

Aus der Chirurgischen Klinik und Poliklinik - Großhadern
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. Dr. h. c. Karl-Walter Jauch

Kühlung großflächiger Brandwunden mit gesprühter Kühlflüssigkeit

-

eine thermographiegestützte Analyse



Dissertation

Zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

HEIN MARTIN SCHNELL

aus Bad Friedrichshall

2008

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Priv. Doz. Dr. med. Stefan Piltz

Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. Peter Kaudewitz
Priv. Doz. Dr. med. Karl-Georg Kanz

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. Johannes Zaspel

Dekan: Prof. Dr. med. Dietrich Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Januar 2008

Ehrenwörtliche Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, den 01.08.2007

Hein Martin Schnell

Meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Fragestellung	5
3.	Grundlagen	7
3.1.	Literatur - Kühlung von Verbrennungen	7
3.2.	Pathophysiologie der Verbrennung	15
3.3.	Notfalltherapie bei Brandverletzten	16
3.4.	Ziele und Gefahren initialer Kühlmaßnahmen bei Verbrennungen.....	16
3.5.	Physiologie der Thermoregulation.....	17
3.6.	Physikalische Grundlagen der Infrarot-Temperaturmessung	21
3.7.	Hydrogel-Kompressen als alternative Kühlmethode.....	22
4.	Material und Methoden	23
4.1.	Versuchsaufbau	23
4.2.	Thermographie	26
4.3.	Berechnungen unter MATLAB®.....	29
4.4.	Otothermometrie	32
4.5.	Statistische Methoden	32
5.	Ergebnisse	35
5.1.	Thermographie	35
5.2.	Otothermometrie	44
6.	Diskussion	47
6.1.	Initiale Kühlung von Verbrennungen	47
6.2.	Studiendesign	48
6.3.	Thermographie	49
6.4.	Kühlflüssigkeitsmenge.....	50
6.5.	Otothermometrie	51
7.	Zusammenfassung	53
8.	Anhang	57
8.1.	MATLAB®-Programmierung	57
8.2.	SPSS Rohdaten	61
8.3.	Abkürzungen, Sonderzeichen, Einheiten, Konstanten	67
9.	Literaturverzeichnis	69
	Nachwort	75
	Curriculum vitae	77

1. Einleitung

Großflächige Verbrennungen^a gehören zu den schwersten Verletzungen, die einem Menschen widerfahren können. Die Integrität der Haut wird massiv gestört, die Schutzfunktion geht verloren. Komplexe systemische Reaktionen und ein hohes Infektionsrisiko bedeuten oftmals Lebensgefahr für ein Unfallopfer.

Eine der ältesten Therapien ist die Kühlung der Verbrennung, schon Claudius Galen (129-199 n.Ch.) propagierte sie. Heute ist Kühlung erwiesenermaßen eine adäquate Sofortmaßnahme, um das Ausmaß der Verbrennung lokal zu begrenzen, den Schmerz zu lindern und die systemischen Auswirkungen zu minimieren^{4-6,10,11,19,23,25,28,29,31,36}. Eine große Gefahr stellt hierbei jedoch die Unterkühlung für den Patienten dar^{14,24}, insbesondere bei großflächigen Verbrennungen und kleinen Kindern. Eine Unterkühlung wird begünstigt durch zu kaltes Kühlmittel, zu lange Kühlung, unbeabsichtigtes Mitkühlen von unverbrannten Hautbezirken, insuffiziente Wärmeerhaltung und unerfahrene Rettungsteams. Die initiale Kühlung von Schwerbrandverletzten wird deswegen immer wieder kontrovers diskutiert.

Als Faustregel hat sich **Kühlen mit kaltem bis lauwarmem (ca. 15-25°C) Wasser für ca. 5-20 min** etabliert. Auch Verbrennungsorganisationen (z.B. die ISBI – International Society for Burn Injuries¹⁷, die British Burn Association⁷ oder die Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin¹³) empfehlen dies als Erstmaßnahme.

Die Angaben in der einschlägigen Literatur differieren allerdings zum Teil beträchtlich, es finden sich Anweisungen wie „höchstens 5 Minuten“, „mindestens 10 Minuten“¹⁶, „10-20 Minuten“³⁹, „mindestens 15 Minuten“^{17,27} oder „etwa 15-20 Minuten“^{20,26}. Meist wird vor einer drohenden Unterkühlung gewarnt. Diese Empfehlungen sind nicht präzise und konkrete Hinweise, wie man kühlen kann bzw. soll, finden sich äußerst selten. In keiner Arbeit wird eine Angabe zur eingesetzten Flüssigkeitsmenge gemacht. Hinweise zur Applikation sind selten bzw. ungenau. Meist wird darauf hingewiesen, dass die Therapie vom Einzelfall abhängig gemacht werden muss.

^a Der Begriff Verbrennung steht in dieser Arbeit stellvertretend auch für Verbrühungen und andere thermische Verletzungen wie z.B. durch Strom.

Im Jahr 2000 gab es in Deutschland 2500 Schwerbrandverletzte³⁰, davon ca. 900 Kinder. Für die meisten Rettungsteams wird es eine Ausnahmesituation sein, zu einem derartigen Einsatz zu kommen. Das bedeutet, dass nicht die gleiche Routine wie bei anderen Notfällen (z. B. Herzinfarkt) herrscht. Schon eine vermeintlich einfache Frage, wie die der adäquaten Kühlung, kann erhebliche Probleme aufwerfen.

Der neue Ansatz zur Lösung dieser Probleme und zur Verbesserung der Primärversorgung von Schwerbrandverletzten ist es, Kühlflüssigkeit zu sprühen.

Gesprühte Kühlflüssigkeit wird bei Verbrennungen noch nicht verwendet und es findet sich auch keine Literatur hierzu. In vielen anderen Bereichen wird sie jedoch bereits erfolgreich eingesetzt:

- Im Motorsport werden die Kühler der Fahrzeuge mit Wasser besprüht, um die Kühlflüssigkeit darin stärker zu kühlen, als durch den Fahrtwind alleine.
- Feuerwehren löschen mit durch Hochdruck vernebeltem Wasser (CAFS-Verfahren) einen brennenden PKW mit ca. 5l Kühlflüssigkeit. Das herkömmliche Verfahren mit Spritze benötigt min. 250l, oft auch bis zu 500l.
- Bei Laserbehandlungen z.B. in der Zahnmedizin, wird Wasser versprüht, um thermische Nebenwirkungen wie Überhitzen des umliegenden Gewebes, Geruchsentwicklung etc. zu vermeiden.
- Bei der Herstellung von verschiedenen Pulvern wird das Sprühkühlungsprinzip verwendet.
- Verdichter von Gasturbinen können mit hinein gesprühtem Wasser gekühlt werden, was zu einer deutlichen Leistungssteigerung und vermindertem Verschleiß der Turbine führt.

Es ist gängige Praxis zur Kühlung von Verbrennungen Infusionslösungen wie z.B. 0,9%-NaCl oder Vollelektrolytlösungen zu verwenden. Der Kühlungseffekt ist dem von Wasser gleich zu setzen³.

Mit einem simplen Pumpzerstäuber, der mit einem spitzen Dorn in gängige Infusionsbehälter eingebracht wird, sind folgende Vorteile bei Brandopfern zu realisieren:

1. deutlicher Kühleffekt wegen vergrößerter Oberfläche des Wassers, daraus folgt geringerer Flüssigkeitsbedarf für gleiche Kühlwirkung
2. dosierte und gezielte Anwendung ausschließlich auf betroffener Fläche

3. Reduktion der Flüssigkeitsmenge, dadurch mehrere positive Effekte:
 - keine sekundäre Auskühlung des Patienten durch Wasseransammlung auf der Liegefläche
 - keine Auskühlung durch Flüssigkeit, die über unverbranntes Areal rinnt
 - Ressourcenschonung auf Rettungsfahrzeugen und im Katastrophenschutz
 - die gesamte Einsatzsituation verbessert sich, wenn Instrumente, Material und Einsatzkräfte nicht durch viel abfließendes Wasser nass werden
4. Sterilität, weil sterile Flüssigkeit (Infusionslösung) verwendet werden kann und weniger Keime von den Wundrändern eingespült werden
5. einfache Handhabung auch für med. Hilfspersonal / Feuerwehrleute / Laien
6. keine mechanische Belastung der Haut
7. psychologisch günstig für Patient und Helfer, denn der Helfer muss nicht improvisieren, was sich wiederum auf den Patienten überträgt
8. wirtschaftlich: kostengünstig gegenüber Spezialprodukten wie WaterJel®, BurnPack®
 - einfache Bevorratung in RTW/KTW, Feuerwehren, Sanitätsgruppen, Katastrophenschutzeinheiten und BG-Unfallhilfe-Schränke in öffentlichen Einrichtungen wie Theater, Fußballstadien und Gastronomie (insbesondere Küchen) etc.
 - auch in weniger entwickelten Ländern vorstellbar, weil preisgünstig und technisch sehr einfach und wartungsfrei

Ziel ist nicht zwingend eine stärkere lokale Temperaturabnahme, sondern eine Qualitätsverbesserung der Kühlmaßnahmen insgesamt.

Diese Arbeit gliedert sich wie folgt:

Die genaue Fragestellung und die Zielkriterien dieser Studie finden sich in Kapitel 2. In Kapitel 3 werden die für diese Studie relevanten Grundlagen besprochen. Versuchsaufbau, Messmethoden und Berechnungsverfahren werden in Kapitel 4 beschrieben. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt und in Kapitel 6 diskutiert, Kapitel 7 ist eine Zusammenfassung der Studie. Im Anhang finden sich Programme für MATLAB®, die Rohdaten und ein Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Sonderzeichen, Konstanten und Einheiten.

2. Fragestellung

Um zu untersuchen, ob eine Spray-Kühlung die bisherige Methode mit fließendem Medium bei großflächigen Verbrennungen ersetzen kann, bedarf es einer experimentellen Pilotstudie. Ziel ist es, die bekannten und erwiesenen Vorteile der Kühlung zu nutzen und gleichzeitig die damit verbundenen Gefahren zu minimieren.

In dieser Studie wird untersucht, wie sich gesprühte Kühlflüssigkeit im Vergleich zu fließender Kühlflüssigkeit bei der Anwendung auf menschlicher Haut verhält. Die Simulation einer realen Notfallsituation an gesunden Probanden ermöglicht es, das Kühlpotential der beiden Methoden zu testen. Folgende Zielkriterien sind von entscheidender Bedeutung:

- Lokale Temperaturabnahme der Haut
- Homogenität der Kühlung
- Stabilität der Körperkerntemperatur während lokaler Kühlung

Mit Hilfe der Infrarot-Thermographie ist es möglich, absolute Temperaturwerte der Haut bzw. den Temperaturverlauf während einer Kühlbehandlung zu bestimmen. Thermographiebilder ermöglichen eine Beurteilung und Berechnung der Temperaturverteilung, d.h. wie homogen die Kühlung auf die Fläche wirkt. Die Oothermometrie ermöglicht eine Überwachung der Körperkerntemperatur, insbesondere Änderungen können mit ihr frühzeitig dokumentiert werden.

3. Grundlagen

In diesem Kapitel finden sich die für diese Studie relevanten Grundlagen. Es beginnt mit einer Übersicht der entsprechenden Literatur. Es folgen die Unterkapitel Pathophysiologie der Verbrennung, Notfalltherapie bei Brandverletzten, Ziele und Gefahren initialer Kühlmaßnahmen bei Verbrennungen, Physiologie der Thermoregulation, physikalische Grundlagen der infrarot-basierten Temperaturmessung sowie ein Ausblick zu Hydrogel-Kompressen als alternative Kühlmethode.

3.1. Literatur - Kühlung von Verbrennungen

Etliche Studien^{2-6,11,18,19,21,25,29,31,33} haben versucht zu klären, ob Kühlung positive Effekte hat, welche pathophysiologischen Mechanismen verantwortlich sind und welches Kühl-Verfahren am besten ist. Es wurden mehrere Tiermodelle entwickelt.

Davies¹⁰ veröffentlichte 1982 eine umfassende Zusammenstellung bis dato gemachter Untersuchungen hinsichtlich Kühlung von Brandwunden. Die meisten Studien sprechen sich für eine Kühlung aus.

Boykin und Crute⁴ zeigten in einer Versuchsreihe an Meerschweinchen, die durch Eintauchen in 100°C heißes Wasser eine komplette subthorakale Verbrühung (~ 40-50% KOF) erhielten, dass ohne Kühlung die Laktat-Serumkonzentration signifikant anstieg und auch 24 h erhöht blieb, im Vergleich zu einer Kontrollgruppe unverletzter Tiere. Die Gruppe der verbrannten Tiere, die gekühlt wurden, zeigte keine signifikanten Erhöhungen gegenüber der Kontrollgruppe.

Ähnliches Ergebnis für die Histamin-Serumkonzentration, deren Anstieg nach Verbrennung in der ersten halben Stunde durch Kaltwasserbehandlung um mehr als 30% gesenkt werden konnte. In den folgenden acht Stunden lag sie signifikant unter der der unbehandelten Gruppe. Bereits eine Stunde nach Verbrennung war der Unterschied zur Kontrollgruppe nicht mehr signifikant.

Zusätzlich wurde der Einfluss von Kühlung auf wichtige Kreislaufparameter untersucht. Herzzeitvolumen, Blutdruck und totaler peripherer Widerstand wurden 24 Stunden lang nach der Verbrühung gemessen. Ebenso der Hämatokrit, der starken Einfluss auf die Fließeigenschaften des Blutes und damit auf die Mikrozirkulation hat. Das Herzzeitvolumen sowohl der gekühlten als auch ungekühlten Tiere fiel in

den ersten vier Stunden um bis zu 50 %. Jedoch erholten sich die gekühlten Tiere anschließend stetig, wohingegen die ungekühlten auf dem schlechten Niveau verweilten. Der mittlere arterielle Blutdruck war mit Kühlung in den ersten Stunden signifikant höher als ohne Kühlung, wo er um teilweise mehr als 30 % abnahm. Der totale periphere Widerstand nahm zu Beginn bei beiden verbrannten Gruppen deutlich zu, war in der Gruppe der Gekühlten aber nach 24 Stunden wieder auf dem Ausgangsniveau. Der Hämatokrit stieg nur in der ungekühlten Gruppe an, mit Kaltwassertherapie war er nie signifikant von der Kontrollgruppe abgewichen.

In einer weiteren Studie bewiesen **Boykin et al.**^{5,6} an Mäusen (Verbrennung je eines Ohrs, ~ 7% KOF), dass Histamin eine der Hauptrollen bei der Ödembildung spielt. Durch hochdosierte Prämedikation mit Cimetidine (H₂-Rezeptor-Antagonist) konnte, ebenso wie durch Kühlung, eine Ödembildung am kontralateralen unverbrannten Ohr (Abb.3) und in Haut des Abdomens komplett verhindert werden. Gemessen wurde der Wassergehalt in Stanzproben. Die Ödembildung am verbrannten Ohr selbst konnte durch Kühlung allerdings nur verzögert, nicht verhindert werden.

Jacobsson et al.¹⁸ fanden ebenso wie **Blomgren et al.**^{2,3} in ähnlichen Modellen nur bedingt positive Einflüsse der Kühlung hinsichtlich der Entwicklung von Ödemen. Beide Gruppen waren auf der Suche nach der optimalen Kühltemperatur und der optimalen Dauer der Kühlung. Jacobsson konnte für Kühlmitteltemperaturen von 0°C und 10°C eine signifikante Reduktion der Ödembildung nachweisen. Wärmeres Kühlmittel hatte keinen Effekt. Allerdings wurde eine verzögerte Ödembildung nach Beendigung der Kühlung beobachtet. Je länger die Kühlung zuvor dauerte, desto später entwickelte sich das Ödem.

In der Studie von Blomgren wurde zusätzlich untersucht, welchen Einfluss isotonische NaCl-Lösung im Vergleich zu hypoosmolarem Wasser hat. Anhand des Wassergehalts in [g H₂O/100g Gewebe] wurde die Ödembildung quantifiziert. NaCl-Lösung führte in allen Versuchsabschnitten zu geringerer Ödembildung, eine Signifikanz konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Kühlmittel bei 8°C (niedrigste Temperatur in dieser Studie) führte zu einer signifikant geringeren Ödembildung als wärmere Kühlmedien. Diskutiert wurde zusätzlich, ob nicht das Kühlen mit Flüssigkeiten selbst einen erhöhten Wassergehalt des Gewebes bedingen kann, was dann fälschlicherweise als Ödem gemessen wurde.

Die Arbeit von **de Camara et al.**¹¹ zeigt detailliert, welche Strukturen des verbrannten Gewebes besonders leiden und inwiefern Kühlung diese Schäden begrenzt.

24 Meerschweinchen erhielten eine Verbrühung am Rücken (10% KOF, 75°C, 10s) und die Hälfte der Tiere wurde anschließend gekühlt (Beginn 10 min. nach Verbrühung, Eintauchen der Wunde in Eiswasser für 30 min.). Die histologischen Untersuchungen (licht- und elektronenmikroskopisch) von Hautproben nach 2, 8, 24 und 96 Stunden ergaben folgendes:

Nach 2 Stunden waren in der ungekühlten Gruppe Epidermis und Dermis voneinander gelöst, die Kapillaren angeschwollen und undicht. Es entwickelte sich ein Ödem. Die Axone der Hautnerven waren deutlich geschwollen.

In der gekühlten Gruppe hingegen gab es noch viele intakte Kapillaren und demzufolge auch kaum ein Ödem. Myelinisierte Nervenfasern waren nahezu nicht angeschwollen.

Nach 8 Stunden war die Trennung von Epidermis und Dermis ohne Kühlung noch deutlicher, es konnten keine epidermalen Zellen mehr identifiziert werden und die Basalmembran begann zu zerfallen. Die ödematöse Flüssigkeit komprimierte die Kollagenbündel, wodurch diese ihre Periodizität verloren. Die Schäden an den Kapillaren waren so groß, dass Erythrozyten und Thrombozyten aus den Gefäßen ins Gewebe entwichen.

In der behandelten Gruppe waren Dermis und Epidermis nach wie vor adhärent, die Basalmembran glatt und ungebrochen. Zwar nahm auch hier das Ödem zu, jedoch behielt das Kollagen seine Periodizität. Die Kapillaren enthielten Erythrozyten, die Thrombozyten konnten die entstandenen Lücken abdichten.

Die Myelinscheiden der Nerven waren in beiden Gruppen angegriffen, die Axone in der gekühlten Gruppe aber deutlich weniger geschwollen.

Nach 24 Stunden war, in der Gruppe ohne Kühlung, die Auflösung der Basalmembran weiter fortgeschritten und ungleichmäßig verteilte hämorrhagische Areale traten an die Stelle der subepidermalen Kapillarplexus.

Gekühlte Haut verfügte immer noch über eine durchgehende Basalmembran und viele intakte Gefäße.

96 Stunden nach Beginn (ohne Kühlung) löste sich die zerstörte Epidermis ab und hinterließ Zelltrümmer und Erythrozyten als Wundoberfläche. Die gesamte obere Dermis wurde durch nekrotisches Kollagen ersetzt. Es kam zur granulozytären Infiltration der Dermis (Mikroabszesse). Die verbliebene Dermis war durchsetzt mit Blutungen und Zellschrott.

Mit Kühlung hingegen erschien die Haut lichtmikroskopisch nahezu normal. Eine granulozytäre Infiltration zeigte sich gar nicht. Die Epidermis blieb in Kontakt mit der intakten Basalmembran. Die Hautgefäße behielten ihre Lumen und es kam nur zu minimaler Extravasation roter Blutkörperchen.

Die Schäden an den Nerven unterschieden sich nicht nennenswert.

Die Autoren nahmen an, dass durch die Kühlung alle Membranen, insbesondere die Basalmembran, stabilisiert und geschützt werden. Daraus resultiere ein geringeres Ödem. Dies sei einer der pathologischen Hauptfaktoren, denn das Ödem trenne die Wundfläche von den Blutgefäßen und störe somit die Reepithalisierung. Zudem sei es ein idealer Nährboden für die bei Verbrennungen häufigen Infektionen.

Ófeigsson et al.²⁹ kamen zu ganz ähnlichen Ergebnissen. Sie setzten bei Albinoratten Verbrühungen (20% Körperoberfläche - KOF) am Rücken und teilten sie in mehrere Gruppen ein, eine blieb unbehandelt als Kontrolle. Die anderen Gruppen wurden mit unterschiedlichen Temperaturen, unterschiedlich lange, teilweise auch erst bis zu 45 min. zeitverzögert, gekühlt. Anschließend wurde das Heilungsverhalten im Verlauf der folgenden 30 Tage analysiert. Die Wunden wurden makroskopisch und mikroskopisch untersucht. Zusätzlich bekamen einige Tiere zu bestimmten Zeitpunkten radioaktiv markiertes Thymidin oder Prolin injiziert. Die Aufnahme dieser Substanzen an den Wundrändern war ein Indikator für den Metabolismus, der letztlich proportional zur Heilung ist. Durch Probenentnahme konnte die Heilung quantifiziert werden.

Die wichtigsten Ergebnisse:

- In der Kontrollgruppe stieg die Mortalität innerhalb von 21 Tagen auf 60% und nach 30 Tagen auf knapp 100%.
- In der Gruppe, die unmittelbar nach Trauma mit Wasser von 25°C für 30 oder 45 Minuten gekühlt wurde, betrug die Mortalität 0% (Null %). Die Läsionen

waren nahezu geheilt. Nach 30 Tagen waren die Wunden komplett reepithelisiert und Haarwuchs war klar zu erkennen.

- Der klinische Zustand der Tiere innerhalb der Gruppen schwankte stark. Die ungekühlte Gruppe zeigte schlechtere Parameter wohingegen sich die gekühlten Tiere stetig erholten.
- Selbst wenn die Kühlung erst mit einer Verzögerung von 15, 30 oder gar 45 Minuten einsetzte, konnte noch ein positiver Effekt nachgewiesen werden.
- Bei den gekühlten Tieren waren kleine verstreute Areale mit offenbar gesunder Haut im Wundgebiet makroskopisch erkennbar. Von ihnen konnte eine Heilung ausgehen. In der Kontrollgruppe konnte dies nur vom Wundrand her geschehen.
- Die Histologie korrelierte mit diesen Ergebnissen. Nach einer Woche reichten die Schäden in der Kontrolle bis in die Skelettmuskulatur, nach Kühlung bleiben sie oberflächlicher. Ödembildung war bei Kühlung geringer ausgeprägt.
- Die Infektionsrate war nach Kühlung wesentlich niedriger. Wenige auftretende Infektionen waren nur oberflächlich.
- Ein drastischer Unterschied zeigte sich in der zweiten und dritten Woche: ohne Kühlung fanden sich tiefe Ulcera durch die Muskulatur bis zum Peritoneum mit nachfolgender lokaler oder generalisierter Peritonitis. Fast alle Tiere dieser Gruppe entwickelten eine Pneumonie. Die gekühlten Tiere zeigten in dieser Phase entschieden weniger Nekrosen und bereits eine beginnende Reepidermisierung, ausgehend von den oben genannten Arealen, die einer bleibenden Schädigung entgangen waren.
- Die Autoradiographie zeigte bei den gekühlten Wunden vermehrte DNA-Synthese in Epithelzellen und Fibroblasten.

Vo et al.³⁶ untersuchten Autofluoreszenz-Eigenschaften verbrannter und nicht verbrannter Haut mittels „Fiber Optic Confocal Imaging“ (FOCI). Die Abschätzung der Verbrennungstiefe spielt in der Behandlung und Prognose eine wichtige Rolle. Von FOCI erhofften sich die Autoren die Verbrennungstiefe nicht-invasiv in vivo besser abschätzen zu können. Verbrannte Haut, bzw. denaturiertes Kollagen, fluoresziert wenn es blauem Licht bei 488nm ausgesetzt ist, gesunde Haut zeigt diese Eigenschaft nicht. Es wurden haarlose Mäuse verbrannt und anschließend zum Teil

gekühlt. Die Brandwunden wurden mittels klassischer Histologie und FOCl untersucht, wobei sich zeigte, dass die Verbrennungstiefe proportional zur Dicke der Autofluoreszenz emittierenden Schicht ist. Bei den Tieren, die eine Kaltwasserbehandlung erhielten, war die Dicke der fluoreszierenden Schicht (FOCl) und des zerstörten Kollagens (Histologie) geringer.

Raine et al.³¹ stellten weitere Untersuchungen zur Mikrozirkulation im Wundgebiet an. Verwendet wurden Meerschweinchen, mit einer 10%igen Verbrühung am Rücken, die in verschiedene Gruppen eingeteilt wurden. Es gab eine ungekühlte Kontrollgruppe sowie fünf gekühlte Gruppen. Kühlung bedeutete 30 Minuten Tauchbad der verbrannten Region in Eiswasser und begann entweder unmittelbar nach Trauma, oder 10, 20, 30 oder 60 Minuten verzögert. Den Tieren wurde zum einen intraarteriell ein Farbstoff verabreicht und anschließend mikroskopisch in Hautproben aus den Wunden quantitativ bestimmt. Zum anderen wurde ¹³³Xe intradermal in die Wunde injiziert und anschließend mittels Gammazählkammer die Auswasch-Halbwertszeit bestimmt. Die Ergebnisse der beiden Ansätze deckten sich. Die Wunden, die sofort oder bis 30 Minuten später gekühlt wurden, waren schon nach wenigen Stunden erheblich besser perfundiert, als 60 Minuten verspätet oder nicht gekühlte Wunden.

Auch in dieser Studie fiel auf, dass gekühlte Wunden wesentlich besser verheilten. Nach 30 Tagen wiesen diese wieder ein relativ normales Haarwachstum vor, wohingegen die ungekühlten, oder erst nach 60 Minuten gekühlten, Wunden noch lange offen blieben. Ein Haarwachstum stellte sich hier nicht ein.

Jandera et al.¹⁹ untersuchten an Schweinen, ob sich Kühlung durch Hydrogelkompressen von Kühlung durch Kaltwasserkompressen unterscheidet. Diese Hydrogelkompressen enthielten zusätzlich Teebaumöl (Maleleuca), das einen antibiotischen Effekt hat. (WaterJel® ist ein entsprechendes Produkt auf dem deutschen Markt.) Es wurden einerseits die intraepidermalen Temperaturen 2 mm tief in den Wunden während der Kühlung gemessen, aber auch Biopsien entnommen und Abstriche gemacht. Nach 21 Tagen wurden die Wunden zusätzlich von unabhängiger Seite begutachtet. Es konnte kein Unterschied zwischen Wasser- und Hydrogelkühlung nachgewiesen werden. Auch eine um 30 Minuten verzögerte Kühlung führte zur gleichen Heilungsrate. Die Gewebeschäden waren nach Kühlung

lediglich oberflächlich und nach 21 Tagen schon fast geschlossen, wohingegen die ungekühlten nur sehr zögerlich zu heilen begannen. Die mikrobiologischen Untersuchungen führten zu keinen relevanten Unterschieden. Alle Wunden waren hauptsächlich mit Darmflora, Staph. epidermidis und Staph. saprophyticus besiedelt.

Sawada et al.³³ untersuchten den Einfluss einer exzessiven Kühlung, beispielsweise durch einen Eiswürfel, im Vergleich zu moderater Kühlung mit Wasser bei 16°C. Die Auswertung erfolgte makroskopisch und histologisch und kam zu dem Ergebnis, dass Eiskühlung eine zusätzliche Verschlechterung der Wundsituation nach sich zieht. Die Wunde war tiefer, zeigte vermehrte Zellinfiltrationen und teilweise sogar Blasenbildung.

Nguyen et al.²⁸ führten eine retrospektive Studie an Daten von n =695 Kinder durch, die im National Burn Institute in Hanoi/Vietnam behandelt worden waren. Die statistischen Analysen sollten klären, ob ein Zusammenhang zwischen früher Kalt-Wasser-Behandlung und dem Schweregrad der Verbrennung besteht und inwiefern davon der Bedarf von Hauttransplantationen abhängt. Statistisch signifikant war, dass 49 % der Kinder ohne Kühlung eine tiefe Verbrennung hatten, aber nur 33 % derjenigen, die gekühlt wurden. Das sind, im direkten Vergleich, 32 % weniger. Die Wahrscheinlichkeit Haut transplantieren zu müssen war ebenfalls signifikant reduziert, wenn gekühlt wurde.

Lönnecker und Schoder²⁴ werteten Daten von 212 Patienten des Schwerbrandverletzententrums in Hamburg aus. Frage der Studie war, ob Hypothermie bei Brandverletzungen einen Einfluss auf die Letalität und auf die intensivmedizinische Behandlungszeit hat und welche Faktoren zur Hypothermie führen.

Die Letalität betrug 19,8 % bei einem mittleren Abbreviated Burn Severity Index (ABSI) von 6,8. Die Kaltwassertherapie hatte keinen Einfluss auf die Aufnahmetemperatur. 67 % der Patienten waren zum Aufnahmezeitpunkt intubiert und beatmet in Narkose. Diese Patienten waren signifikant kälter als nicht narkotisierte, hatten allerdings auch signifikant ausgedehntere Verbrennungen. Um letzteres zu berücksichtigen bildete man Subpopulationen. Auch unabhängig vom Ausmaß der Verbrennung hatte die Narkose einen signifikanten Einfluss auf die Körpertemperatur. Zwischen Aufnahmetemperatur und Ausdehnung der

Verbrennung bestand lediglich ein moderater linearer Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von $-0,416$. Die Letalität stieg mit zunehmendem Lebensalter, Umfang der Verbrennung und Hypothermie bei Aufnahme.

Die Autoren diskutierten den Einfluss der Narkose. Narkotika beeinträchtigen die zentrale Temperaturregulation, bei Verwendung von Muskelrelaxantien falle zusätzlich die Möglichkeit der Wärmeproduktion durch Kältezittern aus. Eventuell seien die narkotisierten Patienten auch einfach intensiver gekühlt worden, weil die Anzeichen einer Unterkühlung in Narkose nur sehr schwer zu erkennen seien.

Gunning et al. ¹⁴ wiesen nach, dass Hypothermie nach Trauma, gleich welcher Art, mit einer erhöhten Letalität einhergeht. Die Gefahr, eine Hypothermie zu entwickeln, steigt außerdem mit zunehmender Ernsthaftigkeit des Verletzungsmusters.

Die Ergebnisse der oben aufgeführten Untersuchungen gehen teilweise weit auseinander, was mehrere Gründe hat:

- Es wurden verschiedene Tierarten benutzt (Meerschweinchen, Ratten, Hunde, Mäuse, Schweine)
- Die gesetzten Verbrennungen unterscheiden sich stark in Ausdehnung, Lokalisation (z.B. ein Ohr, eine Pfote oder unterschiedlich große Areale auf dem Rücken), Tiefe, Verbrennungsmechanismus (heiße Metallgegenstände, heißes Wasser) und Verbrennungstemperatur, Dauer der Hitzeeinwirkung etc.
- Die angewandten Kühlmaßnahmen variierten in Dauer, Temperatur, Kühlmedium und -methode und Zeitpunkt des Kühlbeginns
- Verschiedene Narkosemittel mit unterschiedlichen Effekten auf Kreislauf und Gesamtorganismus wurden verwendet
- Unterschiedliche Kriterien wurden untersucht (Ödem, Histaminausschüttung, Mortalität, Mikrozirkulation, Kreislaufparameter, hämatologische Veränderungen, Histologie, Heilungsdauer, Reepithelialisierung, Haarwuchs und Narbenbildung)
- verschiedene Methoden der Messung und Analyse wurden angewendet, die Ergebnisse im Anschluss individuell interpretiert

Die Mehrzahl der Studien spricht für eine Kühlung. Insbesondere die aufwendigen histologischen Untersuchungen von de Camara et al.¹¹ und Ófeigsson et al.²⁹ untermauern die Theorie des verminderten Nachbrenneffekts (siehe 3.4.2).

Anzumerken bleibt, dass die aus Tierversuchen gewonnenen Erkenntnisse nicht unkritisch auf den Menschen übertragen werden können. Die Häute verschiedener Spezies haben eventuell verschiedene Eigenschaften und die in diesen Versuchen verwendeten Tiere waren erheblich kleiner als ein Mensch und haben damit ein anderes Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpervolumen. Eventuell spielen bei Tieren noch andere unbekannte Mechanismen eine Rolle. Im Großen und Ganzen darf man aber davon ausgehen, dass die ablaufenden Prozesse ähnlich sind.

3.2. Pathophysiologie der Verbrennung

Durch die Hitzeeinwirkung kommt es zur Denaturierung der Proteine im Gewebe. Zu Beginn, d. h. die ersten zwei bis drei Tage, steht der Verbrennungsschock im Vordergrund.

Dieser entsteht in den ersten Stunden nach der Verbrennung. Verantwortlich dafür sind lokale Schäden der Kapillaren und systemisch wirksame Mediatoren. Dies sind u. a. Histamin, Kinine, Prostaglandine und Zytokine. Ihre Freisetzung führt zu einem generalisierten Wasser-, Kalium-, und Proteinverlust in den Extravasalraum. Hinzu kommt der Flüssigkeitsverlust durch Exsudation über die Wunde. Es folgt eine Hypovolämie mit Hämokonzentration und Hypernatriämie. Stase, erhöhte Viskosität des Blutes und reaktive Vasokonstriktion führen zu Mikrozirkulationsstörungen. Letzte Konsequenz sind ein vermindertes Herzzeitvolumen (bei gleichzeitiger Abnahme der Myokardkontraktilität) und eine daraus resultierende periphere Minderperfusion, die eine metabolische Azidose zur Folge hat. Die Sauerstoffunterversorgung führt auf zellulärer Ebene zum Multiorganversagen. Es entwickelt sich das komplexe Vollbild des Schocks.

Nach 24-72 Stunden gehen die Permeabilitätsstörungen zurück und es kommt zur Rückresorption des Ödems. Hier drohen, je nach Nierenfunktion, Elektrolytentgleisungen und Hypervolämie, die das Herz überfordern können.

Im weiteren Verlauf kann es zu einer Vielzahl von Komplikationen kommen. Hierzu zählt das prärenale Nierenversagen (Schockniere). Auch Tubulusschäden durch Myoglobin- und Toxineinschwämmungen im Sinne einer Crush-Niere werden

beobachtet. Ein ARDS sowie eine sekundäre Pneumonie werden häufig beobachtet. Im Gastrointestinaltrakt kann es, aufgrund der Mukosaschäden durch Minderperfusion, zur Translokation von Darmbakterien ins Blut kommen, was zu einer Sepsis führen kann. Aus Minderperfusion, Elektrolytverschiebung und Sepsis resultieren ZNS-Störungen wie z.B. Bewusstseinsbeeinträchtigung.²⁰

3.3. Notfalltherapie bei Brandverletzten

Großflächige Brandwunden sind schwere, meist lebensbedrohende Verletzungen. Sie fordern vom behandelnden Rettungsteam ein schnelles, komplexes Vorgehen. Dabei stehen Schockbehandlung, Analgesie und Wärmeerhalt im Vordergrund. Schon am Unfallort sollte möglichst steril gearbeitet werden.

Zur Anwendung kommen initial die Kaltwasserbehandlung, eine intensive Infusionstherapie (nach Baxter-Parkland oder Evans), intravenöse Analgesie, Intubationsnarkose, steriles Abdecken der Wunden und wärmeisolierende Rettungsdecken. Es sollte wenn möglich ein Temperaturmonitoring erfolgen.

Von entscheidender Bedeutung ist die Auswahl der Zielklinik. Bei Kindern sowie Patienten mit Gesichts-, Hand- oder Genitalbeteiligung sollte die Indikation zum Helikoptertransfer in eine Klinik mit Spezialabteilung großzügig gestellt werden. Eventuell muss zuvor eine Stabilisierung in einem nahe gelegenen Krankenhaus erfolgen.^{16,20,26,27,39}

3.4. Ziele und Gefahren initialer Kühlmaßnahmen bei Verbrennungen

Analgesie und eine Reduktion des Nachbrenneffekts sind die wesentlichen Ziele der initialen Kühlung. Dem steht eine drohende Unterkühlung gegenüber.^{10,24}

3.4.1. Analgesie

Die schmerzlindernde Wirkung von Kühlmaßnahmen bei Verbrennungen ist allgemein bekannt.

Obwohl objektive Versuche hierzu nur schwer zu gestalten sind, konnte gezeigt werden, dass die Schwelle für Schmerzempfindung an der Haut bei etwa 43°C liegt. Da die Haut eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweist, kann bereits relativ warmes Wasser (20-25°C) einen Abfall der Hauttemperatur unter diese Schmerzschwelle

bewirken. Durch die verminderte Hauttemperatur wird die Reizübertragung der peripheren Nerven vermindert oder gar blockiert, der Schmerz wird somit schnell und deutlich gesenkt¹⁰. Dieser Effekt zeigt sich beispielsweise bei der Verwendung von Eis-Sprays bei Sportverletzungen.

Kühlung ist eine nicht invasive Möglichkeit den Schmerz zu bekämpfen, noch bevor ein venöser Zugang und Analgetika vorhanden sind. In Kombination mit der psychischen Betreuung des Patienten ist Kühlung eine der wesentlichen Komponenten der frühen Schockprophylaxe.

3.4.2. Nachbrenneffekt

Man versteht hierunter die weiter schädigende Wirkung der Hitze, die im Gewebe gespeichert ist. Es kommt zu weiter fortschreitender Denaturierung der Eiweißmoleküle mit den Folgen, die unter 3.2 beschrieben sind. Eine oberflächliche Verbrennung kann hierdurch schnell zu einer Schädigung tieferer Schichten mit Sensibilitätsverlust führen. Stärkere Narbenbildung bedarf mehr chirurgischer Intervention²⁸. Sowohl wegen der starken funktionellen Probleme, wie beispielsweise Kontrakturen, als auch aus kosmetischen Gründen. Ebenso haben Verbrennungsschock und Verbrennungskrankheit pathophysiologisch hier ihren Ursprung. Durch Kühlung kann dieser Nachbrenneffekt unterbunden oder zumindest reduziert werden. Eine höhere Lebensqualität Schwerbrandverletzter, wird nicht zuletzt von der verbliebenen Hautfläche ohne Sensibilitätsstörungen und geringerer Bewegungseinschränkung von Gelenken abhängen.

3.4.3. Unterkühlung

In fast allen einschlägigen Literaturstellen und Empfehlung wird auf die Gefahr einer Unterkühlung durch zu intensives Kühlen hingewiesen^{16,20,27,39}, insbesondere bei Kindern und Kleinkindern. Unterkühlung erhöht die Mortalität²⁴, nicht nur bei Verbrennungen sondern bei allen Traumata¹⁴.

3.5. Physiologie der Thermoregulation

Als homoiothermer Organismus ist der Mensch auf eine nahezu konstante Körpertemperatur (37°C) angewiesen. Diese kann nur bestehen, wenn Wärmebildung und Wärmeabgabe sich im Gleichgewicht befinden.

3.5.1. Thermogenese

Für die Wärmeproduktion in Ruhe sind im Wesentlichen Brust- und Baucheingeweide (ca.40%), das Gehirn (ca.18%) sowie die Muskulatur (ca.25%) verantwortlich. Bei körperlicher Arbeit ändert sich das Verhältnis, unter extremen Bedingungen entsteht bis zu 90% der Wärme in der Muskulatur. Dieses hohe Potential der Wärmebildung wird beim sog. Kältezittern ausgenutzt. Neugeborene und Säuglinge verfügen zusätzlich über die Möglichkeit der zitterfreien Wärmebildung aus braunem Fettgewebe.

3.5.2. Wärmetransport im Inneren

Die im Inneren des Körpers entstandene Wärme muss, damit der Körper nicht überhitzt, an die Oberfläche transportiert werden, damit sie dort abgegeben werden kann. Dieser Transport geschieht zum größten Teil konvektiv via Blutbahn, zu einem kleinen Teil auch durch Konduktion aufgrund der Wärmeleitfähigkeit der Gewebe.

3.5.3. Wärmeabgabe von der Körperoberfläche

Die Wärmeabgabe erfolgt auf verschiedene Arten. Sie ist abhängig vom Temperaturgradienten zwischen Haut und Umgebung, den physikalischen Bedingungen der Umgebung und dem Verhältnis Oberfläche / Volumen des Körpers. Je kleiner ein Lebewesen, desto ungünstiger ist dieses Verhältnis. Deshalb haben Kinder einen höheren spezifischen Energieumsatz (= Grundumsatz / Körpermasse) als Erwachsene.

Wärmeabgabe durch Strahlung: Bei „normalen“ Klimabedingungen (20-25°C, 50% relativer Luftfeuchtigkeit und einer sehr kleinen Windgeschwindigkeit) gibt der Körper 50-60% der gesamten im Stoffwechsel gebildeten Wärme durch Strahlung ab. Hierzu bedarf es keines leitenden Mediums. Entscheidend ist die Temperaturdifferenz zwischen Haut und Gegenständen in der Umgebung (z.B. heißer Ofen, kalte Mauer). Die Temperatur der Haut ist hauptsächlich von der Durchblutung abhängig, somit kann die Wärmeabgabe durch Änderungen der Durchblutung gesteuert werden. Die abgegebene Strahlung liegt zwischen 8 und 10 μm , d. h. im fernen infraroten Bereich.

Wärmeabgabe durch Konduktion (Leitung) und Konvektion: Konduktion findet bei direktem Kontakt eines Mediums mit der Haut statt. Ist dieses Medium die Luft,

so beschränkt sich dieser Effekt auf eine dünne Luftgrenzschicht unmittelbar über der Haut, da die Wärmeleitfähigkeit von unbewegter Luft gering ist. Wasser hat im Vergleich zu Luft eine 25 mal höhere Wärmeleitfähigkeit und die entstehende Grenzschicht ist nur ein Zehntel so dick. Dennoch verliert der Körper in Wasser aufgrund einer starken Vasokonstriktion und folgender Abnahme der Hauttemperatur nur zwei- bis dreimal soviel Wärme wie in Luft gleicher Temperatur. Wind oder ein fließendes Medium transportieren die Wärme dann außerhalb der Luftgrenzschicht ab (Konvektion). Je höher die Geschwindigkeit des Mediums, desto stärker ist dieser Mechanismus. Konduktion und Konvektion machen in Ruhe einen Anteil von ca. 20 % der Gesamtwärmeabgabe aus.

Wärmeabgabe durch Verdunstung (Evaporation): Die Wärmeabgabe kann hier aufgrund der hohen Verdampfungsenergie des Wassers ($2,34 \text{ kJ/cm}^3$) sehr hoch und effektiv sein. Der Mensch verliert bei Raumtemperatur in 24 h ca. einen Liter Wasser über die Haut und die Atmungsorgane. Dies geschieht unbemerkt (Perspiratio insensibilis), ca. 20-30% des täglichen Energiegrundumsatzes werden hierfür benötigt. Bei hohen Temperaturen und körperlicher Arbeit führen die merkbar zunehmende Schweißsekretion und die folgende Verdunstung des Schweißes zu einer stark erhöhten Wärmeabgabe (Perspiratio sensibilis).

Die Evaporation erfolgt entlang eines Gradienten des Wasserdampfdrucks, nicht eines Temperaturgradienten. Deshalb hat die relative Luftfeuchtigkeit hier eine besondere Bedeutung. Je kleiner sie ist, desto steiler ist der Gradient und es kann mehr Wasser pro Zeiteinheit verdunsten. Zunehmende Windgeschwindigkeiten sorgen für einen dauerhaft steilen Gradienten durch stetigen Abtransport feuchter Luft nahe der Haut.

3.5.4. Regulationszentrum und Mechanismen

Das Zentrum des Regelsystems liegt im Hypothalamus. Hier werden die Informationen der Thermorezeptoren der Haut und des Körperinneren zu einem gemeinsamen Ist-Wert verrechnet, welcher mit einem ebenfalls im Hypothalamus gebildeten Soll-Wert verglichen wird. Weichen diese beiden Werte voneinander ab, so werden Regulationsmechanismen in Gang gesetzt, um den Ist-Wert wieder dem Soll-Wert anzugleichen. Sowohl Wärmeproduktion als auch Wärmeabgabe können gesteigert oder reduziert werden.

Die Wärmeproduktion wird durch Aktivierung der Muskulatur gesteigert, bei beginnender Kälteeinwirkung durch Tonuserhöhung, ohne dass ein Zittern beobachtet werden kann. Bei andauernder Kälteexposition kommen phasische Muskelfasern hinzu, was zum Muskelzittern führt. Entsprechend bedingt eine Hemmung der Muskelaktivität einen reduzierten Energieumsatz.

Die Wärmeabgabe wird vegetativ über die Vasomotorik sowie über Schweißsekretion und Pilomotorik (Gänsehaut) geregelt. Letzteres ist eine rudimentäre Form dessen, was bei Tieren als Aufrichten der Federn oder des Fells (Aufplustern) zu beobachten ist. Dadurch wird die isolierende Luftgrenzschicht vergrößert.

3.5.5. Stör- und Einflussgrößen in der Thermoregulation

Die Thermoregulation unterliegt einer Vielzahl an endogenen und exogenen Einflüssen, die Schwankungen der Temperaturen verursachen. Diese Schwankungen kommen teilweise periodisch vor.

Hormone wie Thyroxin und Trijodthyronin sowie Katecholamine erhöhen den Stoffwechsel, wobei mehr Energie umgesetzt wird. Katecholamine wirken gleichzeitig aber auch vasokonstriktorisch in der Haut, wodurch weniger Wärme abgegeben wird. Progesteron erhöht im Menstruationszyklus in der postovulatorischen Hälfte den Soll-Wert, was einen Anstieg der Körperkerntemperatur von ca. $0,5^{\circ}\text{C}$ nach sich zieht. Gewebshormone wie Histamin, Bradykinin, Plasmakinin, Kallikrein sowie Prostaglandine und Leukotriene erhöhen lokal die Durchblutung, Serotonin senkt sie. Ebenso kann ein zircadianer Rhythmus beobachtet werden, mit einem Minimum der Temperatur in der zweiten Nachthälfte. Die Temperatur schwankt im Tagesverlauf um bis zu 1°C . Dies gilt auch im Dauerdunkel ohne Zeitgeber, allerdings ist dann die Periodenlänge im Mittel etwas über 25 Stunden.

Nahrungsaufnahme führt je nach Menge und Temperatur zu Umverteilungen der Blutversorgung. Es kommt durch Darmmotorik und gesteigerte Metabolisierung zu erhöhtem Energieumsatz im Splanchnikusgebiet.

Erkrankungen des Herzkreislaufsystems, Hauterkrankungen, Medikamente und Substanzen wie Koffein und Alkohol nehmen Einfluss auf Körperkern- und Hauttemperatur.

Nicht zuletzt kann auch schwere körperliche Arbeit, wie beispielsweise ein Marathonlauf, die Körpertemperatur kurzfristig um bis zu zwei Grad erhöhen²².

3.6. Physikalische Grundlagen der Infrarot-Temperaturmessung

Alle Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt von $0\text{K} = -273,15^\circ\text{C}$ strahlen Energie in Form elektromagnetische Wellen ab. Das Spektrum S dieser Strahlung ist abhängig von der Temperatur des Körpers. Es wird, in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und der Temperatur T , beschrieben vom PLANCK'schen Strahlungsgesetz:

$$S(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (\text{I})$$

wobei c_1 und c_2 Produkte aus fundamentalen Naturkonstanten sind (siehe Kap. 8.3.). Für eine jede Temperatur T nimmt die Funktion S ein Maximum bei einer bestimmten Wellenlänge λ an. Dieses Maximum verschiebt sich dabei mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen. Dieses Phänomen zeigt sich beispielsweise bei glühendem Metall. Zu Beginn glüht es dunkel rötlich und mit zunehmender Temperatur weißlich hell.

Auch für nicht glühende Körper gilt diese Gesetzmäßigkeit, jedoch steigt auf Grund der niedrigeren Temperatur die Wellenlänge in den so genannten Infrarotbereich, den das menschliche Auge nicht wahrnehmen kann.

Dieser Sachverhalt wird im fernen Infrarotbereich vom WIEN'schen Verschiebungsgesetz beschrieben, welches sich durch Differentiation aus dem PLANCK'schen Strahlungsgesetz ergibt:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = w \quad (\text{II})$$

mit der WIEN'schen Verschiebungskonstante w . Hier zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen T und λ . Somit kann durch Bestimmung der Wellenlänge beim Strahlungsmaximum die Temperatur eines Körpers errechnet werden.

Ohne Einschränkung anwendbar ist dies allerdings nur, wenn es sich bei dem Körper um einen schwarzen Strahler handelt. Unter einem schwarzen Strahler versteht man einen Körper, der alle auftreffende Strahlung zu 100% absorbiert und nichts reflektiert oder transmittiert d.h. hindurch lässt. Alle Nichtmetalle verhalten sich bei

niedrigen Temperaturen näherungsweise wie schwarze Strahler, so auch der menschliche Körper, bzw. die Haut als dessen Oberfläche^{35,37}.

3.7. Hydrogel-Kompressen als alternative Kühlmethode

Zur Kühlung von Verbrennungswunden gibt es Spezialprodukte wie z.B. Hydrogel-Kompressen (WaterJel®). Die Produktinformation gibt an, dass die Hitze lokal in das Gel abgeleitet werde, dabei aber keine Unterkühlungsgefahr entstehe. Wie gleichzeitig Wärme lokal abgeführt und dabei ein systemischer Temperaturverlust absolut ausgeschlossen werden kann, wird leider nicht logisch und physikalisch fundiert erläutert³⁸.

Einigen dieser Gelprodukte ist meist auch Teebaumöl (Maleleuca) beigesetzt, was eine bakteriostatische Wirkung hat und die gerade bei Brandwunden häufigen Infektionen verhindern soll. Brandwunden gelten jedoch in den ersten 24 h als steril, Infektionen entstehen erst einige Tage später während der Behandlung. Der wirkliche Bedarf eines solchen Zusatzes ist fraglich. Bei Untersuchungen im Tiermodell war die Besiedelung der Brandwunde durch Bakterien, einige Tage nach Trauma, genauso hoch wie nach Wasser-Kühlung. Beide Kühl-Methoden führten zu einer vergleichbar guten Heilung, insbesondere im Vergleich zu ungekühlten Wunden¹⁹.

Diese Produkte sind sehr teuer und haben zudem auch nur eine begrenzte Haltbarkeit, deshalb sind sie für die Bevorratung gerade in der Katastrophenmedizin weniger geeignet.

4. Material und Methoden

4.1. Versuchsaufbau

4.1.1. Ansatz

An gesunden Probanden wurde an zwei verschiedenen Tagen eine 15-minütige Kühlung der Vorderseite beider Beine durchgeführt, wie sie auch bei einer entsprechenden Verbrennung durchgeführt würde. Das Areal entspricht ca. 18 % der Körperoberfläche gemäß der „Neuner-Regel“ (nach WALLACE). An einem Termin erfolgte die Kühlung mit fünf Liter fließendem Wasser, am anderen mit einem Liter gesprühtem Wasser.

Gemessen wurden die Temperatur der Hautoberfläche mittels Infrarotwärmebildkamera und die Körperkerntemperatur mittels Infrarot-Ohrthermometer.

4.1.2. Ablauf

Die Probanden nahmen gleich nach Eintreffen und Entkleiden der Beine auf einer Liege Platz. Da frisch entkleidete Haut sich an die neue Umgebungstemperatur anpasst und ihre Temperatur sich während der ersten Minuten nach Entkleiden ändert, wurde 15 Minuten gewartet um eine Akklimatisierung zu ermöglichen. Zudem wurde dadurch eine entspannte Atmosphäre geschaffen, da auch emotionale Anspannung, Aufregung und Unruhe über vaso-aktive Reflexe (Sympathicus) die Hauttemperatur beeinflussen. In dieser Zeit wurden Alter, Größe und Gewicht erfragt und auf einem anonymen Studienprotokoll eingetragen.

Nach Aufnahme des ersten Thermobildes der noch ungekühlten Beine begann die 15-minütige Kühlphase. Während der Kühlphase wurde nach jeder Minute ein weiteres Bild aufgenommen. Hierzu war es nötig, die Kühlung für ca. fünf Sekunden zu unterbrechen, um ein störungsfreies Bild zu bekommen. Parallel zu jedem Bild wurde die Körperkerntemperatur im linken Ohr gemessen und protokolliert.

Alle Messungen und alle Kühlmaßnahmen wurden stets von der gleichen Person auf die gleiche Art und Weise durchgeführt, um die Bias gering zu halten.

4.1.3. Probanden

An der Studie nahmen 53 gesunde Probanden teil, davon 25 (47,2 %) weiblich, 28 (52,8 %) männlich. Das Durchschnittsalter betrug 25,4 Jahre (20 bis 30 Jahre). Die durchschnittliche Größe betrug 1,78 m (1,59 m bis 1,97 m), das Gewicht im Mittel 71 kg (50 kg bis 97 kg) und der BMI 22,5 (17,0 bis 30,8). Die mittlere Körperoberfläche (nach DUBOIS) betrug 1,88m² (1,53m² bis 2,28m²).

Dieses Kollektiv wurde gebildet aus gesunden Studenten der Ludwig-Maximilians-Universität München.

4.1.4. Ausschlusskriterien

Es wurden ausschließlich gesunde Probanden in die Studie mit einbezogen, insbesondere durfte keines der folgenden Ausschlusskriterien vorliegen:

- Verletzungen und Erkrankungen der Haut und des Bewegungsapparats, insbesondere der unteren Extremität
- Schwangerschaft
- Infektionen aller Art
- Erkrankungen und Anomalien im HNO-Bereich
- Erkrankungen wie z.B. Diabetes mellitus, rheumatische Erkrankungen, Polyneuropathien und Durchblutungsstörungen
- Medikamenteneinnahme von vasoaktiven, die Durchblutung beeinflussenden oder direkt das Nervensystem beeinflussenden Substanzen
- Erkrankungen, die grundsätzlich einer Teilnahme an einer klinischen Studie entgegenstehen.

4.1.5. Untersuchungsraum

Als Untersuchungsraum diente ein fensterloser, gekachelter ca. 10 m² großer und ca. 2,80 m hoher Raum im Klinikum München Großhadern, in welchem die Temperatur konstant zwischen 22° und 23° C. betrug. Dichte Türen minimierten die Zugluft auf ein Minimum. Als Lichtquelle dienten zwei Leuchtstoffröhren an der Decke, die als Infrarotstrahlungsquelle, im Gegensatz zu normalen Glühbirnen, vernachlässigt werden können. Ein Abfluss am Boden in der Mitte des Raumes ermöglichte ein Trockenhalten des Raumes über den gesamten Zeitraum der Studie.

Im Untersuchungsraum befand sich außer den Messinstrumenten lediglich eine Notfalltrage der Marke Ferno®, auf der die Probanden während des Versuchs lagen.

4.1.6. Kühlflüssigkeit

Gekühlt wurde ausschließlich mit Trinkwasser, welches einige Stunden zuvor im Untersuchungsraum gelagert wurde. Somit war die Temperatur des Wassers ebenfalls konstant zwischen 22° und 23° C. Um eine feste Relation zu haben, wurden für die Kühlung mit fließendem Wasser fünf Liter und für die Spray-Kühlung ein Liter als Volumen festgesetzt.

Die Menge für Spray-Kühlung ergibt sich aus der Überlegung, dass die Menge der eingesetzten Flüssigkeit durch den Sprühkopf und die Frequenz des Sprühens begrenzt wird. Mehr als drei Pumpvorgänge pro Sekunde sind über mehrere Minuten praktisch unmöglich, weil bei dieser Frequenz schnell eine muskuläre Ermüdung im Unterarm des Anwenders eintritt. Bei Austriebsmengen von 1-1,5 ml/Sprühvorgang und einer Sprüh-Frequenz von max. 2/s ist eine Gesamtbilanz >200 ml/min sehr schwer zu erreichen. Die Menge für Kühlung mit fließendem Wasser mag willkürlich erscheinen, entspricht aber realen Bedingungen (siehe auch 6.2.).

Jedoch kann eine Flasche mit einem Liter Inhalt binnen weniger Sekunden ausgeschüttet werden. Durch diese automatische Limitierung beim Sprühen sinkt das Hypothermierisiko für den Patienten und auch unerfahrene Helfer kommen nicht in die Situation, die vorhandene Kühlflüssigkeit zu schnell zu verbrauchen.

Kühlung mit fließendem Wasser

Über einen Zeitraum von 15 min. wurden fünf Liter Wasser gleichmäßig über beide Beine des Probanden gegossen. Hierzu wurden fünf Plastikflaschen zu je einem Liter verwendet. Das entspricht einem Verbrauch von 333 ml/min. Es wurde auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung geachtet.

Kühlung mit gesprühtem Wasser

Über einen Zeitraum von 15 min. wurde ein Liter Wasser gleichmäßig über beide Beine des Probanden gesprüht. Der Sprühnebel wurde durch einen handelsüblichen Pumpzerstäuber Modell „VELA“ der Marke Sprayplast® (Italien) erzeugt, der einfach auf die Plastikflaschen geschraubt werden konnte, die auch bei der Kühlung mit fließendem Wasser verwendet wurden. Bei jedem Sprühstoß liefert dieser Pumpzerstäuber eine Flüssigkeitsmenge von 1,3 ml. Bei 51 Sprühstößen pro Minute ergibt sich ein Verbrauch von 66 ml/min. Auch hier wurde eine möglichst gleichmäßige Verteilung angestrebt.

4.2. Thermographie

4.2.1. Thermographiesystem

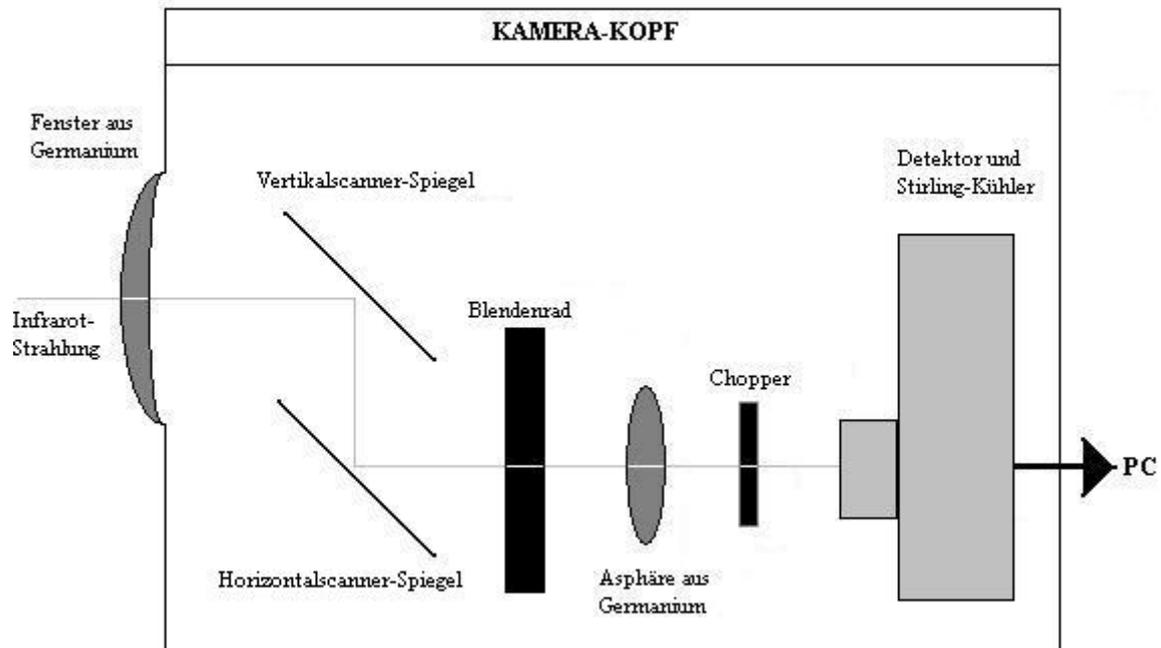


Abbildung 4-1: schematische Darstellung des Kamerakopfes (nach Handbuch VARIOSCAN 3011-ST)

Zur Anwendung kam eine Wärmebildkamera vom Typ VARIOSCAN 3011-ST (JENOPTIK, Jena). Hierbei handelt es sich um ein so genanntes Slow Scan Thermographie System.

Kernstück des Systems ist ein gekühlter Ein-Element Detektorchip aus dem ternären Halbleitermaterial Cadmium-Quecksilber-Tellurid mit einer Kantenlänge von $100 \times 100 \mu\text{m}$. Auftreffende Infrarotstrahlung aktiviert Elektronen im Halbleitermaterial (Innerer Photoeffekt) und das entstehende elektrische Signal wird von der Auswerteelektronik weiterverarbeitet. Die Funktionalität des Detektors ist generell nur gegeben, wenn die Eigenaktivität der Elektronen stark reduziert wird. Dies geschieht durch eine Kühlung des Detektors auf -196°C (77 K) mittels eines Stirling-Motors.

Die Kamera arbeitet nach dem Prinzip des objektseitigen Scannings. Das Scanner-Spiegel-System realisiert die rasterförmige Abtastung des Objekts. Der Horizontalspiegel schwingt um seine vertikal stehende Achse und erfasst die Breite des Bildes. Er arbeitet als Resonanzschwinger, der, mit einer Frequenz von 135 Hz, pro Zeile (Vor- und Rücklauf) 300 Bildpunkte abtastet. Der Vertikalscanner generiert aus den gewonnenen Zeilen das Bild, indem er sich um seine horizontale Mittelachse bewegt und das Bild vertikal erfasst. Dabei werden 200 Zeilen aufgenommen, wodurch eine Auflösung von 300 x 200 Pixel resultiert. Für jedes dieser 60 000 Pixel liefert das System einen Strahlungswert, aus dem, durch die Kalibrierung des Systems, ein absoluter Temperaturwert berechnet wird. Der Scan-Vorgang für ein komplettes Bild dauert ca. 0,8 Sekunden.

Zwischen der abbildenden Optik und dem Detektor befindet sich ein Blendenrad. Blenden mit verschiedenen Durchmessern werden automatisch für die Temperaturmessbereiche oberhalb 100 °C in den Strahlengang eingebracht. Eine Asphäre fokussiert die Strahlen auf den Detektor. Zwischen zwei Scanvorgängen wird ein Referenzstrahler (Chopper) in den Strahlengang eingeschwenkt. Seine Temperatur wird gleichzeitig über ein Thermoelement gemessen. Somit findet eine ständige Kalibrierung statt, die eine hohe Messstabilität des Systems sichert.

Die VARIOSCAN 3011-ST arbeitet im Wellenlängenbereich von 8 – 12 µm. Das System hat eine sehr hohe thermische Auflösung von 0,03 K bei einer Schwarzstrahlertemperatur von 30°C. Der Temperaturmessbereich liegt zwischen -40°C und +1200°C. Für die durchgeführten Messungen wurde der Kalibrierbereich von -40 bis +100 °C benutzt. Die Einstellung der Objektentfernungen von 0,2 m bis unendlich wird durch die axiale Verschiebung des optischen Systems erreicht.

Über eine ISA-Interface-Karte ist die Kamera an einen IBM-kompatiblen PC angeschlossen. Unter dem Betriebssystem WINDOWS 98® dient die Software VARIOSCAN control (Firma InfraTec, Dresden) sowohl der Steuerung der Kamera, als auch der gleichzeitigen Falschfarbendarstellung am Bildschirm. Zusätzlich ermöglicht VARIOSCAN control durch automatisierte Benennung und Speicherung eine einfache Verwaltung der Bild-Dateien.

4.2.2. Auswertung Thermographie-Bilder

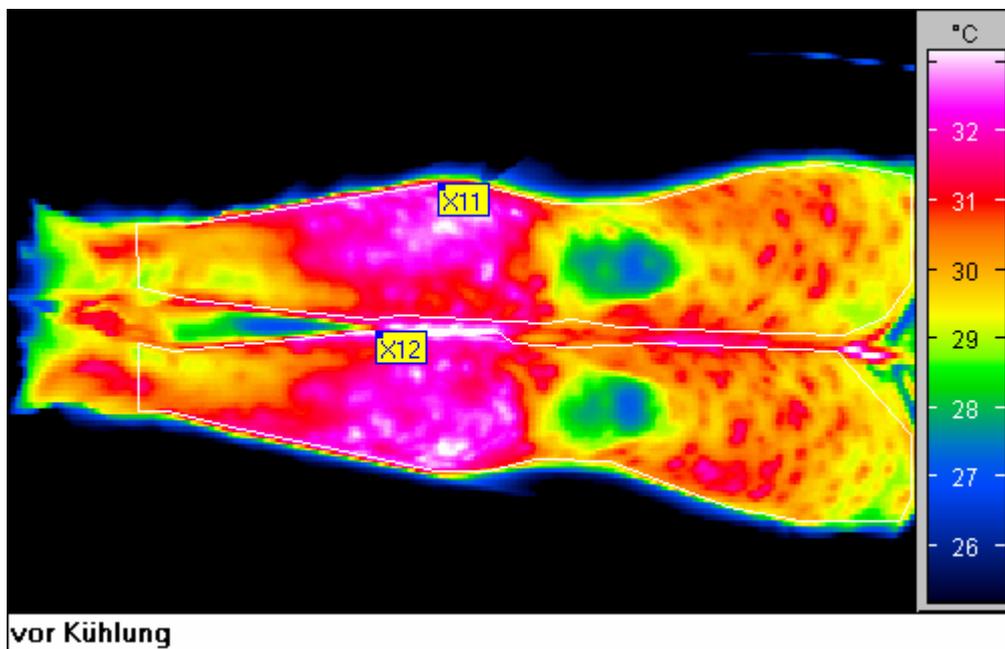


Abbildung 4-2: Thermobild mit Polygonen und Temperaturskala

Die Darstellung der Thermographiebilder erfolgt in der so genannten Falschfarbendarstellung. Dabei werden die Farben in der Reihenfolge schwarz, blau, grün, gelb, rot, weiß für zunehmende Temperaturen angezeigt (siehe Abb. 4-2). Wichtig für die richtige Interpretation dieser Falschfarbenbilder ist, dass die farbliche Auflösung der Temperaturen für jedes Bild individuell eingestellt werden kann. Sowohl Temperaturniveau als auch Spannweite des darzustellenden Temperaturbereichs können variiert werden. Dabei gilt, je kleiner die Spannweite ist, desto höher ist der optische Kontrast, weil stets die gesamte Farbpalette auf die Spannweite bezogen wird. Unterhalb des eingestellten Bereichs ist das Bild schwarz, oberhalb weiß. Es können folglich zwei Bilder nur dann ohne Einschränkung direkt miteinander verglichen werden, wenn alle Einstellungen identisch sind.

Mit der Software IRBIS plus® (Infratec, Dresden) wurden die Bilderserien zuerst gesichtet und auf Kongruenz überprüft, d.h. ob sich der Proband während des Versuches bewegt hat.

Das Programm bietet die Möglichkeit, bestimmte Areale im Bild als Messbereiche zu markieren. Es wurden für jeden Versuchsdurchlauf zwei Polygone eingepasst, die das rechte und das linke Bein von der Umgebung abgrenzten und als Messbereich definierten (Abb.4.2). IRBIS plus gibt für markierte Messbereiche die Durchschnittstemperatur, Minimum, Maximum und die Standardabweichung an. Jedoch ist es nicht möglich, die Inhalte mehrerer Bereiche als Einheit zu betrachten, was im vorliegenden Fall gewünscht war. Deshalb wurde auf die Rohdaten zurückgegriffen, die als Textdatei ausgegeben werden können. Eine solche Datei enthält 60 000 einzelne Temperaturwerte, die dem ursprünglichen Bild entsprechend in Form einer Matrix von 200 Zeilen mit 300 Punkten angeordnet sind.

4.3. Berechnungen unter MATLAB®

Um die große Datenmenge automatisiert zu verarbeiten, wurde MATLAB 6.5® verwendet¹. Es handelt sich hierbei um eine leistungsstarke Software für numerische Mathematik. Die besondere Stärke liegt in der Vektor- und Matrizenrechnung. Zudem bietet es umfangreiche Optionen grafischer Darstellung. (MATLAB-Programme siehe Anhang)

Die Definitionen der Polygone lieferte IRBIS plus mit weiteren Parametern des Bildes in einer ASCII-Datei. Dabei wird das Bild als Koordinatensystem betrachtet und für jeden Eckpunkt der Polygone ein x- und ein y-Wert angegeben. Um diese Koordinaten in MATLAB einlesen zu können, wurden sie zuerst aus der ASCII-Datei extrahiert und dann formatiert in einer txt-Datei gespeichert. In MATLAB wurden die Polygone auf die Bilder bezogen. Alle Punkte außerhalb der Polygone wurden als Not-a-Number (NaN) betrachtet, alle verbleibenden Werte wurden in eine neue Matrix geschrieben. Damit waren die Inhalte der beiden Polygone vereint und der Ausgangspunkt für die weiteren Berechnungen geschaffen.

Erster Schritt für alle weiteren Rechenoperationen war die Berechnung der durchschnittlichen Hauttemperatur in allen Bildern. Als Nächstes wurde für jedes Bild einer Serie die Differenz der Durchschnittstemperatur zum Ausgangswert vor Kühlbeginn bestimmt, als Maß für die Effektivität der Kühlung.

Zur Bestimmung der Homogenität der Kühlung wurde zunächst eine dimensionslose Größe δ definiert, die die Temperaturfluktuationen an jedem Punkt (Pixel i) darstellt.

$$\delta_i = \frac{\Delta T_i}{T_M} \quad (\text{III})$$

Dabei ist T_M die Durchschnittstemperatur und ΔT_i die Temperaturdifferenz der Einzelwerte zur Durchschnittstemperatur. Es wird also an jedem Ort die Temperaturabweichung von der Durchschnittstemperatur berechnet und zur Durchschnittstemperatur normiert. Somit ist δ_i eine allgemeine Größe, die die Fluktuation an jedem Punkt misst und gleichzeitig unabhängig von den physikalischen Einheiten ist.

Aus den Temperaturfluktuationen wird die „root mean square (*rms*)“ gebildet, um global die Homogenität abzuschätzen:

$$rms(\delta) \equiv \sqrt{\langle \delta^2 \rangle} \quad (\text{IV})$$

Dies wird auch als quadratisches Mittel bezeichnet. Die spitzen Klammern stellen das statistische Mittel des Ensembles dar. Ein Ensemble ist eine Menge von Realisierungen, im vorliegenden Fall die Realisierung einer Menge von Messpunkten, die analysiert werden sollen. Da im vorliegenden Fall nur mit einer endlichen Anzahl von Punkten gearbeitet wird, wird nur das Quadrat der einzelnen Temperaturfluktuationen gebildet und die Summe der Quadrate durch die Anzahl der Messwerte (Pixel) n geteilt.

Für die *rms* der Temperaturfluktuationen ergibt sich somit:

$$rms(\delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i - T_M}{T_M} \right)^2}{n}} = \frac{\sigma(T)}{T_M} \quad (\text{V})$$

Mathematisch gesehen setzt man dabei die Standardabweichung ins Verhältnis zum Mittelwert.

Die Standardabweichung ist:

$$\sigma(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_M)^2}{n}} \quad (\text{VI})$$

Der vorgestellte Formalismus ist in den Naturwissenschaften gewöhnlich, um die Fluktuationen von physikalischen Größen zu berechnen.

Als Beispiel im Zusammenhang mit elektromagnetischer Strahlung soll die Kosmische Hintergrundstrahlung (CMBR, cosmic microwave background radiation)^a dienen. Diese hat eine entscheidende Bedeutung in der Kosmologie. Sie ist ein Abdruck des frühen Universums, den die Photonen (Lichtquanten) hinterlassen haben, als das Universum so weit abgekühlt war, dass sich Atomkerne und Elektronen zu Atomen verbinden konnten und dadurch das Weltall durchsichtig wurde.

Die Homogenität der Temperaturfluktuationen des CMBR spielt dabei eine sehr wichtige Rolle, da die Temperaturfluktuationen mit den Dichtefluktuationen im Universum korreliert sind. Das bedeutet, dass die Homogenität für die Temperaturfluktuationen ein Maß für die Homogenität der Dichteverteilung im Universum ist. Eine extrem homogene kosmische Hintergrundstrahlung deutet darauf hin, dass es eine heiße Phase gab, in der das Universum aus einer einzigen Flüssigkeit bestand, zusammengesetzt aus freien Atomkernen, Elementarteilchen und Licht. Die Existenz dieses primordialen Plasmas unterstützt die Urknallhypothese. Das COBE-Experiment (Cosmic-Background-Explorer-Satellit, 1989-1993)^b fand tatsächlich sehr kleine Temperaturfluktuationen ($\text{rms} \sim 10^{-5}$)^c in allen Richtungen im Himmel, also ein extrem isotropes und homogenes Universum. Das Universum ist demnach ein fast perfekter schwarzer Körper mit einer durchschnittlichen Temperatur von 2,725 K \pm 0,002 K. Die neueste CMBR Karte ist vom Satelliten WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) von der NASA (siehe Abbildung 4-3, S. 32).

^aZum ersten Mal von Penzias und Wilson 1965 gemessen. Penzias, A.A. and Wilson, R.W., 1965, *Astrophysical Journal* 142, 419-421 und von Gamow, Ralph Alpher, und Robert Hermann 1949 theoretisch vorhergesagt.

^b4-Year COBE DMR Cosmic Microwave Background Observations: Maps and Basic Results, Bennett et al. *Astro-ph/9601067*.

^cDieser Wert wurde von Peebles theoretisch hergeleitet mit der Annahme von der Existenz Dunkler Materie. Peebles P.J.E., 1982, *Astrophysical Journal* 263, L1-L5

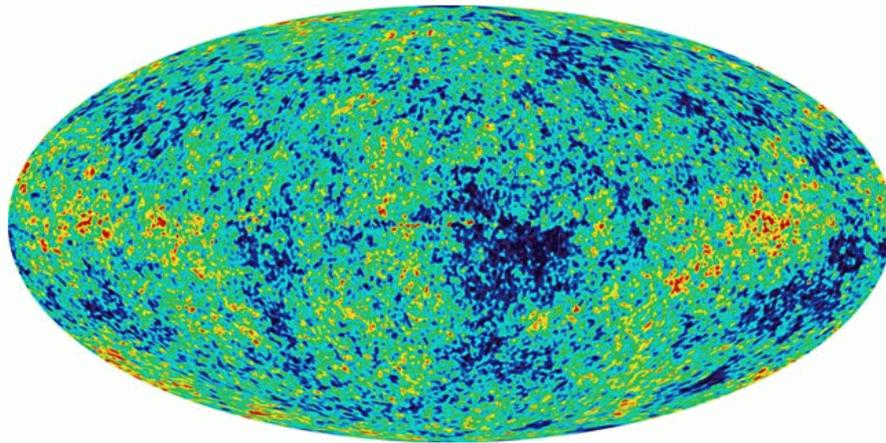


Abbildung 4-3: CMBR Karte des Satelliten WMAP. Die Farben stellen "warme" (rot) und "kältere" (blue) spots dar. Die Ei-Form ist eine Projektion, um den ganzen Himmel abzubilden.

4.4. Oothermometrie

Bei der Oothermometrie wird die Wärmestrahlung des Trommelfells und des Gehörgangs gemessen. Trommelfell und Hypothalamus (Zentrum der Temperaturregulation) haben eine gemeinsame Blutversorgung über die Carotiden und haben deshalb annähernd die gleiche Temperatur.

Infrarot-Ohrthermometer arbeiten auf derselben physikalischen Grundlage wie die Infrarotwärmebildkamera. Die Messung ist schnell und einfach durchzuführen und sehr zuverlässig. Die Methode setzt sich zunehmend auch im klinischen Alltag durch.

Zur Anwendung kam ein Ohrthermometer vom Typ ThermoScan®, IRT 4520 der Marke Braun. Der Messbereich liegt zwischen 34 und 42,2°C, das Gerät ist bei 10-40°C Umgebungstemperatur betriebsbereit. Der Hersteller gibt eine Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$ im Temperaturbereich 35,5 – 42°C an. Unterhalb dieses Bereiches erhöht sich die Ungenauigkeit auf $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

4.5. Statistische Methoden

Die statistische Auswertung wurde in Zusammenarbeit mit dem IBE, Klinikum Großhadern, durchgeführt.

Die Beschreibung der einzelnen Merkmale und Messparameter wurde deskriptiv vorgenommen. Die zu analysierenden Daten wurden in eine SPSS-Datenbank

konvertiert. Zur Überprüfung auf Normalverteilung, wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt. Da die Normalverteilungshypothese (mit $p=0,05$) nicht abgelehnt werden konnte, wurde zur Unterschiedsberechnung der T-Test für gepaarte Stichproben durchgeführt.

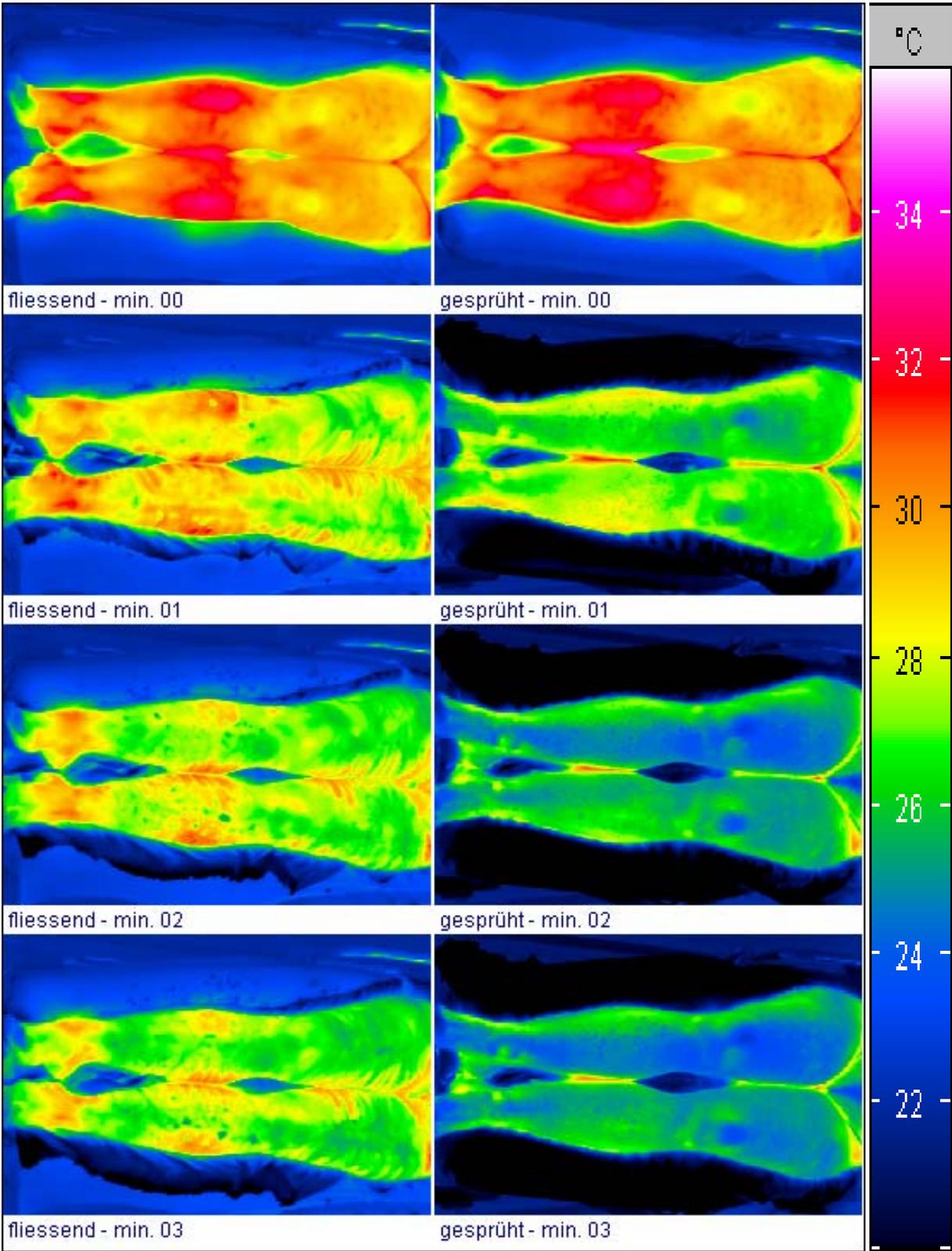
Die wiederholte statistische Auswertung der Messreihen zu den verschiedenen Zeitpunkten stellt multiples Testen am gleichen Datenkörper dar. Daher wird das für die statistische Prüfung zugrunde liegende Signifikanzniveau nach BONFERRONI korrigiert. Das vorgegebene Level (hier $\alpha=0,05$) wird dabei durch die Anzahl der Messungen geteilt. Bei 16 voneinander abhängenden Messungen galt somit $\alpha=0,05/16 = 0,003125$.

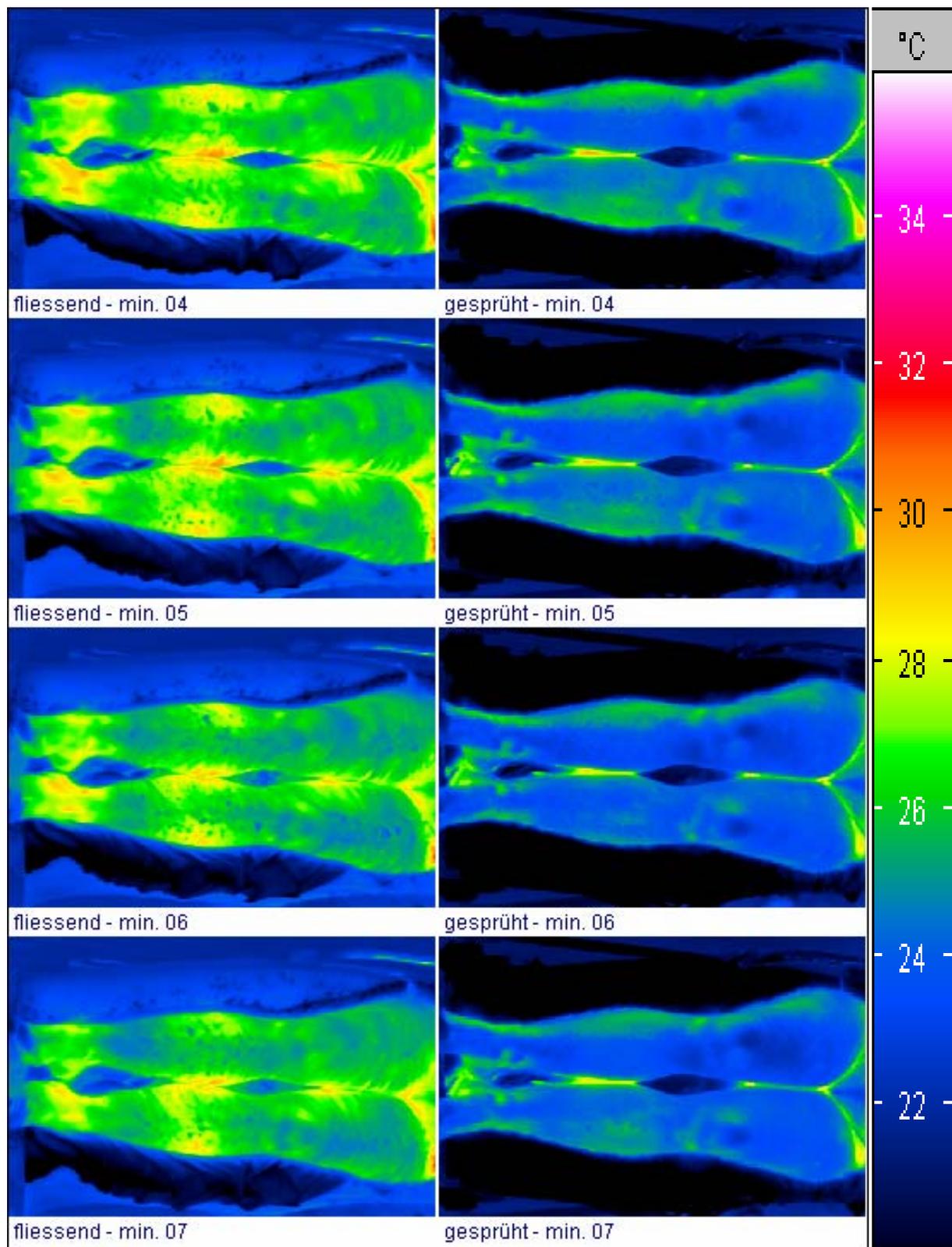
Im Kapitel Ergebnisse werden die bei dieser Auswertung gefundenen Zusammenhänge und Verteilungen dargestellt. Im Anhang finden sich die verwendeten SPSS-Rohdaten.

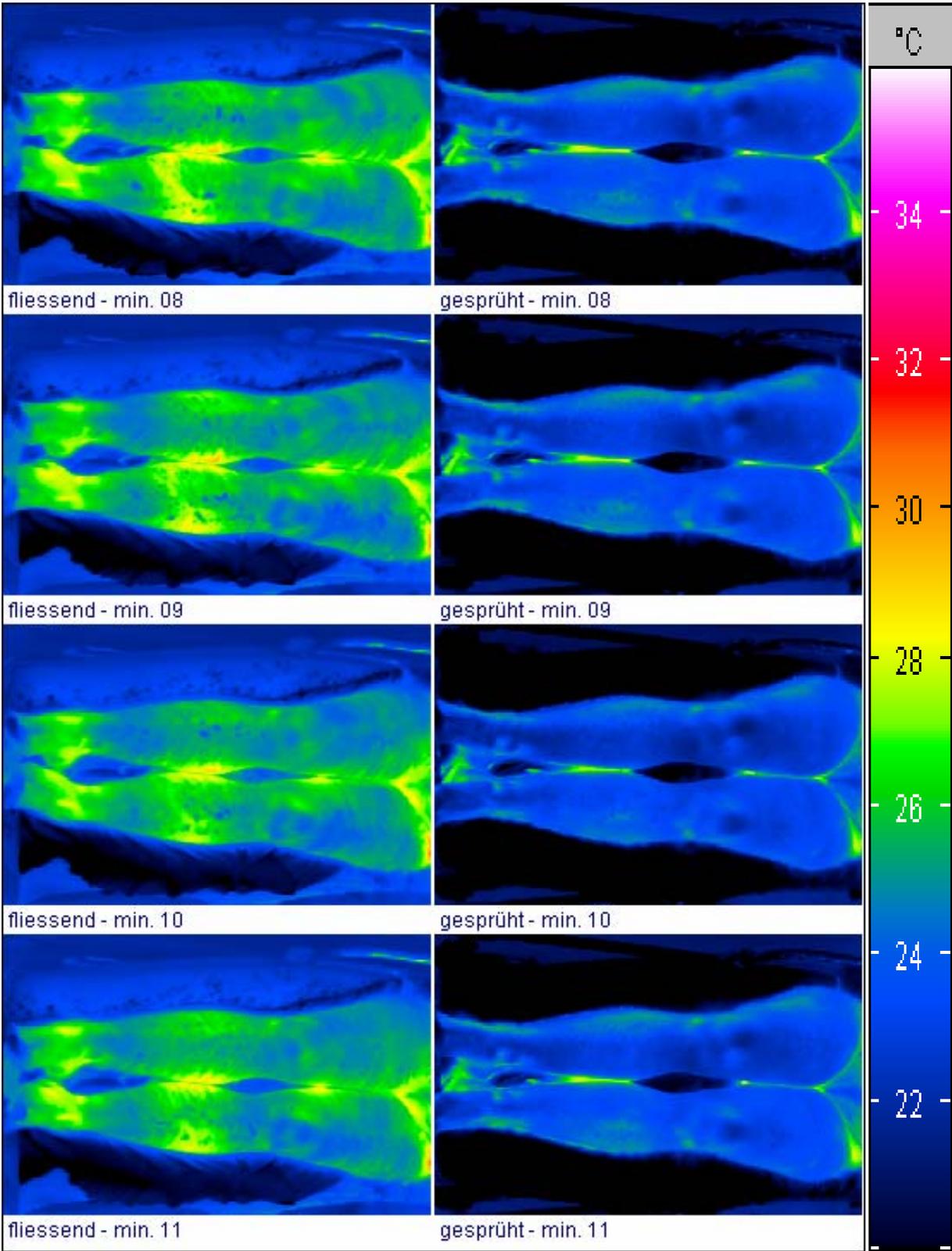
5. Ergebnisse

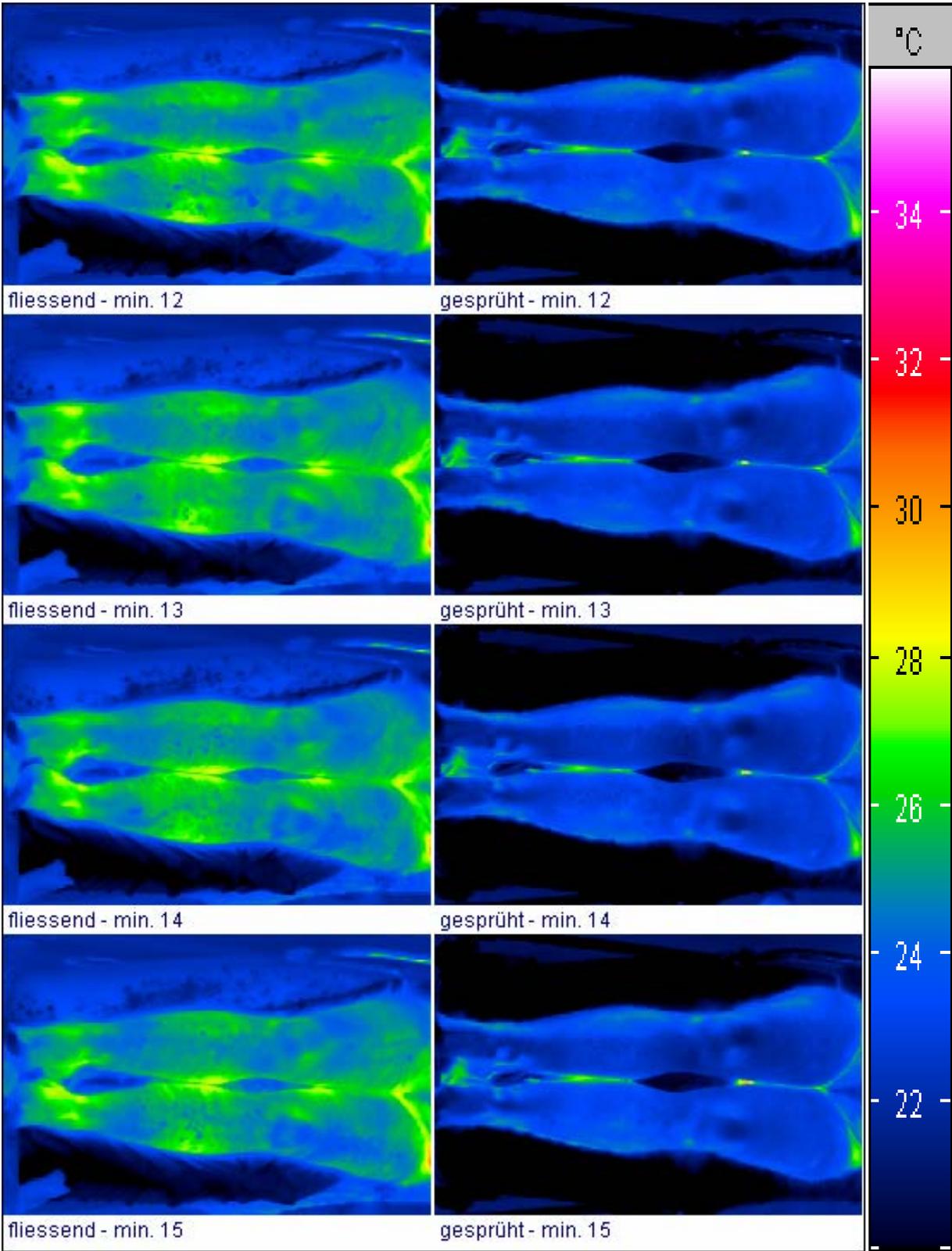
5.1. Thermographie

Die folgenden Seiten zeigen exemplarisch die Thermobildserie einer Probandin in beiden Versuchsdurchläufen. Links wurde mit fließendem Wasser gekühlt, rechts mit dem Pumpzerstäuber. Die farbliche Darstellung der Temperatur ist für alle Bilder identisch, gleiche Farbe bedeutet gleiche Temperatur. Farblich angezeigt wird hier der Bereich von 20 bis 36°C (siehe Farbskala). Man sieht sehr deutlich sowohl die schnellere Temperaturabnahme als auch die gleichmäßigere Temperaturverteilung bei der Kühlung mittels Pumpzerstäuber. Die wesentlichen Änderungen geschehen bis zu Minute sechs.









5.1.1. Temperaturabnahme

Tabelle 5.1. zeigt die durchschnittliche Temperaturabnahme, bezogen auf den Ausgangswert vor Beginn der Kühlung. Die beiden Kühlmethoden wurden zu allen Messzeitpunkten verglichen. Statistische Unterschiede wurden mit dem T-Test für verbundene Stichproben berechnet. Dabei galt $p < 0,003$ als signifikant.

Minute	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
gesprüht	0.00	3.11	4.15	4.81	5.26	5.60	5.82	6.01	6.22	6.35	6.50	6.61	6.74	6.87	6.94	7.08	
Fließend	0.00	1.96	2.78	3.44	3.96	4.24	4.50	4.75	4.89	5.03	5.21	5.30	5.43	5.55	5.59	5.67	
Differenz	0.00	1.15	1.37	1.37	1.30	1.36	1.32	1.26	1.33	1.32	1.29	1.30	1.31	1.32	1.36	1.41	
T-Test p	-	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
		0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Tabelle 5-1: durchschnittliche Temperaturabnahme in °C, n=53

Abbildung 5-1 zeigt die durchschnittliche Temperaturabnahme für beide Kühlmethoden. Man erkennt deutlich den steileren Temperaturabfall sowie die konstant stärkere Kühlung bei Verwendung des Sprays.

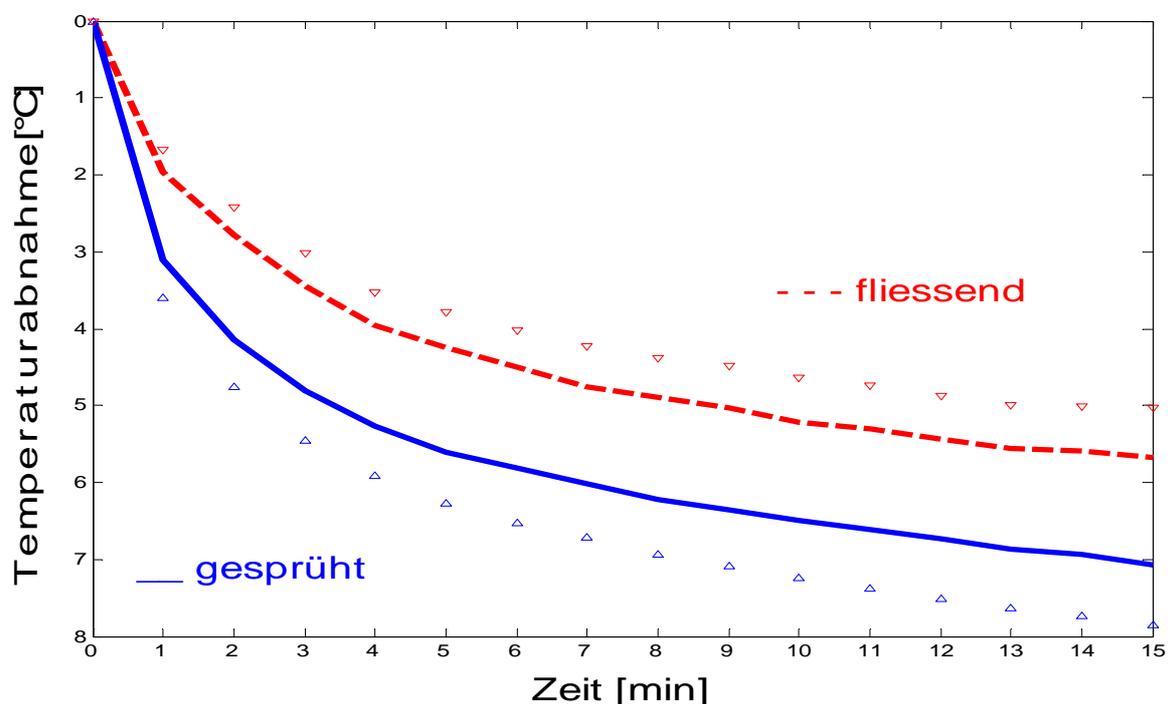


Abbildung 5-1: durchschnittliche Temperaturabnahme beider Kühlmethoden und Standardabweichungen (kleine Dreiecke), n=53

Die Abbildungen 5-2 und 5-3 zeigen die Verläufe der Temperaturabnahme aller Probanden, jeweils für eine Kühlmethode, um die Streuung der Messwerte genauer darzustellen.

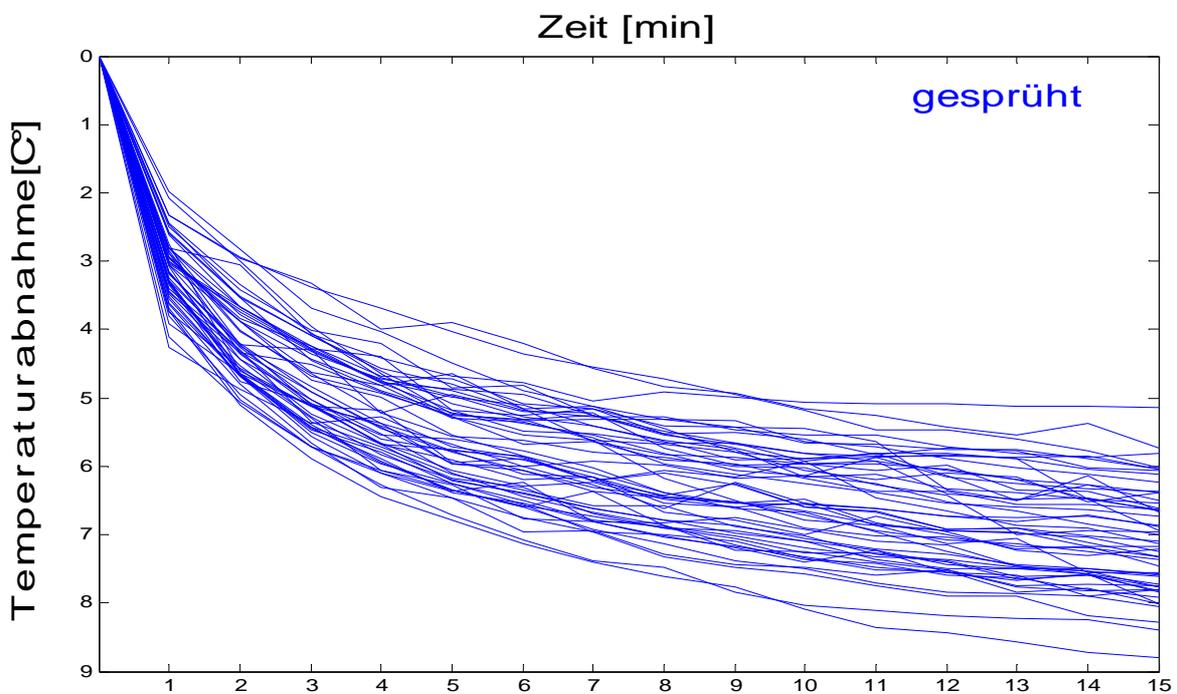
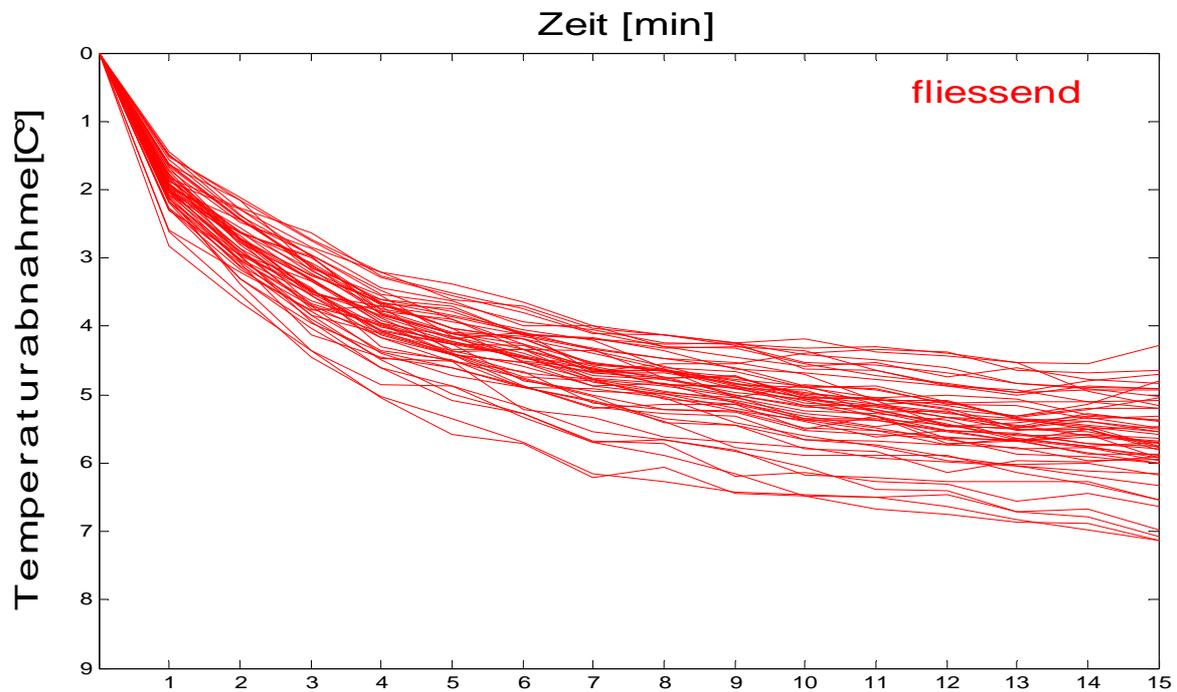


Abbildung 5-2 und 5-3: Verlauf der Temperaturabnahme, n=53

5.1.2. Homogenität - rms

Tabelle 5-2 zeigt die durchschnittliche *rms* für beide Kühlmethoden zu allen Messzeitpunkten. Zur Varianzanalyse wurde der T-Test für verbundene Stichproben durchgeführt. Dabei galt $p < 0,003$ als signifikant, da es sich um wiederholtes Testen an einem Datenkörper handelte (α adjustiert nach BONFERRONI)

Minute	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
gesprüht	3.21	3.02	3.03	3.02	2.96	2.92	2.91	2.86	2.89	2.87	2.85	2.82	2.79	2.79	2.77	2.79
fließend	3.10	3.78	3.77	3.71	3.51	3.38	3.30	3.23	3.22	3.18	3.11	3.09	3.07	2.99	3.00	2.99
T-Test p	n.s.	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.00253	0.00142	0.00345 n.s.	<0.001	0.02277 n.s.	0.00531 n.s.	0.00214	0.01395 n.s.

Tabelle 5-2: durchschnittliche *rms*-Werte ($\times 10^{-3}$), $n=53$

Abbildung 5-4 zeigt die durchschnittlichen *rms*-Werte für beide Kühlmethoden. Man erkennt deutlich die äquivalente Ausgangslage, den markanten Anstieg nach Kühlbeginn bei der fließend Kühlung sowie das Absinken und niedrigere Niveau von *rms* bei Spraykühlung.

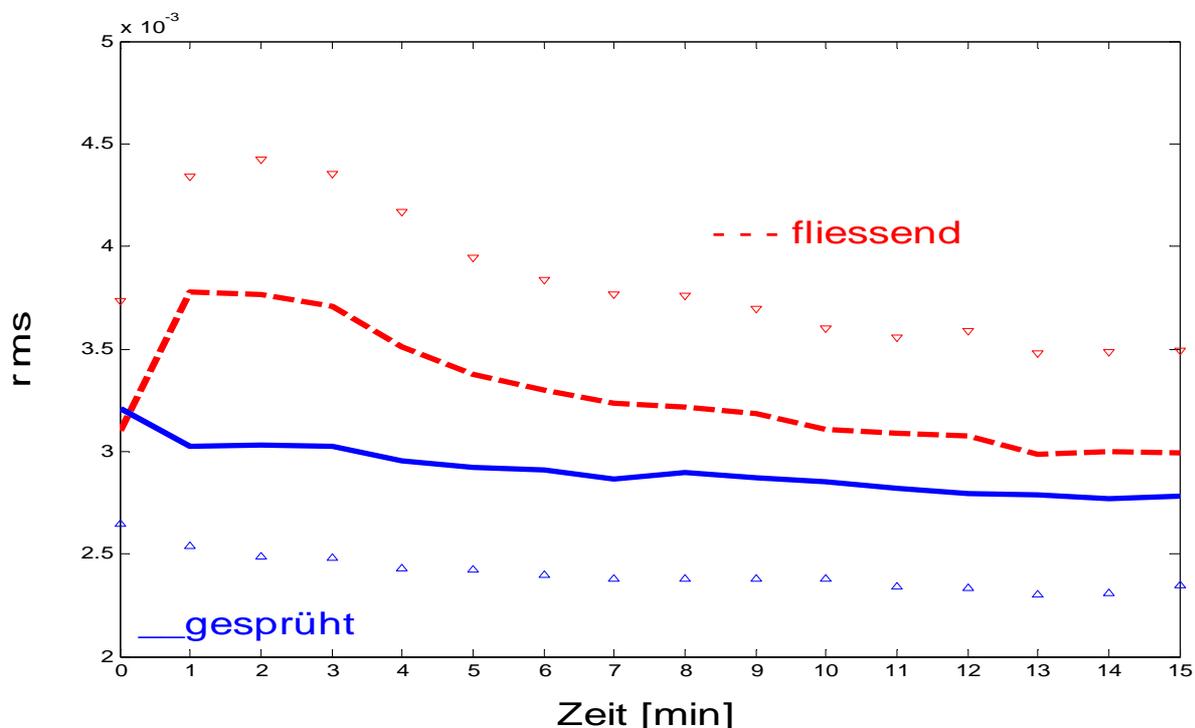


Abbildung 5-4: durchschnittliche *rms*-Werte beider Kühlmethoden und Standardabweichungen (kleine Dreiecke), $n=53$

Die Abbildung 5-5 und 5-6 zeigen für alle Probanden den Verlauf der *rms* über die Zeit, jeweils für eine Kühlmethode.

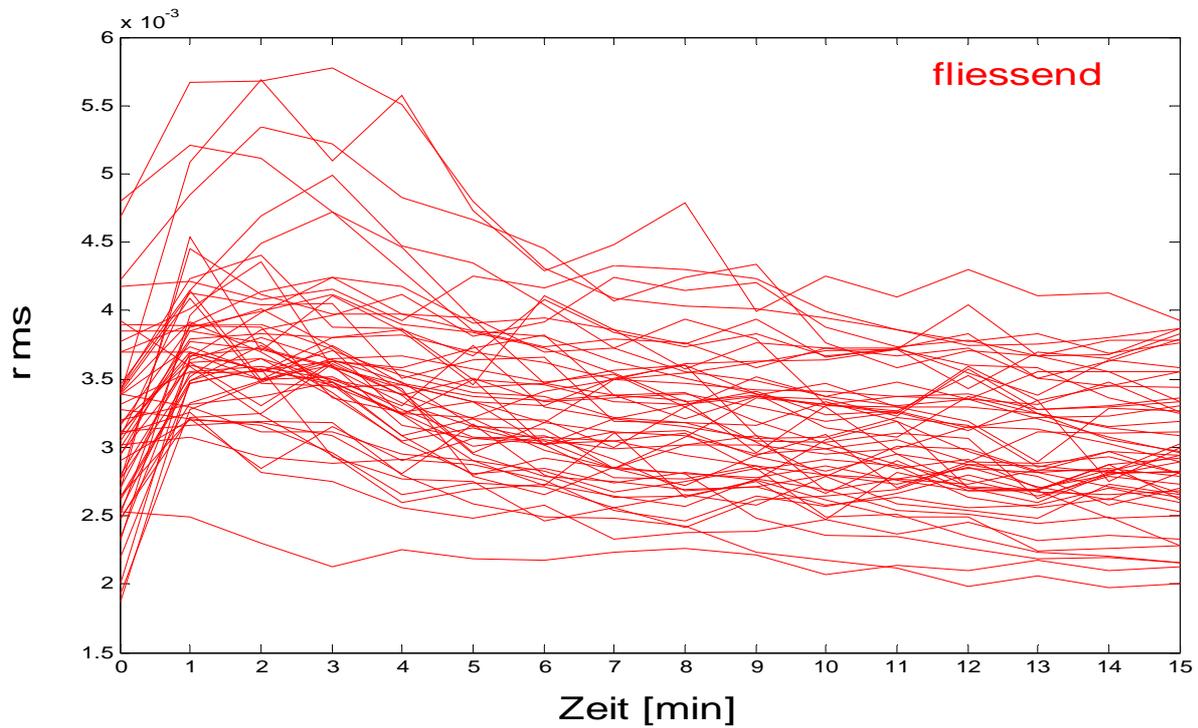


Abbildung 5-5: *rms*-Verlauf bei Kühlung mit fließendem Wasser, n=53

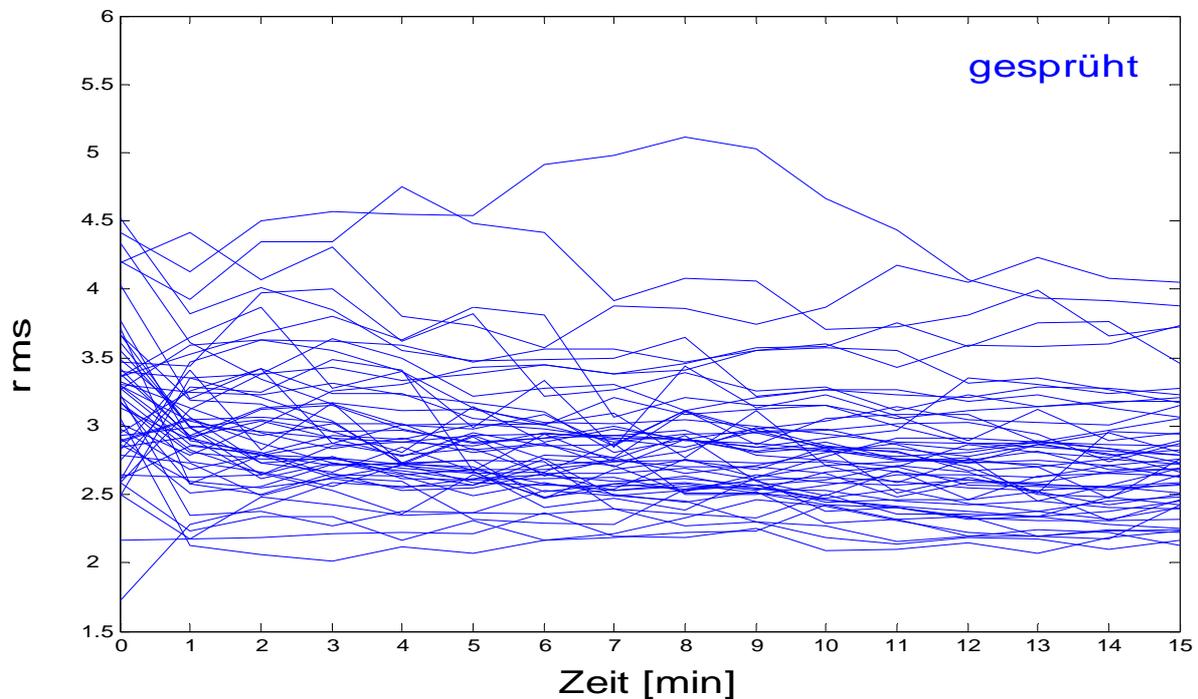


Abbildung 5-6: *rms*-Verlauf bei Kühlung mit gesprühtem Wasser, n=53

5.2. Oothermometrie

Das Temperaturmonitoring mittels Infrarot-Ohrthermometer hat ergeben, dass während der Kühlung die Körperkerntemperaturen weitgehend konstant geblieben sind, unabhängig von der Kühlmethode. Insbesondere kam es zu keiner Hypothermie.

Die Abbildung 5-7 zeigt die durchschnittlichen Körperkerntemperaturen während beider Kühlmethoden. Man erkennt deutlich das gleich bleibende Niveau der Körperkerntemperaturen bei beiden Kühlmethoden.

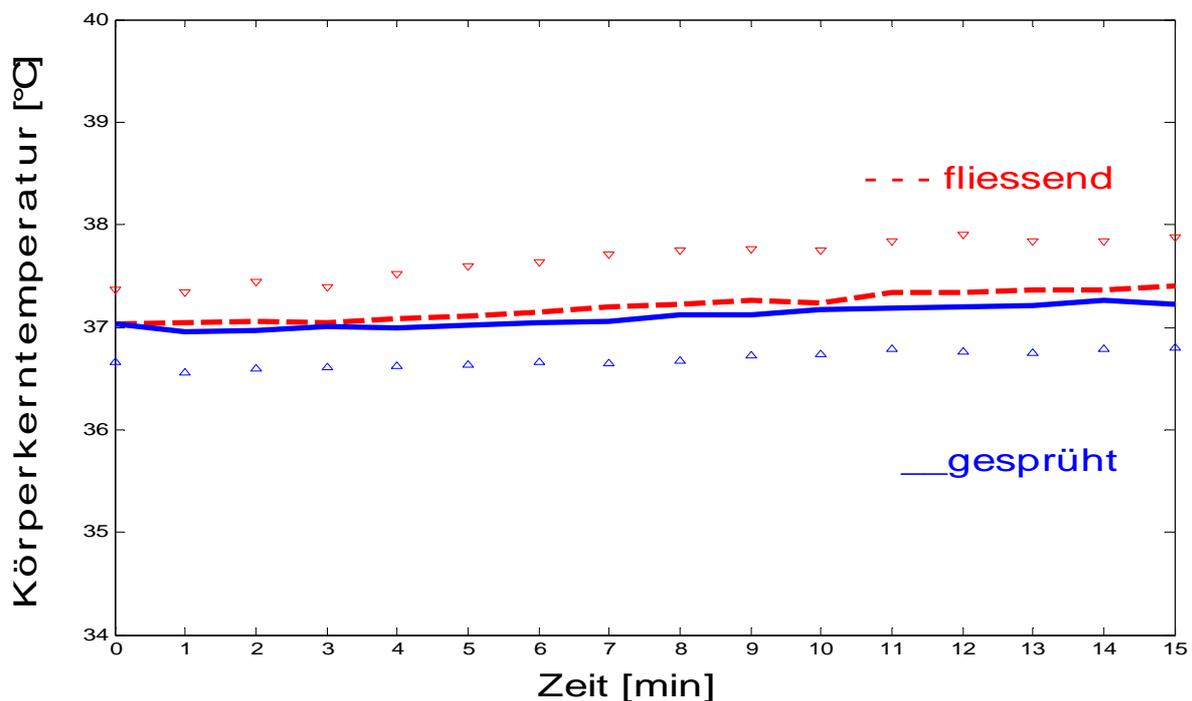


Abbildung 5-7: durchschnittliche Körperkerntemperaturen und Standardabweichungen (kleine Dreiecke) während beider Kühlmethoden, n=53

Die Abbildungen 5-8 und 5-9 zeigen den Verlauf und die Streuung der Körperkerntemperaturen aller Probanden. Die unterste Linie auf Abbildung 5-8 zeigt den Temperaturverlauf eines Probanden mit sehr viel Zerumen.

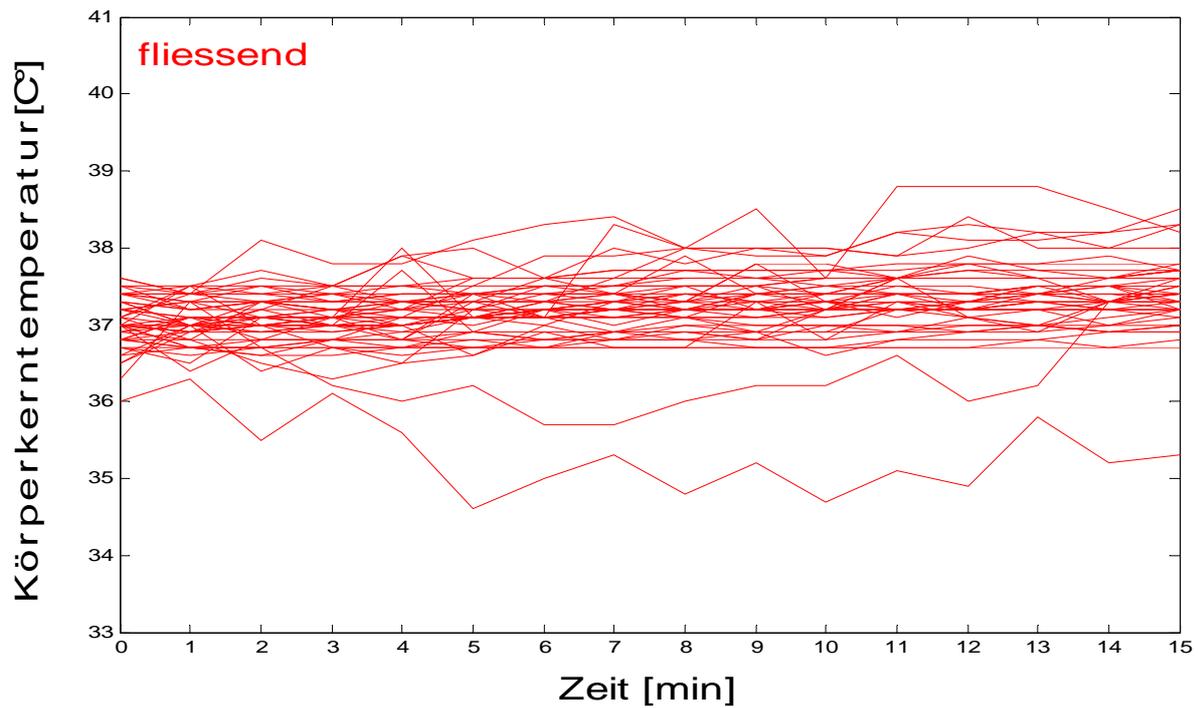


Abbildung 5-8: Körperkerntemperaturen bei Kühlung mit fließendem Wasser, n=53

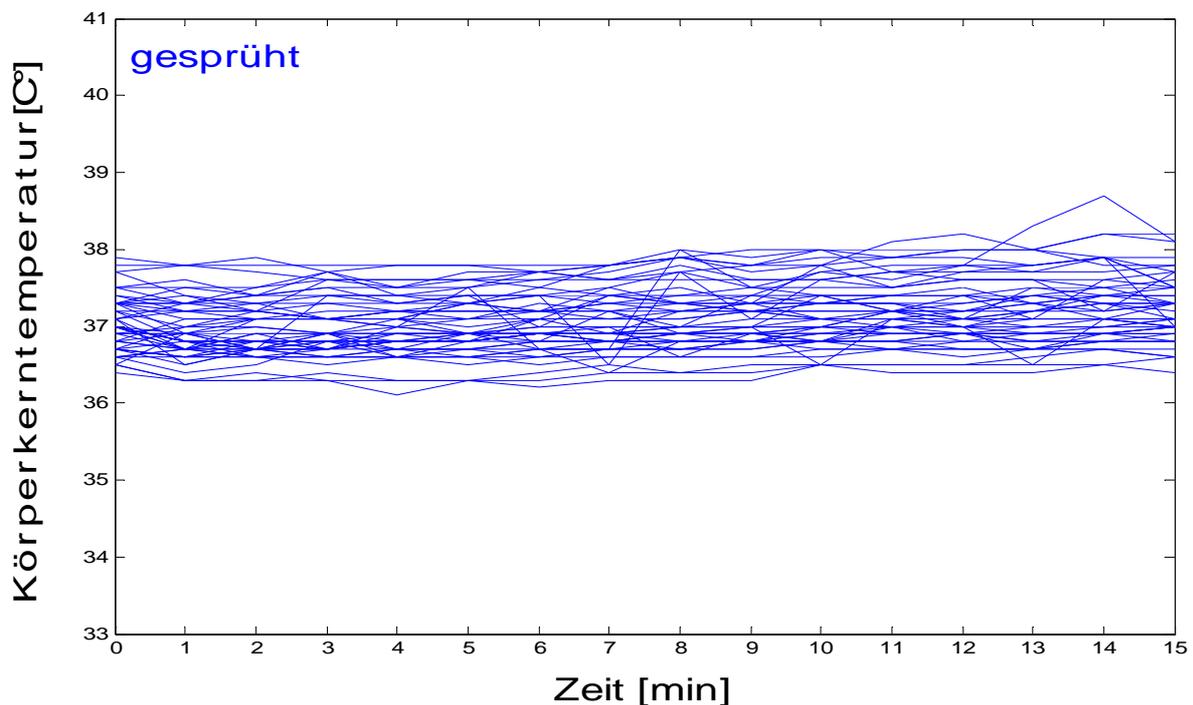


Abbildung 5-9: Körperkerntemperaturen bei Kühlung mit gesprühtem Wasser, n=53

Bei genauer Betrachtung fällt in den Abbildungen 5-7, 5-8 und 5-9 ein dezenter Anstieg der Temperaturen auf. Die Probanden hatten zu Beginn bei fließendem Wasser eine durchschnittliche Körperkerntemperatur von 37,0°C und nach 15 min 37,4°C. Der Ausgangswert bei der Spraykühlung war ebenfalls 37,0°C und stieg

nach 15 min Kühlung auf 37,2°C. Vergleicht man die Differenzen von Beginn und Ende beider Versuchsdurchläufe für alle Probanden mit dem T-Test für verbundene Stichproben, so findet sich ein signifikanter Unterschied mit einem $p < 0,001$.

Um etwaige Messfehler in dieser Beobachtung besser einschätzen zu können, wurden die einzelnen Temperaturverläufe in Excel® graphisch dargestellt und linear gefittet (siehe Abbildung 5-10), unter der Annahme, dass eine Beeinflussung der Körperkerntemperatur in diesem engen Zeitrahmen annähernd linear verläuft. Für diese Ausgleichsgerade wurde die zugehörige Geradengleichung ausgegeben. Die Steigung der Geraden entsprach dem durchschnittlichen Temperaturanstieg pro Minute. Im Mittel betrug die Steigung pro Minute bei fließendem Wasser 0,027°C, bei Spray 0,020°C. Im T-Test für verbundene Stichproben fand sich kein signifikanter Unterschied (siehe Tabelle 5-3).

	Mittelwert min. 0	Mittelwert min. 15	Mittelwert der Differenz min. 15 – min. 0	Mittelwert der Steigung °C/min
gesprüht	37.03	37.22	0.19	0.020
fließend	37.03	37.40	0.36	0.027
T-Test p	n.s.	0,012	<0,001	0,114 – n.s.

Tabelle 5-3: Mittelwerte der Körperkerntemperaturen, n=53

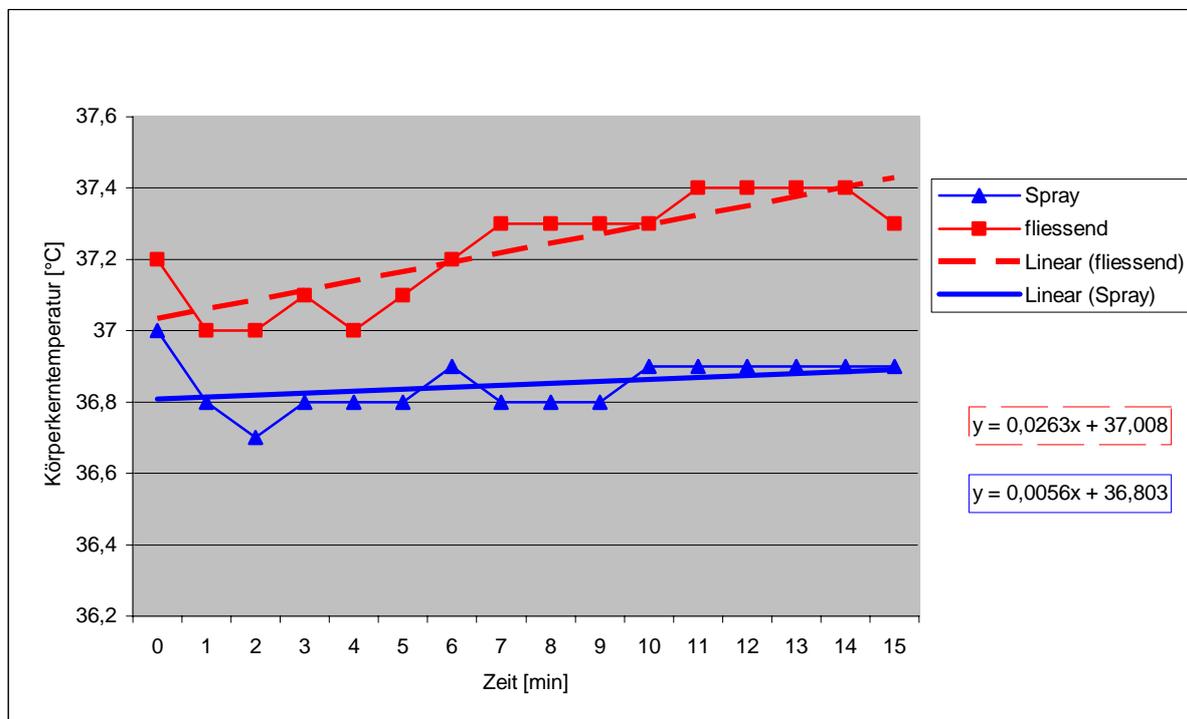


Abbildung 5-10: Verlauf der Körperkerntemperaturen eines Probanden mit linearen Ausgleichsgeraden und zugehörigen Geradengleichungen

6. Diskussion

6.1. Initiale Kühlung von Verbrennungen

Immer wieder wird der Nutzen von Kühlmaßnahmen bei Verbrennungen in Frage gestellt. Teilweise gilt die Kühlung als Laienmaßnahme³⁴ und es wird gefordert, dass sie nur noch wenige Minuten, im Sinne eines „Ablöschens“, durchgeführt wird⁸, da auch Studien vorliegen, die einen Nutzen durch Kühlung nur bei sofortigem Beginn nach Trauma sehen¹². Die Vorteile, die eine adäquate Kühlung mit sich bringt, sind jedoch nicht von der Hand zu weisen. Die tierexperimentellen Studien der Vergangenheit zeigen die vielfältigen positiven Effekte der Kühlung^{4-6,10,11,19,23,25,28,29,31,36}. Der Ansatz, eine fortschreitende Denaturierung von Gewebeproteinen zu unterbinden, ist somit primär richtig.

Zunehmende Hypothermie ist bei allen Traumata, nicht nur bei Verbrennungen, mit einer erhöhten Mortalität verbunden^{14,24}, weshalb es diese unbedingt zu vermeiden gilt. Die Gefahr der Hypothermie, die bei jedem Brandverletzten auf Grund des Hautdefekts besteht, steigt natürlich mit einer Kühlung. Jedoch ist die Unterkühlung bei Brandverletzten nicht ausschließlich auf Kühlmaßnahmen zurückzuführen. So hat z.B. eine Intubationsnarkose einen erheblichen Einfluss auf die Körperkerntemperatur, da die körpereigene Temperaturregulation beeinflusst wird²⁴. Muskelrelaxantien verhindern eine Wärmeproduktion über Kältezittern. Die Anzeichen einer Unterkühlung sind in Narkose nur sehr schwer zu erkennen und der Patient kann sein Kälteempfinden auch nicht mitteilen. Patienten mit sehr ausgedehnten Verbrennungen werden häufiger eine Narkose erhalten und eventuell von den Helfern auch intensiver gekühlt. Deshalb steigt das Hypothermierisiko mit zunehmender Größe der Verbrennung sehr stark an.

Je größer jedoch die Verbrennung ist, desto stärker sind die lokalen und systemischen Auswirkungen, die durch eine Kühlung begrenzt werden können. Dies sollte dem Patienten nicht vorenthalten bleiben, nur weil man eine Unterkühlung fürchtet. Vielmehr sollte gelten, dass gerade diese Patienten eine adäquate Kühlung ihrer Wunden erhalten, doch was bedeutet adäquat? Es gilt, das Optimum zwischen ausreichender lokaler Kühlung und minimalem systemischem Temperaturverlust zu finden. Die Kühlung muss kontrolliert und wohldosiert ablaufen, sie muss gut zu steuern sein. Durch den Einsatz von Pumpzerstäubern gewinnt man diese Kontrolle und Steuerbarkeit. Kühlung mit einer aufgeschnittenen Infusionsflasche oder einem

Wasserschlauch hingegen bietet diese Steuerbarkeit nicht. Die vielfältigen weiteren, insbesondere einsatztaktischen Vorteile, die sich durch die Spray-Kühlung ergeben, sind in der Einleitung ausführlich dargestellt.

Kühlmaßnahmen alleine können Verbrennungsschock und Verbrennungskrankheit nicht verhindern. Bereits entstandene schwere Schäden an der Haut können nicht ungeschehen gemacht werden. Trotz Kühlung kann auf erweiterte Maßnahmen wie medikamentöse Analgesie, eventuell Narkose und adäquate Volumensubstitution nicht verzichtet werden. Jedoch können entstehende Läsionen in ihrem Ausmaß begrenzt und die ablaufenden systemischen Reaktionen eingedämmt werden. Somit stellt die initiale Kühlung einen wichtigen Baustein des Notfallmanagements dar.

Zusätzlich sollte - sofern möglich - bei allen Schwerbrandverletzten ein Temperaturmonitoring durchgeführt werden.

6.2. Studiendesign

Diese Studie sollte klären, inwieweit sich die Kühlung mit Spray hinsichtlich der Kühlpotenz und Homogenität von der Kühlung mit fließendem Kühlmedium unterscheidet. Es wurde eine Kühlung beider Beinvorderseiten (18% KOF) durchgeführt, wie sie z.B. bei einer Verbrühung durch einen umgekippten Wasserkessel angezeigt wäre.

Die Studie imitiert, bezüglich der Kühlung, einen realen Notfalleinsatz bei einem Brandverletzten. Es wurde deshalb eine Rettungsdiensttrage der Marke Ferno® verwendet. Dieses Modell findet fast flächendeckend Anwendung im deutschen und internationalen Rettungsdienst. Die eingesetzten Flüssigkeitsmengen sind realitätsnah kalkuliert. Ausgehend von ca. 20 vorrätigen 1/2-Liter-Infusionsbehältnissen in Rettungs-/Notarztwagen kann es vorkommen, dass durch vorangegangene Einsätze und den hohen Bedarf an intravenöser Volumensubstitution eines Brandverletzten durchaus auch weniger als fünf Liter Flüssigkeit zwecks Kühlung zur Verfügung stehen. Bei Krankentransport- und Katastrophenschutzfahrzeugen sowie sonstigen Hilfseinrichtungen werden üblicherweise nicht mehr als zwei bis drei solcher Infusionsbehälter zur Hand sein. Meist wird in diesen Fällen auf andere Kühlflüssigkeiten zurückgegriffen, was durchaus legitim ist, jedoch ist eine sterile Kühlflüssigkeit vorzuziehen.

Der Pumpzerstäuber in diesem Versuch liefert pro Sprühstoß 1,3 ml. Bei 51 Pumpvorgängen pro Minute ergibt das über 15 min eine Menge von einem Liter.

Abzüglich einer kurzen Unterbrechung der Kühlung für die Thermographie ergibt sich somit etwa ein Sprühstoß pro Sekunde, was ebenfalls realistisch ist (siehe auch Kapitel 4.1.6.).

6.3. Thermographie

Kein anderes Verfahren erlaubt Temperaturen derart exakt zu bestimmen und gleichzeitig ihre flächige Verteilung zu beurteilen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Kühlung mit gesprühtem Wasser zu einer deutlichen Temperaturabnahme der Haut führt. Statistisch konnte im Vergleich zu fließendem Wasser für den gesamten Zeitraum ein signifikanter Unterschied ($p < 0,003$) nachgewiesen werden. Die Sprühkühlung führte im Mittel nach einer Minute zu einem ca. 1°C größeren Temperaturabfall als fließendes Wasser. Diese Differenz stieg im weiteren Verlauf auf $1,4^{\circ}\text{C}$ in Minute 15 an. Das bedeutet andererseits, dass der Einsatz von Spray keineswegs einer Eiskühlung gleichkommt, die für den Patienten eine Gefahr darstellen würde^{14,24,33}. Ziel der Kühlung ist es, im Gewebe gespeicherte Hitze so schnell wie möglich abzuführen, um den Nachbrenneffekt, d.h. eine fortschreitende Denaturierung der Gewebeproteine, zu minimieren. Dies kann mit Spraykühlung sehr gut erreicht werden, da die initiale Temperaturabnahme stärker ist als bei fließendem Wasser (siehe Abb. 5-1, 5-2 und 5-3, Kapitel 5.1.1.).

Hinzu kommt, dass die Kühlung sehr schnell die gesamte Fläche erreicht, da mittels Spray die Kühlflüssigkeit besser und schneller verteilt wird. Die Berechnungen der Temperaturfluktuationen zeigen, dass die Sprühkühlung homogener ist. Als Maß für die Homogenität wurde der dimensionslose Wert *rms* (siehe Kapitel 4.3.) eingeführt. Je kleiner *rms* eines Thermobildes ist, desto homogener ist in diesem Fall die Kühlung. Eine Kühlung mit gesprühtem Wasser führt in der ersten Minute zu einem Abfall von *rms*, wohingegen fließendes Wasser einen regelrechten Anstieg von *rms* bewirkt (siehe Abb. 5-4, 5-5 und 5-6, Kapitel 5.1.2.). Es konnte bis zu Minute neun ein signifikanter Unterschied der *rms* nachgewiesen werden. Erst ab Minute zehn erreichte auch die Kühlung mit fließendem Wasser eine gewisse Homogenität (siehe Tabelle 5-2, Kapitel 5.1.2). Das entspricht dem Zeitpunkt, an dem auch mit fließendem Wasser die gesamte Haut mehrmals benetzt worden war, und somit eine gleichmäßige Kühlung herbeigeführt werden konnte. Mit 333 ml Wasser pro Minute war dies zuvor nicht möglich. Durch eine Erhöhung der Flussrate wäre es natürlich

möglich, auch mit fließendem Wasser eine gleichmäßige Kühlung zu erzielen, jedoch müsste man dann mehrere Nachteile in Kauf nehmen (siehe nächsten Abschnitt Kühlflüssigkeitsmenge). Ein begrenzter Vorrat an Kühlflüssigkeit wäre binnen weniger Minuten erschöpft, eine unbegrenzte Menge, wie beispielsweise unter einer Dusche, bedeutet ein erheblich höheres Hypothermierisiko.

Die Thermobildserie am Anfang von Kapitel 5.1. ist repräsentativ für alle Versuchsdurchläufe. Man erkennt die schnellere Kühlung und die bessere Verteilung an Hand der Falschfarbendarstellung sehr gut.

6.4. Kühlflüssigkeitsmenge

Abb. 6-1 zeigt für alle Probanden die Temperaturunterschiedsverläufe bezogen auf die Zeit und die eingesetzte Flüssigkeitsmenge. Die Tatsache, dass beim Sprühen deutlich weniger Flüssigkeit zum Einsatz kommt, hat mehrere Vorteile (siehe Einleitung). Während der Versuche kam es bei der Kühlung mit fließendem Wasser zu einer massiven Ansammlung des Wassers auf der Trage. Obwohl der Oberkörper mit 30° hoch gelagert wurde, waren alle Probanden bis ca. BWK 7/8 am Rücken nass. Das Wasser breitete sich durch Kapillarkräfte zwischen Haut und Trageoberfläche auch gegen die Schwerkraft aus. Ein Patient in Schocklage wäre noch viel weiter nach kranial nass geworden. Da die Polsterauflage der Trage sowohl längs als auch quer eine leichte Muldenform aufweist, sammelte sich das Wasser mehrere Zentimeter hoch und floss nur teilweise ab. Bei einem realen Notfall mit längerem Transport käme es vermutlich zu einer sekundären Auskühlung. Ablaufendes Wasser führte zu einem sehr nassen Boden. Rutschiger Untergrund in Notfalleinsätzen, bei denen u.a. mit blutigen Injektionskanülen hantiert wird, bedeutet erhebliche Gefahr für das Rettungspersonal. In einem engen Rettungsfahrzeug ist es schwierig, angeschlossene Geräte wie z.B. einen EKG-Monitor vor der Nässe zu schützen. Sollte ein Patient defibrillationspflichtig werden, ginge von der großen Flüssigkeitsmenge ein massives Risiko für alle Beteiligten aus, die sich dessen eventuell gar nicht bewusst wären.

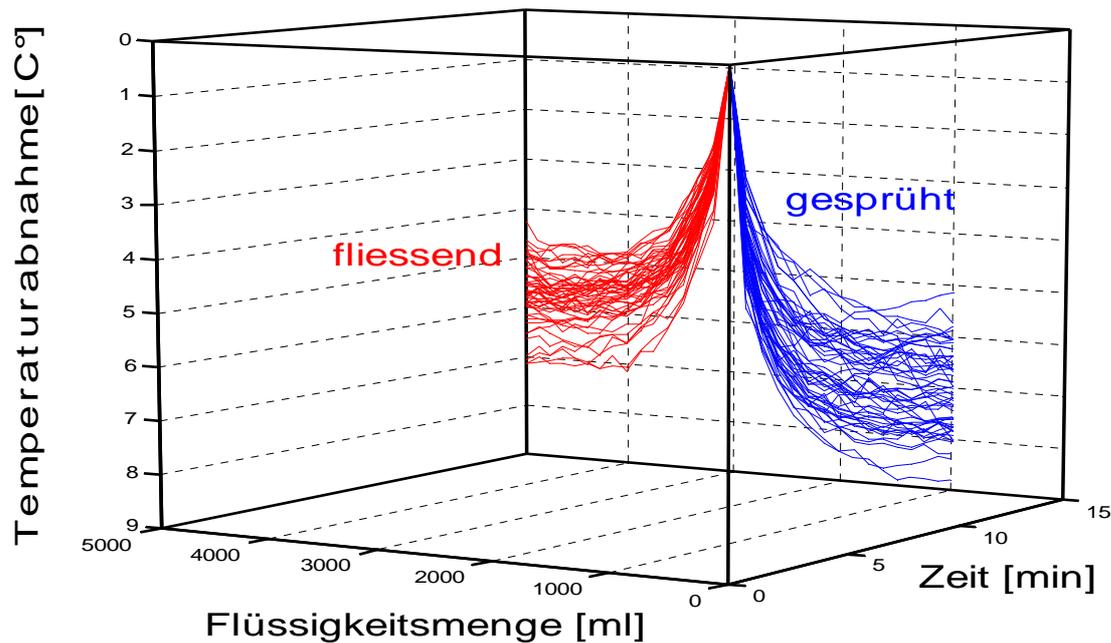


Abbildung 6-1: Relationsdiagramm Temperaturabnahme / Zeit / Flüssigkeitsmenge für beide Kühlmethoden, n=53

6.5. Oothermometrie

Vergleichsuntersuchungen gegen Pulmonalarterienkatheter und Ösophagussonden haben gezeigt, dass die Oothermometrie ein gutes Verfahren zur Abschätzung der Körperkerntemperatur darstellt^{15,32}.

Anders als die rektale Messung registriert die Oothermometrie sehr schnell Änderungen der Körperkerntemperatur⁹, was im vorliegenden Fall vorrangige Bedeutung hatte. Bezüglich der Fragestellung war nicht ein hoch exakter absoluter Wert, sondern die Dokumentation einer Temperaturänderung das wichtigste Kriterium.

Orale und axillare Messungen unterliegen erheblichen Störeinflüssen wie Atmung, Bewegung, Transpiration und Platzierung des Thermometers. Die Messungen dauern zudem länger. Die rektale Messung kann bei gefülltem Rektum und durch Stoffwechselaktivität von Bakterien verfälscht werden. Deshalb waren diese Methoden insbesondere für diese Studie unpraktikabel.

Überraschenderweise nahmen die Körpertemperaturen während der Kühlphase fast ausschließlich zu und nicht wie erwartet ab. Jedoch bewegen sich die Änderungen

mit 0,2°C (Spray) und 0,27°C (fließend) in der Größenordnung der vom Hersteller angegebenen Messungenauigkeit von 0,2°C.

Der Grund für die Zunahme ist wahrscheinlich, dass bei den hier beteiligten gesunden Probanden durch die Kühlung eine Vasokonstriktion der Hautgefäße ausgelöst wurde, die zu einer mäßigen Umverteilung des Blutvolumens nach zentral führte (ähnlich einer Kneipp-Kur). Es zeigt sich jedoch, dass der Körper systemisch auf die Kühlmaßnahmen reagiert und das offensichtlich stärker bei der Kühlung mit fließendem Wasser, vermutlich wegen der größeren Flüssigkeitsansammlung auf der Trage.

Während der Untersuchungen fiel auf, dass es recht häufig zu großen Temperatursprüngen ($>0,5^{\circ}\text{C}$) von einer Messung zur nächsten kam. Dass die Körperkerntemperaturen derart schwanken ist zwar nicht ausgeschlossen, wahrscheinlicher erscheint jedoch, dass es sich um Messfehler handelt. Deshalb wurden die Temperaturverläufe auch graphisch dargestellt und die Kurven linear gefittet (siehe Kapitel 5.2., Abb.5-10), unter der Annahme, dass eine Änderung in diesem engen Zeitrahmen annähernd linear verläuft. Diese Ausgleichsgeraden sowie die Abbildungen 5-8 und 5-9 zeigen, dass keine wesentliche Änderung der Körperkerntemperaturen, insbesondere keine Hypothermie eingetreten ist.

Auch wenn die Othothermometrie die Erwartungen bezüglich Exaktheit und Wiederholbarkeit der einzelnen Messungen nicht ganz erfüllen konnte, so wäre ein Absinken der Körperkerntemperaturen $>1,5^{\circ}\text{C}$ sicher festgestellt worden und die Aussage, dass in keinem Fall eine Hypothermie eingetreten ist, darf uneingeschränkt getroffen werden. Keiner der Probanden klagte über unangenehmes Kälteempfinden, es wurde zu keinem Zeitpunkt ein Kältezittern beobachtet. Bezeichnenderweise wurde die Kühlung mit Spray von fast allen Probanden als wesentlich angenehmer empfunden.

Die unterste Linie auf Abbildung 5-8 zeigt den Temperaturverlauf eines Probanden mit sehr viel Zerumen. Die Angabe des Herstellers, Zerumen hätte keinen Einfluss auf die Messungen, muss wegen der starken Schwankungen in dieser Messreihe in Frage gestellt werden.

7. Zusammenfassung

Als Initialmaßnahme bei großflächigen Verbrennungen gilt die Kühlung mit fließendem Wasser als Standardtherapie^{16,17,20,26,27,39}. Die Kühlung hat einen allgemein bekannten, unmittelbaren analgetischen Effekt. Des Weiteren haben tierexperimentelle Studien gezeigt, dass Kühlung von Verbrennungswunden lokal und systemisch positive Auswirkungen auf akutes Schockgeschehen und den weiteren Heilungsverlauf hat. Kreislauf und Mikrozirkulation werden stabilisiert^{4,6,31}. Es kommt zur Abnahme der Mortalität^{10,29}. Die Ausschüttung von Histaminen und anderer Mediatoren wird reduziert, was Verbrennungsödem und Verbrennungsschock verringert^{4-6,10,11,29}. Es zeigen sich geringere Gewebeschäden sowohl makroskopisch als auch histologisch^{11,19,25,29,31,36}. Schnellere Heilung bei erniedrigter Infektionsrate^{19,29,31}, eine geringere Narbenbildung und im weiteren Verlauf ein erniedrigter Bedarf an Hauttransplantationen²⁸ unterstreichen die Bedeutung der initialen Kühlung von Brandwunden. Große Gefahr ist jedoch eine Unterkühlung, die es unbedingt zu vermeiden gilt, denn sie korreliert mit einer erhöhten Mortalität^{10,14,24}.

Insbesondere wegen der Gefahr der Hypothermie wird die initiale Kühlung bei großflächigen Verbrennungen immer wieder kontrovers diskutiert. Bisher mangelt es an einer etablierten Kühlmethode mit konkreten Anwendungshinweisen. Kühlmaßnahmen werden fast immer, auch von professionellen Helfern, improvisatorisch durchgeführt, z.B. unter einer Dusche, mittels Feuerwehrschauch, aus aufgeschnittenen Infusionsbehältnissen, mit feuchten Tüchern oder Kompressen oder gar kalten Getränken. Dabei variieren die eingesetzten Mengen und Temperaturen der Kühlmedien erheblich. Der Anwender hat wenig Kontrolle über die Kühlung.

Dieser Studie liegt die Idee zu Grunde, große Brandverletzungen zu kühlen, in dem man Infusionslösung (0,9% NaCl oder Vollelektrolytlösung) mit einem einfachen Pumpzerstäuber auf die Wunde sprüht.

Es wird gezeigt, dass der Einsatz von gesprühter Flüssigkeit zur Kühlung sehr effektiv ist. Das Kühlmedium wird ausschließlich gezielt auf einem begrenzten Gebiet angewendet und hierbei gleichmäßig verteilt. Das bedeutet zum einen, dass das verbrannte Areal intensiv gekühlt werden kann, zum anderen, dass unverbranntes Gebiet nicht simultan mitgekühlt wird. Das Hypothermierisiko sinkt dadurch

beträchtlich. Die einfache Handhabung eines Pumpzerstäubers bietet auch für Laien und unerfahrenes medizinisches Hilfspersonal die Möglichkeit adäquat zu helfen. Da nur wenig Flüssigkeit verwendet wird, bleiben Material und Umfeld trocken, wodurch sich eine deutliche Verbesserung der Einsatzsituation ergibt. Die Sicherheit steigt, denn es kommt nicht zu rutschigen Böden und im Falle einer Defibrillation sind die beteiligten Personen weniger gefährdet.

53 gesunden Probanden wurde an verschiedenen Tagen vergleichsweise mit fließendem (5 Liter) und gesprühtem (1 Liter) Wasser (22°C) 15 min. lang beide Beinvorderseiten (18% KOF) gekühlt. Anhand von Thermographiebildern wurde die durch Kühlung erzielte Temperaturabnahme der Haut (bezogen auf den Ausgangswert vor Kühlung) sowie die Homogenität der Kühlung in einminütigen Intervallen mit dem T-Test für verbundene Stichproben untersucht. Dabei galt ein $p < 0,003$ als signifikant. Die Kühlung mit Spray führte im gesamten zeitlichen Verlauf zu einer signifikant kühleren Hauttemperatur. Nach einer Minute betrug die Temperaturabnahme beim Sprühen im Mittel 3,1°C, bei fließendem Wasser 2,0°C. Nach 15 Minuten wurde mittels Spray eine durchschnittliche Temperaturabnahme von 7,1°C, mittels fließendem Wasser von 5,7°C erreicht.

Zur Bestimmung der Homogenität der Kühlung wurde die *root mean square - rms* der Temperaturfluktuationen an jedem Bildpunkt berechnet. Die Kühlung mittels Spray führte in den Minuten eins bis neun, elf und vierzehn zu signifikant ($p < 0,003$) geringeren Fluktuationen der Hauttemperaturen als die Kühlung mit fließendem Wasser.

Im Temperaturmonitoring mit Infrarotrohrthermometer fand sich bei beiden Kühlmethoden ein dezenter Anstieg der durchschnittlichen Körperkerntemperatur, der sich aber jeweils im Bereich der Messungengenauigkeit des Thermometers (0,2°C) bewegte. In keinem Fall kam es zu einer Hypothermie.

Die Ergebnisse dieser Studie sprechen dafür, großflächige Brandwunden mit gesprühter Kühlflüssigkeit (z.B. 0,9% NaCl-Lösung, Vollelektrolytinfusionslösung) zu kühlen, da die Kühlung gleichmäßiger und effizienter wird, die Gefahr der Hypothermie sinkt, die Infusionslösungen steril sind und das Notfalleinsatzgeschehen positiv beeinflusst wird. Im Vergleich zur etablierten Methode ergeben sich keine neuen Kontraindikationen und Risiken, vielmehr können diese neu bewertet werden. Im Vergleich zu teuren Spezialprodukten ist diese Methode sehr kostengünstig.

Ob die in dieser Studie an gesunden Probanden gefundenen Ergebnisse auf Brandverletzte übertragbar sind und ob die theoretischen Vorteile tatsächlich bestehen, muss durch weitere klinische Forschung verifiziert werden.

8. Anhang

8.1. MATLAB®-Programmierung

Dieses Kapitel zeigt die wesentlichen Programmabschnitte, die auf MATLAB-Basis geschrieben wurden.

Kommentare sind durch ein %-Zeichen vom Programm getrennt, alles was in einer Zeile hinter einem % steht, gehört nicht zum eigentlichen Programm.

8.1.1. Datenimport, Durchschnittstemperaturen/Differenzen, Standardabweichung

```
clear all           %deletes all memories of MATLAB

%%%%%%%% Definition of the source files %%%%%%%%%
path='E:\Promotion\ThermoBilder+Polygone für Matlab\';
nummer=[011,022,031,042,051,061,072,082,091,101,112,122,132,142,151,161,172,181,191,202,212,222,231,242,252,262, ...
272,282,292,302,311,322,331,342,351,362,371,382,391,402,411,421,431,441,451,462,472,481,491,501,512,521,532]
nummer2=[01,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36, ...
37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53]
namepoly='\9999.txt';           % name of polygon definition file in the directories
ext='.txt';

%%%%%%%% beginning of each series %%%%%%%%%
sizenummer=size(nummer);
for ii=1:1:sizenummer(1,2)
if rem(nummer(ii),2)==0
    sex='m';
else
    sex='w';
end
    indexx=1:1:300;
    indexy=1:1:200;
    [XI,YI]=meshgrid(indexx,indexy);           %generates x and y matrices
    fname = sprintf('%s%.3i3%s',path,nummer(ii),namepoly);           %writes formatted data to a string

%%%%%%%% loop for "cooling with flowing water" %%%%%%%%%
POLYGON=dlmread(fname);           %reading polygon definition from text file
    polygon1x = POLYGON(:,1);
    polygon1y = POLYGON(:,2);
    polygon2x = POLYGON(:,3);
    polygon2y = POLYGON(:,4);
    polygon1x(find(polygon1x==0))=[];
    polygon1y(find(polygon1y==0))=[];
    polygon2x(find(polygon2x==0))=[];
    polygon2y(find(polygon2y==0))=[];
    p1=polyarea(polygon1x,polygon1y);           %area of polygon
    p2=polyarea(polygon2x,polygon2y);
in1 =inpolygon(XI,YI,polygon1x,polygon1y);           %detects points inside a polygonal region
```

```

in2 =inpolygon(Xl,Yl,polygon2x,polygon2y);

for iii=0:1:15
    coolmeth='3\';
    fname = sprintf('%s%.3i%s%.2i%sf%.4i%s',path,nummer(ii),coolmeth,nummer2(ii),sex,iii,ext);
    zeit(iii+1).temp=dlmread(fname);
    tempmod=0;
%   for i=1:1:200
%       for j=1:1:300
%           if in1(i,j)==1 | in2 (i,j)==1
%               tempmod(i,j)=temp(i,j);
%           else
%               tempmod(i,j)=NaN;
%           end
%       end
%   end
% end
index=1;
for i=1:1:200
    for j=1:1:300
        if in1(i,j)==1 | in2 (i,j)==1
            tempmod(index)=zeit(iii+1).temp(i,j);
            index=index+1;
        end
    end
end
end

averagetemp(iii+1)=mean(tempmod);
standdevi(iii+1)=std(tempmod);

end

deltastart= averagetemp(1)-averagetemp; %calculates the differences of average temperatures to the value of the beginning
fname = sprintf('%s%.3i4%s',path,nummer(ii),namepoly);

%%%%%%%% loop for "cooling with spray" %%%%%%%%%
POLYGON=dlmread(fname);
    polygon1x = POLYGON(:,1);
    polygon1y = POLYGON(:,2);
    polygon2x = POLYGON(:,3);
    polygon2y = POLYGON(:,4);
    polygon1x(find(polygon1x==0))=[];
    polygon1y(find(polygon1y==0))=[];
    polygon2x(find(polygon2x==0))=[];
    polygon2y(find(polygon2y==0))=[];
p1=polyarea(polygon1x,polygon1y);
p2=polyarea(polygon2x,polygon2y);
in1 =inpolygon(Xl,Yl,polygon1x,polygon1y);
in2 =inpolygon(Xl,Yl,polygon2x,polygon2y);

for iii=0:1:15

```

```

coolmeth='4\';
fname =sprintf('%s%.3i%s%.2i%ss%.4i%s',path,nummer(ii),coolmeth,nummer2(ii),sex,iiii,ext);
zeit(iiii+1).temp=dlmread(fname);

tempmod=0;
% for i=1:1:200
%   for j=1:1:300
%     if in1(i,j)==1 | in2 (i,j)==1
%       tempmod(i,j)=temp(i,j);
%     else
%       tempmod(i,j)=NaN;
%     end
%   end
% end
index=1;
for i=1:1:200
  for j=1:1:300
    if in1(i,j)==1 | in2 (i,j)==1
      tempmod(index)=zeit(iiii+1).temp(i,j);
      index=index+1;
    end
  end
end
end
averagetemp(2,iiii+1)=mean(tempmod);           %averagetemp = average of temperature of both polygons
standdevi(2,iiii+1)=std(tempmod);             %standdevi = standard deviation
end
deltastart(2,:)= averagetemp(2,1)-averagetemp(2,:); % differences of average temperatures to the value of the beginning

averagetemp=averagetemp';                     %inverts the matrice
standdevi=standdevi';                         %inverts the matrice
deltastart=deltastart';                       %inverts the matrice

%%%%%% creating the output text files %%%%%%
fname = sprintf('%s%.3ideltastart%s',path,nummer(ii),ext); %creates name of file "deltastart"
dlmwrite(fname,deltastart,'\t')               % creates file "deltastart", tabstopped

fname = sprintf('%s%.3istanddevi%s',path,nummer(ii),ext); %creates name of file "standdevi"
dlmwrite(fname,standdevi,'\t')               % creates file "standdevi", tabstopped

fname = sprintf('%s%.3iaveragetemp%s',path,nummer(ii),ext); %creates name of file "averagetemp"
dlmwrite(fname,averagetemp,'\t')           % creates file "averagetemp", tabstopped

clear averagetemp deltastart standdevi

end

```

8.1.2. Berechnung der dimensionslosen Größe rms

Prinzipiell wurde das gleiche Programm genutzt wie unter 8.1.1. gezeigt. Es wurde lediglich folgende Berechnungen an Stelle der Standardabweichung hinzugefügt. Für die *rms* wurde im Programm die Variable „Dimless“ (dimensionslos) verwendet.

```

...
Flowpoints = length (tempmod);           %number of points in Polygons in case of "flow"
  averagetemp(iiii+1)=mean(tempmod);     %average temperature of "tempmod"
  D= ((tempmod)-averagetemp(iiii+1))./averagetemp(iiii+1); % fluctuation of each point
  Dimless(iiii+1)=sqrt(sum(D.*D)./Flowpoints); % rms of all fluctuations
...
sowie:
...
Spraypoints = length (tempmod);         %number of points in Polygons in case of "spray"
  averagetemp(2,iiii+1)=mean(tempmod);  %averagetemp = average temperature of both polygons
  D= ((tempmod)-averagetemp(2,iiii+1))./averagetemp(2,iiii+1); %fluctuation of each point
  Dimless(2,iiii+1)=sqrt(sum(D.*D)./Spraypoints); %rms of all fluctuations
...

```

8.2. SPSS Rohdaten

8.2.1. Temperaturabnahme der Haut nach Kühlung in [K]

Fließendes Wasser

Fall	Minute														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.14	3.01	3.54	3.7	4.38	4.33	4.77	5.06	5.14	5.51	5.31	5.64	5.65	5.87	5.87
2	1.61	2.42	3.13	3.69	4.04	4.53	4.67	4.54	4.54	4.4	4.33	4.38	4.64	4.68	4.64
3	1.82	2.26	2.64	3.26	3.52	3.74	4.08	4.3	4.32	4.54	4.72	4.83	4.96	4.79	4.71
4	1.73	2.75	3.69	4.16	4.5	5.22	5.33	5.62	5.7	5.77	5.92	5.99	6.05	6.2	6.33
5	1.64	2.15	2.75	3.28	3.56	3.8	4.1	4.12	4.28	4.53	4.57	4.68	4.83	4.9	4.91
6	1.94	2.56	3.22	3.74	3.94	4.12	4.31	4.48	4.61	4.87	4.91	5.15	5.17	5.36	5.32
7	1.92	2.61	3.35	3.86	4.18	4.08	4.67	4.65	4.73	5.01	5.14	5.1	5.35	5.39	5.55
8	1.44	2.29	2.97	3.81	4.1	4.19	4.39	4.62	4.86	4.9	4.88	5.11	5.34	5.21	5.04
9	1.87	2.61	3.08	3.65	3.83	4.05	4.21	4.61	4.67	4.9	5.04	5.01	5.07	5.3	5.37
10	2.03	2.64	2.98	3.76	4.09	4.15	4.34	4.76	4.72	5.06	5.16	5.27	5.35	5.5	5.81
11	1.57	2.39	2.96	3.53	3.67	3.93	4.05	4.24	4.26	4.31	4.29	4.4	4.53	4.54	4.28
12	1.88	2.29	2.85	3.2	3.38	3.65	4	4.13	4.24	4.19	4.37	4.43	4.53	4.95	5.17
13	2.08	2.68	3.49	3.83	4.11	4.27	4.68	4.68	4.84	4.96	5.09	5.09	5.36	5.45	5.55
14	1.78	2.7	3.5	3.78	3.89	4.26	4.52	4.67	4.77	4.87	5.14	5.25	5.47	5.28	5.39
15	2.01	2.72	3.25	3.64	4.04	4.18	4.56	4.64	4.91	4.93	5.26	5.23	5.53	5.47	5.75
16	1.98	2.44	2.95	3.48	3.89	4.33	4.64	4.64	4.88	5.05	5.07	5.21	5.31	5.2	5.19
17	1.68	2.71	3.26	3.61	3.78	4.12	4.17	4.35	4.62	4.69	4.78	4.87	5	4.87	4.91
18	2.28	3.3	3.95	4.37	4.6	4.9	5.09	5.35	5.44	5.8	5.84	6.13	5.96	5.99	5.91
19	1.52	2.11	2.73	3.2	3.6	3.7	4.03	4.13	4.25	4.42	4.49	4.6	4.84	4.92	5.02
20	2.09	3.06	3.83	4.11	4.4	4.74	4.8	5.02	5.23	5.37	5.53	5.62	5.67	5.5	5.47
21	1.5	2.15	3.15	3.55	4.15	4.4	4.72	4.78	4.96	5.06	5.21	5.42	5.65	5.78	5.88
22	1.84	2.71	3.48	4.06	4.42	4.53	4.88	4.99	5.2	5.39	5.62	5.52	5.58	5.72	5.75
23	1.9	2.72	3.3	3.95	4.27	4.28	4.62	4.73	5	5.17	5.16	5.33	5.44	5.6	5.67
24	2.02	2.9	3.71	4.4	4.72	4.9	5.11	5.39	5.77	5.88	5.89	5.89	6.14	6.31	6.53
25	1.77	2.78	3.31	3.91	4.22	4.48	4.54	4.62	5.04	4.86	4.93	5.12	5.11	5.1	5.2
26	1.64	2.43	3.1	3.82	4.17	4.43	4.81	4.97	5.04	5.23	5.27	5.38	5.64	5.75	5.93
27	2	2.64	3.16	3.82	4.11	4.34	4.35	4.59	4.83	5.05	5.04	5.17	5.31	5.14	4.79
28	1.93	2.72	3.55	4.06	4.26	4.8	4.95	4.99	5.11	5.37	5.37	5.55	5.67	5.85	6
29	1.48	2.37	3.18	3.66	4.03	4.19	4.54	4.65	4.79	4.98	5.07	5.2	5.49	5.39	5.51
30	2.01	2.94	3.45	4.13	4.42	4.88	5.18	5.27	5.32	5.66	5.73	5.91	6.04	6.12	6.15
31	2.04	2.86	3.44	4.29	4.51	4.76	5	5.22	5.23	5.49	5.52	5.73	5.77	5.96	5.94
32	1.79	2.64	3	3.67	3.75	4.1	4.19	4.27	4.25	4.62	4.65	4.87	4.94	5.1	5.08
33	2.14	2.96	3.47	4.01	4.23	4.43	4.62	4.86	4.88	5.12	5.18	5.33	5.37	5.47	5.58
34	2.18	3.11	3.7	3.97	4.42	4.77	5.03	5.4	5.45	5.65	5.68	5.74	5.64	5.76	5.69
35	2.08	2.9	3.56	4.17	4.42	4.53	4.78	4.95	5.09	5.27	5.37	5.52	5.68	5.59	5.92
36	1.81	2.8	3.51	4.05	4.26	4.45	4.69	4.76	4.74	5.02	5.26	5.46	5.4	5.32	5.37
37	2.17	3.14	3.9	4.47	4.5	4.66	5.12	5.21	5.25	5.53	5.58	5.64	5.87	5.9	6
38	1.65	2.44	3.11	3.61	3.71	4.13	4.18	4.32	4.3	4.36	4.65	4.85	4.96	4.93	4.93
39	1.71	2.48	2.86	3.43	3.62	3.99	4	4.29	4.46	4.58	4.53	4.74	4.61	4.78	4.83
40	1.96	2.87	3.75	4.09	4.35	4.58	4.87	4.83	5.13	5.31	5.46	5.33	5.51	5.51	5.78
41	2.59	3.21	3.76	3.7	3.85	4.08	4.34	4.48	4.53	4.7	5.09	5.46	5.49	5.34	5.48
42	1.95	2.77	3.33	3.87	4.33	4.34	4.59	4.78	4.91	5.09	5.32	5.71	5.68	5.62	5.69
43	2.31	2.95	3.94	4.6	5.08	5.28	5.68	5.72	6.2	6.14	6.28	6.3	6.55	6.45	6.63
44	2.26	3.07	4.13	4.46	4.6	4.88	5.2	5.15	5.15	5.35	5.48	5.65	5.79	5.78	5.96
45	2.03	3.04	3.67	4	4.24	4.46	4.75	4.84	5.01	5.18	5.22	5.45	5.51	5.55	5.71
46	2.82	3.65	4.36	5.05	5.58	5.71	6.22	6.06	6.45	6.48	6.67	6.75	6.87	6.89	7.14
47	2.61	3.54	4.45	5.02	5.35	5.69	6.15	6.27	6.43	6.46	6.51	6.47	6.72	6.79	7.07
48	2.17	3.04	3.63	3.96	4.39	4.69	4.77	4.87	5.02	5.35	5.36	5.44	5.61	5.58	5.64
49	2.12	3.38	4.35	4.86	4.88	5.33	5.7	5.89	6.16	6.49	6.51	6.64	6.83	6.98	7.14
50	1.83	2.94	3.34	3.96	4.14	4.51	4.6	4.86	4.89	5.16	5.32	5.52	5.56	5.71	5.8
51	1.98	2.97	3.83	4.49	4.99	5.27	5.7	5.66	5.83	6.07	6.39	6.41	6.72	6.68	6.98
52	2.29	3.17	3.79	4.35	4.49	4.9	4.91	5.05	5.41	5.61	5.75	5.96	6.02	6	6.17
53	2.2	3.3	4.04	4.61	4.87	5.18	5.54	5.66	5.82	6.17	6.22	6.27	6.27	6.28	6.54

Temperaturabnahme der Haut nach Kühlung in [K]

Gesprühtes Wasser

Fall	Minute														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.93	3.88	4.73	4.99	5.54	5.85	6.1	6.39	6.62	6.68	6.97	7.25	7.45	7.57	8.01
2	1.99	2.83	3.69	4.03	4.49	4.89	5.12	5.32	5.33	5.63	5.71	5.88	6.02	6.11	6.23
3	2.81	3.66	4.28	4.76	4.99	5.11	5.41	5.64	5.91	5.89	5.82	6.13	6.51	6.14	6.67
4	2.46	3.53	4.45	4.89	5.21	5.38	5.55	5.81	6.07	6.13	5.87	6.15	6.26	6.32	6.37
5	2.88	4.04	4.64	5.22	5.56	5.62	5.8	5.86	6	6.03	6.27	6.42	7	6.94	6.97
6	2.58	3.51	4.09	4.6	5.08	5.32	5.26	5.49	5.65	5.82	5.92	6.07	6.19	6.49	6.54
7	2.33	2.93	3.38	3.68	4.03	4.36	4.55	4.72	4.95	5.18	5.47	5.47	5.6	5.77	6.03
8	4.1	5.07	5.72	6.09	6.36	6.23	6.8	6.83	6.75	6.92	7.1	7.15	7.46	7.54	7.77
9	3	3.74	4.31	4.73	5.27	5.54	5.62	6.17	6.51	6.78	6.86	7.13	7.06	7.56	7.56
10	3.25	4.35	5.12	5.65	6.07	6.29	6.24	6.48	6.6	6.54	6.61	6.74	6.8	6.72	6.88
11	2.08	3	3.96	4.64	5.23	5.33	5.32	5.31	5.43	5.66	5.68	5.76	5.75	5.89	6.05
12	2.62	3.66	4.24	4.77	5.18	5.48	5.52	5.65	5.66	5.93	5.82	5.81	5.88	6.05	6.11
13	2.6	3.53	4.09	4.56	4.8	5.16	5.63	5.91	5.96	6.18	6.36	6.37	6.56	6.56	6.63
14	2.8	4.01	4.69	4.94	5.26	5.31	5.62	5.67	5.79	6.06	6.2	6.09	6.15	6.52	6.39
15	3.15	4.44	5.24	5.67	6.21	6.39	6.62	6.79	6.98	7.09	7.23	7.43	7.49	7.57	7.85
16	2.94	3.83	4.24	4.69	4.72	5.08	5.16	5.41	5.43	5.44	5.63	6.34	6.5	6.28	6.51
17	4.27	4.87	5.37	5.28	5.72	5.86	6.21	6.1	6.28	6.6	6.67	6.92	6.9	7.12	7.32
18	3.17	4.26	5.03	5.6	5.77	6.11	6.15	6.53	6.6	6.91	7.01	7.04	7.18	7.19	7.33
19	3.17	4.24	4.84	5.38	5.67	6	5.93	5.98	6.18	6.13	6.26	6.52	6.65	6.85	7
20	2.89	4.34	4.51	4.91	5.27	5.67	5.63	5.84	5.87	5.96	5.92	6.4	6.48	6.46	6.65
21	3.06	3.88	4.43	4.82	4.65	5.16	5.12	5.45	5.79	5.89	5.87	5.84	5.88	6.48	6.63
22	2.96	3.88	4.63	4.82	5.29	5.36	5.59	5.96	6.11	6.26	6.38	6.54	6.6	6.64	6.74
23	3.72	5.11	5.89	6.44	6.79	7.14	7.4	7.62	7.76	8.09	8.36	8.43	8.56	8.72	8.79
24	2.8	3.79	4.35	4.72	4.89	5.18	5.27	5.27	5.47	5.55	5.54	5.71	5.82	5.87	5.81
25	2.49	3.42	4.02	4.21	4.86	4.81	5.25	5.52	5.74	5.96	5.96	6.05	6.2	6.27	6.38
26	2.74	4.61	5.13	5.18	5.94	5.88	6.21	6.43	6.25	6.59	6.65	6.92	6.9	7.02	7.09
27	3.45	4.34	5.08	5.41	5.78	5.85	6.21	6.07	6.16	5.93	6.47	6.65	6.86	6.9	7.13
28	2.32	2.96	3.33	4	3.9	4.2	4.56	4.84	4.93	5.17	5.26	5.43	5.55	5.37	5.74
29	3.02	3.66	4.28	4.4	5.18	5.26	5.17	5.52	5.5	5.61	5.83	5.74	5.78	6.03	6.07
30	2.85	4.23	4.3	5.21	4.95	5.19	5.21	5.74	5.98	5.96	6.06	5.98	6.34	6.37	6.61
31	2.44	3.35	4.05	4.7	4.97	5.27	5.4	5.62	5.76	6.15	6.11	6.32	6.39	6.48	6.95
32	3.29	4.32	4.92	5.45	5.79	6.06	6.31	6.44	6.52	6.66	6.84	6.95	6.98	7.04	7.24
33	3.56	4.69	5.56	6.1	6.47	6.75	6.97	7.32	7.48	7.57	7.75	7.9	7.89	8.18	8.28
34	3.91	4.65	5.13	5.37	5.97	6.01	6.27	6.61	6.24	6.54	6.86	6.94	6.96	7.18	7.18
35	3.18	4.2	4.92	5.43	5.97	6.07	6.37	6.46	6.54	6.56	6.62	6.73	6.75	6.74	6.87
36	2.8	3.06	4.06	4.42	4.69	4.78	5.04	4.92	4.99	5.06	5.08	5.08	5.13	5.12	5.14
37	3.74	4.56	5.13	5.54	5.6	5.77	6.02	6.38	6.53	6.48	6.83	7	7.2	7.18	7.45
38	3.04	3.7	4.29	4.77	4.88	4.95	5.25	5.54	5.68	5.81	5.85	5.85	5.86	5.85	6.05
39	3.35	4.76	5.09	5.67	5.9	6.19	6.16	6.67	6.78	6.99	6.74	6.96	7.22	7.31	7.21
40	3.05	4.22	5.1	5.67	5.75	5.91	6.15	6.45	6.52	6.72	6.95	7.08	7.13	7.24	7.37
41	3.69	5.02	5.72	6.28	6.72	7.07	7.39	7.48	7.85	8.04	8.1	8.18	8.23	8.24	8.39
42	3.43	4.44	5.03	5.52	6.09	6.44	6.68	6.86	7.15	7.37	7.42	7.6	7.64	7.8	7.92
43	3.07	4.65	5.39	5.93	6.35	6.6	6.93	7.13	7.39	7.49	7.7	7.85	7.87	7.89	8.05
44	3.8	4.95	5.71	6.07	6.34	6.59	6.37	6.87	7.23	7.25	7.41	7.52	7.74	7.72	7.74
45	3.32	4.66	5.51	5.97	6.26	6.5	6.78	6.88	7.02	7.19	7.32	7.36	7.48	7.53	7.62
46	3.3	4.67	5.43	5.94	6.34	6.58	6.74	6.91	7.06	7.27	7.26	7.39	7.61	7.6	7.76
47	3.29	4.64	5.43	5.76	6.18	6.3	6.69	6.91	6.95	7.09	7.37	7.5	7.5	7.49	7.59
48	3.62	4.79	5.65	6.31	6.46	6.96	6.95	7.29	7.44	7.47	7.6	7.51	7.77	7.82	7.81
49	3.31	4.59	5.29	6.06	6.27	6.76	6.81	7.02	7.19	7.41	7.22	7.56	7.59	7.89	7.81
50	3.52	4.69	5.44	5.89	6.38	6.53	6.8	7.04	7.18	7.32	7.47	7.55	7.66	7.57	7.72
51	3.61	4.69	5.46	5.79	6.26	6.56	6.96	7	7.1	7.35	7.51	7.53	7.85	7.79	8.02
52	3.47	4.53	5.27	5.83	6.19	6.4	6.61	6.79	6.87	7.06	7.21	7.28	7.44	7.49	7.57
53	3.39	4.3	5.36	5.72	6.11	6.35	6.57	6.57	6.89	7.02	7.28	7.4	7.65	7.6	7.83

8.2.2. rms-Werte in 10^{-3} [-]

Fließend Wasser

Fall	Minute															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.771	3.515	3.861	3.965	4.121	3.812	3.919	4.242	4.15	4.209	3.881	3.736	3.779	3.665	3.78	3.78
2	4.68	5.668	5.676	5.776	5.506	4.797	4.307	4.091	4.033	4.015	3.943	3.86	3.776	3.827	3.685	3.765
3	2.542	3.542	3.556	3.803	3.859	3.672	4.085	3.845	3.734	3.832	3.673	3.717	3.43	3.702	3.651	3.831
4	2.323	3.961	4.494	4.725	4.463	3.938	3.464	3.38	3.206	3.373	3.319	3.244	3.59	3.34	3.448	3.436
5	2.902	3.203	3.179	3.085	2.808	3.166	2.801	2.636	2.641	2.746	2.471	2.815	2.703	2.683	2.87	2.616
6	3.018	3.071	2.929	2.885	2.912	2.874	2.757	2.543	2.458	2.643	2.566	2.66	2.8	2.677	2.655	2.68
7	1.923	3.278	3.474	3.626	3.562	3.437	3.471	3.561	3.603	3.086	2.679	2.773	2.728	2.84	2.822	2.939
8	3.078	4.145	4.692	4.994	4.471	4.344	4.046	3.729	3.549	3.49	3.372	3.302	3.356	3.316	3.477	3.261
9	2.479	3.217	3.246	3.613	3.381	3.503	3.33	3.366	3.387	3.296	3.187	3.258	3.121	3.339	2.749	3
10	3.701	3.902	4.142	4.244	4.18	3.909	3.949	3.859	3.572	3.765	3.724	3.672	3.723	3.504	3.634	3.793
11	3.042	3.791	3.829	3.802	3.822	3.699	3.62	3.492	3.611	3.627	3.642	3.712	3.6	3.578	3.363	3.245
12	2.69	4.54	3.709	4.106	3.847	3.454	4.111	3.862	3.754	3.939	3.658	3.728	3.835	3.508	3.448	3.549
13	3.181	3.616	3.309	3.634	3.578	3.726	3.822	3.384	3.346	2.957	3.303	3.292	3.189	2.897	3.284	3.271
14	3.391	3.914	3.7	3.405	3.037	2.803	2.845	2.737	2.815	2.756	2.62	2.489	2.495	2.238	2.257	2.279
15	2.949	3.599	3.495	3.745	3.47	3.369	3.339	3.386	3.396	3.187	3.025	2.872	2.756	2.642	2.791	2.732
16	3.695	3.7	3.561	3.626	3.38	2.95	2.784	2.749	2.688	2.712	2.575	2.63	2.555	2.578	2.697	2.601
17	3.77	4.017	4.356	3.581	3.462	3.332	3.021	3.112	3.088	2.949	2.986	3.059	2.889	2.888	2.935	2.806
18	3.157	3.875	3.991	4.121	3.901	3.843	3.73	3.54	3.334	3.381	3.467	3.298	3.298	3.251	3.152	3.19
19	3.381	3.736	3.553	3.709	3.527	3.401	3.368	3.221	3.185	3.161	3.336	3.188	2.974	2.821	2.849	2.786
20	2.612	3.47	3.574	3.458	3.088	3.208	2.984	2.841	3.071	3.362	3.311	3.37	3.392	3.278	3.302	3.366
21	2.758	4.458	4.118	3.972	3.975	3.852	3.816	3.628	3.507	3.394	3.138	3.071	3.371	3.245	3.053	2.966
22	2.468	3.328	3.486	3.651	3.666	3.574	3.478	3.53	3.294	3.514	3.374	3.477	3.351	3.549	3.552	3.558
23	3.102	3.67	3.729	3.593	3.425	2.789	2.655	2.859	2.804	2.774	2.869	2.76	2.683	2.691	2.832	2.663
24	2.193	3.466	3.575	2.933	2.77	2.747	2.466	2.556	2.419	2.616	2.642	2.695	2.876	2.791	2.581	2.705
25	4.795	5.206	5.117	4.722	4.289	3.849	3.737	3.789	3.767	3.587	3.722	3.725	3.547	3.384	3.637	3.578
26	2.795	3.62	3.645	3.376	3.044	3.144	3.021	2.776	2.77	2.865	2.794	2.771	2.847	2.818	2.714	2.631
27	3.459	4.145	3.494	3.604	3.157	3.068	3.023	3.045	2.944	2.864	2.661	2.899	2.683	2.681	2.486	2.503
28	1.872	3.486	3.745	3.481	3.086	2.799	2.922	2.842	2.716	2.938	3.095	2.7	2.895	3.109	3.106	3.115
29	3.196	3.311	3.375	3.473	3.242	2.903	2.724	3.099	3.124	2.936	2.824	2.948	2.715	2.694	2.871	2.924
30	3.423	4.127	4.039	4.051	3.507	3.64	3.659	3.187	3.185	3.043	3.041	3.1	3.068	2.622	2.817	2.817
31	2.633	3.484	3.654	3.501	3.388	3.213	3.197	3.003	3.295	3.041	2.787	3.009	2.987	2.829	2.973	2.942
32	3.278	3.213	3.16	2.963	2.658	2.742	2.713	2.559	2.649	2.58	2.792	2.59	2.541	2.485	2.729	2.654
33	3.094	3.254	2.821	2.749	2.556	2.486	2.579	2.326	2.377	2.39	2.47	2.362	2.456	2.322	2.357	2.324
34	2.705	3.684	3.496	3.511	3.279	3.073	3.043	2.846	2.81	2.483	2.356	2.346	2.264	2.18	2.193	2.157
35	3.002	3.777	3.713	3.582	3.322	3.147	3.135	2.85	3.017	3.018	2.947	2.991	3.147	3.13	3.023	2.894
36	3.39	5.086	5.693	5.099	5.57	4.73	4.291	4.481	4.788	3.992	4.255	4.101	4.299	4.106	4.13	3.929
37	2.529	2.494	2.296	2.125	2.255	2.187	2.176	2.23	2.264	2.216	2.069	2.134	2.097	2.174	2.099	2.13
38	3.102	3.701	3.565	3.478	3.245	3.008	3.071	3.045	3.105	2.832	2.908	2.86	2.632	2.554	2.622	2.526
39	3.391	3.296	3.11	3.113	2.955	2.906	2.822	2.676	2.752	2.841	2.488	2.507	2.343	2.231	2.208	2.154
40	2.938	3.853	4.014	3.734	3.413	2.961	3.18	3.116	2.631	2.757	3.052	3.189	2.698	2.592	2.808	2.828
41	3.895	3.893	3.879	3.364	3.26	3.335	3.179	3.493	3.463	3.423	3.414	3.371	3.348	3.21	3.079	2.964
42	3.116	3.165	3.187	3.179	2.795	2.59	2.492	2.486	2.426	2.234	2.179	2.113	1.984	2.057	1.97	2.005
43	2.647	3.206	2.848	3.149	2.9	3.064	3.081	2.914	2.682	2.712	2.798	2.729	2.852	2.71	2.62	2.812
44	3.319	3.554	3.589	3.501	3.306	3.741	3.291	3.21	3.314	3.371	3.35	3.224	3.572	3.272	3.293	3.336
45	3.923	3.588	3.237	2.938	2.592	2.695	2.733	2.645	2.566	2.772	2.692	2.537	2.507	2.441	2.488	2.283
46	2.513	3.898	3.897	3.718	3.234	3.492	3.459	3.337	3.317	3.406	3.236	3.268	3.528	3.247	3.141	3.083
47	2.002	3.66	3.989	4.24	3.975	3.947	3.695	3.722	3.939	3.795	3.313	3.266	3.146	3.218	3.226	3.307
48	3.398	4.089	3.471	3.453	3.245	3.223	3.409	3.494	3.543	3.623	3.704	3.715	4.046	3.664	3.68	3.867
49	2.336	3.636	3.803	3.638	3.48	3.162	3.053	2.989	3.019	3.086	2.987	2.846	2.914	2.704	2.797	2.897
50	3.846	3.85	3.762	3.439	3.462	3.331	3.301	3.505	3.606	3.393	3.3	2.954	2.871	2.867	2.82	3.024
51	4.223	4.851	5.342	5.215	4.826	4.668	4.456	4.072	4.246	4.342	3.76	3.581	3.708	3.664	3.556	3.331
52	4.172	4.21	4.083	4.159	3.929	4.249	4.17	4.328	4.297	4.23	3.99	3.864	3.749	3.752	3.8	3.874
53	3.43	4.233	4.405	3.884	3.868	3.497	3.014	3.209	3.15	3.061	3.071	3.223	3.163	2.852	2.965	2.803

Spray

Fall	Minute															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.501	2.175	2.184	2.212	2.223	2.215	2.364	2.194	2.18	2.255	2.089	2.098	2.143	2.07	2.189	2.228
2	2.93	2.991	2.642	2.78	2.616	2.602	2.787	2.768	2.652	2.709	2.811	2.872	2.826	2.897	2.834	2.789
3	2.59	2.234	2.333	2.34	2.163	2.31	2.17	2.213	2.324	2.458	2.418	2.313	2.222	2.195	2.177	2.42
4	3.014	2.791	3.007	3.257	3.308	3.427	3.449	3.377	3.454	3.576	3.582	3.754	3.58	3.755	3.764	3.461
5	3.664	3.193	3.159	2.956	2.81	3.142	2.884	2.98	2.905	2.812	2.882	2.761	2.731	2.864	2.802	2.664
6	2.952	3.257	3.422	3.238	3.233	3.053	3.007	2.887	2.938	2.954	2.849	2.831	2.777	2.864	2.953	2.811
7	1.722	2.278	2.402	2.583	2.554	2.57	2.759	2.49	2.527	2.571	2.442	2.463	2.463	2.52	2.311	2.463
8	4.195	4.413	4.068	4.313	3.804	3.733	3.573	3.877	3.859	3.745	3.868	4.179	4.049	4.233	4.08	4.053
9	3.483	3.064	2.73	2.663	2.843	2.677	2.408	2.47	2.385	2.624	2.779	2.912	2.916	2.881	2.835	2.729
10	4.34	3.613	3.343	3.16	3.007	3.02	2.98	2.915	2.907	2.842	2.916	2.969	3.356	3.302	3.241	3.28
11	3.292	2.913	2.783	2.765	2.649	2.567	2.711	2.749	2.702	2.705	2.655	2.483	2.582	2.586	2.66	2.727
12	3.668	2.991	2.729	2.767	2.717	2.753	2.471	2.683	2.751	2.68	2.846	2.51	2.622	2.517	2.421	2.504
13	2.848	2.921	3.035	2.914	2.885	2.928	2.944	2.936	2.907	2.982	3.039	3.14	3.049	3.026	3.011	3.147
14	2.888	3.043	3.065	3.028	2.73	2.747	2.737	2.399	2.357	2.331	2.505	2.356	2.357	2.342	2.485	2.422
15	2.165	2.179	2.479	2.423	2.345	2.369	2.361	2.391	2.272	2.3	2.183	2.141	2.181	2.178	2.095	2.168
16	3.168	2.738	2.661	2.56	2.722	2.585	2.569	2.554	2.584	2.531	2.666	2.705	2.57	2.559	2.526	2.576
17	2.614	2.853	2.8	2.931	2.9	3.006	3.017	3.094	2.765	3.109	2.714	2.743	2.769	2.455	2.564	2.693
18	3.176	2.573	2.498	2.649	2.531	2.549	2.652	2.53	2.573	2.509	2.466	2.408	2.328	2.313	2.311	2.322
19	3.773	2.897	2.807	2.641	2.635	2.493	2.582	2.503	2.447	2.517	2.293	2.323	2.338	2.195	2.24	2.222
20	3.613	2.993	3.046	2.956	2.967	2.885	2.912	2.935	2.966	2.789	2.75	2.706	2.861	2.803	2.77	2.895
21	2.754	3.284	3.249	3.485	3.411	2.676	2.938	2.744	2.821	2.989	2.858	2.811	2.699	2.511	2.959	2.941
22	3.216	2.827	2.658	2.53	2.356	2.64	2.483	2.54	2.757	2.625	2.707	2.584	2.755	2.7	2.757	2.725
23	2.645	2.624	2.647	2.852	2.885	2.859	2.954	2.898	2.841	2.963	2.982	2.864	2.729	2.747	2.711	2.627
24	3.323	3.131	2.952	2.836	2.911	2.81	2.867	2.77	3.107	2.954	2.974	3.022	3.024	2.94	2.741	2.872
25	3.557	3.003	2.956	2.916	2.78	2.955	2.853	2.868	3.109	2.968	2.831	2.821	2.675	2.704	2.476	2.762
26	3.472	3.436	3.972	4	3.616	3.82	3.214	3.27	3.39	3.261	3.289	3.115	3.225	3.139	3.174	3.208
27	4.031	3.198	3.419	2.876	3.005	2.975	3.08	2.859	3.113	2.866	3.058	3.085	3.087	2.883	2.973	3.053
28	2.791	2.728	2.495	2.621	2.593	2.314	2.29	2.282	2.54	2.57	2.603	2.713	2.66	2.498	2.482	2.643
29	2.896	3.054	2.876	2.735	2.641	2.687	2.577	2.531	2.558	2.549	2.469	2.542	2.434	2.374	2.452	2.479
30	3.359	3.653	3.874	3.276	3.397	2.988	3.332	2.842	3.438	3.134	3.226	3.073	2.894	3.119	2.891	2.948
31	2.863	2.599	2.552	2.618	2.548	2.614	2.641	2.6	2.619	2.564	2.462	2.417	2.379	2.335	2.377	2.451
32	3.404	3.348	3.386	3.639	3.496	3.22	3.277	3.305	3.114	3.21	3.264	3.267	3.177	3.23	3.136	3.068
33	2.98	2.687	2.786	2.874	2.786	2.831	2.657	2.655	2.696	2.602	2.629	2.592	2.547	2.527	2.555	2.51
34	2.488	3.351	3.21	3.035	2.722	2.923	2.637	2.761	2.928	2.597	2.489	2.672	2.463	2.633	2.653	2.637
35	3.175	2.806	2.759	2.755	2.69	2.65	2.662	2.877	2.503	2.496	2.569	2.641	2.646	2.624	2.711	2.756
36	2.823	3.413	2.825	3.166	2.731	2.928	2.759	2.707	2.51	2.506	2.425	2.403	2.323	2.335	2.276	2.254
37	3.231	2.344	2.374	2.268	2.373	2.362	2.531	2.488	2.453	2.296	2.267	2.16	2.197	2.197	2.231	2.245
38	2.602	3.464	3.635	3.551	3.401	3.129	3.005	3.209	3.081	3.127	3.148	3.002	2.875	2.872	2.789	2.829
39	3.72	2.578	2.791	2.622	2.714	2.663	2.471	2.574	2.538	2.609	2.38	2.405	2.339	2.372	2.32	2.408
40	4.203	3.925	4.352	4.351	4.75	4.48	4.414	3.914	4.079	4.059	3.707	3.724	3.81	3.995	3.663	3.726
41	3.13	2.907	3.12	3.154	2.982	2.878	2.912	2.995	2.892	2.873	2.826	2.75	2.737	2.718	2.657	2.695
42	2.916	2.508	2.555	2.718	2.724	2.7	2.522	2.574	2.63	2.537	2.534	2.449	2.425	2.457	2.403	2.397
43	3.383	2.927	3.134	3.166	3.112	3.119	3.025	3.021	3.049	2.995	2.944	2.886	2.875	2.844	2.816	2.783
44	3.293	3.035	2.933	3.013	3.021	2.825	2.87	2.7	2.901	2.85	2.818	2.774	2.81	2.882	2.863	2.859
45	3.424	2.918	2.612	2.732	2.673	2.61	2.62	2.627	2.52	2.643	2.588	2.567	2.607	2.573	2.55	2.571
46	3.367	3.527	3.675	3.803	3.63	3.866	3.816	3.061	3.211	3.15	3.147	3.057	3.112	3.14	3.178	3.184
47	2.582	3.123	3.382	3.432	3.33	3.38	3.445	3.383	3.413	3.552	3.573	3.549	3.313	3.351	3.266	3.168
48	4.417	4.129	4.506	4.565	4.554	4.541	4.909	4.98	5.117	5.031	4.66	4.438	4.072	3.938	3.919	3.884
49	3.054	2.13	2.061	2.011	2.117	2.067	2.168	2.181	2.224	2.237	2.427	2.314	2.195	2.245	2.222	2.13
50	3.274	2.865	2.783	2.71	2.733	2.684	2.679	2.744	2.752	2.727	2.74	2.662	2.605	2.565	2.556	2.589
51	4.524	3.819	4.011	3.851	3.558	3.478	3.491	3.496	3.65	3.214	3.269	3.229	3.206	3.289	3.273	3.231
52	3.307	3.246	3.226	3.31	3.227	3.166	3.104	2.804	2.901	2.811	2.847	2.755	2.747	2.814	2.678	2.678
53	3.271	3.595	3.631	3.623	3.594	3.467	3.568	3.565	3.47	3.553	3.605	3.433	3.595	3.579	3.602	3.739

8.2.3. Ohrtemperaturen in [°C]

Fließend Wasser

Fall	Minute															Steigung °C/min	Differenz Minute 15-0	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15
1	37	37	36.4	36.7	36.5	36.6	36.9	36.7	36.7	37.3	36.8	37.3	37.1	37.2	37	37.2	0.0341	0.2
2	37.4	37.2	37.3	37.4	37.2	37.6	37.6	37.7	37.7	37.7	37.7	37.7	37.8	37.8	37.8	37.8	0.0400	0.4
3	36.8	36.9	37.1	37.2	37	37.2	37.1	36.9	36.9	36.8	37.2	37.6	37.1	36.9	37.3	37.5	0.0234	0.7
4	37	36.4	36.8	37.1	36.8	37.3	37.3	37.2	37.4	37.3	37.2	37.4	37.3	37.5	37.5	37.4	0.0496	0.4
5	36.8	37.1	37.1	37.1	37.2	37.1	37	37.3	37.2	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.3	37.4	0.0318	0.6
6	37.5	37.5	37.7	37.5	37.5	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.7	37.6	37.6	0.0062	0.1
7	37	36.9	37	37	37	36.6	37	36.8	37	37	37	37	37	37	37.1	37.2	0.0115	0.2
8	37.3	37.2	37.3	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	37.4	37.3	37.4	37.4	37.4	37.5	37.5	37.6	0.0212	0.3
9	37	37.1	37.1	37.2	37.3	37.3	37.1	37.2	37.3	37.2	37.3	37.2	37.3	37.4	37.4	37.4	0.0203	0.4
10	37.5	37.4	38.1	37.8	37.8	38.1	38.3	38.4	38	38	38	37.9	38	38.2	38	38	0.0251	0.5
11	37.3	37	37.1	37.1	37.1	37.1	37.2	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	37.2	37.2	37.2	37.2	0.0081	-0.1
12	36.7	36.5	37.1	37	36.9	37.1	37.3	37.6	38	37.9	37.9	38.2	38.1	38.1	38.2	38.3	0.1210	1.6
13	37	36.9	37	37	37	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	0.0246	0.3
14	37	36.7	36.6	36.6	36.7	36.7	36.7	36.8	36.8	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.9	37	0.0107	0
15	36.9	36.8	36.5	36.3	36.5	37.2	37.5	37.5	37.6	37.6	37.7	37.8	37.8	37.8	37.9	37.7	0.0972	0.8
16	37.6	37.4	37.3	37.4	37.4	37.4	37.5	37.4	37.3	37.8	37.8	37.6	37.8	37.6	37.6	37.7	0.0224	0.1
17	37.4	37.4	37.6	37.5	37.9	37.6	37.6	37.7	37.7	37.7	37.7	37.6	37.6	37.6	37.6	37.7	0.0099	0.3
18	37.2	37.3	37.5	37.5	37.9	38	37.6	37.4	37.9	37.4	37.4	37.6	37.6	37.6	37.6	37.7	0.0121	0.5
19	37.1	36.8	37.3	37.1	38	37.1	37.1	38.3	38	38.5	37.6	38.8	38.8	38.8	38.5	38.2	0.1212	1.1
20	36.8	36.8	36.8	36.8	36.9	36.9	36.8	36.9	36.9	36.8	37	37	36.9	37	36.9	37	0.0126	0.2
21	37.2	37.1	37	37.1	37.1	37.1	37.3	37.2	37.2	37.1	37.2	37.4	37.2	37.4	37.5	37.3	0.0206	0.1
22	37	36.9	37	36.7	36.7	36.9	36.8	36.9	37.1	36.9	36.9	37.2	37.1	37	37.3	37.3	0.0254	0.3
23	37	37	37.3	37.2	37.1	37.1	37.2	37.3	37.5	37.2	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	0.0263	0.4
24	36.8	36.7	36.7	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	37.1	37	36.9	36.9	0.0196	0.1
25	36	36.3	35.5	36.1	35.6	34.6	35	35.3	34.8	35.2	34.7	35.1	34.9	35.8	35.2	35.3	-0.0518	-0.7
26	36.5	36.9	37.2	37.5	37.3	37.4	37.4	37.4	37.3	37.5	37.2	37.6	37.9	37.7	37.6	37.8	0.0574	1.3
27	36.8	37.1	36.8	36.8	37.1	37.5	37.9	37.9	38	38	38	37.9	38.4	38	38	38.3	0.1034	1.5
28	36.7	36.6	36.7	36.7	36.6	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	0.0029	0
29	37.3	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.3	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.1	-0.0046	-0.2
30	37.1	37.5	37.4	37.3	37.3	37.3	37.6	38	37.8	38	37.9	38.2	38.3	38.2	38.2	38.5	0.0856	1.4
31	37.1	37.4	37.4	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.7	37.6	37.5	37.6	37.6	37.6	37.3	37.6	0.0154	0.5
32	36.6	36.7	36.7	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	37	36.9	37.2	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	0.0468	0.7
33	37.1	37	36.9	37	37.1	37	37.2	37	37.2	37.2	37.3	37.5	37.4	37.4	37.3	37.3	0.0301	0.2
34	36.7	36.7	36.7	36.8	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.9	36.9	37	36.9	36.9	0.0172	0.2
35	37.5	37.2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.4	37.3	37.4	37.4	37.4	37.4	37.5	37.5	37.5	0.0124	0
36	37.2	37.1	37.1	37	37	37.1	37.1	37.1	37.1	37	37	36.9	37	37	37	37.1	-0.0079	-0.1
37	37	37.5	37	37	37.7	36.9	37.2	37.2	37.3	37.8	37.3	37.2	37.3	37.4	37.6	37.7	0.0284	0.7
38	36.6	37	37	36.9	37	37.1	37.1	37.1	37.2	37.2	37.1	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	0.0269	0.6
39	37.2	37.3	37.3	37.2	37.3	37.2	37.4	37.3	37.4	37.4	37.5	37.4	37.4	37.5	37.5	37.5	0.0197	0.3
40	36.9	37	37.2	37	36.8	37.4	37.1	37.2	37.1	37.4	37.3	37.1	37.3	37.5	37.3	37.5	0.0313	0.6
41	37	36.9	36.9	36.9	37	37.1	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	37.2	37.3	0.0279	0.3
42	37	36.7	36.8	36.8	36.8	36.8	36.7	36.9	36.8	36.9	36.6	36.8	36.9	36.9	37	37	0.0079	0
43	37.4	37.5	37.5	37.4	37.5	37.4	37.5	37.5	37.5	37.5	37.6	37.6	37.7	37.7	37.7	37.7	0.0201	0.3
44	36.9	37.1	37	37.1	37.3	37.2	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	37.2	37.3	37.2	37.2	0.0159	0.3
45	36.5	37	36.9	37	37	37.1	37.2	37.1	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.4	0.0400	0.9
46	37.4	37.3	37.3	37.3	37.4	37.4	37.4	37.5	37.5	37.5	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	0.0229	0.2
47	37.6	37.4	37.4	37.4	37.3	37.4	37.4	37.4	37.4	37.5	37.5	37.4	37.6	37.6	37.6	37.6	0.0134	0
48	37.4	37.4	37.5	37.3	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.3	37.3	37.3	-0.0060	-0.1
49	37.2	37	37	37.1	37	37.1	37.2	37.3	37.3	37.3	37.3	37.4	37.4	37.4	37.4	37.3	0.0263	0.1
50	36.3	37.3	36.7	36.2	36	36.2	35.7	35.7	36	36.2	36.2	36.6	36	36.2	37.3	37.4	0.0224	1.1
51	36.8	36.7	36.6	36.8	36.8	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.8	36.7	36.8	0.0009	0
52	37.3	37	37.1	37	37	37.1	37.1	37.2	37.1	37.1	37.1	37.2	37.3	37.3	37.2	37.2	0.0113	-0.1
53	37.4	37.3	37.1	37.1	37.2	37.4	37.3	37.4	37.2	37.4	37.5	37.5	37.5	37.4	37.5	37.2	0.0224	-0.2

Ohrtemperaturen [°C]

Spray

Minute

Nr.	Minute															Steigung °C/min	Differenz Minute 15-0		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15	
1	37.3	37.5	37.4	37.5	37.5	37.7	37.7	37.8	37.9	37.8	37.9	37.9	38	38	37.8	37.8	0.0393	0.5	
2	36.7	36.6	36.7	36.6	36.7	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.7	36.7	36.7	36.7	36.8	36.8	0.0078	0.1	
3	37.3	37.3	37.5	37.7	37.4	37.3	37.5	37.4	37.4	37.4	37.7	37.6	37.8	37.7	37.9	37.5	0.0250	0.2	
4	36.7	36.5	36.7	36.7	36.7	36.6	36.7	36.4	36.8	36.9	36.8	37.1	37	36.5	37.1	37	0.0259	0.3	
5	37.1	36.5	36.7	37.4	37.4	37.4	37.4	36.5	37.7	37.1	37.6	37.7	37.7	37.7	37.7	37.8	0.0635	0.7	
6	37.7	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.9	37.8	37.8	37.9	37.9	37.8	37.9	37.9	0.0088	0.2	
7	36.9	37	37.2	37.1	37	36.9	37.1	36.9	37.2	37.2	37.1	37.1	37	37.1	37.1	37	0.0046	0.1	
8	36.6	36.6	36.6	36.6	36.6	36.6	36.6	36.6	36.7	36.7	36.7	36.8	36.8	36.9	36.8	36.9	0.0213	0.2	
9	37.3	37.3	37.3	37.4	37.3	37.4	37	37.4	37.5	37.3	37.8	37.5	37.6	37.6	37.5	37.6	0.0244	0.3	
10	37.8	37.8	37.7	37.6	37.6	37.6	37.5	37.8	37.9	37.7	37.8	38.1	38.2	38	38.2	38.2	0.0369	0.4	
11	37.4	37.2	37.2	37.1	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	37.3	37.4	37.3	37.1	0.0029	-0.3	
12	36.8	36.7	36.9	36.7	37	37.1	37.2	37.5	37.7	37.5	37.5	37.5	37.6	37.6	37.2	37.7	0.0624	0.9	
13	36.7	36.6	36.7	36.9	36.6	36.8	37.1	37.4	37.3	37.4	37.3	37.3	37.1	37.5	37.5	37.3	0.0581	0.6	
14	36.6	36.4	36.5	36.8	36.6	36.6	36.5	36.6	36.6	36.6	36.6	36.7	36.6	36.7	36.7	36.7	0.0100	0.1	
15	37.3	37.2	37.2	37.1	37.1	37.3	37.2	37.2	37.3	37.2	37.3	37.3	37.2	37.2	37.2	37.3	0.0035	0	
16	37.3	37.1	37.1	37.1	37.1	37	37.1	37.1	37.1	37.2	37.1	37.2	37.1	37.2	37.3	37.3	0.0076	0	
17	36.8	36.9	37	36.9	37.1	36.9	37	37	36.6	36.9	37	37	37	37	37	37.1	0.0085	0.3	
18	36.9	36.7	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	37	37	37.1	0.0200	0.2	
19	37.4	37.3	37.4	37.4	37.4	37.5	37.6	37.6	37.8	37.6	37.6	37.5	37.7	37.8	37.9	37.5	0.0262	0.1	
20	36.6	36.7	36.6	36.5	36.6	36.6	36.7	36.7	36.7	36.7	36.8	36.7	36.8	36.8	36.8	36.8	0.0160	0.2	
21	36.4	36.3	36.3	36.4	36.3	36.3	36.4	36.5	36.4	36.4	36.5	36.5	36.5	36.6	36.7	36.6	0.0216	0.2	
22	36.5	36.3	36.4	36.3	36.1	36.3	36.2	36.3	36.3	36.3	36.5	36.4	36.4	36.4	36.5	36.4	0.0079	-0.1	
23	37	36.8	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	37	37	36.5	37.1	37.1	37	37.1	37.1	0.0149	0.1	
24	37.3	36.9	37.1	37.1	37.2	37.2	37.2	37.3	37.3	37.2	37.2	37.2	37.2	37.3	37.2	37.3	0.0103	0	
25	37	36.7	37.1	37.2	37.2	37.1	37.3	37.2	37	37.4	37.4	37.2	37.4	37.1	37.6	37.5	0.0332	0.5	
26	36.5	36.9	36.7	36.7	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	36.8	37	37.2	37	37.2	37.3	37.2	0.0396	0.7	
27	37.5	37.6	37.4	37.7	37.5	37.5	37.7	37.8	38	37.9	38	38	38	38	37.9	37.7	0.0338	0.2	
28	36.7	36.6	36.6	36.6	36.6	36.7	36.6	36.6	36.6	36.6	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.6	0.0037	-0.1	
29	37.2	37.2	37.3	37.3	37.2	37.3	37.4	37.3	37.4	37.5	37.4	37.4	37.4	37.5	37.4	37.5	0.0184	0.3	
30	37.1	37.3	37.2	37.6	37.5	37.6	37.6	37.7	37.9	38	38	37.9	38	38	38.2	38.1	0.0666	1	
31	36.8	37.1	37.1	37.1	37.1	37.3	37.2	37.3	37.2	37.3	37.3	37.4	37.4	37.3	37.4	37.4	0.0296	0.6	
32	36.9	36.9	36.9	36.9	36.8	36.8	36.9	36.9	36.8	36.8	36.8	36.8	36.9	36.8	36.8	36.8	-0.0063	-0.1	
33	36.7	36.6	36.8	36.7	36.9	36.9	37	37	37	37.1	37.1	37.1	37.2	37.4	37.3	37.3	0.0469	0.6	
34	36.6	36.7	36.8	36.9	36.9	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	36.8	37	36.8	36.9	36.9	37	0.0140	0.4	
35	37	36.9	36.8	36.8	36.8	36.8	36.9	36.8	36.9	36.9	37	36.9	36.9	36.9	37	37	0.0075	0	
36	37	36.8	36.8	36.7	36.8	36.8	36.9	37	37	37	37	37	37	37.1	37.1	37.1	0.0199	0	
37	36.9	36.9	36.7	36.9	36.7	36.9	36.9	36.9	37	37	37	37.2	37.2	37.3	37.1	37.3	0.0328	0.4	
38	36.7	37	37.1	37.1	37.2	37.2	37.2	37.1	37.1	37.2	37.2	37.2	37.1	37.2	37.4	37.3	0.0225	0.6	
39	37.3	37.4	37.2	37.3	37.3	37.3	37.4	37.4	37.4	37.3	37.3	37.3	37.4	37.4	37.4	37.4	0.0072	0.1	
40	37.1	36.7	36.9	36.9	37	36.9	36.8	37.2	36.9	37	37.4	37.2	37.3	37.4	37.5	37.5	0.0437	0.4	
41	37.2	36.8	36.8	36.8	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	-0.0071	-0.4	
42	37	36.8	36.7	36.8	36.8	36.9	36.7	36.7	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.7	36.7	36.8	36.9	-0.0037	-0.1
43	37.5	37.5	37.5	37.6	37.6	37.6	37.7	37.6	37.6	37.6	37.6	37.7	37.6	37.6	37.6	37.7	0.0085	0.2	
44	36.7	36.8	36.6	36.7	36.8	36.8	36.9	36.8	36.7	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	0.0143	0.2	
45	36.8	36.7	36.6	36.6	36.6	36.5	36.6	36.7	36.7	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	0.0218	0.1	
46	37.1	37.2	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	37.2	37.3	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	-0.0009	0	
47	37.2	37	37	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	37	37.1	37	36.9	36.7	36.9	37	-0.0082	-0.2	
48	37.5	37.3	37.4	37.5	37.3	37.4	37.4	37.5	37.3	37.3	37.4	37.4	37.5	37.3	37.4	37.4	-0.0016	-0.1	
49	37	36.8	36.7	36.8	36.8	36.8	36.9	36.8	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	0.0056	-0.1	
50	37.7	37.4	37.3	37.1	37	37.5	36.7	36.7	38	37.5	37.7	37.8	37.8	38.3	38.7	38.1	0.0743	0.4	
51	36.5	36.3	36.3	36.3	36.3	36.3	36.3	36.4	36.4	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.6	0.0163	0.1	
52	37	36.7	36.7	36.6	36.7	36.7	36.8	36.8	36.9	36.9	36.9	37	37	36.9	36.9	37	0.0175	0	
53	37.9	37.8	37.9	37.7	37.8	37.8	37.7	37.6	37.7	37.8	38	37.7	37.8	37.8	37.9	37	0.0004	-0.9	

8.3. Abkürzungen, Sonderzeichen, Einheiten, Konstanten

8.3.1. Abkürzungen

ARDS	acute (adult) respiratory distress syndrome
ASCII (Dateiformat)	american standard code for information interchange
BG	Berufsgenossenschaft
BMI	Body Mass Index
CAFS	compressed air foam system
CMBR	cosmic microwave background radiation
COBE	cosmic background explorer
FOCI	fiber optic confocal imaging
KOF	Körperoberfläche
KTW	Krankentransportwagen
NASA	national aeronautics and space administration
NaN	not-a-number
<i>rms</i>	root mean square = quadratisches Mittel
RTW	Rettungstransportwagen
SD	standard deviation / Standardabweichung
Txt (Dateiformat)	Text-Datei
WMAP	Wilkinson microwave anisotropy probe
Xe	Xenon

8.3.2. Sonderzeichen

°	Grad
Σ	Summenzeichen
®	eingetragenes Warenzeichen

8.3.3. Physikalische Einheiten

neben den SI-Einheiten wurden folgende Einheiten verwendet

C	Celsius
h	Stunde
J	Joule
kJ	Kilojoule
min	Minute

ml	Milliliter
l	Liter

8.3.4. griechische Buchstaben

α	Irrtumswahrscheinlichkeit
δ	Differenz global (delta)
Δ	Differenz Einzelwerte (Delta)
λ	Wellenlänge (lambda)
σ	Standardabweichung (sigma)

8.3.5. Variablen

i	Pixel
n	Anzahl
S	Strahlungsspektrum
T	Temperatur

8.3.6. Konstanten

$c = 2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
$e = 2,718$	EULER´sche Zahl
$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$	PLANCK´ches Wirkungsquantum
$k = 1,439 \times 10^{-2} \text{ m K}$	BOLTZMANN´sche Konstante
$w = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$	WIEN´sche Verschiebungskonstante

$$c_1 = 2 h c^2$$

$$c_2 = h c k^{-1}$$

9. Literaturverzeichnis

1. Angermann A, Beuschel M, Rau M, Wohlfarth U. Matlab - Simulink - Stateflow. 2. Auflage ed. München: Oldenbourg-Verlag, 2003.
2. Blomgren I, Eriksson E, Bagge U. Effect of cold water immersion on oedema formation in the scalded mouse ear. *Burns Incl Therm Inj* 1982;9:17-20.
3. Blomgren I, Eriksson E, Bagge U. The effect of different cooling temperatures and immersion fluids on post-burn oedema and survival of the partially scalded hairy mouse ear. *Burns Incl Therm Inj* 1985;11:161-5.
4. Boykin JV, Jr., Crute SL. Mechanisms of burn shock protection after severe scald injury by cold-water treatment. *J Trauma* 1982;22:859-66.
5. Boykin JV, Jr., Eriksson E, Sholley MM et al. Histamine-mediated delayed permeability response after scald burn inhibited by cimetidine or cold-water treatment. *Science* 1980;209:815-7.
6. Boykin JV, Jr., Eriksson E, Sholley MM et al. Cold-water treatment of scald injury and inhibition of histamine-mediated burn edema. *J Surg Res* 1981;31:111-23.
7. British Burn Association.2007., BBA. 2007.
<http://www.britishburnassociation.co.uk>
8. Bruck J, Müller F, Steen M. Handbuch der Verbrennungstherapie. In: Bruck J, ed. Handbuch der Verbrennungstherapie. Landsberg: ecomed Verlagsgesellschaft, 2002.
9. Castner Th, Bayerl E. Temperaturmonitoring bei der Kühlung von Brandverletzungen. *Rettungsdienst* 2000;23:28-31.
10. Davies JW. Prompt cooling of burned areas: a review of benefits and the effector mechanisms. *Burns Incl Therm Inj* 1982;9:1-6.

11. de Camara DL, Raine T, Robson MC. Ultrastructural aspects of cooled thermal injury. J Trauma 1981;21:911-9.
12. Demling RH, Mazess RB, Wolberg W. The effect of immediate and delayed cold immersion on burn edema formation and resorption. J Trauma 1979;19:56-60.
13. Deutsche Gesellschaft für Verbrennungsmedizin, Leitlinie der AWMF 2005. <http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/II/044-001.htm>
14. Gunning KA, Sugrue M, Sloane D et al. Hypothermia and severe trauma. Aust N Z J Surg 1995;65:80-2.
15. Harasawa K, Kemmotsu O, Mayumi T et al. Comparison of tympanic, esophageal and blood temperatures during mild hypothermic cardiopulmonary bypass: a study using an infrared emission detection tympanic thermometer. J Clin Monit 1997;13:19-24.
16. Heimann G. Verbrennungen und Verbrühungen. In: v.Harnack, Koletzko, eds. Kinderheilkunde und Jugendmedizin. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 1997;10.Auflage:646-7.
17. International Society of Burn Injuries, ISBI . 2005. <http://www.worldburn.org/>
18. Jakobsson OP, Arturson G. The effect of prompt local cooling on oedema formation in scalded rat paws. Burns Incl Therm Inj 1985;12:8-15.
19. Jandera V, Hudson DA, de Wet PM et al. Cooling the burn wound: evaluation of different modalities. Burns 2000;26:265-70.
20. Jauch K-W, Ruf S. Der Brandverletzte. In: Madler C, Jauch K-W, Werdan K, eds. Das NAW-Buch. München: Urban&Schwarzenberg, 1999;2. Auflage:671-83.
21. King TC, Zimmerman JM. Optimum temperatures for postburn cooling. Arch Surg 1965;91:656-7.

22. Klußmann FW. Wärmehaushalt und Temperaturregulation. In: Deetjen P, Speckmann E-J, eds. Physiologie. München: Urban & Fischer, 1999;3.Auflage:501-20.
23. Latarjet J, Foyatier JL, Faure M. [Immediate water cooling. Emergency treatment of burns]. Ann Dermatol Venereol 1990;117:415-6.
24. Lonneckner S, Schoder V. [Hypothermia in patients with burn injuries: influence of prehospital treatment]. Chirurg 2001;72:164-7.
25. Moserová J, Behouňková E. Subcutaneous temperature measurements in a thermal injury. Burns 1975;1:267-9.
26. Mühlendahl KEv. Verbrennungen, Verbrühungen. In: Niessen K-H, ed. Pädiatrie. Stuttgart: Thieme Verlag, 2001;645-6.
27. Muntau A. Kinderchirurgie und Kinderorthopädie. In: Muntau A, ed. Intensivkurs Pädiatrie. München: Urban und Schwarzenberg, 1994;1. auflage:625-8.
28. Nguyen NL, Gun RT, Sparnon AL et al. The importance of immediate cooling-- a case series of childhood burns in Vietnam. Burns 2002;28:173-6.
29. Ofeigsson OJ, Mitchell R, Patrick RS. Observations on the cold water treatment of cutaneous burns. J Pathol 1972;108:145-50.
30. Phoenix Deutschland, Hilfe für Brandverletzte e. V., Brandheiss . 2003. www.phoenix-deutschland.de
31. Raine TJ, Heggors JP, Robson MC et al. Cooling the burn wound to maintain microcirculation. J Trauma 1981;21:394-7.
32. Rotello LC, Crawford L, Terndrup TE. Comparison of infrared ear thermometer derived and equilibrated rectal temperatures in estimating pulmonary artery temperatures. Crit Care Med 1996;24:1501-6.
33. Sawada Y, Urushidate S, Yotsuyanagi T et al. Is prolonged and excessive cooling of a scalded wound effective? Burns 1997;23:55-8.

-
34. Thierbach A. Thierbach A, ed. Lexikon der Notfallmedizin. Springer, 2002.
 35. Tränkler H-R. Messtechnik. In: Czichos HaVHeV, ed. HÜTTE - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Berlin: Springer, 2000;31:H 37-H39.
 36. Vo LT, Anikijenko P, McLaren WJ et al. Autofluorescence of skin burns detected by fiber-optic confocal imaging: evidence that cool water treatment limits progressive thermal damage in anesthetized hairless mice. J Trauma 2001;51:98-104.
 37. Wallrabe A. Wallrabe A, ed. Nachtsichttechnik. 1.Auflage ed. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 2001.
 38. Water-Jel Technologies Llc., WaterJel Produktinformation. 2005.
www.waterjel.de
 39. Ziegenfuß T. Traumatologische Notfälle. In: Ziegenfuß T, ed. Checkliste Rettungsmedizin. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1997;511-6.

Nachwort

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Hervorzuheben sind:

PD Dr. med. Stefan Piltz, der das Thema zur Promotion annahm und es mir somit ermöglichte, meine Idee in eine wissenschaftliche Studie umzusetzen.

Dr. med. Johannes Zaspel, der sich spontan als promovierter Mitbetreuer zur Verfügung stellte. Sowohl seine fachliche Kompetenz als auch seine Unterstützung bei allen Formalia, der Organisation und der Finanzierung trugen maßgeblich zum erfolgreichen Ablauf dieser Arbeit bei.

Die Herren Dipl.-Ing. Christian Peter Renk und Dipl.-Wi.-Ing. Massimo Genoese, die bei wissenschaftlichen und technischen Fragen oft eine große Hilfe waren und mir stets mit freundschaftlichem Rat zur Seite standen.

Dipl.-Ing. Michael Tischer, dessen MATLAB-Kenntnisse die sehr eleganten Berechnungen der Thermographie-Daten ermöglichte.

Dr. rer. nat. Francisco Shu Kitaura Joyanes, der mir die entscheidenden Hinweise hinsichtlich der Fluktuationsberechnungen gab.

Michael Schmidt vom IBE Großhadern, der mich bei der statistischen Auswertung beriet.

Die Firma INFRATEC (Dresden), die durch äußerst günstige Konditionen den Einsatz der Thermographie ermöglichte. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang Dipl.-Ing. Jürgen Fiebig, der dieses Projekt sehr engagiert und persönlich betreute.

Die Dr. Schumacher GmbH (Melsungen), die mir die Pumpzerstäuber zur Verfügung stellte.

Die Firma MKT-OHG (München), die durch die Leihgabe der Rettungsdiensttrage den Studienaufbau der Realität noch näher kommen ließ.

Allen Probanden, die unentgeltlich bei diesem Projekt mitwirkten, gebührt mein besonderer Dank. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht zu realisieren gewesen.

Curriculum vitae

Name	Hein Martin Schnell
Geburtsdatum	13.11.1978
Geburtsort	Bad Friedrichshall, Deutschland
Eltern	Dr. med. Anita Maria Elisabeth Pecoroni-Schnell Dr. med. Gerhard Heinrich Schnell

Schulbildung

1985-1986	Grundschule Bad Wimpfen
1986-1989	Grundschule Baden-Baden
1989-1998	Markgraf-Ludwig-Gymnasium, Baden-Baden Leistungskurse: Mathematik, Musik

Staatsdienst

07.1998-07.1999	Zivildienst, Rettungshelfer und -sanitäter in Baden-Baden
-----------------	---

Medizinischer Werdegang

07.1998-03.2001	Ausbildung zum Rettungsassistenten
05.2000-10.2006	Studium der Humanmedizin an der LMU München Studienbegleitende Nebentätigkeit als Rettungsassistent
10.2005-08.2006	Praktisches Jahr

Anästhesie

- Intensiv Care Unit, Cairns Base Hospital, Australien
- Anesthesiologia, Hospital Civil de Guadalajara, Mexiko

Innere Medizin

- Rheumatology, Tripoli Medical Center, Libyen
- Urgences, Hôpital Saint Roch, CHU de Nice, Frankreich

Chirurgie

- Allgemeinchirurgie, Kantonspital Luzern, Schweiz

seit 04.2007	Assistenzarzt Unfallchirurgie, BG-Unfallklinik Murnau
--------------	---