

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE



**Untersuchungen zur
Reduzierung der thermo-
physiologischen und
psychologischen Belastung für
Einsatzkräfte durch
Feuerwehrschutzkleidung**

200

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 200

**Untersuchungen zur Reduzierung der thermo-physiologischen
und psychologischen Belastung für Einsatzkräfte durch Feuer-
wehrschutzkleidung**

von

Dr. rer. nat. Sandra Wegner
Christoph Vogel, M. Sc.
Dr.-Ing. Daniel Butscher
Dr.-Ing. Michael Neske

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr -

Heyrothsberge
Oktober 2022

BERICHTS-KENNBLATT

BERICHTSNUMMER: 200	TITEL DES BERICHTES: Untersuchungen zur Reduzierung der thermo-physiologischen und psychologischen Belastung für Einsatzkräfte durch Feuerwehrsutzhkleidung	ISSN: 0170-0060	
AUTOREN: Dr. rer. nat. Sandra Wegner Christoph Vogel, M. Sc Dr.-Ing. Daniel Butscher Dr.-Ing. Michael Neske		DURCHFÜHRENDE INSTITUTION: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Biederitzer Straße 5 D-39175 Biederitz, OT Heyrothsberge Direktor: i.V. Buchaly	
NUMMER DES AUFTRAGES: 100 (2/2019) IdF		AUFTRAG GEBENDE INSTITUTION: Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
DATUM DES BERICHTES: Juni 2022			
SEITENZAHL: 67	BILDER: 12	TABELLEN: 14	LITERATURVERWEISE: 64
<p>KURZFASSUNG:</p> <p>Die Aufgaben der Feuerwehr erfordern u. a. einen adäquaten Schutz der Einsatzkräfte durch angemessene Schutzkleidung. Diese muss vor den äußeren Gefahren, die auf die Träger einwirken, aber auch vor Überhitzung durch Körperwärme schützen. Die Überhitzungsgefahr wird vor allem in heißer, mit Wasserdampf gesättigter Luft verstärkt. Die Kleidung muss die am Körper entstehende Feuchtigkeit und Wärme nach außen transportieren können, damit es nicht zum Hitze- und Feuchtigkeitsstau unter der Kleidung kommt. In einer Literaturrecherche wurde der aktuelle Forschungsstand zum Heatstress bei Feuerwehrsutzhkleidung recherchiert. Der Einfluss der einzelnen Lagen der Kleidung und ihre Eigenschaften wurden herausgearbeitet. Des Weiteren wurden andere Maßnahmen zur Hitzestressreduzierung, wie geeignete Unterbekleidung und Hand-Cooling, erarbeitet. Im nächsten Schritt wurde Einsatzkleidung mit einem breiten Spektrum an Oberstoff-, Membran- und Futterstoffkombinationen in Laboruntersuchungen bezüglich Wärmedurchgang bei Strahlung und Flamme, Wasserdampfdurchgangswiderstand und Pufferwirkung von flüssigem Schweiß getestet. Ausgewählte Kombinationen wurden in verschiedenen Tragetests mit Feuerwehrangehörigen überprüft. Die Datenerfassung hierbei wurde mit einem Fragebogen vorgenommen. Es zeigte sich, dass bei verschiedenen Szenarien die gewählte Bekleidung nur geringe Unterschiede im Heatstress der Träger verursachte. Von einem gewissen Teil der Probanden wurde das Tragen von spezieller Unterwäsche ohne konkrete Abfrage im Fragebogen als positiv ausgewiesen.</p>			
<p>SCHLAGWÖRTER: Heatstress, Schutzkleidung, Feuerwehr, Wärme, Wärmedurchgang, thermophysiologische Belastung</p>			

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	1
1.1	Forschungsauftrag.....	1
1.2	Notwendigkeit und Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Methodik der Informationsgewinnung	3
3	Ausgangslage und Rahmenbedingungen.....	4
3.1	Rechtliche Lage.....	4
3.2	Thermoregulation des Menschen	5
3.3	Heatstress.....	6
3.4	Aufbau der Feuerwehrsutzhleidung.....	8
3.5	Erhobene Werte bei Testungen der Schutzkleidung	9
3.6	Einzelkomponenten der Kleidung.....	11
3.6.1	Oberstoffe.....	11
3.6.2	Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Obermaterialien hinsichtlich des Heatstresses	12
3.6.3	Nässesperren/ Membranen	13
3.6.4	Vor- und Nachteile unterschiedlicher Membranen	14
3.6.5	Isolationslage und Innenfutter	15
3.6.6	Vor- und Nachteile unterschiedlicher Futterstoffe	16
3.7	Studienlage zur Gesamtkleidung	17
3.8	Empfehlungen und Erfahrungen zu Trageversuchen.....	17
3.9	Techniken zur Vermeidung von Heatstress	20
3.9.1	Kühlende Kleidung.....	20
3.9.2	Textilinnovationen.....	21
3.9.3	Sensorik in Kleidung	22
3.9.4	Unterbekleidung	22
3.9.5	Waschen und Imprägnieren der Schutzkleidung.....	23
3.9.6	Passgenauigkeit und Gewicht der Kleidung.....	24
3.9.7	Vor-/ Nachbereitung des Angriffstrupps	24
3.10	Weitere Auswahlaspekte der Feuerwehrbekleidung	26
3.11	Resümee aus Literatur und physikalischen Grundlagen	27
4	Experimentelle Untersuchungen	28
4.1	Beschreibung der Methodik	28
4.2	Testung des Einflusses des Oberstoffs auf den Wärmedurchgang.....	28
4.2.1	Proben.....	28

4.2.2	Versuchsreihe zum Strahlungswärmedurchgang durch Feuerweherschutzbekleid. ...	30
4.2.3	Versuchsreihe zum Wärmedurchgang bei Flammeneinwirkung auf Feuerweherschutzbekleid.....	38
4.3	Testung des Einflusses der Eigenschaft hydrophil/hydrophob der Membran und des Futters auf den Schweißtransport.....	42
4.3.1	Proben.....	42
4.3.2	Versuchsreihe zum Wasserdampfdurchgangswiderstand.....	43
4.3.3	Versuchsreihe zur Pufferwirkung flüssigen Schweißes	44
4.3.4	Messwerte für den Wärmedurchgang	46
4.4	Trageversuche mit Probanden	47
4.4.1	Kleidungs Auswahl/ -beschaffung für die Trageversuche	47
4.4.2	Probandenauswahl	48
4.4.3	Fragebogen	48
4.4.4	Szenarien.....	50
4.4.5	Ergebnisse zum subjektiven Trageempfinden.....	52
5	Zusammenfassung	59
6	Dank.....	61
7	Literatur	62

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AFKzV	Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung
α	Absorptionskoeffizient
C	Wärmekapazität Kalorimeter
°C	Grad Celsius, physikalische Einheit der Temperatur
cm	Zentimeter, physikalische Einheit der Länge
ePTFE	expandiertes PTFE
F_1	Schweißtransport
F_d	Feuchtigkeitskennzahl
F_i	Wasserdampfaufnahmefähigkeit
FR	Fire Retardant (feuerhemmend)
g	Gramm, physikalische Einheit der Masse
h	Stunde, physikalische Einheit der Zeit
HTI	Wärmeübergangsindex Flamme
HuPF	Herstellungs- und Prüfbeschreibung für eine universelle Feuerwehrschutzkleidung
i_B	Benetzungsindex
IBK	Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
J	Joule, physikalische Einheit der Energie
K	Kelvin, physikalische Einheit der Temperatur
K_f, K_r	Pufferwirkung flüssiger Schweiß
km	Kilometer, physikalische Einheit der Länge
l	Liter, physikalische Einheit des Volumens
m	Meter, physikalische Einheit der Länge
m ²	Quadratmeter, physikalische Einheit der Fläche
mm	Millimeter, physikalische Einheit der Länge
min	Minute, physikalische Einheit der Zeit
N	Newton, physikalische Einheit der Kraft
NIOSH	US-amerikanische Bundesbehörde für arbeitsmedizinische Forschung
Pa	Pascal, physikalische Einheit des Drucks
PBI	Polybenzimidazol
PBO	Polybenzobisoxazol
PCM	phase change materials (Phasenwechselmaterial)
PES	Polyethersulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen

PU	Polyurethane
q	Wärmestromdichte
R_{et}	Wasserdampfdurchgangswiderstand
RHTI	Wärmeübergangsindex Strahlung
RPE	Received Perception of Exertion (empfundene Wahrnehmung der Anstrengung)
s	Sekunde, physikalische Einheit der Zeit
t	Zeit
T	Temperatur
TF	Wärmedurchlassgrad
W	Watt, physikalische Einheit der Leistung
X	Wärmeübergang
X _f	Wärmeübergang „Flamme“
X _r	Wärmeübergang „Strahlung“
Z	Wasserdampfdurchgangswiderstand

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mechanismen der Wärmeabgabe des menschlichen Körpers bei verschiedenen Raumtemperaturen [Schmidt et al., 2011]	6
Abbildung 2: Aufbauschema von Feuerwehrschtzkleidung mit der Funktionsdarstellung der einzelnen Schichten [DGUV, 2012]	9
Abbildung 3: Einsatzhose nach dem Einsatz und nach der Wäsche, Verschmutzungen und der Reinigungserfolg sind besser auf hellerer Kleidung sichtbar, entnommen aus [DGUV 205-035, 2020]	27
Abbildung 4: Probenauswahl zur Oberstoffvariation, Zuschnitt für den Strahlungsprüfstand	30
Abbildung 5: exemplarische Kurven des Temperaturanstiegs über der Zeit zur Ermittlung der Wärmestromdichte auf der Probenrückseite und des Wärmedurchlassgrads für das Material 6-gold	31
Abbildung 6: Kalorimeterblock aus Aluminium (Normung [DIN EN 366]) mit Probenhalter (und eingespannter Kleidung).....	33
Abbildung 7: Versuchsaufbau Strahlungswärmedurchgang: Siliziumkarbid-Heizstäbe glühen, so dass der helle Probenstoff bestrahlt wird (siehe Pfeilmarkierung). 33	
Abbildung 8: Entfärbung der Probe 1-rot bei Bestrahlung mit 30 kW/m ² zu den Zeiten: 18 s, 20 s, 23 s und 25 s nach Beginn der Beaufschlagung der Probe.....	35
Abbildung 9: Versuchsaufbau Flammeneinwirkung auf Feuerwehrschtzkleidung: Kleidung liegt unter dem runden Kalorimeter und wird beflammt.....	39
Abbildung 10: oben: Außenseiten der Schichten (v.l.n.r.: Oberstoff, Membran, Futter) und unten: Innenseite der Materialprobe 1 der Kleidung 1-blau, nach der Beaufschlagung mit einer Flammenstromdichte 80 kW/m ²	40
Abbildung 11: Schematische Darstellung Hautmodell [Hohenstein Institute]	43
Abbildung 12: Szenario mit definierter Wärmestrahlung mit drei durchführenden Probanden vor einer Wärmestrahlerwand. Der linke Proband steht. Der Proband in der Mitte fährt Rad. Der rechte Proband läuft auf der Stelle.....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Skalierung zur Bewertung von Temperatur-, Feuchteempfinden und Tragekomfort	19
Tabelle 2: Borg-PRE-Skala	20
Tabelle 3: Übersicht der Proben für Labortestungen	29
Tabelle 4: Probengrößen für verschiedene Versuche.....	30
Tabelle 5: mittlere Messwerte zum Strahlungswärmedurchgang bei Bestrahlung mit 30 kW/m ² , gemittelt über je 3 Proben (Die Messwerte für originale Kleidaufbauten sind grau dargestellt.)	36
Tabelle 6: mittlere Temperaturerhöhung nach 30 Minuten bei Bestrahlung mit einer Wärmestromdichte von 1kW/m ² (Die Messwerte für Kleidungsoriginalaufbauten sind grau dargestellt.)	37
Tabelle 7: mittlere Zeit bis zum Erreichen der Temperaturerhöhung um 12 K und 24 K bei Beflammung mit 80 kW/m ² (Die Messwerte für Kleidungsoriginalaufbauten sind grau dargestellt.).....	41
Tabelle 8: Probenbezeichnung und Materialzusammensetzung der Proben zur Testung des Einflusses hydrophiler/hydrophober Membranen und Futter/Isolationslagen....	42
Tabelle 9: mittlere Wasserdampfdurchgangswiderstände der beprobten Materialien [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute].....	44
Tabelle 10: mittlere Messergebnisse für die Pufferwirkung flüssigen Schweißes [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute].....	45
Tabelle 11: Messwerte für die Bestrahlung mit den Wärmestromdichten 30 kW/m ² und 1 kW/m ² sowie die Beflammung mit 80 kW/m ²	46
Tabelle 12: Zusammensetzung und Gewicht der Kleidung für Trageversuche	47
Tabelle 13: Durchschnittliche Antworten der Probanden nach Durchlauf der Tragetestszenarien der leichten körperlichen Beanspruchung (Szenario 1) und der Atemschutzübungstrecke (Szenario 2). Als Fehler wurde die Standardabweichung angegeben. Maximale Antwortzahl pro Szenario und Bekleidung: 23.	53
Tabelle 14: Durchschnittliche Antworten der Probanden nach Durchlauf des Szenarios 3 (Wärmestrahlerwand). Als Fehler wurde die Standardabweichung angegeben. Maximale Antwortzahl pro Szenario und Bekleidung: 6.....	56

1 Aufgabenstellung

1.1 Forschungsauftrag

Aufgrund des Verwaltungsabkommens der Bundesländer über die Brandschutzforschung vom 26.08.1993 und des durch den AFKzV beschlossenen Forschungsprogramms für das Jahr 2019 erteilte das Ministerium für Inneres, Digitalisierung und Migration Baden-Württemberg im Auftrag der Länder dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Abteilung Forschung – Institut der Feuerwehr den Forschungsauftrag Nr. 100 (IdF – 2/2019) „Untersuchungen zur Reduzierung der thermo-physiologischen und psychologischen Belastung für Einsatzkräfte durch Feuerweherschutzbekleidung“.

1.2 Notwendigkeit und Ziel des Forschungsvorhabens

Die vielfältigen Aufgaben der Feuerwehr fordern einen adäquaten Schutz der Einsatzkräfte. Dies wird zum einen durch einen hohen Ausbildungsstand, zum anderen durch die persönliche Schutzausrüstung, im Speziellen auch durch die Feuerschutzbekleidung gewährleistet. An diese Bekleidung werden hohe Ansprüche gestellt. Sie muss sowohl an kalten Wintertagen Schutz vor Kälte und gegebenenfalls Nässe sowie im Brandeinsatz vor extremen Temperaturen, als auch mit Wasserdampf gesättigter Luft garantieren.

Im letzteren Fall ist aber nicht nur die heiße, feuchte Umgebungsluft problematisch. In dieser Situation höchster Anstrengung produziert der menschliche Körper ebenfalls Wärme. Normalerweise wird die Wärme nach außen durch Bekleidung abgeführt, bzw. der Körper beginnt zu schwitzen und sich darüber zu kühlen. Die Feuerschutzbekleidung lässt einen Abtransport der Wärme und die Verdunstung des Schweißes jedoch nur bedingt zu, so dass es zum Wärmestau unter der Bekleidung kommen kann. Damit erhöht sich die Körperkerntemperatur der Einsatzkraft, was zu weitreichenden Folgen führen kann. US-Forschungen zeigen, dass fast die Hälfte der tödlichen Unfälle während Feuerwehreinsätzen in den USA auf Überhitzung, Überanstrengung oder ähnliche medizinische Aspekte zurückgeht [Fahy et al., 2013]. Im Allgemeinen wird dieses Phänomen als Hitzestress oder Heatstress bezeichnet.

Im Rahmen der Aus- und Fortbildung trainieren Einsatzkräfte den Umgang mit diesen physiologischen und psychologischen Belastungen. Die Ausbildungseinheiten vermitteln das Wissen, Heatstress zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Die Hersteller der Schutzbekleidung optimieren die Materialien und Materialaufbauten sowie die Lagenanordnung innerhalb der Bekleidung unter anderem unter den o.g. Gesichtspunkten immer weiter. Dabei werden auch Forschungseinrichtungen und Dienstleistungsunternehmen einbezogen.

Dieses Forschungsvorhaben setzt sich gezielt mit Maßnahmen der Reduzierung der thermophysiologicalen und psychologischen Belastung auseinander. Hierzu wird der Einfluss der einzelnen Lagen der Kleidung und ihrer Eigenschaften, wie die Farbe und das Material des Oberstoffs sowie die Beschaffenheit der Membran und des Futterstoffs - hydrophil oder hydrophob ausgeführt - recherchiert und untersucht. Im Weiteren werden andere Maßnahmen zur Reduzierung des Hitzestresses aufgearbeitet.

2 Methodik der Informationsgewinnung

Zur Bearbeitung des Forschungsauftrages gemäß Aufgabenstellung wurde eine umfassende Recherche nach themenrelevanten Publikationen sowie Inhalten und Ergebnissen von Tagungen durchgeführt, ausgewertet und ständig aktualisiert.

Teilweise ergab sich bei der Recherche und dem weiteren Vordringen in die Thematik die persönliche Kontaktaufnahme mit den Verfassern der Publikationen. Hier sind die Gesprächsmöglichkeiten mit der Forschungsabteilung der Hohenstein Institute hervorzuheben. Des Weiteren sind die konstruktiven Fragen und Anmerkungen der beteiligten hessischen Feuerwehren wertvoll für dieses Forschungsprojekt.

Die im Folgenden präsentierten Forschungsergebnisse basieren auf Versuchen im Labormaßstab und begleiteten Realtrageversuchen mit Feuerwehrangehörigen. Außerdem wurde das subjektive Empfinden ausgewählter Einsatzkräfte bei verschiedenen Belastungsübungen mit unterschiedlichen Bekleidungsensembles mit einem Fragebogen erfasst.

3 Ausgangslage und Rahmenbedingungen

3.1 Rechtliche Lage

Die Schutzkleidung, die im breiten Einsatzspektrum der Feuerwehr, bei Brand-, Technischen Hilfeleistungs- und Rettungseinsätzen vor Gefahren schützt, ist in der DIN EN 469:2005 + A1:2006 + AC:2006 *Schutzkleidung für die Feuerwehr – Leistungsanforderungen für Schutzkleidung für die Brandbekämpfung* normiert. Die Schutzbekleidung kann nach der Norm ein Kleidungsstück oder eine Zusammenstellung mehrlagiger Kleidungsstücke, die aus Materialkombinationen oder Bekleidungszusammenstellungen bestehen, sein. Ist der Schutzanzug zweiteilig ausgeführt, ist stets eine Überlappung von Jacke und Hose bei allen Körperhaltungen oder -bewegungen zu gewährleisten. Die Schutzkleidung muss Rumpf, Hals, Arme (bis zu den Handgelenken) und Beine (bis zu den Knöcheln) schützen. Die Kleidung wird nach der Norm auf die folgenden Eigenschaften überprüft:

- Begrenzte Flammenausbreitung
- Wärmedurchgang bei Flamme
- Wärmedurchgang bei Strahlung
- Verbleibende Materialfestigkeit nach Strahlung
- Wärmewiderstand
- Zugfestigkeit
- Weiterreißfestigkeit
- Oberflächenbenetzung
- Maßänderung
- Widerstand gegen das Durchdringen flüssiger Chemikalien
- Wasserdichtigkeit
- Wasserdampfdurchgangswiderstand
- Ergonomische Trageigenschaften
- Wahrnehmbarkeit

Außerdem können sich optionale Prüfungen, wie die Beprobung an einer sensorbestückten Prüfpuppe, anschließen. Kleidung, die diese Prüfung besteht, wird den mechanischen, thermischen und chemischen Anforderungen an Einsatzkleidung gerecht. Die genauen Prüfungen und Minimalanforderungen sind detailliert in der Norm dargestellt. Es werden zwei Leistungsstufen der Schutzkleidung unterschieden. Leistungsstufe 2 stellt dabei höhere Anforderungen an die Kleidung.

Neben dieser Norm haben verschiedene Bundesländer die *Herstellungs- und Prüfbeschreibung für eine universelle Feuerweherschutzbekleidung (HuPF)* eingeführt. Die HuPF Teil 1 und 4 beschreibt die Schutzkleidung nach EN 469, Leistungsstufe 2. In der HuPF werden

einige über die DIN EN 469 hinausgehende Forderungen gestellt. Zum Beispiel sind gemäß HuPF höhere Anforderungen an die Reißfestigkeit des Oberstoffs einzuhalten (> 800 N im Vergleich zu > 450 N). An die Warn- und Reflexbestreifung werden unterschiedliche Ansprüche gestellt. In der DIN EN 469 wird nur die Mindestgröße des retroreflektierenden und fluoreszierenden Materials eingegangen. In der HuPF wird die konkrete Anordnung angegeben. Außerdem sind in der HuPF einige Anforderungen verpflichtend, die in der DIN EN 469 optional sind. Ein Beispiel hierfür ist die Vollbeflammung der Kleidung auf einer instrumentierten Prüfpuppe. Des Weiteren werden die Prüfungen der Bekleidung nach HuPF erst nach 5 Wäschen im Vergleich zur Prüfung nach EN 469 nach einer Wäsche durchgeführt. In der HuPF werden zudem Anforderungen an die Scheuerbeständigkeit, das Pilling, die Farbe und Farbechtheit des Oberstoffs, die Beständigkeit gegen Kraftstoff und Öl, der Abdeckung im Kniebereich sowie der Saumeinfassung und gegen Pflegebehandlung sowie Abrieb gestellt. Eine detaillierte Auflistung der Unterschiede ist in [DGUV, 2012] zu finden.

Die Verordnungen über Dienst- und Schutzkleidung der verschiedenen Bundesländer bestimmen, ob zusätzlich zur DIN EN 469 weitere Vorgaben für die Schutzkleidung gelten. Dies kann z.B. die Festlegung einer einheitlichen Farbe der Schutzkleidung sein.

3.2 Thermoregulation des Menschen

Der menschliche Körper ist bestrebt, die Körpertemperatur von $36,5$ °C bis zu $37,0$ °C konstant zu halten. Kommt es zu Abweichungen von dieser, leitet der Körper Maßnahmen zum Ausgleich ein. Bei der Belastung mit erhöhten Temperaturen spielt auch die Luftfeuchtigkeit eine entscheidende Rolle. Je feuchter die Luft ist, umso schlechter kann der Mensch Wärme ertragen [Ridder et al., 2013].

Der sogenannte Behaglichkeitsbereich, der optimale Klimabereich des Menschen, besteht zwischen 10 °C und 28 °C. Hier ist der Wärmeaustausch mit der Umgebung im Gleichgewicht, so dass ein geringer thermoregulatorischer Aufwand besteht. Der Bereich ist z.B. abhängig von der körperlichen Belastung sowie der Bekleidung. [Ridder et al., 2013]. Der Körper gibt permanent dampfförmiges Wasser an die Umgebung ab. Wärme wird hauptsächlich über Strahlung und Konvektion abgeführt. Diese Mechanismen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Bei steigender Umgebungstemperatur oder vermehrter körperlicher Aktivität beginnt der Thermoregulationsmechanismus des Schwitzens. Dieser Vorgang tritt bei erhöhten Umgebungstemperaturen neben der den bereits genannten ein. Beim Vorgang des flüssigen Schwitzens wird Schweiß über Poren auf die Haut transportiert und verdunstet im optimalen Fall, was zur Kühlung durch die Verdunstungskälte führt. Durch die Verdunstung eines Liters Schweiß kann der Körper eine Wärmemenge von 2420 kJ abgeben [Rossi, 2015]. Die Thermoregulation ist von Mensch zu Mensch unterschiedlich und tagesformabhängig.

Ist keine ausreichende Kühlwirkung erzielbar, können Hitzeschäden entstehen. Diese sind bei zu starker Wärmebeanspruchung z.B. Hitzekrämpfe, Hitzeerschöpfung, Hitzschlag und Dehydration [Ridder et al., 2013].

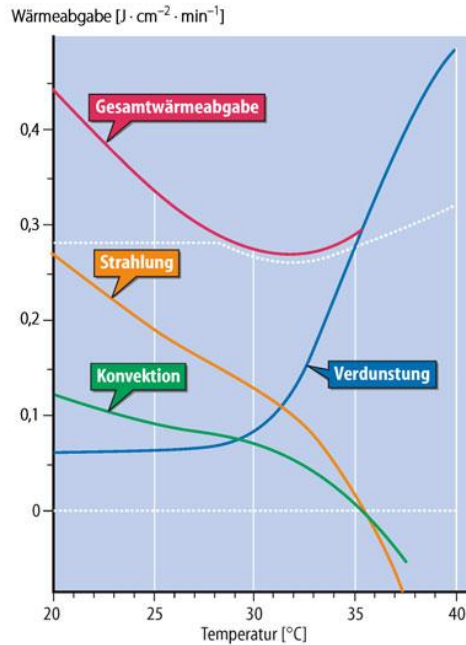


Abbildung 1: Mechanismen der Wärmeabgabe des menschlichen Körpers bei verschiedenen Raumtemperaturen [Schmidt et al., 2011]

3.3 Heatstress

Unter Heatstress wird, einfach ausgedrückt, die Erhöhung der Körperkern-Temperatur verstanden. Im Folgenden werden die darin zugrundeliegenden Mechanismen erläutert.

Bei einem Brandbekämpfungseinsatz wird auf Grund der schweren körperlichen Tätigkeit und des Tragens der Schutzkleidung fast nur noch eine Wärmeabgabe über die Abgabe von Schweiß an die Umgebung reguliert, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist. Durch die körperliche Arbeit wird Wärme produziert, die durch die Schutzkleidung nur schwer nach außen abgegeben werden kann, so dass dieses Regime im rechten Bereich der Abbildung 1 zu finden ist. Hierzu wird der innere Wärmetransport zur Hautoberfläche erhöht. Dadurch werden die Herzfrequenz und das Schlagvolumen des Herzens erhöht. Extreme Wärmebelastungen können die Gesamtdurchblutung im körperlichen Ruhezustand auf 4 l/min erhöhen [Schmidt et al., 2011]. Normalerweise liegt der Wert bei 0,2 l/min bis 0,5 l/min. Durch die Weiterarbeit in diesem Regime und damit verbundenem verstärkten Schweißausstoß kann eine Dehydrierung und eine Erhöhung der Körpertemperatur von Innen hergerufen werden.

Durch die zu tragende Schutzkleidung kann es zum Wärmestau kommen. Verschiedene Forscher haben Wärmeraten und Körperkerntemperaturen von Feuerwehrangehörigen bei körperlicher Arbeit mit Schutzkleidung und mit teils angelegter Schutzkleidung aufgenommen, um dies zu belegen. Eine Auswahl an Quellen sind [Carter, 1996], [Mäkinen, 1996], [Huck, 1988]. Durch diesen Wärmestau kann die von außen aufgenommene Wärme in den verschiedenen Hautschichten gespeichert und in das Körperinnere transportiert werden. Die aufgenommene Wärme gelangt außerdem über den Blutkreislauf ins Innere des Körpers. Ist der Wärmestrom zu stark, kommt es zu Verbrennungen in den Hautschichten, da diese nicht mehr aus dem Körperinneren gekühlt werden können [Neske, 2015], [Rossi, 2003], [Rossi, 1999].

Erste Heatstress-Anzeichen sind Muskelkrämpfe, verzögerte Entscheidungen und Reaktionen. Darauf folgend kommt es zu Ermüdungserscheinungen, Schwindel und Übelkeit. Bei einer Körperkerntemperatur von mehr als 40 °C kommt es zum Hitzschlag, welcher zur Bewusstlosigkeit und schließlich zum Tod führen kann [Schmidt et al., 2011], [Feuerwehr, 2012]. Des Weiteren kann es bei Feuerwehreinsätzen zu einem Phänomen kommen, welches den Körper zusätzlich sehr stark aufheizen kann. Dazu ist wissenswert, dass Wasserdampf immer vom Ort eines hohen Wasserdampfpartialdrucks zu Stellen eines niedrigeren Werts fließt. Normalerweise ist der Druck in der Nähe der Haut höher als in der Umgebung. Dadurch wird der Wasserdampf von dort wegtransportiert. Bei Feuerwehreinsätzen kann sich dieses Verhältnis jedoch umdrehen, wie in verschiedenen Studien [Rossi et al., 2004, Sati et al., 2004] gezeigt wurde. Es existiert also ein Risiko, dass der heiße Löschwasserdampf der Umgebung zur Haut geleitet wird. So kann dann Wärme an die Haut übertragen werden. Dies führt im ungünstigsten Fall sogar zu Dampfverbrennungen [Rossi, 2015].

Ein weiterer Mechanismus, der zur Erhöhung der Körpertemperatur beitragen kann, ist der folgend beschriebene Effekt. Ein gewisser Teil des flüssigen Schweißes wird sich in der Schutzkleidung sammeln, da sie einen hohen Wasserdampfdurchgangswiderstand hat. Damit einher geht eine Änderung der thermischen Eigenschaften der Kleidung. Es ist nach aktuellem Stand nicht eindeutig, ob positive oder negative Effekte auf die Hitzeschutzeigenschaften durch die feuchte Kleidung überwiegen. Dies ist von vielen Faktoren, wie der Menge der Feuchtigkeit und den Eigenschaften der Schichten der Kleidung, abhängig.

Problematisch ist, dass die in der Kleidung gebundene, im flüssigen Aggregatzustand vorliegende Feuchtigkeit bei äußerlicher sehr hoher Temperatur verdampfen kann und dann ggf. zu Dampfverbrennungen führt [Rossi, 2015].

Das Problem Heatstress ist jedoch nicht allein auf die mehrlagige Schutzkleidung zurückführbar. In den USA wurden Tests durchgeführt, ob eine einlagige Schutzkleidung weniger Heatstress bedingte Unfälle hervorruft [Fabrizio, 2014], [Mager, 2002]. Mit dieser Bekleidung

stiegt der Prozentsatz des Heatstresses am Gesamtunfallaufkommen im Boston Fire Department von 9,4 % auf 12 %. In der Studie wurde geschlussfolgert, dass weitere Faktoren wesentlich für das Auftreten sind. Genannt wurden die physische Leistungsfähigkeit, das Alter und der individuelle Metabolismus. In [Gavhed, 1989] wurde festgestellt, dass Wärmegewöhnung, Realbrandausbildung und physisches Training die Hitzetoleranz verbessern. Auch das NIOSH [NIOSH, 2001], die US-amerikanische Bundesbehörde für arbeitsmedizinische Forschung, fordert daher Fitnessprogramme zur Vermeidung von Heatstress.

3.4 Aufbau der Feuerwehrschutzkleidung

Die Schutzkleidung ist mehrschichtig aufgebaut. Jede Schicht erfüllt eine spezielle Aufgabe. Üblicherweise wird folgende Anordnung von außen nach innen verwendet: Oberstoff, Membran bzw. Nässesperre und Isolationsfutter. Dies ist in Abbildung 2 gezeigt. Eine mögliche andere Reihenfolge der Lagen ist Oberstoff, Isolationszwischenlage, Nässesperre/ Membran. Die genutzten Werkstoffe müssen in allen Punkten der DIN EN 469 und der EN ISO 13688, Schutzkleidung - Allgemeine Anforderungen, entsprechen. Die Norm sieht zwei Schutzstufen für die Bekleidung vor. Die Stufe 2 stellt dabei höhere Anforderungen an die Kleidung. Die Auswahl der geeigneten Leistungsstufe hängt von den Ergebnissen einer Gefährdungsbeurteilung ab. Hinweise für die Erstellung können der DGUV Information „Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung für Einsätze bei der Feuerwehr“ [DGUV-I 205-014, 2016] und [DIN EN 469,2007] entnommen werden.

In Abbildung 2 ist der gängigere Liner-Aufbau von Schutzausrüstung dargestellt. Im Gegensatz dazu gibt es als zweite verbreitete Ausführung die Laminat-Konstruktion. Diese folgenden Ausführungen wurden [Fabrizio, 2014], [Feuerwehrmagazin, 2014] und [Brandschutz, 2007] entnommen.

Die Liner-Konstruktion besteht aus 3 Schichten: dem Oberstoff, dem Isolationsfutter (ggf. zweiteilig als Isolationslage und Isolationsfutter) und einer dazwischen lose eingehängten Nässesperre. Vorteilhaft sind hier die Lufteinschlüsse zwischen den Lagen. Sie bieten zum einen eine zusätzliche thermische Isolation. Zum anderen ist das Anbringen von Applikationen, wie Taschen, am Oberstoff einfach möglich. Nachteilig bei dieser Konstruktion ist die vermehrte Wasseraufnahme durch den Oberstoff bei nachlassender Imprägnierung.

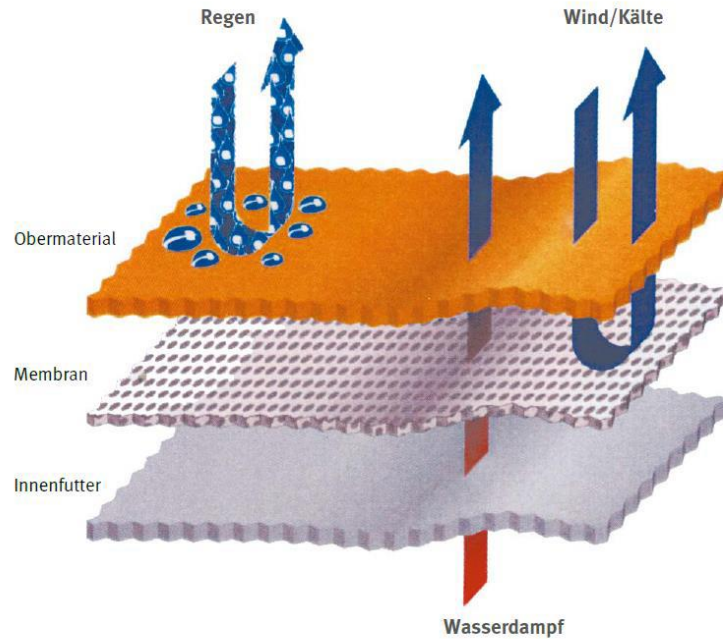


Abbildung 2: Aufbauschema von Feuerwehrsutzkleidung mit der Funktionsdarstellung der einzelnen Schichten [DGUV, 2012]

Der Laminat-Aufbau besteht aus zwei textilen Schichten, dem Laminat und dem Isolationsfutter. Die Nässesperre ist auf die Innenseite des Oberstoffs laminiert, d.h. verklebt. An diesen Verbund schließt sich eine Luftschicht an. Am Körper liegend folgt das Futter. Vorteilhaft sind das geringe Gewicht der Kleidung, eine hohe Atmungsaktivität und die geringe Wasseraufnahme des Obermaterials. Nachteilig sind die Störanfälligkeit beim Waschen, die Versiegelung, die bei jeder nach außen führenden Naht mit speziellem wasserdichtem Nahtversiegelungsband ausgeführt sein muss und damit die Anbringung spezieller Applikationen erschwert.

3.5 Erhobene Werte bei Testungen der Schutzkleidung

In diesem Abschnitt wird auf die für die Untersuchung des Heatstresses relevanten Kenngrößen eingegangen. Dies sind hauptsächlich Messgrößen, die den Durchtritt von Wasser bzw. Wasserdampf oder Wärme durch die Feuerschutzkleidung beschreiben.

Wärmeübergang (in DIN EN 469 abgekürzt als X)

Um die Schutzwirkung der Kleidung beurteilen zu können, werden das Schmerzempfinden und die Schädigung des menschlichen Gewebes bei Wärmeeinwirkung durch die Kleidung betrachtet. Bei den Prüfungen des Wärmeübergangs bei Strahlung und bei Flamme wird der Übergang der Schmerzgrenze bis zur Verbrennung 2. Grades betrachtet. Hier sind Luftschichten zwischen den Kleidungslagen entscheidend [DGUV, 2012].

Wärmeübergang „Flamme“ (in DIN EN 469 abgekürzt als Xf)

Für diese Prüfung wird, wie näher im Kapitel 4.2.2.2 beschrieben, eine Kleidungsprobe bestehend aus allen Lagen der Schutzkleidung mit einem Gasbrenner, mit einer Wärmestromdichte von 80 kW/m^2 , beflammt. Auf der Rückseite der Kleidungsprobe werden der Temperaturanstieg und sein Zeitverlauf erfasst.

Es werden zwei Ergebnisse erhoben, die Wärmeübergangsindizes HTI 12 und HTI 24. HTI 12 entspricht einer Erhöhung der Rückseitentemperatur um 12 K. Bei dieser Temperaturerhöhung ist, ausgehend von der Hauttemperatur von $36 \text{ }^\circ\text{C}$, etwa die Schmerzgrenze erreicht. HTI 24 steht für eine Erhöhung um 24 K, wobei dies Verbrennungen 2. Grades der menschlichen Haut bedeutet. Je nach Leistungsstufen der Schutzkleidung müssen bestimmte Werte erfüllt werden. Für die Einstufung der Schutzkleidung in die Leistungsstufe 1 muss gelten, dass der Wärmeübergangsindex $\text{HTI } 24 \geq 9,0$ ist, also nach frühestens 9 Sekunden eine Erhöhung um 24 K vorliegt. Außerdem muss $\text{HTI } 24 - \text{HTI } 12 \geq 3,0$ sein. Die Zeitdifferenz zwischen dem Erreichen der Erhöhung um 12 K und der Erhöhung um 24 K muss demnach mindestens 3 Sekunden dauern. Die Zeit zwischen dem ersten Wahrnehmen des Schmerzes und dem Eintreten einer Verbrennung 2. Grades muss also mindestens 3 Sekunden betragen. Für die Leistungsstufe 2 müssen die Werte für $\text{HTI } 24 - \text{HTI } 12 \geq 4,0$ und $\text{HTI } 24 \geq 13,0$ betragen [DGUV, 2012], [DIN EN 469].

Wärmeübergang „Strahlung“ (in DIN EN 469 abgekürzt als Xr)

Diese Prüfung verläuft ähnlich wie die Flammenprüfung. Eine Strahlungsquelle exponiert die Oberseite der Kleidungsprobe. Darunter müssen, wie beim Tragen der Schutzkleidung, alle weiteren Schichten der Schutzkleidung liegen. Auf der Rückseite der Probe wird der Temperaturanstieg bei Bestrahlung mit 40 kW/m^2 erfasst. Hier gelten die gleichen Temperaturgrenzen von 12 K und 24 K und werden mit RHTI 12 und RHTI 24 bezeichnet. Die Schwellwerte für die Leistungsstufe 1 sind $\text{RHTI } 24 \geq 10$ und $\text{RHTI } 24 - \text{RHTI } 12 \geq 3$. Für die Leistungsstufe 2 gelten $\text{RHTI } 24 \geq 18$ und $\text{RHTI } 24 - \text{RHTI } 12 \geq 4$ [DGUV, 2012].

Wasserdampfdurchgangswiderstand (in DIN EN 469 abgekürzt als Z oder R_{et})

Auf Grund des Wasserdampfpartialdrucks, also einer geringen Konzentration von Wasserdampf auf der Außenseite der Schutzkleidung und einer hohen Konzentration auf der Innenseite bei einer schwitzenden Person, streben die Wassermoleküle diffusiv nach außen. Der Wasserdampfpartialdruck wird in Pascal [Pa] gemessen. Um viele Moleküle nach außen zu leiten, ist eine gute Wasserdampfdurchlässigkeit nötig. Der Wasserdampfdurchgangswiderstand wird in $\text{m}^2\text{Pa/W}$ angegeben. Umso kleiner der $\text{m}^2\text{Pa/W}$ - Wert, desto mehr Wasserdampf kann nach außen diffundieren. Ein hoher Wasserdampfdurchgangswiderstand kann das Ri-

siko von Hautverbrühungen erhöhen. Hier kann der Schweiß nicht ausreichend schnell abtransportiert werden, so dass er die Unterwäsche und die unteren Kleidungsschichten durchfeuchtet. Dadurch wird ein Teil der Isolationswirkung eingebüßt. Für die Leistungsstufe 2 der Einsatzkleidung gilt, dass der Wert kleiner als $30 \text{ m}^2\text{Pa/W}$ sein muss. Dies darf jedoch nicht zu Lasten der Wasserdichtigkeit erreicht werden [DGUV, 2012].

Pufferwirkung von flüssigem Schweiß K_f und Schweißtransport F_1

Hiermit wird das Szenario überprüft, bei dem nicht nur dampfförmiger, sondern flüssiger Schweiß vom Träger der Schutzkleidung gebildet wird. Diese Überprüfung, wie die des gasförmigen Schweißtransports, wird an einem Hautmodell im Labor durchgeführt. K_f liegt zwischen Null und Eins und sollte für einen guten Tragekomfort möglichst groß sein. Eine weitere Kennzahl für den Umgang mit flüssigem Schweiß ist der Schweißtransport F_1 . Sie wird in g/m^2 angegeben. Haben Textilien eine ähnliche Pufferkennzahl K_f , so wäre aus bekleidungsphysiologischer Sicht dasjenige mit dem höheren Schweißtransport vorzuziehen [Wölfling et al., 2012].

3.6 Einzelkomponenten der Kleidung

3.6.1 Oberstoffe

Der Oberstoff besteht aus einem schwer entflammaren, antistatischen Material. Dadurch schützt er zum einen vor Flammen und Hitze, zum anderen aber auch durch seine Reiß- und Scherfestigkeit vor äußeren mechanischen Einflüssen.

Für die Oberstoffe werden ausschließlich flammfeste (inhärente) Kunstfasern genutzt. Diese werden chemisch gewonnen, sind alle schwer entflammbar und zeigen eine hohe Wärmebeständigkeit. Gängige Fasertypen (mit Markennamen in den Unterstrichen) sind [Fabrizio, 2014]:

- Meta-Aramide
 - Nomex®
 - Teijinconex®
- Polyamid-Imide
 - Kermel®
- Polybenzimidazole
 - PBI®
- Melamine
 - Basofil®
- Polybenzobisoxazol
 - PBO/ Zylon®

Diese Fasern werden üblicherweise mit Para-Aramidem gemischt, um die mechanische Stabilität zu erhöhen. Dadurch werden unter anderem die Reißfestigkeit erhöht und das Aufbrechen bei Beflammung verhindert. Die Mischungsanteile variieren. Gängige Para-Aramide (Marken) sind [Fabrizio, 2014]:

- Kevlar®,
- Twaron® und
- Technora®.

Die Fasergemische weisen typische Flächengewichte zwischen 180 g/m² und 260 g/m² [Fabrizio, 2014] auf.

In sehr geringen Mengen werden dem Oberstoff Antistatikfasern, wie Carbonfasern oder Stahlfasern, zugemischt. Durch ihre elektrische Leitfähigkeit wird die statische Aufladung der Bekleidung verhindert. Außerdem besitzen diese ebenfalls eine extrem hohe Reißfestigkeit [Kuhn, 2020].

Zur Herstellung eines Oberstoffs gibt es zwei Oberstoffbindungsarten: Leinwandbindung und Rip-Stop. Die Leinwandbindung bildet ein dichtes Gewebe durch eine gleichmäßige Struktur. Das rauere Rip-Stop-Gewebe weist ein Karo-Muster auf, durch das es reißfester ist. Dieses Muster entsteht dadurch, dass jede zehnte Faser dicker ist. Die Antistatik-Eigenschaften des Oberstoffs werden durch eine Para-Aramidfaser mit Carbonkern über einen Induktionsmechanismus oder durch ein leitfähiges System mittels eingewebter Stahlfaser erreicht. Letztere benötigt eine Leitungsbrücke zum Boden [Rossi, 2015; Brandschutz, 2007].

Durch verschiedene Kombinationen diverser Fasern, der Feinheit der Garne, die Bindung des Gewebes sowie seiner Konstruktion, werden diverse Oberstoffe erzielt.

Die Farbe des Gewebes kann üblicherweise ausgewählt werden. Sie kann nicht nur einen Einfluss auf die bisher genannten Eigenschaften haben. Von ihr ist z.B. die Sichtbarkeit im Straßenverkehr oder das Erkennen von Kontaminationen der Kleidung abhängig.

Neben den positiven Eigenschaften zeigt sich beim Einsatz von Kevlar im Gewebe die Tatsache problematisch, dass es nicht dauerhaft einfärbbar ist. Durch besondere Gewebeaufbauten, z.B. die Einarbeitung des Kevlaranteils auf die Rückseite des Gewebes, wird dieser Nachteil umgangen [Brandschutz, 2007].

3.6.2 Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Obermaterialien hinsichtlich des Heatstresses

In einem Experten-Interview ergab sich, dass der Oberstoff keine, maximal sehr geringe, Auswirkungen auf das Heatstress-Verhalten der Schutzkleidung hat. Der Oberstoff sollte nach den Kriterien Haltbarkeit, Flammfestigkeit, Scheuerfestigkeit, Haltbarkeit beim Waschen und Farbfestigkeit ausgesucht werden [Gespräch mit Forschern der Hohenstein-Institute].

Ein immer wieder kontrovers diskutiertes Thema ist der Einfluss der Farbe des Oberstoffs der Feuerwehrschutzkleidung auf das Temperaturempfinden des Trägers. Hinsichtlich des Einflusses dieser Farbe konnten keine wissenschaftlichen Studien recherchiert werden.

Der Einfluss der Farbe auf den Wärmedurchgang wurde aber z.B. an Sportfunktionskleidung getestet [Harnisch, 2015]. Hier wurde als wesentliches Kriterium zur Beschreibung der g-Wert herangezogen. Dieser Wert kann zwischen 0 und 1 liegen. Bei 0 wird 100 % der Strahlung reflektiert oder absorbiert, bei 1 100 % der Strahlung transmittiert. Je kleiner der g-Wert ist, desto weniger Energie gelangt durch das Textil zur Haut. In den Untersuchungen zeigte sich, dass gefärbte Stoffe einen leicht geringeren g-Wert als weiße Stoffe aufweisen, also etwas weniger Wärme durch das Textil gelangt. Diese geringeren Werte können durch die gesteigerte Absorption begründet werden. Dies kann durch die Wahl der Färbungsmaterialien bedingt sein. Bei engem Anliegen auf der Haut, kann dieser Effekt auch zu einer erhöhten Hauttemperatur führen. Weite Sportkleidung ist bei starker Sonneneinstrahlung vorzuziehen, da bei enger Kleidung die durch die Kleidung transportierte Wärme direkt auf die Haut geleitet wird.

3.6.3 Nässesperren/ Membranen

Durch eine Nässesperre wird der Feuchtigkeitseintritt von außen in das Innere der Kleidung verhindert. Dadurch wird ein wesentlicher Bestandteil des thermischen Schutzes gewährleistet, da Feuchtigkeit diesen aufheben würde. Problematisch ist, dass zum einen die Nässe von außen zurückgehalten werden soll und zum anderen Schweiß nach außen transportiert werden muss. Dazu werden heute fast ausschließlich Membranen als Nässesperren genutzt [Feuerwehrmagazin, 2014]. Des Weiteren soll durch die Nässesperre eine Kontamination des Schutzkleidungsträgers durch weitere Flüssigkeiten, wie Kraftstoffe oder Blut verhindert werden.

Die verwendeten Membranen können in zwei unterschiedliche Wirkungsweisen unterschieden werden [Fabrizio, 2014]. Zum einen gibt es mikroporöse Membranen. Diese werden meist aus PTFE (Polytetrafluorethylen) oder ePTFE, welches expandiertes PTFE, hergestellt. Dabei werden die PTFE-Moleküle in bestimmte Formationen gebracht. Dies verbessert die Trageeigenschaften [Gore, 2022]. Diese Membrantypen besitzen winzige Öffnungen, durch die Wasserdampf von innen nach außen durchtreten kann. Wassertropfen hingegen bleiben aufgrund deren Größe auf der Oberfläche. Zum anderen werden hydrophil/hydrophobe Membranen, die komplett geschlossen sind, eingesetzt. Die hydrophil ausgerüstete Innenseite der Membran transportiert das Wasser über Molekülketten nach außen. Die hydrophobe Außenseite verhindert das Eindringen von Wasser nach innen [Fabrizio, 2014].

Der Einbau von Membranen in die Schutzkleidung kann in beide mögliche Richtungen, also mit dem Trägermaterial nach außen und der Membran nach innen zum Träger gewandt oder

andersherum, vorgenommen werden. Wie oben beschrieben, ist auch ein Laminat aus Membran und Oberstoff oder aus Membran und Futterstoff möglich. Beispielhaft wird hierfür [Gore, 2020] angeführt. Zeigt die Membran nach außen, schützt sie alle darunterliegenden Schichten vor Nässe. Zeigt die Membran zum Träger, kann die Atmungsaktivität erhöht werden.

3.6.4 Vor- und Nachteile unterschiedlicher Membranen

Die unterschiedlichen Membrantypen weisen Vor- und Nachteile in ihrem Verhalten bezüglich des Schweißtransports und dem damit verbundenem Heatstress auf. Die folgenden Erkenntnisse sind [Wölfling et al., 2012] entnommen.

Je nach Stärke des Schwitzens und damit dem Vorliegen dampfförmigen oder flüssigen Schweißes zeigen sich Vorzüge oder Defizite der genannten Membranen. Messungen des Wasserdurchgangswiderstands R_{et} , der das Verhalten bei mäßig sensiblem Schwitzen, also mit dampfförmigem Schweiß beschreibt, zeigen, dass Materialaufbauten, bei denen die Membran zum Oberstoff orientiert ist, einen höheren Wert für R_{et} aufweisen und damit einen geringeren Tragekomfort bieten als Membranen, die zur Haut orientiert sind, also unter der Isolationslage angeordnet sind. Dieser Unterschied konnte von den Trägern bei messtechnisch begleiteten Trageversuchen nicht bestätigt werden.

PTFE-Membranen, im Bericht der Hohenstein Institute oft auch hydrophobe Membranen genannt, sind gut geeignet, um dampfförmigen Schweiß nach außen zu leiten. Dabei limitiert die Porenanzahl dieser Membranen die Menge des weitergeleiteten dampfförmigen Schweißes. Bei hydrophilen Membranen, bestehend aus PU oder PES, muss der dampfförmige Schweiß zunächst kondensieren, um durch die Kapillarkräfte angetrieben, nach außen transportiert werden zu können.

Bei höherer körperlicher Aktivität und damit verbundenen höheren Schweißraten zeigt sich, dass Nässesperren den Feuchtigkeitstransport innerhalb des Lagenaufbaus limitiert. Dieser Fall tritt beim Innenangriff häufig auf. In der Veröffentlichung zeigt sich, dass die Feuchtigkeitskennzahl F_d , die den Wasserdampftransport und die Wasserdampfaufnahme beschreibt und zwischen 0 und 1 liegt, für die Gesamtkleidung durch die geringen Werte der Nässesperren reduziert ist.

Beim Auftreten flüssigen Schweißes ist die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß K_r von entscheidender Bedeutung. Der Wert liegt zwischen 0 und 1 und ist für einen guten Tragekomfort möglichst groß [Wölfling et al., 2012]. Es zeigt sich während der Untersuchungen mit dem Hautmodell im Labor, dass Materialaufbauten mit hydrophilen Membranen einen leicht besseren Tragkomfort bieten als welche mit hydrophoben. In einem Gespräch mit den Forschern [Gespräch mit Forschern der Hohenstein-Institute] ergab sich, dass die Mikroporen

flüssigen Schweiß nur bedingt transportieren können, da sie durch ihn verschlossen werden können.

In den in [Wölfling et al., 2012] durchgeführten Trageversuchen zeigte sich jedoch kein Unterschied im Mikroklima bei der Gegenüberstellung einer Kleidung mit hydrophiler und einer mit hydrophober Membran. Als Unterbekleidung wurden ein Baumwollhemd und eine Jeans gewählt. Die beiden Schutzbekleidungen waren nicht nur hinsichtlich ihrer Temperatur- und Feuchtigkeitsentwicklung gleich, auch der Tragekomfort wurde von den Probanden sehr ähnlich bewertet.

3.6.5 Isolationslage und Innenfutter

Thermoisolation wird über das Einschließen von Luft erreicht. Dies kann auf zwei Arten, die textile Isolation mit Lufteinschlüssen im Futter oder der Lufteinschluss durch Abstandshalter zwischen den Bekleidungsschichten, erreicht werden. Die textile Isolation wird durch ein nadel- oder wasserstrahlverfestigtes Vlies oder eine dreidimensionale Strickware zwischen Oberstoff und Futter erreicht. Mögliche Fasern sind Aramide oder Aramid-/Viskose-FR-Mischungen. Alternativ können Luftabstandshalter auf das Trägermaterial der Nässesperre aufgebracht werden, so dass ein Luftpolster entsteht. Dadurch ist ein sehr dünner Aufbau möglich, der trotzdem eine hohe thermische Isolation sicherstellt [Brandschutz, 2007], [Fabrizio, 2014].

Das Innenfutter besteht oft aus einem Gewebe aus Aramid oder einer Aramid-/Viskose-FR-Mischung. Hier soll ein hoher Viskoseanteil zum schnelleren Schweißabtransport nach außen führen [Fabrizio, 2014].

Diverse Aufbauten von Schutzkleidungen verschiedener Schichten sind inzwischen erhältlich. In Deutschland sind häufig ein 4-lagiger Aufbau mit einem Innenfutter, das mit der Isolationsschicht versteppt ist sowie ein 3-lagiger Aufbau, bei dem das Innenfutter hängend eingnäht ist, anzutreffen [Brandschutz, 2007], [Wölfling et al., 2012].

In der Veröffentlichung [Lu et al., 2012] wird gezeigt, dass die Wärmeschutzleistung mit einem Luftspalt zwischen Kleidungslagen erhöht wird. Für die getesteten Modelle liegt eine kritische Luftspaltgröße bei trockener Kleidung bei 9 mm bis 15 mm. Danach wird nur noch eine geringe Verbesserung der Isolationseigenschaften durch den Luftspalt erreicht. Dieser Effekt ändert sich bei feuchter Luft zwischen den Kleidungsschichten. Hier gibt es ein Optimum je nach Modell bei maximal 12 mm. Danach verschlechtern sich die Isolationseigenschaften durch die feuchte eingeschlossene Luft. Trotz des komplexen Einflusses des Luftspalts ergibt sich, dass Schutzkleidung über alle Schichten gesamt einen Luftspalt von 9 mm bis 12 mm haben sollte.

Stationäre Hautmodellmessungen der Hohenstein Institute [Wölfling et al., 2012] zeigen, dass diese Luftschichten maßgebend für den Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} sind. In dieser Studie wurden die Wärmedurchgangskoeffizienten für die Einzelkomponenten der Feuerwehreinsatzbekleidung (Oberstoff/ Nässesperre/ Futterstoff) und für den Gesamtaufbau getestet. Es konnte festgestellt werden, dass die Werte für den Gesamtaufbau höher sind als die adaptierten Einzelmessungen, was die Bedeutung der Luftschichten zeigt.

Eine wesentliche Erkenntnis für die Trocknung nach dem Schwitzen ist nach den Hautmodellmessungen [Wölfling et al., 2012], dass dünnere Futterstoffgewebe schneller als Aufbauten mit dicken Futterstoffgeweben trocknen. Grundsätzlich sank die Wärmeisolation bei allen untersuchten Bekleidungen im feuchten Zustand gegenüber dem trockenen.

3.6.6 Vor- und Nachteile unterschiedlicher Futterstoffe

Neben der Nässesperre haben auch unterschiedliche Futterstoffe einen Einfluss auf das Heatstress-Verhalten. Zum einen hat die Dicke des Materials einen Einfluss. Materialien mit dünneren Futterstoffgeweben trocknen schneller als welche mit dickeren [Wölfling et al., 2012], was ein Vorteil ist, da so ein unangenehmes Tragegefühl nach der körperlichen Aktivität bzw. der Post-Exercise-Chill (Nachkühleffekt) vermieden wird. Zudem ist die Wärmeisolation im feuchten Zustand schlechter als im trockenen.

Eine hohe Wasserdampfaufnahmefähigkeit F_i spiegelt einen guten Tragekomfort wider. Dies wird laut [Wölfling et al., 2012] aber nicht durch die Membran oder den Oberstoff, sondern vor allem durch Futterstoffe und Isolationslagen erzielt. Futterstoffe und Isolationslagen nehmen große Mengen der Feuchtigkeit auf, wenn diese hydrophil sind.

Die Dicke der Kleidung ist auch entscheidend bei Einsätzen, die nicht mit einem Brand einhergehen. Im bereits erwähnten Forschungsprojekt [Wölfling et al., 2012] wurde als Weiterentwicklung der konventionellen Schutzkleidung ein adaptives Modell aus einer Überjacke, bestehend aus Oberstoff und Nässesperre (PTFE-Membran auf Futtergewebe) und einer Unterjacke aus Plüschgewirk entwickelt. Durch diesen „Zwiebelschalenaufbau“ sind Feuerwehrangehörige in der Lage, auf die Umgebungsbedingungen bei Nicht-Brandeinsätzen zu reagieren. So könnte z.B. bei technischen Hilfeleistungseinsätzen im Sommer nur die Oberjacke getragen werden. Bei Brandeinsätzen sind beide Jacken zu kombinieren.

In den thermophysiologicalen Messungen dieses Systems wurde festgestellt, dass mit der Unterjacke die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß enorm erhöht werden kann. Das wird zum einen dadurch begründet, dass wenn nur die Oberjacke getragen wird, die Feuchtigkeit des Körpers direkt auf die Nässesperre und damit auf das den Feuchtigkeitstransport limitierende Element trifft. Zum anderen kann die vom Körper abgegebene Feuchtigkeit in der Unterjacke in deren Luftkanälen verdampfen und so über einen langen Zeitraum gleichmäßig an die Membran weitergegeben werden.

3.7 Studienlage zur Gesamtkleidung

Aus [Wölfling et al., 2012] kann geschlussfolgert werden, dass die untersuchten Schutzkleidungen, die zum Zeitpunkt der Berichtserstellung, 2012, dem Stand der Technik entsprachen, sehr ähnliche thermophysiologische Eigenschaften zeigten. Einige positive Effekte konnten, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, bestimmten Kleidungseigenschaften in den Bereichen Membran, Isolationslage und Futterstoff zugeschrieben werden. Ein markanter Einfluss des Oberstoffs ist soweit nicht ersichtlich.

Messungen mittels einer thermischen Gliederpuppe, mit der anatomischen Gestalt eines Mannes, die dessen Wärmeproduktion und -abgabe simuliert, konnten zeigen, dass Wärmeflüsse an die Umgebung bei bewegten Personen größer sind als bei unbewegten, da Ventilationseffekte eine Rolle spielen.

In Trageversuchen mit Feuerwehrschutzkleidung desselben Forschungsberichts wurde festgestellt, dass bereits ab moderatem Gehen mit 4 km/h bzw. 5 km/h bei einer Außentemperatur von 10 °C mehr Feuchtigkeit vom Probanden produziert wird als von der Kleidung nach außen abgegeben werden kann. Des Weiteren wurden in diesen Trageversuchen festgestellt, dass sich trotz unterschiedlicher Ergebnisse bei den Messungen mit dem Hautmodell im Labor bei Schutzbekleidungen mit hydrophilen und hydrophoben Membranen, keine Unterschiede in den Befragungen der Probanden zum Mikroklima und Tragekomfort ergaben. Nach subjektivem Empfinden waren also keine Unterschiede bei unterschiedlichen Bekleidungen aktueller Modelle erkennbar.

3.8 Empfehlungen und Erfahrungen zu Trageversuchen

Bei Forschungsprojekten oder der Neubeschaffung von Schutzkleidung können Trageversuche mit verschiedenen Modellen zielführend sein, um diese vergleichen zu können. Dazu müssen eine Probandenauswahl, ein Testregime, ein Fragekatalog und ggf. ein Bewertungsschema festgelegt werden. Verschiedene Ansätze dafür werden im Folgenden vorgestellt.

Probandenauswahl

Die Auswahl sollte entweder eine repräsentative Gruppe der Träger darstellen oder möglichst gleich konstituierte Träger beinhalten [DGUV, 2016], [Gespräch mit Forschern der Hohenstein-Institute]. Die Auswahlkriterien hierfür sind: Geschlecht, Alter und Körpermaße sowie ggf. andere Merkmale bei speziellen Anforderungen. Eine Gruppe repräsentativer Träger sollte für die Beschaffung neuer Kleidung angestrebt werden. Möglichst einheitliche Träger werden für die vergleichende Erforschung verschiedener Textilien genutzt. Damit soll sichergestellt werden, dass nicht die Unterschiede der Träger, sondern nur die Unterschiede der Kleidung zum Tragen kommen.

Die Personen müssen den körperlichen und geistigen Anforderungen genügen und ausreichend für die Probetätigkeiten ausgebildet sein. Zum Zeitpunkt der Testdurchführung müssen sie gesund sein [DGUV, 2016].

Testregime

Jede zu testende Schutzkleidung muss von jedem Probanden getragen und z.B. mittels der Beantwortung eines Fragebogens beurteilt werden. Die Rahmenbedingungen der Tests sind zu dokumentieren und bei allen Versuchen möglichst gleich zu halten. Die Durchführung sollte übliche Bewegungsabläufe aus dem Einsatzgeschehen beinhalten [DGUV, 2016].

Für die Durchführung kann z.B. aus [DGUV, 2016] ein Testregime gewählt werden. Dieses kann ergänzt, gekürzt oder anderweitig abgewandelt werden, um die jeweilige Fragestellung besser abbilden zu können.

Eine mögliche Durchführung wird im Folgenden angegeben. Sie ist stark an [DGUV, 2016] angelehnt. Hier liegt das Hauptaugenmerk nicht auf dem Heatstressverhalten der Kleidung, sondern auf der Eignung und Kompatibilität von zu beschaffender PSA für eine Feuerwehr.

Vorbereitung

- Anprobe und Größenanpassung
- Fixierung gemäß Gebrauchsanweisung

Dynamischer Test

- Gehen 20 m
- Treppensteigen mit 10 m Höhenunterschied
- Kniebeugen 5 x
- Rumpfbeugen 5 x
- Absprung von einer Treppenstufe zum Boden 5 x
- Übersteigen Hindernis (bspw. Stuhl) 2 x
- Anheben Kiste (5 kg) und Ablage auf einer Erhöhung 10 cm über Kopf
- Rollen eines Fasses 20 m
- Lösen einer Schraube bzw. Mutter M 10, M 24 über Kopfhöhe

Hier schließt sich ein ergänzendes Programm, z.B. ausgerichtet auf die Brandbekämpfung oder die Rettungsdiensttätigkeiten an.

Fragenkatalog

Der erste Teil eines Fragebogens besteht aus der Vorhabenbeschreibung, Motivation und einer zu bestätigenden Datenschutzerklärung hinsichtlich der Erfassung personenbezogener Daten, wie Alter, Größe und Gewicht. Im Folgenden schließen sich für die Erfassung des Heatstresses die Teile Komfort, Feuchteempfinden, Temperaturempfinden, Anstrengung und Schwitzverhalten an.

Die Einschätzung der Feuchtigkeit, der Wärme und die Komfortbewertung erfolgen standardmäßig in separaten Skalen. Diese Skalen sind unterschiedlich fein aufgegliedert und [Wölfling et al., 2012] entnommen.

Für die Erfassung des subjektiven Temperaturempfindens wird die 7-stufige Bedford-Skala verwendet. Die Skalierung ist in Tabelle 1 aufgetragen. Die Erfassung von Feuchtigkeit kann nicht so detailliert abgestuft werden, da das subjektive Empfinden nicht mehr Stufen zulässt. Das Feuchteempfinden wird daher mittels einer vierstufigen Skala erfragt. Der Tragekomfort kann mittels Schulnoten eingeordnet werden. Diese Bewertungen sind sowohl für den gesamten Körper, als auch für Einzelpartien, möglich.

Tabelle 1: Skalierung zur Bewertung von Temperatur-, Feuchteempfinden und Tragekomfort

Temperaturempfinden	Feuchteempfinden	Komfortbewertung
viel zu warm	nass	ungenügend (6)
zu warm	feucht	mangelhaft (5)
komfortabel warm	leicht feucht	ausreichend (4)
neutral	trocken	befriedigend (3)
komfortabel kalt		gut (2)
zu kalt		sehr gut (1)
viel zu kalt		

Eine Abfrage der Beanspruchung der Person (extrem gering bis zu stark) wird nach Borg [Borg, 2004] durchgeführt. Die Borg-RPE-Skala ist eine lineare Schätzskala und umfasst den Bereich von 6 bis 20. RPE bedeutet dabei Received Perception of Exertion, also die empfundene Wahrnehmung der Anstrengung. Damit kann eine Tätigkeit bzw. Erschöpfung subjektiv eingeordnet werden. Der erfragte Wert multipliziert mit Zehn ergibt etwa die zugehörige Herzfrequenz (60 bis 200 Schläge/Minute). Im Folgenden ist die Skala mit einer vergleichenden Erklärung in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Borg-PRE-Skala

Skala (RPE- Wert)	Anstrengung	Vergleich
6	Überhaupt nicht anstrengend	
7		
8	Extrem leicht	
9	Sehr leicht	Normales Gehen im normalen Tempo
10		
11	Leicht	
12		
13	Etwas anstrengend	Etwas anstrengend, gut fortführbar
14		
15	Anstrengend	Schwer, aber Fortfahren ist möglich
16		
17	Sehr anstrengend	Belastung kann weitergemacht werden, aber man ist bald erschöpft.
18		
19	Extrem anstrengend	Sehr starke/ die stärkste jemals erlebte Belastung
20	Maximale Anstrengung	

3.9 Techniken zur Vermeidung von Heatstress

Nicht nur über die Optimierung der Schutzkleidung kann Heatstress reduziert werden. Es stehen zum einen innovative Zusatzprodukte zur Minimierung zur Verfügung, zum anderen kann auch eine Optimierung des Verhaltens der Feuerwehrangehörigen zur Reduzierung von Heatstress führen.

3.9.1 Kühlende Kleidung

Kühlende Kleidung, am häufigsten in der Form von Westen ausgeführt, ist im einfachsten Fall eine passive Einrichtung. Kommerziell zu erwerbende Westen und teils Hosenträger, die in Wasser getaucht werden und dann über Minuten bis Stunden durch die hohe Wärmekapazität des Wassers kühlen, sind inzwischen von diversen Anbietern zu erwerben [ErgoMed, 2020], [Portwest, 2020], [e-cooline, 2020]. Dabei nehmen z.B. Polymere das Wasser auf und halten es somit in gelartiger Form. Ein Hersteller hat seine Kühlweste von Feuerwehrangehörigen der Berufsfeuerwehr Köln testen lassen. Ihre kühlende Wirkung wurde positiv, ihre Anwendung als einfach eingestuft. Weitere Bewertungen durch Feuerwehren zu Kühlwesten waren nicht recherchierbar.

In anderen Arbeitsbereichen werden z.B. mit Ventilatoren bestückte Westen eingesetzt [Makita, 2020]. Solche Möglichkeit muss für die Nutzung bei Bränden speziell ausgelegt sein, da akkubasierte Technik bei Hitze ein erhöhtes Gefährdungspotential für den Träger bedeutet. Ein weiteres aktives Kühlsystem wurde durch die Freiwillige Feuerwehr Bad Homburg v. d. Höhe und einem Wirtschaftspartner entwickelt [Feuerwehrpreis, 2018]. In der Weste sind Kühlschlängel integriert, in denen ein Wärmeträgermedium zirkuliert. Dadurch soll die Wärmefreisetzung räumlich variabel absorbiert werden. Außerdem kann die Kühlwirkung durch den Anwender reguliert werden. Es wurde ein integriertes und ein autarkes System entwickelt. Das integrierte System kann z.B. in die Jacke eingebettet werden, sodass kein zusätzliches Kleidungsstück angezogen werden muss. Die interne Evaluation der Ergebnisse von Tragetests zeigte eine hohe Akzeptanz der beteiligten Einsatzkräfte [Feuerwehrpreis, 2018, 2]. Das Produkt ist derzeit (noch) nicht marktreif.

3.9.2 Textilinnovationen

Um den Wärmeeintrag in die Schutzkleidung zu verringern, wurde in verschiedenen Forschungsprojekten an neuartigen Textilien gearbeitet.

Wissenschaftler der Hohestein Institute und des ITCF Denkendorf haben Textilien entwickelt, die elektromagnetische Strahlung, im Sinne des Elektrosmogs, und infrarote Strahlung gleichzeitig abhalten können. Insgesamt werden mehrere Bereiche des elektromagnetischen Spektrums abgedeckt. Dazu werden die Chemiefasern entweder mit Indiumzinnoxid (ITO) dotiert oder beschichtet. Diese Schicht ist beständig gegen Waschen, Scheuern und Bewitterung [Pressebox, 2010].

In [Keiser, 2007] wurde ein Drainage-System für den Abtransport von Schweiß aus Kleidung entwickelt. Dieses kann in der Unterwäsche unter der Feuerweherschutzkleidung und für den Transport innerhalb der Schutzkleidung eingesetzt werden. Dazu werden zwei Stofflagen verbunden. Eine der Lagen ist so bestickt und an der anderen Lage befestigt, dass ein Entwässerungssystem entsteht.

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von wärmeaufnehmenden Materialien, Latentwärmespeicher, auch PCM (phase change materials) genannt, zur Reduktion des Heatstresses führen kann [Rossi, 2005], [Rossi, 2015] [Zhu, 2015]. Diese Materialien können in einem kleinen Temperaturbereich rund um ihren Phasenwechsel sehr große Wärmemengen in kleiner Speichermasse speichern. Schutzkleidung, die mit dieser Technologie ausgerüstet ist, ist derzeit noch nicht marktreif.

3.9.3 Sensorik in Kleidung

Bei Forschungsprojekten zu Sensorik in Feuerwehrschtzkleidung ist das vorrangige Ziel nicht die Minimierung von Heatstress, sondern das rechtzeitige Warnen des Feuerwehrangehörigen, bevor oder wenn erste Heatstressanzeichen eintreten.

Ein Beispiel dieser Kleidung wurde im Projekt SensProCloth erstellt und erforscht. Es wurde ein T-Shirt und eine Überjacke, die in Kombination genutzt werden, entwickelt. Im Stoff des Shirts sind elektrische Leiterbahnen, Sensorik und Elektronik vernäht. Die Instrumente erfassen Herzschlag, Körpertemperatur, Hautfeuchtigkeit, andere Körperfunktionen und den Standort des Trägers. An der dazugehörigen Jacke sind Leuchtdioden angebracht. Für einen Einsatz werden die elektrischen Kreise der Kleidungsstücke miteinander verbunden. Kommt ein Feuerwehrangehöriger in einen körperlich kritischen Bereich, ändern die Leuchtdioden ihre Farbe und eine Warnung läuft für den Einsatzleiter oder einen Überwacher auf einem Monitor auf. Damit kann ein Rückzug im Einsatz, an einem Punkt, an dem der Träger seine kritische Lage selbst unterschätzt, stattfinden [SensProCloths, 2011].

Als eine weitere Möglichkeit, Träger der Schutzkleidung im kritischen Fall zu warnen, nachdem eine Detektion von Körperfunktionen im riskanten Bereich erfolgte, wurden Nesselzellen erforscht [Becker, 2004]. Die Zellen wurden durch Formgedächtnisdrähte realisiert und sollen an betroffener Stelle durch Schmerzen warnen.

Nichtinvasive Kerntemperaturmessmethoden befinden sich in der Entwicklung. Diese werden als Sensoren in die Kleidung eingearbeitet. Hier muss noch an der Genauigkeit bei wechselnden Außenbedingungen gearbeitet werden. [Rossi, 2015].

3.9.4 Unterbekleidung

Wird spezielle Unterwäsche gewählt, um Heatstress zu verringern, sollte diese eine möglichst geringe zusätzliche Wärmeisolation bieten, da die Oberbekleidung ein dickes Futter oder andere Isolationsmöglichkeiten enthält [Wölfling et al., 2012]. Es ist außerdem günstig, wenn die Unterbekleidung möglichst wenig Wasserdampf aufnimmt, da der Dampf nach außen diffundieren soll. Außerdem hat feuchte Bekleidung ein höheres Gewicht. Hier erweisen sich hygroskopische Materialien, wie Baumwolle, als nachteilig. Die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß ist bei diesen Bekleidungen jedoch hervorragend [Wölfling et al., 2012].

Bei Unterbekleidung, die definitionsgemäß direkt auf der Haut sitzt, sind neben thermophysiologischen Eigenschaften auch hautsensorische Eigenschaften, wie Klebeindex, Benetzungsindex oder Oberflächenindex, wichtig. In diesem Bereich erreichten die aus einem breiten Spektrum gewählten und von den Hohenstein Instituten [Wölfling et al., 2012] getesteten Unterbekleidungen meist ähnlich gute Messwerte.

In messtechnisch begleiteten Trageversuchen zeigte sich, dass bei Schutzbekleidung mit dünnem oder aufkaschiertem Futterstoff durch geeignete Unterbekleidung die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß verbessert werden kann. Außerdem wurde beobachtet, dass bei Futtern mit hohem Viskose-VR-Anteil die Feuchtigkeit im Futtergewebe gut gespeichert werden kann und damit schnell von der Unterbekleidung weggeleitet wird [Wölfling et al., 2012].

Ein abgestimmtes Gesamtsystem aus Schutz- und Unterbekleidung kann den Tragekomfort und das Feuchtigkeitsmanagement verbessern.

3.9.5 Waschen und Imprägnieren der Schutzbekleidung

Über das Waschen und Imprägnieren von Schutzbekleidung können die Eigenschaften dieser bezüglich Heatstress geändert werden. Um die Feuchtigkeit vom Inneren der Kleidung nach außen transportieren zu können, muss das Futterstoffgewebe hydrophile Eigenschaften aufweisen. Der Benetzungsindex i_B charakterisiert die Hydrophilie und die Oberflächenbenetzbarkeit. Ab einem Indexwert von 270 gilt Kleidung als hydrophob. Dieser Benetzungsindex wurde in [Wölfling et al., 2012] im Neuzustand, nach 5, 10 und 20 Wasch-Trocknungszyklen für die untersuchten Bekleidungen bestimmt. Im Neuzustand wiesen die meisten untersuchten Schutzbekleidungen Benetzungsindizes unter 270 auf. Schon nach 5 industriellen Wasch-/Trocknungszyklen „Överschmutzt“, einem Verfahren, das in Anlehnung an die DIN EN ISO 15797 entwickelt wurde, die genauen Bedingungen können in [Wölfling et al., 2012] nachverfolgt werden, ist dies nicht mehr so. Hier wiesen nur noch 2 von 5 Bekleidungen Indizes unter 270 auf. Nach 20 Wasch-Trocknungszyklen erfüllte keine Kleidung mehr die Bedingung $i_B < 270$. Diese Entwicklung wird zurückgeführt auf die Hydrophobierung im 4. Spülbad in der industriellen Wiederaufbereitung nach dem „Överschmutzt“-Verfahren. Dies ändert entscheidend die thermophysiologicalen Eigenschaften der Schutzbekleidung, wie die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß K_f . Der Wert verschlechtert sich durch die Hydrophobierung wesentlich.

Als Alternative dazu wurde ein nichtgewerbliches Waschverfahren nach DIN EN ISO 6330 genutzt [Wölfling et al., 2012], bei dem keine Hydrophobierung stattfand. Dabei traten keine steigenden Benetzungsindizes auf. Der Tragekomfort blieb gegenüber der Neukleidung unverändert.

Es wurde jedoch festgehalten, dass die Hydrophobierung im Feuerwehralltag notwendig ist, um die Schutzbekleidung vor dem Eindringen von Wasser zu schützen.

In [Wölfling et al., 2012] wurde ein zweites Waschverfahren entwickelt, bei dem das Feuchtigkeitsmanagement aufrechterhalten wurde. Dazu wurde das „Överschmutzt“-Waschverfahren genutzt. Hierbei erfolgt die Hydrophobierung nur noch bei jedem 5. Wasch-Trockenzyklus.

Es verschlechtert sich der i_B -Wert weiterhin bei den Wäschen, jedoch wird er unter 270 gehalten, so dass die Futterstoffe bzw. der komplette Materialaufbau, hydrophil blieben. Damit erfolgen auch nur geringe Auswirkungen auf den Tragekomfort bei starkem Schwitzen.

Um eine Hydrophobierung nach jedem 5. Waschgang zu gewährleisten, ist zu empfehlen, die Kleidungshistorie, ähnlich wie bei Druckluftbehälter und Atemschutzmasken, z.B. mittels Strichcodes, eindeutig zu kennzeichnen und nachzuvollziehen. Hier sollten auch Herstellungsdatum, Träger, durchgeführte Waschzyklen und Reparaturen eingepflegt werden [Meyer, 2015]. Eine andere, sehr einfache Möglichkeit, wäre die wasserfeste Kennzeichnung jeder Wäsche und Imprägnierung in der Schutzkleidung selbst. Hierzu kann ein eingenähtes oder geklebtes Etikett genutzt werden.

Des Weiteren ist Kleidung zu empfehlen, bei der die einzelnen Schichten der Jacke bzw. Hose vor dem Waschen zu trennen sind. So kann nur jene Schicht, wie der Oberstoff, imprägniert werden, für die ein Nässeschutz notwendig ist. Die anderen Schichten werden nur gewaschen.

3.9.6 Passgenauigkeit und Gewicht der Kleidung

Die persönliche Schutzausrüstung muss für jeden Feuerwehrangehörigen passgenau ausgewählt werden. Zum einen muss sie so gut sitzen, dass es immer zur Überlappung zwischen den Einzelteilen, wie Jacke und Hose bzw. Jacke und Handschuhen, kommt. Zum anderen sollte sie nicht so weit sein, dass der Feuerwehrangehörige leicht an Gegenständen hängen bleibt. Hieraus ergibt sich auch für die Heatstress-Vermeidung ein Vorteil. Wenn die Kleidung passgenau sitzt, wird der unter der Feuerwehrrarbeit entstehende Schweiß bestmöglich nach außen transportiert.

Zur Wahl der Kleidung sollte es optimaler Weise eine Testmöglichkeit zur Ermittlung eines geeigneten Modells und einer geeigneten Größe für die tragende Person geben. Optimale Anpassung heißt auch, dass bei einer Änderung der Konfektionsgröße im Laufe der Zeit andere Kleidung genutzt werden muss [Startin, 2020].

Des Weiteren wird davon ausgegangen, z.B. in [Fire, 2019] und [Fire, 2019, 2], dass leichtere Kleidung, die dennoch den hohen schützenden Anforderungen entspricht, Heatstress minimieren kann.

3.9.7 Vor-/ Nachbereitung des Angriffstrupps

Einsatzkräfte müssen, abgesehen von regelmäßigen strengen ärztlichen Untersuchungen, selbstverantwortlich einschätzen können, ob sie einsatztauglich sind. Auch hitzebedingte Erkrankungen sind vom aktuellen Fitness- und Gesundheitszustand und den Umgebungsbe-

dingungen abhängig. Um dies einschätzen zu können, müssen zum einen ein gutes Körperbewusstsein, zum anderen aber auch eine ausreichende Sensibilisierung für das Thema Heatstress vorhanden sein. Bereits erste Ermüdungs- und Krankheitsanzeichen sollten gemeldet werden und im Zweifelsfall zum Einsatzabbruch oder Nichtantritt bei dieser Person führen. Eine ausreichende Sensibilisierung durch Schulungen führt auch dazu, frühzeitig Anzeichen von Heatstress bei Kameraden erkennen zu können [Department of Health and Human Services, 2016].

Weitere präventive Maßnahmen ergeben sich aus diesen Erkenntnissen und werden im Folgenden vorgestellt.

Vor Einsatzantritt und im Einsatz sollten vorrangig isotonische Getränke konsumiert werden. Diese sind Wasser vorzuziehen. Auf keinen Fall sollten koffeinhaltige Getränke oder Alkohol getrunken werden, weil diese zusätzlich entwässern [Fire, 2010].

Eine weitere wesentliche vorbeugende Maßnahme stellt regelmäßiges körperliches Training dar. Der zu erzielende Effekt wird als sehr groß eingeschätzt [Fire, 2010]. In einer Studie von Finteis et al. [Finteis, 2002] konnte gezeigt werden, dass bei untrainierteren Feuerwehrangehörige teils zu hohe Herzfrequenzen für die Dauerbelastung eines Atemschutztrainings von ca. 20 Minuten gemessen wurden. Sportliche Betätigung und damit eine erhöhte Fitness wird in der Studie und in [Serra, 1998] als Möglichkeit zur Vermeidung angegeben. Da die Arbeit unter Atemschutz eine der anstrengendsten Tätigkeiten im Feuerwehrbereich ist und hierbei die Gefahr des Heatstresses am größten ist, vor allem, wenn an seiner körperlichen Leistungsgrenze gearbeitet wird, ist diese Präventionsmaßnahme auch zur Vermeidung von Heatstress zwingend zu beachten. Des Weiteren wiesen die untrainierten Probanden in der Studie im Mittel eine höhere Körpertemperatur nach der Übung, als die trainierten, auf. Auch dieses Ergebnis weist auf die Dringlichkeit einer sehr guten Fitness hin.

Ein weiterer Faktor für eine gute körperliche Fitness ist ausreichend guter Schlaf. Schlafstörungen gehen mit einem erhöhten Risiko für Unfälle, Sekundenschlaf und Herz-Kreislaufkrankungen einher [Jahnke, 2017]. Auch kurze Schlafphasen von 20 bis 30 Minuten während des Tags können die Wachsamkeit während eines nächtlichen Einsatzes erhöhen.

Des Weiteren ist eine für den Einsatz angemessene Bekleidung zu wählen. Je nach Einsatzlage sollte die Führungskraft abwägen und entscheiden, ob das Tragen der mehrlagigen Schutzkleidung angemessen ist. Zum Beispiel bei Vegetationsbränden und Technischen Hilfeleistungseinsätzen kann das Tragen der einlagigen Schutzausrüstung oder ggf. einer speziellen Vegetationsbrandbekleidung [Fabrizio, 2014] ausreichend sein. An heißen Tagen ist außerdem auf ausreichenden UV-Schutz zu achten.

Nach einem Einsatz bzw. bei langdauernden Einsätzen, sind genügend lange Rehabilitationspausen nach zeitlich begrenzten Aufenthalten in der Gefahrenzone und eine rechtzeitige

Ablösung entscheidend. Die Pausen müssen zur vermehrten Flüssigkeitsaufnahme und zur Abkühlung der Körperkerntemperatur genutzt werden.

Bei sehr großen Einsatzlagen kann eine Rehabilitationszone mit medizinischer Überwachung aufgebaut werden. Hierzu können Zelte, Abrollbehälter-Betreuung oder Cool-Vans zur Verfügung stehen. Cool-Vans sind speziell zur Erholung und zum Abkühlen ausgestattete Fahrzeuge [Fire, 2010]. Bei den Regenerierungspausen sollte nasse bzw. kontaminierte PSA getauscht werden. Nach dem Waschen von Händen und Gesicht kann durch medizinisches Personal ein Überwachungsbogen mit Vitalwerten der Einsatzkräfte geführt werden.

Des Weiteren hat sich das *hand cooling* etabliert. Hierbei wird die Körperkerntemperatur gesenkt, indem Hände in ein kühlendes Wasserbecken getaucht werden oder in einen Sprühstrahl gehalten werden. Besonders effektiv ist 10 °C kaltes Wasser über eine Dauer von 20 Minuten. Alternativ kann 20 °C warmes Wasser über 30 Minuten gewählt werden [Smith, 2004].

Durch die Einführung eines Sicherheitsassistenten, ein bereits in Deutschland diskutierter und in Erprobung befindlicher Ansatz, kann das Sicherheitsniveau für Einsatzkräfte erhöht werden. Der Sicherheitsassistent ist ein direkter Assistent der Einsatzleitung. Er erkennt und bewertet Gefährdungen. Die Einrichtung einer Rehabilitationszone und das Einleiten weiterer Maßnahmen zum Schutz der Einsatzkräfte fällt ebenfalls in seine Aufgaben [Ridder, 2017].

Die Wärmegewöhnung eines Menschen ist möglich. Dazu ist ein 2-4-wöchiges Wärmekonditionierungsprogramm zu absolvieren. Diese Wärmeadaptation geht aber nach wenigen Tagen verloren. Daher ist sie eher nicht im Feuerwehrbereich einsetzbar. Bei Soldaten vor einem Auslandseinsatz oder Arbeitern mit einem dauerhaften Hitze Arbeitsplatz kann dieses Gewöhnungsprogramm sinnvoll sein [Department of the Army and Air Force, 2003], [Navy Environmental Health Center, 2007].

3.10 Weitere Auswahlaspekte der Feuerwehrbekleidung

Neben dem Schutz vor Hitze, Flammen, Durchdringen flüssiger Chemikalien, Wasserdichtigkeit, anderen äußeren Einwirkungen und der Optimierung zum Schutz vor Heatstress, sollten bei der Wahl einer Feuerweherschutzkleidung und speziell bei der Wahl eines Oberstoffes die aktuell intensiv diskutierten Punkte Sichtbarkeit von Verschmutzungen und damit verbundene Kontaminationsverschleppung sowie Tag- und Nachtsichtbarkeit des Trägers berücksichtigt werden.

Die Anforderungen an die Wahrnehmbarkeit bei Tag und Nacht wird in DIN EN 469, Anhang B, beschrieben. In der Praxis wird dies durch retroreflektierende/ fluoreszierende Materialien oder Materialien mit kombinierten Eigenschaften gewährleistet. Eine geeignete Farbwahl des Oberstoffes kann dies unterstützen.

Die Sichtbarkeit der Kontamination nach einem Einsatz und damit die Vermeidung der Kontaminationsverschleppung sollte aus aktuellem Anlass [DGUV: BGI/GUV-I 8651 C30, 2011], [DGUV 205-035, 2020] auch in die Auswahl der Kleidung einfließen. Dies kann z.B. durch einen hellen Oberstoff geschehen [DGUV 205-035, 2020], wie eindrucksvoll an einer Abbildung in der Veröffentlichung (S.17, Abb.9) gezeigt wird. Das Bild wurde in Abbildung 3 übernommen. Selbst nach dem Waschen ist noch eine dunkle Färbung auf dem Stoff zu erkennen, die bei einer dunklen Hose nicht aufgefallen wäre.



Abbildung 3: Einsatzhose nach dem Einsatz und nach der Wäsche, Verschmutzungen und der Reinigungserfolg sind besser auf hellerer Kleidung sichtbar, entnommen aus [DGUV 205-035, 2020]

3.11 Resümee aus Literatur und physikalischen Grundlagen

Aus der Literaturrecherche ergibt sich, dass Heatstress ein vielschichtiges Phänomen mit vielen Einflussparametern ist. Die Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Heatstress kann durch die physische und psychische Vorbereitung des Kleidungsträgers erzielt werden. Dieser Faktor ist in der Praxis nicht zu vernachlässigen. Des Weiteren sind die Einflüsse des Waschens und Imprägnierens der Kleidung und die Passgenauigkeit als zielführende Optimierungsparameter zu beachten.

Auch durch die Auswahl bestimmter Bekleidungskomponenten wird ein Beitrag zur Vermeidung von Heatstress geleistet. Dies ist vor allem in den Bereichen Membran, Isolationslage und Futterstoff realisierbar. Der Oberstoff hat einen sehr geringen Einfluss auf das Heatstress-Verhalten. Welche Schichtkombinationen sich als günstig erweisen, wird auch in den folgenden Kapiteln, über die Literaturrecherche hinaus, untersucht. Hier werden neben Laborversuchen mit verschiedenen Lagenaufbauten auch Tragetests mit zertifizierter und damit in Deutschland zugelassener Kleidung vorgenommen.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Beschreibung der Methodik

Die Materialauswahl der einzelnen Schichten der Schutzkleidung kann einen großen Einfluss auf die Schutzfunktion haben. Der Oberstoff schützt dabei vorrangig vor den äußeren Einflüssen Wärmestrahlung, Flammen, mechanische Beanspruchung und Witterung. Hierbei kann neben dem Material auch die Farbe einen Einfluss auf die Wärmeaufnahme und -weitergabe zeigen. Die darunterliegenden Schichten werden hier vorrangig nach den Aspekten der Wärme- und Feuchtigkeitstransport betrachtet.

Generell gilt, dass sich Szenarien der Brandbekämpfung nur schwer simulieren lassen. Es können normierte Prüfverfahren zur Überprüfung der Eigenschaften genutzt werden.

Im Versuchsschritt 1 wurden verschiedene Oberstoffe im Labormaßstab hinsichtlich ihres Wärmedurchgangs untersucht. Hierbei wurden eine einheitliche Membran und ein einheitliches Futter/Isolationslage für alle Experimente zum besseren Vergleich der Ergebnisse verwendet. Im zweiten Schritt fanden Laboruntersuchungen unter Variation von Membran und Isolationslage/ Innenfutter statt. Hier wurden hydrophile und hydrophobe Stoffe genutzt und der Oberstoff konstant gehalten.

4.2 Testung des Einflusses des Oberstoffs auf den Wärmedurchgang

Es wurden 3 Versuchsserien mit unterschiedlichen Testverfahren durchgeführt. Dabei wurde der Oberstoff in Materialzusammensetzung und Farbe variiert, die anderen Schichten der Kleidung wurden konstant gehalten.

4.2.1 Proben

Die Proben für die zwei Testreihen zum Strahlungswärmedurchgang und die Reihe zum Wärmedurchgang bei Flammeneinwirkung wurden so gewählt, dass nur der Oberstoff variiert wird und die darunterliegenden Materialien identisch sind. So soll der Einfluss der Wärmeaufnahme und -weiterleitung der Oberstoffe bestmöglich erfasst werden. Dabei wurde nicht nur das Material selbst, sondern auch seine Farbe variiert. Hierzu wurden nach [DIN EN 469] genormte Feuerwehrhosen und teils Meterware von Obermaterialien beschafft. Es waren nicht zu allen Oberstoffen die gewünschte Untermaterialienkombination erhältlich. Ersatzweise wurden diese Oberstoffe mit den gewählten Untermaterialien neu kombiniert und getestet. Daher entsprach der Großteil der Materialaufbauten keiner normativ geprüften Kleidung, was für das Versuchsziel irrelevant war. Des Weiteren wurden die beschafften Originalaufbauten geprüft. Die geprüften Oberstoffe sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Übersicht der Proben für Labortestungen

Probenbezeichnung (inkl. Probenfarbe)	Materialzusammensetzung	Flächengewicht	Originalaufbau getestet (so beschafft)
1-blau	75 % Meta-Aramid 23 % Para-Aramid 2 % Antistatik	195 g/m ²	x
1-rot			x
1-orange			x
1-gold			x
2-blau	99 % Polyamid-Imid 1 % Antistatik	210 g/m ²	x
3-blau	94 % Meta-Aramid 5 % Para-Aramid 1 % Antistatik	210 g/m ²	
3-beige			
4-blau	73 % Aramid 25 % arom. Polyester 2 % Antistatik	220 g/m ²	
4-gold			
5-gold	61 % Para-Aramid 37 % Polybenzimidazol 2 % Antistatik	205 g/m ²	x
6-gold	59 % Para-Aramid 40% Polybenzimidazol 1 % Carbon	205 g/m ²	
7-blau	58 % Para-Aramid 40 % Polybenzimidazol 2 % Antistatik	205 g/m ²	
8-blau	99% Meta-Aramid 1% Antistatik	210 g/m ²	x
8-rot			x

Die Proben wurden vorbereitend fünfmal mit dem Waschmittel Derval Rent gewaschen und einmal mit dem Mittel HYDROB FC imprägniert.

Vor der Prüfung wurden die Proben einem Konditionierungsklima von 20 ± 2 °C ausgesetzt. Die Prüfungen erfolgten anschließend im Raum des Konditionierungsklimas. Hier wurden Luftströmungen und Wärmestreustrahlung ausgeschlossen bzw. minimiert. Eine leichte Absaugung, der bei der Prüfung entstehenden Gase, wurde gewährleistet.

Die Stoffproben wurden mittels einer elektrischen Schere aus der Kleidung geschnitten. Die Größen der einzelnen Proben richteten sich nach den Versuchsaufbauten. Sie sind in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Probengrößen für verschiedene Versuche

Versuch	Probenmaße	Anzahl Proben
Wärmedurchgang bei Strahlung	23 cm x 7 cm	je 3 (30 kW/m ² und 1 kW/m ²)
Wärmedurchgang bei Flamme	10 cm x 10 cm	3

Eine Auswahl an Proben, zurechtgeschnitten für die Strahlungsprüfung, ist in Abbildung 4 zu sehen.



Abbildung 4: Probenauswahl zur Oberstoffvariation, Zuschnitt für den Strahlungsprüfstand

4.2.2 Versuchsreihe zum Strahlungswärmedurchgang durch Feuerwehrschutzkleidung

In dieser Versuchsreihe wurde der Wärmedurchlassgrad bei Strahlungseinwirkung auf die Feuerwehrschutzkleidung ermittelt. Der Wärmedurchlassgrad beschreibt den durchgelassenen Anteil der einfallenden Wärmestromdichte. Es wurde aufgrund der Ressourcenverfügbarkeit das Prüfverfahren B nach zurückgezogener Norm [DIN EN 366:1993-05] „*Schutzkleidung – Schutz gegen Hitze und Feuer – Prüfverfahren: Beurteilung von Materialien und Materialkombinationen, die einer Hitze-Strahlungsquelle ausgesetzt sind*“ verwendet. Hier sollte keine normative Überprüfung vorgenommen werden, sondern die zu prüfenden Stoffaufbau-

ten untereinander verglichen werden. Die zu prüfenden Stoffe wurden mit einer Wärmestromdichte $q_0 = 30 \text{ kW/m}^2$ beaufschlagt. Dies ist zum einen der Mittelwert des Bereichs der mittleren Wärmestromdichte nach [DIN EN 366]. Zum anderen wurde dieser Wert in Versuchsreihen [Neske, 2015] als üblicherweise zu erwartende Strahlungswärmestromdichte in Bereichen, in denen sich Einsatzkräfte im Brandfall aufhalten, ermittelt. Bei der Überprüfung der Kleidung wurde ein Temperaturanstieg um 24 K gemessen. Über die Steigung $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ dieser Temperaturanstiegskurve wurde die Wärmestromdichte q_c auf der Probenrückseite wie folgt ermittelt:

$$q_c = \frac{C}{s} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

q_c	Wärmestromdichte auf der Probenrückseite bei einer einfallenden Strahlung mit der Wärmestromdichte q_0 [kW/m^2]
C	Wärmekapazität des Kalorimeters (hier: $482,02 \text{ J/K} \pm 2,05 \text{ J/K}$)
s	beaufschlagte Fläche der Kalorimetervorderseite (hier: 25 cm^2)
$\frac{\Delta T}{\Delta t}$	Steigung im linearen Teil des Temperaturverlaufs des Kalorimeters [K/s].

Die Messkurven eines Materials (6-gold) sind dazu exemplarisch in Abbildung 5 gezeigt.

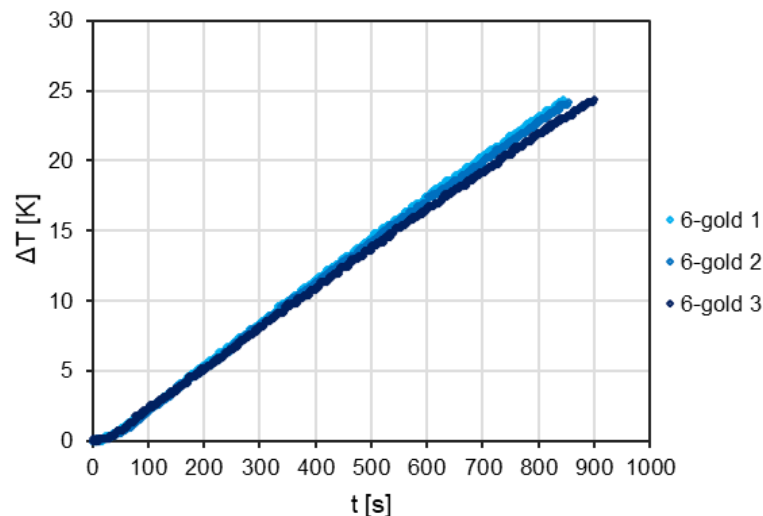


Abbildung 5: exemplarische Kurven des Temperaturanstiegs über der Zeit zur Ermittlung der Wärmestromdichte auf der Probenrückseite und des Wärmedurchlassgrads für das Material 6-gold

Aus der Wärmestromdichte auf der Probenrückseite ist der Wärmedurchlassgrad $TF(q_0)$ bestimmbar. Er berechnet sich aus der Wärmestromdichte auf der Rückseite der Probe und der Wärmestromdichte der einfallenden Strahlung q_0 wie folgt:

$$TF(q_0) = \frac{q_c}{q_0} \quad (2)$$

Des Weiteren wurden die Materialaufbauten mit einer Strahlungswärmestromdichte von 1 kW/m² über eine Dauer von 30 min beaufschlagt. Dies entspricht der Strahlungsexposition mit senkrechtem Einfall auf die Erdoberfläche an einem wolkenlosen Sommertag in Deutschland [LUBW, 2006]. Dadurch sollten die Bedingungen eines Einsatzszenarios, z.B. auf einer Autobahn im Sommer, abgebildet werden.

4.2.2.1 Aufbau und Durchführung der Experimente zum Strahlungswärmedurchgang durch Feuerweherschutzbekleidung

Der Schutzkleidungsprüfaufbau entsprach dem in der DIN 366:1993. Auf einem Kalorimeter-Block mit Probenhalter wurde die textile Probe gespannt. Das Kalorimeter war ein Aluminiumblock mit leicht abgerundeter Vorderseite. Der Kalorimeterblock ist im Detail in Abbildung 6 zu sehen. An diesen Block angeschlossen ist ein Temperaturmess- und -aufzeichnungsggerät. Im Kalorimeter war neben einem Temperaturfühler, ein auf einen Kern aus Reinaluminium gewickelter Konstantan-Draht. Dieser diente der Kalibrierung des Kalorimeters. Umgeschlossen wurde das Kalorimeter von Dämmstoff und einem Plexiglasgehäuse. Der Probenhalter war am Kalorimeter so angebracht, dass die Probe komplett den Aluminium-Block abdeckt und seitlich am Plexiglas-Gehäuse mittels Schraubzwingen eingespannt wurde.

Der Probenhalter wurde dann mit dem Kalorimeter auf einem fahrbaren Prüfgestell mit verschließbarer Öffnung positioniert. Die Verschlussöffnung war quadratisch mit der Länge 60 mm ausgeführt und wassergekühlt. Die darum liegenden Flächen des Prüfgestells waren ebenfalls wassergekühlt. Das Prüfgestell konnte auf einer Schiene verschoben werden, um den Abstand zur Wärmestrahlungsquelle einzustellen. Die Strahlungsquelle bestand aus 6 Siliziumkarbid-(SiC)-Heizstäben. Die Stäbe waren in einem U-förmigen Gestell aus isolierendem nicht brennbarem Material horizontal in senkrechter Ebene angeordnet. Die Strahlungsquelle war mit zwei Leistungsstufen betreibbar. Bei der ersten Stufe waren 3 Heizstäbe in Betrieb. Bei der zweiten Stufe wurden die drei verbleibenden Stäbe hinzugeschaltet. Der Aufbau ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 6: Kalorimeterblock aus Aluminium (Normung [DIN EN 366]) mit Probenhalter (und eingespannter Kleidung)

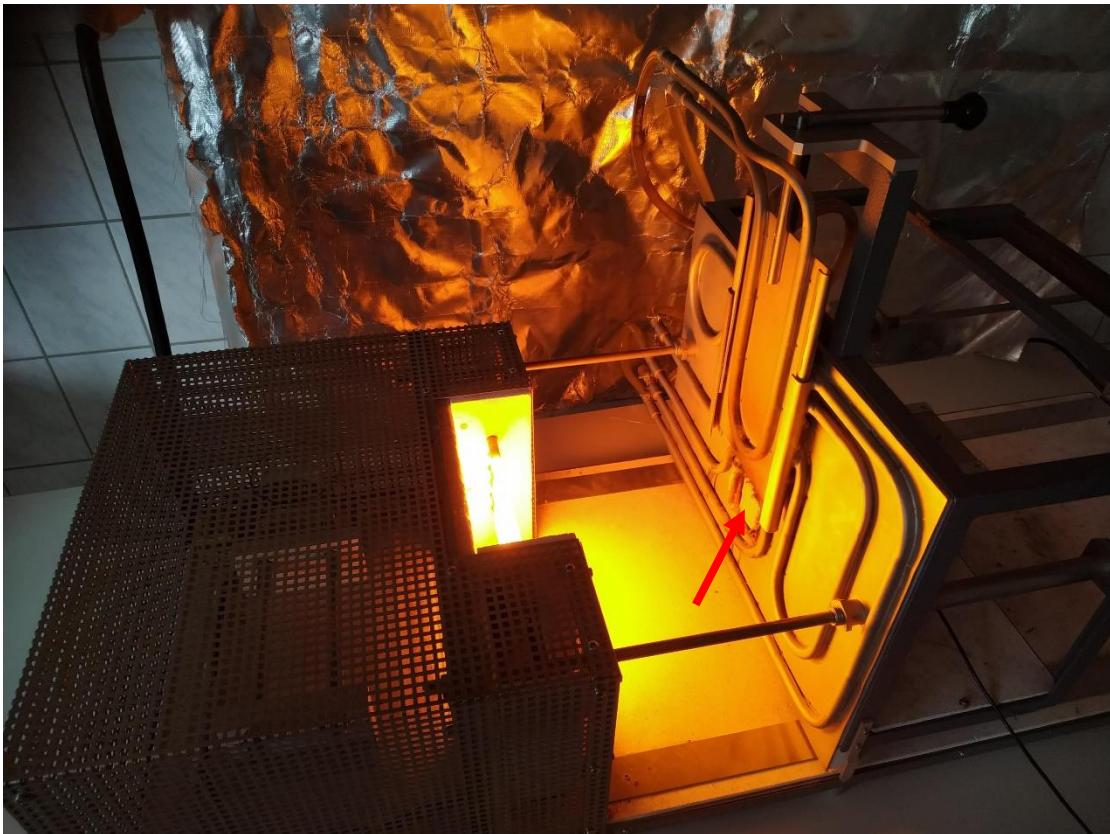


Abbildung 7: Versuchsaufbau Strahlungswärmedurchgang: Siliziumkarbid-Heizstäbe glühen, so dass der helle Probenstoff bestrahlt wird (siehe Pfeilmarkierung).

Zur Ermittlung des Abstands des Prüfgestells zur Strahlungsquelle zum Einhalten der gewählten Wärmestromdichte von $q_0 = 30 \text{ kW/m}^2$ wurde ein Wärmeflussaufnehmer genutzt. Dieses wurde an Stelle der Schutzkleidung auf dem Prüfgestell positioniert. Für die Beaufschlagung mit einer Wärmestromdichte von 30 kW/m^2 betrug der Abstand der Probe zur Strahlungsquelle 24,4 cm. Bei der Beaufschlagung mit 1 kW/m^2 betrug der Abstand 63,5 cm. Um die Wärmestromdichte für eine Bekleidungsart zu testen, wurden drei Proben dieser Kleidung verwendet. Sie wurden dem folgenden Prozess unterzogen. Die Kleidungsprobe wurde ggf. nach einer Abkühlzeit der Apparatur in den Probenhalter eingespannt. Der Probenhalter wurde auf dem Prüfgestell positioniert und die Öffnung zur Strahlungsquelle hin verschlossen. Die Wasserkühlung wurde angestellt. Nach dem Starten der Messwerterfassung erfolgte die Beaufschlagung der Probe mit einer Wärmestrahlung von 30 kW/m^2 bzw. 1 kW/m^2 . Bei der Registrierung eines Temperaturanstiegs von 24 K wurde die Aufzeichnung beendet und die Öffnung zur Strahlungsquelle geschlossen. Bei der Beaufschlagung mit Strahlung mit 1 kW/m^2 wurde eine Bestrahlungsdauer von 30 Minuten gewählt. Hier kann die erzielte Temperaturdifferenz der unterschiedlichen Proben verglichen werden.

4.2.2.2 Ergebnisse der Experimente des Strahlungswärmedurchgangs durch Feuerwehrschutzkleidung bei Bestrahlung mit 30 kW/m^2

Auf die getestete Kleidung wirkte nach der Norm [DIN EN 366] eine Strahlung mit einer konstanten mittleren Wärmestromdichte von 30 kW/m^2 ein. Bei dieser Bestrahlung der Kleidung war bei allen Textilien eine Rauchentwicklung zu beobachten. Diese begann nach ca. 10 Sekunden. Die Dauer der Rauchentwicklung variierte zwischen 10 Sekunden und knapp 2 Minuten. Bei geringen Mengen an weißem Rauch wird davon ausgegangen, dass im Material gebundene Feuchtigkeit verdampft. Dies wird als unauffällig eingestuft.

Hervorzuheben in der Rauchentwicklung sind zum einen die Materialien 1-rot und 1-orange. Sie wiesen eine geringe bis mittlere Rauchentwicklung auf. Sie färbten sich bei der Bestrahlung golden, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Auf Grund der gleichen Materialzusammensetzung mit der blauen und goldenen Probe wird davon ausgegangen, dass sich der Farbstoff löst und frei wird. Dies erklärt auch die geringeren Wärmestromdichten auf der Rückseite im Vergleich zur goldfarbenen Probe, da für das Farbstofflösen Energie verwendet wird, die nicht in die Erwärmung des Kalorimeters auf der Rückseite fließt.

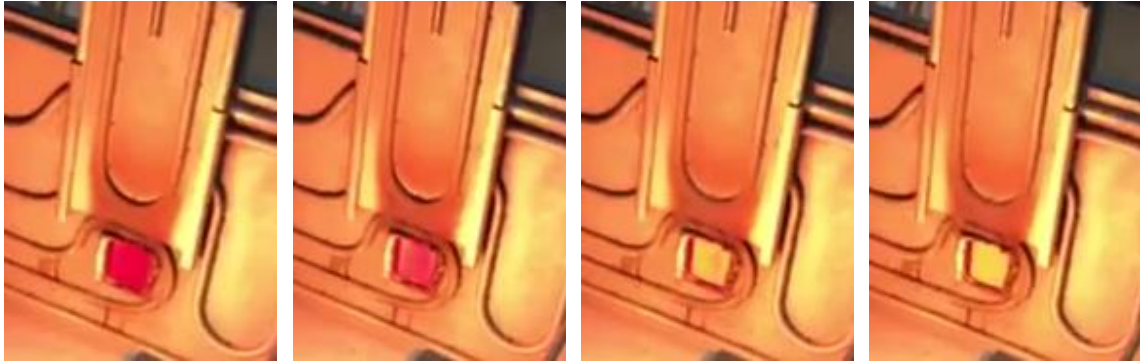


Abbildung 8: Entfärbung der Probe 1-rot bei Bestrahlung mit 30 kW/m^2 zu den Zeiten: 18 s, 20 s, 23 s und 25 s nach Beginn der Beaufschlagung der Probe

Bei den Materialien 1-blau, 1-gold, 3-beige, 4-gold, 4-blau, 6-gold und 7-blau trat nur eine geringe Raumentwicklung auf.

Alle Stoffe wiesen nach der Beprobung Veränderungen auf. Viele zeigten geringe Verklebungen der einzelnen Schichten. Nur die Materialien 2-blau original und 3-blau verklebten stark bis sehr stark und waren nach der Prüfung schwer bzw. nicht mehr voneinander zu trennen. Die Schichten aller Proben wiesen mindestens auf der nach außen gewandeten Seite bräunliche bis schwarze Verfärbungen auf.

Nach der Diskussion der Ergebnisse der optischen Inaugenscheinnahme der Proben werden im Folgenden die erzielten Messwerte diskutiert. Die untersuchte Kleidung wurde bei der Bestrahlung mit 30 kW/m^2 hinsichtlich der Zeit bis zum Erreichen von 12 K und 24 K auf der Probenrückseite untersucht. Die Wärmestromdichte der Probenrückseite und der Wärmedurchlassgrad werden mittels der Formeln (1) und (2) errechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 angegeben. Optimalere Werte sind bei den Zeiten bis zur Erhöhung um 12 K bzw. 24 K längere Zeiten. Je länger die Zeit bis zur Erhöhung um eine bestimmte Temperatur, umso besser ist der Träger geschützt. Kleine Wärmestromdichten auf der Probenrückseite und geringe Wärmedurchlassgrade stellen geeignetere Materialkombinationen dar.

Die erfassten Zeiten bis zur Erwärmung um 24 K, der Grenze ab der Verbrennungen 2. Grades auftreten würden, wurden mittels eines Aluminiumkalorimeters erfasst. Daher sind sie wesentlich höher als die in der aktuellen Normung [DIN EN 469] geforderten 10 s bzw. 18 s, die zum Erreichen der Leistungsstufen 1 und 2 überschritten werden müssen. Daher ist ein Vergleich der Zeit, bei der sich ein Mensch Verbrennungen 2. Grades zuzieht, schwierig.

Tabelle 5: mittlere Messwerte zum Strahlungswärmedurchgang bei Bestrahlung mit 30 kW/m², gemittelt über je 3 Proben (Die Messwerte für originale Kleidungsaufbauten sind grau dargestellt.)

Probe	Zeit bis Erhöhung 12 K [s]	Zeit bis Erhöhung 24 K [s]	Wärmestromdichte q_c auf Probenrückseite [W/m ²]	Wärmedurchlassgrad [-]
1-blau	327 ± 13	658 ± 27	7,3 ± 0,5	0,24 ± 0,02
1-rot	431 ± 15	870 ± 24	5,5 ± 0,3	0,18 ± 0,01
1-orange	434 ± 22	874 ± 45	5,5 ± 0,4	0,18 ± 0,02
1-gold	390 ± 9	784 ± 21	6,1 ± 0,4	0,20 ± 0,02
2-blau	304 ± 14	600 ± 29	8,0 ± 0,6	0,27 ± 0,02
2-blau original	295 ± 17	580 ± 22	8,3 ± 0,5	0,28 ± 0,02
3-blau	319 ± 11	630 ± 21	7,6 ± 0,4	0,25 ± 0,02
3-beige	365 ± 17	734 ± 34	6,5 ± 0,5	0,22 ± 0,02
4-blau	328 ± 13	653 ± 28	7,3 ± 0,5	0,24 ± 0,02
4-gold	388 ± 19	788 ± 25	6,0 ± 0,4	0,20 ± 0,02
5-gold	421 ± 31	852 ± 52	5,6 ± 0,5	0,19 ± 0,02
5-gold original	529 ± 31	1061 ± 42	4,5 ± 0,3	0,15 ± 0,01
6-gold	422 ± 16	849 ± 38	5,6 ± 0,4	0,19 ± 0,02
7-blau	394 ± 10	787 ± 14	6,0 ± 0,3	0,20 ± 0,01
8-blau	369 ± 24	723 ± 39	6,7 ± 0,5	0,23 ± 0,02
8-blau original	377 ± 12	732 ± 24	6,6 ± 0,4	0,22 ± 0,02
8-rot	398 ± 19	792 ± 33	6,1 ± 0,4	0,20 ± 0,02
8-rot original	413 ± 9	822 ± 20	5,8 ± 0,4	0,19 ± 0,02

Wird die Farbabhängigkeit der Messwerte und errechneten Werte, die Wärmestromdichte und der Wärmedurchlassgrad, dieser Versuche betrachtet, zeigt sich eine geringe Tendenz für geringere Durchlassgrade bei helleren Farben (rot/orange, gold/beige). Die Kleidung lässt geringfügig weniger Strahlungswärme zum Träger. Diese Tendenz ist bei allen in mehreren Farben getesteten Proben ersichtlich (Proben 1, 2, 4, 8). Die Unterschiede bei verschiedenen Obermaterialien sind jedoch größer (z.B. Durchlassgrade blaue Oberstoffe: 20 % - 27 %). D.h. dass die Streuung zwischen unterschiedlichen Materialien größer ist als bei verschiedenen Farben eines Materials. Mit diesem Parameter ist also eine größere Optimierung möglich. Es liegen mehrere Materialien im Bereich der geringen ermittelten Wärmedurchlassgrade (18 % - 22 %). Dies sind jedoch bis auf Probe 7 ausschließlich helle oder rötliche

Materialien. Beim einzigen Vergleich mit allen 3 Farbvarianten (Probe 1), schneidet die rötliche Färbung am besten ab. Dies kann, wie bereits diskutiert, auf das Verbrennen des Farbstoffs zurückgeführt werden.

4.2.2.3 Ergebnisse der Experimente des Strahlungswärmedurchgangs durch Feuerwehrschutzkleidung bei Bestrahlung mit 1 kW/m²

Die mittleren Temperaturerhöhungen bei der Bestrahlung mit Wärmestromdichte 1 kW/m² sind in Tabelle 6 angegeben. Diese Wärmestromdichte entspricht etwa der auf einer sonnigen Autobahn im Sommer in Deutschland.

Tabelle 6: mittlere Temperaturerhöhung nach 30 Minuten bei Bestrahlung mit einer Wärmestromdichte von 1kW/m² (Die Messwerte für Kleidungsoriginalaufbauten sind grau dargestellt.)

Material	ΔT (30 min) [K]
1-blau	3,3 ± 0,3
1-rot	2,7 ± 0,2
1-orange	2,3 ± 0,2
1-gold	2,6 ± 0,1
2-blau	2,9 ± 0,2
2-blau original	2,7 ± 0,3
3-blau	2,8 ± 0,4
3-beige	2,5 ± 0,2
4-blau	2,5 ± 0,2
4-gold	2,3 ± 0,2
5-gold	2,3 ± 0,3
5-gold original	1,5 ± 0,2
6-gold	2,4 ± 0,3
7-blau	2,2 ± 0,1
8-blau	2,3 ± 0,2
8-blau original	1,7 ± 0,2
8-rot	2,1 ± 0,2
8-rot original	2,0 ± 0,6

Es ist kein eindeutiger Trend für die Bevorzugung einer Farbe zu erkennen. Die marginal geringeren Temperaturerhöhungen der helleren Farben liegen meist im Fehlerbereich der dunkleren. Aus diesen Werten kann nicht direkt geschlussfolgert werden, wie warm es auf

der Haut des Trägers werden würde, da ein Aluminiumkalorimeter verwendet wurde. Wie im vorherigen Kapitel diskutiert, liefern Kalorimeter unterschiedlicher Metalle verschiedene Ergebnisse. Außerdem kann bei der menschlichen Haut eine weitere Erwärmung durch das Körperinnere stattfinden, da eine Wärmeabgabe in Form von dampfförmigem oder flüssigem Schweiß durch die untersuchte Kleidung eingeschränkt ist. Die Messungen können daher nur die Bekleidungen untereinander vergleichen, jedoch keine absoluten Werte für die Erhöhung beim Tragen liefern.

4.2.3 Versuchsreihe zum Wärmedurchgang bei Flammeneinwirkung auf Feuerwehrschutzkleidung

Zur Überprüfung der Reaktion auf die Flammeneinwirkung bzw. der Leistungsüberprüfung nach [DIN EN 469] zum Wärmeübergang – Flamme wurde das Prüfverfahren [DIN EN ISO 9151] *Schutzkleidung gegen Hitze und Flammen – Bestimmung des Wärmedurchgangs bei Flammeneinwirkung* verwendet. Die Prüfmaterialien wurden mittels einer Flamme mit einer Wärmestromdichte von $80 \pm 2 \text{ kW/m}^2$ beaufschlagt. Dabei wurde die Zeit bis zum Temperaturanstieg von 24 K erfasst. Zur Einstufung nach [DIN EN 469] wird die Leistung nach dem kleinsten Einzelergebnis, gerundet auf 0,1 s, einer gewissen Leistungsstufe zugeordnet. Da hier keine Überprüfung der Normerfüllung durchgeführt wurde, können die gewonnenen Probandaten untereinander verglichen werden. Dazu werden die Mittelwerte der drei Überprüfungen verglichen.

4.2.3.1 Aufbau und Durchführung des Wärmedurchgangs bei Flammeneinwirkung auf Feuerwehrschutzkleidung

Es wurde ein Prüfaufbau, wie in [DIN EN ISO 9151] vorgesehen, verwendet. Dieser wurde zunächst kalibriert. Zur Testung wurden die Stoffproben von einem quadratischen Prüflingsträger gehalten. Mittig auf die Proberückseite wurde das runde Kupferkalorimeter aufgebracht. Die Kupferplatte des Kalorimeters hatte einen Durchmesser von 40 mm, eine Dicke von 1,6 mm und eine Masse von 18 g. Ein isolierter Kupfer-Konstantan-Thermoelementdraht war am Kalorimeter befestigt. Das Kupferkalorimeter war in einen kreisförmigen, nicht brennbaren, wärmedämmenden Montageblock eingefasst. Das Kupferelement war mit schwarzer Farbe mit Absorptionskoeffizienten $\alpha > 0,9$ beschichtet. Am Kalorimeter erfolgte die Messwertaufnahme über einen PC. Die mittige Positionierung des Kalorimeters über der Stoffprobe wurde mittels einer Kalorimeteranordnungsplatte gewährleistet. Sie besaß eine Öffnung von 60 mm. Darin konnte der Montageblock genau positioniert werden. Unter dem Prüflingsträger befand sich eine schwenkbare Platte. Darunter war der Gasbrenner angebracht. Dieser befand sich genau 50 mm unter dem Prüflingsträger. Der Gasbrenner besaß eine

perforierte flache Oberseite und einen Durchmesser von 40 mm. Der Gasstrom war über ein Feinreguliertventil einstellbar. Die Beflammung wurde durch eine quadratische Öffnung der Länge 50 mm im Prüflingsträger vorgenommen. Dies ist in Abbildung 9 zu sehen.



Abbildung 9: Versuchsaufbau Flammeneinwirkung auf Feuerwehrsutzhleidung: Kleidung liegt unter dem runden Kalorimeter und wird beflammt.

Zur Testung der Materialien wurden sie mit dem Oberstoff nach unten auf den Prüflingsträger gelegt. Das Kalorimeter wurde, wie beschrieben, mittig darüber positioniert. Bei der Durchführung eines Versuchs wird nach dem Einschalten der Aufnahmesoftware für Zeit und Temperatur, die Probe über die Brennerflamme geführt. Der voreingestellte Wärmestrom von 80 kW/m^2 lag dann an der Probe an. Registrierte das Kalorimeter einen Temperaturanstieg von 24 K, wurde die Prüfung beendet. Die Prüfung wurde für jeden Materialaufbau mit je einer neuen, zuvor nicht untersuchten, Probe dreimal durchgeführt. Anschließend wurde jede Probe, sofern möglich auch jede Schicht, fotografiert und die Beschädigungen dokumentiert.

4.2.3.2 Ergebnisse des Wärmedurchgangs bei Flammeneinwirkung auf Feuerwehrsutzhleidung

Die optische Begutachtung während der Durchführung der Versuche ergab, dass sich zwei grundsätzliche Rauchbildungen feststellen ließen. Zum einen trat die erste Rauchentwicklung bei der Einwirkung der Flamme auf den Stoff auf, zum anderen nach dem Entfernen der Flamme. Die aufgetretenen Phänomene waren bei allen Proben ähnlich.

Eine Begutachtung der Proben nach den Versuchen zeigte, dass alle Bekleidungen mittlere bis schwere Verklebungen der Einzelschichten aufwiesen. Außerdem wiesen alle Schichten Verfärbungen auf beiden Seiten auf. Die beaufschlagten Außenflächen zeigten eine schwarze Färbung. Die Intensität der Verfärbung nahm mit der Schichttiefe ab. Es zeigte sich ein Braunton auf der Innenseite aller Bekleidungen. Bei allen Aufbauten waren außerdem schwarze Flecken auf der Innenseite des Futters zu erkennen. Diese Schicht würde auf der Unterwäsche oder Haut aufliegen. Die Membranen und der Oberstoff zeigten beim Großteil der getesteten Aufbauten nach der Beflammung eine deutliche Veränderung der Struktur. Sie wurden spröde und teils löchrig. Die Membran war, wie bereits beschrieben, mit den anderen Schichten verklebt und ist auf der erhitzten Stelle geschrumpft. Als Beispiel wird in Abbildung 10 die Kleidung 1-blau, Probe 1, gezeigt.

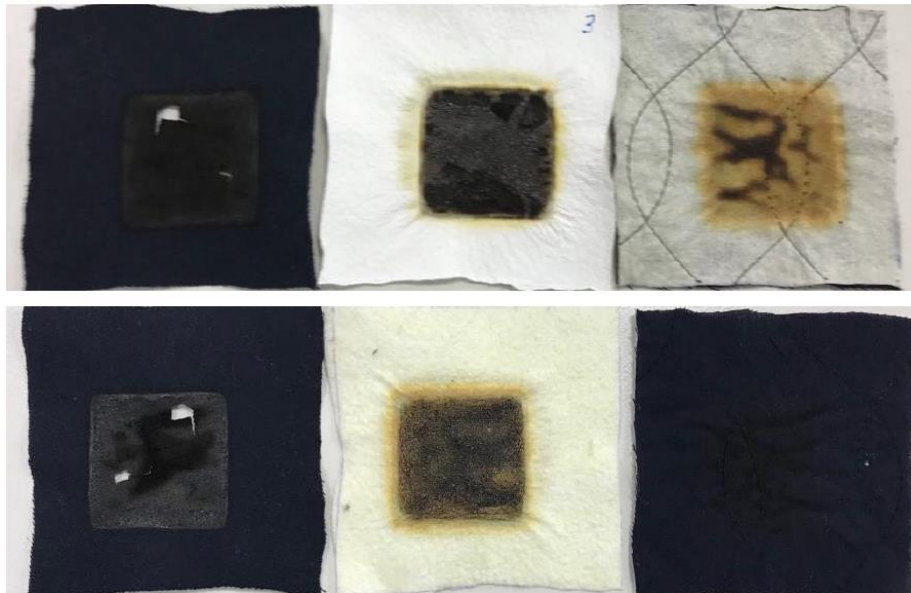


Abbildung 10: oben: Außenseiten der Schichten (v.l.n.r.: Oberstoff, Membran, Futter) und unten: Innenseite der Materialprobe 1 der Kleidung 1-blau, nach der Beflammung mit einer Flammenstromdichte 80 kW/m^2

Vergleichend mit der Beflammung mit einer Strahlungswärmedichte von 30 kW/m^2 zeigten sich bei der Beflammung gravierende Veränderungen der Kleidung. Dies ist auf die höhere Wärmestromdichte und den direkten Flammenkontakt zurückführbar. Eine Einsatzkraft wäre einmalig bei dieser Beflammung geschützt. Nach dieser irreversiblen Schädigung muss die Schutzkleidung ausgesondert werden.

Die Zeiten für das Erreichen einer Erwärmung hinter der getesteten Kleidung von 12 K , was etwa der Schmerzschwelle der Haut entspricht, und die Zeiten für eine Erhöhung um 24 K , was einer Verbrennung 2. Grades gleichkommt, sind in Tabelle 7 für eine Beflammung mit einer Wärmestromdichte von 80 kW/m^2 angegeben.

Es zeigt sich, dass die Zeiten bis zur Erhöhung um 12 K für die Bekleidungen mit der gleichen Membran und dem gleichen Futter nur geringe Abweichungen voneinander zeigen. Die Werte liegen jeweils in den Fehlerbereichen der anderen.

Tabelle 7: mittlere Zeit bis zum Erreichen der Temperaturerhöhung um 12 K und 24 K bei Beflammung mit 80 kW/m² (Die Messwerte für Kleidungsoriginalaufbauten sind grau dargestellt.)

Material	Δt (12 K) [s]	Δt (24 K) [s]
1-blau	12,3 ± 1,6	18,7 ± 2,1
1-rot	13,7 ± 1,6	19,0 ± 1,5
1-orange	13,0 ± 1,0	18,7 ± 2,1
1-gold	11,3 ± 1,6	16,6 ± 2,1
2-blau	12,0 ± 1,0	17,0 ± 1,5
2-blau original	12,0 ± 1,0	16,0 ± 1,5
3-blau	12,6 ± 1,6	19,7 ± 2,1
3-beige	13,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5
4-blau	12,3 ± 1,6	18,0 ± 2,5
4-gold	12,0 ± 1,0	17,7 ± 2,1
5-gold	12,0 ± 2,0	17,7 ± 2,1
5-gold original	14,0 ± 2,0	19,7 ± 2,1
6-gold	12,6 ± 1,6	17,7 ± 2,1
7-blau	12,0 ± 1,0	17,0 ± 1,5
8-blau	13,7 ± 3,1	20,0 ± 4,1
8-blau original	15,7 ± 1,6	20,3 ± 3,1
8-rot	13,0 ± 1,0	20,0 ± 1,5
8-rot original	15,7 ± 1,6	22,2 ± 2,5

Für die Erhöhung um 24 K zeigt sich ein ähnlicher Trend. Die Werte liegen verhältnismäßig nah beieinander. Die Fehlerbereiche überlappen meist, sodass keine eindeutigen Rückschlüsse über ein geeignetes Material oder eine vorzuziehende Farbe gemacht werden können. Die Bekleidungen haben alle in der Leistungsstufe 2 nach der Norm EN 469 [DIN EN 469] geforderten Parameter erfüllt. Wie auch in der Norm [DIN EN ISO 9151] beschrieben, sollte die gemessene Zeitdauer nicht als Dauer angesehen werden, die die Kleidung Schutz

gegen Flammen bietet. Vielmehr dient sie dem Vergleich von verschiedenen Bekleidungsproben. Die Dauer, in der eine Erhöhung von 24 K auf der Haut erreicht wird, kann nicht abgeleitet werden.

4.3 Testung des Einflusses der Eigenschaft hydrophil/hydrophob der Membran und des Futters auf den Schweißtransport

Bei den Hohenstein Instituten wurden durch die Hohenstein Institute verschiedene Tests mit unterschiedlichen Testverfahren durchgeführt. Dabei wurde der Oberstoff konstant gehalten. Membran und Futter/Isolationslage wurden in je zwei Ausführungen hydrophil und hydrophob betrachtet. Es wurden alle 4 möglichen Kombinationen getestet. Außerdem wurde für einen Test eine fünfte Probe mit geänderter Orientierung der Membran verwendet.

4.3.1 Proben

Als Obermaterial wurde einheitlich die folgende Stoffzusammensetzung in der Farbe blau gewählt: 75 % Meta-Aramid, 23 % Para-Aramid, 2 % Antistatik. Die Membranen und Futterstoffe/ Isolationslagen sind in Tabelle 8 mit resultierender Probenbezeichnung angegeben.

Tabelle 8: Probenbezeichnung und Materialzusammensetzung der Proben zur Testung des Einflusses hydrophiler/hydrophober Membranen und Futter/Isolationslagen

Probe	Zusammensetzung
PTFE-hphob	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Lagen Laminat mit PTFE-Membran, Membran zeigt zum Oberstoff (hydrophob) • Vlies versteppt mit Aramid-Viskose-Futterstoff (hydrophob)
PU-hphob	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Lagen Laminat mit PU-Membran, Membran zeigt zum Futterstoff (hydrophil) • Vlies versteppt mit Aramid-Viskose-Futterstoff (hydrophob)
PU-hphob2	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Lagen Laminat mit PU-Membran, Membran zeigt zum Oberstoff (hydrophil) • Vlies versteppt mit Aramid-Viskose-Futterstoff (hydrophob)
PU-hphil	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Lagen Laminat mit PU-Membran, Membran zeigt zum Futterstoff (hydrophil) • Vlies versteppt mit Aramid-Viskose-Futterstoff (hydrophil)
PTFE-hphil	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Lagen Laminat mit PTFE-Membran, Membran zeigt zum Oberstoff (hydrophob) • Vlies versteppt mit Aramid-Viskose-Futterstoff (hydrophil)

Vor der Versuchsdurchführung wurde die Bekleidung in Anlehnung an DIN EN ISO 6330:2013-02A im „Schonwaschgang 30 °C“ unter Verwendung von ECE-Standardwaschmittel gewaschen und gemäß Trocknungsverfahren A auf der Leine getrocknet [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute].

4.3.2 Versuchsreihe zum Wasserdampfdurchgangswiderstand

Bei dieser Versuchsreihe wird die Reaktion der Bekleidung auf dampfförmigen Schweiß untersucht.

4.3.2.1 Aufbau und Durchführung der Wasserdampfdurchgangswiderstandsuntersuchung bei Feuerweherschutzbekleidung

Der Wasserdampfdurchgangswiderstand wurde durch die Hohenstein-Institute in einem zertifizierten Verfahren ermittelt. Es wurde mit stationären Bedingungen, also zeitlich konstantem Wärme- und Feuchtefluss, gearbeitet. Die Feuchteabgabe wurde von einem künstlichen Hautmodell realisiert. Diese Messeinrichtung konnte die trockene und schwitzende Haut simulieren. Schematisch ist dies in Abbildung 11 dargestellt. Der Versuch wurde gemäß DIN EN ISO 11092:2014-12 durchgeführt. Als Messwert ergab sich der Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} in der Einheit $m^2 Pa/W$.

Das Prüfklima wurde auf eine Temperatur von 35 °C und eine relative Feuchte von 40% r.F. eingestellt.

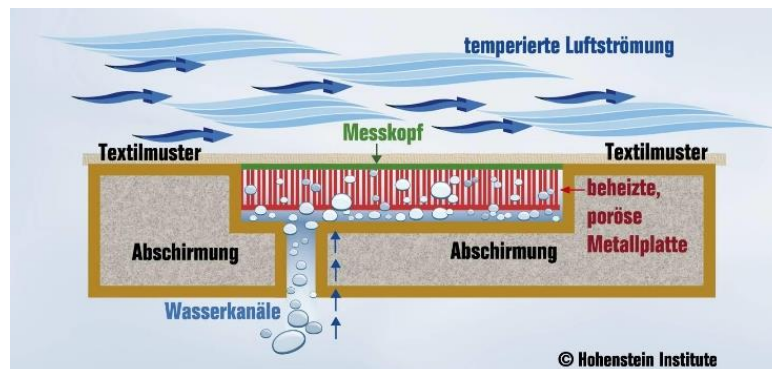


Abbildung 11: Schematische Darstellung Hautmodell [Hohenstein Institute]

4.3.2.2 Ergebnisse der Wasserdampfdurchgangswiderstandsuntersuchung bei Feuerweherschutzbekleidung

Die Untersuchungsergebnisse zum dampfförmigen Schweißtransport werden in Tabelle 9 dargestellt.

Diese Prüfung zeigte, dass die Proben PTFE-hphob, PU-hphob und PTFE-hphil nach EN 469:2014-09 Stufe 2 erreichten. Damit genügen sie auch den Anforderungen nach HuPF

Teil1 und Teil 4, bei der die Bekleidung die Leistungsstufe Z2 erreichen muss. Geringere Werte sind generell als besser zu bewerten.

Tabelle 9: mittlere Wasserdampfdurchgangswiderstände der beprobten Materialien [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute]

Material	Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} [$\text{m}^2\text{Pa/W}$]
PTFE-hphob	10,36 \pm 0,73 %
PU-hphob	20,08 \pm 2,38 %
PU-hphil	32,13 \pm 1,92 %
PTFE-hphil	13,05 \pm 0,93 %

Des Weiteren zeigten die Proben mit der PTFE-Membran eindeutig geringere Wasserdampfdurchgangswiderstände als die Materialkombinationen mit der hydrophilen Membran. Für das Auftreten dampfförmigen Schweißes sind Schutzkleidungen mit einer solchen Membran zu bevorzugen. Zu begründen sind die besseren Eigenschaften dadurch, dass bei dieser Prüfung Wasserdampf verwendet wird und PTFE-Membranen hier Vorteile haben [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute]. Bei einer PU-Membran muss der Wasserdampf zunächst an der Innenseite der Membran kondensieren, um dann in flüssiger Form durch die Membran transportiert zu werden [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute].

4.3.3 Versuchsreihe zur Pufferwirkung flüssigen Schweißes

Bei dieser Versuchsreihe wurde das Verhalten der Kleidung auf das Vorkommen flüssigen Schweißes getestet. Zu Schweißimpulsen des Trägers und damit zu einem feuchteren Mikroklima nahe der Haut des Trägers der Kleidung, kommt es durch körperliche Anstrengung. Eine Pufferwirkung der Kleidung gegenüber flüssigem Schweiß erhöht den subjektiven Tragekomfort.

4.3.3.1 Aufbau und Durchführung der Untersuchung der Pufferwirkung bei flüssigem Schweiß

Die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß wurde ebenfalls mittels des Hautmodells erfasst und durch mehrere Kennzahlen, die Pufferkennzahl K_f , die Schweißaufnahme G_2 und den Schweißtransport F und F_1 , dargestellt. Die Prüfbedingungen entsprachen den Standardprüfbedingungen der Prüfvorschrift BPI 1.2.1: 2010-12, Abschnitt 3.

Die Pufferkennzahl liegt zwischen Null und Eins und sollte möglichst groß sein. Die Schweißaufnahme gibt die aufgenommene Schweißmenge in Gramm an. Der Schweißtransport kennzeichnet die vom Textil pro m² Fläche und Stunde von der Haut abtransportierte Flüssigkeitsmenge in Gramm.

Als Prüfklima wurden eine Temperatur von 35 °C und eine relative Luftfeuchte von 30% r.F. gewählt.

4.3.3.2 Ergebnisse der Untersuchung der Pufferwirkung bei flüssigem Schweiß

Die Kennzahlen, die die Pufferwirkung flüssigen Schweißes beschreiben, sind in Tabelle 10 für die zusammengestellten Materialproben angegeben.

Tabelle 10: mittlere Messergebnisse für die Pufferwirkung flüssigen Schweißes [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute]

Material	Pufferkennzahl K_f	Schweißaufnahme G_2 [g]	Schweißtransport F_1 [g/m ² h mbar]	Schweißtransport F [g/m ² h]
PTFE-hphob	0,81 ± 0,02	8,64 ± 0,3	8,9	360 ± 19,4
PU-hphob	0,80 ± 0,02	10,06 ± 0,3	5,0	203 ± 19,4
PU-hphob2	0,80 ± 0,02	10,18 ± 0,3	4,6	188 ± 19,4
PU-hphil	0,76 ± 0,02	9,89 ± 0,3	3,9	156 ± 19,4
PTFE-hphil	0,80 ± 0,02	8,64 ± 0,3	8,4	338 ± 19,4

Die erhobene Pufferkennzahl K_f liegt zwischen Null und Eins. Für guten Tragekomfort sorgt ein Textil mit einem hohen Wert. Die Werte der untersuchten Materialien lagen sehr dicht zusammen. Für alle Materialien konnten Werte um 0,8 gemessen werden. Damit sind sie der höchsten Leistungsstufe 1 mit $K_f > 0,7$ der HuPF Teil 1 bzw. 4 zuzuordnen.

Die Muster mit PU-Membran nahmen eine höhere Schweißmenge mit 9,89 g bis 10,18 g auf als die mit PTFE-Membran mit 8,64 g. Die höhere aufgenommene Menge an Schweiß- bzw. Wasser ist durch die PU-Membran erklärbar. Der Feuchtigkeitstransport durch eine PU-Membran findet in flüssiger Form statt [Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute].

Außerdem zeigte sich in den Messwerten, dass der Schweißtransport nach außen bei den Kombinationen mit PTFE-Membranen deutlich erhöht gegenüber den Proben mit PU-Membran war. Damit zeigten sich die Kombinationen mit PTFE als deutlich günstiger für den Träger. Dies widersprach den Erwartungen.

Bezüglich der variierten Futterstoffeigenschaften (hydrophil und hydrophob) konnten keine Zusammenhänge beim Transport flüssigen Schweißes gefunden werden.

4.3.4 Messwerte für den Wärmedurchgang

Zur besseren Einordnung der Bekleidungsproben, auch im Kontext Wärmedurchgang, wurden die in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 vorgestellten Experimente zum Wärmedurchgang bei Strahlung und Flammeneinwirkung für die an den Hohenstein Instituten hinsichtlich des Schweißtransports untersuchten Bekleidungsproben durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 angegeben.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die Proben mit dem hydrophilen Futterstoff für beide Membrantypen besser abschneiden. Dies kann durch die besseren Wärmedurchgangseigenschaften, jedoch auch am dickeren Futterstoff, bedingt sein. Das hydrophile Futter war 6 mm stark, wohingegen das hydrophobe Futter 5 mm aufwies. Die Flächengewichte stellten sich wie folgt dar, hydrophil mit ca. 290 g/m² und hydrophob mit ca. 210 g/m². Des Weiteren zeigt sich, dass die Proben mit der PTFE-Membran jeweils bei gleichem Futterstoff besser abschneiden, als die Proben mit der PU-Membran.

Tabelle 11: Messwerte für die Bestrahlung mit den Wärmestromdichten 30 kW/m² und 1 kW/m² sowie die Beflammung mit 80 kW/m²

	Strahlung 30 kW/m ²		Strahlung 1 kW/m ²	Flamme 80 kW/m ²
Material	q_c [kW/m ²]	$TF (q_0)$	$\Delta T (30 \text{ min})$ [K]	$\Delta t (24 \text{ K})$ [s]
PTFE-hphob	7,4 ± 0,4	0,25 ± 0,02	2,5 ± 0,2	18,0 ± 1,5
PU-hphob	9,0 ± 1,1	0,30 ± 0,04	2,5 ± 0,2	15,0 ± 1,5
PU-hphil	7,0 ± 0,3	0,23 ± 0,02	2,7 ± 0,2	17,3 ± 2,1
PTFE-hphil	6,0 ± 0,7	0,20 ± 0,03	1,9 ± 0,2	20,7 ± 2,1

Es ergab sich insgesamt, auch im Zusammenhang mit den Feuchtetransporteigenschaften, dass die PTFE-Membran, die in diesem Forschungsprojekt als Vertreter hydrophober Membranen gewählt wurde, günstigere Eigenschaften als der Vertreter der hydrophilen Membranen, die PU-Membran, aufwies.

Einen eindeutigen Hinweis, welcher Futterstoff besser ist, konnte nicht gefunden werden. Laut den vorliegenden Ergebnissen sind hydrophile Futter zu bevorzugen. Dieser Zusammenhang kann jedoch durch die Dicken und die Flächengewichte der Materialien verfälscht sein. Für die reine Betrachtung des Feuchtetransports schneidet das hydrophobe Futter marginal besser ab. Die Unterschiede der beiden Futterstofftypen jeweils mit gleicher Membran, haben jedoch für die wesentlichen Eigenschaften Pufferkennzahl, Schweißaufnahme und Schweißtransport jeweils überlappende Fehlerbereiche. Damit ist keine eindeutige Aussage möglich.

4.4 Trageversuche mit Probanden

Aus den bisherigen Forschungsergebnissen konnten die in den Laborversuchen optimalen Bekleidungen herausgestellt werden. Diese wurden im dritten Forschungsschritt beschafft und das subjektive Trage- und Heatstress-Empfinden durch Probanden beurteilt.

4.4.1 Kleidungs Auswahl/ -beschaffung für die Trageversuche

Für die Trageversuche wurden Bekleidungsensembles gemäß den vorherigen Forschungsergebnissen ausgewählt. Es wurden zwei Produkte identifiziert, die nach den bisherigen Forschungsergebnissen einen positiven Einfluss auf das Heatstress-Verhalten haben sollten. Ein weiteres Produkt, das nicht speziell in dieser Richtung optimiert wurde, diente als Referenz. Alle Bekleidungsensembles sind zertifiziert und damit für die Brandbekämpfung im Innenangriff zugelassen. Die Stoffzusammensetzungen der Kleidungsstypen sind in Tabelle 12 angegeben.

Tabelle 12: Zusammensetzung und Gewicht der Kleidung für Trageversuche

Probenbezeichnung (nach Oberstofffarbe)	Materialzusammensetzung		
	Obermaterial	Mittellage	Innenlage
Blau (Gewicht Jacke: 2,40 kg, Hose: 1,45 kg)	99 % Aramid 1 % Antistatik	Nässesperre: Polyester Gestrick mit PES-Beschichtung (Orientierung: zum Obermaterial)	Isolation/ Innenfutter: Kohlefasernadelvlies verstept mit 50 % Aramid/ 50 % Viskose FR
Rot (Gewicht Jacke: 2,25 kg, Hose: 1,75 kg)	83 % Meta-Aramid 15% Para-Aramid 2 % Antistatikfaser	Membran: 100% Aramid mit ePTFE-Membran (Orientierung: zum Träger)	Innenfutter/ Lining: 93 % Meta-Aramid 5 % Para-Aramid 2 % Antistatikfaser
Gold (Gewicht Jacke: 2,10 kg, Hose: 1,55 kg)	61 % Para-Aramid 37 % Polybenzimidazol 2 % Antistatik	Isolationslage als Zwischenlage: 95 % Meta-Aramid, 5 % Para-Aramid	Nässesperre/ Membran: 50 % Aramid, 50 % Viskose mit ePTFE-Membran (Orientierung: zum Obermaterial)

Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde versucht, dass der Schnitt der Kleidungen möglichst ähnlich ist, so dass die gleiche Menge an Luft mit in die geschlossene Kleidung eingeschlossen wird sowie die Ventilation ein ähnliches Verhalten zeigt. Außerdem wurde die Überlappung von Jacke und Hose sowie Hose und Stiefeln annähernd gleich gewählt. Dies war bedingt durch unterschiedliche Hersteller nicht in Gänze möglich, da die beschaffte Kleidung Standardware ist und nicht speziell für dieses Projekt konfektioniert wurde, um Lieferzeiten möglichst kurz zu halten.

Die Unterbekleidung wurde für allen Probanden gleich gewählt. Langarmshirts und lange Unterhosen aus Aramid (48,5 %), Lenzing FR (48,5 %) und Carbon/ Belltron (3 %) wurden genutzt.

Die Feuerwehrsutzbekleidung wurde vor dem ersten Trageversuch fünfmal nach Herstellerangaben gewaschen und anschließend imprägniert. Die Unterbekleidung wurde einmal gewaschen. Vor der Weitergabe an den nächsten Probanden fand ein weiterer Waschgang nach Herstellerangaben statt. Je 3 Probanden trugen die Bekleidung nacheinander.

4.4.2 Probandenauswahl

Nach Rücksprache mit Forschern der Hohenstein Institute [Gespräch mit Forschern der Hohenstein-Institute] wurden die Probanden so ausgewählt, dass sie eine ähnliche Statur und Körpergröße haben. Dies brachte den Vorteil, dass die Kleidung in einer Größe beschafft werden konnte. Des Weiteren wurde eine ähnliche körperliche Fitness vorausgesetzt, so dass die durchzuführenden Übungen ähnlich anstrengend für alle Teilnehmer waren. Ein ähnliches Schwitzverhalten der Probanden wurde angestrebt. Hier konnte jedoch nur das subjektive Empfinden der Teilnehmer abgefragt werden.

Die Probanden entstammten dem Personal von Berufsfeuerwehren, Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften und dem IBK Heyrothsberge. Aus sechs Institutionen nahmen je 4 Probanden an den Trageversuchen ohne Wärmeexposition teil. Diese Versuche wurden gemäß den Vorgaben des IBK an den Standorten der beteiligten Institutionen in Eigenregie durchgeführt. Für Trageversuche vor der am IBK installierten Wärmestrahlerwand, siehe Kapitel 4.4.4, wurden 6 Probanden aus dem Personal von Berufsfeuerwehren und dem IBK gewählt.

4.4.3 Fragebogen

Der Fragebogen, der nach jedem Testszenario und jeder getragenen Bekleidung von jedem Probanden ausgefüllt wurde, gliederte sich in die Abschnitte Datenschutz, Bekleidungsnummer (rot, blau, gold), Temperaturempfinden, Feuchteempfinden, Komfort, Anstrengung und Schwitzverhalten. Daran schlossen sich ein Freitextfeld und der Dank für die Teilnahme an. Folgende Fragen waren zu beantworten:

Temperaturempfinden

- Wie beurteilen Sie das Temperaturempfinden im Bereich Oberkörper?
- Wie beurteilen Sie das Temperaturempfinden im Bereich Unterkörper?

Die Antwortmöglichkeiten sind: viel zu warm, zu warm, komfortabel warm, neutral, komfortabel kalt, zu kalt, viel zu kalt.

Feuchteempfinden

- Wie beurteilen Sie das Feuchteempfinden im Bereich Oberkörper?
- Wie beurteilen Sie das Feuchteempfinden im Bereich Unterkörper?

Die Antwortmöglichkeiten sind: nass, feucht, leicht feucht, trocken.

Komfort

- Wie bewerten Sie den allgemeinen Komfort der Feuerwehrüberjacke im Trageversuch?
- Wie bewerten Sie den allgemeinen Komfort der Feuerwehrüberhose im Trageversuch?
- Wie bewerten Sie die Beweglichkeit im Bereich Oberkörper?
- Wie bewerten Sie die Beweglichkeit im Bereich Unterkörper?
- Wie empfinden Sie das Gewicht der Jacke?

Die Antwortmöglichkeiten werden durch Schulnoten wiedergegeben: ungenügend (6), mangelhaft (5), ausreichend (4), befriedigend (3), gut (2), sehr gut (1).

Anstrengung

- Was für eine Anstrengung haben Sie während der körperlichen Aktivität empfunden?

Die Skala läuft von 6 bis 20, wie in Kapitel 3.8, gezeigt. Im Fragebogen werden Erläuterungen zur Intensität gegeben.

Schwitzverhalten

- Wie stark haben Sie geschwitzt?

Die Antwortmöglichkeiten sind: nur dampfförmig, mäßig, stark, sehr stark.

- Wie lange haben Sie für die Akklimatisierung benötigt?

Die Antwortmöglichkeiten sind: Auswahl zwischen 1 - 30 min, über 30 min.

Weitere Anmerkungen

In einem Freitextfeld können Anmerkungen und Hinweise gegeben werden.

Zur zügigen Abfrage und Auswertung nach der Nutzung der jeweilig getesteten Kleidung wurde das Online-Tool SoSci Survey genutzt.

4.4.4 Szenarien

Für die Trageversuche ohne Wärmeexposition wurden zunächst zwei Szenarien gewählt. Alle Versuche fanden bei den beteiligten Institutionen in Eigenregie statt. Zum einen wurde ein Test mit geringer körperlicher Beanspruchung durchgeführt, zum anderen mit erhöhter Aktivität. Dadurch sollte beim Szenario 1 das dampfförmige Schwitzen bzw. moderates flüssiges Schwitzen simuliert werden. Das Testszenario 2 war so ausgestaltet, dass von flüssigem Schweiß bei den Probanden ausgegangen werden konnte.

Als Rahmenbedingungen wurden für die Tests Umgebungstemperaturen von 10 - 20 °C und eine trockene Umgebung vorgesehen. Hierzu konnte z.B. eine Fahrzeughalle oder eine Freifläche genutzt werden.

Die Probanden trugen neben der Schutzkleidung und der vorgegebenen Unterwäsche, Einsatzstiefel, Feuerwehrschtzhandschuhe und einen Feuerwehrhelm.

Die Durchführung des Szenarios mit geringer Beanspruchung war an den Durchführungstest aus [DGUV, 2016] angelehnt. Das Szenario war gemäß nachfolgender Gliederung in die drei Bereiche Vorbereitung, dynamischer Test und Akklimatisierung eingeteilt.

Vorbereitung

- Anprobe und Größenanpassung
- Fixierung gemäß Gebrauchsanweisung
- Überprüfung des Sitzes der Kleidung

Dynamischer Test (bei 10 - 20 °C, in trockener Umgebung)

- Gehen
 - 10 Minuten bei angenehmer Geschwindigkeit, ca. 3 - 4 km/h
 - zurückgelegter Weg in 10 Minuten etwa 500 - 600 m
- Treppensteigen
 - 3 Stockwerke auf- und abwärts
- Gehen
 - 5 Minuten bei angenehmer Geschwindigkeit, ca. 3 - 4 km/h
 - zurückgelegter Weg in 10 Minuten etwa 250 - 300 m
- Heben und Ablegen eines 5 kg schweren Gegenstands auf 1,80 m Höhe
 - dreimaliges Wiederholen

- Gehen
 - 10 Minuten bei angenehmer Geschwindigkeit, ca. 3 - 4 km/h
 - zurückgelegter Weg in 10 Minuten etwa 500 - 600 m
- Schlauch ausrollen, Schlauch zusammenlegen

Akklimatisierung

- Ablegen Jacke
- Akklimatisierungszeit
- Ausfüllen Fragebogen

Zusätzlich zu diesem Szenario wurde als zweites die lokale Atemschutzübungsstrecke der jeweiligen Feuerwehr mit der zu testenden Bekleidung unter Atemschutz durchlaufen. Hier wurde eine erhöhte körperliche Beanspruchung erzielt. Zusätzlich wurde die Ventilation der Kleidung eingeschränkt, da unter Atemschutz gearbeitet wurde.

Neben der zur Verfügung gestellten Einsatzbekleidung und Unterwäsche wurden Feuerwehrstiefel, Feuerwehrschtzhandschuhe, eine Flammenschutzhaube sowie ein Feuerwehrschutzhelm getragen.

Die Bekleidung wurde nach den beiden Testszenarien gemäß Herstellerangaben gewaschen. Danach wurde sie einem anderen Probanden zur Verfügung gestellt.

Ein drittes Szenario mit definierter Wärmestrahlung von ca. 1 kW/m² wurde mit begrenzter Personenanzahl von 6 Probanden durchgeführt. Die Strahlung wurde durch eine in einem Raum befindlichen Wärmestrahlerwand am IBK Heyrothsberge sichergestellt. Neben der Schutzkleidung trugen die Probanden die bereitgestellte Unterwäsche und Schutzstiefel. Innerhalb des Raumes mussten die Probanden drei Stationen von je 6 Minuten durchlaufen. Die Stationen waren:

1. leichtes Radfahren auf dem Fahrradergometer
2. Stehen, je eine Vierteldrehung des Probanden nach einer Minute
3. Jeweils 50 Sekunden Auf-der-Stelle-Gehen mit anschließenden 10 Sekunden erhöhter Aktivität (Kniebeuge, Kniehebelauf, Hampelmann-Sprünge, Laufen, Hockstrecksprünge, Kniebeuge).

Ein Foto, aufgenommen während der Durchführung, ist in Abbildung 12 angegeben. Nach dem Beenden der Übungen und der Akklimatisierung wurde von jedem Probanden der Fragebogen ausgefüllt. Anschließend fand der Durchgang mit einer anderen Versuchskleidung statt.



Abbildung 12: Szenario mit definierter Wärmestrahlung mit drei durchführenden Probanden vor einer Wärmestrahlerwand. Der linke Proband steht. Der Proband in der Mitte fährt Rad. Der rechte Proband läuft auf der Stelle.

4.4.4.1 Grundvoraussetzungen der Trageversuche

Jeder Proband durchlief das gleiche Szenario innerhalb der gleichen Zeit und war dabei der gleichen Temperaturspanne ausgesetzt. So sind die Ergebnisse eines Trageregimes und der verschiedenen Szenarien vergleichbar.

Des Weiteren sollte bei Trageversuchen darauf geachtet werden, dass jegliche Markenbezeichnungen der Schutzkleidung (Hersteller- und Zusammensetzungsetiketten) vor der Ausgabe an die Probanden entfernt wird. Der Rückschluss auf die genaue Art der Kleidung soll damit so weit wie möglich unterbunden werden. Diese vollständige Entfernung war bei der beschafften Probekleidung nicht möglich.

4.4.5 Ergebnisse zum subjektiven Trageempfinden

Die Ergebnisse der Probandenbefragungen sind in der folgenden Tabelle 13 für die Szenarien 1 (körperlich leichte Beanspruchung) und Szenario 2 (Durchlaufen der Atemschutzübungsstrecke) zusammengefasst.

Tabelle 13: Durchschnittliche Antworten der Probanden nach Durchlauf der Tragetestsszenarien der leichten körperlichen Beanspruchung (Szenario 1) und der Atemschutzübungstrecke (Szenario 2). Als Fehler wurde die Standardabweichung angegeben. Maximale Antwortzahl pro Szenario und Bekleidung: 23.

Bewertungskriterien	Antwortmöglichkeiten		Szenario 1			Szenario 2		
			Rot (19)	Gold (17)	Blau (18)	Rot (21)	Gold (19)	Blau (16)
Bekleidung (Anzahl beantworteter Fragebögen)								
Anstrengung	6	überhaupt nicht anstrengend	9,8 ± 1,6	9,9 ± 1,8	10,8 ± 2,4	12,9 ± 2,1	13,3 ± 1,6	14,1 ± 2,7
	7	extrem leicht						
	8							
	9	sehr leicht						
	10							
	11	leicht						
	12							
	13	etwas anstrengend						
	14							
	15	anstrengend, schwer						
	16							
	17	sehr anstrengend						
	18							
19	extrem anstrengend							
20	maximale Anstrengung							
Temperaturempfinden Oberkörper	1	viel zu warm	2,9 ± 0,9	3,5 ± 0,6	2,3 ± 0,8	2,8 ± 0,8	3,2 ± 0,7	1,9 ± 0,7
	2	zu warm						
	3	komfortabel warm						
	4	neutral						
Temperaturempfinden Unterkörper	5	komfortabel kalt	3,2 ± 1,1	3,6 ± 0,5	3,0 ± 0,8	2,9 ± 0,9	3,3 ± 0,7	2,1 ± 0,6
	6	zu kalt						
	7	viel zu kalt						
Feuchteempfinden Oberkörper	1	nass	3,1 ± 1,0	3,4 ± 0,6	2,4 ± 0,9	2,3 ± 0,7	2,7 ± 0,7	1,6 ± 0,5
	2	feucht						
	3	leicht feucht						
Feuchteempfinden Unterkörper	4	trocken	3,2 ± 1,0	3,5 ± 0,6	2,5 ± 0,9	2,6 ± 0,7	2,8 ± 0,8	1,8 ± 0,8
Stärke Schwitzen	1	nur dampfförmig	1,6 ± 0,6	1,5 ± 0,6	3,0 ± 2,2	2,6 ± 0,7	2,2 ± 0,5	3,2 ± 0,8
	2	mäßig						
	3	stark						
	4	sehr stark						
Komfort Jacke	1	sehr gut	1,6 ± 0,8	2,0 ± 0,8	3,6 ± 1,1	2,0 ± 0,9	2,1 ± 0,7	3,6 ± 1,3
	2	gut						
	3	befriedigend						
Komfort Hose	4	ausreichend	1,6 ± 0,8	1,9 ± 0,4	3,6 ± 1,2	2,1 ± 0,7	1,7 ± 0,6	3,4 ± 1,4
	5	mangelhaft						
	6	ungenügend						
Akklimatisierungslänge	Zeit in Minuten		4,1 ± 2,4	2,1 ± 0,9	5,6 ± 2,9	6,2 ± 3,1	6,1 ± 2,8	10,2 ± 5,1

Im Folgenden werden die erhobenen Daten ausgewertet und untereinander verglichen. Nicht alle Probanden haben für jede Bekleidung die Fragebögen ausgefüllt. Eine Ursache dafür war nicht ermittelbar. Insgesamt lagen somit für jede Bekleidung und jedes Szenario weniger als die möglichen 23 Antworten vor.

Die Anstrengung ergab sich für das Szenario 1 zu einer durchschnittlichen Anstrengung zwischen „sehr leicht“ und „leicht“. Die Belastung beim Durchlaufen der Atemschutzübungsstrecke bewerteten die Probanden zwischen „etwas anstrengend“ und „anstrengend/schwer“. Damit werden auch ein etwas erhöhtes Temperatur- und ein stärkeres Feuchteempfinden bei den Durchläufen der Atemschutzstrecke erwartet.

Beim Temperaturempfinden zeigte sich deutlich, dass bei allen Bekleidungen die Temperatur am Oberkörper leicht wärmer als am Unterkörper empfunden wurde. Außerdem zeigte sich bei beiden Durchgängen am Ober- und Unterkörper, dass die goldene Kleidung am kältesten und die blaue am wärmsten bewertet wurde. Die rote Bekleidung lag leicht hinter der goldenen. Die Streubreiten der Antworten verschiedener Probanden überlappen. Subjektiv war der Durchlauf der Atemschutzstrecke (Szenario 2) für die Probanden erwartbar wärmer als das leichtere Szenario 1.

Beim Feuchteempfinden waren die Trends ähnlich denen für das Temperaturempfinden. Der Oberkörper wurde als feuchter empfunden als der Unterkörper. Beim Durchgang durch die Atemschutzübungsstrecke wurde das Feuchtigkeitsempfinden erwartbar „nasser“ beurteilt als beim Szenario 1. Bei der Unterscheidung der Textilien zeigte sich erneut der eindeutige Trend, dass die goldene Kleidung am trockensten und damit am besten abschnitt. Die blaue Kleidung hinterließ das subjektiv feuchteste Hautempfinden der Probanden.

Mit dem Feuchteempfinden korrelierte auch die Stärke des Schwitzens. Je wärmer das Temperaturempfinden eingeschätzt wurde, desto stärker wurde flüssig geschwitzt und desto feuchter war das Empfinden auf der Haut. Für das leichte Bewegungsszenario zeigten die Probanden ein ähnliches Schwitzverhalten in der goldenen und roten Kleidung. Sie schwitzten dampfförmig bis mäßig flüssig. Die Probanden schwitzten in der blauen Bekleidung „stark“. Beim Durchlauf der Atemschutzübungsstrecke schwitzten die Probanden „mäßig“ (goldene Kleidung) oder „stark“ (rote, blaue Kleidung).

Der Komfort, der nur indirekt mit dem Heatstress-Verhalten zusammenhängt, wurde ebenfalls erfragt. Die Benotung erfolgte gemäß Schulnoten von Eins bis Sechs. Die Oberbekleidung zeigte von der roten, über die goldene hin zur blauen Bekleidung, „gute“ bis „ausreichende“ Ergebnisse. Die Auswertung der Befragungsdaten zur Einsatzhose zeigten für die leichten körperlichen Übungen den gleichen Trend. Für das schwerere Szenario gab es eine Änderung in der Reihung zwischen roter und goldener Bekleidung. Die Auswertung der Freitextfelder ergab, dass die Kniepolster der roten Hose zum Teil nicht gut saßen. Für den Komfort

gibt es weitere Einflussfaktoren als den Heatstress. Dennoch spielt der Komfort auch in das Heatstress-Verhalten rein.

Die Akklimatisierungszeit bestätigte die bisherigen Trends. Sie lag für die schwereren Arbeiten im Szenario 2 höher als bei Szenario 1. Für die blaue Bekleidung ergaben sich stets die längsten Akklimatisierungszeiten. Beim Durchlauf der Atemschutzübungsstrecke waren die Akklimatisierungszeiten für die goldfarbene und rote Bekleidung sehr ähnlich. Beim leichteren Szenario 1 schnitt die goldene Kleidung erneut besser ab.

Die Auswertung der Kommentare des Freitextfelds zeigen einige wiederkehrende Kommentare für die jeweilige Kleidung. Für die rote Kleidung wurden die Kniepolster als zu rutschhemmend und die Hosenträger als zu starr empfunden. Außerdem wurde in einigen Kommentaren angegeben, dass die Unterwäsche den meisten Schweiß aufnahm. Für die goldene Kleidung wurden ähnliche Kommentare zum Schweiß in der Unterbekleidung abgegeben. Des Weiteren wurde der Sitz des Kragens dieser Kleidung bemängelt. Der Sitz und das Gewicht wurden positiv hervorgehoben. Für die blaue Bekleidung waren die Kommentare über den nicht optimalen Sitz der Daumenschlaufen gehäuft. Hier wurde auch erwähnt, dass der Schweiß von der Unterwäsche auf Grund der Menge auf die Schutzkleidung übergegangen ist.

Die lange Unterwäsche, die einen großen Teil des Schweißes aufgenommen hat, wurde, wenn in den Kommentaren erwähnt, überwiegend als positiv empfunden. Ein beispielhafter Kommentar lautete: „Es war festzustellen, dass sich die komplette Feuchtigkeit nur in der Unterwäsche gesammelt hat, die Überhose und Jacke sind komplett trocken geblieben, [...] Die Unterwäsche hat sich, obwohl sie „Nass“ war, weder kalt noch nass am Körper angefühlt. Auch längere Zeit nach dem Auskleiden konnte kein Auskühlen festgestellt werden, was sich sehr positiv angefühlt hat und auch im Einsatzdienst zu einem positiven Effekt führen könnte, da die Gefahr sich zu erkälten oder ähnliches, verringert wird.“ Diesem Kommentar kann der Freitext „Wärmeempfinden/ Feuchtigkeit liegt an der langen Unterwäsche - viel zu warm - NICHT geeignet!“ entgegengesetzt werden. Negative Kommentare über die Unterbekleidung waren jedoch sehr selten.

Die Ergebnisse der Trageversuche im Szenario 3 mit der Einbringung einer definierten Wärmestrahlung werden in

Tabelle 14 separat aufgeführt. Hier zeigten sich generell sehr ähnliche Trends, wie in den anderen beiden Szenarien. Diese werden im Folgenden näher beleuchtet.

Die Anstrengung für das Szenario wurde mit der Einordnung in die Borg-Skala bei Werten zwischen 11 und 13 als höhere Anstrengung als im leichten Szenario 1, aber geringere Anstrengung als beim Durchlauf der Atemschutzübungsstrecke, eingeordnet.

Tabelle 14: Durchschnittliche Antworten der Probanden nach Durchlauf des Szenarios 3 (Wärmestrahlerwand). Als Fehler wurde die Standardabweichung angegeben. Maximale Antwortzahl pro Szenario und Bekleidung: 6.

Bewertungskriterien	Antwortmöglichkeiten	Szenario 3 (Wärmestrahlerwand)		
		Rot (6)	Gold (6)	Blau (6)
Bekleidung (Anzahl beantworteter Fragebögen)				
Anstrengung	6 überhaupt nicht anstrengend 7 extrem leicht 8 9 sehr leicht 10 11 leicht 12 13 etwas anstrengend 14 15 anstrengend, schwer 16 17 sehr anstrengend 18 19 extrem anstrengend 20 maximale Anstrengung	11,7 ± 0,5	11,3 ± 8,1	12,2 ± 0,8
Temperaturempfinden Oberkörper	1 viel zu warm 2 zu warm 3 komfortabel warm 4 neutral	2,8 ± 0,4	3,3 ± 0,5	2,7 ± 0,5
Temperaturempfinden Unterkörper	5 komfortabel kalt 6 zu kalt 7 viel zu kalt	2,7 ± 0,5	3,5 ± 0,8	2,8 ± 0,8
Feuchteempfinden Oberkörper	1 nass 2 feucht	2,2 ± 0,8	2,8 ± 1,0	2,3 ± 0,8
Feuchteempfinden Unterkörper	3 leicht feucht 4 trocken	2,2 ± 1,0	2,8 ± 1,0	2,5 ± 0,8
Stärke Schwitzen	1 nur dampfförmig 2 mäßig 3 stark 4 sehr stark	2,5 ± 0,5	2,2 ± 0,8	2,5 ± 0,5
Komfort Jacke	1 sehr gut 2 gut 3 befriedigend	2 ± 0,9	1,5 ± 0,5	3,2 ± 1,0
Komfort Hose	4 ausreichend 5 mangelhaft 6 ungenügend	2,5 ± 1,0	2,0 ± 0,0	3,3 ± 1,0
Akklimatisierungslänge	Zeit in Minuten	8,3 ± 1,6	5,5 ± 1,4	8,8 ± 2,7

Beim Temperaturempfinden, sowohl am Oberkörper als auch im Bereich Hose, zeigte sich erneut, dass die goldene Kleidung den kühlfsten Eindruck hinterlässt. Die anderen beiden Bekleidungen lagen etwa gleichauf.

Dieser Trend setzte sich beim Feuchteempfinden fort. Die goldene Kleidung wurde am trockensten empfunden, die anderen folgten mit kleinem Abstand. In der goldenen Bekleidung wurde auch das mäßigste Schwitzen verzeichnet. Damit wurde der Trend des Feuchte- und Temperaturempfindens bestätigt. Anders als bei den vorherigen Tragetests den Szenarien 1 und 2, zeigten sich in den Kategorien Temperatur-, Feuchteempfinden und Stärke des Schwitzens nur sehr geringe Unterschiede zwischen roter und blauer Bekleidung.

Für den Komfort zeigte sich die Bewertungsreihenfolge von gut bis befriedigend beginnend mit gold, über rot zu blau. Dies stellt einen Unterschied zu den bisherigen Szenarien dar. Hier erzielte die rote Kleidung meist die besten Ergebnisse. Es ist nicht ersichtlich, ob dieser Effekt durch die geänderten körperlichen Übungen und einen Komfortunterschied auftritt oder durch das subjektive Empfinden der eingesetzten Probanden. Da die Probandenzahl im Vergleich zu den vorherigen Szenarien reduziert wurde, konnte der letztgenannte Effekt nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Die längsten Akklimatisierungszeiten wurden je nach Bekleidung beim Durchlaufen der Atemschutzübungsstrecke (Szenario 2) und im Szenario 3 ermittelt. Dies lag im Szenario 2 daran, dass die Probanden sehr starke körperliche Aktivitäten ausführen mussten und im Szenario 3 daran, dass die Probanden nicht nur einen Wärmeeintrag durch die körperliche Aktivität, sondern auch einen großen Wärmeeintrag durch die äußerliche Exposition hatten. Die Akklimatisierungszeit bei körperlich weniger anstrengenden Tätigkeiten und fehlender externer Wärmeexposition sind entsprechend geringer.

Im Freitextfeld des Fragebogens wurden teils vorherige Kommentare, wie die unflexiblen Hosenträger der einen Kleidung und das Auffangen des Schweißes in der Unterbekleidung, bestätigt. Außerdem fiel der Wärmeeintrag im Bereich der Knie bei verschiedenen Bekleidungen sehr unterschiedlich aus. Diese spiegelt sich im Temperaturempfinden im Bereich Hose wider.

Einige Probanden betonten, nachdem sie dieses Szenario mit den unterschiedlichen Bekleidungen und teils mit ihrer eigenen Feuerweherschutzausrüstung durchlaufen hatten, dass sie die Beschaffung spezieller Unterwäsche für ihre Einsätze forcieren möchten. Es zeige sich ein deutlicher Mengenunterschied an Schweiß in der Schutzbekleidung beim Tragen des üblichen Poloshirts. So könne außerdem schnell die Unterwäsche zwischen Einsätzen getauscht werden. Des Weiteren kann ein trockenes Gefühl und damit mehr Wohlbefinden und ggf. mehr Leistungsfähigkeit erreicht werden. Trotz der Nässe der Unterwäsche wurde diese nicht negativ, sondern eher als angenehm eingestuft.

Insgesamt zeigte sich, dass die goldene und teils die rote Kleidung bezüglich Heatstress zu bevorzugen sind. Dies kann dadurch begründet werden, dass für den dampfförmigen und teils flüssigen Schweiß die ePTFE-Membranen vorteilhaft sei. Die Laboruntersuchungen aus Kapitel 4.3 zeigten dies auch bereits. Eine weiterer Grund kann die geringere Masse der Jacken, im Vergleich zur blauen, sein. Durch dünnere Stofflagen kann Feuchtigkeit wahrscheinlich besser nach außen abgegeben werden.

Obwohl Unterschiede zwischen den Bekleidungen auftraten, waren diese nicht gravierend. Bis auf das Bewertungskriterium „Komfort“ liegen jeweils die schlechteste und beste Bewertung eines Kriteriums nur etwa einen Bewertungspunkt auseinander. Das unterstreicht die uneingeschränkte Eignung zertifizierter Kleidung für die Brandbekämpfung im Innenangriff. Jedoch ist ableitbar, dass das Heatstressverhalten durch die gezielte Auswahl von aufeinander abgestimmten Bekleidungsanlagen positiv beeinflusst werden kann. Die Untersuchungen zeigen, dass der Komfort der Kleidung nicht unberücksichtigt bleiben darf. Es muss jedem bewusst sein, dass das Arbeiten in unkomfortabler Kleidung unter Stress und exponiert durch Wärme, zu einer höheren psychischen Belastung führt. Der Einsatz spezieller Funktionsunterwäsche ist deutlich zu befürworten.

5 Zusammenfassung

Heatstress stellt bei bestimmten Einsatzszenarien erfahrungsgemäß ein Problem für Feuerwehrangehörige dar. Gezeigt wurde, dass hinsichtlich der Vermeidung zahlreiche Optimierungspotentiale möglich sind. In diesem Bericht wurden über eine Literaturrecherche die Punkte kühlende Kleidung (z.B. Kühlwesten o.ä.), Textilinnovationen, Sensorik in Kleidung, Unterbekleidung, Waschen und Imprägnieren der Schutzkleidung, Passgenauigkeit und Gewicht der Kleidung, geeignete Vor-/ Nachbereitung des Angriffstrupps ermittelt. Hier sind gerade durch die Empfehlungen der letzten vier Punkte einfach umzusetzende Verbesserungen des Heatstressverhaltens erzielbar. Es sollte stets im Einsatz spezielle funktionale Unterbekleidung getragen und die Schutzkleidung auf den Träger abgestimmt werden. Außerdem ist auf eine erhöhte Flüssigkeitsaufnahme, eine sehr gute körperliche Fitness und Gesundheit sowie genügend Schlaf zu achten. Die Schutzkleidung darf nicht nach jeder Wäsche imprägniert werden, um zu ermöglichen, dass die Feuchtigkeit im Inneren nach außen gelangt. Hierzu sollte die Waschhistorie durch ein geeignetes Instrument dokumentiert werden. Weiterhin wäre es möglich Kleidung zu verwenden, deren Schichten sich voneinander trennen lassen, so dass bei notwendiger Imprägnierung nur der Oberstoff nach dem Waschen imprägniert wird. Durch beide Maßnahmen sind deutliche Reduktionen des Heatstressverhaltens erreichbar. Außerdem sollte situationsangepasste Bekleidung getragen werden. Nicht jeder Einsatz erfordert die Bekleidung nach EN 469, Leistungsstufe 2, in vielen Fällen kann auf leichtere Kleidung zurückgegriffen werden.

Des Weiteren wurde über Recherchen und Versuche im Labormaßstab sowie Trageversuche mit Probanden ermittelt, welche Potentiale zur Vermeidung von Heatstress durch die Schutzkleidung vorliegen. Aus der Literaturrecherche ergab sich, dass das Heatstressempfinden eines Schutzkleidungsträgers nicht vom Material des Oberstoffs beeinflusst wird. Das Obermaterial und seine Farbe sollten nach anderen Gesichtspunkten, wie der Reißfestigkeit und der Sichtbarkeit gewählt werden. Einfluss auf das Heatstressverhalten haben im Wesentlichen die Eigenschaften der Membranen, der Isolationslagen und die Materialien der Innenfutter. Theoretisch wären hydrophile Futterstoffe hinsichtlich der Vermeidung von Heatstress zu bevorzugen, da sie viel Feuchtigkeit aufnehmen können. Dem gegenüber steht das Problem der Imprägnierung. Diese führt auch zur Hydrophobierung des Futterstoffs, wenn die Kleidungslagen während der Wäsche nicht getrennt werden können. Außerdem sollten PTFE-Membranen bei dampfförmigem Schweiß und PU-Membranen bei flüssigem Schweiß vorteilhaft sein. In den in der Literatur durchgeführten Trageversuchen zeigte sich jedoch kein Unterschied im Mikroklima bei der Gegenüberstellung von Kleidungen mit unterschiedlichen Membranen und Futterstoffen.

Aus den unterschiedlichen Experimenten für diesen Forschungsbericht ergab sich im ersten Schritt, dass bei der Variation des Oberstoffs der Schutzkleidung sowohl bei Belastungen unter Wärmestrahlung als auch unter Beflammung kaum Messunterschiede auftraten. Marginal besser schnitten rötliche Oberstoffe ab. Im nächsten Schritt, in dem Membranen, Isolationslagen und Futterstoffen variiert wurden, zeigte sich, dass PTFE-Membranen sowohl beim Auftreten dampfförmigen Schweißes als auch bei flüssigem Schweiß etwas besser bei unterschiedlichen Bewertungskriterien abschnitten.

In Trageversuchen mit Probanden zeigte sich, dass die getesteten Kleidungsensembles in den Bewertungspunkten nah beieinander liegen, es dennoch einen eindeutigen positiven Trend in zwei der Szenarien für die Bekleidungen mit PTFE-Membranen gab. Im dritten Szenario mit den gleichen Ensembles wurde eine Bekleidung etwas besser als die anderen durch die Probanden bewertet. Auch diese hatte eine PTFE-Membran. Es ist anzunehmen, dass das geringe Gewicht der Jacke einen positiven Einfluss hatte.

Insgesamt können alle untersuchten Kleidungsensembles uneingeschränkt bei der Innenbrandbekämpfung verwendet werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der untersuchten Kriterien nur geringfügig. Es wurde gezeigt, dass das Heatstressverhalten eines Feuerwehrangehörigen durch die Wahl einer geeigneten Schutzkleidung minimiert werden kann. Wie jedoch im Bericht gezeigt, gibt es viele weitere, teils auch sehr schnell und kostengünstig umzusetzende, Stellschrauben. Diese betreffen vor allem die körperlichen Vorbereitungen, wie eine gute Fitness oder der Verzicht auf Alkohol, die Akklimatisierungsoptimierung nach einem Einsatz und das Tragen geeigneter Unterbekleidung.

6 Dank

Der Dank der Autoren richtet sich zunächst an die beteiligten Feuerwehren aus Kassel, Wiesbaden, Hofheim am Taunus, Fulda und Frankfurt am Main) für die personelle Unterstützung bei Tragetests und konstruktive Diskussionen. Des Weiteren möchten wir dem involvierten Personal der Hessischen Landesfeuerweherschule sowie des Hessischen Innenministeriums und Frau Peppermüller von der Unfallkasse Hessen für ihre Unterstützung danken. Allen Probanden sei im besonderen Maße gedankt.

7 Literatur

[Becker, 2004]

Katharina Becker: Ein Mechanismus zur Frühwarnung bei Überhitzung von Hitzeschutzkleidung, Studienarbeit, Aachen, 2004

[Brandschutz, 2007]

Brandschutz (Zeitschrift), 255-262, April 2007.

[Borg, 2004]

Borg, G., Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. Deutsches Ärzteblatt, Nr. 15, S.1016-1021, 2004

[Carter, 1996]

Carter, J.B., Heat Stress and Fire Fighting, Fire Fighting in Canada, Vol. 40, Nr.,10, S. 28-29, Dezember 1996

[Department of the Army and Air Force, 2003]

Department of the Army and Air Force, „Technical Bulletin: Heat Stress Control and Heat Casualty Management [TB MED 507 I AFPAM 48-152 (I)] “, Washington DC, 2003

[Department of Health and Human Services, 2016]

Department of Health and Human Services; Centers of Disease Control and Prevention; National Institute for Occupational Safety and Health : „Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments“, USA, 2016.

[DGUV: BGI/GUV-I 8651, 2011]

DGUV, DGUV-Information 8651, Sicherheit im Feuerwehrdienst – Arbeitshilfen für Sicherheit und Gesundheitsschutz, Juli 2011

[DGUV, 2012]

DGUV, DGUV Information 205-020, Feuerwehrschtutzkleidung – Tipps für Beschaffer und Benutzer, Oktober 2012

[DGUV, 2016]

DGUV, DGUV Information 205-014, Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung für Einsätze bei der Feuerwehr, September 2016

[DGUV 205-035, 2020]

DGUV, DGUV Information 205-035, Hygiene und Kontaminationsvermeidung bei der Feuerwehr, Mai 2020

[DIN EN 366, 1993]

DIN EN 366: 1993

[DIN EN 367,1992]

DIN EN 367: 1992

[DIN EN 469, 2007]

DIN EN 469: 2007-02 (EN 469:2005 + A1:2006 + AC:2006)

[e-cooline, 2020]

<https://www.e-cooline.de/working/feuerwehr/>, abgerufen 02.07.2020

[ErgoMed, 2020]

ErgoMed-Internetpräsenz, <https://www.ergo-med.de/arbeitsschutz/feuerwehrschtzkleidung-%C2%96-liaison-von-schutz-und-tragekomfort-2/>, abgerufen 02.07.2020

[Fahy et al., 2013]

Fahy, R.F. LeBlanc, P.R., Molis, J.L., Firefighter Fatalities in the United States 2012. Quincy: National fire Protection Association, 2013

[Fabrizio, 2014]

Manuel Fabrizio, Ulrich Cimolino, Jörg Lange-Hegermann, Christian Pannier: Persönliche Schutzausrüstung, ecomed SICHERHEIT, ecomed Verlagsgesellschaft in Hüthig Jehle Rehm, 2014

[Feuerwehr, 2012]

„Gefährlicher Hitzestress,“ *Feuerwehr - Retten.Löschen.Bergen*, pp. 68-69, Oktober 2012

[Feuerwehrmagazin, 2014]

<https://www.feuerwehrmagazin.de/nachrichten/news/aufbau-und-materialien-von-feuerwehrebekleidung-46281>, veröffentlicht: 08.12.14, abgerufen 14.04.2020

[Feuerwehrpreis, 2018]

https://hessischer-feuerwehrpreis.de/content/uploads/2019/02/PM_Hessischer_Feuerwehrpreis18.pdf, abgerufen 02.07.2020

[Feuerwehrpreis, 2018, 2]

Bewerbungsunterlagen der Feuerwehr Bad Homburg v.d.H. zum Thema „Mensch, Technik, Innovation – Feuerwehr der Zukunft“

[Finteis, 2002]

T. Finteis, J.-C.Oehler, H. Genzwürker, J. Hinkelbein, C.-E. Dempfle, H. Becker, K. Ellinger, Stressbelastung von Atemschutzgeräteträgern bei der Einsatzsimulation im Feuerwehr-Übungshaus Bruchsal Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg (STATT-Studie), Mannheim, 2002

[Fire, 2010]

Fire Risk Management, Feeling the heat, S. 47-50, Juni 2010

[Fire, 2019]

Fire-Magazine, New protection technology for firefighters helps combat risks of heat stress and toxic smoke particles, 114 (1422), October, 2019

[fire, 2019, 2]

Fire-Magazine, Lightweight high-performance fibre is latest PPE innovation, 114, October, 2019

[Gavhed, 1989]

D.C. Gavhed, I. Holmer, Thermoregulatory response of fireman to exercises in the heat. European Journal of Applied Physiology, 59, 115-122, 1989

[Gespräch mit Forschern der Hohenstein-Institute]

Gespräch mit Dr. Bianca-Michaela Wölfling, Dr. Edith Claßen, Dr. Jan Beringer am 14.03.2019, Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH

[Gore 2020]

Internetauftritt Gore Workwear, <https://www.gore-workwear.de/feuerwehr-und-rettungsdienst/technologien/gore-tex-feuerwehrkleidung-mit-2-lagen-fireblocker-konstruktion>, abgerufen 01.07.2020

[Gore 2022]

Internetauftritt Gore, <https://www.gore.de/ueber-gore/technologien>, abgerufen 23.05.2022

[Hall et al., 2019]

S.Hall et al., The flammability of textiles when contaminated with paraffin base products, Fire Safety Journal 104, 109-116, 2019

[Harnisch, 2015]

Harnisch, M., Wölfling B.-M., Luley D., Heydrich, A. (Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH): Einfluss der Sonnenstrahlung auf die Thermoregulation des Menschen in Abhängigkeit von der textilen Gestaltung und dem Körperbedeckungsgrad, Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben, IGF-Vorhaben Nr. 17655 N, September 2015

[Huck, 1988]

Huck, et al., Firefighter Turnout Clothing: Physiological and Subjective Evaluation, Performance of Protective Clothing: Second Symposium, ASTM STP 989, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, S. 439-451, 1988

[HuPF]

Herstellungs- und Prüfbeschreibung für eine universelle Feuerwehrschutzkleidung - Feuerwehrüberjacke, 2017

[Jahnke, 2017]

Sara Jahnke, Prevent, identify and treat sleep disorders in firefighters, Fire Rescue 1, 2017, online: <https://www.firerescue1.com/health-wellness/articles/prevent-identify-and-treat-sleep-disorders-in-firefighters-VTyp7UlkwMzTAe2q/>

[Keiser, 2007]

Corinne Keiser, Steam burns – Moisture Management in Firefighter Protective Clothing, Promotion, ETH Zürich, 2007

[Kuhn, 2020]

Kuhn, R., GmbH, <https://www.feuerwehreinkauf.de/wissenswertes-feuerwehrbekleidung>, abgerufen 19.06.2020

[Lu et al., 2012]

Y. Lu et al., The effect of air gaps in moist protective clothing on protection from heat and flame, *Journal of Fire Sciences*, 31 (2) 99-111, 2012

[LUBW, 2006]

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, „Klimaatlas Baden-Württemberg“, Karlsruhe, 2006.

[Meyer, 2015]

Axel Meyer, *Feuerwehr Magazin*, Katalog 2015, S.18 – 20, 2015

[Mager, 2002]

D. Mager, Evaluating the results of a modified Bunker Gear Policy. Forschungsprojekt im Rahmen des Executive Fire Officer Program, 2002

[Makita, 2020]

<https://www.makita.de/product/dfv210zxl.html>, abgerufen 02.07.2020

[Mäkinen, 1996]

Mäkinen, et al., Physiological Comparison of Firefighter Turnout Suits With and Without a Microporous Membrane in the Heat, *Performance of Protective Clothing: Fifth Volume*, ASTM STP 1237, J. S. Johnson and S. Z. Mansdorf, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, S. 396-407, 1996

[Navy Environmental Health Center, 2007]

Navy Environmental Health Center, „Technical Manual NEHC-TM-OEM 6260.6A: Prevention and treatment of Heat and Cold Stress Injuries“, Juni 2007, <https://www.med.navy.mil/sites/nmcphc/Documents/policy-and-instruction/oem-prevention-and-treatment-of-heat-and-cold-stress-injuries.pdf>. [Zugriff am 27 August 2019]

[Neske, 2015]

[M. Neske, „Experimentelle Untersuchungen und theoretische Modellierung zu den Auswirkungen von Wärmeexposition auf Pressluftatmer, Vollmasken und Lungenautomaten,“ Magdeburg, 2015.]

[NIOSH, 2001]

NIOSH: NIOSH Report #99F47, Tragedy in Worcester, 2000, 2001

[Portwest, 2020]

Internetpräsenz: <https://www.portwest.com/products/view/CV01/GRR>, abgerufen 02.07.2020

[Pressebox, 2010]

Pressemitteilung der Hohenstein-Institute, <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/hohenstein-institute/High-Tech-Textilien-schuetzen-vor-Strahlungsquellen/boxid/396118>, abgerufen 02.07.2020

[Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute]

Prüfbericht 20.8.6.0007, Hohenstein Institute, 21.07.2020

[Ridder et al., 2013]

Ridder et al., Brandbekämpfung im Innenangriff, ecomed Sicherheit, S. 190-193, 2013

[Ridder, 2017]

A. Ridder, „Der Sicherheitsassistent - Aktueller Stand nach 6 Jahren,“ FEUERWEHREinsatz:nrw , pp. 13-19, 2017

[Rossi et al., 2004]

R. Rossi et al. Hot steam transfer through heat protective clothing layers. Int. J. Occupat. Safety Ergonom. 10, Nr. 3, S.239-245, 2004

[Rossi, 1999]

R. Rossi, „FOKUS-Forschungsprojekt Komfort und Schutzkleidung Bericht Nr. 243,“ Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, St. Gallen, 1999.

[Rossi, 2003]

R. Rossi, Fire fighting and its influence on the body, Ergonomics, August 2003.

[Rossi, 2005]

R. M. Rossi, W. P. Bolli, Phase Change Materials for Improvement of Heat Protection, Advanced Engineering Materials, 7, No. 5, 2005

[Rossi, 2015]

Rossi, Rene, Zeitschriftenaufsatz: Technische Sicherheit, Band/Jahrgang 5, Heft 10, Seite 24-26, 2015

[Sati et al., 2004]

R. Sati et al., Protection from steam at high pressures: development of a test device and protocol. Int. J. Occupat. Safety Ergonom. 14, 29-41, 2008

[Schmidt et al., 2011]

R. F. Schmidt, F. Lang und M. Heckmann, Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie 31. Auflage, Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2011.

[Schwarz, 2010]

Michael Schwarz, Brandschutz/ Deutsche Feuerwehr-Zeitung, Band/Jahrgang 64, Heft 7, S.558-563, 2010

[SensProCloths, 2011]

Internetauftritte des Forschungsprojekts SensProCloths: <https://www.sifo.de/de/senspro-cloth-systemintegrierte-sensorische-schutzbekleidung-fuer-feuerwehr-und-1813.html>, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/forschung/kleidung-die-mitdenkt-370510>, abgerufen 03.07.2020

[Serra, 1998]

A. Serra, S. Denti, Masia, P. Pintore, F. Sanna Randaccio, The energy cost and the use of individual protective devices in firefighters, *G Ital Med Lav Ergon* 20: 233-238, 1998

[Smith, 2004]

D. Smith, „handcooling,“ August 2004. <https://www.atemschutzunfaelle.de/download/hand-cooling.pdf>

[Startin, 2020]

Roger Startin, A fitting design, *Fire*, S. 29-31, May 2020

[Wölfling et al., 2012]

B.-M. Wölfling, B. Bauer, M. Schmid, S. Küblbeck, T. Ritter (Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH): Entwicklung einer physiologisch funktionellen und industriell wiederaufbereitbaren Feuerwehrsutzbekleidung unter Erhalt der Schutzfunktion und Gebrauchstauglichkeit, Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben, AiF-Vorhaben NR. 16676 N, Oktober 2012

[Zhu, 2015]

Zhu F, Feng QQ, Liu R, Yu B, Zhou Y., Enhancing the Thermal Protective Performance of Firefighters' Protective Fabrics by Incorporating Phase Change Materials. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* 23, 2(110): 68-73, 2015