstorben</i> .....	41
<i>Abbildung 25: Boxplots; Liegedauer [Tage] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen</i> ...	42
<i>Abbildung 26: Boxplots; Liegedauer [Tage] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i> .....	43
<i>Abbildung 27: Boxplots; Anzahl der Operationen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i> .....	45
<i>Abbildung 28: Balkendiagramm; Tag der ersten Nekrektomie bei Erwachsenen nach stationärer Aufnahme</i> .....	46
<i>Abbildung 29: Boxplots; Durchschnittlicher ABSI-Score bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe</i> .....	50
<i>Abbildung 30: Kreisdiagramm; Absolute und prozentuale Angabe der Mortalitätsrate bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen</i> .....	51

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Gradeinteilung der Verbrennungstiefe [24] .....</i>	<i>5</i>
<i>Tabelle 2: Abbreviated Burn Severity Index nach Tobiasen et al., nach [4].....</i>	<i>6</i>
<i>Tabelle 3: Gradeinteilung der Verbrennungstiefe und Behandlungsstrategien [24].....</i>	<i>9</i>
<i>Tabelle 4: GFR-Referenzintervalle in ml/min/1,73 m<sup>2</sup> [38], Werte nach [39].....</i>	<i>10</i>
<i>Tabelle 5: Einteilung der akuten Nierenschädigung nach den RIFLE- und AKIN-Stadien [36] .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 6: Verbrennungsgrad 3 [%] und Alter in Abhängigkeit vom Vorliegen eines Lichtbogenunfalls; Ja: Lichtbogenunfall; Nein: Hochspannungsunfall durch direkten Stromkontakt .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 7: Dauer der Primär- und Sekundärzuweisung [Std.] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 8: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 9: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 10: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in der Hochspannungsgruppe .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabelle 11: Körpertemperatur am Ohr zum Aufnahmezeitpunkt [°C] bei Überlebenden und im Verlauf Verstorbener nach Stromunfall; 0= nicht verstorben; 1= verstorben .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 12: Körpertemperatur am Ohr zum Aufnahmezeitpunkt [°C] in Abhängigkeit von der Spannungshöhe .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabelle 13: GFR [ml/min] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen; 0= nicht verstorben; 1= verstorben.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 14: Kreatininwerte [mg/dl] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen; 0= nicht verstorben; 1= verstorben.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 15: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei nekrektomierten Patienten am Aufnahmetag; 0= Nekrektomie nicht durchgeführt; 1= Nekrektomie durchgeführt.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 16: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei nekrektomierten Patienten am 2. posttraumatischen Tag; 0= Nekrektomie nicht durchgeführt; 1= Nekrektomie durchgeführt.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 17: Komplikationen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mit Gegenüberstellung der Mortalitätsraten in der jeweiligen Kategorie.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabelle 18: Komplikationen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe.....</i>	<i>48</i>

<i>Tabelle 19: Gegenüberstellung tatsächlich Verstorbener mit der prognostischen Mortalitätsrate nach Tobiasen et al. bei den Erwachsenen [16] .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabelle 20: Studienvergleich Verbrennungsausmaß bei Stromverletzten (%VKOF).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 21: Kinder und Jugendliche mit durchgeführter Kaltwassertherapie. Bei den hervorgehobenen Markierungen wären Kühlungsmaßnahmen nach den aktuellen Leitlinien kontraindiziert.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 22: Studien mit Empfehlungen für die Kontraindikation von Kühlungsmaßnahmen [%VKOF] .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabelle 23: Studienvergleich Liegedauer bei Stromverletzten (Tage) .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabelle 24: Häufigkeitstabelle verschiedener Variablen in Abhängigkeit vom Vorliegen eines Lichtbogenunfalls; Ja: Lichtbogenunfall; Nein: Hochspannungsunfall durch direkten Stromkontakt .....</i>	<i>90</i>
<i>Tabelle 25: Erwachsene mit durchgeführter Kaltwassertherapie. Bei den hervorgehobenen Markierungen wären Kühlungsmaßnahmen nach den aktuellen Leitlinien kontraindiziert. ...</i>	<i>91</i>

# 1 Einleitung und Ziel der Arbeit

## 1.1 Hintergrund

Bereits in den Siebziger- und Achtzigerjahren des 19. Jahrhunderts, dem Zeitalter der Elektrizität, konnten wesentliche Fortschritte im Bereich der Nutzung des elektrischen Stroms erzielt werden. Insbesondere nachdem 1881 die selbst entwickelte Glühlampe des Amerikaners Thomas Alva Edison präsentiert wurde, begann die eigentliche Revolution der Elektrizität mit seinen neuen Möglichkeiten im wirtschaftlichen, öffentlichen und sozialen Leben der Industrieländer. Schließlich begann im Jahre 1883 die Stromversorgung auch in Deutschland; zunächst in Berlin zur Elektrifizierung von umliegenden Stadt- und Industrievierteln und dann auch in weiteren Großstädten und in einem weiter ausgedehnten Nutzungsbereich [1]. Seither erleichterte die elektrische Energie das Leben in vielen Lebensbereichen. Jedoch wurde ebenfalls deutlich, dass elektrischer Strom eine wesentliche Gefahrenquelle darstellt und schwere letale Verletzungen verursachen kann. Bereits im Jahre 1879 wurde von einem tödlichen Stromunfall berichtet, bei dem ein Bühnenarbeiter bei der Einrichtung von Bühnenbeleuchtung in Frankreich durch einen elektrischen Schlag ums Leben kam [2, 3].

In der heutigen Zeit hat die Inzidenz von Stromverletzungen und die Anzahl stromassoziiertes Todesfälle trotz des steigenden Stromverbrauchs aufgrund von zunehmenden Schutz- und Präventionsmaßnahmen im Arbeits- sowie im Privatbereich deutlich abgenommen [4, 5]. Dennoch wird schätzungsweise von ca. 5600 Elektrounfällen pro Jahr in Deutschland ausgegangen. Da für strominduzierte Verletzungen und Sterbefälle keine Meldepflicht besteht, ist eine zentrale Erfassung dieser Daten deutlich erschwert [6]. Seit der Gründung der Deutschen Gesellschaft für Verbrennungsmedizin (DGV) im Jahre 1991 ist eine zentrale Datenerfassung von thermisch bedingten Verletzungen einschließlich von strominduzierten Verletzungen anhand der Jahresstatistiken bzw. seit 2016 anhand des Verbrennungsregisters möglich. Die Meldung der Fälle erfolgt auf freiwilliger Basis [7].

Anlass für diese Dissertation war eine in der Klinik und Poliklinik für Kinderchirurgie der Universitätsmedizin Mainz behandelte 10-jährige Patientin, die aufgrund eines Hochspannungsunfalls stationär aufgenommen wurde. Nachdem das Kind auf einen abgestellten Eisenbahnwaggon kletterte und in direkten Kontakt mit der Bahnoberleitung kam, erlitt sie strominduzierte Verbrennungen und Verletzungen [8]. Dieser Fall veranlasste eine Analyse von im DGV-Register erfassten Stromverletzungen in der pädiatrischen Population sowie den Vergleich mit denen im Erwachsenenalter in dieser Arbeit. Diese Erkenntnisse könnten dazu dienen, um gezielte Präventionsmaßnahmen sowie höhere Sicherheitsvorkehrungen zu implementieren.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung von stromverletzten Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen, die nach einem Stromunfall in den Verbrennungszentren der deutschsprachigen Länder Deutschland, Österreich und der Schweiz im Zeitraum vom 1. Januar 2015 bis zum 31. Dezember 2018 vorstellig waren. Dabei sollen anhand dieser retrospektiven Studie die Daten der Kinder und Jugendlichen mit denen der Erwachsenen verglichen werden. Ebenfalls ist das Ziel, einen Vergleich zwischen niederspannungsassoziierten und hochspannungsassoziierten Verletzungen zu stellen. In diesem Zusammenhang soll die Epidemiologie der Stromverletzten, die erhobenen Parameter während der präklinischen und klinischen Versorgung sowie das Outcome der Stromverletzten untersucht und verglichen werden.

Die zu untersuchenden konkreten Fragestellungen lauten demnach:

- 1) Gibt es Unterschiede und Gemeinsamkeiten bezüglich der Demografie, dem Unfallhergang, der Morbidität und Mortalität sowie den Behandlungsmethoden zwischen Kindern und Erwachsenen?
- 2) Gibt es Unterschiede und Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Epidemiologie, der Präklinik, des klinischen Verlaufs sowie des Outcomes zwischen Niederspannungsverletzten und Hochspannungsverletzten?
- 3) Welche Unfallmechanismen sind bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen besonders prävalent?
- 4) Welche Faktoren sind bei Stromverletzungen mit Mortalität assoziiert?
- 5) Lassen sich aus den oben genannten Fragestellungen Rückschlüsse für die Prävention von Stromverletzungen ziehen?

Obwohl bereits Studien zu Stromunfällen in Deutschland vorliegen, wurde in dieser Arbeit insbesondere ein Vergleich zwischen pädiatrischen und erwachsenen Stromverletzten angestrebt. Vor allem für die pädiatrische Population liegen bisher sehr wenige Studien zur Charakterisierung der Morbidität und Mortalität vor. Zweck dieser Studie ist es, die Datenbank der Deutschen Gesellschaft für Verbrennungsmedizin (das sogenannte "Verbrennungsregister") diesbezüglich auszuwerten und einen Vergleich zwischen altersabhängigen und spannungsabhängigen Subgruppen anhand des erhobenen Datensatzes anzustellen.

## 2 Literaturdiskussion

### 2.1 Stromunfälle

Stromverletzungen entstehen aufgrund eines Stromflusses durch den menschlichen Körper, wenn sich dieser zwischen zwei Stellen unterschiedlicher Spannungspotentiale befindet. Stromverletzungen werden anhand der Spannungshöhe der elektrischen Quelle in Niederspannungsverletzungen (unter 1000 V) und Hochspannungsverletzungen (über 1000 V) eingeteilt [5, 9]. Die Sonderform der Verletzungen durch Lichtbögen und Blitzschläge werden der Gruppe der Hochspannungsverletzungen zugeordnet [9, 10].

Niederspannung findet hauptsächlich im Haushalt z. B. als Haushaltsstrom (220 V) oder im Telefonnetz (60 V) Verwendung [5, 11]. Patienten mit Niederspannungsverletzungen zeigen in der Regel ein ähnliches Verletzungsmuster wie Patienten mit kleinen thermischen Verletzungen. Es handelt sich dabei meist nur um oberflächliche, lokal begrenzte Verbrennungen und Verletzungen, die auf den Bereich der Stromein- und Stromaustrittsstellen begrenzt sind [12]. Wenn der Weg des Stromflusses durch das Herz führt, können kardiale Komplikationen, im Niedervoltbereich insbesondere Kammerflimmern, entstehen.

Hochspannung kommt dagegen meist in Industrieanlagen, in Bahnüberleitungen (15.000 V) oder in Überlandleitungen (380.000 V) vor [5, 11, 13]. Hochspannungsverletzungen durch direkten Kontakt zur Stromquelle können ein großes Verbrennungsausmaß mit unterschiedlich tiefen Wunden und der Beteiligung von Muskeln, Nerven und Blutgefäßen aufweisen. Dabei können sich tiefe Gewebeschäden auch erst nach mehreren Tagen nach dem Trauma manifestieren [12, 13].

Lichtbögen sind heiße, elektrisch geladene Gase und können beim Annähern an eine Hochspannungsleitung auch ohne direkten Stromkontakt auf den menschlichen Körper übergehen und Verletzungen hervorrufen [17]. Sie können Temperaturen von 3.000 bis 20.000 °C erreichen und abhängig von der Spannungshöhe pro 10.000 Volt über eine Distanz von etwa 2-3 Metern überspringen. Dabei kommt es meist durch die starke Hitze zu Verbrennungen und Gewebeschäden der betroffenen Haut, wobei die Kleidung der Verletzten ebenfalls verbrennen kann [9, 10, 12, 13].

Bei Blitzschlägen handelt es sich um eine Gleichstromentladung, wobei ein gigantischer Lichtbogen zwischen Wolke und Erde entsteht [14]. Dabei kann es zu Spannungshöhen von bis zu 100 Mio. Volt und zu Temperaturen von bis zu 50.000 °C kommen. Blitzschläge haben oft fatale Folgen und können neben schweren Gewebsverletzungen auch eine Atemlähmung durch ZNS-Schäden sowie Kammerflimmern verursachen [15].

Im Jahre 2019 wurden 2 % der in Verbrennungszentren behandelten Patienten aufgrund von Verletzungen durch elektrischen Strom aufgenommen [7]. Die Sterberate bei Stromverletzten liegt jährlich bei ca. 130 Personen in Deutschland [16]. Die Letalität bei

Niederspannungsunfällen beträgt 3 %, wohingegen sie bei Hochspannungsunfällen 30 % und bei Unfällen durch Blitzschlag 10-30 % beträgt [17].

## 2.2 Verbrennungen

### 2.2.1 Verbrennungsausmaß und Verbrennungstiefe

Thermische Verletzungen können durch den Stromdurchfluss, durch das Überspringen von Lichtbögen sowie durch zusätzliche Einwirkung von Flammen und Explosionen zu übermäßigen Gewebeschäden führen. Das Verletzungsausmaß hängt dabei neben der Spannungshöhe von weiteren Einflussfaktoren wie der Stromstärke, der Stromart (Gleichstrom/Wechselstrom), der Kontaktdauer zur Stromquelle, der Kontaktfläche, dem Körperwiderstand (setzt sich zusammen aus dem Haut- und Gewebswiderstand) sowie dem Weg des Stromflusses ab [16, 18-23].

Zur Beurteilung der Schwere einer thermischen Verletzung werden das Ausmaß der verbrannten Körperoberfläche (%VKOF), die Tiefenausdehnung (Grad 1-4) und die Lokalisationen der Verbrennungen bestimmt. Begleitverletzungen, insbesondere das Inhalationstrauma, müssen bei der Bestimmung ebenfalls mitberücksichtigt werden [24]. Zur Berechnung des Verbrennungsausmaßes (VKOF) werden Verbrennungen 1. Grades nicht miteinbezogen. Im Kindesalter erfolgt die Einschätzung der VKOF nach der Handflächenregel, wobei die Handfläche inklusive der Finger des Patienten 1 % der Körperoberfläche entspricht [13, 24]. Zur exakteren Bestimmung kann die Tabelle von Lund und Browder herangezogen werden, die unter Berücksichtigung des Patientenalters eine genauere prozentuale Unterteilung der einzelnen Körperregionen vornimmt. Bei den Erwachsenen hingegen hat sich die sogenannte „Neunerregel“ nach Wallace etabliert, bei der die Körperoberfläche des Erwachsenen in 9 %-Regionen zur Abschätzung der VKOF eingeteilt wird [13, 16].

Bei der Unterteilung der Verbrennungstiefe sind bei erstgradigen Verbrennungen die Epidermis, bei zweitgradigen die Epidermis und das Corium, bei drittgradigen die komplette Dermis bis zur Subcutis und bei viertgradigen Verbrennungen alle Hautschichten inklusive Muskeln, Sehnen, Knochen und Gelenken von Verletzungen betroffen. Die Einteilung der Verbrennungsgrade (Grad 1-4) und die entsprechenden klinischen Zeichen sind in der folgenden Tabelle 1 aufgeführt [16, 24].

Einteilung	Tiefe	Klinik
Grad 1	Epidermal	Rötung, Schwellung; starker Schmerz; intaktes Epithel
Grad 2a	Oberflächlich dermal	Blasenbildung; feuchter hyperämischer Wundgrund; prompte Rekapillarisierung; Hautanhangsgebilde intakt; starker Schmerz
Grad 2b	Tief dermal, Haarfollikel und Schweißdrüsenausführungsgänge mitbetroffen und teilweise zerstört	Fetzenförmige Epidermolyse; Blasenbildung; weißlicher, feuchter Wundgrund; gestörte Rekapillarisierung; Hautanhangsgebilde partiell vorhanden; mäßiger Schmerz
Grad 3	Komplett dermal	Trockene, weiße, elfenbeinfarbige Hautnekrose bis hin zur Verkohlung; Verlust von Hautanhangsgebilden; keine Schmerzen
Grad 4	Unterhautfettgewebe, eventuell Muskeln, Sehnen, Knochen und Gelenken	Verkohlung

Tabelle 1: Gradeinteilung der Verbrennungstiefe [24]

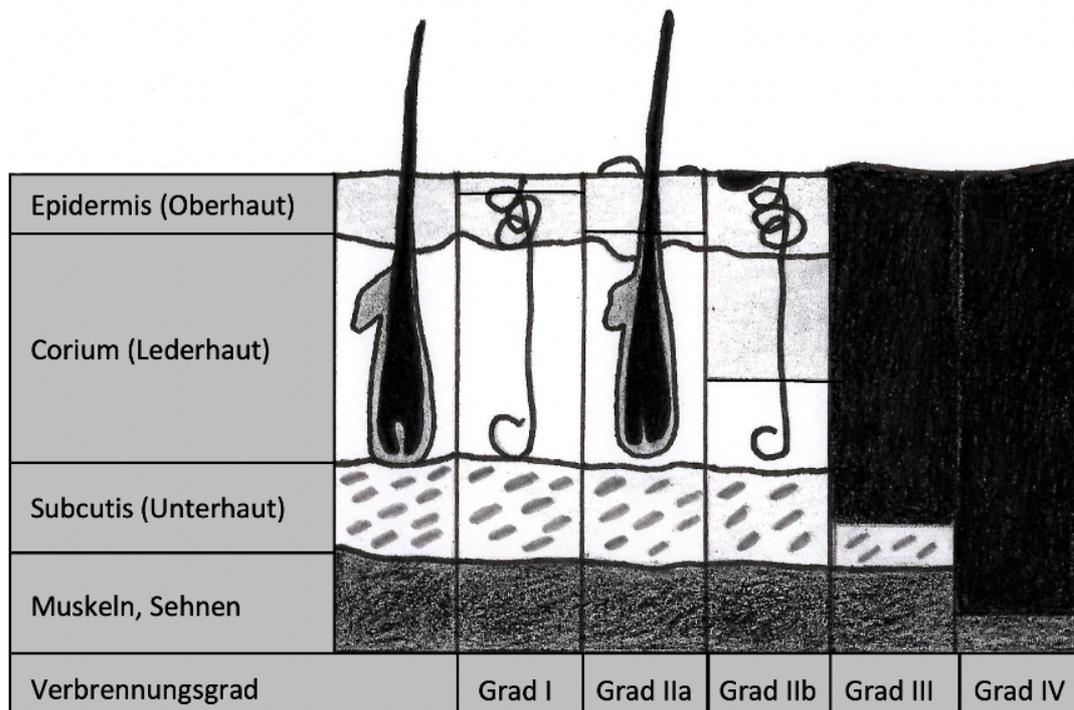


Abbildung 1: Aufbau der Haut. Schematische Darstellung der Verbrennungsgrade nach [24]

### 2.2.2 Abbreviated Burn Severity Index (ABSI)

Der Abbreviated Burn Severity Index (ABSI), von Tobiasen et al. im Jahr 1982 beschrieben, ist ein Score zur Beurteilung der Überlebenswahrscheinlichkeit von Verbrennungsopfern. Hierbei wird anhand der Parameter Alter, Geschlecht, Ausmaß der verbrannten Körperoberfläche (%VKOF), Inhalationstrauma und Verbrennungen 3. Grades, die Sterbewahrscheinlichkeit nach einem Verbrennungstrauma berechnet. Für die einzelnen Parameter werden Punkte vergeben, wobei sich aus der resultierenden Gesamtpunktzahl die prognostische Mortalitätsrate ergibt [16, 25]. Der folgenden Tabelle ist die Punktevergabe sowie die resultierende Prognose entsprechend der Gesamtpunktzahl zu entnehmen.

		Punkte
Verbrannte Körperoberfläche	0-10 %	1
	11-20 %	2
	21-30 %	3
	31-40 %	4
	41-50 %	5
	51-60 %	6
	61-70 %	7
	71-80 %	8
	81-90 %	9
	91-100 %	10
Inhalationstrauma		1
Weibliches Geschlecht		1
3.gradige Verbrennungen		1
Schwere Nebenerkrankungen		1
Alter	0-20	1
	21-40	2
	41-60	3
	61-80	4
	>80	5
<b>Gesamtpunktzahl</b>	<b>Mortalitätsrate</b>	<b>Prognose</b>
2-3	<1 %	Gut
4-5	5 %	Mäßig
6-7	10-20 %	Mäßig ernst
8-9	30-50 %	Ernst
10-11	60-80 %	Schlecht
≥12	>80 %	Sehr schlecht

**Tabelle 2: Abbreviated Burn Severity Index nach Tobiasen et al., nach [4]**

## 2.3 Versorgung von Stromverletzten in Deutschland

### 2.3.1 Präklinische Versorgung

Bei Rettungsmaßnahmen von Stromverletzten steht der Eigenschutz an erster Stelle, da die Verletzten weiterhin in Kontakt mit der elektrischen Quelle stehen können. Dies stellt eine Gefährdung für das Rettungsteam dar. Das sichere Abschalten der Stromquelle ist obligat, um im Anschluss die Verletzten unter Hilfestellung der Feuerwehr aus dem Gefahrenbereich sichern zu können [13, 17, 26]. Bei Verletzungen durch elektrischen Strom ist die Aufnahme in ein Schwerbrandverletzentzentrum indiziert. Dies kann nach Rücksprache mit der Hamburger Verbrennungszentrale erfolgen [13].

Nach Sicherung der Vitalparameter und falls möglich nach einer ausführlichen Anamnese sollte eine Untersuchung auf Begleitverletzungen, auf Vorliegen eines Kompartmentsyndroms, auf Ein- und Austrittswunden und auf neurologische Defizite erfolgen. Bei entsprechender Klinik sollten zudem eine Intubation und eine adäquate Sauerstofftherapie erwogen werden [13]. Außerdem ist ein kardiales Monitoring mit Blutdruckmessung, ein 12-Kanal-EKG und eine Pulsoxymetrie sowie bei Indikation ein EKG-Monitoring für mindestens 24 Stunden durchzuführen [5, 16]. Im Niederspannungsbereich ist das Vorkommen eines Kammerflimmerns und im Hochspannungsbereich eine primäre Asystolie besonders häufig. Überdies kann es beim Kontakt mit elektrischem Strom neben thermischen Schäden wie Verbrennungen auch zu Krampfanfällen sowie zu einem Atemstillstand durch die Hemmung der Reizweiterleitung im Zentralnervensystem kommen [13].

Bereits am Unfallort sollte eine Flüssigkeitssubstitution mit kristalloider Lösung begonnen werden, um das Risiko einer Myoglobinurie und somit eines akuten Nierenversagens zu vermindern. Daher sollten schnellstmöglich großlumige venöse Zugänge angelegt werden [2, 16, 27]. Die Menge der zu substituierenden kristalloiden Lösung wird nach der Parkland-Baxter-Formel berechnet. Hierbei sollen innerhalb der ersten 24 Stunden nach dem Unfallereignis  $4 \text{ ml} \times \text{kg Körpergewicht} \times \% \text{vKOF}$  kristalloide Lösung substituiert werden. 50% dieser berechneten Menge soll dem brandverletzten Patienten innerhalb der ersten 8 Stunden verabreicht werden und die restlichen 50% innerhalb der darauffolgenden 16 Stunden [26].

Im Rahmen der präklinischen Versorgung ist eine Hypothermie strikt zu vermeiden. Die Unterkühlung stellt einen Risikofaktor hinsichtlich der Morbidität und Mortalität von Verbrennungsoptern dar [16]. Bei Körperkerntemperaturen zwischen 35 und 32 °C handelt es sich um eine milde Unterkühlung, bei 32 bis 28 °C um eine moderate und bei Temperaturen unter 28 °C um eine schwere Unterkühlung. Folglich ist stets ein normothermer Zustand zwischen 35,7 und 37,3 °C anzustreben [28].

Des Weiteren stellen präklinische Kühlungsmaßnahmen keine einheitlich geregelte Behandlungsoption bei Verbrennungen dar. In der Primärversorgung bleibt oft unklar, ob und zu welchem Zeitpunkt eine Kühlung mit Kaltwasser angebracht bzw. indiziert ist. Die Kaltwasserbehandlung beschreibt dabei eine Kühlung vor Ort zusätzlich zum Löschen selbst. Aktuellen Leitlinien zufolge werden keine Kühlungsmaßnahmen zur Analgesie bei Verbrennungsverletzungen empfohlen, da diese ein Risiko der Hypothermie darstellen. Daher sollen Kühlungstherapien nach aktuellen Empfehlungen vom medizinischem Fachpersonal nicht durchgeführt bzw. beendet werden. Vielmehr sollten früh angelegte sterile Verbände und eine intravenöse medikamentöse Therapie zur Analgesie von Verbrennungsoptern zunutze gemacht werden [16].

Wesentliche Kriterien bei der Erstversorgung von Stromverletzten sind demnach eine bedarfsgerechte Volumen- und Schmerztherapie, Wärmeerhalt und eine zeitnahe Planung zur stationären Behandlung des Patienten [13].

### 2.3.2 Stationäre Versorgung

Während der klinischen Versorgung wird die bereits am Unfallort begonnene Infusionstherapie und bei Erforderlichkeit eine adäquate Analgosedierung weitergeführt [13, 16, 24]. Falls eine Myoglobinurie vorliegt, ist eine ausreichende Flüssigkeitssubstitution erforderlich, um die Urinausscheidung bei etwa 2 ml/kg/h zu halten. Sollte die Flüssigkeitszufuhr nicht ausreichen, kann zusätzlich 12,5 g Mannitol verabreicht werden [12]. Die Erforderlichkeit einer maschinellen Beatmung, einer Bronchoskopie zur Feststellung eines Inhalationstraumas und einer parenteralen Ernährung ist in Betracht zu ziehen. Das Auftreten von weiteren Komplikationen wie einer Pneumonie, einer Sepsis und Infektionen sind ebenfalls möglich [13, 16, 24]. Ein erhöhtes Infektionsrisiko besteht insbesondere bei großflächigen Verbrennungswunden [29]. Im Falle, dass sich die Infektion systemisch ausbreitet, kann es zu einer Sepsis kommen. Eine Sepsis tritt bei nahezu 50 % aller Schwerverbrannten auf, wobei die Sterblichkeit 35 % bis 76,9 % beträgt [30].

Zur weiteren Therapieplanung ist die Einschätzung des Verbrennungsausmaßes und der Verbrennungstiefen erforderlich [31]. Hierfür werden die Wunden zunächst gründlich gereinigt. Im Folgenden wird über eine konservative oder operative Therapie entschieden. Eine einheitliche allgemeingültige Therapierichtlinie existiert in diesem Zusammenhang jedoch nicht. Eine konservative Therapie ist prinzipiell bei erstgradigen und oberflächlich zweitgradigen Verbrennungen (Grad 2a) indiziert. Während erstgradige Verbrennungen mit antibakteriellen Salben behandelt werden, können bei 2a°-Verbrennungen Okklusivverbände und temporäre Hautersatzmaterialien notwendig sein. Bei tief zweitgradigen (Grad 2b) und drittgradigen Verbrennungen kann meist nicht mehr von einer Spontanheilung ausgegangen

werden. Demnach sind operative Maßnahmen bei entsprechender Indikation zu empfehlen [16, 24]. Weiterhin werden beim Vorliegen von nekrotischen Wunden diese durch frühzeitige Exzision entfernt, um das Infektionsrisiko zu minimieren [12, 16]. Besonders bei Verbrennungen 4. Grades kann die Exzision von Muskeln, Nerven, Sehnen und Knochen erforderlich sein [24]. Daran anschließend erfolgt eine Wunddeckung mit Hauttransplantaten oder Dermisersatzmaterial [12, 24]. Ferner sollte bei Verbrennungsunfällen beim Vorliegen eines Kompartmentsyndroms eine Escharotomie bzw. Fasziotomie durchgeführt werden [13, 16, 24].

Einteilung	Tiefe	Behandlung
Grad 1	Epidermal	Konservativ (nichtoperativ) mit Salben
Grad 2a	Oberflächlich dermal	Konservativ (nichtoperativ); Wundreinigung mit Débridement erfolgt unter aseptischen Bedingungen in Analgosedierung oder Narkose; Okklusivverbände mit inaktiven, aktiven oder biologischen Managementsystemen; ggf. zeitlich verzögert, temporäre synthetische oder biologische Hautersatzmaterialien
Grad 2b	Tief dermal, Haarfollikel und Schweißdrüsenausführungsgänge mitbetroffen und teilweise zerstört	Operative tangentielle Exzision bis in punktuell blutende Dermisanteile; Versorgung und Abdeckung mit Wundmanagementsystemen, synthetischem oder biologischem epidermalem Hautersatzmaterial oder autologer Spalthaut
Grad 3	Komplett dermal	Tangentiale oder epifasziale Nekrektomie; Defektdeckung durch Spalthauttransplantation; ggf. temporäre Deckung mit biosynthetischen Folien, mit allogener Spalthaut oder in Form der Vakuumversiegelung; Einsatz von Dermisersatzmaterial sollte erwogen werden, ggf. auch in Kombination mit Keratinozyten
Grad 4	Unterhautfettgewebe, eventuell Muskeln, Sehnen, Knochen und Gelenke	Exzision; Deckung, eventuell Lappenplastik

**Tabelle 3: Gradeinteilung der Verbrennungstiefe und Behandlungsstrategien [24]**

### 2.3.3 Komplikation akutes Nierenversagen

Eine Komplikation der strominduzierten Verbrennung stellt das akute Nierenversagen dar. Hierbei kann es aufgrund der Verbrennungen, die infolge der Stromeinwirkung entstehen, zu einer Rhabdomyolyse kommen. Durch die Muskelschädigung kommt es zur Freisetzung von Myoglobin und Kreatinin in die Blutbahn, die mit dem Urin über die Nieren ausgeschieden werden. Dies kann zu einer akuten Nierenschädigung führen [20, 31-34]. Der Referenzwert für das Serum-Kreatinin bei Erwachsenen beträgt 0,7-1,3 mg/dl für Männer und 0,5-1,1 mg/dl für Frauen [35]. Werte oberhalb dieser angegebenen Grenzen stellen einen Hinweis auf eine verminderte Nierenfunktion dar.

Ein weiterer wesentlicher Faktor, der Informationen über die Funktionsfähigkeit der Niere liefert, ist die Glomeruläre Filtrationsrate (GFR). Die GFR beschreibt dabei das Flüssigkeitsvolumen, das durch glomeruläre Filtration pro Zeiteinheit produziert wird [36]. Sie wird meist mittels der CKD-EPI-Formel (Formel nach der Chronic Kidney Disease Epidemiology Collaboration) anhand der Parameter Serumkreatinin, Alter, Geschlecht und Rasse abgeschätzt [37]. Die Normwerte variieren demnach in Abhängigkeit der erwähnten Faktoren. Zur groben Orientierung sind die alters- und geschlechtsabhängigen Referenzintervalle [ $\text{ml}/\text{min}/1,73 \text{ m}^2$ ] in der folgenden Tabelle 4 aufgeführt. Eine Abnahme der glomerulären Filtrationsrate deutet auf eine Nierenschädigung hin.

Alter [Jahre]	Männer	Frauen
1-20	>80	
20-29	77-179	71-165
30-39	70-162	64-149
40-49	63-147	58-135
50-59	56-130	51-120
60-69	49-113	45-104
70-79	42-98	39-90
80-89	35-81	32-75

**Tabelle 4: GFR-Referenzintervalle in  $\text{ml}/\text{min}/1,73 \text{ m}^2$  [38], Werte nach [39]**

Um die Diagnose einer akuten Nierenschädigung stellen zu können, werden die von der AKIN (Acute Kidney Injury Network) erarbeiteten RIFLE-Kriterien herangezogen. Diese wurden für eine einheitliche Definition und Stadieneinteilung der akuten Nierenschädigung entwickelt. Die akute Nierenschädigung ist demzufolge definiert durch:

- einen absoluten Anstieg des Serum-Kreatinins um mehr als 0,3 mg/dl innerhalb von 48 Stunden

## 11 Literaturdiskussion

- einen prozentualen Anstieg des Serum-Kreatinins um mehr als 50 % innerhalb von 48 Stunden
- oder einen Abfall der Urinausscheidung unter 0,5 ml/kgKG/Std. über mehr als 6 Stunden [36, 40].

RIFLE-Stadium	AKIN-Stadium	Serumkreatininanstieg RIFLE	Serumkreatininanstieg AKIN
Risk	1	1,5 bis 2-fach	≥ 0,3 mg/dl bzw. 1,5 bis 2-fach
Injury	2	2 bis 3-fach	2 bis 3-fach
Failure	3	Serumkreatinin >4 mg/dl oder > als 3-fach oder Notwendigkeit Nierenersatztherapie	Serumkreatinin >4 mg/dl oder > als 3-fach oder Notwendigkeit Nierenersatztherapie
Loss	-	Dauerhaftes Nierenversagen für mehr als 4 Wochen	-
End Stage Kidney Disease (ESRD)	-	Dauerhaftes Nierenversagen für mehr als 3 Monate	-

Tabelle 5: Einteilung der akuten Nierenschädigung nach den RIFLE- und AKIN-Stadien [36]

## 3 Methoden

### 3.1 Studiendesign

Diese Arbeit ist eine retrospektive Analyse von stationär behandelten Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen, die mit der Unfallursache Stromdurchfluss im Zeitraum von Januar 2015 bis einschließlich Dezember 2018 in einem Brandverletztencentrum aufgenommen wurden sowie im Verbrennungsregister der Deutschen Gesellschaft für Verbrennungsmedizin erfasst wurden. Das Verbrennungsregister der DGV ist eine Datenbank, die eine prospektive Dokumentation der Patientendaten von stationär behandelten brandverletzten Kindern und Erwachsenen in den teilnehmenden Kliniken vornimmt. Die teilnehmenden Verbrennungszentren befinden sich im deutschsprachigen Raum in den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz, wobei die Teilnahme der Kliniken am Register freiwillig ist. Die aktuelle Liste der Kliniken ist auf der Webseite des Verbrennungsregisters ([www.verbrennungsregister.de](http://www.verbrennungsregister.de)) sowie in den einzelnen Jahresberichten ersichtlich [41]. Im Jahr 2018 nahmen insgesamt 45 Kliniken am Verbrennungsregister teil [7]. Da das Verbrennungsregister der DGV im Jahre 2014 gegründet wurde, wurden alle anonymisierten Patientendaten in dem Zeitraum beginnend vom Jahr 2015 ausgewertet.

#### 3.1.1 Patientenkollektiv

Das vorliegende Patientenkollektiv umfasst insgesamt 215 Patienten, die Verbrennungen und Verletzungen nach Stromunfällen erlitten haben. Darunter befinden sich 42 Kinder und Jugendliche bis 18 Jahre sowie 173 erwachsene Patienten (über 18 Jahre). Neben dem Alter beinhaltet der Datensatz Angaben wie das Geschlecht, den Unfallzusammenhang, die Dauer der Zuweisung, das Verletzungsmuster und das Verletzungsausmaß, die Liegedauer, die Anzahl der Operationen, die Arten von Begleitverletzungen sowie die Anzahl der Todesfälle.

#### 3.1.2 Einschluss- und Ausschlusskriterien

Das Einschlusskriterium für den zu analysierenden Datensatz war die Angabe der Unfallursache Stromdurchfluss im Verbrennungsregister. Weitere Selektionskriterien gab es nicht. Alle im Verbrennungsregister registrierten stromverletzten Patienten wurden in die Studie aufgenommen und anschließend in zwei altersabhängige Subgruppen unterteilt. Weitere Kriterien für die Aufnahme von Patienten in das Verbrennungsregister sind in der Projektbeschreibung der DGV einzusehen [41].

### 3.1.3 Bereitstellung der Daten

Die Daten wurden unserem Institut, der Klinik und Poliklinik für Kinderchirurgie der Universitätsmedizin Mainz, von der DGV zur wissenschaftlichen Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Die Freigabe der Daten wurde vom Scientific Board des Verbrennungsregisters gemäß der Publikationsrichtlinie (Version 1.0) geprüft und zur Nutzung genehmigt. Die Übermittlung der anonymisierten Daten erfolgte im Excel- und SPSS-Format. Die Verbrennungsregister-Projekt Nummer für den genehmigten Antrag lautet 2019-01.

### 3.1.4 Ethische Aspekte

Die Durchführung der Studie wurde vom Gremium des Verbrennungsregisters und dem damit verbundenen Ethikkomitee abgezeichnet. Die Kliniken, die die entsprechenden Patientendaten zur Verfügung stellten, nahmen freiwillig an der Studie teil. Es erfolgte eine anonymisierte Übermittlung der Patientendaten an das Register. Aufgrund der ausschließlichen Verarbeitung von anonymen Daten des Registers war kein eigener Ethik-Antrag notwendig.

## 3.2 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS Statistics Version 23.0. Es wurde ein zweiseitiges Signifikanzniveau von 5 % (Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p \leq 0,05$ ) für alle statistischen Tests festgelegt.

Ausgewertet wurden die Daten des Gesamtkollektivs, die altersabhängig in zwei Subgruppen aufgeteilt wurden. Alle Patienten unter 18 Jahren (0 bis einschließlich 17 Jahre) wurden demnach als Kinder und Jugendliche und Patienten über 18 Jahren als Erwachsene bezeichnet. Zusätzlich wurde mit Absprache der DGV eine eigene Unterteilung der Stromunfälle in Niederspannungsunfälle und Hochspannungsunfälle vorgenommen. Durch eine Plausibilitätsprüfung wurden alle Fälle mit der Angabe Stromdurchfluss und zusätzlich Lichtbogen der Gruppe der Hochspannungsunfälle zugeordnet. Außerdem wurden Patienten mit einem hohen Anteil der verbrannten Körperoberfläche (%VKOF) und mit hauptsächlich drittgradigem Anteil ebenfalls dieser Gruppe zugeordnet. Patienten mit der Unfallursache Blitzschlag fielen ebenso in diese Gruppe. Alle Patienten mit einem geringen Anteil der VKOF (unter 5 %) und mit nur geringgradigen Verbrennungen (hauptsächlich Grad 2a) wurden in die Gruppe der Niederspannungsverletzten eingeordnet. Hier betragen die Liegezeiten der Patienten nur wenige Tage. Ziel dieser Einteilung war es, die starken Ausreißerwerte der Niederspannungsunfälle, die nicht mit Hochspannungsunfällen vereinbar schienen, in einer separaten Gruppe zu betrachten.

### 3.3 Methodik

#### 3.3.1 Prüfung auf Normalverteilung

Die Stichproben wurden im ersten Schritt hinsichtlich ihrer Normalverteilung beurteilt. Dies erfolgte deskriptiv durch die Ermittlung des Mittelwerts, der Standardabweichung, der Schiefe, die im Falle einer Normalverteilung zwischen -1 und +1 liegen musste, dem Minimum und dem Maximum. Anschließend wurden durch grafische Darstellungen (Histogramme, Boxplots) Ausreißer und Ungleichverteilungen sowie Abweichungen zwischen dem Mittelwert und dem Median aufgefunden gemacht. Bei schiefen Verteilungen wurde neben dem Mittelwert zusätzlich der Median angegeben, der bei nicht-normalverteilten Daten für die Beschreibung der zentralen Lage den aussagekräftigeren Parameter darstellt.

#### 3.3.2 Varianzanalyse

Zur Prüfung der Varianzgleichheit wurde bei den Analysen der Levene-Test angewendet. Hierbei war bei einem p-Wert  $<0,05$  von einer Varianzheterogenität (Varianzen sind nicht gleich) und bei einem p-Wert von  $\geq 0,05$  von einer Varianzhomogenität (Varianzen sind gleich) auszugehen.

#### 3.3.3 Testverfahren bei kategorialen Variablen

Die grafische Darstellung von kategorialen Variablen erfolgte hauptsächlich mithilfe von Balken- und Kreisdiagrammen. Diese Darstellungsformen wurden verwendet, um die Alters- und Geschlechterverteilung des Patientenkollektivs, die Art des Behandlungszentrums, die Unfallursache, die verletzten Körperteile bei den Kindern sowie die Anzahl der Verstorbenen herauszustellen. Für die Darstellung der absoluten und relativen Häufigkeiten wurden Kreuztabellen verwendet. Die Prüfung der Signifikanz bei kategorialen Variablen erfolgte anhand des Exakten Tests nach Fisher.

#### 3.3.4 Testverfahren bei stetigen Variablen

Für die Darstellung von stetigen Variablen wurden Boxplots und Häufigkeitstabellen genutzt. Bei stetigen Variablen mit Normalverteilung wurden der Mittelwert und die Standardabweichung angegeben. Bei nicht-normalverteilten Variablen wurde zusätzlich der Median sowie die Spannweite (Minimum und Maximum) angegeben. Bei den stetigen Variablen handelt es sich um die Dauer der Zuweisung, das Verbrennungsausmaß (%VKOF), die Krankenhausaufenthaltsdauer, die Anzahl der Operationen und dem ABSI (Abbreviated Burn Severity Index). T-Tests für unabhängige Stichproben wurden bei normalverteilten Werten für den Mittelwertvergleich eines stetigen Merkmals zwischen 2 Gruppen angewendet. Da der Großteil der Parameter nicht normalverteilt war, wurde für alle

statistischen Tests der Mann-Whitney-U-Test angewendet. Es wurde die asymptotische Signifikanz (2-seitig) angegeben.

### 3.3.5 Cox-Regression

Zur Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Variablen auf die Überlebenszeit wurde die Cox-Regression (Überlebenszeitanalyse) verwendet.

Das Hazard Ratio gilt als deskriptives Maß für den Unterschied von Überlebenszeiten. Der  $\text{Exp}(\beta)$ , der die erwartete Veränderung des Hazard Ratios angibt, beschreibt die relative Änderung des Risikos bei Änderung der Einflussgröße um eine Einheit. Dabei liegt bei einem Hazard Ratio:

- $> 1$  → ein erhöhtes Sterberisiko
- $\approx 1$  → ein ungefähr gleich großes Risiko
- $< 1$  → ein reduziertes Risiko

in Bezug auf die Einflussgröße vor. Das Ereignisrisiko wird für die Gruppe mit Vorhandensein des Einflussfaktors im Verhältnis zur Gruppe ohne Vorhandensein des Faktors berechnet. Das heißt, dass das Sterberisiko der Expositionsgruppe im Vergleich zum Sterberisiko der Kontrollgruppe steht. Bei einem p-Wert  $\leq 0,05$  sind signifikante Unterschiede im Überleben nachweisbar. Als primäre Zielgröße gilt die Zeit bis zum Eintritt des Todes. Hierfür wurde der Parameter Liegedauer (in Stunden) bis zum Todeseintritt verwendet. Als Status, der den Ereigniseintritt wiedergibt, wurde die Variable verstorben genutzt. Diese Methodik wurde in Kapitel 4.10.3 Mortalität angewandt, um relevante Einflussfaktoren auf die Sterblichkeit von Stromverletzten ausfindig zu machen [42].

## 3.4 Analyse der Daten

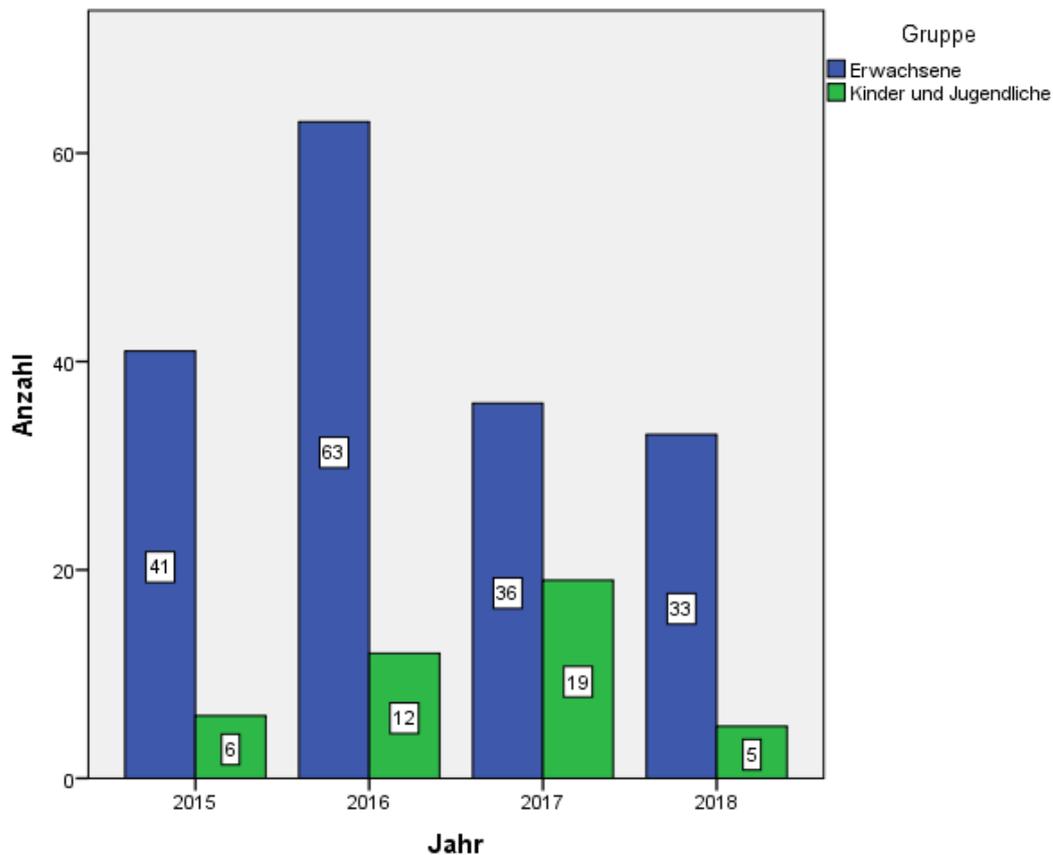
Sollten die Daten aus dem Register aufgrund von unvollständigem Report eine statistische Analyse nicht zulassen, wurde der jeweilige Parameter lediglich deskriptiv dargestellt und auf eine statistische Analyse verzichtet.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Patientenkollektiv

Insgesamt wurden im definierten Zeitraum 215 stromverletzte Patienten unter Berücksichtigung der in den Methoden genannten Selektionskriterien in die Studie aufgenommen. Bei 20 % (n= 42) des gesamten Patientenkollektivs handelte es sich um Kinder und Jugendliche bis 18 Jahre und bei 80 % (n= 173) um Erwachsene.

Die Fallzahlen der vergangenen Jahre sind mit Unterteilung der beiden altersabhängigen Subgruppen in der folgenden Abbildung 2 dargestellt.



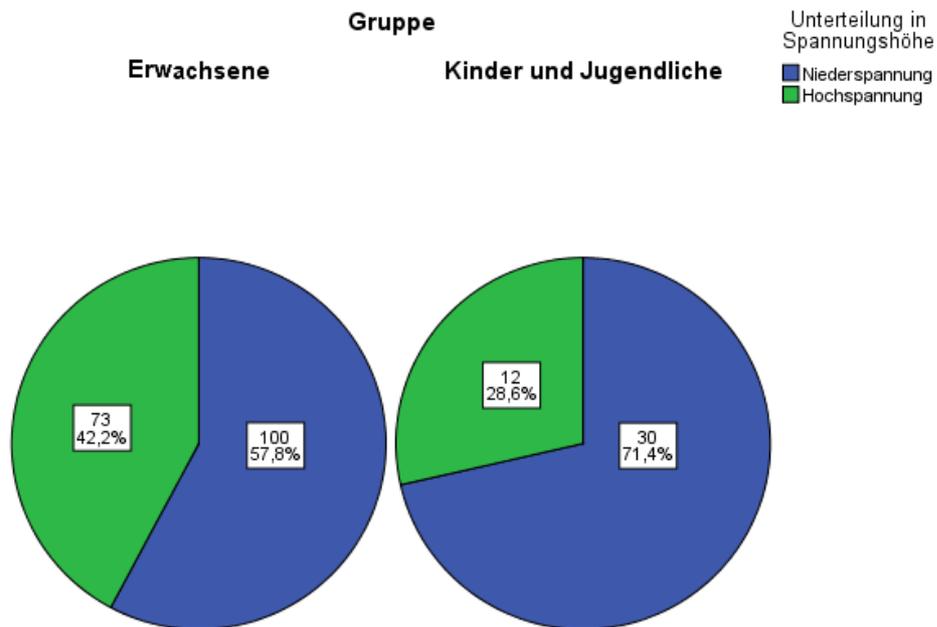
**Abbildung 2: Balkendiagramm; Fallzahlen der Kinder und Erwachsenen (2015-2018)**

In der Gruppe der Kinder und Jugendlichen ließ sich bis zum Jahr 2017 ein Anstieg der Fallzahlen beobachten, wobei im Jahr 2018 die Zahl von 19 stromverletzten Kindern auf 5 Kinder sank. Bei den Erwachsenen zeigte sich ab 2016 ein Trend zur Senkung der behandelten Patientenzahl.

## 17 Ergebnisse

Eine Unterteilung des Patientensatzes in die beiden Subgruppen der Hochspannungsunfälle und Niederspannungsunfälle zeigt einen Anteil der Hochspannungsunfälle von 39,5 % (n= 85) und einen Anteil der Niederspannungsunfälle von 60,5 % (n= 130).

In der Gruppe der Kinder lag dieses Verhältnis bei 29 %: 71 % (HS: NS). Es zeigte sich bei den Kindern somit eine Dominanz der Stromunfälle im Niederspannungsbereich, wobei dieses Verhältnis bei den Erwachsenen mit 42 %: 58 % (HS: NS) nicht besonders ausgeprägt war. Verhältnismäßig kamen Hochspannungsunfälle im Erwachsenenalter häufiger vor als im Kindesalter.



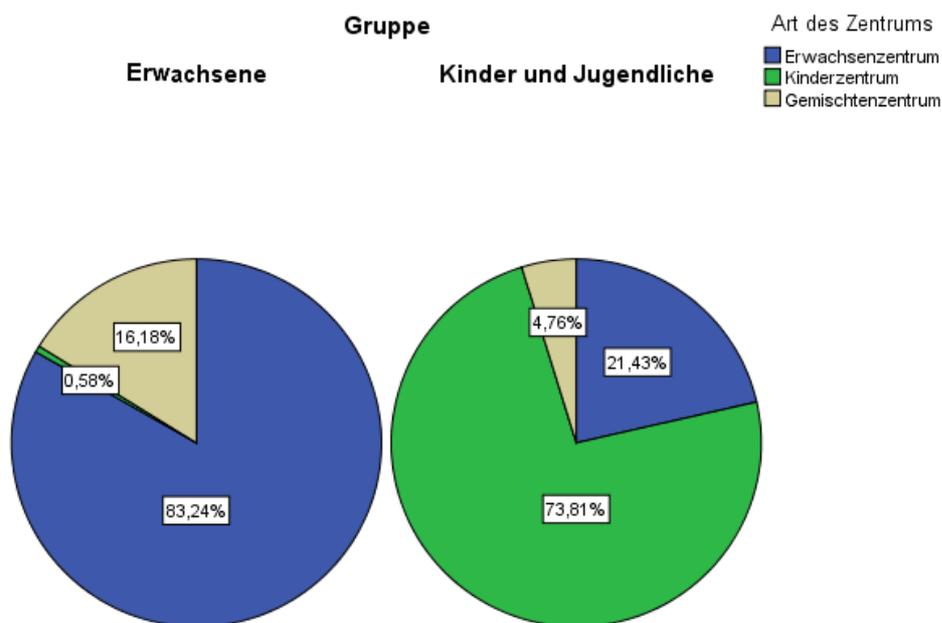
**Abbildung 3: Kreisdiagramm; Fallzahlen der niederspannungs- und hochspannungsverletzten Kinder und Erwachsenen**

## 4.2 Behandlungszentrum

Von insgesamt 45 teilnehmenden Verbrennungskliniken in den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz sind 15 Kliniken auf die Versorgung von schwerbrandverletzten erwachsenen Patienten spezialisiert (Stand 2019). 30 Kliniken sind Kinderzentren, darunter auch die Kinderchirurgie der Universitätsmedizin Mainz mit 2 Kinderbetten für die Versorgung brandverletzter Kinder. 2 der Kliniken sind gemischte Zentren mit dem Schwerpunkt der Behandlung sowohl brandverletzter Kinder als auch brandverletzter Erwachsener [7].

Kinder und Jugendliche wurden mit 74 % zu einem Großteil in Kinderzentren aufgenommen, 21 % in Erwachsenenzentren und 5 % in gemischten Zentren.

83 % der Erwachsenen wurden in entsprechenden Verbrennungszentren für Erwachsene behandelt, 0,6 % in Kinderzentren und ca. 16 % in gemischten Zentren.



**Abbildung 4:** Kreisdiagramm; Unterteilung des Patientenkollektivs in Art des Behandlungszentrums

## 4.3 Demografie

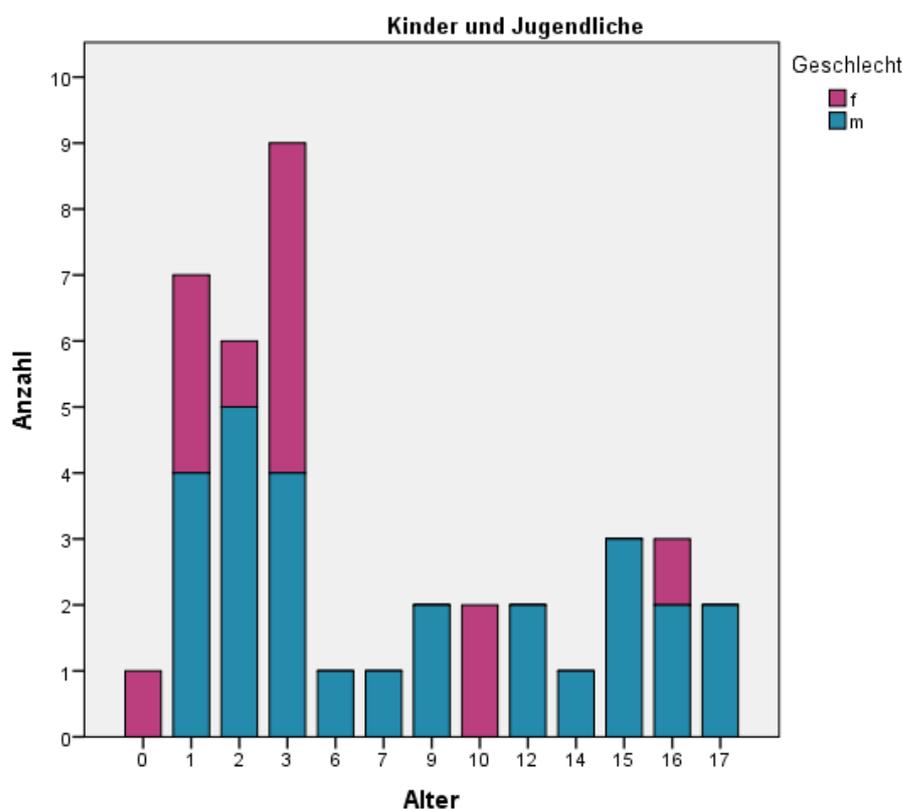
### 4.3.1 Alter

Die Auswertung des Alters der stationär behandelten Kinder und Jugendlichen zeigte ein durchschnittliches Alter von  $6,6 \pm 5,9$  Jahren. Das kleinste Kind war zum Unfallzeitpunkt 7 Monate alt, das Größte ein Jugendlicher von 17 Jahren.

Das durchschnittliche Alter der Erwachsenen betrug  $40,0 \pm 16,9$  Jahre. Der jüngste Patient war 18 Jahre alt und die älteste Patientin war eine 92-jährige Dame, die nach dem Stromunfall mit einem Ausmaß der verbrannten Körperoberfläche von 90 % verstarb.

Bei den minderjährigen Jungen betrug das mittlere Alter  $7,6 \pm 6,2$  Jahre und bei den Mädchen  $4,3 \pm 4,7$  Jahre. Es ließ sich mit  $p=0,151$  keine Signifikanz zwischen den beiden Geschlechtern bestimmen. Das Alter der männlichen volljährigen Patienten betrug im Mittel  $38,7 \pm 15,9$  Jahre und der Frauen  $53,0 \pm 21,2$  Jahre. Dieser Unterschied war statistisch signifikant mit einem  $p=0,01$ .

Bei insgesamt 10 Patienten fehlte eine gültige Altersangabe. Allerdings war von Zweien bekannt, dass es sich um Kinder und bei den restlichen 8 Patienten um Erwachsene handelte. Die demografische Aufteilung des Patientenkollektivs ist in den nachfolgenden Grafiken 5-7 dargestellt.



**Abbildung 5: Balkendiagramm; Alters- und Geschlechterverteilung der Kinder und Jugendlichen am Unfalltag**

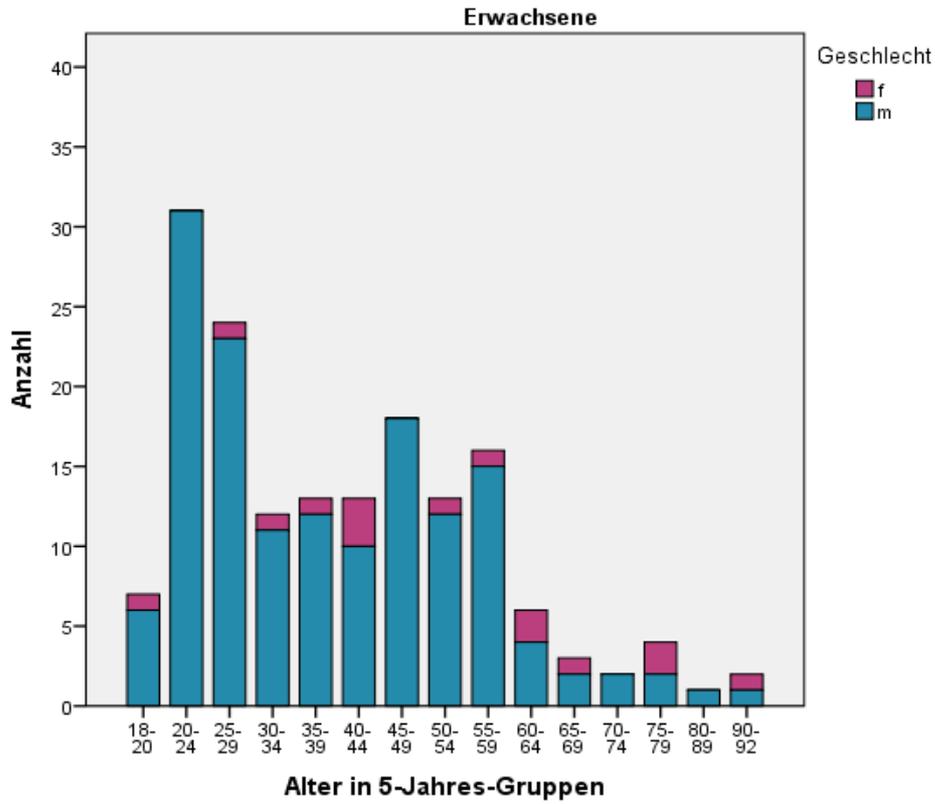


Abbildung 6: Balkendiagramm; Alters- und Geschlechterverteilung der Erwachsenen am Unfalltag in 5-Jahres-Gruppen

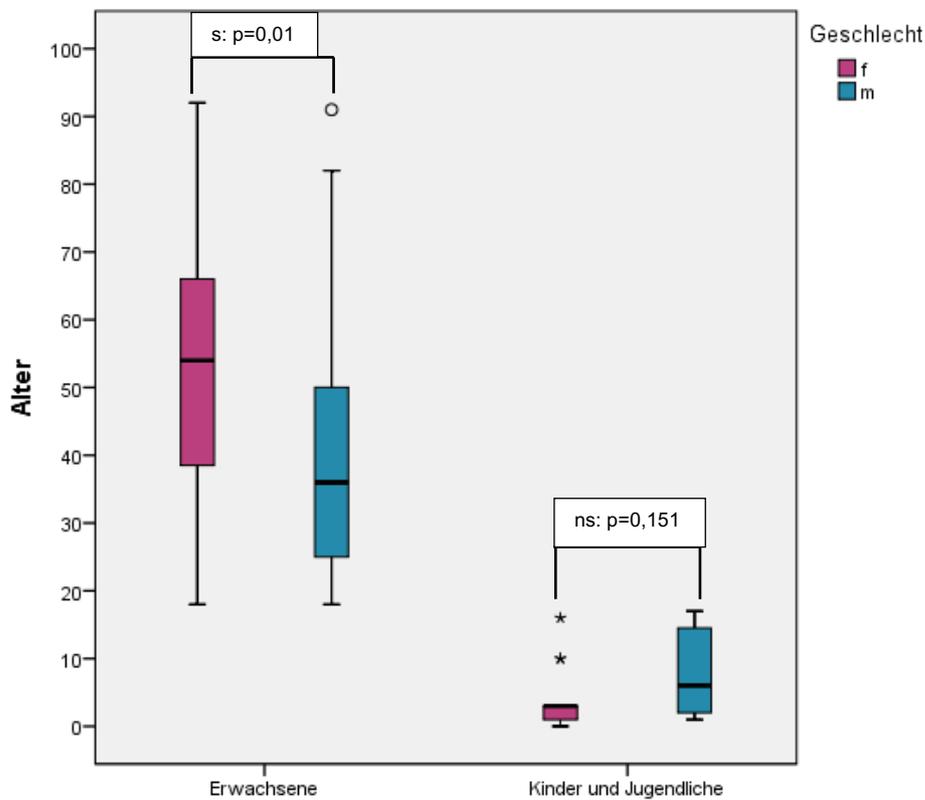
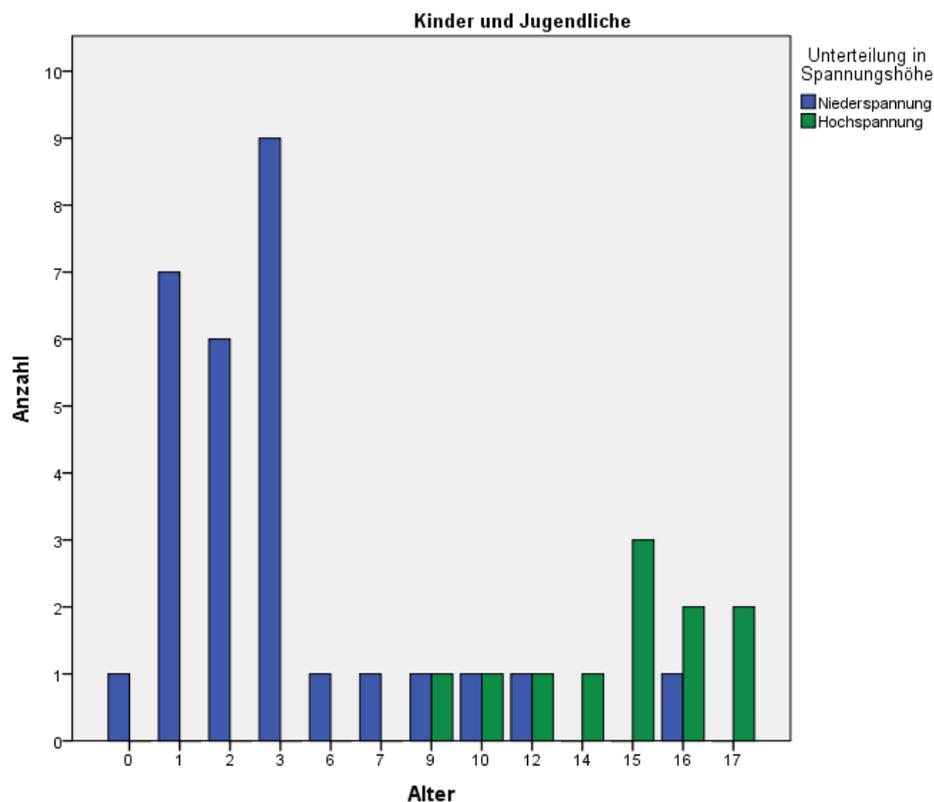


Abbildung 7: Boxplots; Altersverteilung der Kinder und Erwachsenen in Abhängigkeit vom Geschlecht

## 21 Ergebnisse

Beim Altersvergleich der Kinder und Jugendlichen in Bezug auf die beiden Studiengruppen der Hochspannungs- und Niederspannungsunfälle ergab sich ein statistisch signifikanter Unterschied. Während der Altersdurchschnitt der hochspannungsverletzten Kinder  $14,2 \pm 2,7$  Jahre betrug, lag dieser bei den niederspannungsverletzten Kindern bei  $3,7 \pm 3,7$  Jahren ( $p < 0,001$ ). Hochspannungsunfälle ereigneten sich bei den Kindern nur im Altersbereich zwischen 9 und 17 Jahren, wobei die Mehrheit (63,6 %) Jugendliche zwischen 15 und 17 Jahren ausmachten. Den Großteil der Patienten in der Niederspannungsgruppe bildeten mit 75,9 % Kleinkinder im Alter von 1-3 Jahren ab.

Das Alter der Erwachsenen mit Hochspannungsverletzungen (Mittelwert von  $37,3 \pm 16,7$  Jahren) und mit Niederspannungsverletzungen (Mittelwert von  $42,0 \pm 16,8$  Jahren) unterscheidet sich ebenfalls signifikant voneinander. Demnach sind niederspannungsverletzte Erwachsene mit einem p-Wert von 0,05 statistisch gesehen älter als hochspannungsverletzte Erwachsene.



**Abbildung 8: Balkendiagramm; Altersverteilung der Kinder und Jugendlichen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**

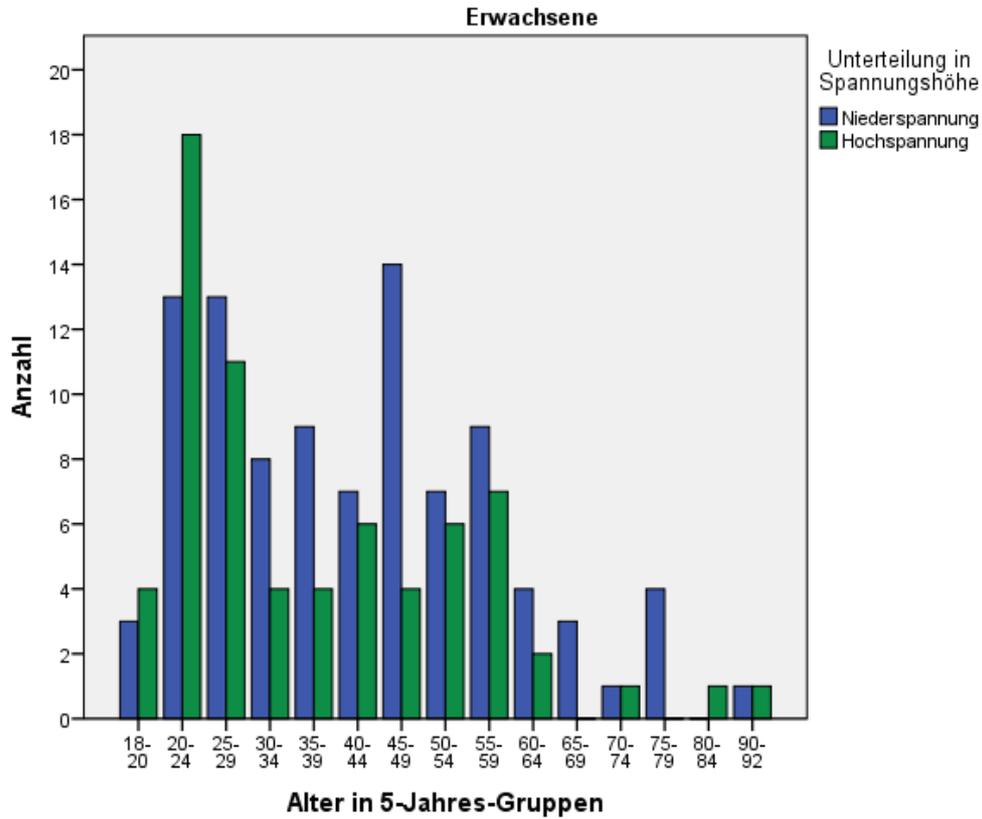


Abbildung 9: Balkendiagramm; Altersverteilung der Erwachsenen in 5-Jahres-Gruppen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe

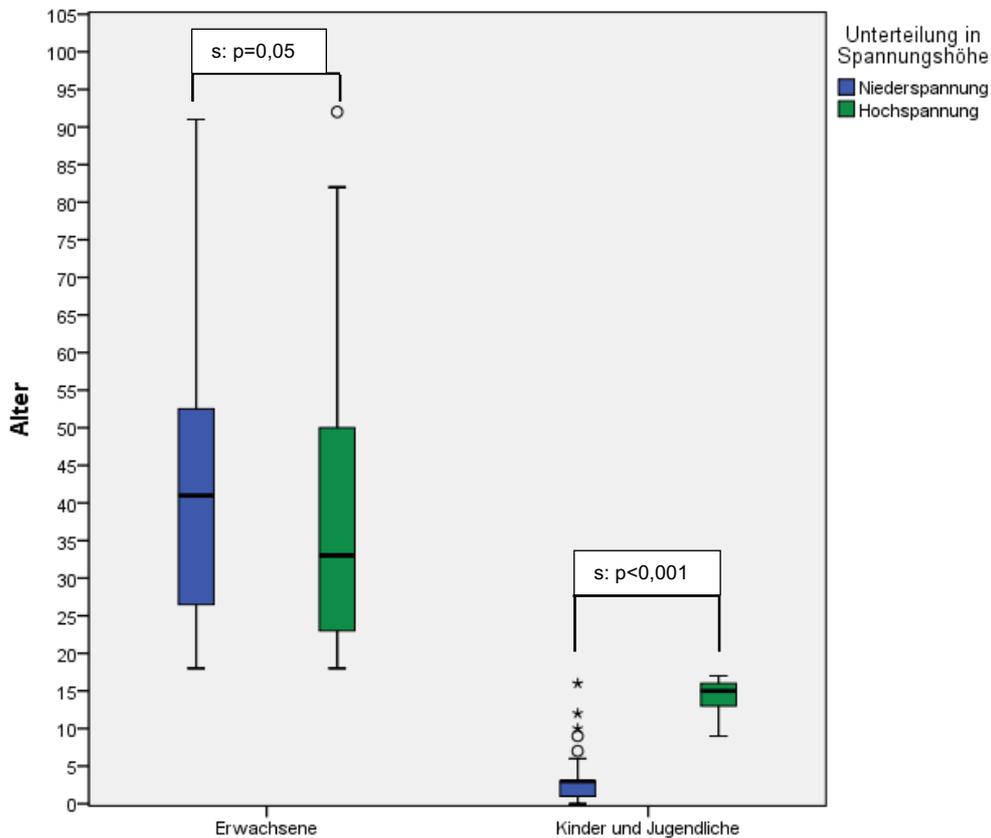
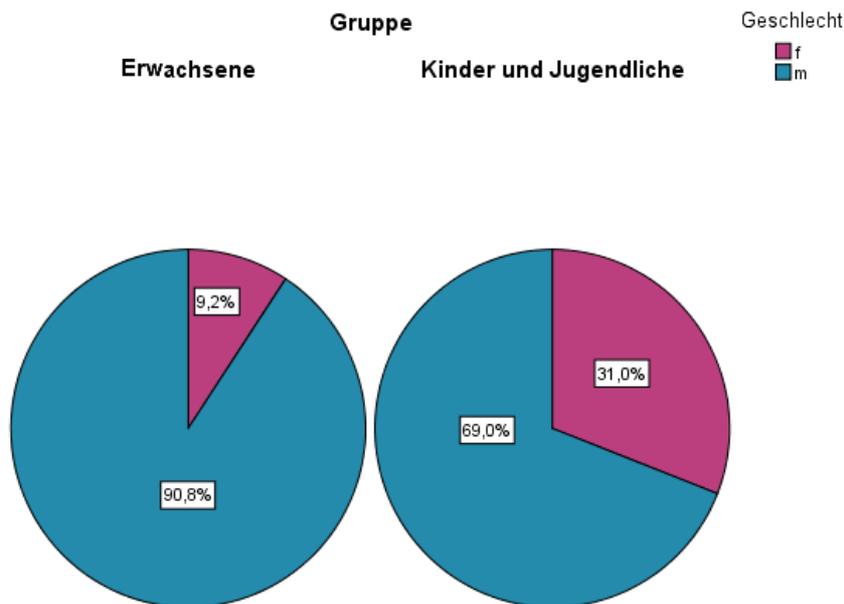


Abbildung 10: Boxplots; Altersverteilung der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe

## 23 Ergebnisse

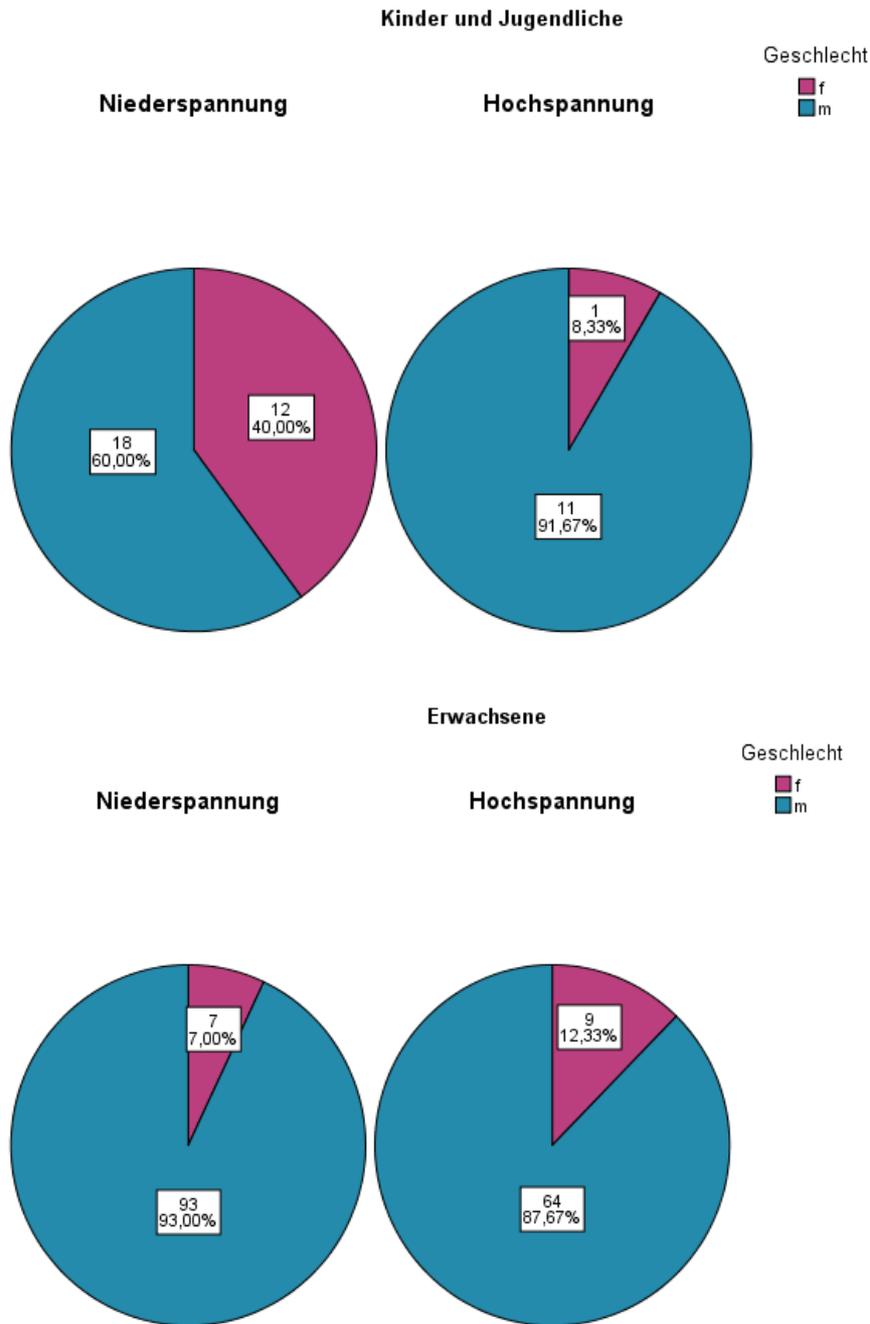
### 4.3.2 Geschlecht

Bei der Geschlechterverteilung der Stromunfälle im Gesamtkollektiv überwiegt der Anteil der männlichen Patienten mit 86,5 % deutlich. Von insgesamt 215 Patienten waren 186 männlich und 29 weiblich (13,5 %). Dieser Geschlechterunterschied war mit einem p-Wert von 0,001 sowohl bei den Kindern und Jugendlichen als auch bei den Erwachsenen hochsignifikant. Der Anteil der Jungen machte in der Gruppe der Kinder und Jugendlichen 69 % (n= 29) und der der Mädchen 31 % (n= 13) aus, wobei bei den Erwachsenen 90,8 % (n= 157) der Patienten Männer und nur 9,2 % Frauen (n= 16) waren.



**Abbildung 11: Kreisdiagramm; Geschlechterverteilung [%] der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen**

In der folgenden Tabelle ist die Geschlechterverteilung der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe dargestellt. Der Anteil der männlichen Patienten überwiegt sowohl bei den Kindern und Jugendlichen (91,7 %) als auch bei den Erwachsenen (87,7 %) mit Hochspannungsverletzungen deutlich. Diese Dominanz der Männer zeigte sich bei der Betrachtung der Niederspannungsverletzten jedoch nicht so stark. Bei den Kindern und Jugendlichen mit Niederspannungsverletzungen zeigte sich ein Geschlechterverhältnis von 40 %: 60 % (Mädchen: Jungen). Dieses Verhältnis war bei den niederspannungsverletzten Erwachsenen mit 7 %: 93 % (Frauen: Männer) deutlich stärker ausgeprägt.



**Abbildung 12: Kreisdiagramm; Geschlechterverteilung [%] der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**

#### 4.4 Unfallzusammenhang

Die meisten Unfälle in der Gruppe der Kinder und Jugendlichen ereigneten sich zu 92,5 % (n= 37) im häuslichen Umfeld bzw. in der Freizeit. Die Dominanz der Haus- und Freizeitunfälle betraf sowohl Unfälle im Niederspannungs- als auch im Hochspannungsbereich. Ein Schulunfall kam lediglich bei eines der stromverletzten Kinder vor (2,5 %).

Bei den Erwachsenen bildeten Verletzungen durch Arbeitsunfälle mit 65,7 % (n= 109) die häufigste Unfallursache ab. Niederspannungsunfälle kamen dabei statistisch signifikant häufiger auf der Arbeit vor als Hochspannungsunfälle ( $p= 0,047$ ). Als zweithäufigsten Unfallzusammenhang ließen sich bei den Erwachsenen Haus- und Freizeitunfälle darstellen (28,9 %, n= 48). Anders als in der Gruppe der Kinder und Jugendlichen erlitten 6 Erwachsene (3,6 %) Stromverletzungen infolge eines Suizidversuchs. Dabei erfolgten 2 Suizidversuche im Niederspannungsbereich und 4 Suizidversuche im Hochspannungsbereich. Des Weiteren war ein Patient (0,6 %) mutmaßlich Opfer einer vorsätzlich kriminellen Handlung. Diese beiden Kategorien kamen bei den Kindern und Jugendlichen nicht vor. Innerhalb der Gruppe der Erwachsenen lässt sich auch ein Geschlechterunterschied bezüglich des Unfallzusammenhangs zeigen. Während bei 60 % der Frauen (n= 6) Haus- und Freizeitunfälle den häufigsten Grund für Stromverletzungen darstellten ( $p= 0,035$ ), waren mit 68,6 % die meisten Verletzungen bei den männlichen Patienten (n= 107) auf Arbeitsunfälle zurückzuführen ( $p= 0,003$ ). Diese Unterschiede waren statistisch signifikant. In der Gruppe der Kinder ließ sich dieser Unterschied nicht feststellen. Sowohl bei den Mädchen (zu 100 %), als auch bei den Jungen (zu 89,7 %) waren Haus- und Freizeitunfälle die häufigste Unfallursache.

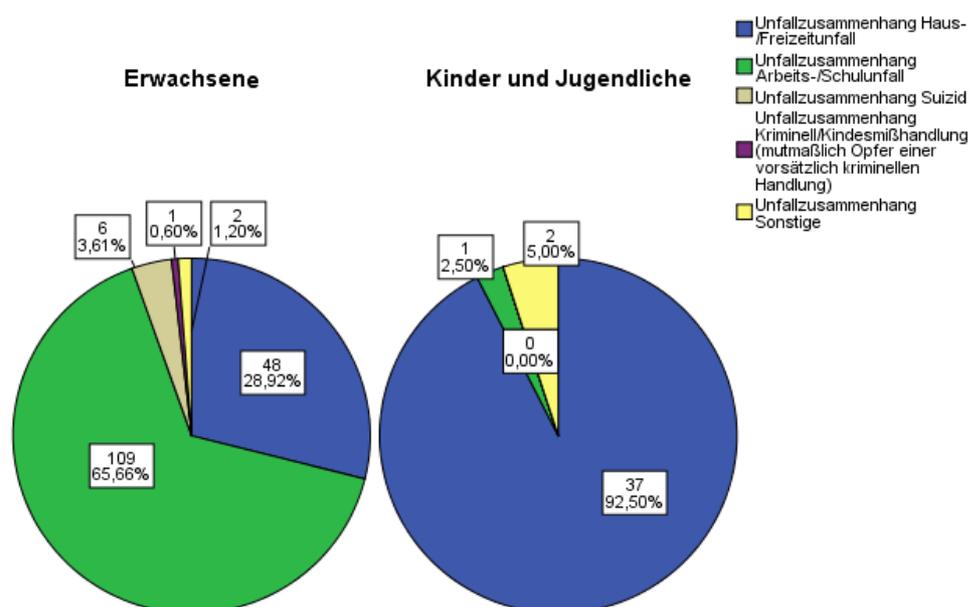
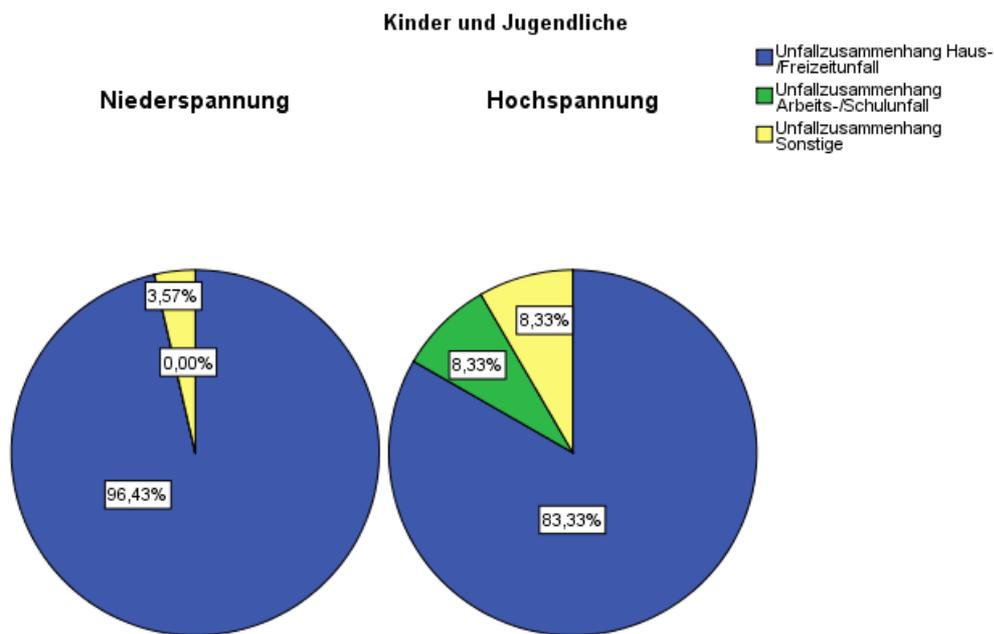
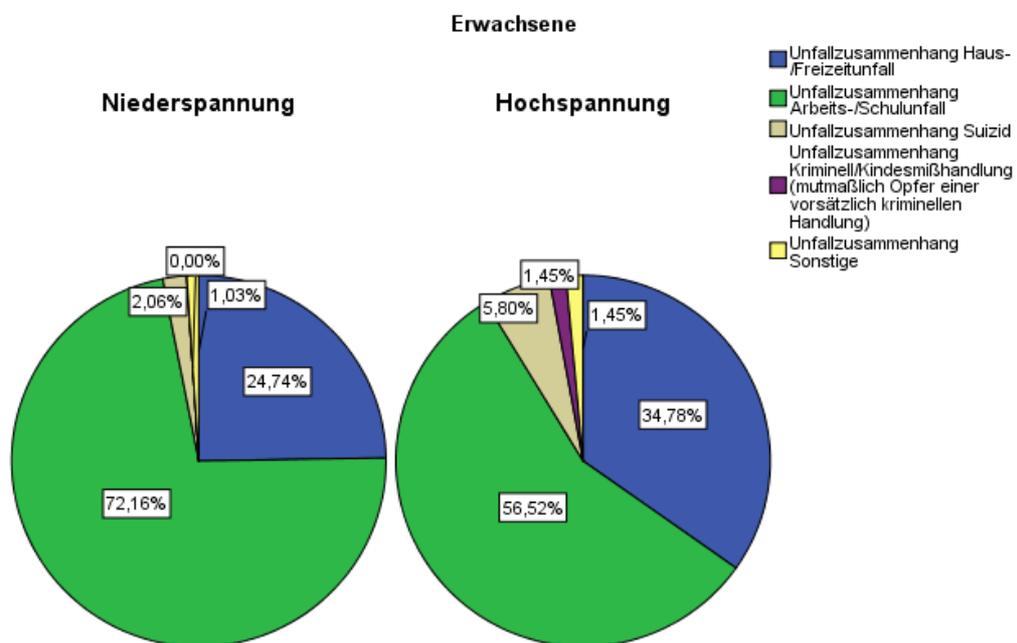


Abbildung 13: Kreisdiagramm; Unfallursache bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen



**Abbildung 14: Kreisdiagramm; Unfallursache bei Kindern und Jugendlichen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**



**Abbildung 15: Kreisdiagramm; Unfallursache bei Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**

#### 4.5 Unfallursache

Die Unfallursache bezeichnet den zur stationären Aufnahme führenden Mechanismus der Verletzung. In die Studie aufgenommen wurden, wie bereits bei den Ein- & Ausschlusskriterien in Kapitel 3.1.2 Methoden erwähnt, nur Patienten mit der Unfallursache Stromdurchfluss. Da Mehrfachnennungen bei der Angabe der Unfallursache möglich waren, kam es auch vor, dass bei Patienten zusätzlich zum Stromdurchfluss die Unfallursachen Lichtbogen, Flamme, Explosion, Kontakt zur Festplatte oder Blitzschlag angegeben wurden. In der Gruppe der Kinder und Jugendlichen kam es bei 8 Patienten (20,5 %) zu Verletzungen aufgrund eines Lichtbogens und bei einem Kind kam es zusätzlich zu der Stromeinwirkung zu weiteren Verletzungen und Verbrennungen aufgrund von Flammen. Bei den Erwachsenen erlitten 26 Personen Lichtbogenverletzungen (17,8 %) und 6 Personen Brandverletzungen (4,1 %). Bei 2 erwachsenen Patienten ereignete sich zusätzlich zum Stromunfall eine Explosion am Unfallort (1,4 %). Zudem erlitt ein 23-jähriger Mann Verletzungen infolge eines Blitzschlags, der dieses Unfallereignis jedoch überlebte. Ein Überblick über die Aufteilung der Unfallursachen ist in der unten aufgeführten Abbildung 16 dargestellt.

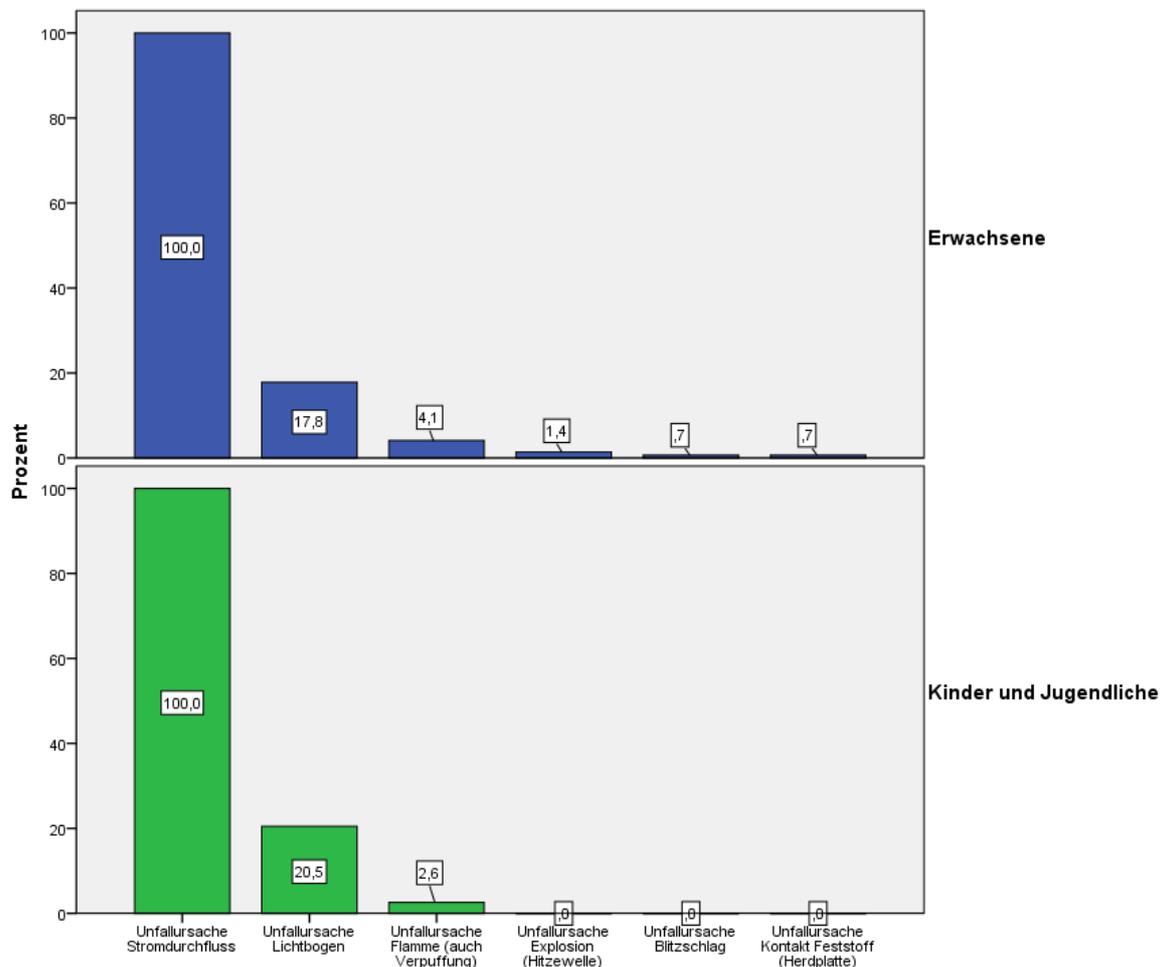


Abbildung 16: Balkendiagramm; Unfallursache bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen

#### 4.5.1 Unfallursache Lichtbogen

In die Berechnungen wurden insgesamt 74 Patienten mit Hochspannungsverletzungen einbezogen. Bei 41,9 % dieser Patienten (n= 31) waren die Verletzungen auf Lichtbögen zurückzuführen. 58,1 % (n= 43) der Unfälle ereigneten sich aufgrund von direktem Kontakt zur Hochspannungsquelle. Bei den Kindern und Jugendlichen machten Lichtbogenverletzungen 80 % der Hochspannungsunfälle aus (8 von 10 Fällen). Bei den Erwachsenen betrug dieser Anteil 35,9 % (n= 23). Aufgrund zu geringer Fallzahl wurde das Patientenkollektiv in den folgenden Berechnungen nicht altersabhängig selektiert, sondern gemeinsam in einem Kollektiv betrachtet.

Die Analysen ergaben, dass Patienten, die Verletzungen aufgrund von Lichtbögen erlitten, tiefere Verbrennungen (Verbrennungen 3. Grades) aufwiesen als Hochspannungsverletzte mit direktem Stromkontakt. Der Anteil drittgradiger Verbrennungen betrug bei Unfällen durch Lichtbögen durchschnittlich  $22,6 \pm 23,2$  % (0-85 %) der verbrannten Körperoberfläche. Bei den Hochspannungsverletzten mit direktem Stromkontakt betrug dieser Anteil dagegen nur  $11,8 \pm 15,5$  % (0-50 %). Dieser Unterschied zeigte eine statistische Relevanz von  $p= 0,001$ .

Des Weiteren waren Verletzte durch Lichtbögen deutlich jünger als Verletzte durch direkten Stromkontakt. Lichtbogenverletzte hatten einen Altersdurchschnitt von  $26,3 \pm 12,5$  Jahren (9-59 Jahre), wobei Verletzte durch direkten Stromkontakt durchschnittlich  $40,7 \pm 18,8$  Jahre (12-92 Jahre) alt waren. Dieses Verhältnis war statistisch signifikant ( $p= 0,016$ ). Bei den weiteren analysierten Variablen, dessen Ergebnisse in Tabelle 24 im Anhang gelistet sind, konnten keine statistisch relevanten Unterschiede detektiert werden.

	Unfallursache Lichtbogen	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Verbrennungstiefe Grad 3 [%]	Nein	42	11,8	15,5	4,0	0,0 - 50,0	<b>0,016</b>
	Ja	31	22,6	23,2	15,0	0,0 - 85,0	
Alter [Jahre]	Nein	43	40,7	18,8	40,7	12,0 - 92,0	<b>0,001</b>
	Ja	31	26,3	12,5	23,0	9,0 - 59,0	

**Tabelle 6: Verbrennungsgrad 3 [%] und Alter in Abhängigkeit vom Vorliegen eines Lichtbogenunfalls; Ja: Lichtbogenunfall; Nein: Hochspannungsunfall durch direkten Stromkontakt**

#### 4.6 Zuweisungsdauer

Die Zuweisungsdauer lässt sich in zwei Kategorien unterteilt betrachten: zum einen die Dauer der Primärzuweisung und zum anderen die Dauer der Sekundärzuweisung. Als Dauer der Primärzuweisung wird die Zeit bezeichnet bis ein Patient nach dem Unfall in einer erstversorgenden Klinik ankommt. Die Sekundärzuweisung bezeichnet eine Zuweisung in ein Brandverletzenzentrum zur Weiterbehandlung [4, 13]. Im Gesamtkollektiv betrug die Dauer der Primärzuweisung im Median 1:24 Stunden (0:21 - 9:55 Stunden). Der Median bei den Kindern und Jugendlichen lag bei 1:40 Stunden (0:33 - 2:45 Stunden) und bei den Erwachsenen bei 1:21 Stunden (0:21 - 9:55 Stunden). Die Mediane der beiden altersabhängigen Subgruppen unterscheiden sich bezüglich der Primärzuweisungsdauer nicht signifikant voneinander ( $p=0,692$ ).

Bei der Dauer der Sekundärzuweisung hingegen lässt sich zwischen den beiden Gruppen ein statistisch signifikanter Unterschied darstellen ( $p=0,035$ ). Während bei den Kindern im Median 6:00 Stunden (2:26 - 273:55 Stunden) bis zur Aufnahme in einer Behandlungseinrichtung vergingen, betrug die Zeit bei den Erwachsenen im Median nur 4:00 Stunden (2:12 - 27:01 Stunden).

	Gruppe	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Primärzuweisung [Std.]	Kinder und Jugendliche	19	1:34	0:36	1:40	0:33 - 2:45	0,692
	Erwachsene	121	1:45	1:18	1:21	0:21 - 9:55	
Sekundärzu- weisung [Std.]	Kinder und Jugendliche	13	62:43	93:40	6:00	2:26 - 273:55	<b>0,035</b>
	Erwachsene	27	6:04	6:08	4:00	2:12 - 27:01	

**Tabelle 7: Dauer der Primär- und Sekundärzuweisung [Std.] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen**

## 4.7 Verletzungsprofil

### 4.7.1 Verbrennungsausmaß und Verbrennungstiefe

Das Ausmaß der verbrannten Körperoberfläche (VKOF) und die Einteilung in die entsprechenden Verbrennungsgrade sind maßgeblich für die Beschreibung des körperlichen Zustands von Verbrennungspatienten. In der nachfolgenden Tabelle 8 ist der durchschnittliche Anteil der VKOF sowie der Verbrennungsgrade 2a, 2b und 3 bei den Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Prozent angegeben. Im Gesamtkollektiv betrug die durchschnittliche VKOF  $15,8 \pm 21,8$  % (0-90 %).

Es ließen sich zwischen den beiden altersabhängigen Subgruppen keine relevanten Unterschiede bezüglich der VKOF sowie der Verbrennungstiefen feststellen, wobei Erwachsene signifikant höhere Anteile an Grad-2b-Verbrennungen aufwiesen als Kinder und Jugendliche ( $p=0,005$ ). Der Anteil der Grad-2b-Verbrennungen betrug bei den Erwachsenen im Durchschnitt  $5,3 \pm 8,5$  % (0-40 %), wobei dieser Anteil bei den Kindern und Jugendlichen nur  $3,5 \pm 9,4$  % (0-47 %) der VKOF ausmachte. Weitere Angaben diesbezüglich sind in der folgenden Tabelle zu finden.

	Gruppen	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Verbrennungstiefe 2a [%]	Kinder und Jugendliche	42	4,3	8,9	0,0	0,0 - 30,0	0,336
	Erwachsene	165	3,9	9,9	0,0	0,0 - 90,0	
Verbrennungstiefe 2b [%]	Kinder und Jugendliche	42	3,5	9,4	0,0	0,0 - 47,0	<b>0,005</b>
	Erwachsene	165	5,3	8,5	1,0	0,0 - 40,0	
Verbrennungstiefe 3 [%]	Kinder und Jugendliche	42	8,9	18,6	1,0	0,0 - 85,0	0,386
	Erwachsene	165	6,3	12,8	0,5	0,0 - 75,0	
Verbrannte Körperoberfläche [%]	Kinder und Jugendliche	42	16,7	25,1	1,5	0,0 - 85,0	0,368
	Erwachsene	165	15,5	20,9	5,0	0,0 - 90,0	

**Tabelle 8: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen**

Bei der Analyse der verbrannten Körperoberfläche und der Verbrennungstiefe zwischen den beiden Gruppen der Niederspannungsverletzten und Hochspannungsverletzten konnten hochsignifikante Ergebnisse erzielt werden. Bei allen beobachteten Verbrennungsgraden (Grad 2a bis 3) zeigten sich sowohl bei den Kindern und Jugendlichen als auch bei den Erwachsenen signifikant höhere Prozentwerte bei den Hochspannungsverletzten im Vergleich zu den Niederspannungsverletzten (s. Tabelle 9). Ebenso verhielt es sich bei der Betrachtung der VKOF. Während hochspannungsverletzte Kinder eine VKOF von durchschnittlich  $51,3 \pm 21,1$  % (27-85 %) aufwiesen, waren es bei den niederspannungsverletzten Kindern nur  $2,8 \pm 5,4$  % (0-25 %). Dieses Verhältnis ließ sich auch bei den Erwachsenen festhalten. Hochspannungsverletzte Erwachsene zeigten eine

## 31 Ergebnisse

VKOF von  $32,6 \pm 22 \%$  (0-90 %) und Niederspannungsverletzte von nur  $2,3 \pm 2,9 \%$  (0-12 %).

Folglich kann behauptet werden, dass innerhalb des betrachteten Studienkollektivs Starkstromverletzte eine größere Verbrennungsfläche sowie tiefere Verbrennungen aufwiesen als Niederstromverletzte.

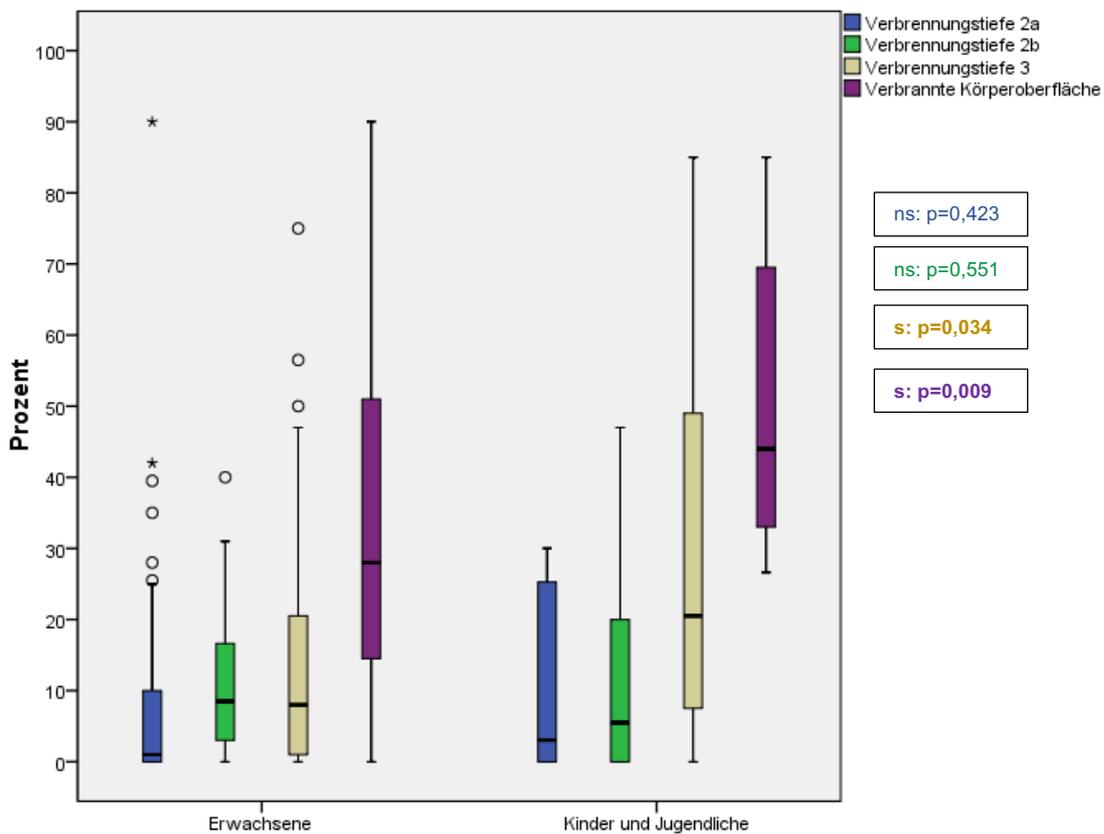
Gruppe		Unterteilung in Spannungshöhe	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert	
Erwachsene	Verbrennungstiefe 2a [%]	Niederspannung	93	1,2	2,3	0,0	0,0 - 12,0	<b>0,005</b>	
		Hochspannung	72	7,4	13,9	1,0	0,0 - 90,0		
	Verbrennungstiefe 2b [%]	Niederspannung	93	0,7	1,5	0,0	0,0 - 8,5	<b>&lt;0,001</b>	
		Hochspannung	72	11,3	9,8	8,5	0,0 - 40,0		
	Verbrennungstiefe 3 [%]	Niederspannung	93	0,5	0,9	0,0	0,0 - 4,0	<b>&lt;0,001</b>	
		Hochspannung	72	13,9	16,6	8,0	0,0 - 75,0		
	Verbrannte Körperoberfläche [%]	Niederspannung	93	2,3	2,9	1,0	0,0 - 12,0	<b>&lt;0,001</b>	
		Hochspannung	72	32,6	21,9	28,0	0,0 - 90,0		
	Kinder und Jugendliche	Verbrennungstiefe 2a [%]	Niederspannung	30	1,8	4,9	0,0	0,0 - 20,0	<b>0,020</b>
			Hochspannung	12	10,6	13,1	3,0	0,0 - 30,0	
Verbrennungstiefe 2b [%]		Niederspannung	30	0,2	0,5	0,0	0,0 - 2,0	<b>0,001</b>	
		Hochspannung	12	11,8	15,0	5,5	0,0 - 47,0		
Verbrennungstiefe 3 [%]		Niederspannung	30	0,9	1,3	0,7	0,0 - 5,0	<b>&lt;0,001</b>	
		Hochspannung	12	28,9	25,9	20,5	0,0 - 85,0		
Verbrannte Körperoberfläche [%]		Niederspannung	30	2,8	5,4	1,0	0,0 - 25,0	<b>&lt;0,001</b>	
		Hochspannung	12	51,3	21,1	44,0	27,0 - 85,0		

**Tabelle 9: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**

Bei der Untersuchung der Hochspannungsunfälle ließen sich zwischen den beiden Altersgruppen der Kinder und Erwachsenen wichtige Erkenntnisse stellen. Während bei den Kindern im Durchschnitt  $51,3 \pm 21,1 \%$  (27-85 %) der Körperoberfläche von Verbrennungen betroffen war, betrug dieser Wert bei den Erwachsenen durchschnittlich nur ca.  $32,6 \pm 22 \%$  (0-90 %). Dieser Vergleich zeigte einen hochsignifikanten Unterschied auf ( $p=0,009$ ). Somit lässt sich folgern, dass Kinder und Jugendliche nach einem Starkstromunfall eine deutlich größere VKOF aufwiesen als Erwachsene. Diese Beobachtung gilt auch für Verbrennungen 3. Grades. Kinder und Jugendliche hatten mit ca.  $28,9 \pm 25,9 \%$  (0-85 %) einen höheren Anteil an drittgradigen Verbrennungen als Erwachsene mit durchschnittlich  $13,9 \pm 16,6 \%$  (0-75 %). Hierbei betrug die statistische Signifikanz  $p=0,034$  (s. Tabelle 10).

	Hochspannungsgruppe	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Verbrennungstiefe 2a [%]	Erwachsene	72	7,4	13,9	1,0	0,0 - 90,0	0,423
	Kinder und Jugendliche	12	10,6	13,1	3,0	0,0 - 30,0	
Verbrennungstiefe 2b [%]	Erwachsene	72	11,3	9,9	8,5	0,0 - 40,0	0,551
	Kinder und Jugendliche	12	11,8	15,0	5,5	0,0 - 47,0	
Verbrennungstiefe 3 [%]	Erwachsene	72	13,9	16,6	8,0	0,0 - 75,0	<b>0,034</b>
	Kinder und Jugendliche	12	28,9	25,9	20,5	0,0 - 85,0	
Verbrannte Körperoberfläche [%]	Erwachsene	72	32,6	22,0	28,0	0,0 - 90,0	<b>0,009</b>
	Kinder und Jugendliche	12	51,3	21,1	44,0	27,0 - 85,0	

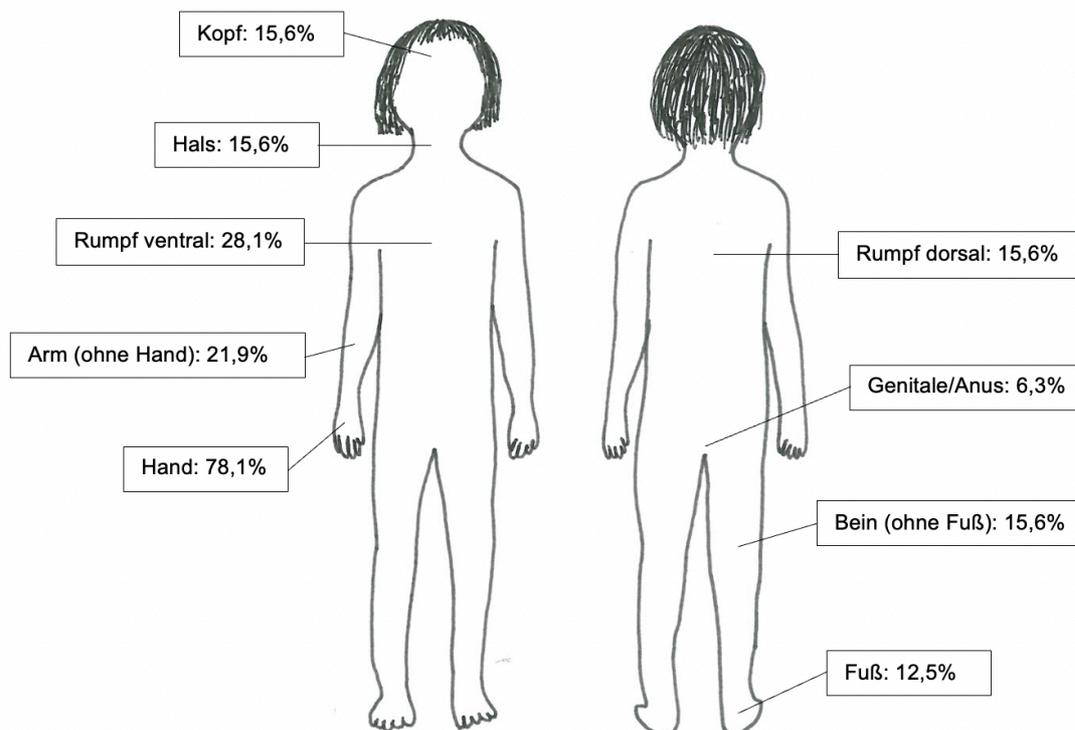
**Tabelle 10: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in der Hochspannungsgruppe**



**Abbildung 17: Boxplots; Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in der Hochspannungsgruppe**

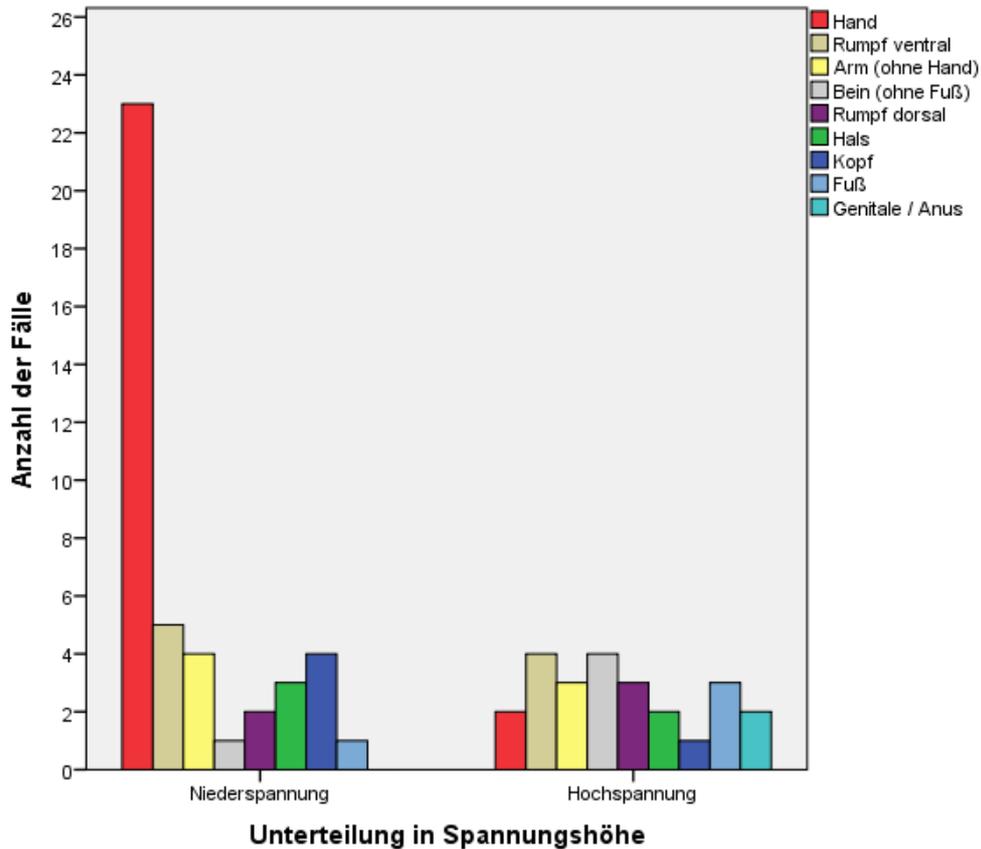
#### 4.7.2 Betroffene Körperregionen

Die von Verletzungen betroffenen Körperregionen können Hinweise auf den Unfallmechanismus geben und sind dementsprechend bedeutsam bei der Prävention von Stromverletzungen. Im Folgenden lagen für diesen Parameter 32 gültige Angaben bei den Kindern und Jugendlichen vor. Bei den Erwachsenen wurde dieser Parameter nicht erhoben. Zudem waren Mehrfachnennungen möglich. Das Körperteil, das am häufigsten von Verletzungen betroffen war, war die Hand. Der Anteil der Kinder mit Verletzungen an der Hand betrug 78,1 % (n= 25). Gefolgt von der Hand war der ventrale Rumpf bei 28 % (n= 9) und die Arme bei 22 % (n= 7) der Kinder von Verletzungen betroffen. Der Kopf, der Hals, der dorsale Rumpf, die Beine, und die Füße waren mit jeweils 15,6 % zu gleichen Anteilen an den Verletzungen beteiligt (n= 5). Bei 2 Kindern (6,3 %) war ebenfalls das Genital bzw. der Anus betroffen. Nachfolgend ist die prozentuale Häufigkeit der betroffenen Körperregionen grafisch dargestellt.



**Abbildung 18: Prozentuale Häufigkeit der verletzten Körperregionen bei Kindern und Jugendlichen**

In der Gruppe der Niederspannungsunfälle verletzten sich 23 von 28 Kindern mit gültigen Angaben an der Hand (82,1 %). Dies stellte das am häufigsten verletzte Körperteil in dieser Gruppe dar. Handverletzungen dominierten in der Gruppe der Hochspannungsverletzten (n=4 gültige Angaben) dagegen nicht. Vielmehr waren die Verletzungen auf alle angegebenen Körperteile relativ gleichmäßig verteilt (s. Abbildung 19).



**Abbildung 19: Balkendiagramm; verletzte Körperregionen bei Kindern und Jugendlichen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**

## 4.8 Präklinische Behandlung und Aufnahme

### 4.8.1 Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt

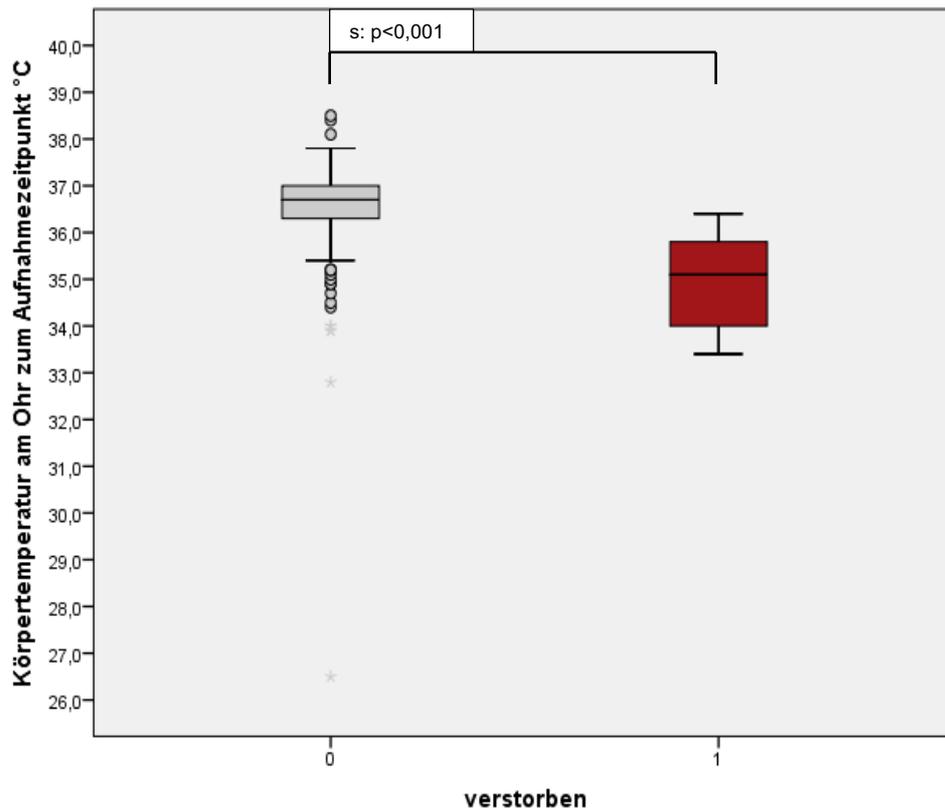
Die normale Körpertemperatur des Menschen liegt zwischen 35,7 und 37,3 °C, im Mittel bei 36,6 °C. Von einer Hypothermie ist ab Werten unter 35 °C zu sprechen. Eine milde Unterkühlung besteht bei Werten zwischen 35 und 32 °C [28].

Im Gesamtkollektiv wurde bei insgesamt 174 Patienten die Körpertemperatur am Ohr zum Aufnahmezeitpunkt gemessen. 9 der Patienten sind im Verlauf der Behandlung verstorben. Im Gesamtkollektiv betrug die durchschnittliche Körpertemperatur  $36,4 \pm 1,2$  °C. Bei den Kindern lag dieser Wert bei durchschnittlich  $36,1 \pm 2,1$  °C und bei den Erwachsenen bei  $36,4 \pm 0,8$  °C. Der Vergleich der Körpertemperatur zwischen diesen beiden Gruppen zeigte keine statistische Signifikanz ( $p > 0,05$ ).

Erwähnenswert ist hierbei der Vergleich der Mittelwerte der Körpertemperaturen von Überlebenden und im Verlauf Verstorbenen. Während bei den Patienten, die den Stromunfall überlebten, der Mittelwert der Aufnahmetemperatur bei  $36,5 \pm 1,2$  °C lag, lag dieser Wert bei den Patienten mit im Verlauf eintretendem Tod bei  $35,0 \pm 1,1$  °C. Es lässt sich somit erfassen, dass bei den Patienten, die im Verlauf des stationären Aufenthalts verstorben sind, eine leichte Unterkühlung zum Aufnahmezeitpunkt vorlag. Bei den Patienten, die nicht verstarben, waren bei der Aufnahme keine Auffälligkeiten bei der Körpertemperatur zu verzeichnen. Diese Beobachtung war mit einem  $p < 0,001$  statistisch hochsignifikant.

	verstorben	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Körpertemperatur	0	165	36,5	1,2	36,7	26,5 - 38,5	<b>&lt;0,001</b>
Aufnahmezeitpunkt [°C]	1	9	35,0	1,1	35,1	33,4 - 36,4	

**Tabelle 11: Körpertemperatur am Ohr zum Aufnahmezeitpunkt [°C] bei Überlebenden und im Verlauf Verstorbenen nach Stromunfall; 0= nicht verstorben; 1= verstorben**



**Abbildung 20: Boxplots; Vergleich der Körpertemperaturen am Ohr zum Aufnahmezeitpunkt [°C] zwischen Überlebenden und im Verlauf Verstorbenen**

Beim Vergleich der Körpertemperaturen von Niederspannungs- und Hochspannungsverletzten zum Aufnahmezeitpunkt zeigte sich, dass die gemessene Körpertemperatur von Hochspannungsverletzten signifikant niedriger war als die der Niederspannungsverletzten ( $p < 0,001$ ). Während die Aufnahmetemperatur bei Hochspannungsverletzten durchschnittlich  $36,0 \pm 1,2$  °C betrug, lag dieser Wert bei den Niederspannungsverletzten bei ca.  $36,6 \pm 1,1$  °C.

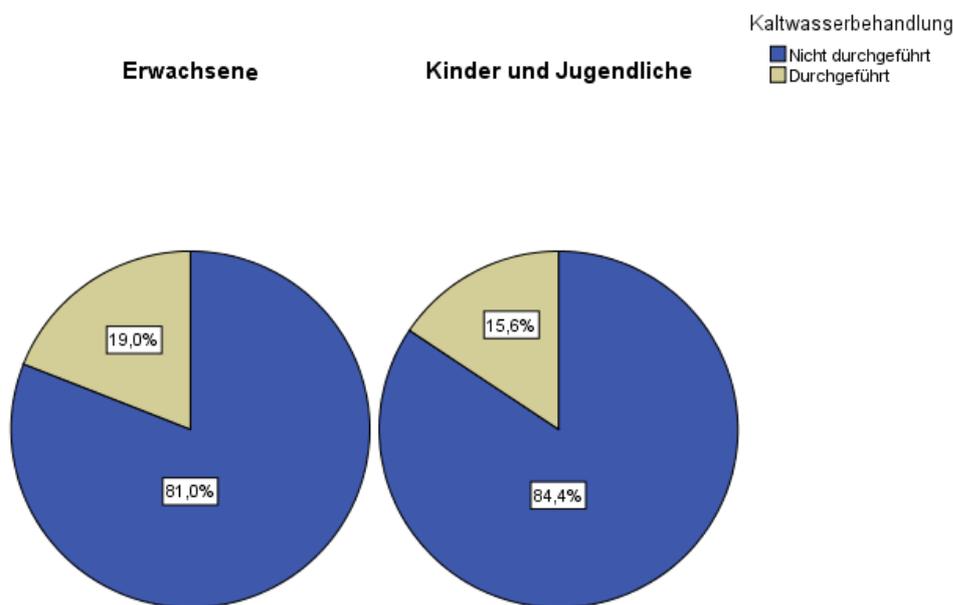
	Unterteilung in Spannungshöhe	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Körpertemperatur Aufnahmezeitpunkt [°C]	Niederspannung	104	36,6	1,1	36,8	26,5 - 38,4	<b>&lt;0,001</b>
	Hochspannung	70	36,0	1,2	36,2	32,8 - 38,5	

**Tabelle 12: Körpertemperatur am Ohr zum Aufnahmezeitpunkt [°C] in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**

#### 4.8.2 Kühlungsmaßnahmen

Präklinische Kühlungsmaßnahmen stellen keine einheitlich geregelte Behandlungsoption bei Verbrennungen dar. Die Kaltwasserbehandlung beschreibt dabei eine Kühlung zusätzlich zum Löschen vor Ort selbst.

Im vorliegenden Patientenkollektiv wurden bei 5 Kindern und 31 Erwachsenen Kaltwasserbehandlungen durchgeführt (18,5 %) und bei insgesamt 159 Patienten (81,5 %) nicht. Die folgende Abbildung 21 zeigt die prozentuale Häufigkeit der Durchführung von Kühlungsmaßnahmen bei den Kindern und Jugendlichen sowie bei den Erwachsenen.



**Abbildung 21: Balkendiagramm; Kaltwasserbehandlungen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen**

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt und einer stattgehabten Kühlung bei Stromverletzten, ließ sich kein signifikanter Unterschied feststellen. Das bedeutet, dass sich in der vorliegenden Studie die Aufnahmetemperatur bei Patienten mit stattgehabten Kühlungsmaßnahmen von der der Patienten ohne Kühlungen nicht signifikant unterschied ( $p=0,162$ ). Die Körpertemperatur der Patienten, bei denen Kühlungsmaßnahmen durchgeführt wurden, betrug dabei durchschnittlich  $36,4 \pm 1,9$  °C und die der Patienten, die nicht gekühlt wurden, etwa  $36,3 \pm 0,9$  °C.

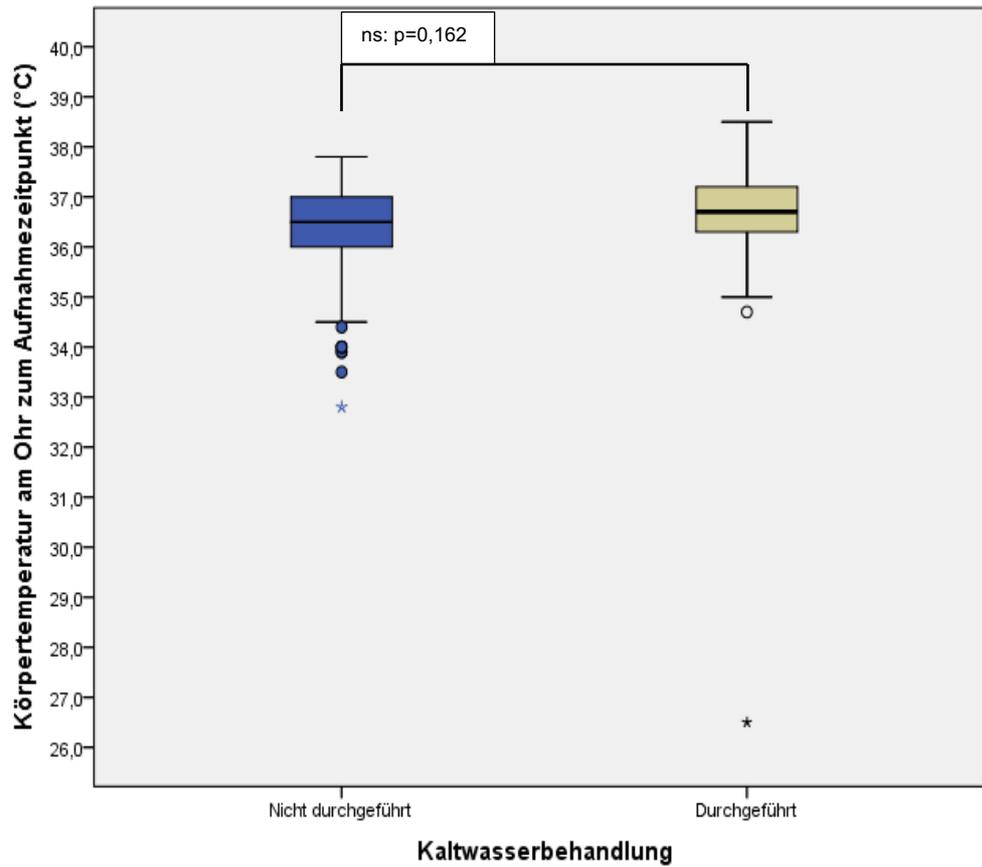


Abbildung 22: Boxplots; Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt [°C] in Abhängigkeit von einer stattgehabten Kühlung

### 4.8.3 Glomeruläre Filtrationsrate und Kreatinin

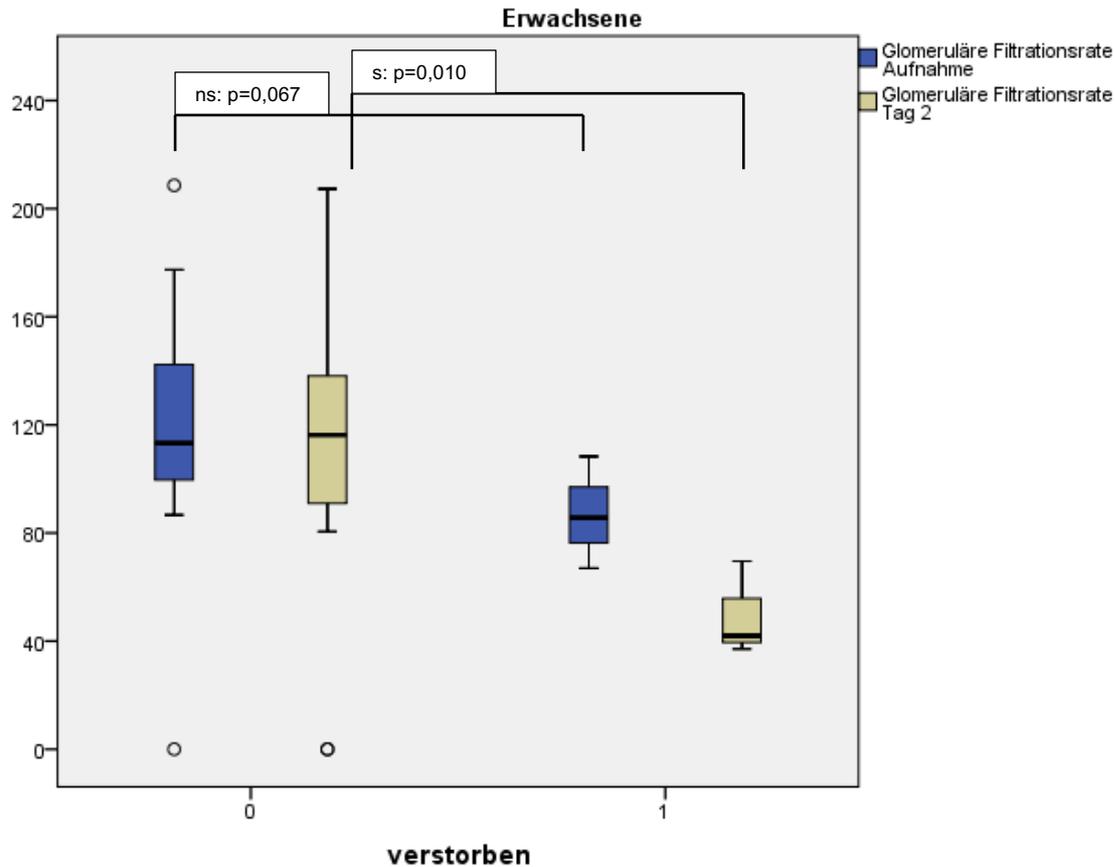
#### 4.8.3.1 Glomeruläre Filtrationsrate

Die glomeruläre Filtrationsrate (GFR) wurde jeweils am Aufnahmetag und am zweiten Tag der Aufnahme dokumentiert. Dieser Parameter wurde nur für Erwachsene ausgewertet, bei denen insgesamt 46 gültige Angaben vorlagen. 4 der 46 Patienten verstarben im Verlauf der stationären Behandlung. In der Gruppe der Kinder und Jugendlichen wurden aufgrund mangelhafter Dokumentation keine Analysen durchgeführt.

Im Folgenden wurde der Zusammenhang der GFR mit der Mortalität dargestellt, um eventuelle Schäden der Niere mit dem Sterbeverhalten der Patienten in Relation zu setzen. Bei den Messungen der GFR [ml/min] ließ sich zwischen den Überlebenden und den im Laufe der Behandlung Verstorbenen ein Unterschied der Mediane zeigen. Der Median der GFR bei den Überlebenden betrug am Aufnahmetag 118 ml/min und am 2. Aufenthaltstag 122 ml/min. Bei den im Nachhinein Verstorbenen lagen diese Werte in deutlich niedrigeren Bereichen: Am 1. Tag betrug der Median 97,0 ml/min und am 2. Tag 42,0 ml/min. Bei der GFR zum Aufnahmezeitpunkt ließ sich bezüglich des Unterschiedes zwischen Überlebenden und Verstorbenen mit einem p-Wert von 0,067 eine Tendenz zur statistischen Signifikanz zeigen. Dieser Unterschied der GFR zwischen Überlebenden und Verstorbenen erwies sich am 2. Aufenthaltstag mit einem  $p = 0,010$  als statistisch signifikant.

Erwachsene	verstorben	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
GFR Aufnahme [ml/min]	0	42	130,5	56,5	118,0	0,0 - 380,0	0,067
	1	4	92,8	20,4	97,0	67,0 - 110,0	
GFR Tag 2 [ml/min]	0	50	120,9	44,9	122,0	0,0 - 207,0	<b>0,010</b>
	1	3	49,6	17,5	42,0	37,0 - 70,0	

**Tabelle 13: GFR [ml/min] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen; 0= nicht verstorben; 1= verstorben**



**Abbildung 23: Boxplots; GFR [ml/min] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen; 0= nicht verstorben; 1= verstorben**

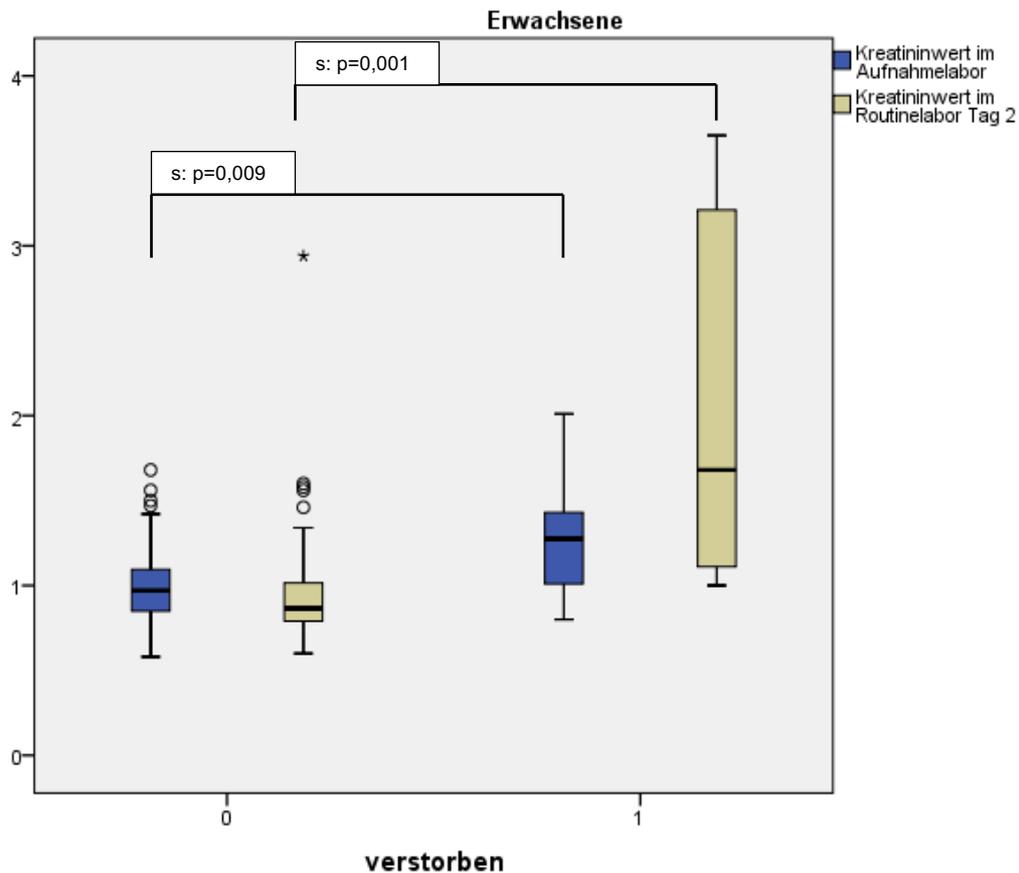
#### 4.8.3.2 Kreatinin

Für die Auswertung des Serum-Kreatininwerts [mg/dl] lagen in der Gruppe der Erwachsenen insgesamt 86 gültige Angaben für den Aufnahmetag und 58 Angaben für den 2. Aufenthaltstag vor. Davon verstarben insgesamt 7 Patienten im Behandlungsverlauf. Patienten, die während des stationären Aufenthalts verstarben, hatten bei der Aufnahme im Median mit 1,3 mg/dl einen signifikant höheren Kreatininwert als Patienten, die nicht verstarben (Median: 0,9 mg/dl). Die Signifikanz betrug hierbei  $p=0,009$ . Dieses signifikante Verhältnis war auch am 2. Tag der Aufnahme zu beobachten. Während im Nachhinein Verstorbene im Median einen Serum-Kreatininwert von 1,7 mg/dl aufwiesen, betrug dieser Wert bei den Überlebenden im Median 0,9 mg/dl. Dieser Unterschied war mit einem  $p=0,001$  statistisch hochrelevant.

## 41 Ergebnisse

Erwachsene	verstorben	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Kreatininwert im Aufnahmelabor [mg/dl]	0	79	3,0	12,9	0,9	0,6 - 95,0	<b>0,009</b>
	1	7	18,8	46,4	1,3	0,8 - 124,0	
Kreatininwert im Routinelabor Tag 2 [mg/dl]	0	52	0,9	0,4	0,9	0,6 - 2,9	<b>0,001</b>
	1	6	2,1	1,1	1,7	1,0 - 3,7	

**Tabelle 14: Kreatininwerte [mg/dl] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen; 0= nicht verstorben; 1= verstorben**



**Abbildung 24: Boxplots; Kreatininwerte [mg/dl] am Aufnahmetag und am 2. Aufenthaltstag bei Erwachsenen, 0= nicht verstorben; 1= verstorben**

Während die Kreatininwerte und die glomeruläre Filtrationsrate bei den Überlebenden im Referenzbereich lagen, waren bei den Patienten, die im Verlauf des Klinikaufenthaltes verstarben, die Kreatininwerte im Median etwas erhöht und die GFR erniedrigt.

## 4.9 Stationäre Behandlung

### 4.9.1 Liegedauer

Die Krankenhausaufenthaltsdauer lag bei den stromverletzten Kindern und Jugendlichen des vorliegenden Patientenkollektivs im Durchschnitt bei  $17,8 \pm 21,8$  Tagen (1-77 Tage). Bei den Erwachsenen lag sie bei durchschnittlich  $25,1 \pm 29,7$  Tagen (1-167 Tage). Dieser Unterschied zwischen den beiden Gruppen erwies sich nicht als statistisch signifikant ( $p=0,187$ ).

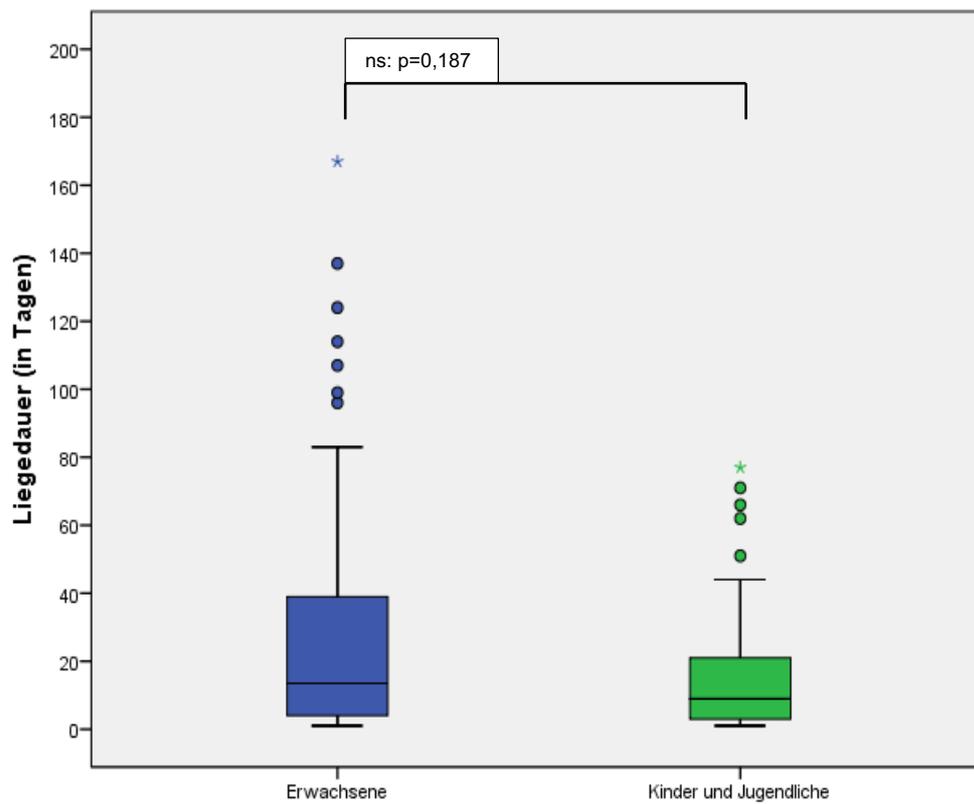


Abbildung 25: Boxplots; Liegedauer [Tage] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen

## 43 Ergebnisse

### 4.9.1.1 Liegedauer in Abhängigkeit von der Spannungshöhe

Zur besseren Darstellung der durchschnittlichen Liegedauer der Stromverletzten wurde dieser Parameter in Abhängigkeit von der Spannungshöhe dargestellt. Es lässt sich sowohl bei den Kindern und Jugendlichen als auch bei den Erwachsenen ein deutlicher Unterschied zwischen den Mittelwerten der Verweildauern der Patienten mit Hochspannungsverletzungen und der Patienten mit Niederspannungsverletzungen zeigen ( $p < 0,001$ ). Während Kinder und Jugendliche in der Gruppe der Hochspannungsverletzten im Mittel  $47,6 \pm 21,5$  Tage (1-77 Tage) und Erwachsene im Mittel  $46,3 \pm 32,8$  Tage (1-167 Tage) stationär waren, verweilten Kinder und Jugendliche mit Niederspannungsverletzungen durchschnittlich  $6,9 \pm 5,8$  Tage (1-21 Tage) und Erwachsene durchschnittlich  $10,3 \pm 14,5$  Tage (1-107 Tage) in der Klinik. Sowohl Kinder und Jugendliche als auch Erwachsene waren nach einem Hochspannungsunfall länger stationär als Verletzte nach einem Niederspannungsunfall. Dieser Zusammenhang erwies sich als statistisch hochsignifikant ( $p < 0,001$ ).

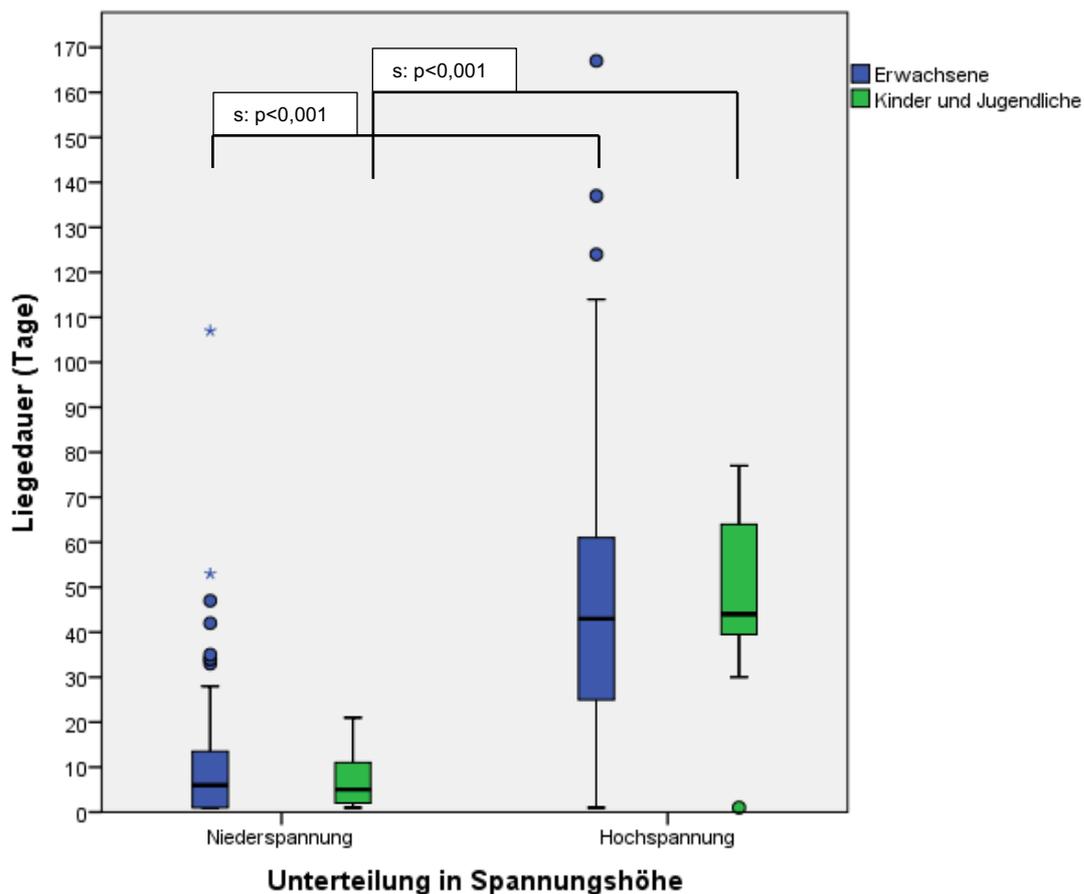


Abbildung 26: Boxplots; Liegedauer [Tage] bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe

#### *4.9.1.2 Zusammenhang der Liegedauer mit Risikofaktoren bei Erwachsenen*

Im Folgenden wurde der Frage nachgegangen, ob die Liegedauer der Erwachsenen von dem Vorhandensein von Risikofaktoren abhängig ist. Bei den Kindern und Jugendlichen wurde dieser Parameter nicht erhoben. Bei den Risikofaktoren handelte es sich um Nikotinkonsum, Adipositas, Diabetes mellitus und andere Vorerkrankungen wie COPD, pAVK, KHK, Hypertonie, Herzrhythmusstörung und Herzinsuffizienz. Von insgesamt 173 Erwachsenen konnten 50 Patienten mit Risikofaktoren (28,8 %) erfasst werden. Bei den restlichen 123 Patienten (71,1 %) waren keine der beschriebenen Risikofaktoren bekannt. Patienten ohne Risikofaktoren verweilten im Durchschnitt  $24,0 \pm 28,8$  Tage (1-137 Tage) in der Klinik und Patienten mit Risikofaktoren im Schnitt  $27,5 \pm 31,7$  Tage (1-167 Tage). Hier ließ sich jedoch keine statistische Signifikanz errechnen ( $p= 0,359$ ). Es wird deutlich, dass sich die Liegedauer bei erwachsenen Patienten mit Risikofaktoren von der der Patienten ohne Risikofaktoren nicht signifikant unterscheidet.

## 4.9.2 Anzahl der Operationen

Im Folgenden wurde die durchschnittliche Anzahl der durchgeführten Operationen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe dargestellt. Hierbei wurde die Gesamtzahl an Operationen inklusive Aufnahmebad und Wundversorgung bis zur Verlegung von der Schwerverbranntenstation erfasst. Beim Vergleich der Anzahl an durchgeführten Operationen ergab sich, dass Hochspannungsverletzte signifikant häufiger operiert wurden als Niederspannungsverletzte. Während bei den niederspannungsverletzten Kindern und Jugendlichen im Mittel nur  $2 \pm 1,6$  Operationen (0-6 OPs) durchgeführt wurden, waren es bei den hochspannungsverletzten Kindern und Jugendlichen  $5,8 \pm 3,3$  Operationen (1-10 OPs). Dieses Verhältnis berechnete sich als hochsignifikant ( $p=0,001$ ). Ähnlich verhielt es sich bei den Erwachsenen. Patienten aus der Niederspannungsgruppe wurden durchschnittlich nur  $1,6 \pm 1,8$ -mal (0-11-mal) operiert, wohingegen dieser Wert in der Hochspannungsgruppe  $5,8 \pm 4,4$  OPs (0-24 OPs) betrug. Auch hier ergab sich ein hochsignifikanter Unterschied mit einem  $p<0,001$ .

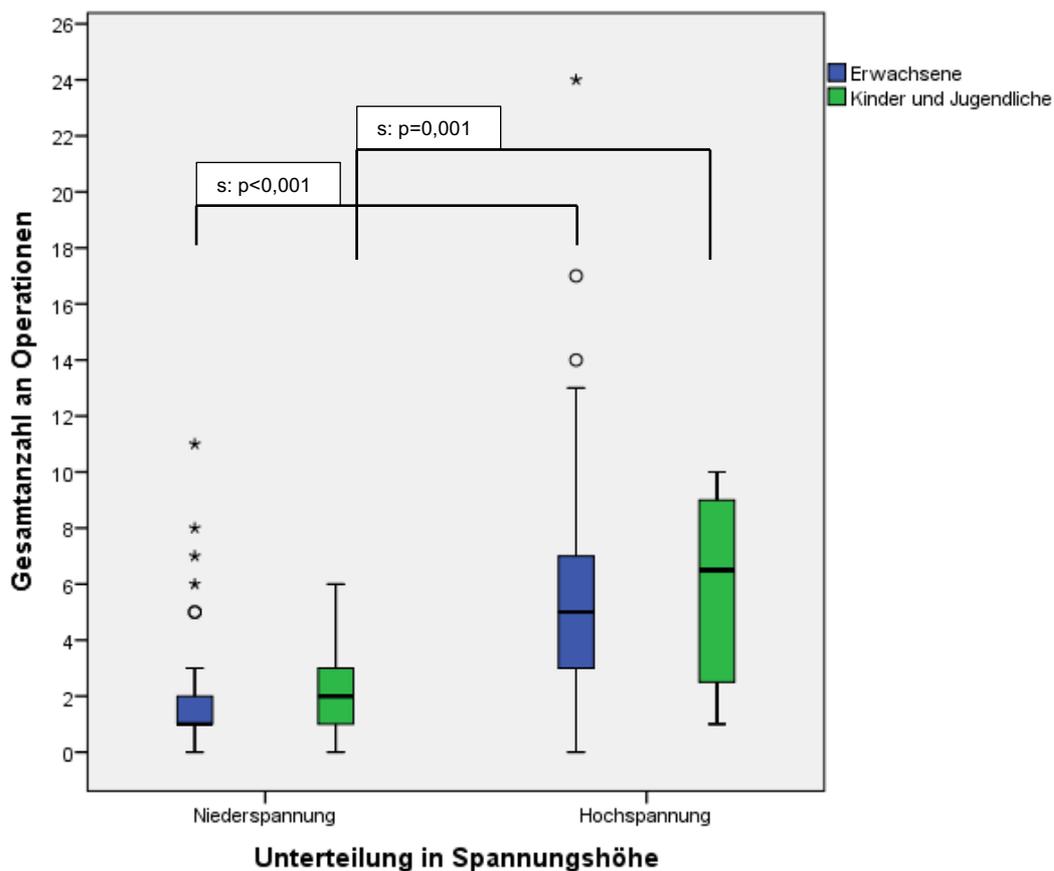
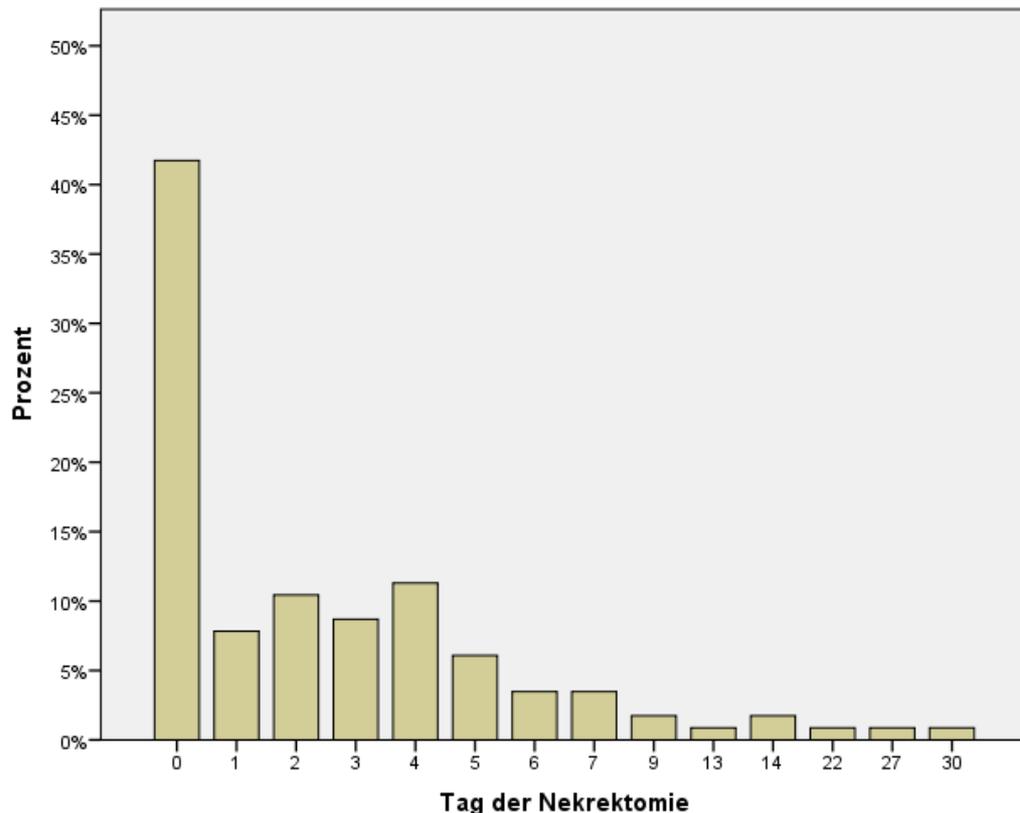


Abbildung 27: Boxplots; Anzahl der Operationen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe

### 4.9.3 Nekrektomie

Im folgenden Kapitel wurde der Tag der ersten durchgeführten Nekrektomie nach stationärer Aufnahme bei den stromverletzten Erwachsenen analysiert. Bei den Kindern und Jugendlichen wurde dieser Parameter nicht erhoben. Die zeitliche Verteilung der ersten durchgeführten Nekrektomie nach Aufnahme ist im unten aufgeführten Diagramm dargestellt.



**Abbildung 28: Balkendiagramm; Tag der ersten Nekrektomie bei Erwachsenen nach stationärer Aufnahme**

Am Aufnahmetag erfolgte bei 44,1 % (n= 49) der stromverletzten Patienten mit gültigen Angaben eine Nekrektomie. Dabei konnte festgestellt werden, dass der mittlere Anteil der verbrannten Körperoberfläche dieser Patienten etwa  $18,9 \pm 24,9$  % (0-83 %) betrug. Durchschnittlich  $11,3 \pm 17,8$  % (0-75 %) davon machten Verbrennungen 3. Grades aus. In den darauffolgenden 7 Tagen machte der Prozentsatz der erstmals nekrektomierten Patienten zwischen 3,6 % und 11,7 % aus. Es kam unter anderem vor, dass Patienten erst 9 Tage nach dem Unfall oder auch später nekrektomiert wurden. Dieser Anteil machte im beobachteten Studienkollektiv 5,3 % der Patienten (n= 6) aus.

Es ist anzumerken, dass bei Patienten, bei denen am Aufnahmetag keine Nekrektomie durchgeführt wurde, eine höhere VKOF und ein höherer Anteil an 2b-gradigen Verbrennungen vorlag als bei Patienten, bei denen eine Nekrektomie durchgeführt wurde

## 47 Ergebnisse

(s. Tabelle 15). Diese Ergebnisse waren statistisch signifikant ( $p= 0,018$ ). Patienten, die am Aufnahmetag nekrektomiert wurden, hatten eine durchschnittliche VKOF von  $18,9 \pm 24,9 \%$  (0-83 %). Patienten, die nicht nekrektomiert wurden, wiesen dabei mit etwa  $24,1 \pm 21,2 \%$  (0,2-70 %) ein größeres Verbrennungsausmaß auf.

Am 2. posttraumatischen Tag dagegen konnten signifikant höhere Werte der verbrannten Körperoberfläche und der prozentualen Anteile der Verbrennungsgrade 2b und 3 für Patienten mit durchgeführter Nekrektomie im Gegensatz zu Patienten ohne eine durchgeführte Nekrektomie beobachtet werden (s. Tabelle 16). Dabei betrug die durchschnittliche VKOF der Patienten, die einer Nekrektomie unterzogen wurden,  $40,4 \pm 24,7 \%$  (4-70 %) und Patienten, die keine Nekrektomie erhielten, eine VKOF von ca.  $19,5 \pm 21,8 \%$  (0-83 %). Diese Erkenntnisse stimmen mit der Theorie überein, dass Nekrektomien bei Patienten mit Verbrennungen Grad 2b und höher erst nach dem 2. posttraumatischen Tag durchgeführt werden sollten.

	Nekrektomie Aufnahmetag	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Verbrennungstiefe 2a [%]	0	61	4,7	8,9	0,0	0,0 - 39,5	0,706
	1	49	3,5	7,3	0,1	0,0 - 35,0	
Verbrennungstiefe 2b [%]	0	61	10,1	11,1	6,0	0,0 - 47,0	<b>0,001</b>
	1	49	4,1	6,4	0,1	0,0 - 25,0	
Verbrennungstiefe 3 [%]	0	61	9,3	13,4	4,0	0,0 - 50,0	0,399
	1	49	11,3	17,8	1,0	0,0 - 75,0	
Verbrannte Körperoberfläche [%]	0	61	24,1	21,2	17,0	0,2 - 70,0	<b>0,018</b>
	1	49	18,9	24,9	6,0	0,0 - 83,0	

**Tabelle 15: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei nekrektomierten Patienten am Aufnahmetag; 0= Nekrektomie nicht durchgeführt; 1= Nekrektomie durchgeführt**

	Nekrektomie Tag 2	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Verbrennungstiefe 2a [%]	0	98	4,1	8,3	0,0	0,0 - 39,5	0,869
	1	12	3,7	7,6	0,3	0,0 - 20,0	
Verbrennungstiefe 2b [%]	0	98	6,3	8,4	2,0	0,0 - 31,0	<b>0,009</b>
	1	12	16,7	14,6	12,0	0,0 - 47,0	
Verbrennungstiefe 3 [%]	0	98	8,9	14,5	2,0	0,0 - 75,0	<b>0,025</b>
	1	12	20,1	20,1	17,0	0,0 - 50,0	
Verbrannte Körperoberfläche [%]	0	98	19,5	21,8	10,0	0,0 - 83,0	<b>0,003</b>
	1	12	40,4	24,7	39,0	4,0 - 70,0	

**Tabelle 16: Verbrennungsausmaß und Anteil der Verbrennungsgrade [%] bei nekrektomierten Patienten am 2. posttraumatischen Tag; 0= Nekrektomie nicht durchgeführt; 1= Nekrektomie durchgeführt**

## 4.10 Outcome

### 4.10.1 Komplikationen

In der folgenden Tabelle 17 sind die Häufigkeiten der unterschiedlichen Komplikationen und Risikofaktoren mit Angabe der Todeszahlen in den jeweiligen Kategorien angegeben. Angaben zu den Komplikationen wurden erst seit dem Jahr 2017 vom Verbrennungsregister erfasst. Mehrfachangaben waren dabei möglich.

Komplikation	Kinder und Jugendliche		Erwachsene	
	gesamt	verstorben	gesamt	verstorben
Inhalationstrauma	1	1 (100%)	3	0 (0%)
Beatmung	7	1 (14,3%)	52	7 (13,5%)
Pneumonie	3	1 (33,3%)	10	0 (0%)
Sepsis	2	1 (50%)	5	2 (40%)
Begleitverletzungen	1	0 (0%)	7	0 (0%)
Nachweis multiresistenter Erreger	2	1 (50%)	-	-
Risikofaktoren	-	-	50	0 (0%)

**Tabelle 17: Komplikationen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mit Gegenüberstellung der Mortalitätsraten in der jeweiligen Kategorie**

Es zeigte sich, dass in beiden altersabhängigen Subgruppen die Komplikationen Pneumonie, Sepsis sowie die Notwendigkeit einer Beatmung etwas häufiger vorkamen als die weiteren angegebenen Komplikationen und diese ebenfalls mit höheren Mortalitätsraten einhergingen.

Komplikation	Kinder und Jugendliche		p-Wert	Erwachsene		p-Wert
	NS	HS		NS	HS	
Inhalationstrauma	0	1 (8,3%)	0,286	0	3 (4,1%)	0,073
Beatmung	0	7 (100%)	<b>0,028</b>	8 (12,3%)	44 (78,6%)	<b>&lt;0,001</b>
Pneumonie	0	3 (60%)	<b>0,005</b>	0	10 (35,7%)	<b>&lt;0,001</b>
Sepsis	0	2 (40%)	<b>0,036</b>	0	5 (17,9%)	<b>0,023</b>
Begleitverletzungen	1 (5,3%)	0	1,000	3 (10,3%)	4 (14,8%)	0,700
Nachweis multiresistenter Erreger	0	2 (50%)	<b>0,029</b>	-	-	

**Tabelle 18: Komplikationen bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe**

In der Gruppe der Hochspannungsverletzten ließen sich sowohl bei den Kindern und Jugendlichen als auch bei den Erwachsenen häufiger Komplikationen feststellen als in der Gruppe der Niederspannungsverletzten. Die Signifikanzen für die jeweiligen Komplikationen sind der Tabelle 18 zu entnehmen. Statistisch signifikant waren die Unterschiede des Vorkommens bezogen auf die Beatmung, Pneumonie, Sepsis sowie der Nachweis multiresistenter Erreger. Während bei den Niederspannungsverletzten nur bei 6,2 % (n= 8) der Patienten Komplikationen auftraten, waren es bei den Hochspannungsverletzten 67,1 % (n= 57) der Patienten ( $p < 0,001$ ).

#### 4.10.2 Abbreviated Burn Severity Index (ABSI)

Im Folgenden wurde die prognostische Mortalitätsrate von Verbrennungspatienten nach Tobiasen et al. herangezogen, um diese mit der tatsächlichen Anzahl der Verstorbenen in den unterschiedlichen ABSI-Gruppen zu vergleichen. Hierfür wurde in einer Tabelle die Anzahl der verstorbenen Patienten innerhalb der jeweiligen ABSI-Gruppe aufgelistet und der prognostische Score zur Sterblichkeit nach Tobiasen et al. dem gegenübergestellt [16]. Die Prozentzahl der Verstorbenen in den jeweiligen ABSI-Gruppen bezieht sich auf die Anzahl der Patienten, die sich in derselben Gruppe befinden. Die unten aufgeführte Tabelle 19 bezieht sich nur auf Erwachsene.

ABSI-Gruppe (nach Punktzahl)	Verstorbene (innerhalb der ABSI-Gruppe)	Mortalitätsrate nach Tobiasen et al.
ABSI 2-3	0 %	≤1 %
ABSI 4-5	0 %	1-10 %
ABSI 6-7	2,9 % (1 von 35)	10-20 %
ABSI 8-9	20 % (3 von 15)	30-50 %
ABSI 10-11	44,4 % (4 von 9)	60-80 %
ABSI 12-13	50 % (1 von 2)	≥90 %
ABSI >13	100 % (1 von 1)	>99 %

**Tabelle 19: Gegenüberstellung tatsächlich Verstorbener mit der prognostischen Mortalitätsrate nach Tobiasen et al. bei den Erwachsenen [16]**

Anhand der Tabelle ist erkennbar, dass sich die prognostische Sterbewahrscheinlichkeit nach Tobiasen et al. in Bezug auf den hier betrachteten Patientensatz nicht verifizieren lässt. Die Anzahl der Verstorbenen in den jeweiligen Verletzengruppen liegt deutlich unter der prognostizierten Sterblichkeitsrate. Bei sehr hohen ABSI-Werten (über 13 Punkten) fällt die Mortalität im Studienkollektiv allerdings, wie im prognostischen Score nach Tobiasen et al. beschrieben, entsprechend hoch aus.

In der Gruppe der Kinder und Jugendlichen gab es ein Kind mit einem ABSI von 10 Punkten und ein Kind mit einem ABSI von 12 Punkten. Beide sind im Verlauf der Therapie verstorben. Unter den Kindern mit einem ABSI von 9 Punkten und weniger konnten keine Todesfälle verzeichnet werden.

Bei der Betrachtung des ABSI-Scores ließen sich sowohl bei den Kindern und Jugendlichen als auch bei den Erwachsenen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen der Hochspannungsunfälle und Niederspannungsunfälle zeigen. Bei den Kindern und Jugendlichen lag der durchschnittliche ABSI-Score der Hochspannungsverletzten bei durchschnittlich  $7,4 \pm 2,4$  Punkten, wobei er bei den Niederspannungsverletzten im Schnitt nur  $3,1 \pm 0,8$  Punkte betrug ( $p < 0,001$ ). Bei den Erwachsenen ließ sich dieses signifikante Verhältnis ebenfalls beobachten ( $p < 0,001$ ). Hochspannungsverletzte Erwachsene wiesen dabei einen ABSI-Score von etwa  $7,2 \pm 2,5$  Punkten auf und Niederspannungsverletzte von nur etwa  $4,1 \pm 1,1$  Punkten. Daraus folgt, dass der durchschnittliche ABSI-Score der Patienten mit Hochspannungsverletzungen mit einer statistischen Signifikanz von  $p < 0,001$  höher war als der ABSI der Patienten mit Niederspannungsverletzungen.

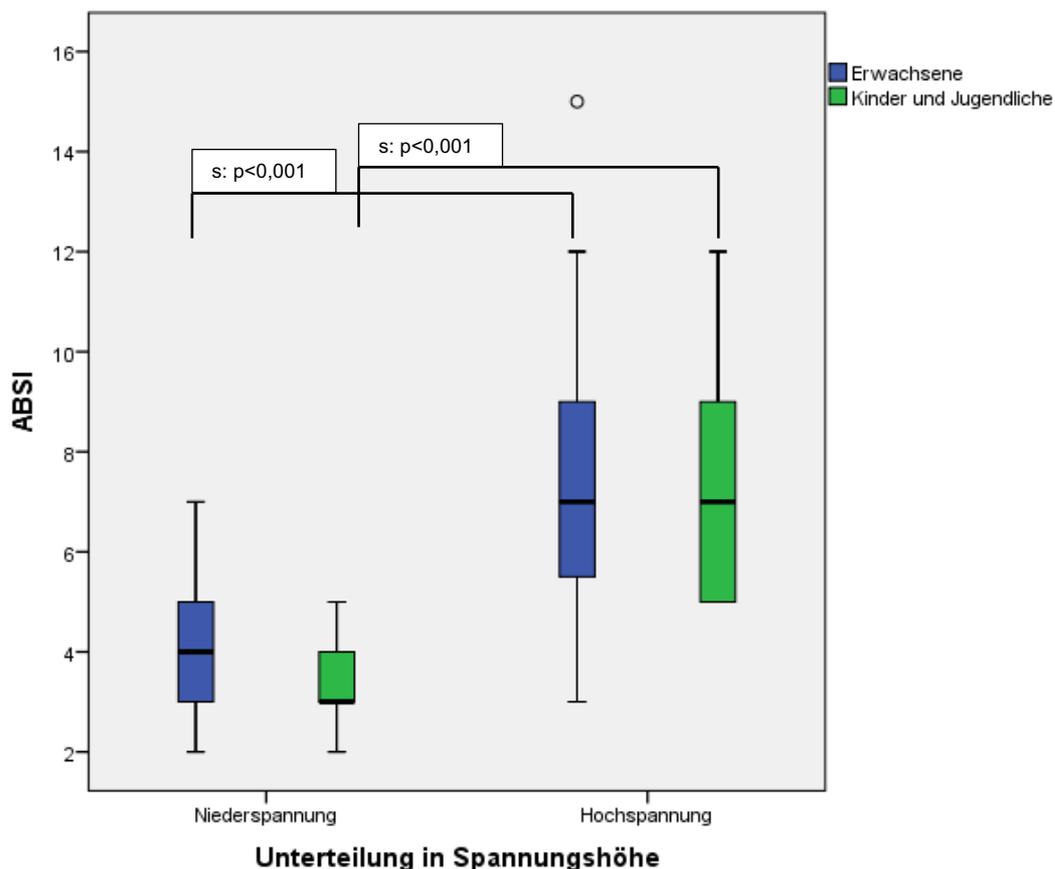


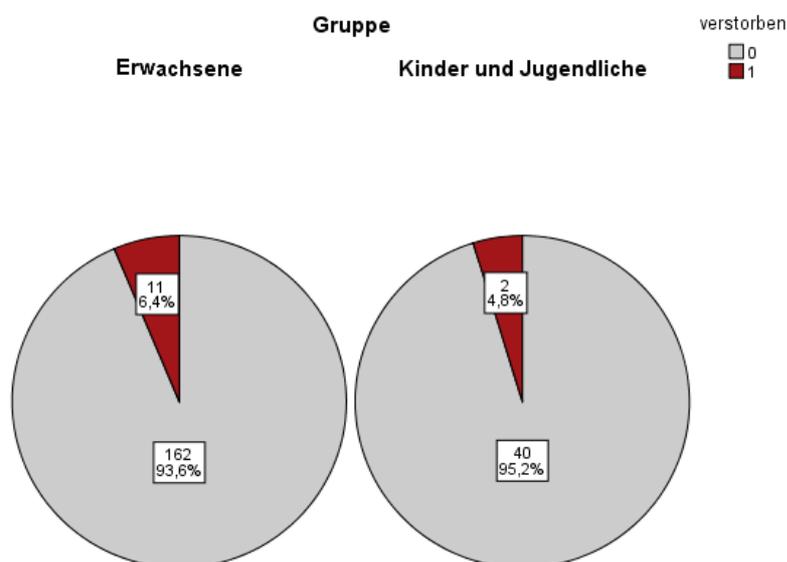
Abbildung 29: Boxplots; Durchschnittlicher ABSI-Score bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in Abhängigkeit von der Spannungshöhe

## 4.10.3 Mortalität

Innerhalb des Gesamtkollektivs bestehend aus 215 Patienten sind insgesamt 13 Personen (6 %) verstorben. Die Mortalitätsrate der Kinder und Jugendlichen lag bei 4,8 % (n= 2) und der der Erwachsenen bei 6,4 % (n= 11). Hierbei zeigte sich, dass alle Verstorbenen infolge von Hochspannungsverletzungen ums Leben kamen. In der Gruppe der Niederspannungsverletzten ließen sich keine Todesfälle verzeichnen. Der Unterschied zwischen diesen beiden spannungsabhängigen Gruppen war hochsignifikant ( $p < 0,001$ ). 3 der verstorbenen Personen kamen innerhalb von 24 Stunden nach dem Unfall ums Leben und 4 Personen innerhalb einer Woche nach dem Unfall. Bei den restlichen 4 Personen fehlten Angaben bezüglich des Todeszeitpunkts.

Bei 5 der 11 (45,5 %) verstorbenen erwachsenen Personen war der Tod mit einem Arbeitsunfall verbunden, darunter befanden sich 4 Männer und eine Frau. Zusätzlich gab es 5 tote Personen (45,5 %) als Folge von Haus- bzw. Freizeitunfällen sowie einen Todesfall (9,1 %) aufgrund von Suizid eines 28-jährigen Mannes. Ferner lässt sich darstellen, dass von insgesamt 6 Suizidversuchen (4 Männer und 2 Frauen) nur ein Versuch tatsächlich mit dem Tod endete. Die restlichen Suizidfälle hatten einen eher milderen Krankheitsverlauf mit einer verbrannten Körperoberfläche von unter 10 %. Bei den Todesfällen der Erwachsenen ergab sich folglich ein Geschlechterverhältnis von 3: 8 (Frauen: Männer).

Bei den Kindern waren beide Todesfälle mit Haus- bzw. Freizeitunfällen assoziiert. Es handelte sich bei eines der Kinder um einen 9-jährigen Jungen mit einem Anteil der verbrannten Körperoberfläche von 82 %, der nach 66 Tagen Krankenhausaufenthalt verstarb. Bei dem anderen Fall handelte es sich um einen 15-jährigen Jungen mit einer VKOF von 85 %, der innerhalb von 24 Stunden nach dem Unfall aufgrund von Lichtbogenverletzungen ums Leben kam.



**Abbildung 30: Kreisdiagramm; Absolute und prozentuale Angabe der Mortalitätsrate bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen**

#### 4.10.4 Einflussfaktoren der Mortalität: Multivariate Analyse

Zur Untersuchung des Effekts von unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Überlebenszeit wurde die Cox-Regression (Überlebenszeitanalyse) angewendet. Faktoren, die keinen signifikanten Einfluss auf die Mortalität hatten, waren das Alter, das Geschlecht, die Spannungshöhe, die Zuweisungsdauer sowie die Durchführung einer Kaltwassertherapie. Im Gegensatz dazu konnten auch Faktoren ausfindig gemacht werden, die statistisch signifikante Ergebnisse lieferten. Diese waren die Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt, das Verbrennungsausmaß sowie die Verbrennungstiefe. Bezüglich der Körpertemperatur konnte festgestellt werden, dass eine um 1 °C erniedrigte Körpertemperatur zu einem höheren Sterberisiko um den Faktor 1,4 führt ( $p=0,005$ ). Im Hinblick auf das Verbrennungsausmaß zeigte sich, dass bei einer Erhöhung der verbrannten Körperoberfläche um 1%, das Sterberisiko um das 1,1fache ansteigt ( $p<0,001$ ). Außerdem ergab sich bei der Analyse der Verbrennungstiefe, dass wenn der Anteil an drittgradigen Verbrennungen um 1% ansteigt, sich das Mortalitätsrisiko um das 1,1fache erhöht ( $p<0,001$ ).

#### 4.11 Unvollständigkeit der Daten

Anzumerken ist, dass aufgrund lückenhafter Dokumentation im Verbrennungsregister die Analyse von einigen Parametern nicht erfolgen konnte. Näheres wurde in Kapitel 5.2.1 Limitationen erläutert. Aufgrund der fehlenden statistischen Aussagekraft bei zu geringer Fallzahl wurde auf die Auswertung einiger Parameter verzichtet. Im Ergebnisteil dieser Arbeit wurden die fehlenden Daten in den relevanten Abschnitten erwähnt. Falls keine Erwähnung stattfand, lagen entweder alle Daten des betrachteten Parameters vor oder der Anteil fehlender Angaben war so gering, dass es für die statistische Auswertung vernachlässigbar war. Da es sich bei den Daten um anonymisierte Patienteninformationen handelt, die von Seiten des Verbrennungsregisters übermittelt wurden, konnte keine nachträgliche Beschaffung fehlender Daten erfolgen.

## 5 Diskussion

### 5.1 Diskussion der Ergebnisse

#### 5.1.1 Demografie

Zum Vergleich der Ergebnisse des vorliegenden Kollektivs mit den Ergebnissen aus der bestehenden Literatur wurden sowohl nationale als auch internationale Studien herangezogen. Den Großteil stellen internationale Studien dar, da nur wenige Untersuchungen bezüglich Stromverletzungen auf nationaler Ebene vorliegen. Im Folgenden erfolgt eine Analyse der demografischen Daten von Stromverletzten.

Aus bereits veröffentlichter Literatur geht hervor, dass Stromverletzte typischerweise männlichen Geschlechts sind. Dabei wird von einem Anteil der männlichen Stromverletzten von über 80 bis 90 % berichtet [11]. Des Weiteren kommen Stromunfälle häufiger im Erwachsenenalter vor als im Kindesalter. Ramakrishnan et al. berichteten in ihrer Studie mit insgesamt 923 einbezogenen Patienten, die zwischen 1973 und 1990 aufgrund strominduzierter Verletzungen in einer indischen Klinik behandelt wurden, dass knapp die Hälfte aller Stromverletzten (44,5 %) zwischen 20 und 30 Jahre alt waren. Nur bei 15,5 % handelte es sich um Kinder und Jugendliche im Alter von 0 bis 20 Jahren [43].

Zu unterscheiden ist außerdem die Häufigkeit von Niederspannungsverletzungen und Hochspannungsverletzungen. Koppenberg und Taeger berichteten 2001 von einem Anteil von etwa 80 % der Stromunfälle im Niederspannungsbereich und 20 % im Hochspannungsbereich [5]. Dabei traten Niederspannungsverletzungen im Kindesalter insbesondere in häuslicher Umgebung auf [11, 27, 33, 44]. Die Altersverteilung bei Hochspannungsverletzungen wird dagegen als bimodal beschrieben. Zum einen sind sie typisch für das Erwachsenenalter, wobei es sich hier insbesondere um Arbeitsunfälle handelt [5, 6, 12, 45]. Zum anderen kommen Hochspannungsunfälle typischerweise bei heranwachsenden Jugendlichen vor [44].

Die in der Literatur beschriebene Charakterisierung von Stromverletzten deckt sich mit der Charakterisierung des hier analysierten Patientenkollektivs. Das Verhältnis der stromverletzten Erwachsenen zu den stromverletzten Kindern lag in der vorliegenden Arbeit bei 80 %: 20 %. Hierbei ist eine Dominanz von erwachsenen Stromverletzten zu beobachten. Von dieser Dominanz der stromverletzten Erwachsenen ist in der bereits genannten Studie von Ramakrishnan et al. ebenfalls die Rede [43]. Ferner kann in den hier durchgeführten Analysen von einem Überwiegen der Niederspannungsverletzungen mit ca. 60 % des Gesamtkollektivs gesprochen werden. Der Anteil der Hochspannungsverletzungen beträgt dabei 40 %. Dieses Verhältnis ist vergleichbar mit den Analysen von Rai et al., in deren Studie Niederspannungsverletzungen 68 % und Hochspannungsverletzungen 32 % des Gesamtkollektivs ausmachten [46].

In dieser Arbeit ereigneten sich Hochspannungsverletzungen im Erwachsenenalter am häufigsten im Alter von  $37,3 \pm 16,7$  Jahren. In einer retrospektiven Studie aus der Schweiz aus dem Jahre 2007, die 61 Hochspannungsverletzte in dem Studienzeitraum von 1995 bis 2007 einbezog, wurde das Kollektiv ebenfalls mit einem durchschnittlichen Alter von  $34 \pm 13$  Jahren charakterisiert [10]. Sowohl in der vorliegenden Studie als auch in weiteren untersuchten Studien ist zu beobachten, dass zum Großteil junge Männer von Hochspannungsverletzungen betroffen sind [21, 33, 47, 48]. Diese sind am häufigsten durch Arbeitsunfälle bedingt [5, 6, 12, 45]. Da Männer häufiger in Berufen mit hoher strominduzierter Verletzungsgefahr wie bspw. als Elektriker, Bahnmitarbeiter oder als Arbeiter der Bau- und Bergbauindustrie tätig sind als Frauen, lässt sich der überwiegende Anteil der stromverletzten erwachsenen Männer mit 91 % im beobachteten Kollektiv erklären [11, 20, 22, 44, 49, 50].

In der bereits erwähnten schweizerischen Studie stellten die Mitarbeiter der Bahnbetriebe mit 75 % die Mehrheit der Arbeitsunfälle im Hochspannungsbereich dar. In der Studie von Lumenta et al. ist ebenfalls in Bezug auf die Verteilung der Hochspannungsunfälle ein Prozentsatz von 49,5-79 % für Berufsunfälle angegeben [11]. In der vorliegenden Studie waren 56,52 % der Hochspannungsverletzungen auf Berufsunfälle zurückzuführen.

Im Gegensatz hierzu ereigneten sich Stromunfälle bei den untersuchten Kindern im vorliegenden Kollektiv mit 75,9 % hauptsächlich im Niederspannungsbereich und dies vorwiegend im Kleinkindsalter (1-3 Jahre). Alle Unfälle in diesem Alter waren auf Haushaltsunfälle zurückzuführen. Im hier betrachteten Patientenkollektiv kamen Hochspannungsunfälle im Kleinkindsalter nicht vor, da der Haushaltsstrom in europäischen Ländern 230 V beträgt und somit Hochspannungsquellen im Haushalt nahezu nicht vorkommen [6, 51]. Hochspannungsunfälle waren vielmehr auf Jugendliche im Alter von  $14,2 \pm 2,7$  Jahren (zwischen 9 und 17 Jahren) zurückzuführen. Insbesondere männliche Jugendliche kommen durch ihre hohe Abenteuer- und Risikobereitschaft, durch Gruppenzwang sowie durch Mutproben häufiger in Kontakt mit Bahnoberleitungen oder Freileitungsmasten [23, 52]. Lumenta et al. beschrieben 2009, dass 34-37,6 % der Stromverletzungen Freizeitunfälle ausmachten. Charakterisiert wurden Freizeitunfälle hierbei als Verletzungen durch S-Bahn-Surfen, Mutproben oder durch Klettern auf Strommasten in Baumnähe [11]. In der bereits erwähnten Studie aus der Schweiz war bei 20 % der Patienten ebenfalls das „S-Bahn-Surfen“ für die Stromverletzungen verantwortlich. Der Kult des „trainsurfings“ ist sowohl in europäischen Ländern als auch in Entwicklungsländern bei männlichen Jugendlichen besonders beliebt. In Case Reports und Publikationen wird über das Besteigen von Dächern fahrender S-Bahnen berichtet, welches von den Jugendlichen als Freizeitaktivität angesehen wird. Unter anderem wird das Besteigen der Bahnen als Reisemöglichkeit bei überfüllten Zügen genutzt, dies vorwiegend in Entwicklungs- bzw.

Schwellenländern [10, 11, 21, 53-55]. Hierbei verletzen sich die Jugendlichen durch direkten oder indirekten Kontakt (Lichtbogen) zu Bahnüberleitungen. Diese sind in Deutschland mit 15 kV elektrifiziert [13].

In nicht-europäischen Ländern kommen aufgrund der Infrastruktur und unterschiedlicher kultureller Besonderheiten differierende Unfallmechanismen vor. Meist wird von Verletzungen durch unzureichende Sicherung der Stromleitungen an Wohnorten berichtet [46, 56, 57]. Celik et al. sprachen in ihrer retrospektiven Studie aus dem Jahr 2004, die 38 stromverletzte Kinder aus der Türkei einbezog, von „balcony injuries“. Bei 9 der 38 Fälle (23,7 %) ereigneten sich Hochspannungsunfälle aufgrund von Stromleitungen, die in der Nähe von Wohnungsterrassen angelegt wurden. Es wurde beobachtet, dass solche Verletzungen vor allem in ländlichen Gebieten auftraten, in denen Menschen mit niedrigem sozioökonomischem Status lebten und der Bau der Wohnanlagen im Allgemeinen schlecht und unzulänglich war [56]. Außerdem waren in einer Studie aus Indien 70 % der Hochspannungsverletzungen auf den direkten Kontakt mit abgerissenen Stromleitungen zurückzuführen, die auf freien Feldern oder Dächern lagen. Besonders in Nordindien ist das Drachensteigen eine sehr beliebte Aktivität unter Jungen. Stromverletzungen entstehen hierbei, wenn es zum Kontakt der Drachen mit den Stromleitungen kommt [46].

Es ist festzuhalten, dass die Unfallmechanismen in Abhängigkeit von den kulturellen Gegebenheiten sowie dem Entwicklungsstand der jeweiligen Länder variieren. In deutschsprachigen Ländern sind die beschriebenen Unfallmechanismen etwas untypisch, da es in Europa gewisse Sicherheitsstandards hinsichtlich der Anlage von elektrischen Leitungen und den Sicherheitsmaßnahmen in Wohngebieten gibt. Die typischen Unfallmechanismen in den deutschsprachigen Ländern stellen Stromverletzungen am Arbeitsplatz sowie im häuslichen Umfeld bzw. während Freizeitaktivitäten dar.

Sowohl in der nationalen als auch in der internationalen Literatur wird beschrieben, dass Stromverletzungen größtenteils akzidentiellen Ursprungs sind. Suizide und Suizidversuche sind eine seltene Ursache von Stromverletzungen [58-61]. In der vorliegenden Studie konnten insgesamt 6 Suizidversuche erfasst werden. Darunter endete ein Suizidversuch mit dem Tod. Hierbei handelte es sich um ein Suizid durch Kontakt zu einer Hochspannungsleitung. Nach aktueller Literatur kommt Suizid durch Stromschlag im Niederspannungsbereich beispielsweise im Haushalt unter Gebrauch von Elektrogeräten, die in die Badewanne gelegt werden, vor. Durch den Wasserkontakt kommt es zu einer Senkung des Hautwiderstands, wodurch ein besserer Stromdurchfluss gewährleistet wird [61]. Hochspannungszwischenfälle im Zusammenhang mit Selbstmorden oder Selbstmordversuchen sind selten [58, 62]. Byard et al. berichteten über 48 Suizidfälle bei Jugendlichen, die zwischen 1985 und 1997 in Australien erfasst wurden. Nur einer der

Suizidfälle (2 %) wurde durch einen Stromschlag herbeigeführt [59]. In der aktuellen Datenlage machen Suizidfälle durch Stromfluss ca. 2 % [11] bzw. 6 % [5] aus. Im Vergleich dazu kamen Suizidversuche in dem hier untersuchten Patientensatz mit 3,6 % (6 Erwachsene) in etwa genauso häufig vor.

### 5.1.2 Unfallmechanismus

Zu unterscheiden sind Unfälle durch direkten Kontakt zur Stromquelle von Unfällen durch Lichtbögen. Verletzungen durch Lichtbögen gehören der Gruppe der Hochspannungsverletzungen an [9]. Lichtbögen können Temperaturen von etwa 3.000 °C - 20.000 °C erreichen und pro 10.000 Volt über eine Distanz von etwa 2-3 Meter überspringen [13]. Dabei kommt es meist durch die starke Hitze zu tiefen Verbrennungen und Gewebeschäden der betroffenen Haut, wobei die Kleidung der Verletzten ebenfalls verbrennen kann [10, 12, 13]. Diese hohen Temperaturen begründen in der vorliegenden Studie den Befund, dass bei Stromunfällen, die durch Lichtbögen verursacht wurden, tiefere Verbrennungen (Verbrennungen 3. Grades) nachgewiesen werden konnten als bei Hochspannungsunfällen durch direkten Kontakt. Wie in den Ergebnissen schon angemerkt, betrug der Anteil drittgradiger Verbrennungen bei Lichtbogenverletzungen durchschnittlich  $22,6 \pm 23,2$  % (0-85 %) der verbrannten Körperoberfläche. Bei Hochspannungsverletzungen durch direkten Kontakt war dieser Wert mit durchschnittlich  $11,8 \pm 15,5$  % (0-50 %) der VKOF deutlich niedriger.

Beim Vergleich der beiden Unfallmechanismen direkter Stromkontakt und Lichtbogen ist oftmals entgegen der Beobachtungen dieser Studie beschrieben, dass Stromunfälle durch Lichtbögen häufig nur oberflächliche Verbrennungen verursachen und tiefe Verbrennungen eher seltener auftreten als bei Unfällen durch direkten Stromkontakt [19, 27, 47, 49]. „Echte“ Hochspannungsverletzungen mit typischen Stromein- und Stromaustrittsstellen, wie Luce und Gottlieb es 1984 beschrieben, also Stromunfälle durch direkten Kontakt zur Stromquelle, gehen meist mit schwereren und tieferen Verletzungen einher. Laut den Autoren erlitten Patienten mit „echten“ Hochspannungsverletzungen in ihrer durchgeführten Studie eine Vielzahl von Verletzungen, die nahezu jedes Organsystem betrafen. Aufgrund des Stromflusses durch den menschlichen Körper sind die hohen Gewebe- und Organschäden, das ausgeprägte Verbrennungsausmaß sowie die Verbrennungstiefe erklärbar [49]. Brandão et al. beschrieben in ihrer retrospektiven Studie mit 99 Stromverletzten, die zwischen 2006 und 2015 behandelt wurden, dass bei Unfällen durch Lichtbögen (45,5 %) keine akuten Komplikationen wie bspw. Arrhythmien, akutes Nierenversagen, Kompartmentsyndrom etc. auftraten. Außerdem bestand in dieser Gruppe keine Notwendigkeit für Amputationen oder rekonstruktive Lappenplastiken. Bei Lichtbogenverletzungen kommt es zwar zu

Hautschädigungen, diese reichen aber meist nicht bis in die tiefen Gewebeschichten, da es beim Lichtbogen nicht zu einem Stromfluss durch den Körper kommt, sondern nur ein oberflächlicher Hautkontakt besteht [47].

Der Grund, weshalb im vorliegenden Patientenkollektiv in der Gruppe der Lichtbogenunfälle ein höherer Anteil an drittgradigen Verbrennungen nachgewiesen werden konnte, liegt zum einen darin begründet, dass die Schwere der thermischen Schädigung von der Temperatur des Lichtbogens, der erzeugten Wärmemenge und der Dauer der Hitzeeinwirkung abhängt. Die Wärmeentwicklung, die beim Stromdurchfluss zustande kommt, steht in einem direkt proportionalen Verhältnis zur Stromstärke und zum Leitwiderstand [49]. Demzufolge ist es möglich, dass in den vorliegend betrachteten Fällen die Patienten mit Lichtbogenverbrennungen von einer höheren Stromstärke und dementsprechend auch von einer stärkeren Hitzeeinwirkung getroffen wurden. Aus diesem Grund können die tieferen Verbrennungen bei den Lichtbogenverletzten entstanden sein. Meist kommt es neben Verbrennungen der oberen Hautschichten auch zum Anzünden der Kleidung, welches zu deutlich tieferen Verbrennungen führen kann. Des Weiteren kann durch die plötzliche Hitzeentwicklung der Umgebung eine Explosion sowie eine Druckwelle entstehen, wodurch es zu weiteren Verletzungen kommen kann [10, 13].

Erwähnenswert ist zudem, dass in der vorliegenden Studie Unfälle durch Lichtbögen zusätzlich mit einem Stromdurchfluss durch den menschlichen Körper charakterisiert sind. Das bedeutet, dass von einer Exposition des Lichtbogens und von einem Stromdurchfluss zugleich die Rede ist. Aufgrund verschiedener Definitionen der Lichtbogenverletzung, die in der Literatur vorherrschen, erschwert sich teilweise die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieser Studie mit weiteren vorliegenden Studien. Einige Autoren charakterisieren den Lichtbogenunfall damit, dass bei einem Lichtbogen kein Stromfluss durch das Gewebe erfolgt, da die Einwirkzeit und die Hitzekapazität von Gasen begrenzt sind. Eine Weiterleitung des Stromes bei Unfällen durch Lichtbögen wird daher als unwahrscheinlich erachtet [31, 47]. Dieser Ansicht zufolge kommt es bei einem Lichtbogenunfall zu einem Kurzschluss, der zu einem Stromfluss an der Außenseite des Körpers führt. Hierdurch bleiben die Verletzungen nur oberflächlichen Charakters [10, 27].

Andererseits beschrieb Ten Duis (1995), dass besonders, wenn das Opfer Teil des Lichtbogenprozesses mit körperlichem Stromfluss wird, es zu tieferen Verbrennungen kommen kann [19]. In der vorliegenden Studie kommt es beim Unfallmechanismus des Lichtbogens zu Verletzungen durch einen Hitzeschlag (elektrisches Gas) und zusätzlich zu einem Stromdurchfluss. Aufgrund der variierenden Definitionen können unterschiedliche Ergebnisse der Verletzungsschwere nach einem Lichtbogenunfall resultiert sein, die einen direkten Studienvergleich erschweren.

Stromunfälle durch Blitzschläge stellen im Vergleich zu Unfällen durch Lichtbögen eine Rarität dar [17]. Hinkelbein et al. sprachen in Bezug auf Blitzschlagverletzungen von einer Inzidenz von ca. 1000 Personen pro Jahr weltweit. In Deutschland beträgt die Inzidenz etwa 50 Personen pro Jahr. Die Mortalitätsrate bei Blitzunfällen variiert zwischen 10 und 30 %. Zwischen 2003 und 2013 verstarben jährlich etwa 3-7 Menschen an den Folgen eines Blitzeinschlages in Deutschland [63]. Die Haupttodesursache stellt dabei der kardiopulmonale Arrest dar [27, 50]. Whitcomb et al. berichteten bezüglich Blitzschlagverletzungen in den Vereinigten Staaten, dass nur 20-30 % der Menschen, die von Blitzschlägen getroffen wurden, auch daran starben, obwohl es sich hierbei um Spannungshöhen von mehreren 100.000 Volt sowie um Temperaturen von bis zu 30.000 Grad handeln kann [64]. Die Überlebenswahrscheinlichkeit nach einem Blitzschlag ist demnach relativ hoch. In der hier vorliegenden Studie überlebte der einzige Patient mit Blitzschlagverletzungen den Unfall und wurde 8 Tage nach stationärer Behandlung entlassen.

### 5.1.3 Zuweisungsintervall

Die Zuweisungsdauer wurde, wie bereits in Kapitel 4.6 der Ergebnisse berichtet, in die beiden Kategorien der Primärzuweisung und Sekundärzuweisung unterteilt und getrennt betrachtet. Die durchschnittliche Dauer der Primärzuweisung betrug im betrachteten Gesamtkollektiv  $1:44 \pm 1:14$  Stunden. Die Spanne der Zuweisungsdauer lag dabei zwischen 0:21 und 9:55 Stunden. Celik et al. berichteten in ihrer veröffentlichten Studie aus 2004, dass die Dauer zwischen dem Auftreten der Stromverletzung und der ersten Vorstellung in der Klinik zwischen 1 und 22 Stunden lag [56]. Ebenso lässt sich auch bei dieser Studie eine große Spanne der Zuweisungsintervalle nachweisen. Die Zuweisungsdauer ist von vielerlei Faktoren wie dem Verletzungsmuster, dem Unfallort oder der Dauer der Primärversorgung abhängig. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

In der präklinischen Versorgung von Stromverletzten ist auf die Absicherung des Unfallortes sowie dem Abschalten der Stromquelle zu achten [5]. Bei Stromunfällen steht der Eigenschutz an erster Stelle, da insbesondere bei Hochspannungsunfällen bereits innerhalb einer Distanz von 2-3 Metern Lichtbögen von der Stromquelle auf andere Menschen übergehen können [13]. Daher wird dem erstversorgenden Team der Zugang zum Patienten vorerst nicht gestattet [5]. Bis zur Ankunft des technischen Fachpersonals am Unfallort sowie der Durchführung der erforderlichen Sicherungsmaßnahmen kann es dementsprechend zu Zeitverzögerungen kommen. Außerdem kann auch die Entfernung des Unfallortes zu einer geeigneten Klinik eine wesentliche Rolle spielen [4].

Verglichen mit den Intervallen der Primärzuweisung waren die Intervalle der Sekundärzuweisung deutlich länger und streuten sehr stark zwischen 2:26 und 273:55 Stunden bei den Kindern (Median von 6:00 Stunden) sowie zwischen 2:12 und 27:01 Stunden bei den Erwachsenen (Median von 4:00 Stunden). Diese starke Streuung ist damit zu erklären, dass nach dem Besuch einer Erstversorgungseinrichtung die Weiterbehandlung im Brandverletzentzentrum bei jedem Patienten, je nach Verletzungsgrad und Auftreten von Komplikationen, unterschiedlich notwendig gewesen sein kann.

Nach Empfehlungen sollte der direkte Transport in ein Verbrennungszentrum anstelle einer nahegelegenen erstversorgenden Klinik nur dann erfolgen, wenn die Transportzeit nicht über 45 Minuten liegt [13, 26]. Lange Transportzeiten unter schlechten Bedingungen sollten vermieden werden [26]. Die erste Anlaufstelle sollte daher eine nahegelegene Versorgungseinrichtung sein, auch wenn diese keine spezialisierte Abteilung für Verbrennungsverletzungen vorenthält. Andere Autoren berichten dagegen, dass sich der Transport „über den „Umweg“ eines erstversorgenden Krankenhauses“ für den Patienten als nachteilig erweist [65, 66]. Durch den Primärtransport in die erstversorgende Klinik und den im Anschluss folgenden Sekundärtransport in eine spezialisierte Verbrennungsklinik kommt es zu Verzögerungen, die zum Auskühlen des Patienten führen kann. Zudem kann dies eine erhöhte Kontamination der verletzten Wunden aufgrund mehrfacher Inspektion und Diagnostik verursachen [66]. Weiterhin wird diskutiert, dass ein äußerst schneller Transport nicht obligat ist, sofern eine regelrechte Initialtherapie durchgeführt wird [66]. Die Beurteilung dieser obliegt dem erstversorgenden Team. Aus diesem Grund wirken sich längere Transportzeiten zum Primärversorgungszentrum nicht unbedingt nachteilig für den Patienten aus, besonders wenn eine optimale präklinische Versorgung des Patienten gewährleistet ist. Lange Zuweisungsdauern, wie sie in dieser Studie beschrieben sind, können daher nicht unbedingt negativ beurteilt werden. Zumal kommen bei Stromverletzungen noch zusätzliche Maßnahmen wie das Abschalten der Stromquelle am Unfallort hinzu, die zu Zeitverzögerungen führen können.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei der Primärzuweisung von Stromverletzten in ein Verbrennungszentrum durchschnittlich  $1:44 \pm 1:14$  Stunden vergingen. Dabei können diese Werte sehr stark streuen und lagen in der durchgeführten Studie zwischen 0:21 und 9:55 Stunden. Längere Zuweisungsdauern wirken sich in diesem Kontext nicht besonders nachteilig für den Patienten aus, falls eine effektive präklinische Versorgung gewährleistet ist.

#### 5.1.4 Verbrennungsausmaß und Verbrennungstiefe

Beim Vergleich der Ergebnisse des Verbrennungsausmaßes mit bereits veröffentlichten Studien ergeben sich für das Gesamtkollektiv ähnliche Werte, die im Folgenden diskutiert werden. Je nach Studie wird ein durchschnittliches Verbrennungsausmaß zwischen  $11,9 \pm 13,2$  % [47] und  $18,6 \pm 14,7$  % [56] für das Gesamtkollektiv angegeben (s. Tabelle 20). Der durchschnittliche Anteil der verbrannten Körperoberfläche von  $15,8 \pm 21,8$  % (0-90 %) der Stromverletzten aus der vorliegenden Studie lässt sich hierbei gut einordnen.

In dieser Studie konnten beim Vergleich des Verbrennungsausmaßes sowie der Verbrennungsgrade bei den Niederspannungsverletzten und Hochspannungsverletzten deutliche Unterschiede festgestellt werden. Während Verbrennungen im Niederspannungsbereich nur wenige Prozente der Körperoberfläche ausmachten, waren es im Hochspannungsbereich bei den Kindern und Jugendlichen durchschnittlich  $51,3 \pm 21,1$  % (27-85 %) und bei den Erwachsenen etwa  $32,6 \pm 22$  % (0-90 %) der Körperoberfläche. Ebenso lagen bei den Hochspannungsverletzten tiefere Verbrennungen vor als bei den Niederspannungsverletzten, insbesondere Verbrennungen 3. Grades. Das geringe Verbrennungsausmaß der Niederspannungsverletzten entspricht den Befunden in der vorhandenen Literatur. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Garcia et al. (1995) beschrieben in ihrer Studie mit 70 Stromverletzten, dass die VKOF bei Verletzungen durch geringe Spannungshöhen weniger als 1 % betrug [67]. In der Studie von Kym et al. (2014) ist ein Mittelwert von  $2,1 \pm 2,6$  % der verbrannten Körperoberfläche angegeben, welcher den hier beobachteten Werten ebenfalls entspricht [12]. In der vorliegenden Studie machten Verbrennungen des Grades 2a den Großteil der Verbrennungen im Niederspannungsbereich aus. Glatstein et al. (2013) berichteten ebenfalls, dass 96 % der niederspannungsverletzten Patienten ihres Kollektivs nur Verbrennungen ersten und zweiten Grades erlitten. Dabei waren es hauptsächlich erstgradige Verbrennungen, die ohne schwerwiegende Komplikationen ausheilten [18]. Tiefe Gewebeschäden aufgrund von Niederspannung sind selten, da es durch den geringen Stromfluss grundsätzlich nicht zu einer beträchtlichen Hitzeentwicklung kommt. Ausnahmen bilden die Extremitäten wie die Finger, Zehen sowie andere kleine und dünne, hervorstehende Körperteile ab, da hier der Gewebewiderstand aufgrund des geringen Durchmessers besonders hoch ist [19]. Durch eine geringere Querschnittsfläche kommt es zu einem gesteigerten Stromfluss sowie zu einer stärkeren Hitzeentwicklung in diesen Körperbereichen [19, 23, 31]. Weiteres wird in Kapitel 5.1.5 Betroffene Körperregionen erörtert.

Stromverletzungen im Hochvoltbereich gingen in der vorliegenden Arbeit hingegen mit deutlich großflächigeren und tieferen Verbrennungen einher. Drittgradige Verbrennungen machten bei den Erwachsenen mit einem Mittelwert von etwa  $13,9 \pm 16,6$  % (0-75 %) und

bei den Kindern mit einem Mittelwert von  $28,9 \pm 25,9$  % (0-85 %) der verbrannten Körperoberfläche den Großteil der Verbrennungen aus. In der bereits erwähnten Übersichtsarbeit mit 61 Hochspannungsverletzten aus der Schweiz konnte eine durchschnittliche VKOF von  $35 \pm 13$  % registriert werden, wobei im Mittel  $29 \pm 10$  % der VKOF drittgradigen Verbrennungen entsprachen [10]. Ozdel et al. berichteten ebenfalls (2019) bezüglich ihres untersuchten Patientenkollektivs mit 93 stromverletzten Kindern, die zwischen 2007 und 2012 in einer türkischen Klinik aufgenommen wurden, dass drittgradige Verbrennungen häufiger im Hochspannungsbereich vorkamen als im Niederspannungsbereich [68]. Die großflächigen und tiefen Verbrennungen bei den Hochspannungsverletzten ergeben sich durch die hohen Stromstärken, denen die Verunfallten ausgesetzt sind. Das Ausmaß der Gewebeschädigung steht in Abhängigkeit zu der Spannung, der Stromstärke, dem Gewebewiderstand sowie der Dauer des Stromdurchflusses [18-23].

Im Gegensatz hierzu berichteten Muehlberger et al. (2001) in ihrer Publikation, dass höhere Spannungen nicht unbedingt mit schwereren Verletzungen einhergehen. Ihren Erkenntnissen zufolge gibt es keinen Zusammenhang zwischen der Stromstärke und der Inzidenz bzw. dem Schweregrad von Komplikationen. Muehlberger et al. deuteten darauf hin, dass niedrige Voltzahlen genauso wie höhere Spannungen mit fatalen Komplikationen einhergehen können [31].

Anhand dieser sowie diverser weiterer Studien, die in der unten aufgeführten Tabelle gelistet sind, kann entgegen der Behauptung von Muehlberger et al. angenommen werden, dass die Spannungshöhe durchaus einen Effekt auf das Verbrennungsausmaß sowie die Verbrennungsschwere hat. In dem hier betrachteten Kollektiv konnten signifikant höhere Werte für die Liegedauer, die Inzidenz von Komplikationen und die Mortalitätsrate bei Hochspannungsverletzten im Vergleich zu Niederspannungsverletzten ermittelt werden. Daraus folgt, dass anhand dieser Daten eine Relation zwischen der Verletzungsschwere und der Voltzahl der Spannungsquelle vermutet werden kann. Diese Relation konnte gleichermaßen in weiteren veröffentlichten Studien aufgezeigt werden [33, 47, 49, 50].

Um auf das Verbrennungsausmaß und die Verbrennungstiefe bei den Hochspannungsverletzten dieser Studie zurückzukommen, wird im Folgenden auf die deutlich erhöhten Werte der VKOF der Kinder und Jugendlichen mit durchschnittlich  $51,3 \pm 21,1$  % im Gegensatz zu den Erwachsenen mit ca.  $32,6 \pm 22$  % eingegangen. Anfangs muss erwähnt werden, dass Studien in Bezug auf Hochspannungsverletzungen im Kindes- und Jugendalter sowohl national als auch international nur spärlich vorhanden sind. Aus diesem Grund wurden in der folgenden Studie Analysen durchgeführt, die die Verbrennungsausdehnung bei den stromverletzten Kindern mit der Ausdehnung bei den Erwachsenen vergleichen.

Diese hohen Werte des Verbrennungsausmaßes bei den Kindern können dadurch resultieren, dass die Haut der Kinder wesentlich dünner ist als die Haut der Erwachsenen und sie somit anfälliger für Verbrennungen und Verbrühungen ist. Heißes Wasser mit einer Temperatur von 60-80 °C kann schon bei einigen Sekunden Einwirkdauer die zarte Kinderhaut schädigen. Damit genügen bereits niedrige Temperaturen und eine kurze Einwirkzeit, um Verbrennungen und Narben auf der Kinderhaut zu hinterlassen [26, 69].

Für die Beurteilung des Verbrennungsausmaßes werden prinzipiell nur zweit- und drittgradige Verbrennungen berücksichtigt. Laut aktuell bestehender Literatur wird das Verbrennungsausmaß grundsätzlich überschätzt und die Verbrennungstiefe unterschätzt [26]. Eich et al. gehen in ihrer Übersichtsarbeit ebenfalls auf die Überschätzung des Verbrennungsausmaßes insbesondere bei Kindern ein [70]. Diese Tatsache muss ebenfalls berücksichtigt werden und kann zu den hohen Werten der VKOF bei den Kindern geführt haben. Prinzipiell wird empfohlen das Verbrennungsausmaß bei der stationären Aufnahme erneut zu evaluieren [13]. Unter anderem können sich die Werte auch durch die niedrige Fallzahl mit nur 12 hochspannungsverletzten Kindern und Jugendlichen ergeben haben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Verbrennungsausmaß bei Hochspannungsverletzten zwar deutlich ausgeprägt sein kann, dies jedoch nicht immer die tatsächliche Schwere der Verletzungen widerspiegelt. Da es auch zu Fehlbeurteilungen kommen kann, spielt neben der erneuten Abschätzung der verbrannten Körperoberfläche auch die Beurteilung des Verbrennungsgrades eine besondere Rolle. Sowohl die Verbrennungsausdehnung als auch die Verbrennungstiefe waren im hier betrachteten Kollektiv der Hochspannungsverletzten signifikant höher als die der Niederspannungsverletzten. Daher kann behauptet werden, dass in der vorliegenden Studie ein Zusammenhang zwischen der Spannungshöhe und dem Ausmaß bzw. der Schwere der Verbrennungen bestand. Es kann davon ausgegangen werden, dass die ausgeprägten Gewebeschäden aufgrund der hohen Voltzahlen zustande gekommen sind, da auch weitere untersuchte Parameter (Liegedauer, Komplikationen, Mortalität) in den Analysen signifikant höhere Ergebnisse für Hochspannungsverletzungen lieferten.

Studie (Jahr)	Kollektiv (Land)	Durchschnittliche VKOF (%)
Durchgeführte Studie	N= 215 gesamt  N= 42 Kinder  N= 173 Erwachsene (Deutschland, Österreich, Schweiz)	15,8 ± 21,8 % für <i>Gesamtkollektiv</i> 35,2 ± 22,7 % für <i>HS-Verletzte</i> 2,4 ± 3,7 % für <i>NS-Verletzte</i> 51,3 ± 21,1 % für <i>HS-Verletzte</i> 2,8 ± 5,4 % für <i>NS-Verletzte</i> 32,6 ± 21,9 % für <i>HS-Verletzte</i> 2,3 ± 2,9 % für <i>NS-Verletzte</i>
Luce, Gottlieb (1984) [49]	N= 48; MW: 28 Jahre (Vereinigte Staaten)	17,8 % für <i>HS-Verletzte</i> (2-60 %)
Garcia et al. (1995) [67]	N= 70 Kinder (Vereinigte Staaten)	<1 % für <i>NS-Verletzte</i>
Celik et al. (2004) [56]	N= 38 Kinder (Türkei)	18,6 ± 14,7 % für <i>Gesamtkollektiv</i> (1-50 %)
Arnoldo et al. (2004) [50]	N= 700; Kinder & Erwachsene (Vereinigte Staaten)	10,7 ± 0,8 % für <i>HS-Verletzte</i> (0-87 %) 1,7 ± 0,3 % für <i>NS-Verletzte</i>
Handschin et al. (2007) [10]	N= 61; Jugendliche ab 14 J. & Erwachsene (Schweiz)	35 ± 13 % für <i>HS-Verletzte</i> (4-75 %)
Kym et al. (2014) [12]	N= 625; Kinder & Erwachsene (Südkorea)	14,0 ± 13,8 % für <i>Gesamtkollektiv</i> 19,0 ± 13,6 % für <i>HS-Verletzte</i> 2,1 ± 2,6 % für <i>NS-Verletzte</i>
Lipový (2014) [21]	N= 58; Kinder & Erwachsene (Tschechien)	35 % für <i>HS-Verletzte</i>
Aghakhani et al. (2015) [22]	N= 287; Kinder & Erwachsene (Iran)	13,6 ± 12,9 % für <i>Gesamtkollektiv</i> (1-100 %)
Shih et al. (2017) [32]	N= 5485 Erwachsene (Kanada)	14,0 % für <i>Gesamtkollektiv</i> 17,6 % für <i>HS-Verletzte</i> 10,6 % für <i>NS-Verletzte</i>
Kurt et al. (2016) [45]	N= 94; Kinder & Erwachsene (Türkei)	21,8 ± 19,8 % für <i>HS-Verletzte</i> 11,9 ± 6,9 % für <i>NS-Verletzte</i>
Brandão et al. (2017) [47]	N= 99; Kinder & Erwachsene (Portugal)	11,9 ± 13,2 % für <i>Gesamtkollektiv</i> 18,9 ± 17,4 % für <i>HS-Verletzte</i> 10,9 ± 14,8 % für <i>NS-Verletzte</i>
Srivastava et al. (2018) [33]	N= 385; Kinder & Erwachsene (Indien)	24,1 ± 8,7 % für <i>HS-Verletzte</i> 18,7 ± 8 % für <i>NS-Verletzte</i>

**Tabelle 20: Studienvergleich Verbrennungsausmaß bei Stromverletzten (%VKOF)**

Es ist zu erwähnen, dass im untersuchten Datensatz Subgruppen gebildet wurden. Zum einen die Gruppe der Kinder und Erwachsenen und zum anderen die Gruppe der Niederspannungs- und Hochspannungsverletzten. Diese vorgenommene Unterteilung ermöglichte eine bessere Veranschaulichung des Verbrennungsausmaßes sowie der Verbrennungsgrade in Abhängigkeit vom Alter und der ausgesetzten Spannungshöhe. In vielen Studien wurde eine derartige spezielle Unterteilung in unterschiedliche Subgruppen

nicht vorgenommen. Daher kann es sein, dass die Werte der einzelnen Subgruppen teilweise nicht mit den Ergebnissen anderer Studien vergleichbar sind.

#### 5.1.5 Betroffene Körperregionen

Bei den durchgeführten Analysen der vorliegenden Arbeit konnte festgestellt werden, dass Stromunfallpatienten am häufigsten Verletzungen an den Händen erlitten (78,1 %, n= 25). Die Auswertungen beziehen sich dabei nur auf das Kollektiv der Kinder und Jugendlichen. Gefolgt von der Hand kamen Verletzungen des ventralen Rumpfes mit 28 % (n= 9) und der Arme mit 22 % (n= 7) bei den Kindern am häufigsten vor. Der Kopf, der Hals, der dorsale Rumpf, die Beine und die Füße waren mit jeweils 15,6 % (n= 5) zu gleichen Anteilen an den Verletzungen beteiligt.

Diese Ergebnisse sind vereinbar mit den Ergebnissen und Untersuchungen in der Literatur. In bereits veröffentlichten Studien ist aufgeführt, dass bei Stromunfällen am häufigsten die oberen Extremitäten, der Stamm und darauffolgend die unteren Extremitäten von Verletzungen betroffen sind [10, 18, 31, 45, 50, 56]. Insbesondere wird von der Beteiligung der Hand bei Stromunfällen berichtet [23, 27, 47, 57, 71]. Dieser Unfallmechanismus ist relativ typisch, da es meist bei der Benutzung von elektrischen Geräten und beim Greifen der Stromquelle mit der Hand zu Stromverletzungen kommt [57]. Zudem wird bei Säuglingen und Kleinkindern meistens von oralen Verletzungen durch das Anbeißen von Stromkabeln berichtet. Zubair und Besner beschrieben in ihrer Studie mit 127 stromverletzten Kindern, dass 38 % des Patientensatzes orale Verletzungen erlitten. Diese kamen dabei am häufigsten in der Altersgruppe der 0 bis 6-Jährigen vor [44]. Orale Verletzungen im Speziellen wurden in der hier vorliegenden Studie nicht erhoben. Lediglich 15,6 % (n= 5) der stromverletzten Kinder erlitten Verletzungen am Kopf, worunter auch die oralen Verletzungen fallen. Diese Art der Verletzung kam entgegen den Beobachtungen der oben genannten Studie hier jedoch nicht am häufigsten vor.

Die Verletzungen im Hochspannungsbereich waren in der Studie von Handschin et al., bei der 61 Hochspannungsverletzte rekrutiert wurden, auf die obere Extremität (90 %), die untere Extremität (60 %) sowie das Gesicht und den Kopf (46 %) zurückzuführen [10]. Da in den vorliegenden Auswertungen nur die verletzten Körperteile bei den Kindern und Jugendlichen angegeben waren, konnten nur 4 Hochspannungsfälle mit gültigen Angaben zur Untersuchung herangezogen werden. Dadurch kann es sein, dass in dieser Arbeit kein Zusammenhang zwischen hohen Spannungen und den verletzten Körperregionen verzeichnet werden konnte. Außerdem betrug der Anteil der verbrannten Körperoberfläche bei den hochspannungsverletzten Kindern im Durchschnitt  $51,3 \pm 21,1$  %. Da eine große Körperfläche von Verbrennungen und Verletzungen betroffen war, gab es keine wesentliche

Körperregion im Hochspannungsbereich, die einen besonders hohen Anteil an Verletzungen aufwies.

Muehlberger et al. erläuterten den Zusammenhang, weshalb bei Stromunfällen Verletzungen der Extremitäten deutlich häufiger auftreten als im Bereich des Thorax und Abdomens [31]. Dabei spielt der Durchmesser des Körperteils eine entscheidende Rolle. Das Muskelgewebe, das im Querschnitt der Arme und Beine den größten Mengenanteil ausmacht, leitet den Großteil des Stromflusses weiter. In einem Primatenmodell konnte besonders im Bereich der Gelenke wie dem Handgelenk und Ellenbogengelenk eine maximale Hitzeentwicklung aufgrund der Zusammensetzung des Gewebes im Querschnitt erforscht werden. Nach einer elektrischen Energiezufuhr zeigten sich Temperaturen von etwa 59 °C im Ellenbogenbereich sowie 84 °C an den Handgelenken, wobei die Temperaturen an den restlichen Ober- und Unterarmregionen relativ niedrig waren. Der Muskelanteil an den Gelenken ist gering und die Anteile von Knochen, Sehnen und Haut im Gegensatz dazu relativ hoch. Dadurch kommt es zu einem verhältnismäßig gesteigerten Stromdurchfluss und dementsprechend zu einer stärkeren Wärmebildung, die an den Gelenken der Extremitäten am höchsten ist [19, 31]. Dieser Zusammenhang erklärt das prozentual häufigere Auftreten von Verletzungen in diesen Körperarealen. Schließlich sind aufgrund der Pathophysiologie die typischen Verletzungslokalisationen bei Stromunfällen in dieser und der bereits erwähnten Studien relativ gut nachvollziehbar.

### 5.1.6 Körpertemperatur und Durchführung Kaltwassertherapie

In der bereits bestehenden Literatur gibt es keine einheitliche Regelung bezüglich der Anwendung von Kühlungsmaßnahmen bei Brandverletzten. Nach den aktuellen Leitlinien zur Behandlung thermischer Verletzungen bei Erwachsenen (Stand 02/2021) wird von einer aktiven Kühlung der Verbrennungen abgeraten. Kühlungsmaßnahmen sollen vom medizinischen Personal nicht durchgeführt bzw. beendet werden, da Kühlungen zwar zur kurzfristigen Analgesie dienen, aber auch mit einem erhöhten Risiko für eine Hypothermie einhergehen [4, 7, 16, 72]. In den Leitlinien zur Behandlung thermischer Verletzungen im Kindesalter (Stand 04/2015) wird festgehalten, dass „aus analgetischen Gründen kleinere Verbrennungen innerhalb der ersten 30 Minuten mit handwarmem Wasser vor Ort bis zum Eintreffen des Notarztes lokal gekühlt werden können“. „Bei großflächigen Verletzungen über 15 % KOF, bei Kleinkindern, Säuglingen, Neugeborenen, bei intubierten und beatmeten Patienten; und bei thermischen Verletzungen im Bereich des Körperstamms und Kopfes ist auf die Kühlbehandlung ganz zu verzichten, da die resultierende Hypothermie signifikant mit einer erhöhten Letalität einhergeht“ [24].

Beim Blick auf den in dieser Arbeit analysierten Datensatz kann in der Gruppe der Kinder und Jugendlichen beobachtet werden, dass die Kriterien der Leitlinien zur Anwendung von Kühlungsmaßnahmen teilweise nicht eingehalten wurden. Bei 4 von 5 gekühlten Kindern wären den Leitlinien zufolge Kühlungsmaßnahmen kontraindiziert gewesen. 2 Kleinkinder im Alter von 2 Jahren sowie 2 Jugendliche mit einer VKOF von über 15 % wurden entgegen den Empfehlungen der Leitlinien gekühlt. Der Mittelwert der Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt der 5 Kinder und Jugendlichen mit einer stattgehabten Kühlung betrug dabei  $34,9 \pm 4,7$  °C, wohingegen die Temperatur der Kinder und Jugendlichen, die nicht gekühlt wurden,  $36,1 \pm 1,3$  °C betrug. Dieser Befund war jedoch nicht statistisch signifikant ( $p= 0,618$ ). Auch wenn im vorliegenden Kollektiv aufgrund der niedrigen Fallzahlen statistisch keine Unterschiede zwischen den Körpertemperaturen bei gekühlten und nicht gekühlten Patienten aufgezeigt werden konnten, waren in Einzelfällen dennoch Hypothermien nachzuweisen (s. Tabelle 21). Es könnte durchaus sein, dass vor allem durch die kontraindizierten Kühlungsmaßnahmen eine Hypothermie der Patienten begünstigt wurde.

In der Gruppe der Erwachsenen wurden die Empfehlungen der Leitlinien hinsichtlich der Kühlungsmaßnahmen ebenfalls nicht oder nur teilweise beachtet. Patienten mit einer VKOF von über 15 % wurden entgegen der Empfehlungen gekühlt (s. Tabelle 25 im Anhang). Es wurde sogar ein Patient mit einer VKOF von 74 % gekühlt, obwohl dies aufgrund des hohen Wärmeverlustes bei großflächigen Wunden strikt kontraindiziert ist. Da bei großflächigen Verbrennungen aufgrund der aufgehobenen Barrierefunktion der Haut ein hoher Wärmeverlust und eine kontinuierliche Verdunstung von Flüssigkeit über die Wundflächen

erfolgt, erhöht sich dadurch die Gefahr einer Unterkühlung [72-74]. In diesem Zusammenhang beschrieben Trupkovic und Giessler 2008, dass aufgrund der Kaltwassertherapie öfters hypotherme Schwerbrandverletzte in Verbrennungszentren aufgenommen wurden, bei denen die Körperkerntemperatur weit unter 34 °C lag. Diese müssten stundenlang erwärmt werden bis letztendlich ein normothermer Zustand erreicht werden könne [26].

Desgleichen konnte in der vorliegenden Studie bestimmt werden, dass Hochspannungsverletzte mit einem ausgeprägten Verbrennungsausmaß mit durchschnittlich  $36 \pm 1,2$  °C eine niedrigere Körpertemperatur am Aufnahmetag aufwiesen als Niederspannungsverletzte mit einer kleineren Verbrennungsfläche. Die durchschnittliche Körpertemperatur bei den Niederspannungsverletzten betrug im Schnitt  $36,6 \pm 1,1$  °C. Dieser Unterschied war hochsignifikant. Aus dieser Erkenntnis ist zu entnehmen, dass bei Patienten, bei denen aufgrund von großflächigen Verbrennungen ohnehin schon ein erhöhtes Risiko zum Wärmeverlust besteht, ein weiterer Wärmeverlust durch Kühlungsmaßnahmen nicht begünstigt werden sollte.

Aus den beschriebenen Befunden lässt sich schließen, dass das Fachpersonal hinsichtlich der präklinischen Kühlungsbehandlung von Verbrennungsverletzten nicht ausreichend geschult ist. Die Leitlinien zur Behandlung thermischer Verletzungen im Kindesalter stammen aus dem Jahr 2015 und der hier analysierte Datensatz wurde im Zeitraum von Anfang 2015 bis einschließlich Ende 2018 erhoben. Folglich hätten die aktuellen Leitlinien dem medizinischen Personal zu dieser Zeit bekannt sein sollen.

	Alter [Jahre]	Temperatur [°C]	Verbrennung Grad 2a [%]	Verbrennung Grad 2b [%]	Verbrennung Grad 3 [%]	VKOF [%]
<b>1</b>	<b>2</b>	37,4	0,0	1,0	0,0	1,0
<b>2</b>	<b>2</b>	26,5	0,0	1,0	0,0	1,0
3	9	36,9	0,0	2,0	0,0	2,0
<b>4</b>	12	36,0	17,0	0,0	0,0	<b>17,0</b>
<b>5</b>	15	37,5	5,1	6,0	17,7	<b>28,8</b>

**Tabelle 21: Kinder und Jugendliche mit durchgeführter Kaltwassertherapie. Bei den hervorgehobenen Markierungen wären Kühlungsmaßnahmen nach den aktuellen Leitlinien kontraindiziert.**

Bezüglich der Empfehlungen von Kühlungsmaßnahmen existieren weiterhin kontroverse Meinungen. Dabei liegt die zentrale Fragestellung darin, ob und zu welchem Zeitpunkt eine Kühlung bei Verbrennungen indiziert ist. Erwähnenswert ist außerdem, dass die Leitlinien für Verbrennungen im Kindesalter aus dem Jahr 2015 stammen und aktuell überarbeitet werden [24]. Es besteht daher die Wahrscheinlichkeit, dass in den kommenden Jahren neuere Empfehlungen für Kühlungstherapien veröffentlicht werden. Die angegebene Höchstgrenze

für die Durchführung einer Kühlung bei Kindern mit einer VKOF von bis zu 15 % könnte noch weiter eingeschränkt werden, da neuere Erkenntnisse dies nahelegen. Der Trend bezüglich der Empfehlungen zeichnete sich über die Jahre durch eine weitere Einschränkung der Kühlungsmaßnahmen aus (s. Tabelle 22). Die kontroversen Meinungen bezüglich der Kontraindikation von Kühlungen bei hohen Anteilen der verbrannten Körperoberfläche bestehen dabei weiterhin. In den Empfehlungen der DGV zur Ersten Hilfe bei Brandverletzungen wird von einer Kontraindikation der Kühlung bei einer VKOF von über 5 % berichtet. Unter allen hier aufgeführten Empfehlungen für eine Kontraindikation der Kühlung ist dies der aktuellste Verweis [75]. Eine Diskussion in Hinsicht auf eine Indikation zur Kühlung bei Verbrennungspatienten erfolgt im Weiteren.

Autor	Jahr	Empfehlung, ab welcher VKOF <u>keine</u> Kühlung durchgeführt werden sollte
Giessler et al. [76]	2004	über 30 % VKOF
V Gregory et al. [77]	2005	über 20 % VKOF
Trupkovic & Giessler [26]	2008	über 10 % VKOF
Spelten et al. [13]	2013	über 10 % VKOF
Sander, Hartmann [4]	2015	über 15 % VKOF
Schneider & Plock [78]	2016	über 5 % VKOF
Hoffmann [79]	2018	über 15 % VKOF
DGV [75]	2021	über 5 % VKOF

**Tabelle 22: Studien mit Empfehlungen für die Kontraindikation von Kühlungsmaßnahmen [%VKOF]**

Aktuellen Empfehlungen zufolge sollten Kühlungsmaßnahmen bei Brandverletzten bestenfalls vermieden werden bzw. so kurz wie möglich gehalten werden [16]. Schneider und Plock beschrieben 2016, dass die Annahme, die Temperatur im Gewebe durch Kühlungen schneller zu normalisieren und damit progressive Gewebeschäden zu minimieren, heutzutage nicht mehr vertretbar ist [78]. Gleichermäßen äußerte Hoffmann 2018, dass bislang kein sicherer Beweis vorliegt, dass durch Kühlungen das Ausbreiten des Verbrennungsausmaßes limitiert werden kann [79]. Hoffmann und Landsleitner erläuterten, dass die lokale Kühlung von Extremitäten in den ersten Minuten nach einer Verbrennung ein geringeres Risiko für eine Hypothermie zeigt als bei der Kühlung des Körperstamms. Daher sollten Kühlungen am Körperstamm und am Kopf, insbesondere mit kaltem Wasser, aufgrund des höheren Hypothermierisikos strikt vermieden werden [79, 80]. Schneider und Plock ergänzten in ihren Erläuterungen, dass bei großflächigen Wunden der Wärmeerhalt an

erster Stelle steht. Bei kleineren Brandwunden seien Kühlungen aufgrund des schmerzlindernden Effekts jedoch möglich [78].

In diesem Kontext schilderten Spelten et al. den Effekt von Kühlungen bei Verbrennungspatienten folgendermaßen: In den ersten Minuten nach einer Verbrennung kommt es durch die Kühlung der betroffenen Areale zur Stabilisierung der Mastzellen in der Haut und somit zur Verringerung der Histaminausschüttung. Dies führt schließlich zu einer Schmerzlinderung. Hierbei wird zusätzlich die Ödembildung eingeschränkt [13]. Untersuchungen zufolge ist ein positiver Effekt der Kühlung nur innerhalb weniger Sekunden nach einer Verbrennung nachzuweisen, wenn mit 10-20 °C kaltem Wasser gekühlt wird. Eine Kühlung, die bereits 2 Minuten nach dem Trauma erfolgt, zeigt keinen effektiven Nutzen mehr. Nach dieser Zeit ist nur noch eine analgetische Wirkung der Kühlung zu erwarten, wobei es gleichzeitig zur Senkung der Körperkerntemperatur kommen kann [76]. Die Gefahr bei einer zu langen oder zu kalten Kühlung besteht zudem darin, dass es über eine „hypothermiebedingte Vasokonstriktion zu einer Zunahme des Verbrennungsausmaßes“ führen kann [26]. Auf diese Problematik gingen auch Koppenberg und Taeger im Jahr 2001 ein. Sie thematisierten den Effekt des „Afterburns“, der eine Zunahme des Gewebeschadens im Falle einer übermäßigen Kühlung beschreibt [5].

In Bezug auf den analgetischen Effekt von Kühlungsmaßnahmen werden zur Schmerztherapie anstelle des Kühlens vielmehr sterile Verbände empfohlen, die frühzeitig angelegt werden sollten [81]. Bereits die Vermeidung von Zugluft über den Verbrennungswunden, vor allem bei Verbrennungen 2. Grades, führt zu einer deutlichen Schmerzlinderung. Die zusätzliche medikamentöse Analgesie sollte bei Ankunft des Fachpersonals am Unfallort intravenös erfolgen. Aus dem Literaturvergleich geht demnach hervor, dass Kühlungsmaßnahmen keine optimale Maßnahme zur Analgesie vonseiten des Fachpersonals darstellen [16, 69]. Das Risiko aufgrund der Kühlungen eine Hypothermie zu begünstigen ist schließlich zu hoch.

Aus der Literatur geht hervor, dass eine Hypothermie mit einer signifikant höheren Mortalität einhergeht [24, 26, 69, 72, 79]. Dieses Erkenntnis lässt sich in der hier untersuchten Studie ebenfalls bestätigen. Patienten, die im Verlauf des Krankenhausaufenthaltes verstarben, hatten im Mittel eine niedrigere Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt ( $35 \pm 1,1$  °C) als Patienten, die nicht verstarben ( $36,5 \pm 1,2$  °C). Dieser Zusammenhang erwies sich als statistisch signifikant. Ebenso ist aus der Literatur zu entnehmen, dass bereits bei einer um 1 °C erniedrigten Körpertemperatur das Mortalitätsrisiko um etwa 50 % steigt [81]. In den vorliegend durchgeführten Analysen konnte bei einer Senkung der Körpertemperatur um 1 °C eine Steigerung des Mortalitätsrisikos um 35 % ermittelt werden. Diese beiden Werte sind somit in etwa vergleichbar.

In den Leitlinien sowie in weiteren wissenschaftlichen Artikeln wird bezüglich der Vermeidung von Hypothermien auf die hohe Relevanz des Wärmeerhalts bei Brandverletzten hingewiesen. Maßnahmen wie das „Aufwärmen des Rettungsfahrzeugs, Infusion von vorgewärmten Infusionslösungen sowie Abdecken des Patienten mit Aluminiumfolie“ sollten strikt beachtet werden [13]. Des Weiteren wird empfohlen, brandverletzte Patienten in Schockräume aufzunehmen, die auf 35-40 °C vorgeheizt wurden, um eine Hypothermie zu behandeln bzw. zu verhindern [4, 26].

Da eine Kühlung nur in den ersten Minuten nach einer Verbrennung einen positiven Effekt auf das Outcome der Patienten zeigt und zur Abschätzung des Verbrennungsausmaßes am Unfallort zu viel Zeit vergeht, sodass eine Indikation zur Kühlung überhaupt gestellt werden kann [4, 76], ist auf einen gänzlichen Verzicht der Kühlung zu raten. Obwohl in dieser Studie ein temperatursenkender Effekt der Kühlung statistisch nicht nachzuweisen war, waren in Einzelfällen Hypothermien bei Patienten mit durchgeführten Kühlungen zu beobachten. Außerdem ist festzustellen, dass dem Fachpersonal die Indikationen und Kontraindikationen für eine Kühlung nur teilweise bekannt sind. Es kann behauptet werden, dass die Notwendigkeit bzw. die Unterlassung einer Kühlung für eine optimale Behandlung in der Notfallsituation nicht adäquat eingeschätzt werden kann. Da jahrelang das Prinzip der Kühlung bei Verbrennungsverletzungen den Goldstandard in der präklinischen Behandlung sowie zur Analgesie darstellte, ist es möglich, dass die neuen Empfehlungen unterschätzt werden und es dementsprechend an Zeit bedarf bis die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Praxis umgesetzt werden. Auch wenn der Verzicht von Kühlungen und schlichte Maßnahmen zum Wärmeerhalt einen großen Wandel in der präklinischen Versorgung von Brandverletzten darstellen, sind diese Anwendungen für das Outcome der Patienten maßgeblich [78]. Als Folge dessen sollte das Ziel sein, Ersthelfer und Gesundheitspersonal hinsichtlich der Behandlung von strominduzierten Verbrennungen ausreichend auszubilden und zu schulen.

### 5.1.7 Liegedauer

In der folgenden Studie war die Liegedauer von Niederspannungsverletzten mit durchschnittlich  $9,5 \pm 13,1$  Tagen (1-107 Tage) kürzer als die von Hochspannungsverletzten. Diese verweilten durchschnittlich  $46,5 \pm 31,4$  Tage (1-167 Tage) in der Klinik. Dieser signifikante Unterschied resultiert aus der Tatsache, dass hochspannungsverletzte Patienten durch das hohe Ausmaß der verbrannten Körperoberfläche sowie die tieferen Verbrennungen häufiger operiert wurden und dementsprechend länger behandelt werden mussten als niederspannungsverletzte Patienten. Außerdem bestand bei den Hochspannungsverletzten eine höhere Komplikationsrate (Sepsis, Pneumonie, Inhalationstrauma), deren Behandlungsdauer ebenfalls zur Verlängerung des stationären Aufenthaltes beigetragen haben kann. Handschin et al. berichteten in ihrer Studie von einer durchschnittlichen Hospitalisationsdauer von  $43 \pm 29$  Tagen (4-110 Tage) bei Hochspannungsverletzten [10]. Hierbei wurde von einem hohen Verbrennungsausmaß von durchschnittlich  $35 \pm 13$  % berichtet, wobei  $29 \pm 10$  % drittgradigen Verbrennungen entsprachen. Diese langen Liegezeiten der Hochspannungsverletzten hängen mit der hohen VKOF und dem hohen Anteil an drittgradigen Verbrennungen zusammen, die langwierigere Therapien bedürfen als Niederspannungsverletzte. Diesen Zusammenhang konnten auch weitere Autoren beobachten (s. Tabelle 23).

Es lässt sich somit festhalten, dass die signifikant längeren Liegedauern in der Gruppe der Hochspannungsverletzungen auf den langwierigen Wundheilungsprozess, die Häufigkeit von Komplikationen [49] sowie die höhere Rate an durchgeführten Operationen (u.a. Escharotomien/Fasziotomien und Amputationen) zurückgeführt werden kann [47, 50]. In der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen Liegedauern der Stromverletzten von diversen internationalen Studien denen der hier vorliegenden Studie gegenübergestellt.

<b>Studie (Jahr)</b>	<b>Kollektiv (Land)</b>	<b>Durchschnittliche Liegedauer (Tage)</b>
Durchgeführte Studie	N= 215 gesamt  N= 42 Kinder  N= 173 Erwachsene (Deutschland, Österreich, Schweiz)	46,5 ± 31,4 Tage für <i>HS-Verletzte</i> 9,5 ± 13,1 Tage für <i>NS-Verletzte</i> 47,6 ± 21,5 Tage für <i>HS-Verletzte</i> 6,9 ± 5,8 Tage für <i>NS-Verletzte</i> 46,3 ± 32,8 Tage für <i>HS-Verletzte</i> 10,3 ± 14,5 Tage für <i>NS-Verletzte</i>
Luce, Gottlieb (1984) [49]	N= 48; MW: 28 Jahre (Vereinigte Staaten)	37,7 Tage für <i>HS-Verletzte</i>
Garcia et al. (1995) [67]	N= 70 Kinder (Vereinigte Staaten)	4,5 Tage für <i>Gesamtkollektiv</i> (1-43 Tage)
Celik et al. (2004) [56]	N= 38 Kinder (Türkei)	23,8 ± 14,2 Tage für <i>Gesamtkollektiv</i> (2-48 Tage)
Arnoldo et al. (2004) [50]	N= 700; Kinder & Erwachsene (Vereinigte Staaten)	18,9 ± 1,4 Tage für <i>HS-Verletzte</i> 4,1 ± 1,2 Tage für <i>NS-Verletzte</i>
Handschin et al. (2007) [10]	N= 61; Jugendliche ab 14 J. & Erwachsene (Schweiz)	43 ± 29 Tage für <i>HS-Verletzte</i> (4-110 Tage)
Rai et al. (2013) [46]	N= 41 Kinder (Indien)	9 Tage für <i>Gesamtkollektiv</i> 10,1 Tage für <i>HS-Verletzte</i> 7,4 Tage für <i>NS-Verletzte</i>
Lipový (2014) [21]	N= 58; Kinder & Erwachsene (Tschechien)	53,4 ± 31,7 Tage für <i>HS-Verletzte</i>
Aghakhani et al. (2015) [22]	N= 287; Kinder & Erwachsene (Iran)	17 ± 16 Tage für <i>Gesamtkollektiv</i> (1-115 Tage)
Kurt et al. (2016) [45]	N= 94; Kinder & Erwachsene (Türkei)	21,3 ± 19,8 Tage für <i>HS-Verletzte</i> (3-116 Tage) 8,6 ± 6,2 Tage für <i>NS-Verletzte</i> (2-30 Tage)
Brandão et al. (2017) [47]	N= 99; Kinder & Erwachsene (Portugal)	39,2 ± 31,2 für <i>HS-Verletzte</i> 17,6 ± 13,9 für <i>NS-Verletzte</i>
Ozdel et al. (2019) [68]	N= 8 Kinder (Türkei)	67,1 ± 5,4 Tage für <i>Gesamtkollektiv</i>

**Tabelle 23: Studienvergleich Liegedauer bei Stromverletzten (Tage)**

### 5.1.8 Nekrektomie

Bei der Nekrektomie werden nekrotisierte Hautpartien entfernt, die nicht mehr regenerierbar sind. In der vorliegenden Arbeit wurden Nekrektomien mit 44,1 % am häufigsten am Aufnahmetag durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass die durchschnittliche verbrannte Körperoberfläche dieser Patienten  $18,9 \pm 24,9$  % (0-83 %) betrug. Der Großteil davon waren drittgradige Verbrennungen mit durchschnittlich  $11,3 \pm 17,8$  % (0-75 %). Bei den Patienten, bei denen keine Nekrektomie am Aufnahmetag durchgeführt wurde, lag mit durchschnittlich  $24,1 \pm 21,2$  % (0,2-70 %) eine deutlich höhere VKOF vor als bei den Patienten, die am Aufnahmetag nekrektomiert wurden. Diese Patienten wurden hingegen häufiger am 2. posttraumatischen Tag einer Nekrektomie unterzogen.

Die zentrale Fragestellung zur Beurteilung des optimalen Zeitpunkts der Durchführung von Nekrektomien bei Verbrennungen besteht darin, inwiefern von einer progressiven Gewebsnekrose ausgegangen werden kann. Hierzu bestehen kontroverse Meinungen in der Literatur [20, 23, 49]. Zum einen wird eine frühzeitige Exzision devitalisierten Gewebes empfohlen, da Verletzungen durch elektrischen Strom als Verbrennungen angesehen werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt der Verletzung die Gewebsnekrose bereits vollständig ist [49]. Folglich wird eine frühzeitige Exzision aller nekrotischen Wunden und eine daran anschließende Wundabdeckung empfohlen, um das Infektionsrisiko so gering wie möglich zu halten [12, 20, 27]. Es soll ab Grad 2b-Verbrennungen ein frühes Débridement erfolgen [69]. Ebenso wurde bei allen Patienten in der bereits berichteten Studie von Handschin et al. mit 61 untersuchten Hochspannungsverletzten eine Nekrosektomie am Aufnahmetag durchgeführt [10].

Auf der anderen Seite besteht die Theorie, dass sich ein vorsichtiges und zurückhaltendes Débridement bewährt hat. Eine frühzeitige Exzision und Wundabdeckung würde demnach eine Infektion verursachen, falls die Nekrektomie des devitalisierten Gewebes unvollständig war [49]. Autoren berichten bezüglich Grad 2b/3-Verbrennungen von einer Nekrosektomie beginnend ab etwa dem 3. Tag nach Unfallgeschehen [4]. Weiteren Ansichten zufolge sollte die Durchführung einer Nekrektomie normalerweise nicht vor dem zweiten posttraumatischen Tag erfolgen. In Einzelfällen kann sie jedoch abhängig von der klinischen Situation auch am Tag der Aufnahme durchgeführt werden [73, 77]. Diese Empfehlungen spiegeln sich im vorliegenden Kollektiv insofern wider, dass Patienten mit hohen Werten des Verbrennungsausmaßes sowie Verbrennungen des Grades 2b/3 häufiger am 2. posttraumatischen Tag nekrektomiert wurden.

Diese Uneinigkeit bezüglich des Zeitpunkts der Durchführung von Nekrektomien kommt zum einen daher, dass es aufgrund des Stromkontakts zu tiefen Gewebe-, Nerven- und Muskelschäden kommen kann, die zu Anfang der Verletzung nicht sichtbar sind. Im Folgenden kann das Gewebe, das vorerst ungeschädigt erschien, schließlich ödematös,

ischämisch oder gangränös werden. Auch Wochen später können durch Stromverletzungen und Verbrennungen ischämische Nekrosen, Vasospasmen, Aneurysmenbildung und Blutungen hervorgerufen werden [18]. Handschin et al. gehen ebenfalls auf diese Problematik ein. Sie thematisieren das Problem der ungenauen Einschätzung der Verletzungsschwere bei Stromverletzungen. Die zentrale Problematik in der Akutphase ist dabei die Beurteilung des tatsächlichen Ausmaßes des Gewebeschadens, da die Höhe der VKOF zur Einschätzung des Schweregrades der Verletzungen und der Verbrennungstiefe nicht hinweisgebend ist [10]. So kann es insbesondere nach einem Stromunfall dazu führen, dass Verletzungen vorerst unterschätzt werden und der wahre Gewebeschaden erst nach Tagen sichtbar wird. Aufgrund der Unvorhersehbarkeit der Nekroseabfolge wird mit der Nekrektomie von devitalisiertem Gewebe abgewartet, bis die endgültige Ausdehnung der Nekrose bekannt ist [23]. Daher kann auch erst Tage nach dem Trauma eine erstmalige Nekrektomie oder eine erneute Nekrektomie erforderlich sein.

Muehlberger et al. behaupteten zum anderen jedoch, dass mit einer spät auftauchenden Nekrose des Gewebes grundsätzlich nicht zu rechnen ist [31]. Zelt et al. behaupteten in ihrer Studie, dass „eine progressive Nekrose nicht stattfindet und befanden, dass Hochspannungsverletzungen eher durch progressive Aufmerksamkeit des Therapeuten anstatt progressiver Gewebsveränderungen charakterisiert sind.“ [31, 82]. Weitere Autoren äußerten, dass zwischen dem dritten und fünften Tag nach der Verletzung ein endgültiges Débridement vollzogen werden kann, da nach dieser Zeit verspätet auftretende Muskelnekrosen nicht mehr zu erwarten sind [44]. Da in der vorliegenden Studie Nekrektomien auch Tage bis Wochen nach dem Trauma erforderlich waren, kann der Annahme von Muehlberger et al., dass eine fortschreitende Gewebsnekrose nicht zu erwarten ist, nicht zugestimmt werden.

In dieser untersuchten Studie wurden Nekrektomien am häufigsten am Aufnahmetag durchgeführt, wobei Patienten mit einem höherem Verbrennungsausmaß sowie tieferen Verbrennungen häufiger am 2. posttraumatischen Tag nekrektomiert wurden. Die vorliegenden Ergebnisse decken sich am ehesten mit den Feststellungen von Kym et al. Kym et al. zufolge sollte eine frühzeitige Resektion nekrotischen Gewebes erfolgen, um das Infektionsrisiko möglichst zu minimieren [12]. Um die Ausschüttung von Mediatoren aus den Verbrennungswunden zu unterbinden, sollte außerdem eine zeitnahe Wunddeckung der offenen Verbrennungsstellen erfolgen [73, 77]. Erforderliche Débridements in den darauffolgenden Tagen sollten je nach Notwendigkeit und dem Fortschreiten der Gewebsnekrosen erwogen werden. Genauere Vermutungen über den optimalen Zeitpunkt einer Nekrektomie zu stellen, sind anhand der hier erhobenen Daten jedoch nicht weiter möglich.

### 5.1.9 Komplikationen

Bei der Analyse der Komplikationen, die bei den Stromverletzten der vorliegenden Studie ermittelt werden konnten, zeigte sich eine höhere Komplikationsrate bei den Hochspannungsverletzten im Vergleich zu den Niederspannungsverletzten. Insbesondere die Komplikationen Inhalationstrauma (n= 4), Pneumonie (n= 13) und Sepsis (n= 7) kamen ausschließlich bei den Hochspannungspatienten vor. In der Gruppe der Hochspannungsverletzten traten bei insgesamt 67,1 % der Patienten (n= 57) Komplikationen auf, wobei dieser Wert bei den Niederspannungsverletzten nur 6,2 % (n= 8) betrug. Im Vergleich hierzu konnten Handschin et al. in ihren Untersuchungen beobachten, dass bei 64 % der Hochspannungsverletzten ihres Kollektivs Komplikationen auftraten, wobei pulmonale und septische Komplikationen dominierten [10]. Weiterhin geht aus der Literatur hervor, dass bei Hochspannungsverletzungen tiefe Verbrennungen [50], das Kompartmentsyndrom, Amputationen [27], Muskelnekrosen, Myoglobinurie [27, 32, 44], Nierenversagen, Multiorganversagen, Sepsis [20, 50], Herzstillstand sowie das akute Atemnotsyndrom [46, 50] häufig vorkommende Komplikationen darstellen [33, 68]. Diese schwerwiegenden Komplikationen kommen bei Hochspannungsverletzungen häufiger vor als bei Niederspannungsverletzungen [33, 50, 68].

Bezüglich der Myoglobinurie und dem Auftreten eines akuten Nierenversagens als Komplikation bei Stromverletzten bestehen kontroverse Meinungen in der Literatur. In diesem Zusammenhang äußerten Muehlberger et al., dass die Myoglobinurie einen Risikofaktor für die Entwicklung eines akuten Nierenversagens bei Stromunfällen darstellt [31]. Weitere Autoren beschrieben ebenfalls, dass die erhöhte Ausscheidung von toxischen Muskelabbauprodukten (Myoglobin), die durch strominduzierte Verbrennungen entstehen können und über die Nieren ausgeschieden werden, zu einer signifikant hohen Inzidenz des akuten Nierenversagens führen [20, 27, 32, 33]. Die Inzidenz des akuten Nierenversagens bei Stromverletzungen wird zwischen 1,5 und 7,5 % angegeben [49]. Bei Hochspannungsverletzungen betragen diese Werte je nach Studie bereits 13,9 % [32] bzw. 40 % [33]. Cooper beschrieb 1995, dass seit dem Beginn einer angemessenen Volumentherapie die Inzidenz des akuten Nierenversagens zurückging [27].

Rosen et al. zeigten im Gegensatz dazu, dass das Risiko für eine renale Komplikation bei stromverletzten Patienten sehr gering ist. In ihrer durchgeführten Studie mit 162 stromverletzten Patienten trat bei nur 14 % eine Myoglobinurie auf, wobei es in keinem der Fälle zu einem Nierenversagen kam [83].

Um der Frage eines möglichen erhöhten Risikos eines akuten Nierenversagens bei Stromverletzten nachzugehen, wurden im vorliegenden Kollektiv die Kreatininwerte sowie die glomeruläre Filtrationsrate herangezogen. Verbrennungen im Rahmen von

Stromverletzungen können zu einer massiven Muskelnekrose führen. Folglich kann es zur Freisetzung von Muskelabbauprodukten und zum Verlust von Plasmaproteinen und Flüssigkeit kommen. Dabei kommt es im Rahmen der Rhabdomyolyse zu erhöhten Kreatininwerten [31]. Die erhöhten Kreatininwerte und eine erniedrigte GFR stellen dabei einen Hinweis auf eine Niereninsuffizienz dar [40].

In den folgenden Analysen wurde ein Vergleich der Kreatininwerte, die am 1. und 2. Tag der Aufnahme gemessen wurden, durchgeführt. Es ergab sich, dass Patienten, die im Anschluss der stationären Aufnahme verstarben, im Median einen höheren Kreatininwert aufwiesen als Patienten, die den Stromunfall überlebten. Nach der Definition der akuten Nierenschädigung des Acute Kidney Injury Network (AKIN-Definition) ist eine abrupte Abnahme der Nierenfunktion definiert durch einen absoluten Anstieg des Serum-Kreatinins um  $\geq 0,3$  mg/dl, einen prozentualen Anstieg des Serum-Kreatinins um  $\geq 50$  % bzw. auf das 1,5fache des Ausgangswertes innerhalb von 48 Stunden oder eine Verminderung der Urin-Ausscheidung auf unter  $0,5$  (ml/kg)/h über mehr als 6 Stunden [40]. In dieser Arbeit betrugen die Kreatininwerte der Patienten, die im Verlauf des stationären Aufenthalts verstarben, im Median  $1,3$  mg/dl am ersten Tag der Aufnahme und  $1,7$  mg/dl am 2. Aufenthaltstag. Nach der AKIN-Definition entspricht dieser ermittelte Kreatininanstieg von  $\geq 0,3$  mg/dl innerhalb von 24 Stunden dem Stadium 1 der AKIN-Einteilung und stellt somit ein Risiko für ein akutes Nierenversagen dar. Nach der AKIN-Definition ist eine abrupte Verschlechterung der Nierenfunktion durch ein Serum-Kreatininanstieg innerhalb von 48 Stunden definiert. In den hier durchgeführten Analysen stiegen die Werte bereits innerhalb von 24 Stunden abrupt an. Die abrupte Verschlechterung der GFR in der Gruppe der im Verlauf Verstorbenen mit einem Median von  $97$  ml/min am Aufnahmetag zu  $42$  ml/min am 2. Aufenthaltstag bestätigt ebenfalls diese Annahme.

Anhand der untersuchten Fälle konnte nach den RIFLE-Kriterien ein niedriges Stadium (AKIN-Stadium 1) für eine akute Nierenschädigung bei Stromverletzten bestimmt werden. Diesen Ergebnissen zufolge kann behauptet werden, dass nach Stromunfällen, vor allem bei den Fällen, die zum Tode geführt haben, eine Niereninsuffizienz vorgelegen haben kann. Dies macht sich durch die erhöhten Kreatininwerte und die erniedrigte GFR der Patienten, die im Laufe der stationären Behandlung verstarben, bemerkbar. Ein definitives Nierenversagen lässt sich jedoch anhand der vorliegenden Daten nicht belegen. Es konnte lediglich ein erhöhtes Risiko für eine Nierenschädigung aufgezeigt werden.

### 5.1.10 Mortalität

In dem vorliegenden Patientenkollektiv verstarben insgesamt 13 Patienten (6 %) aufgrund von strominduzierten Verletzungen. Bei allen Todesfällen handelte es sich um Hochspannungsunfälle. In der Literatur wird eine Mortalitätsrate von 0 bis 21,7 % bei Stromunfällen angegeben [10, 12, 21, 22, 45, 47, 71]. In den untersuchten Studien lag die Mortalität bei Hochspannungsverletzten zwischen 4 % und 30 % und bei Niederspannungsverletzten zwischen 1 % und 3 % [5, 6, 22, 32, 33, 50]. Stromverletzungen aufgrund von niedrigen Voltzahlen führten demnach seltener zum Tod [23]. Verglichen mit den angegebenen Prozentzahlen aus der Literatur kamen im vorliegenden Kollektiv keine Todesfälle im Niederspannungsbereich vor. Bei stromassoziierten Verletzungen wurden ein hohes Verbrennungsausmaß (über 50 %), Pneumonie, Sepsis, Multiorganversagen und frühes akutes Nierenversagen als die häufigsten Ursachen der Krankenhaussterblichkeit beschrieben [27, 32, 33, 45, 49]. Drei der Verstorbenen aus dem hier betrachteten Kollektiv wiesen ebenfalls eine Sepsis auf.

In der vorliegenden Studie handelte es sich bei 8 der 11 Verstorbenen um Männer bzw. um Jungen. Dieser Geschlechtsunterschied zeigte sich ebenso in einer kanadischen Studie mit 21 Toten nach Stromunfall, bei der bis auf eine Ausnahme alle Verstorbenen männlichen Geschlechts waren. Das Durchschnittsalter der verstorbenen Kinder durch elektrische Hochspannung betrug in der Studie dabei 13,2 Jahre [52]. In dem hier vorliegenden Kollektiv handelte es sich bei einem der beiden verstorbenen Kinder um einen 9-jährigen Jungen, der nach einem Lichtbogenunfall nach 66 Tagen Klinikaufenthalt verstarb. Bei diesem konnten multiresistente Erreger, eine Pneumonie und eine Sepsis als Komplikationen nachgewiesen werden. Bei dem anderen Kind handelte es sich um einen 15-jährigen Jungen, der nach einem Lichtbogenunfall innerhalb von 24 Stunden verstarb.

Der aktuellen Literatur zufolge ist die Mortalität von Brandverletzten grundsätzlich von folgenden Faktoren abhängig [13, 74]:

- Ausmaß des verbrannten Hautareals (%VKOF)
- Schweregrad der Verbrennung (III. und IV. Grad)
- Vorliegen eines Inhalationstraumas
- weibliches Geschlecht
- hohes Alter [84]
- Hochspannung [32]

Lönnecker und Schoder [72] beschrieben eine Zunahme der Mortalität bei Brandverletzungen unter folgenden Bedingungen:

- Hohes Verbrennungsausmaß
- Hohes Lebensalter
- Niedrige Aufnahmetemperatur

Die Durchführung einer Kaltwassertherapie sowie die Erstversorgungsdauer hatten dabei keinen Einfluss auf die Mortalität [72].

In den vorliegenden Analysen konnte bei einigen dieser Faktoren ebenfalls ein Effekt auf die Mortalität bestimmt werden. Das Alter und das Geschlecht hatten dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Sterblichkeit. Signifikante Einflussfaktoren auf die Mortalität waren dagegen das Verbrennungsausmaß (VKOF), der Schweregrad der Verbrennung (3. Grad), die Körpertemperatur zum Aufnahmezeitpunkt sowie der Lichtbogen als Unfallmechanismus. Lönnecker und Schoder beschrieben eine um etwa 43 % erhöhte Sterbewahrscheinlichkeit im Falle einer Erniedrigung der Körpertemperatur um 1 °C [72]. Diese Wahrscheinlichkeit konnte in dem vorliegenden Kollektiv mit etwa 35 % bemessen werden. Dass eine Hypothermie einen prädiktiven Faktor für die Mortalität von strominduzierten Verbrennungspatienten darstellt, wurde bereits in Kapitel 5.1.6 Körpertemperatur und Durchführung Kaltwassertherapie erläutert.

## 5.2 Diskussion der Studienkonzeption

### 5.2.1 Limitationen

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln diskutiert, unterliegen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit einigen Limitationen. Eine der Limitationen stellt das retrospektive Design dar. Nachuntersuchungen waren aufgrund des Studienkonzeptes sowie der länderübergreifenden und anonymisierten Datenerhebung nicht möglich. Daher konnten unvollständig dokumentierte bzw. fehlende Daten nicht ergänzt werden. Es konnten keine Analysen bezüglich der verletzten Körperregionen bei den Erwachsenen, der Nierenfunktion bei den Kindern (GFR & Kreatininwerte) sowie den Tag der ersten durchgeführten Nekrektomie bei den Kindern erfolgen, da die entsprechenden Angaben im Register nicht hinterlegt wurden.

Die Einteilung der Stromunfälle im Verbrennungsregister wurde ungünstig gewählt, da keine Unterscheidung der Unfälle nach der Spannungshöhe (Niederspannung/Hochspannung) vorgenommen wurde. Es wurde lediglich eine Extrakategorie für Lichtbogenverletzungen angelegt, die in die Gruppe der Hochspannungsverletzungen fallen. Aufgrund dessen wurde in dieser Arbeit eine eigene Unterteilung des Patientensatzes in die beiden Gruppen der Niederspannungs- und der Hochspannungsverletzungen vorgenommen, um die Ergebnisse besser mit denen der bestehenden Literatur vergleichen zu können. Näheres zur vorgenommenen Unterteilung ist in Kapitel 3.2 der Methoden beschrieben.

Diese Limitationen und einige weitere Anregungen wurden bereits mit der Arbeitsgruppe des Verbrennungsregisters korrespondiert. Die neue Software des Verbrennungsregisters zur Erfassung der Daten stromverletzten Patienten wird Anfang 2021 eingeführt und sieht in Bezug auf Stromunfälle eine Unterteilung in Niederspannung, Hochspannung und Blitzschlag vor.

Da die Teilnahme der Verbrennungszentren am Verbrennungsregister freiwillig ist, stellt der hier analysierte Patientensatz nur einen Teil aller Stromverletzten in Deutschland, Österreich und der Schweiz dar. Dennoch konnten trotz der teilweise geringen Fallzahlen in den einzelnen Subgruppen und des retrospektiven Designs aussagekräftige Ergebnisse ermittelt werden.

### 5.2.2 Bedeutung der Studie und Ausblick

Ein großer Vorteil dieser Studie ist, dass sowohl Daten aus deutschen Kliniken als auch Daten aus teilnehmenden Verbrennungszentren in Österreich und der Schweiz erhoben wurden. Die Ergebnisse dieser Studie unterstützen die Datenlage bezüglich der Charakterisierung und Behandlung von stromverletzten Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen in deutschsprachigen Ländern. Durch die Erhebung von Daten über die nationalen Grenzen hinaus konnten eine länderübergreifende Beschreibung und Analyse der Daten sowohl im Sinne einer Vergleichsarbeit zwischen Niederspannungsverletzungen und Hochspannungsverletzungen als auch als Vergleichsarbeit zwischen stromverletzten Kindern und Erwachsenen genutzt werden. Es konnten in dieser Arbeit wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf die Demografie und das Outcome von Hochspannungsverletzten gestellt werden, die im Vergleich zu Niederspannungsverletzungen eher seltener vorkommen.

Folglich erweitern die gewonnenen Untersuchungsergebnisse, insbesondere die Ergebnisse der stromverletzten Kinder und der Hochspannungsverletzungen, den Forschungsstand. Die vorliegende Arbeit diene dabei nicht nur dazu, um eine Forschungslücke zu schließen, sondern soll aufgrund der Denkanstöße zu weiteren Studien anregen, um Stromunfälle eingehender zu erforschen. In dieser Hinsicht könnte eine Erhebung von zusätzlichen Parametern wie die Operationsart, die amputierten Körperteile sowie die kardialen Funktionsparameter der Stromverletzten die Datenlage in diesem Forschungsbereich zukünftig weiter aufwerten.

### 5.2.3 Prävention

Trotz erhöhter Sicherheitsstandards ereignen sich heutzutage weiterhin Stromunfälle, insbesondere Hochspannungsunfälle mit schweren Verletzungen, die bis hin zum Tod führen können. Es ist von essenzieller Bedeutung, Sicherheitsmaßnahmen zu implementieren und weiter auszubauen, um derartige fatale Stromverletzungen zu verhindern. Präventionsarbeiten stellen einen wesentlichen Faktor zur Verhinderung von Stromverletzungen dar. Tomkins und Holland zufolge hätten mehr als die Hälfte aller Stromunfälle im Kindesalter durch höhere Achtsamkeit der Eltern verhindert werden können [85]. Aufgrund der hohen Inzidenz von Niederspannungsverletzungen im Kleinkindsalter sind Aufklärungsarbeiten für Sorgeberechtigte besonders relevant. Hierbei ist es maßgeblich auf Niederspannungsunfälle im Haushalt und trotz der niedrigen Voltzahlen auf das Auftreten von Verbrennungen, Gewebeschäden und Herzrhythmusstörungen hinzuweisen. Hierfür könnten Informationsmaterialien in Kinderarztpraxen sowie Kindertagesstätten zunutze gemacht werden. Eine Aufklärung über die Gefahren des elektrischen Stroms sollte idealerweise durch den Kinderarzt bzw. die Kinderärztin erfolgen [44].

Präventionsmaßnahmen sollten außerdem die Aufklärung von Kindern und Jugendlichen bezüglich der Gefahren und Sicherheitshinweise an Bahnhöfen, Oberleitungen und Strommasten umfassen, da in der Gruppe der heranwachsenden Jugendlichen Hochspannungsunfälle besonders prävalent sind [48, 52, 55]. Dies könnte am ehesten durch Lehreinheiten in Bildungseinrichtungen verwirklicht werden.

## 6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit erfolgte eine retrospektive Analyse strominduzierter Verbrennungen und Verletzungen von 215 Fällen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, die über den Zeitraum von Januar 2015 bis Dezember 2018 im Verbrennungsregister dokumentiert wurden. Es erfolgte eine Charakterisierung der Fälle sowie die Beurteilung des Outcomes von stromverletzten Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen. Zudem wurde eine altersabhängige und spannungsabhängige Subgruppenanalyse durchgeführt.

Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse dieser Studie aufgeführt:

- In den Analysen konnte festgestellt werden, dass Hochspannungsverletzte signifikant höhere Werte des Verbrennungsausmaßes aufwiesen als Niederspannungsverletzte. Dies war sowohl bei den Kindern als auch bei den Erwachsenen der Fall. Das Verbrennungsausmaß bei den Niederspannungsverletzten betrug nur ca. 2 %, wohingegen hochspannungsverletzte Erwachsene eine VKOF von ca. 32 % und hochspannungsverletzte Kinder von ca. 52 % aufwiesen. Dies kommt dadurch zustande, dass höhere Voltzahlen durch die proportional höhere Wärmeentwicklung einen stärkeren Gewebeschaden hinterlassen als niedrigere Voltzahlen.
- Neben einem hohen Verbrennungsausmaß zeigte sich ebenfalls, dass Hochspannungsverletzte tiefere Verbrennungen aufwiesen als Niederspannungsverletzte. Dies betraf sowohl Verbrennungen des Grades 2a, 2b als auch Verbrennungen 3. Grades.
- Insbesondere in der Hochspannungsgruppe zeigte sich, dass das Verbrennungsausmaß sowie der Anteil drittgradiger Verbrennungen bei den Kindern signifikant höher war als bei den Erwachsenen. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Kinderhaut deutlich zarter und empfindlicher ist als die Erwachsenenhaut und die hohen Temperaturen deshalb dazu führen, dass die Kinderhaut deutlich stärkere Schäden erleidet.
- Beim Vergleich zwischen Hochspannungsverletzungen und Niederspannungsverletzungen ließen sich in der Gruppe der Hochspannungsverletzungen signifikant höhere Werte hinsichtlich des Verbrennungsausmaßes, der Verbrennungstiefe, der Verweildauer, der Anzahl der durchgeführten Operationen, der Komplikationen sowie der Mortalität bestimmen.
- In unserem Patientenkollektiv verstarben insgesamt 13 Patienten (6%). Davon waren 2 Kinder und 11 Erwachsene. Alle 13 Todesfälle wurden durch Hochspannungsverletzungen verursacht. Signifikante Einflussfaktoren auf die Mortalität von Stromverletzten waren dabei eine Hypothermie des Patienten zum

Aufnahmezeitpunkt, ein hohes Ausmaß der verbrannten Körperoberfläche, ein hohes Ausmaß drittgradiger Verbrennungen sowie Verletzungen infolge von Lichtbögen.

Als Fazit dieser Studie lässt sich schließen, dass Hochspannungsverletzte eine höhere Morbidität und Mortalität im Vergleich zu Niederspannungsverletzten aufwiesen. Außerdem konnte beobachtet werden, dass Kinder großflächigere und tiefere Verbrennungen und Verletzungen im Vergleich zu Erwachsenen zeigten.

Die Charakterisierung dieser Fälle ist wesentlich, um Präventivmaßnahmen vorzunehmen und fatale Verletzungen durch Verbesserung der Sicherheitsstandards auf längere Sicht zu vermeiden.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Würfel P. Unter Strom. 2 ed. p.1-5; Heidelberg, Deutschland: Springer; 2015.
2. Robinson M, Seward PN. Electrical and lightning injuries in children. *Pediatric emergency care*. 1986;2(3):186-90.
3. Koumbourlis AC. Electrical injuries. *Critical care medicine*. 2002;30(11):424-30.
4. Sander F, Hartmann B. Akut- und Erstversorgung von Brandverletzten. *Notfall & Rettungsmedizin*. 2015;18(6):529-43.
5. Koppenberg J, Taeger K. Stromunfälle. *Notfall & Rettungsmedizin*. 2001;4(4):283-98.
6. Haberkern M, Martinolli L. Notfall-Management bei Elektrounfällen. *ZFA-Zeitschrift für Allgemeinmedizin*. 2008;84(06):246-51.
7. Thamm OC, Königs I, Lefering R. Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin e. V. (DGv). Jahresbericht 2019. Zugriff am: 02.03.2021. URL: [https://verbrennungsmedizin.de/files/dgv\\_files/pdf/jahresbericht/Jahresbericht%20VR%202019%20gesamt.pdf](https://verbrennungsmedizin.de/files/dgv_files/pdf/jahresbericht/Jahresbericht%20VR%202019%20gesamt.pdf). 2019.
8. Günal B, Sokolovski F, Neu N, Schwabegger AH, König TT, Engel V, et al. High-Voltage Injuries by Contact With Overhead Lines: Case Reports of Two Young Girls. *Journal of Burn Care & Research*. 2021.
9. Möller M, Bisgwa F, Partecke B. Elektrotrauma. *Trauma und Berufskrankheit*. 2005;7(4):310-3.
10. Handschin AE, Jung FJ, Guggenheim M, Moser V, Wedler V, Contaldo C, et al. Die chirurgische Behandlung von Hochspannungsverletzungen. *Handchir Mikrochir Plast Chir*. 2007;39(5):345-9.
11. Lumenta DB, Kamolz LP, Frey M. Stromverletzungen. Verbrennungen. Wien: Springer; 2009. p. 195-208.
12. Kym D, Seo DK, Hur GY, Lee JW. Epidemiology of electrical injury: Differences between low- and high-voltage electrical injuries during a 7-year study period in South Korea. *Scandinavian Journal of Surgery*. 2014;104:108-14.
13. Spelten O, Wetsch W, Hinkelbein J. Präklinische Versorgung einer lichtbogenbedingten schweren Verbrennung an einer Bahnüberleitung. *Der Unfallchirurg*. 2013;116(9):847-53.
14. Backhaus R, Kirzinger L, Platen S, Kreuzer P, Kleiter I, Lürding R, et al. Blitzschlagverletzungen. *Klinische Neurophysiologie*. 2016;47(02):78-84.
15. Bartsch A. Strom- und Blitzunfall. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-46523-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46523-3_4). Weiterbildung Notfallmedizin. Berlin, Heidelberg: Springer; 2015. p. 37-44.

16. Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin. Leitlinie „Behandlung thermischer Verletzungen des Erwachsenen“ - S2k - AWMF-Registernummer: 044-001. Zitiert am: 20.12.2022. Gültig bis: 30.06.2023. URL: [https://register.awmf.org/assets/guidelines/044-001\\_S2k\\_Behandlung-thermischer-Verletzungen-des-Erwachsenen\\_2021-07.pdf](https://register.awmf.org/assets/guidelines/044-001_S2k_Behandlung-thermischer-Verletzungen-des-Erwachsenen_2021-07.pdf). AWMF. 2021.
17. Lederer W, Kroesen G. Notfallmedizinische Versorgung von Blitz- und Stromschlagverletzungen. Der Anaesthesist. 2005;54(11):1120-9.
18. Glatstein MM, Ayalon I, Miller E, Scolnik D. Pediatric Electrical Burn Injuries: Experience of a Large Tertiary Care Hospital and a Review of Electrical Injury. Pediatric Emergency Care. 2013;29:737-40.
19. Ten Duis H. Acute electrical burns. Seminars in neurology. 1995;15(4):381-6.
20. Wilkinson C, Wood M. High voltage electric injury. The American Journal of Surgery. 1978;136(6):693-6.
21. Lipový B, Kaloudová Y, Ríhová H, Chaloupková Z, Kempný T, Suchanek I, et al. High voltage electrical injury: an 11-year single center epidemiological study. Annals of burns and fire disasters. 2014;27(2):82-6.
22. Aghakhani K, Heidari M, Tabatabaee SM, Abdolkarimi L. Effect of current pathway on mortality and morbidity in electrical burn patients. Burns. 2015;41(1):172-6.
23. Burke JF, Quinby Jr WC, Bondoc C, McLaughlin E, Trelstad RL. Patterns of high tension electrical injury in children and adolescents and their management. The American Journal of Surgery. 1977;133(4):492-7.
24. Deutsche Gesellschaft für Kinderchirurgie, Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin, Arbeitsgemeinschaft das schwerbrandverletzte Kind, Paulinchen-Initiative für brandverletzte Kinder eV, Deutscher Verband der Ergotherapeuten eV, Bundesinnungsverband für Orthopädietechnik, et al. Leitlinie „zur Behandlung thermischer Verletzungen im Kindesalter (Verbrennung, Verbrühung)“. AWMF-Register Nr. 006/128 Klasse: S2k. Zitiert am: 02.04.2020. Gültig bis: 29.04.2020 (in Überarbeitung). URL: <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/006-128.html>. AWMF. 2015.
25. Tobiasen J, Hiebert JM, Edlich RF. The abbreviated burn severity index. Annals of emergency medicine. 1982;11(5):260-2.
26. Trupkovic T, Giessler G. Das Verbrennungstrauma-Teil 1. Der Anaesthesist. 2008;57(9):898-907.
27. Cooper MA. Emergent care of lightning and electrical injuries. Seminars in neurology. 1995;15(3):268-78.
28. Hohlrieder M, Kaufmann M, Moritz M, Wenzel V. Management der akzidentellen Hypothermie. Der Anaesthesist. 2007;56(8):805-11.

29. Arturson G. Pathophysiology of the burn wound and pharmacological treatment. The Rudi Hermans Lecture, 1995. *Burns*. 1996;22(4):255-74.
30. Pallua N, Machens H, Becker M, Berger A. Chirurgische Prävention der posttraumatischen Sepsis durch Sofortnekrektomie von Verbrennungswunden. *Wahrung des Bestandes, Wandel und Fortschritt der Chirurgie*: Springer; 1996. p. 1144-8.
31. Muehlberger T, Krettek C, Vogt P. Der Stromunfall: Neue Aspekte zu Pathophysiologie und Behandlung. *Der Unfallchirurg*. 2001;104(12):1122-8.
32. Shih JG, Shahrokhi S, Jeschke MG. Review of adult electrical burn injury outcomes worldwide: an analysis of low-voltage vs high-voltage electrical injury. *Journal of Burn Care & Research*. 2017;38(1):293-8.
33. Srivastava S, Kumari H, Singh A, Rai R. Electrical burn injury: a comparison of outcomes of high voltage versus low voltage injury in an Indian scenario. *Annals of burns and fire disasters*. 2018;31(3):174-7.
34. Artz CP. Changing concepts of electrical injury. *The American Journal of Surgery*. 1974;128(5):600-2.
35. Luppä PB, Steimer W. Referenzwerte der wichtigsten Laborparameter. *Die Anästhesiologie*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2019. p. 2279-86.
36. Benad HM. Akutes Nierenversagen in der Intensivmedizin. *Anästh Intensivmed*. 2011;52:757-70.
37. The National Kidney Foundation. CKD-EPI Creatinine Equation (2009) [Webseite]. Zitiert am: 23.01.2022. URL: <https://www.kidney.org/content/ckd-epi-creatinine-equation-2009> 2009 [
38. Pelzer M. Bestimmung der glomerulären Filtrationsrate (GFR) mittels Cystatin C- und Kreatinin basierter Formeln im Vergleich zur 51 Cr-EDTA-Plasma Clearance (Referenzmethode) bei Patienten mit Kopf-Hals Tumoren. Düsseldorf, Deutschland: Universitäts- und Landesbibliothek der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf; 2012. 4-5 p.
39. Duarte CG, Preuss HG. Assessment of renal function—glomerular and tubular. *Clinics in laboratory medicine*. 1993;13(1):33-52.
40. Mehta RL, Kellum JA, Shah SV, Molitoris BA, Ronco C, Warnock DG, et al. Acute Kidney Injury Network: report of an initiative to improve outcomes in acute kidney injury. *Critical care*. 2007;11(2):1-8.
41. Thamm OC, Königs I, Lefering R. Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin e. V. (DGV). Jahresberichte. [Webseite] Zugriff am: 02.03.2021. URL: <https://verbrennungsmedizin.de/verbrennungsregister/jahresberichte>. 2021.
42. Zwiener I, Blettner M, Hommel G. Überlebenszeitanalyse - Teil 15 der Serie zur Bewertung wissenschaftlicher Publikationen. *Deutsches Ärzteblatt*. 2011;108(10):163-9.

43. Ramakrishnan KM, Ramachandran K, Jayaraman V, Mathivanen T. Electrical burns treated in an Indian hospital. *Burns*. 1991;17(6):481-3.
44. Zubair M, Besner G. Pediatric electrical burns: management strategies. *Burns*. 1997;23(5):423-0
45. Kurt A, Yildirim K, Yagmur C, Kelahmetoglu O, Aslan O, Gumus M, et al. Electrical burns: Highlights from a 5-year retrospective analysis. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2016;22(3):278-82.
46. Rai A, Khalil S, Batra P, Gupta SK, Bhattacharya S, Dubey NK, et al. Electrical Injuries in Urban Children in New Delhi. *Pediatr Emer Care*. 2013;29:342-5.
47. Brandão C, Vaz M, Brito I, Ferreira B, Meireles R, Ramos S, et al. Electrical burns: a retrospective analysis over a 10-year period. *Annals of burns and fire disasters*. 2017;30(4):268-71.
48. Lumenta DB, Vierhapper MF, Kamolz LP, Keck M, Frey M. Train surfing and other high voltage trauma: differences in injury-related mechanisms and operative outcomes after fasciotomy, amputation and soft-tissue coverage. *Burns*. 2011;37(8):1427-34.
49. Luce EA, Gottlieb SE. "True" high-tension electrical injuries. *Annals of plastic surgery*. 1984;12(4):321-6.
50. Arnoldo BD, Purdue GF, Kowalske K, Helm PA, Burris A, Hunt JL. Electrical injuries: a 20-year review. *The Journal of burn care & rehabilitation*. 2004;25(6):479-84.
51. Icheva V, Heimberg E. Stromunfälle in der Pädiatrie. *Monatsschrift Kinderheilkunde*. 2015;163(9):918-24.
52. Nguyen BH, MacKay M, Bailey B, Klassen TP. Epidemiology of electrical and lightning related deaths and injuries among Canadian children and youth. *Injury Prevention*. 2004;10(2):122-4.
53. Sternick I, Gomes RD, Serra MC, Radwanski HN, Pitanguy I. "Train surfers": analysis of 23 cases of electrical burns caused by high tension railway overhead cables. *Burns*. 2000;26(5):470-3.
54. Koller J. High-tension electrical-arc-induced thermal burns caused by railway overhead cables. *Burns*. 1991;17(5):411-4.
55. Reichl M, Kay S. Electrical injuries due to railway high tension cables. *Burns*. 1985;11(6):423-6.
56. Celik A, Ergun O, Ozok G. Pediatric electrical injuries: a review of 38 consecutive patients. *J Pediatr Surg*. 2004;39(8):1233-7.
57. Akcan R, Hilal A, Gulmen MK, Cekin N. Childhood deaths due to electrocution in Adana, Turkey. *Acta Paediatr*. 2007;96(3):443-5.

58. Dokov W. Forensic characteristics of suicide by electrocution in Bulgaria. *Journal of forensic sciences*. 2009;54(3):669-71.
59. Byard R, Markopoulos D, Prasad D, Eitzen D, James R, Blackbourne B, et al. Early adolescent suicide: a comparative study. *Journal of clinical forensic medicine*. 2000;7(1):6-9.
60. Zack F, Schau H, Dalchow A, Rock M, Blaas V, Büttner A. Lesions and characteristic injury patterns caused by high-voltage fault arcs. *International journal of legal medicine*. 2020;134(4):1353-9.
61. Byard R, Hanson K, Gilbert J, James R. Death due to electrocution in childhood and early adolescence. *J Paediatr Child Health*. 2003;39:46–8.
62. Das S, Patra AP, Shaha KK, Sistla SC, Jena MK. High-voltage suicidal electrocution with multiple exit wounds. *The American journal of forensic medicine and pathology*. 2013;34(1):34-7.
63. Hinkelbein J, Spelten O, Wetsch W. Blitzschlag und Blitzzunfälle in der präklinischen Notfallmedizin. *Der Unfallchirurg*. 2013;116(1):74-9.
64. Whitcomb D, Martinez JA, Daberkow D. Lightning injuries. *Southern medical journal*. 2002;95(11):1331-5.
65. Hadjiiski O, Dimitrov D. First aid and transportation of burned patients during mass disasters. *The American journal of emergency medicine*. 1996;14(6):613-4.
66. von Heimburg D, Radke A, Wainwright U, Pallua N. Der Einfluss der präklinischen Flüssigkeitssubstitution des Verbrennungspatienten auf Therapie und Verlauf im Schwerverbranntenzentrum. *Aktuelle Traumatologie*. 2001;31(5):194-200.
67. Garcia C, Smith G, Cohen D, Fernandez K. Electrical Injuries in a Pediatric Emergency Department. *Annals of Emergency Medicine*. 1995;26(5):604-8.
68. Ozdel S, Cakici EK, Sayli TR. Pediatric electrical injury in Turkey: Five year retrospective hospital-based study. *Pediatrics International*. 2019;61(11):1155-8.
69. Ellerkamp V. Handlungsempfehlung zur Behandlung thermisch verletzter Kinder. *Monatsschrift Kinderheilkunde*. 2016;164(7):610-2.
70. Eich C, Sinnig M, Guericke H. Akutversorgung des brandverletzten Kindes. *Notfall+ Rettungsmedizin*. 2014;17(2):113-22.
71. McLoughlin E, Joseph MP, Crawford JD. Epidemiology of high-tension electrical injuries in children. *The Journal of Pediatrics*. 1976;89:62-5.
72. Lönnecker S, Schoder V. Hypothermie bei brandverletzten Patienten - Einflüsse der präklinischen Behandlung. *Der Chirurg*. 2001;72(2):164-7.
73. Aloy A. Verbrennung. *Chirurgische Intensivmedizin: Kompendium für die Praxis*. 2007:261-6.

74. Spanholtz TA, Theodorou P, Amini P, Spilker G. Severe burn injuries: acute and long-term treatment. *Deutsches Ärzteblatt International*. 2009;106(38):607.
75. Adams HA, Hartmann B, Lehnhardt M, Mailänder P, Menke H, Reichert B, et al. Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin (DGV). Erste Hilfe bei Brandverletzungen [Webseite]. Letzte Aktualisierung: April 2013. Zugriff am: 21.11.2021. URL: <https://www.verbrennungsmedizin.de/leitlinien-erste-hilfe-brandverletzungen>. 2021.
76. Giessler G, Deb R, Germann G, Sauerbier M. Die Akutversorgung von Brandverletzten. *Der Chirurg*. 2004;75(6):560-7.
77. v Gregory H, Gazyakan E, Germann G, Öhlbauer M. Die Akutversorgung Brandverletzter - Die qualifizierte Erstbehandlung bestimmt den Erfolg der weiteren Therapiemaßnahmen. *Der Klinikarzt*. 2005;34(08/09):241-8.
78. Schneider ME, Plock JA. Verbrennungen. *Swiss Medical Forum*. 2016;16(43):910-5.
79. Hoffmann F. Verbrennungen und Verbrühungen richtig behandeln. *Pädiatrie*. 2018;30(1):57-60.
80. Landsleitner B, Keil J. Verbrennungen und Verbrühungen im Kindesalter. *Medizinische Klinik-Intensivmedizin und Notfallmedizin*. 2015;110(5):346-53.
81. Bischoff A. Rasche und richtige Hilfe für Brandverletzte. *MMW-Fortschritte der Medizin*. 2016;158(7):10-4.
82. Zelt RG, Daniel RK, Ballard PA, Brissette Y, Heroux P. High-voltage electrical injury: chronic wound evolution. *Plastic and reconstructive surgery*. 1988;82(6):1027-41.
83. Rosen CL, Adler JN, Rabban JT, Sethi RK, Arkoff L, Blair JA, et al. Early predictors of myoglobinuria and acute renal failure following electrical injury. *The Journal of emergency medicine*. 1999;17(5):783-9.
84. Tiryaki C, Haksal MC. Comparison of clinical findings in adult and paediatric burn victims. *Nigerian Journal of Clinical Practice*. 2019;22(5):642-7.
85. Tomkins KL, Holland AJ. Electrical burn injuries in children. *Journal of paediatrics and child health*. 2008;44(12):727-30.

## 8 Anhang

### 8.1.1 Unfallursache Lichtbogen

	Unfallursache Lichtbogen	N	Mittelwert	SD	Median	Spannweite	p-Wert
Alter [Jahre]	Nein	43	40,7	18,8	40,7	12,0 - 92,0	<b>0,001</b>
	Ja	31	26,3	12,5	23,0	9,0 - 59,0	
Verbrennungstiefe Grad 2a [%]	Nein	42	8,5	16,4	0,0	0,0 - 90,0	0,623
	Ja	31	6,6	10,9	1,0	0,0 - 39,5	
Verbrennungstiefe Grad 2b [%]	Nein	42	12,4	10,6	10,0	0,0 - 40,0	0,319
	Ja	31	10,4	11,2	7,0	0,0 - 47,0	
Verbrennungstiefe Grad 3 [%]	Nein	42	11,8	15,5	4,0	0,0 - 50,0	<b>0,016</b>
	Ja	31	22,6	23,2	15,0	0,0 - 85,0	
Verbrannte Körperoberfläche [%]	Nein	42	32,6	21,2	28,0	0,0 - 90,0	0,320
	Ja	31	39,7	26,1	40,0	2,5 - 85,0	
Dauer der Zuweisung [Std.]	Nein	35	40,5	171,6	2,2	0,0 - 963,0	0,880
	Ja	30	11,7	45,9	2,2	0,8 - 254,0	
Liegendauer [Std.]	Nein	39	42,3	28,4	43,0	1,0 - 137,0	0,354
	Ja	30	48,6	31,5	45,0	1,0 - 124,0	
ABSI [Punkte]	Nein	42	7,1	2,3	7,0	3,0 - 15,0	0,897
	Ja	31	7,3	2,8	7,0	3,0 - 12,0	
Anzahl der Operationen	Nein	35	5,1	3,8	4,0	0,0 - 17,0	0,263
	Ja	29	6,0	3,7	6,0	0,0 - 14,0	

**Tabelle 24: Häufigkeitstabelle verschiedener Variablen in Abhängigkeit vom Vorliegen eines Lichtbogenunfalls; Ja: Lichtbogenunfall; Nein: Hochspannungsunfall durch direkten Stromkontakt**

## 8.1.2 Körpertemperatur und Durchführung Kaltwassertherapie

	Alter [Jahre]	Temperatur [°C]	Verbrennung Grad 2a [%]	Verbrennung Grad 2b [%]	Verbrennung Grad 3 [%]	VKOF [%]
<b>1</b>	20	36,5	21,0	7,5	45,5	<b>74,0</b>
<b>2</b>	27	35,0	0,0	13,0	50,0	<b>63,0</b>
<b>3</b>	40	-	0,0	40,0	0,0	<b>40,0</b>
<b>4</b>	44	35,4	0,0	20,0	12,0	<b>32,0</b>
<b>5</b>	35	36,3	25,0	0,0	6,0	<b>31,0</b>
<b>6</b>	58	35,5	0,0	31,0	0,0	<b>31,0</b>
<b>7</b>	36	36,5	0,0	27,5	0,0	<b>27,5</b>
<b>8</b>	82	-	9,0	9,0	9,0	<b>27,0</b>
<b>9</b>	29	35,8	2,0	3,0	20,0	<b>25,0</b>
<b>10</b>	48	37,7	0,0	16,0	4,0	<b>20,0</b>
11	23	37,0	0,5	10,5	1,5	12,5
12	20	36,3	8,5	2,5	1,0	12,0
13	41	-	0,0	6,0	2,0	8,0
14	20	36,7	3,5	0,0	3,0	6,5
15	32	34,7	1,0	2,0	2,0	5,0
16	55	38,5	0,0	3,0	2,0	5,0
17	58	36,5	0,0	5,0	0,0	5,0
18	27	37,2	0,0	4,5	0,0	4,5
19	49	37,2	1,5	1,0	0,0	2,5
20	32	37,4	0,0	2,0	0,0	2,0
21	56	36,7	2,0	0,0	0,0	2,0
22	20	37,0	0,0	1,0	0,0	1,0
23	22	36,0	1,0	0,0	0,0	1,0
24	24	36,5	0,0	0,0	1,0	1,0
25	25	38,4	0,0	0,0	1,0	1,0
26	37	36,8	1,0	0,0	0,0	1,0
27	59	36,8	0,0	1,0	0,0	1,0
28	24	37,0	0,0	0,5	0,0	0,5
29	57	37,4	0,0	0,5	0,0	0,5
30	50	36,5	0,0	0,0	0,2	0,2
31	25	37,0	-	-	-	-

**Tabelle 25: Erwachsene mit durchgeführter Kaltwassertherapie. Bei den hervorgehobenen Markierungen wären Kühlungsmaßnahmen nach den aktuellen Leitlinien kontraindiziert.**

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater für die Überlassung dieses interessanten Promotionsthemas und für die Ermöglichung dieser Arbeit. Seine Motivation, freundliche und geduldige Unterstützung sowie seine ständige Diskussions- und Hilfsbereitschaft haben zur Vollendung der Arbeit beigetragen. Ebenso möchte ich mich für seine ansteckende Begeisterung für die Wissenschaft bedanken, die mich dazu motiviert hat, auch in Zukunft wissenschaftlich zu arbeiten.

Auch den Mitarbeitern der DGV möchte ich für die Unterstützung und Ermöglichung der Arbeit herzlichst danken. Ich danke für die Bereitstellung der Daten, die Beantwortung meiner Fragen und die Durchsicht der Arbeit.

Ebenfalls danken möchte ich dem IMBEI der Universitätsmedizin Mainz für die Unterstützung bei der Statistik und Ausarbeitung der Ergebnisse.

Des Weiteren gilt mein herzlichster Dank an die Mitarbeiter der Bereichsbibliothek der Universitätsmedizin Mainz für die Hilfestellung bei der Literaturbeschaffung.

Bei meinen Eltern möchte ich mich ganz besonders herzlich bedanken für die uneingeschränkte Unterstützung, die wertvollen Hilfestellungen und Bemühungen, ohne die diese Arbeit so nicht möglich gewesen wäre.

---

## Lebenslauf

