

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Verhalten moderner Feuerwehr-Einsatzkleidung
bei thermischer Beanspruchung unter Feuchte
und Nässe

124

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Verhalten moderner Feuerwehr-Einsatzkleidung bei thermischer Beanspruchung unter Feuchte und Nässe

Forschungsbericht Nr. 124

Im Auftrag
der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V

Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und zivile Verteidigung

Bearbeiter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski (Projektleiter)
Dipl.-Ing. Ulrich Pasch
Dr. rer. nat. Horst Starke

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Heyrothsberge
Januar 2001

ISSN 0179-0060

FA: Nr. 24 (1/98) H

BERICHTS-KENNBLETT

1. BERICHTSNUMMER

Instituts-Bericht Nr. 394

2. TITEL DES BERICHTES (KURZ)

Verhalten moderner Feuerwehr-Einsatzkleidung bei thermischer Beanspruchung unter Feuchte und Nässe

3. AUTOR(EN)

Leitender Branddirektor
Prof. Dr. Reinhard Grabski
Dipl.-Ing. Ulrich Pasch
Branddirektor Dr. Horst Starke

4. DURCHFÜHRENDE INSTITUTION (NAME/ANSCHRIFT)

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Biederitzer Straße 5
D-39175 Heyrothsberge
Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Grabski
Leitender Branddirektor

5. FÖRDERNDE INSTITUTION/AUFTRAGGEBER (NAME/ANSCHRIFT)

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer Arbeitskreis V -
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und zivile Verteidigung

6. ABSCHLUSSDATUM

Januar 2001

7. FÖRDER-/ AUFTRAGS-NR.

IMK 24 (1/98) H

8. SEITENZAHL

95

9. ABBILDUNGEN

40

10. TABELLEN/DIAGRAMME

16

11. LITERATURANGABEN

88

12. KURZFASSUNG

Der Nachweis einer möglichen Veränderung der thermischen Eigenschaften von Feuerwehr-Schutzkleidung in Abhängigkeit von ihrem Nässezustand ist Gegenstand experimenteller Untersuchungen von Materialproben und konfektionierter Kleidung. Ausgehend von einer physikalisch-naturwissenschaftlichen Betrachtung dieses Phänomens werden zwei grundsätzliche Gruppen von Untersuchungsmethoden (Material- und Dummy-Prüfverfahren) berücksichtigt. Aus den Ergebnissen wird geschlussfolgert, dass der Einfluss von Nässe auf die thermische Schutzwirkung der Feuerwehr-Schutzkleidung durchaus relevant ist. Bedeutung haben insbesondere die Höhe des Energieeintrages und dessen zeitliche Einwirkdauer. Herausgearbeitet wurde die besondere Rolle der bei diesen Prozessen auftretenden Konvektion an der Außenseite der Kleidung, die ganz wesentlich die Parameter der Wärmeübertragungsprozesse mitbestimmt. Einsatztaktisch führen die Untersuchungsergebnisse zu dem Schluss, dass nasse Feuerwehr-Schutzkleidung aus thermischer Sicht deutlich ungünstiger ist. Es kann den Einsatzkräften daher nicht empfohlen werden, sich bewusst der Nässe auszusetzen in der Annahme, sie seien dadurch besser geschützt.

13. SCHLAGWÖRTER

Feuerwehr, Schutzkleidung, thermische Belastung, Nässe, Feuchtigkeit

14. VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

Januar 2001

Inhalt

Verzeichnis der Bilder	iii
Verzeichnis der Tabellen	v
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Generelle Abschätzungen zur thermischen Wirkung	4
2.2 Erkenntnisstand	7
2.3 Eindimensionales Wärmeleitungsmodell	11
3 Begriffe und Verfahren	16
3.1 Zustand „trocken“	16
3.2 Zustand „feucht“	17
3.3 Zustand „nass“	18
4 Thermische Untersuchungsverfahren	23
4.1 Verfahren für Materialproben	23
4.1.1 Wärmedurchgang Strahlung nach [DIN EN 366]	23
4.1.2 Wärmedurchgang Flamme nach [DIN EN 367]	24
4.1.3 Begrenzte Flammenausbreitung nach [DIN EN 532]	25
4.1.4 Kontaktwärmepfung nach [DIN EN 702]	27
4.2 Verfahren für konfektionierte Feuerwehr-Schutzkleidung	28
4.2.1 Wärmestrahlungstest	28
4.2.1.1 Prüfeinrichtung	28
4.2.1.2 Vorbereitung und Versuchsdurchführung	31
4.2.2 Thermo Man®-Verfahren	31

5	Materialuntersuchungen	33
5.1	Auswahl der Materialproben	33
5.2	Untersuchung der Materialproben	35
5.2.1	Verfahren Wärmedurchgang Strahlung nach 4.1.1	36
5.2.2	Verfahren Wärmedurchgang Flamme nach 4.1.2	39
5.2.3	Verfahren Begrenzte Flammenausbreitung nach 4.1.3	40
5.2.4	Verfahren Kontaktwärmeproofung nach 4.1.4	43
5.3	Zusätzliche Untersuchungen	44
6	Untersuchung konfektionierter Feuerwehr-Schutzkleidung	46
6.1	Verfahren Wärmestrahlungstest	46
6.1.1	Auswahl der Feuerwehr-Schutzkleidung	46
6.1.2	Ergebnisse der Untersuchungen	48
6.2	Verfahren Thermo Man®	54
6.2.1	Auswahl der Feuerwehr-Schutzkleidung	55
6.2.2	Ergebnisse der Untersuchungen	56
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	68
	Literatur	72
	Anhang	80

Verzeichnis der Bilder

2.1	Menschliche Haut nach [Engineering Guide 00]	9
2.2	Verbrennungen 2. Grades	11
2.3	Modellsystem für feuchte Einsatzkleidung mit Temperaturverlauf [Saadjian 00]	12
3.1	Beregnungseinrichtung für Materialproben	18
3.2	Probenhalterkasten	19
3.3	Probenhalter	19
3.4	Einfluss der Beregnungsdauer auf den Wasseranteil von [DIN EN 702]-gefertigten Proben	20
3.5	Probenschleudergerät PSG 1	20
3.6	Beregnungseinrichtung	21
4.1	Prüfgerät Wärmedurchgang Strahlung	24
4.2	Kalorimeter	24
4.3	Prüfgerät Wärmedurchgang Flamme	25
4.4	Prinzipskizze Prüfgerät Wärmedurchgang Flamme	25
4.5	Brennkasten	26
4.6	Kontaktwärmeprüfgerät mit Steuerteil	27
4.7	Prinzipskizze Kontaktwärmeprüfgerät	27
4.8	Wärmestrahlungstest	30
4.9	Testpuppe	32
4.10	Beflammung	32
5.1	Einfluss des Nässezustandes auf die Wärmestromdichte auf der Probenrückseite nach [DIN EN 366]	36
5.2	Einfluss des Nässezustandes auf den Wärmedurchlassgrad nach [DIN EN 366]	37
5.3	Einfluss des Nässezustandes auf die Grenzwertzeit nach [DIN EN 366]	37

5.4	Einfluss des Nässezustandes auf den Wärmeübergangsindex nach [DIN EN 367]	40
5.5	Einfluss des Nässezustandes auf die Schwellenwertzeiten bei der Kontaktwärmepfung nach [DIN EN 702]	43
5.6	Erreichte Schwellenwertzeiten bei den zusätzlichen Untersuchungen	45
6.1	Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der trockenen Feuerwehrüberjacke 1	49
6.2	Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der trockenen Feuerwehrüberjacke 2	49
6.3	Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der nassen Feuerwehrüberjacke 3	50
6.4	Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der nassen Feuerwehrüberjacke 4	50
6.5	Temperaturmesswerte nach 13 <i>min</i> bei einer Wärmestrahlung von 0.1 W/cm^2	51
6.6	Vergleich der Temperaturen an den Messstellen bei trockener Überjacke 1 und nasser Überjacke 3	51
6.7	Gegenüberstellung der Temperaturdifferenzen für die Überjacke 2	53
6.8	Messflächen am Thermo Man®	57
6.9	Durchschnittswerte am Kopf zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit	58
6.10	Thermo Man®-Untersuchungen der Feuerwehr-Überjacke 1 im Front-, Rücken- und Armbereich	60
6.11	Thermo Man®-Untersuchungen der Feuerwehr-Überjacke 2 im Front-, Rücken- und Armbereich	61
6.12	Thermo Man®-Untersuchungen der Feuerwehr-Überjacke 3 im Front-, Rücken- und Armbereich	62
6.13	Front- und Rückseiten der Feuerwehrüberjacken 1 nach den Thermo Man®-Untersuchungen (11-trocken, 12-nass)	64
6.14	Front- und Rückseiten der Feuerwehrüberjacken 2 nach den Thermo Man®-Untersuchungen (21-trocken, 22-nass)	65
6.15	Front- und Rückseiten der Feuerwehrüberjacken 3 nach den Thermo Man®-Untersuchungen (31-trocken, 32-nass)	66

Verzeichnis der Tabellen

2.1	Ausgewählte Wärmeleitfähigkeiten bei $T= 273\text{ K}$ nach [Saadjian 00]	6
2.2	Physikalische Charakteristiken von Gewebe für Feuerwehreinsatzkleidung bei 20 °C nach [Mell et al. 99]	8
2.3	Hautparameter	9
2.4	Grad der Verbrennung in der Basalschicht pro Hautelement	10
2.5	Schädigungsparameter nach [prEN ISO 13506]	10
3.1	Exsikkator-Substanzen [Nikolski 56]	17
3.2	Festlegung von Nässestufen	20
4.1	Messstellen Wärmestrahlungstest	30
5.1	Materialaufbauten der Proben	34
5.2	Erläuterung des Versuchsschlüssels am Beispiel 3231	34
5.3	Probenartbezogene <i>HTI24</i> -Werte	39
5.4	Nachglimmzeiten nach [DIN EN 532]	41
6.1	Gewicht der Überjacken im trockenen und nassen Zustand	47
6.2	Anordnung der Messstellen	48
6.3	Feuerwehrüberjacken für Thermo Man [®] -Untersuchungen	55
6.4	Jackenkennzeichnung für Thermo Man [®] -Untersuchungen	56

1 Einleitung

Die Feuerwehreinsatzkraft ist bei der Brandbekämpfung einer Vielzahl von Gefahren ausgesetzt, vor denen eine entsprechende Feuerwehr-Schutzkleidung schützen soll. Die bisher am Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt (IdF LSA) erzielten Forschungsergebnisse zur Feuerwehr-Schutzkleidung, insbesondere unter dem Aspekt des Schutzes vor thermischen Einwirkungen, konnten noch nicht alle in diesem Zusammenhang notwendigerweise zu betrachtenden Probleme berücksichtigen. So ist die Tatsache, dass das Löschmittel Wasser bei thermischer Beanspruchung der Einsatzkräfte die Schutzwirkung der Feuerwehr-Einsatzkleidung beeinflussen kann, zwar weitestgehend bekannt, die konkreten Auswirkungen sind jedoch zumindest strittig bzw. bisher wissenschaftlich nicht konkret nachgewiesen.

Wasser kommt aber wegen seiner guten Löscheigenschaften und der Kühlwirkung bevorzugt bei der Brandbekämpfung zum Einsatz. Beispielsweise herrschen zu der Frage, inwieweit eine thermische Aufheizung von Feuerwehr-Schutzkleidung durch deren Befeuchten verhindert werden sollte bzw. welche Folgen dieses für die Einsatzkraft haben könnte, durchaus unterschiedliche Auffassungen. Allein daraus ergibt sich ein notwendiger Klärungsbedarf, der schließlich auch zur Ableitung taktischer Hinweise bei der Brandbekämpfung führen sollte. Ausgehend von diesen Feststellungen und zur Klärung der konkreten Sachverhalte wurde das Forschungsvorhaben "Die Beeinflussung der Schutzwirkung von Feuerwehr-Einsatzkleidung in Abhängigkeit von Feuchte und thermischer Beanspruchung" formuliert und mit der Zielstellung der Nachweisführung der Abhängigkeit der thermischen Schutzwirkung der Feuerwehr-Schutzkleidung vom Nässezustand der Kleidung bearbeitet.

Schlussfolgernd aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich diesbezügliche taktische Hinweise ableiten. Dies unterstreicht die praktische Bedeutung der durchgeführten Untersuchungen in Bezug auf Einsätze als auch für die Aus- und Fortbildung. Die Realisierung der Zielstellung erfordert sowohl eine Untersuchung von Materialien bzw. Materialkombinationen, aus denen Feuerwehr-Schutzkleidung hergestellt wird, als auch die Untersuchung konfektionierter Feuerwehr-Überjacken.

Damit verbindet sich die Lösung folgender Teilaufgaben:

- ◆ Analyse der Problemstellung aus naturwissenschaftlicher Sicht
- ◆ Definition der Begriffe Trockenheit, Feuchte und Nässe
- ◆ Entwicklung von Verfahren zur technischen Realisierung der Zustände „trocken“, „feucht“ und „nass“ in Bezug auf die Beschaffenheit von Materialproben und konfektionierter Feuerwehr-Schutzkleidung
- ◆ Festlegung der Verfahren zur thermischen Belastung von Materialproben und konfektionierter Feuerwehr-Schutzkleidung
- ◆ Festlegung der Art der zu untersuchenden Materialien und der konfektionierten Feuerwehr-Schutzkleidung
- ◆ Untersuchung der Materialproben und der konfektionierten Feuerwehr-Schutzkleidung
- ◆ Auswertung der Ergebnisse der Untersuchungen und Schlussfolgerungen.

Für die experimentellen Untersuchungen standen folgende Einrichtungen bzw. Labors am IdF LSA zur Verfügung:

- ◆ Materiallabor mit gängigen, genormten Prüfverfahren für Stoffproben, insbesondere Geräte zur Wärmedurchgangsprüfung Strahlung, zur Kontakthitzeprüfung, zur Untersuchung der konvektiven Wärmebelastung, ein Brennkasten u. a.
- ◆ Dummy mit propangasbetriebener Wärmestrahlerwand.

Zur Probenvorbereitung wurde ergänzend eine Anlage zur Befeuchtung der Stoffe gebaut. Vergleichende Untersuchungen erfolgten darüber hinaus unter Nutzung des Flashover-Simulators „Thermo Man[®]“ bei Du Pont in Genf.

Die Autoren bedanken sich beim AFKzV sowie beim TWB der vfdb für die Unterstützung bei der Bearbeitung dieses IMK-Themas. Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. (FH) Marquardt, der in seiner Diplomarbeit [Marquardt 98] am IdF LSA Aspekte dieser Thematik bearbeitete, die im vorliegenden Bericht mit berücksichtigt sind. Für die Unterstützung beim Aufbau, der Instrumentierung und der Durchführung

der Versuche wird dem wissenschaftlichen Mitarbeiter des IdF LSA Herrn Dipl.-Phys. Wienecke sowie den Forschungsfacharbeitern des IdF LSA Herrn Hartmann und Herrn Kulawik herzlich gedankt. Außerdem bedanken sich die Autoren für die korrekte und ordnungsgemäße verwaltungsseitige Abwicklung des Vorhabens.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen einige Überlegungen und Abschätzungen dargestellt werden, die den Forschungsansatz für experimentelle Untersuchungen des Einflusses von durchnässter oder feuchter Einsatzkleidung aus thermischer Sicht vertiefen. Zugleich werden damit oft benutzte Argumente bei der Diskussion der Problematik in der Praxis wissenschaftlich auf ihre Aussagekraft geprüft.

2.1 Generelle Abschätzungen zur thermischen Wirkung

Der Einfluss von Wasser, das im Bekleidungsstoff gebunden ist, auf die Schutzwirkung ist aus physikalischer Sicht ein komplexer Vorgang. Zum einen bindet Wasser Wärme, die zum Aufheizen und Verdampfen benötigt wird. Für diese Kühlwirkung steht die spezifische Energie von

$$w_{\text{Kühl}} = 2634 \frac{\text{kJ}}{\text{l}}. \quad (2.1)$$

Bei einer üblichen Einsatzsituation, die nach [Pasch 96] durch eine flächenspezifische Wärmeleistung von

$$n_q = 0.1 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} = 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (2.2)$$

und durch die Einsatzparameter

$$t_{\text{Einsatz}} = 15 \cdot 60 \text{ s} = 900 \text{ s} \quad \text{und} \quad A = 0.7 \text{ m}^2$$

gekennzeichnet ist, ergibt sich die folgende Wärmebelastung (A bedeutet dabei näherungsweise die der Wärmebelastung ausgesetzte Fläche der Einsatzkraft):

$$W = n_q \cdot A \cdot t_{\text{Einsatz}} = 630 \text{ kJ}. \quad (2.3)$$

Andererseits hat die experimentelle Überprüfung erbracht, dass sich bei guter Durchfeuchtung von außen in einer Einsatzjacke maximal ca. 300 g Wasser binden lässt. Bezogen auf die Projektionsfläche (unter der näherungsweisen Annahme, dass die halbe Fläche wärmebeaufschlagt wird) bedeutet dies, dass für den Nachweis einer nässebedingten thermischen Wirkung ein maximales Wasservolumen von

$$V_{H_2O} = 0.15 \text{ l} . \quad (2.4)$$

anzusetzen ist. Dies ergibt über (2.1) die maximale Kühlenergie

$$W_{Kühl} = w_{Kühl} \cdot V_{H_2O} = 395.1 \text{ kJ} . \quad (2.5)$$

Diese Abschätzung macht deutlich, dass immerhin ein Drittel der normalen Wärmebelastung abgebaut werden könnte, was an sich bereits ein beachtlicher Effekt ist. Natürlich wird das tatsächlich Erreichbare, insbesondere bei extremer thermischer Belastung z. B. durch einen Flashover, deutlich niedriger liegen und sollte deshalb im Nutzen nicht überschätzt werden. Andererseits wirkt gleichzeitig ein gegenläufiger Effekt. Beim Befeuchten der Kleidung wird das Wasser im porösen Gewebe eingelagert und ersetzt die isolierend wirkende Luft. Die Größenordnung lässt sich erahnen, wenn man die dafür charakteristischen Materialparameter betrachtet (Tabelle 2.1).

Der Vergleich von Wasser und Luft zeigt, dass die Wärmeleitung das 23fache beträgt. Die Kleidung verliert also zumindest teilweise ihre wärmeisolierenden Eigenschaften. Auch hier ist die tatsächliche Wirkung nicht in einfacher Weise zu erkennen. Zunächst kann eine quantitative Abschätzung der Wärmeleitprozesse unter Annahme relevanter Schichtdicken mehr Klarheit liefern. Aus diesem Grunde werden im Folgenden einfache Modellüberlegungen angestellt.

Eine modellmäßige Betrachtung ist sehr schwierig und allein sicher nicht ausreichend. Beispielsweise wird die Wasseranlagerung im Gewebe abhängig von der Faser inhomogen erfolgen und nicht in deutlichen Schichten. Vielmehr erfordert die „poröse Struktur“ letztlich auch die experimentelle Bestimmung der Materialparameter. Es ist deshalb naheliegend, das System, so wie im bearbeiteten Forschungsvorhaben angestrebt, in seiner Ganzheit mit den üblichen Methoden thermisch zu bewerten.

Tabelle 2.1: Ausgewählte Wärmeleitfähigkeiten bei $T = 273\text{ K}$ nach [Saatdjian 00]

λ in $W/m\cdot K$		λ in $W/m\cdot K$	
Solids			
Aluminium	236	Antimony	26
Barium	18.5	Beryllium	218
Bismuth	16	Boron	25
Cadmium	97.5	Calcium	206
Chrome	90.5	Cobalt	105
Constantan	25	Gallium	85
Copper	403	Gold	319
Iron	86.5	Lead	35.6
Magnesium	157	Manganese	7.68
Nickel	94.1	Caesium	88
Platinum	71.7	Sodium	142
Pyrex	1.1	Inconel	15
Silver	424	Uranium	28
Tungstene	179.2	Zinc	120
Liquids			
Bromine (270 K)	0.13	Cesium (301,9 K)	19.7
Chlorine (300 K)	0.134	Gallium (303 K)	28.1
Mercury	7.82	Phosphorus (373 K)	0.181
Water	0.552	Benzene	0.156
Gases			
Air	0.024	Argon	0.0167
CO ₂	0.0149	CO	0.0234
Ethane	0.0187	Ethylene	0.0182
Helium	0.143	Hydrogen H ₂	0.1747
Methane	0.031	Neon	0.046
Water	0.016	Oxygen O ₂	0.0248

2.2 Erkenntnisstand

Die Bewertung der Eigenschaften von Einsatzbekleidung und speziell auch von nasser bzw. feuchter Kleidung ist in den letzten Jahren verstärkt ins Zentrum des internationalen Interesses gerückt. Die Ursache dafür ist sicher darin zu sehen, dass die unter Standardbedingungen zweifelsfrei erreichte Leistungssteigerung durch neue Fasern auch in den Grenzbereichen nachgeprüft bzw. nachgewiesen werden muss.

Umfangreiche Untersuchungen zur Thematik wurden am National Institute of Standards and Technology (NIST), USA [Lawson 96, Lawson et al. 99, Mell et al. 99, Lawson et al. 00] sowie in der EMPA, Schweiz [Rossi 94, Rossi 97, Rossi et al. 97, Rossi 00] durchgeführt. Ein Ausgangspunkt der Analyse der thermischen Umgebung beim Feuerwehreinsatz war auch die Veränderung der thermischen Eigenschaften der Kleidung durch Schweiß oder von außen einwirkende Wassersprühstrahlen. Dabei interessierte insbesondere das Auftreten von Hautverbrennungen (mindestens 2. Grades). Zur einfachen Abschätzung von Eigenschaften wurden auch Modelle entwickelt, die den Schichtenaufbau eindimensional betrachten. Sie berücksichtigen instationäre Bedingungen mit Wärmeleitung und -strahlung sowie Wärmequellen im Innern. Die partiellen Differentialgleichungen erfordern eine numerische Lösung. Die Verifikation mit einem geschlossen lösbaeren Spezialfall sowie mit entsprechenden Experimenten erbrachte eine gute Übereinstimmung [Mell et al. 00].

Analoge Berechnungen sind nur mit hohem wissenschaftlichen Aufwand nachzuvollziehen. Da eine Reihe von Modellparametern nur geschätzt werden kann, sind derartige numerische Berechnungen im Rahmen dieses praktisch angelegten Projektes nicht hilfreich. Interessant sind allerdings für vergleichende Betrachtungen die verwendeten Modellparameter (vgl. Tabelle 2.2).

Von Bedeutung ist auch das Ergebnis, dass die Wärmeleitfähigkeiten der Gewebe für Einsatzbekleidung bereits bei geringen Temperaturerhöhungen (von 20 °C auf 72 °C) temperaturabhängig werden. Im Übrigen erfordert eine exakte mathematische Beschreibung des Einflusses von eingelagertem Wasser die explizite Berücksichtigung der Pyrolyse, was für die Verbrennung von Holz ausgearbeitet wurde [Yuen et al.00].

Tabelle 2.2: Physikalische Charakteristiken von Gewebe für
Feuerwehreinsatzkleidung bei 20 °C nach [Mell et al. 99]

Fabric Characteristic	Shell	Moisture Barrier	Thermal Liner
thickness in <i>cm</i>	0.082 ± 0.007	0.055 ± 0.005	0.35 ± 0.04
specific mass in <i>g/m²</i>	254	440	240
density in <i>g/cm³</i>	0.31 ± 0.024	0.8 ± 0.06	0.072 ± 0.007
conductivity in <i>W/cmK</i>	4.7 · 10 ⁻⁴	1.2 · 10 ⁻⁴ (soft rubber)	3.8 · 10 ⁻⁴ (glass wool)
specific heat in <i>J/gK</i>	1.3	2.01 (soft rubber)	0.7 (glass wool)
transmissivity	0.044	0.005	0.0012
reflectivity	0.09	0.017	0.002
color	black	white	yellow

Vom Standpunkt der Modellierung ist eine Arbeit interessant, die das Gewebe als poröses Medium beschreibt [Fan et al. 00]. Sie bezieht sich speziell auf hygroskopische Materialien. Es wurde gezeigt, dass für große Temperaturdifferenzen insbesondere der Strahlungsanteil von Bedeutung ist.

Ein weiterer Problemkreis, der für die Betrachtung der Schutzfunktion von Einsatzkleidung von Bedeutung ist, ist die Rückwirkung auf den Menschen. Die generelle Schwierigkeit besteht darin, von den gemessenen oder berechneten physikalischen Zustandsparametern auf die biologische Reaktion zu schließen. Experimentelle Betrachtungen sind schwierig und verbieten sich im Einzelfall von selbst. Es wird deshalb in jüngster Zeit versucht, durch Hautmodelle reproduzierbare und zugleich anschauliche Ergebnisse zu erzielen. Grundsätzlich werden zwei Denkansätze verfolgt. Zum einen werden experimentelle Systeme entwickelt, die die jeweils interessanten Eigenschaften nachbilden, beispielsweise auch aus organischem Material [Niesing 00, Hohenstein 93]. Interessanter im Rahmen dieses Vorhabens, weil direkt in die Versuchsauswertung über eine Prozessvisualisierung einbaubar, sind jedoch entsprechende mathematische Modelle. Sie stellen einen funktionalen Zusammenhang zu physikalischen Messgrößen, wie z. B. der Oberflächentemperatur der Haut, her [Engineering Guide 00; prEN ISO 13506].

Tabelle 2.3: Hautparameter

Parameter	Hautschicht		
	Epidermis	Dermis	Subkutangewebe
Schichtdicke in m	$5 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Wärmeleitfähigkeit in $W/m \cdot K$	0.255	0.523	0.167
volumetrische Wärmekapazität in $J/m^3 \cdot K$	$4.32 \cdot 10^6$	$3.87 \cdot 10^6$	$2.76 \cdot 10^6$

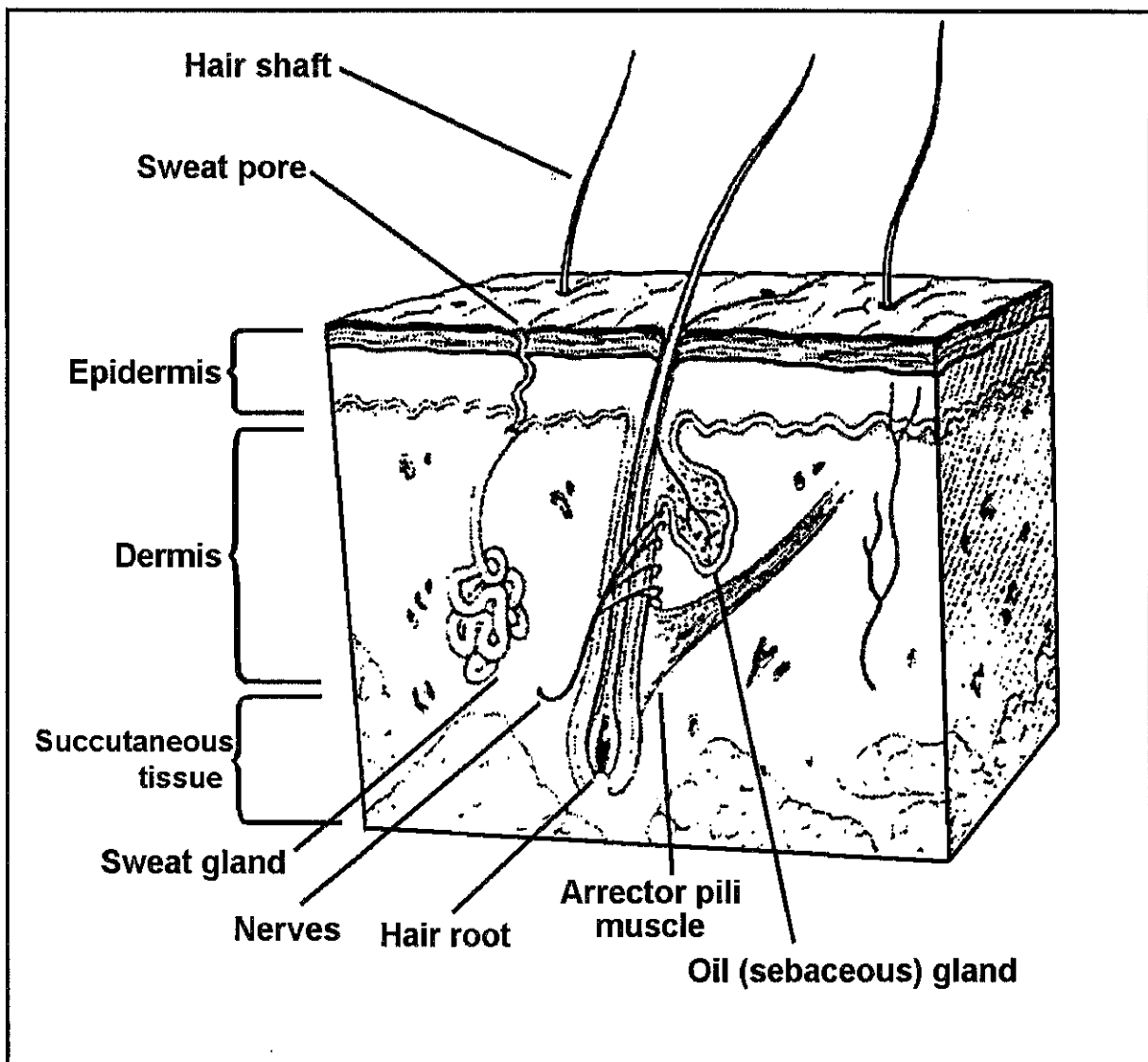


Bild 2.1: Menschliche Haut nach [Engineering Guide 00]

Die Bewertung einer Schädigung der Haut erfolgt also über ein mathematisches Modell. Der hierbei verwendete Ansatz wird im Folgenden kurz zusammengefasst. Er beruht auf der Wärmeleitung in den einzelnen 3 Hautschichten (von außen nach

innen: Epidermis, Dermis, Subkutangewebe – vgl. Tabelle 2.3, Bild 2.1) sowie auf einer chemischen Reaktion 1. Ordnung.

Die Gesamtschädigung ergibt sich durch Integration über die Zeit, während der die kritische Temperatur überschritten wird. Für die Schädigung wird dabei die Grenzschicht Epidermis/Dermis (Basalschicht) betrachtet. Resultierend ergibt sich der Zusammenhang für den Gesamtschaden eines Hautelementes

$$\Omega = \int_{(T > 44^\circ\text{C})} P \cdot e^{-\frac{\Delta E}{RT}} dt \quad (2.6)$$

mit der Bewertung nach Tabelle 2.4. Für die Bestimmung nach (2.6) können empirische Daten verwendet werden (vgl. Tabelle 2.5).

Tabelle 2.4: Grad der Verbrennung in der Basalschicht pro Hautelement

Ω	Schädigung
0 ... 0.5	keine
0.5 ... 1.0	Verbrennung 1. Grades
größer 1.0	Verbrennung 2. Grades

Tabelle 2.5: Schädigungsparameter nach [prEN ISO 13506]

Quelle	$T < 50^\circ\text{C}$		$T > 50^\circ\text{C}$	
	P in s^{-1}	$\frac{\Delta E}{R}$ in K	P in s^{-1}	$\frac{\Delta E}{R}$ in K
Stoll	$2.185 \cdot 10^{124}$	93534.9	$1.823 \cdot 10^{51}$	39109.8
Takata	$4.32 \cdot 10^{64}$	50000	$9.39 \cdot 10^{104}$	80000

Die erforderlichen Berechnungen bestehen aus folgenden Teilschritten:

1. Messung der Oberflächentemperatur der Haut
2. Berechnung der Temperatur der Basalschicht durch Wärmeleitung in der Epidermis
3. Bestimmung der Schädigung durch Integration (zeitliche Addition) der kritischen Anteile
4. Bewertung der Schädigung des Oberflächenelementes

5. Gesamtbewertung der Schädigung durch prozentuale Betrachtung der geschädigten Flächen zur Gesamtfläche.

Abschließend sei darauf verwiesen, dass der aktuelle US-amerikanische Erkenntnisstand in [Engineering Guide 00] dargestellt ist, wo auch weiterführende Betrachtungen zu den Modellen und ihren Parametern enthalten sind. Für eine grobe Bewertung ist Bild 2.2 interessant, das empirische sowie berechnete Daten zusammenfasst.

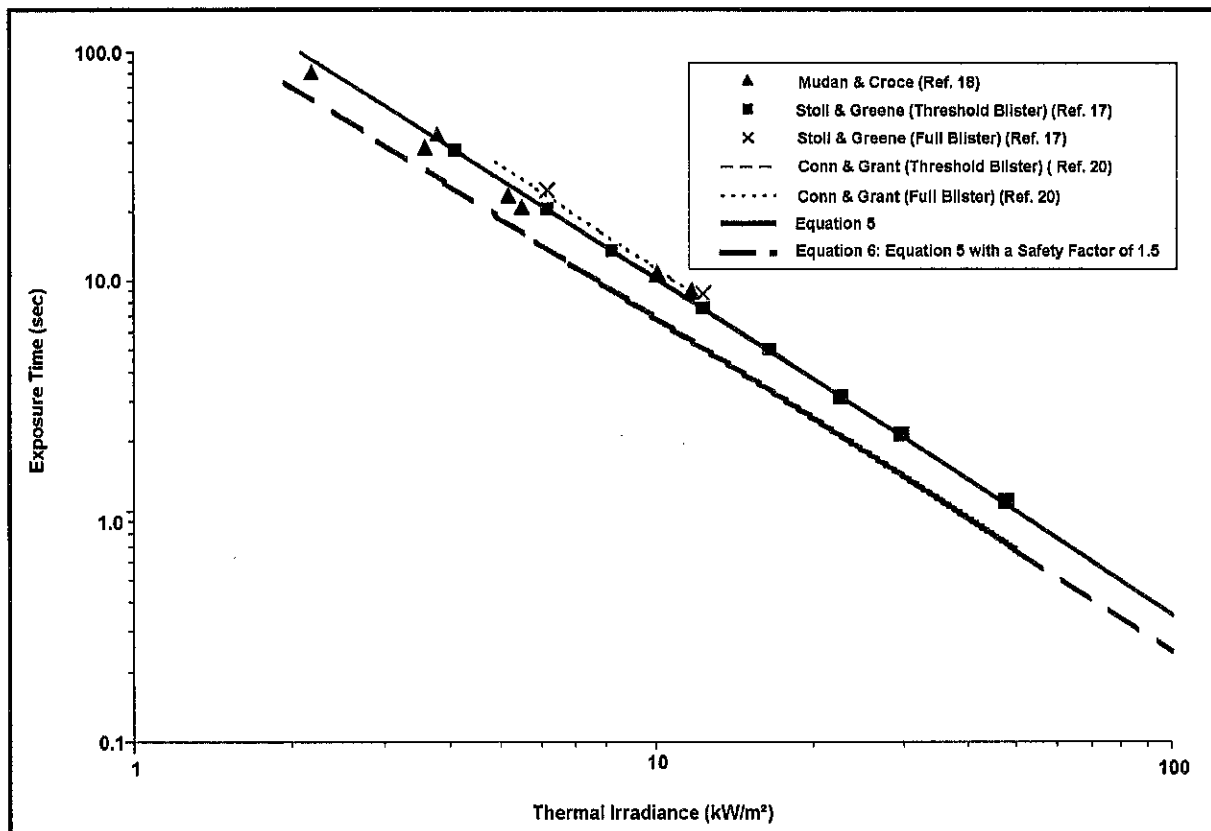


Bild 2.2: Verbrennungen 2. Grades

2.3 Eindimensionales Wärmeleitungsmodell

Um das grundlegende Verhalten der feuchten Einsatzkleidung quantitativ bewerten zu können, lässt sich vereinfacht der Kleidungsstoff als ein Schichtsystem auffassen. Dabei sind die eigentlichen Materialschichten des funktional bedingten Aufbaues durch wärmeisolierende Luftschichten getrennt. Diese sind beim hier betrachteten Problem der feuchten Schutzkleidung mit Wasser gefüllt, wodurch sich der gesamte Wärmeleitwiderstand ändert. Es verbleibt folglich ein eindimensionales Problem, bei dem die Wärmeleitung durch die Fouriergleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

mit Randbedingungen durch den Wärmeübergang beschrieben wird. Der Wärmeübergang vom fluiden Medium in den Festkörper ist mit einem Temperaturgradienten verbunden. Er hängt von der Oberflächenbeschaffenheit und der Bewegung im Fluid ab [Stroppe 92]. Mit (2.7) sind sowohl die Wärmequellen im Innern der Schichten wie auch die Verluste durch Strahlung vernachlässigt. Gerade die Strahlung wäre aber eigentlich bei einer exakteren mathematischen Beschreibung zu berücksichtigen.

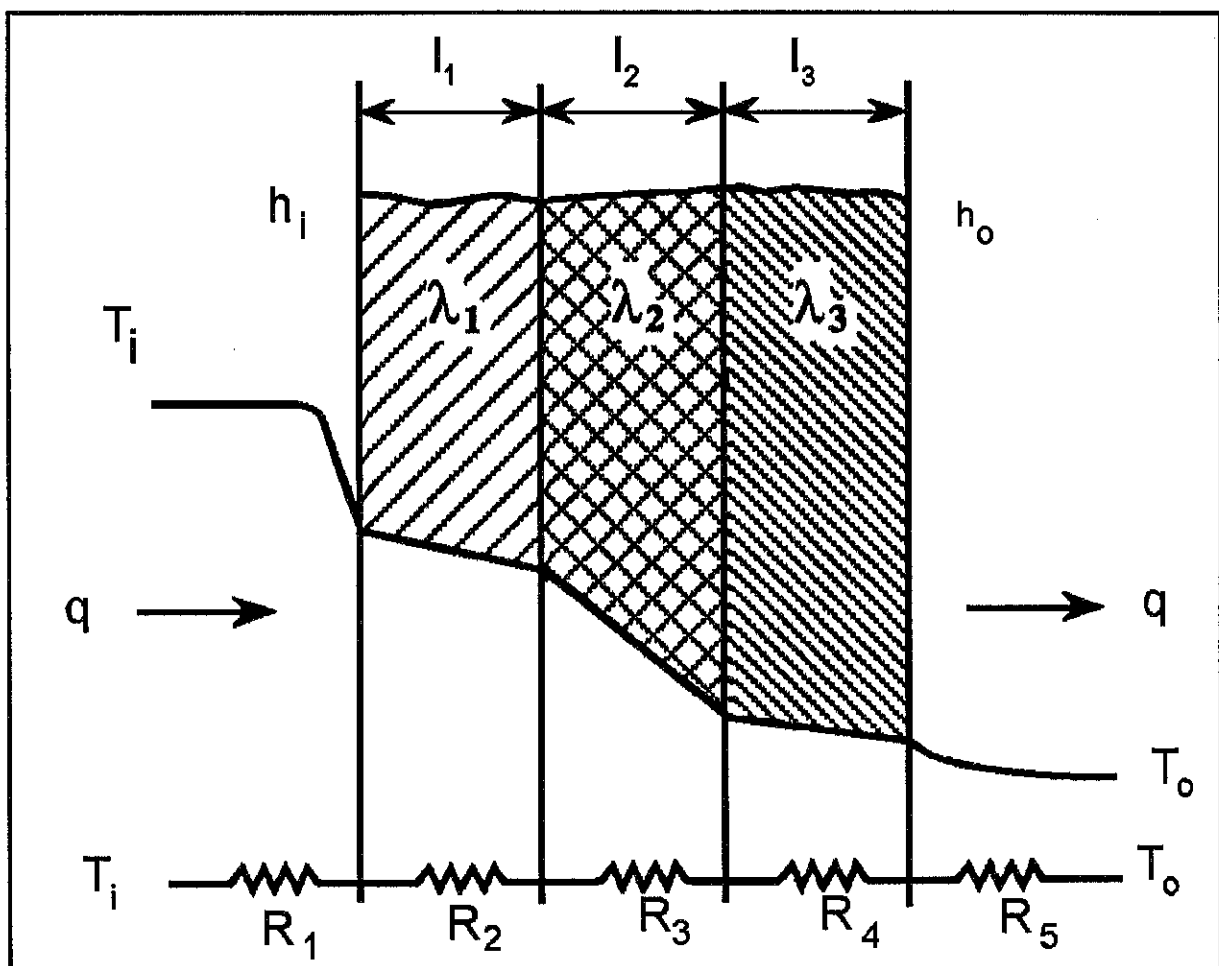


Bild 2.3: Modellsystem für feuchte Einsatzkleidung mit Temperaturverlauf
[Saadjian 00]

Betrachtet man ausschließlich das stationäre Verhalten, so verschwindet in (2.7) die Zeitableitung und man erhält durch Integration einen linearen Temperaturverlauf in Ausbreitungsrichtung. In der angrenzenden Luft (oder Flüssigkeit) treten, wie bereits diskutiert, durch Konvektion gesonderte Verhältnisse auf (vgl. Bild 2.3). Für den hier

interessierenden Fall lässt sich ein Ersatzsystem konstruieren, das aus 3 Schichten mit angrenzenden Räumen besteht. Die äußeren Schichten bestehen aus Festkörpern und können ihrerseits wieder aus verschiedenen Schichten aufgebaut sein. Die mittlere Schicht ist im engeren Sinne von Interesse. Sie charakterisiert die eingeschlossene Luft bzw. das diese Luft ersetzende Wasser. Infolge der geringen Dicke soll in dieser Schicht auf die ebenfalls prinzipiell auftretende Konvektion und die damit verbundenen Wärmeübergangsphänomene verzichtet werden.

Das Ersatzsystem ist also durch lineare Temperaturänderung in den Schichten und Wärmeübergangsphänomene in der Umgebungsluft charakterisiert. Der Wärmeübergang wird durch den Wärmeübergangskoeffizienten h_o bzw. h_i und die Wärmeleitung durch den Wärmedurchgangskoeffizienten λ_k beschrieben. Die Schichtdicken werden mit l_k bezeichnet.

Ein solches Composit-System lässt sich durch Einführung von Wärmeleitwiderständen in hoher Analogie zu elektrischen Stromkreisen beschreiben und damit sehr anschaulich interpretieren [Saadjan 00, Baehr 98]. Mit dem Gesamtwärmestrom \dot{Q} durch die Fläche A und dem Temperaturgradienten ΔT als verallgemeinerte „Spannung“ lässt sich analog zum Ohmschen Gesetz der Zusammenhang

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{ges}} = \frac{T_i - T_o}{R_{ges}} \quad (2.8)$$

formulieren. Dabei bildet sich der Gesamtwärmeleitwiderstand als Reihenschaltung

$$\begin{aligned} R_{ges} &= \sum_{j=1}^5 R_j \\ &= \frac{1}{h_i A} + \sum_{k=1}^3 \frac{l_k}{\lambda_k A} + \frac{1}{h_o A} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Mit der im Bild 2.3 gewählten Bezeichnung sind (abweichend von der englischen Bedeutung) T_i die hohe Außentemperatur und T_o die niedrige Innentemperatur, d. h. bei Vernachlässigung der Eigentemperatur quasi die Oberflächentemperatur der Haut.

Bei Befeuchtung der Kleidung treten im Modell also nur Unterschiede in der mittleren Schicht auf, für die gilt:

$$R_L = \frac{l_2}{\lambda_L A} \quad \text{für Luft} \quad (2.10)$$

$$R_W = \frac{l_2}{\lambda_W A} \quad \text{für Wasser.}$$

Mit den dargestellten Ergebnissen lässt sich das Verhalten anschaulich interpretieren und quantitativ bewerten. Zunächst gilt wegen der Werte der Wärmeleitfähigkeiten (vgl. Tabelle 2.1)

$$R_L > R_W \quad (2.11)$$

Bei vorgegebenem Wärmestrom ist damit nach (2.8) bei Wasser die sich ergebende Temperaturdifferenz geringer, damit also die Innentemperatur höher und die Schutzwirkung schlechter. Weiterhin gilt, dass im stationären Zustand der Wärmestrom in jeder Schicht gleich dem äußeren Wert sein muss. Damit erhält man im Vergleich

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_W}{R_W} = \frac{\Delta T_L}{R_L} \quad (2.12)$$

bzw. mit gleicher Außentemperatur $T^{(a)}$ und unterschiedlichen Innentemperaturen $T_L^{(i)}$, $T_W^{(i)}$ für Luft und Wasser

$$\lambda_W \frac{A}{l_2} (T^{(a)} - T_W^{(i)}) = \lambda_L \frac{A}{l_2} (T^{(a)} - T_L^{(i)})$$

und hieraus

$$(T^{(a)} - T_W^{(i)}) = (T^{(a)} - T_L^{(i)}) \frac{\lambda_L}{\lambda_W}. \quad (2.13)$$

Das bedeutet, dass auch die Temperaturdifferenz bei Wasser nur 1/23stel der Temperaturdifferenz bei Luft beträgt.

Die absolute Größe der Temperaturdifferenz kann z. B. für Luft über den Widerstand

$$R_L = \frac{l_2}{\lambda_L A} \quad (2.14)$$

bestimmt werden. Die geometrischen Größen in diesen Gleichungen lassen sich, wenn auch sehr grob, beispielsweise über das aufgenommene Wasser nach (2.2) und (2.4) abschätzen. Man erhält über

$$V = A \cdot l_2 \quad (2.15)$$

die Werte:

$$A = 0.7 \text{ m}^2, \quad l_2 = 214 \text{ } \mu\text{m}, \quad R_L = 12,738 \cdot 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}.$$

Der Wärmestrom ergibt sich mit (2.2) über

$$\dot{Q} = n_q \cdot A. \quad (2.16)$$

Während die spezifische Wärmeleistung von 1 kW/m^2 für die normale Einsatzbelastung (d. h. $\dot{Q} = 0.7 \text{ kW}$) bis 80 kW/m^2 in Flashover-Situationen (d. h. $\dot{Q} = 56 \text{ kW}$) schwankt, erhält man über (2.12) den entsprechenden Temperaturabfall in der Luftschicht von $\Delta T_L = 9 \text{ K}$ im normalen Einsatzfall und bis zu $\Delta T_L = 713 \text{ K}$ in Flashover-Situationen.

Angesichts der erheblichen Modellnäherungen und der nur groben Abschätzung einiger Ausgangsdaten liegen diese Werte größenordnungsmäßig sehr gut. Sie lassen folgende Schlüsse zu:

- ◆ Die isolierende Wirkung der Luftschicht ist für die Schutzfunktion durchaus bedeutsam.
- ◆ Im normalen Feuerwehreinsatz sind die Effekte dieser Zwischenschicht, also auch der Nässeinfluss, vernachlässigbar.
- ◆ In thermischen Extremsituationen kann die drastische Reduzierung der Schutzwirkung durch eingelagertes Wasser durchaus Bedeutung erlangen.

Die dargestellten Abschätzungen ermöglichen ein erstes Verständnis der ablaufenden Phänomene. Sie unterstreichen die Notwendigkeit, durch detailliertere experimentelle Untersuchungen eine Aufklärung des Nässeinflusses anzustreben. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die Stärke dieser Effekte in Abhängigkeit vom Energieeintrag auf der Grundlage der nachfolgenden experimentellen Untersuchungen anders zu bewerten ist. Die Ursache liegt darin, dass unter anderem die freie Konvektion auf der Außenoberfläche und die Tatsache, dass instationäre Verhältnisse vorliegen, offensichtlich eine entscheidende Rolle spielen.

3 Begriffe und Verfahren

Zur allgemeinen Verständigung wird vorab in Bezug auf die Zustände „feucht“ und „nass“ von der Annahme ausgegangen, dass diese ausschließlich durch Beaufschlagung der Materialien mit reinem Wasser hervorgerufen werden. Wasserzusätze in Form von oberflächenspannungsverringernenden Zusätzen wie Netzmittel und Schaumbildner, wie sie beim Löschen bestimmter Brandmedien teilweise zum Einsatz gelangen und mit denen auch die Feuerwehr-Schutzkleidung in Berührung kommen kann, finden bei den Betrachtungen keine Berücksichtigung.

In Ermangelung exakter Begriffsdefinitionen in der Literatur wurden notwendigerweise die nachfolgenden, empirisch begründbaren, "hauseigenen" Definitionen erarbeitet. Die jeweiligen Begriffsdefinitionen werden zudem bezüglich ihrer Anwendung auf Materialproben und konfektionierte Feuerwehr-Schutzkleidung differenziert ausgewiesen. Derartige eindeutige Definitionen sind auch die Voraussetzung für die Sicherung der Reproduzierbarkeit von wissenschaftlichen Experimenten, wie sie im Rahmen der Bearbeitung konzipiert und durchgeführt wurden. Zur Realisierung der verschiedenen Zustände werden geeignete Verfahren zur Probenaufbereitung festgelegt.

3.1 Zustand „trocken“

Eine Materialprobe, die über einen Zeitraum von 48 h in einem Exsikkator mit Phosphorpentoxid (s. Tabelle 3.1) als Trockenmittel bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C konditioniert wird, wird als „trocken“ bezeichnet.

Feuerwehr-Schutzkleidung wird „trocken“ genannt, wenn sie über einen Zeitraum von 48 h bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit kleiner als 40 %, frei im Raum hängend, aufbewahrt wird.

Die Trockengewichte werden mit einer Präzisionswaage ermittelt.

3.2 Zustand „feucht“

Eine Materialprobe wird als „feucht“ bezeichnet, wenn sie bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C über einen Zeitraum von 48 h in einem Exsikkator mit einer relativen Luftfeuchtigkeit größer als 40 % konditioniert wurde.

Die jeweilige Materialprobe wurde zunächst als Voruntersuchung zur Erreichung definierter Feuchtigkeitsstufen (Luftfeuchtigkeiten) 48 h im Exsikkator mit verschiedenen Salzlösungen konditioniert (vgl. Tabelle 3.1). Anschließend wurde geprüft, ob sich deutlich nachweisbare Effekte zeigen. Hierfür wurden sowohl trockene Materialproben als auch unterschiedlich feuchte Proben thermisch mittels des Kontaktwärmepförfverfahrens nach [DIN EN 702] (siehe hierzu Kapitel 4) beansprucht.

Im Ergebnis dieser Voruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Feuchtigkeit nur einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die thermischen Eigenschaften der Materialproben haben. In den nachfolgenden Untersuchungen kam deshalb die Feuchteconditionierung der Materialproben nicht zur Anwendung. Statt dessen wurde das im folgenden Abschnitt beschriebene Beregnungsverfahren für Materialproben angewendet.

Tabelle 3.1: Exsikkator-Substanzen [Nikolski 56]

Substanz	Formel	Temperatur in °C	relative Feuchtigkeit in %
Phosphorpentoxid	P_2O_5	20	$1.2 \cdot 10^{-3}$
Natriumchlorid	NaCl	16.4	30.5
Calciumchlorid	$CaCl_2$	20	32.3
Ammoniumsulfat	$(NH_4)_2SO_4$	20	81

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zum Einfluss der Feuchte auf die thermischen Eigenschaften von Materialproben sind auch für die konfektionierte Feuerwehr-Schutzkleidung relevant. Für diese kommt deshalb ebenfalls ein Beregnungsverfahren zur Anwendung.

3.3 Zustand „nass“

Die Materialproben bzw. die Kleidung werden „nass“ genannt, wenn sie durch eine hinreichend lange Beaufschlagung mit flüssigem, tröpfchenförmigem Wasser (Sprühwasser) konditioniert werden und dabei eine makroskopische Wassermenge aufgenommen wird.

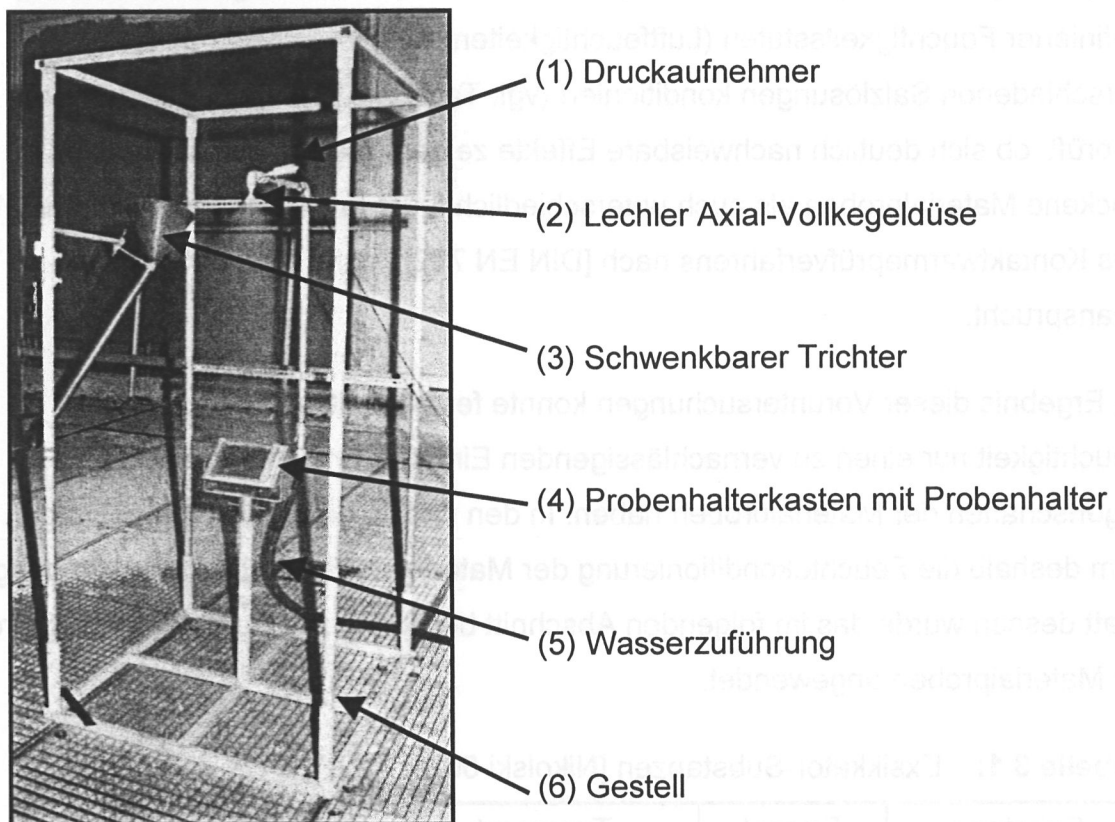


Bild 3.1: Beregnungseinrichtung für Materialproben

Für die Erzeugung des Zustandes "nass" der Materialproben kam eine eigens für diesen Zweck entwickelte Beregnungseinrichtung zur Anwendung. Die Beregnungseinrichtung mit den dazugehörigen Komponenten ist in Bild 3.1 dargestellt. Ziel der Beregnungseinrichtung war es, Materialproben reproduzierbar zu beregnen, um einen definierten Nässezustand zu erzielen. Die Materialproben wurden zu diesem Zweck in einem in einen Probenhalterkasten (Bild 3.2) einzulegenden Probenhalter (Bild 3.3) fixiert. Entsprechend der anzuwendenden unterschiedlichen Normprüfverfahren (siehe Kapitel 4) sind mehrere verschiedene Materialprobengeometrien notwendig, weswegen auch verschiedene Probenhalter Verwendung fanden. Der Probenhalterkasten gestattet eine exakte Positionierung der Proben zur Ebene in einem frei wählbaren Winkel. In Analogie zur Norm

„Textilien, Bestimmung der wasserabweisenden Eigenschaften (Sprühverfahren)“ [DIN EN 24920] wurden die Untersuchungen bei einem Anstellwinkel des Probenhalterkastens und damit des Probenhalters von 45° zur Ebene durchgeführt. Dadurch wird eine praxisrelevante Beregnung der Materialproben gewährleistet.

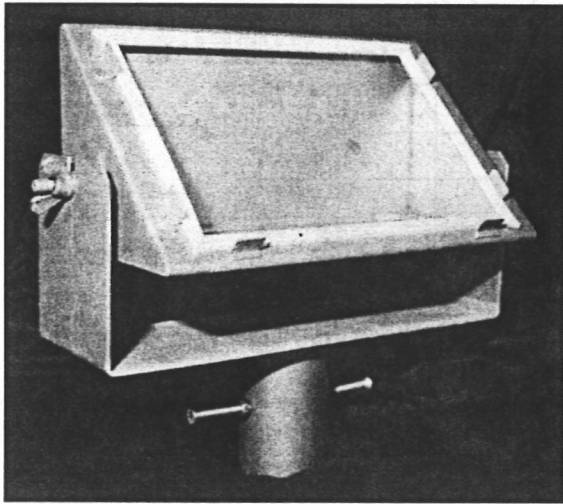


Bild 3.2: Probenhalterkasten

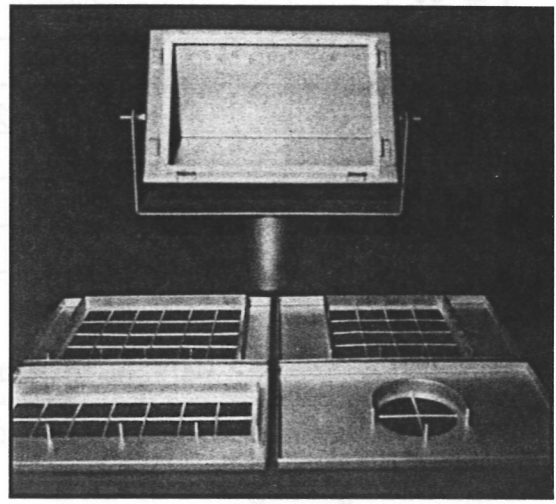


Bild 3.3: Probenhalter

In einer Höhe von 1000 mm über dem Probenhalter wurde eine Axial- Vollkegeldüse der Firma Lechler [Lechler 94] mit einem Volumenstrom von 3.9 l/min und einem Sprühwinkel von 120° bei einem Düseneingangsdruck von 4 bar installiert, die über eine Pumpe gespeist wurde. Zur Drucküberwachung diente ein unmittelbar vor der Düse installierter digitaler Druckaufnehmer. Ein schwenkbarer Trichter gestattete die Ableitung des aus der Düse austretenden Wassers bis zur Einstellung stationärer Druckverhältnisse bzw. das Auswechseln der Materialproben ohne Wasserbeaufschlagung. Zur Beregnung der Materialproben wird der Trichter weggeschwenkt.

Um die Abhängigkeit der thermischen Eigenschaften vom Nässezustand ermitteln zu können, wurden im Ergebnis von Vorversuchen sogenannte Nässestufen (siehe Tabelle 3.2) festgelegt, die Ausdruck der Beregnungsdauer unter den vorgenannten Bedingungen sind. Als Faustregel kann davon ausgegangen werden, dass sich die Menge des durch die Materialproben aufgenommenen Wassers jeweils verdoppelt. Das Bild 3.4 zeigt beispielhaft den Wasseranteil der Materialproben nach [DIN EN 702] in Abhängigkeit von der Beregnungsdauer.

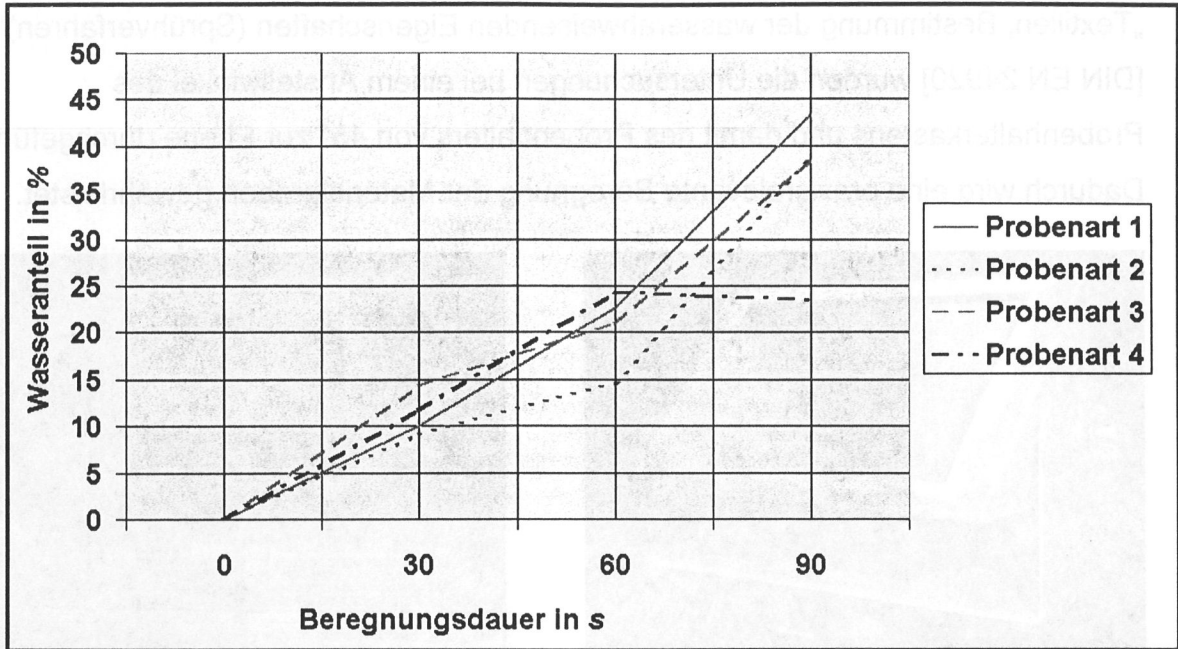


Bild 3.4: Einfluss der Beregnungsdauer auf den Wasseranteil von [DIN EN 702]-gefertigten Proben

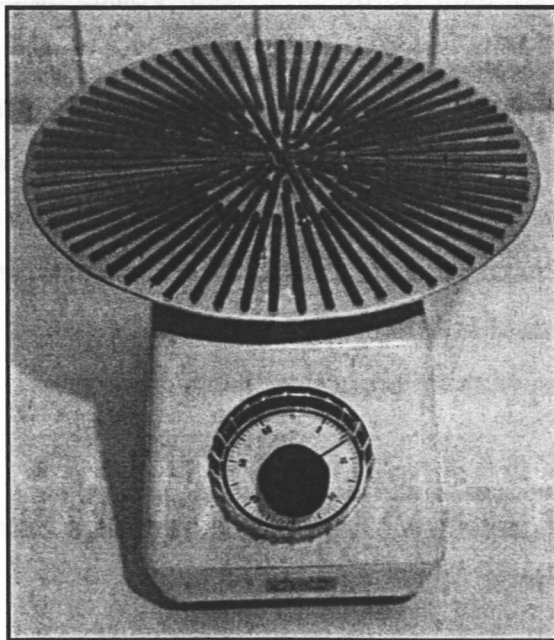


Bild 3.5: Probenschleudengerät PSG 1

Tabelle 3.2: Festlegung von Nässestufen

Nässestufe	Beregnungsdauer in s
1	30
2	60
3	90

Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass sämtliche Proben, die nach der Beregnung auf der Oberfläche noch mehr oder weniger "stehendes Wasser" aufwiesen, anschließend definiert zentrifugiert wurden. Dafür kam das speziell für

diesen Zweck hergerichtete genormte Probenschleudergerät PSG 1 (siehe Bild 3.5) zum Einsatz. Bei einer Drehzahl von 700 U/min wurden die Proben jeweils über einen Zeitraum von 5 s zentrifugiert.

Für die Bewertung der thermischen Eigenschaften ist es erforderlich, das von der Probe durch die entsprechende Behandlung tatsächlich aufgenommene Wasser exakt zu kennen. Der jeweilige Wasseranteil wurde deshalb durch Subtraktion des Trockengewichtes vom Nassgewicht der Probe bestimmt. Die Gewichte wurden durch Wägung mit einer Präzisionswaage ermittelt.

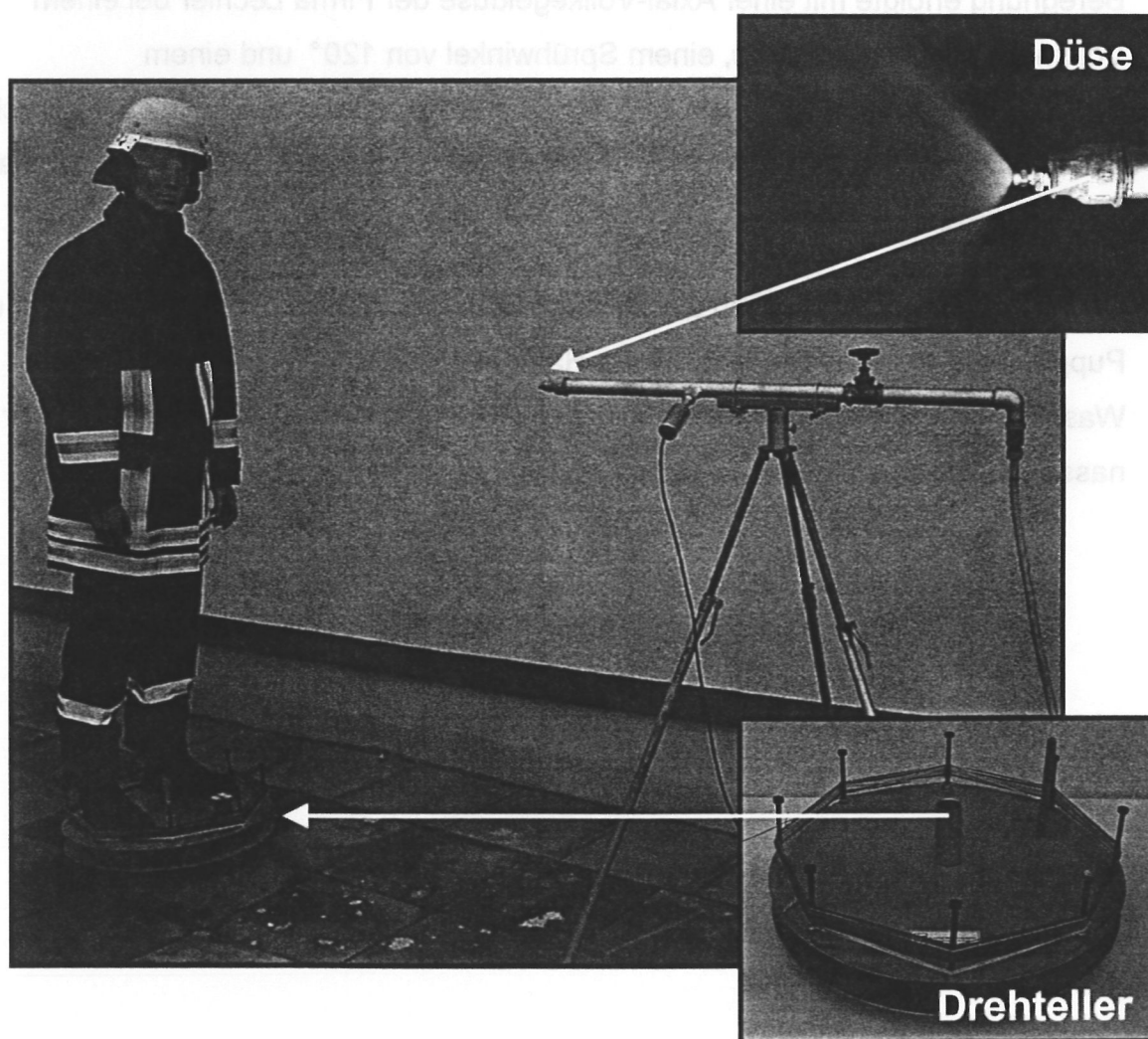


Bild 3.6: Beregnungseinrichtung

Bei dem Verfahren zur Beregnung konfektionierter Feuerwehr-Schutzkleidung musste zusätzlich sichergestellt werden, dass die gesamte Kleidung gleichmäßig mit Wasser unter praxisnahen bzw. einsatztypischen Bedingungen beaufschlagt wurde. Das setzte zunächst voraus, dass die konkret zu untersuchende Feuerwehrüberjacke

in "angezogenem Zustand" benässt wird. Hierzu kam eine der Konfektionsgröße der Jacken entsprechende Schaufensterpuppe zum Einsatz. Die Puppe wurde auf einem drehbaren Untergestell (Drehteller) nach Bild 3.6 montiert, um bei feststehender Beregnungseinrichtung die sich drehende Puppe mit der Feuerwehrüberjacke allseitig beregnen zu können.

Die Beregnung der zu untersuchenden Feuerwehrüberjacken erfolgte derart, dass die jeweilige Jacke auf dem Drehteller während einer Beregnungszeit von 3 *min* insgesamt 15 mal per Seilzug um ihre vertikale Achse gedreht wurde (5 *U/min*). Die Beregnung erfolgte mit einer Axial-Vollkegeldüse der Firma Lechler bei einem Volumenstrom von 3.9 *l/min*, einem Sprühwinkel von 120° und einem Düseneingangsdruck von 4 *bar*. Der Abstand der Düsenvorderkante zur Drehachse des Drehtellers betrug 1.50 *m*. Die Achse der horizontal ausgerichteten Düse hatte einen vertikalen Abstand zur Oberfläche des Drehtellers von 1.60 *m*.

Nach der Beregnung verblieb die jeweilige Feuerwehrüberjacke noch 3 *min* auf der Puppe, um danach dreimal kräftig per Hand ausgeschüttelt zu werden. Der Wasseranteil der Feuerwehrüberjacke wurde bestimmt, indem vom Gewicht der nassen Jacke das Trockengewicht subtrahiert wurde.

4 Thermische Untersuchungsverfahren

Zur Beurteilung der thermischen Auswirkungen von Nässe wurden unterschiedliche Verfahren angewandt, die im Folgenden näher beschrieben werden. Sie repräsentieren unterschiedliche Seiten des komplexen Phänomens „Wärme“ bezüglich der Schutzwirkung.

4.1 Verfahren für Materialproben

Die zu untersuchenden Materialien wurden in den Zuständen „trocken“ und „nass“ den folgenden vier genormten thermischen Prüfverfahren unterzogen:

- ◆ Wärmedurchgang Strahlung nach [DIN EN 366]
- ◆ Wärmedurchgang Flamme nach [DIN EN 367]
- ◆ Begrenzte Flammenausbreitung nach [DIN EN 532]
- ◆ Kontaktwärmeproofung nach [DIN EN 702].

Die einzelnen Verfahren werden nachfolgend näher beschrieben.

4.1.1 Wärmedurchgang Strahlung nach [DIN EN 366]

Bei diesem Prüfverfahren wird eine Materialprobe mit Wärmestrahlung beaufschlagt und der Wärmedurchgang der Materialprobe ermittelt bzw. berechnet.

Das Prüfgerät ist in Bild 4.1 dargestellt. Als Wärmestrahlungsquelle dienen 6 elektrisch betriebene Quarzstrahler (Siliziumkarbid-Heizstäbe). Diese bestrahlen eine auf ein Kalorimeter (siehe Bild 4.2) aufgespannte Materialprobe mit den Abmaßen $230\text{ mm} \cdot 70\text{ mm}$. Die Kalorimeterauflagefläche selbst beträgt $60\text{ mm} \cdot 60\text{ mm}$.

Die Wärmestrahlungsintensität kann mittels einer Verfahreinheit durch Veränderung des Abstandes der Materialprobenoberfläche von der Wärmestrahlungsquelle reguliert werden. Für die Untersuchungen wurden in Analogie zur Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung für eine universelle Feuerwehr-Schutzkleidung [HuPF 96] eine Wärmestromdichte von 40 kW/m^2 gewählt. Eine thermische Beaufschlagung der Materialprobe bis zum Erreichen des Beharrungszustandes der Quarzstrahler wird durch einen wassergekühlten Schieber verhindert.

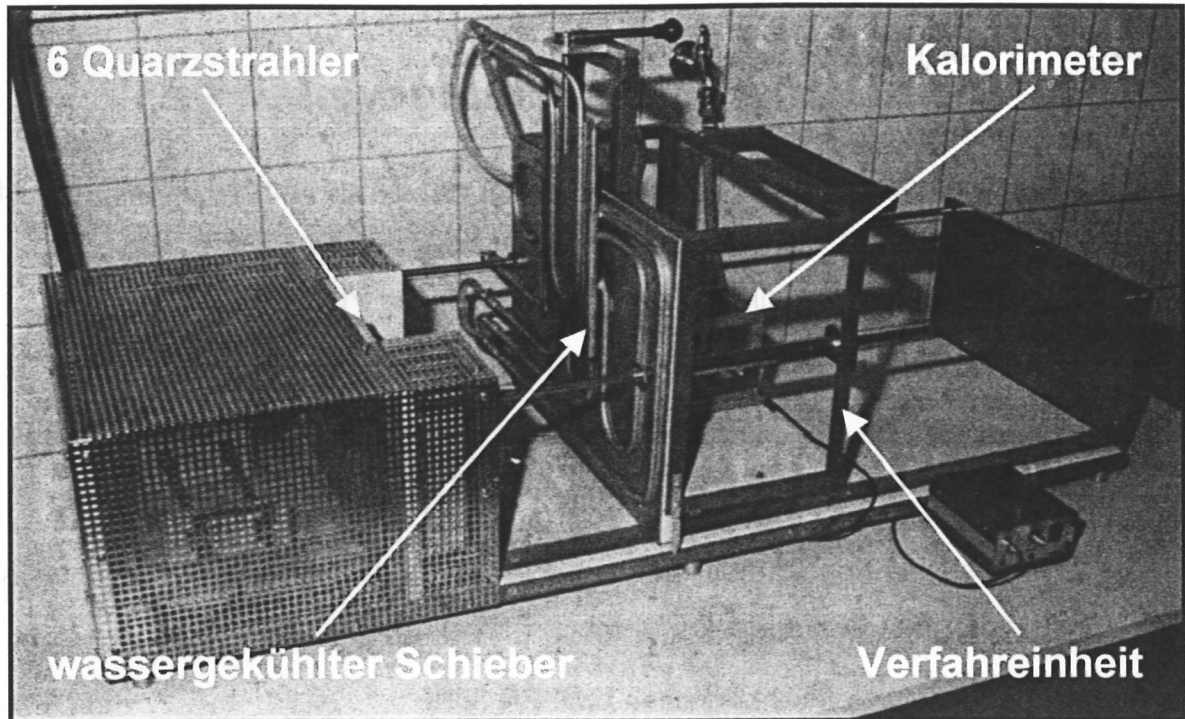


Bild 4.1: Prüfgerät Wärmedurchgang Strahlung

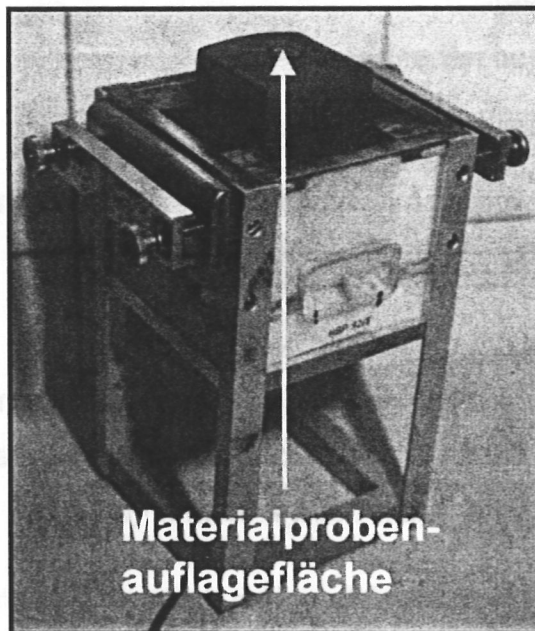


Bild 4.2: Kalorimeter

Die Erfassung der Messwerte erfolgt über einen Datalogger, die anschließende Auswertung läuft im PC über die Berechnungsvorschrift nach [DIN EN 366]. Der Versuch wird solange durchgeführt, bis auf der Rückseite der Materialprobe eine Temperaturdifferenz (Kalorimeter-Auflagefläche) von 10 K erreicht wird.

4.1.2 Wärmedurchgang Flamme nach [DIN EN 367]

Bei diesem Prüfverfahren wird die Probe mit einer definierten Propangasflamme beaufschlagt. Die Wärmestromdichte der Flamme lässt sich einstellen und durch

Kalibriermessungen ohne Probe kontrollieren. Mittels eines Kalorimeters wird der Temperaturanstieg auf der flammenabgewandten Seite der Probe gemessen und rechnerisch daraus der Wärmedurchgang durch die Materialprobe ermittelt. Die Prüfdauer hängt vom Erreichen eines Temperaturkriteriums ab, das als Zeitdauer bis zum Erreichen einer Temperaturdifferenz von 24 K auf der der Flamme abgewandten Seite der Materialprobe definiert ist. Die Prüfeinrichtung, die in den Bildern 4.3 und 4.4 dargestellt ist, besteht aus dem Probenhalter und einer Aluminiumplatte (Kalorimeterzentrierplatte), die einerseits einen definierten Druck auf die Materialprobe (Maße 140 mm · 140 mm) ausübt und zum anderen das Kalorimeter in seiner Lage fixiert.

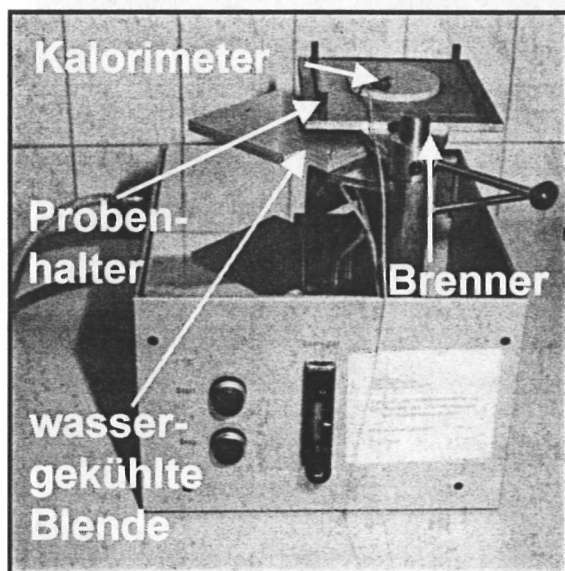


Bild 4.3: Prüfgerät Wärmedurchgang Flamme

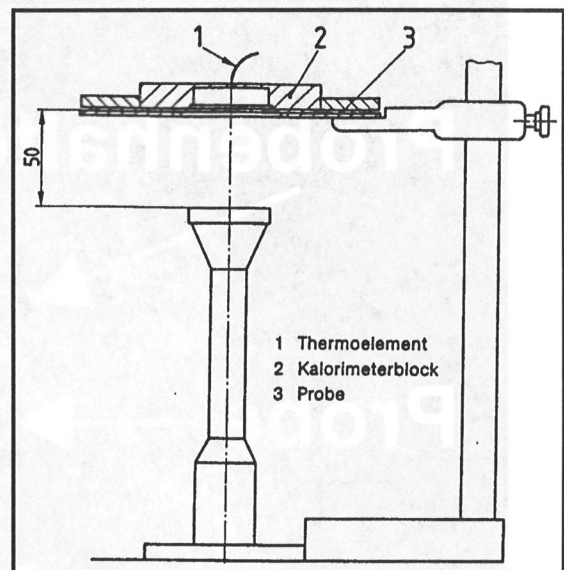


Bild 4.4: Prinzipskizze Prüfgerät Wärmedurchgang Flamme

Zur Erfassung der Messwerte wird das Kalorimeter an einen Datalogger angeschlossen. Zwischen Propangasbrenner und Probenhalter wird vor Beginn der Beflammung der Materialprobe pneumatisch eine wassergekühlte Blende eingeschoben. Zu Prüfbeginn wird diese weggeschwenkt und die Materialprobe beflammt. Nach Erreichen der Grenztemperatur (Kriterium erfüllt!) wird durch Einschieben der Blende die Messung beendet.

4.1.3 Begrenzte Flammenausbreitung nach [DIN EN 532]

Für Untersuchungen zur begrenzten Flammenausbreitung von Materialproben kam ein Brennkasten gemäß [DIN 50050 Teil 1] zum Einsatz. In ihm ist ein der

[DIN EN 532] - Begrenzte Flammenausbreitung - entsprechender Probenhalter mit den Abmaßen $190\text{ mm} \cdot 150\text{ mm}$ (H x B) eingebaut, auf dem die Materialprobe zur Beflammung aufzuspannen ist. Die Anordnung des mit Propangas betriebenen Brenners wurde ebenfalls entsprechend den Festlegungen der [DIN EN 532] gestaltet.

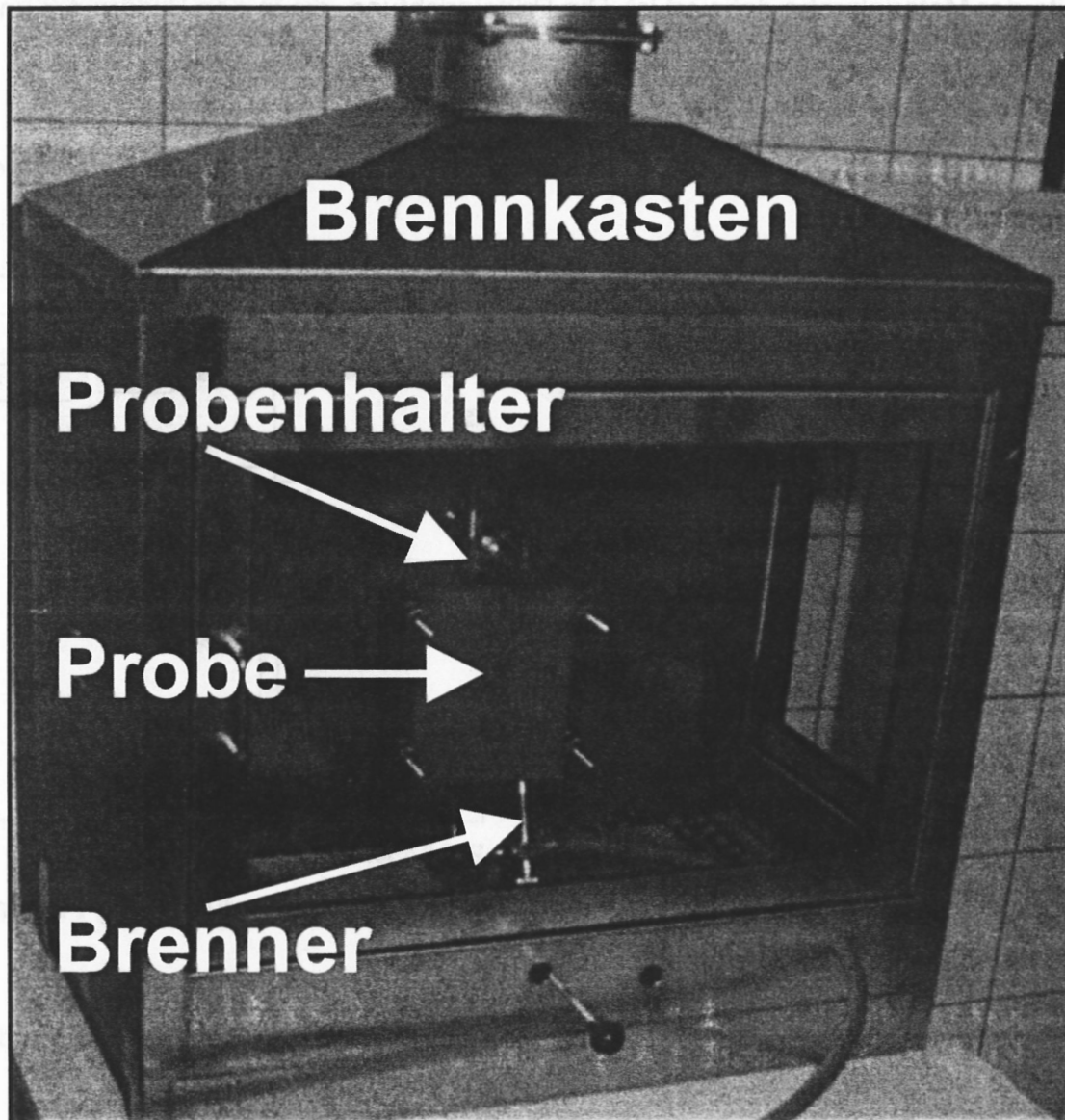


Bild 4.5: Brennkasten

In Bild 4.5 ist der Brennkasten mit dem modifizierten Probenhalter dargestellt. Zur Untersuchung der jeweiligen Materialprobe mit den Abmaßen $200\text{ mm} \cdot 160\text{ mm}$ (H x B) wird diese in den Probenhalter eingespannt. Der Abstand zwischen der Materialprobenoberfläche und der Flammenaustrittsöffnung des Brenners betrug 17 mm . Die Flamme wirkt auf die Mitte der Materialprobe und 20 mm vom unteren Rand

entfernt über einen Zeitraum von 10 s ein. Sinn und Zweck des Verfahrens ist die Ermittlung der Nachbrenn- und Nachglimmzeit der Materialien. Darüber hinaus ist festzustellen, ob sich Löcher gebildet haben und inwieweit die Ober- und Seitenkanten der jeweiligen Probe von der Flamme erfasst wurden.

4.1.4 Kontaktwärmeproofung nach [DIN EN 702]

Zielstellung dieses Prüfverfahrens ist es, den Wärmedurchgang durch die Materialprobe, bedingt durch die Kontaktwärme, zu ermitteln. Das Kontaktwärmeproofgerät, welches in den Bildern 4.6 und 4.7 dargestellt ist, besitzt als Zentraleinheit einen Heizzyylinder, der die notwendige Kontakttemperatur erzeugt. Die Norm lässt einen Kontakttemperaturbereich von 100 °C bis 500 °C zu. In Vorversuchen mit trockenen und nassen Materialproben wurden die größten Differenzen beim Wärmedurchgangswert zwischen diesen Zuständen bei einer Kontakttemperatur von 150 °C festgestellt, weswegen diese Kontakttemperatur für die weiteren Untersuchungen festgelegt wurde.

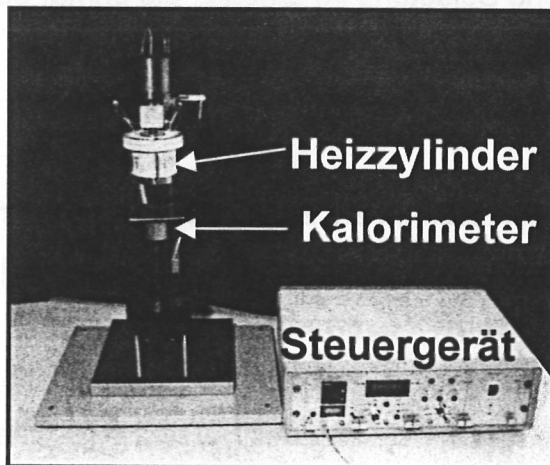


Bild 4.6: Kontaktwärmeproofgerät mit Steuerteil

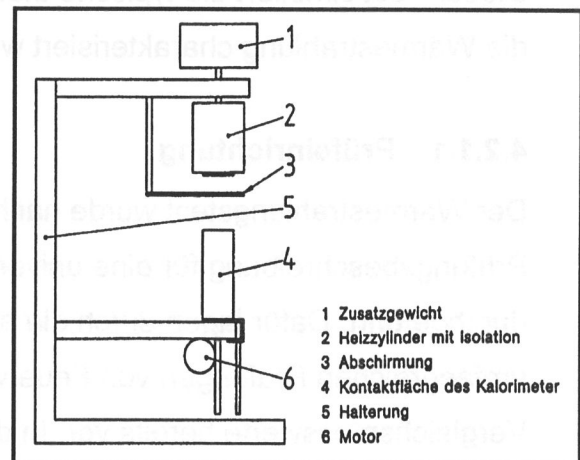


Bild 4.7: Prinzipskizze Kontaktwärmeproofgerät

Dem Heizzyylinder gegenüber befindet sich ein Kalorimeter, auf welches eine runde Materialprobe mit einem Durchmesser von 80 mm aufgelegt wird. Das Kalorimeter wird motorgetrieben und mit einer definierten Geschwindigkeit gegen den Heizzyylinder gefahren. Die Aufwärtsbewegung wird gestoppt, wenn der Heizzyylinder etwa 10 mm aus seiner Ausgangslage bewegt wurde. Durch die Gewichtskraft des Heizzyinders wird ein definierter Druck von 49 N auf die Probe erzeugt. Die Kontaktflächen von Kalorimeter und Heizzyylinder haben einen Durchmesser von 25

mm und sind zueinander parallel angeordnet. Die automatische Messung der Zeit bis zum Erreichen der vorgegebenen Temperaturdifferenz von 10 K beginnt 10 *mm* vor dem Auftreffen des Kalorimeters auf den Heizzylinder. Die Messeinheit ist in das Steuergerät integriert, über das auch alle anderen Funktionen des Gerätes gesteuert werden.

4.2 Verfahren für konfektionierte Feuerwehr-Schutzkleidung

Neben den reinen Materialprüfungen wurden Untersuchungen an Versuchspuppen durchgeführt, die eine Bewertung des Gesamtsystems der Feuerwehr-Schutzkleidung gestatten. Dabei wurden zwei unterschiedliche Dummy-Messplätze genutzt, die verschiedene typische Einsatzsituationen repräsentieren.

4.2.1 Wärmestrahlungstest

Dieser Test simuliert die typische thermische Belastung im Einsatz, die primär durch die Wärmestrahlung charakterisiert wird.

4.2.1.1 Prüfeinrichtung

Der Wärmestrahlungstest wurde nach Teil I, Abschnitt 2.7.2, der Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung für eine universelle Feuerwehr-Schutzkleidung [HuPF 96] durchgeführt. Dafür lagen durch die am Institut der Feuerwehr durchgeführten umfangreichen Prüfungen von Feuerwehr-Überjacken umfassende Erkenntnisse und Vergleichsmesswerte bereits vor. In der neuesten Fassung der Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung ist dieser Wärmestrahlungstest als Mindestforderung nicht mehr vorgeschrieben.

Die Bestandteile der Prüfeinrichtung „Wärmestrahlungstest“ sind:

- ◆ **Wärmestrahlerwand**

Eine propangasbetriebene Wärmestrahlerwand dient der Erzeugung der für die Prüfung vorgeschriebenen Strahlungsintensität. Dazu werden von insgesamt sieben Elementen die Strahlerreihen 1, 3, 5 und 7 (von oben nach unten) in Betrieb genommen. Insgesamt ergibt sich eine imaginäre Strahlerfläche von

2.8 m². Die geforderte Strahlungsintensität wird über den Abstand zur Wärmestrahlerwandoberfläche eingestellt.

◆ Testpuppe „HARDY“

Eine Testpuppe (Größe: 1830 mm) dient der Aufnahme der zu prüfenden Feuerwehr-Überjacke. Sie ist mit drei Temperaturmessstellen (Messstellen 7, 8 und 9, vgl. Tabelle 4.1) im Brustbereich (Höhe über Standfläche: 1390 mm) zum Vergleich der Messwerte zwischen trockener und nasser Feuerwehr-Überjacke ausgerüstet.

◆ Positioniereinrichtung

Eine motorgetriebene Positioniereinrichtung gestattet die Lageänderung des Dummys in der horizontalen Ebene vor der Wärmestrahlerwand.

◆ Messwerterfassungssystem

Das Messwerterfassungssystem ist ein rechnergestützter Messplatz zur Erfassung, Auswertung und Speicherung von Temperaturwerten an den in Tabelle 4.1 ausgewiesenen Messstellen. Zur Temperaturmessung wurden NiCr-Ni-Thermoelemente eingesetzt.

◆ Radiometer

Das Radiometer dient der Ermittlung der Strahlungsintensität auf der der Wärmestrahlerwand zugewandten Vorderseite der bekleideten Testpuppe vor der Prüfung.

◆ Raumtemperaturüberwachung

Die Raumtemperatur (ohne Wärmestrahlungsanteil) wird mit einem mittig hinter der Testpuppe in einer Höhe von 1390 mm angeordneten Thermoelement (Messstelle 10) während des gesamten Prüfvorganges erfasst.

Als Prüfobjekt wird eine Feuerwehr-Überjacke der Konfektionsgröße 56 L verwendet. Sie ist ausgestattet mit 6 Thermoelementen zur Erfassung der während des Prüfvorganges gemessenen Temperaturen (Messstellen 1, 3 und 5 außen auf der Jacke; Messstellen 2, 4 und 6 auf der Innenseite der Jacke – jeweils angeordnet von links nach rechts aus der Blickrichtung der Testpuppe). Die Messstellen 7, 8 und 9 des Dummys sind in analoger Weise angebracht (siehe hierzu Tabelle 4.1). Dabei liegen die Messstellen in den drei Ebenen (Körper sowie Innen- und Außenseite der Kleidung) direkt übereinander. Während der Messung wird die Jacke einer Wärmestrahlungsintensität von 1 kW/m² über einen Zeitraum von 15 min ausgesetzt.

Bild 4.8 zeigt den Versuchsstand zum Wärmestrahlungstest.

Tabelle 4.1: Messstellen Wärmestrahlungstest

Nr.	Messort	Kurzbezeichnung
1	Jacke, Brust links-außen	Brust l-a
2	Jacke, Brust links-innen	Brust l-i
3	Jacke, Brust Mitte-außen	Brust m-a
4	Jacke, Brust Mitte-innen	Brust m-i
5	Jacke, Brust rechts-außen	Brust r-a
6	Jacke, Brust rechts-innen	Brust r-i
7	Testpuppe Brust-links	Dummy l
8	Testpuppe Brust-Mitte	Dummy m
9	Testpuppe Brust-rechts	Dummy r
10	Raumtemperatur	Raum

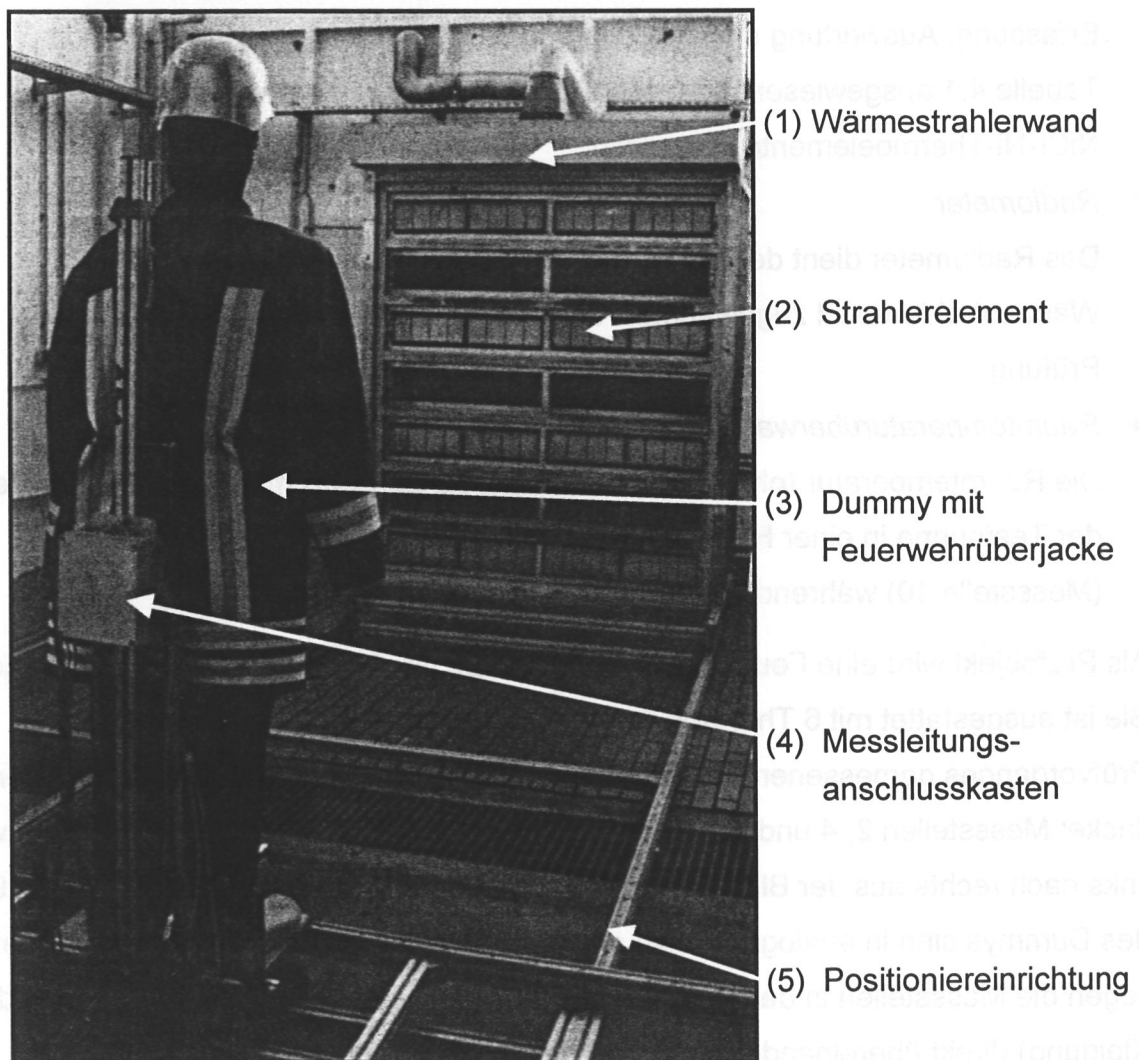


Bild 4.8: Wärmestrahlungstest

4.2.1.2 Vorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Versuchspuppe und die Feuerwehr-Überjacke sind entsprechend den Festlegungen zu instrumentieren. In diesem Zustand erfolgt gegebenenfalls die Berechnung mit der im Abschnitt 3.3 erläuterten Vorrichtung. Die Feuerwehr-Überjacke ist auf dem Dummy im Brustbereich durch Anbringen von zwei, über Umlenkrollen geführte Gewichte von jeweils 1 kg Masse definiert zu spannen. Damit wird sichergestellt, dass für den allgemeinen Sitz der Jacke reproduzierbare Bedingungen vorliegen.

Die Testpuppe wird vor Beginn der Prüfung mit einem Schutzschirm vor der Wärmestrahlung der in Betrieb gesetzten Wärmestrahlerwand abgeschirmt. Nach Erreichen des Beharrungszustandes der Wärmestrahlerwand nach ca. 3 min wird der Strahlungsschutzschirm entfernt, und es wird mit der Messwerterfassung begonnen. Nach Ablauf der vorgesehenen Prüfzeit erfolgt die Abschaltung der Wärmestrahlerwand und die Beendigung des Messvorganges. Die erfassten Messwerte werden tabellarisch und grafisch aufbereitet und bewertet.

4.2.2 Thermo Man[®]-Verfahren

Das Thermo Man[®]-Verfahren der Firma Du Pont mit Sitz in Genf wurde angewandt, um Stichflammenexpositionen auf Feuerwehr-Schutzkleidung zu simulieren. Bei dem Verfahren wird die komplette Feuerwehr-Schutzkleidung auf einer aus Glasfaser-Epoxidharz-Kunststoff bestehenden dreidimensionalen Testpuppe (siehe Bilder 4.9 und 4.10) beflammt. Dies erfolgt mit einer Wärmestromdichte von 80 kW/m^2 über einen Zeitraum von 8 s mittels paarweise um die Testpuppe angeordneten Propangasbrennern. Damit wird eine mittlere Temperatur von 800 °C auf der Oberfläche der Feuerwehr-Schutzkleidung erzeugt.

Die Testpuppe selbst ist ausgestattet mit 122 Wärmefluss-Sensoren. Über ein Modell werden aus den Messdaten durch Computerberechnung Aussagen hinsichtlich möglicher Verbrennungen 2. und 3. Grades auf der Körperoberfläche abgeleitet. Die Ergebnisse werden in Form einer zweidimensionalen grafischen Darstellung ausgewiesen, woraus sich eine Zuordnung der Schädigung bezogen auf die Körperoberfläche anschaulich erkennen lässt.

Das Thermo Man[®]-Verfahren wurde im Rahmen des Projektes zur Untersuchung trockener und nasser Feuerwehr-Schutzkleidung angewandt. Zur Erzeugung des definierten Nässezustandes der Feuerwehr-Schutzkleidung kam die Berechnungseinrichtung nach Abschnitt 3.3 zum Einsatz.

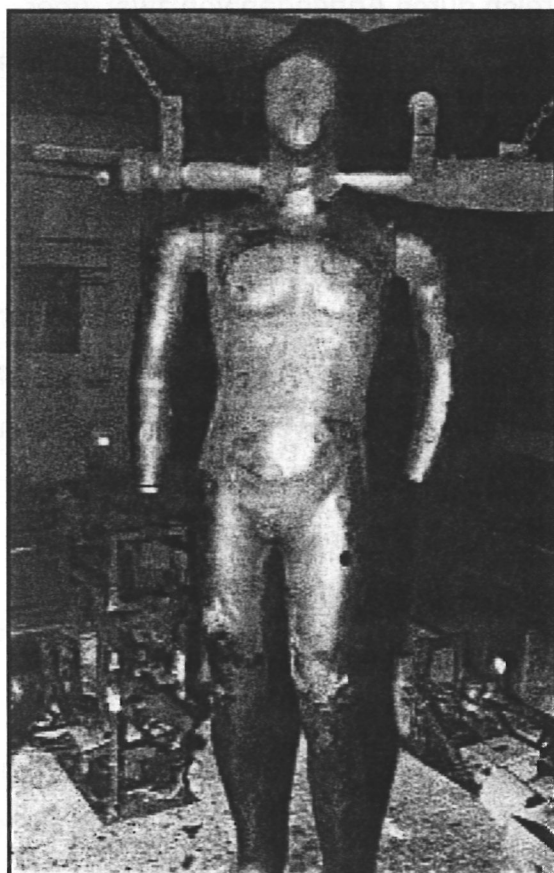


Bild 4.9: Testpuppe

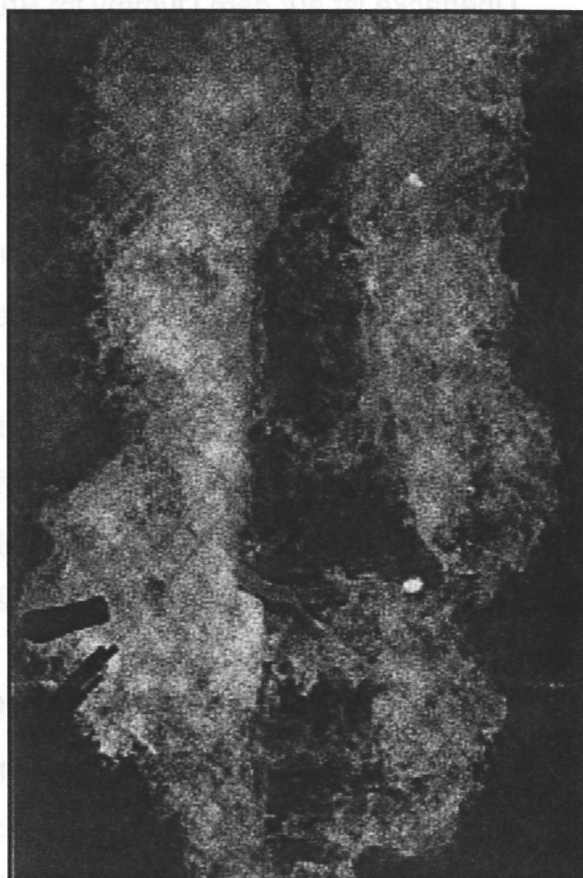


Bild 4.10: Beflammung

5 Materialuntersuchungen

In diesem Kapitel wird die Durchführung der verschiedenen Materialuntersuchungen dargestellt. Die Ergebnisse werden ausgewertet und diskutiert.

5.1 Auswahl der Materialproben

Für die Untersuchungen wurden sämtliche zum Zeitpunkt der Untersuchungen auf dem Markt befindlichen und nach der Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung für Feuerwehr-Schutzkleidung [HuPF 96] zugelassenen Feuerwehrüberjacken einer Analyse unterzogen. Aus der Vielzahl der Materialkombinationen der Feuerwehrüberjacken wurden im Ergebnis Stoffproben von 4 Jacken als typische Vertreter ausgewählt, die folgenden Ansprüchen genügen:

- ◆ Sie sind repräsentativ für die Mehrzahl der im praktischen Feuerwehreinsatz befindlichen Überjacken.
- ◆ Berücksichtigt wurde die Verwendung verschiedener Materialkombinationen und Oberstoffmaterialien unter Beachtung des Aspekts ihrer Wasseraufnahmefähigkeit.
- ◆ Zur Sicherung der Produktneutralität wurden unterschiedliche Hersteller einbezogen.

Von jeder der in Tabelle 5.1 ausgewiesenen Materialaufbauten wurden Proben gefertigt. Zur Anwendung gelangten die im Abschnitt 4.1 beschriebenen vier thermischen Untersuchungsverfahren. Jeweils eine neue Probe wurde im trockenen Zustand sowie in den drei Nässestufen nach Tabelle 3.2 diesen Verfahren unterzogen. Jeder Versuch wurde dreimal unter Verwendung einer neuen Probe wiederholt. Damit wurden insgesamt 48 Materialproben untersucht. Durch die Versuchswiederholung und die damit verbundene Mittelwertbildung wurde angestrebt, eine ausreichend hohe statistische Sicherheit der Aussagen zu erhalten.

Tabelle 5.1: Materialaufbauten der Proben

Materiallage	Materialaufbau/Probenart			
	1	2	3	4
Oberstoff	Nomex Delta TA, FC-Ausrüstung, 195 g/m ²	Nomex Delta TA, 195 g/m ²	Nomex Delta TA, 93 % Nomex, 5 % Kevlar, 2 % P140 Antistatikfaser, 195 g/m ²	Kermel HTA 210, antistatisch, 64.6% Kermel, 35.2 % Paraaramid, 0.2 % Bekinox, 210 g/m ²
Farbe des Oberstoffes	dunkelblau	dunkelblau	dunkelblau	dunkelblau
Nässesperre	Sympatex 181-11	Gore-Tex moisture barrier E89	Gore-Tex moisture barrier E89	FR-Liner 89/55 (Sontara)
Isolationslage	P84 Filz	Aramid-Vlies, 200 g/m ²	P84 Filz	Nadelvlies Kermel
Innenfutter	P84 / Viskose FR Gewebe, 320 g/m ²	50 % Nomex, 50 % Viskose FR Gewebe, 135 g/m ²	P84 / Viskose FR Gewebe	Ripstop Kermel / Viskose, 105 g/m ²

Tabelle 5.2: Erläuterung des Versuchsschlüssels am Beispiel 3231

Ziffern des Schlüssels	3	2	3	1
Bedeutung	Materialaufbau /Probenart 3 nach Tabelle 5.1	Anwendung des thermischen Prüfverfahrens "Wärmedurchgang Flamme"	Materialprobe mit Nässegrad 2, d. h. mit einer Berechnungsdauer von 60 s	1. Probe der durchgeführten Untersuchung

Zur eindeutigen Kennzeichnung der einzelnen Versuche wurde ein vierstelliger Schlüssel eingeführt. Dieser berücksichtigt:

- ◆ 1. Ziffer - Materialaufbau der Probe
Die zu vergebene Ziffer ist identisch mit der Ziffer des Materialaufbaus in der Tabelle 5.1.
- ◆ 2. Ziffer - Untersuchungsverfahren der Materialprobe
Dabei stehen die Zahlen für folgende Verfahren:
 - 1 - Kontaktwärmeprobeprüfung nach Abschnitt 4.1.4
 - 2 - Wärmedurchgang Flamme nach Abschnitt 4.1.2
 - 3 - Wärmedurchgang Strahlung nach Abschnitt 4.1.1
 - 4 - begrenzte Flammenausbreitung nach Abschnitt 4.1.3 .
- ◆ 3. Ziffer - Nässezustand der Materialprobe
Dabei bezeichnen die Zahlen folgende Zustände:
 - 1 - trockene Materialprobe
 - 2 - nasse Materialprobe, Berechnungsdauer 30 s (Nässegrad 1, Tabelle 3.2)
 - 3 - nasse Materialprobe, Berechnungsdauer 60 s (Nässegrad 2, Tabelle 3.2)
 - 4 - nasse Materialprobe, Berechnungsdauer 90 s (Nässegrad 3, Tabelle 3.2).
- ◆ 4. Ziffer - laufende Nummer der Probe bei gleichen Versuchsbedingungen.

Zur Demonstration ist in Tabelle 5.2 ein Beispiel explizit dargestellt. Der Versuchsschlüssel findet sich in der geschilderten Art und Weise auch bei der Darstellung der Untersuchungsergebnisse an anderen Stellen des vorliegenden Berichtes wieder.

5.2 Untersuchung der Materialproben

In den folgenden Abschnitten werden die Materialuntersuchungen und die erzielten Ergebnisse im Einzelnen dargestellt.

5.2.1 Verfahren Wärmedurchgang Strahlung nach 4.1.1

Die nach [DIN EN 366] erforderlichen Berechnungen zur Aufbereitung der Versuchsdaten werden nachfolgend kurz erläutert. Die Auswertung erfolgt nach Methode B. Sie ist nur dann möglich, wenn der Temperatur-Zeit-Verlauf linear ist, anderenfalls hätte man keinen stationären Zustand. Dies kann der Fall sein, wenn während des Versuches Materialveränderungen oder -zerstörungen auftreten. Die ermittelten Verläufe wiesen jedoch alle einen deutlichen linearen Bereich auf.

Die Wärmestromdichte auf der Innenseite der Probe wird über

$$q_c = \frac{C}{S} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (6.1)$$

bestimmt. Hierbei sind:

- C - Wärmekapazität des Kalorimeters in J/K
- S - Fläche der Kalorimetervorderseite (25 cm^2)
- $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ - Steigung im linearen Teil des Temperaturverlaufs des Kalorimeters in K/s .

Im Bild 5.1 sind die sich einstellenden Wärmestromdichten auf der Probenrückseite in Abhängigkeit vom Nässezustand und der Probenart dargestellt.

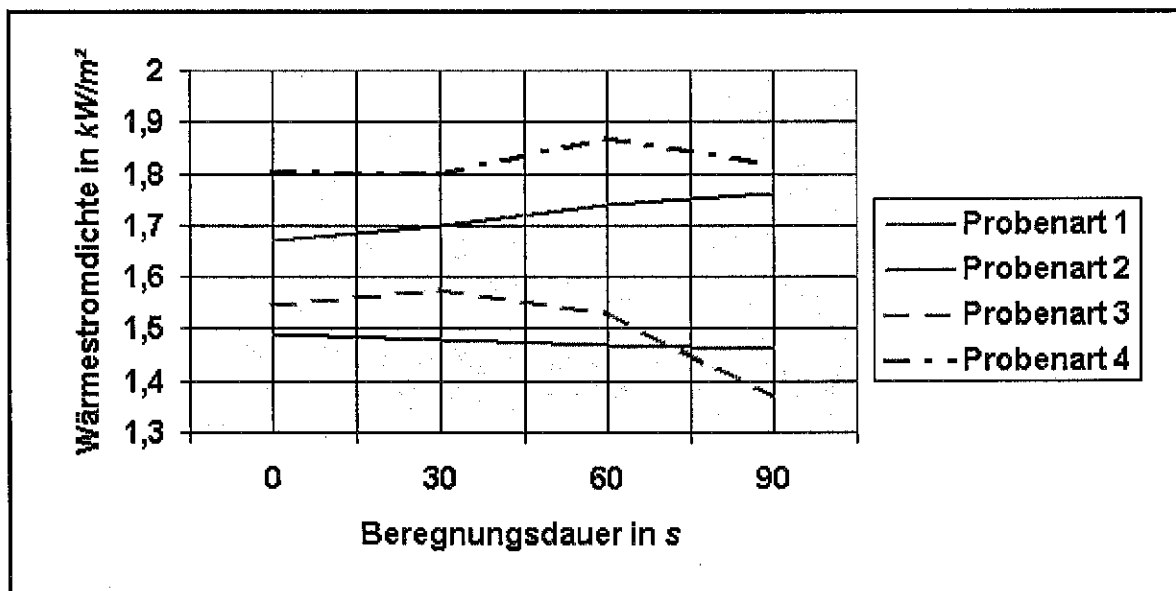


Bild 5.1: Einfluss des Nässezustandes auf die Wärmestromdichte auf der Probenrückseite nach [DIN EN 366]

Nach einer weiteren Formel lässt sich der Wärmedurchlassgrad $TF(q_0)$ über

$$TF(q_0) = \frac{q_c}{q_0} \quad (6.2)$$

berechnen. Dieser Kennwert ist das Verhältnis der Wärmestromdichte auf der Rückseite der Probe zur Dichte der einfallenden Wärmestrahlung. Der Kennwert trifft eine Aussage über das Isolationsverhalten der Probe. Bild 5.2 zeigt die grafische Darstellung der erhaltenen Ergebnisse.

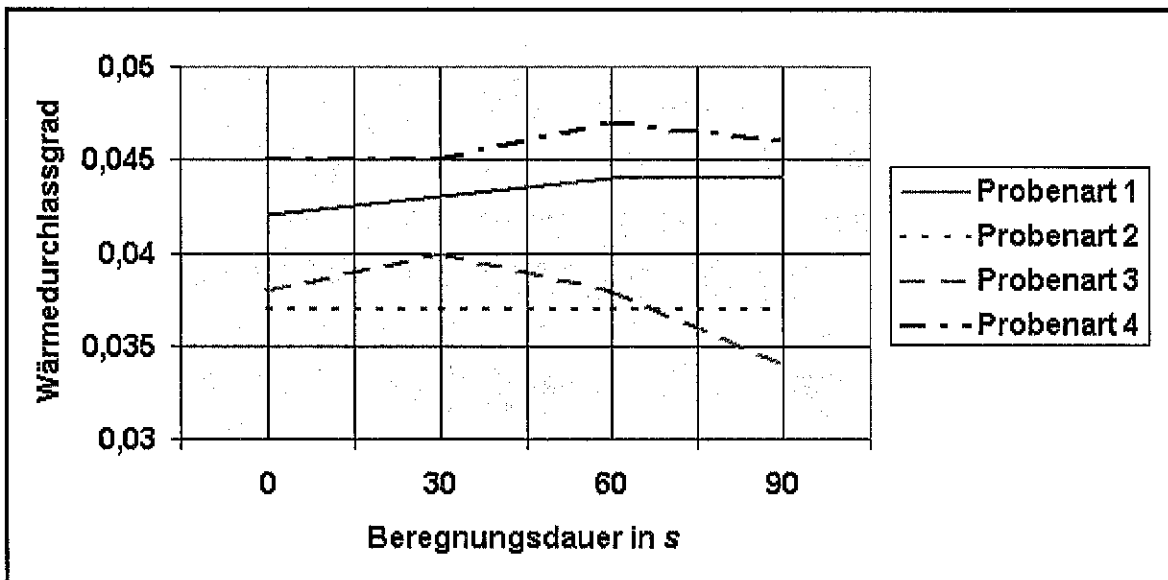


Bild 5.2: Einfluss des Nässezustandes auf den Wärmedurchlassgrad nach [DIN EN 366]

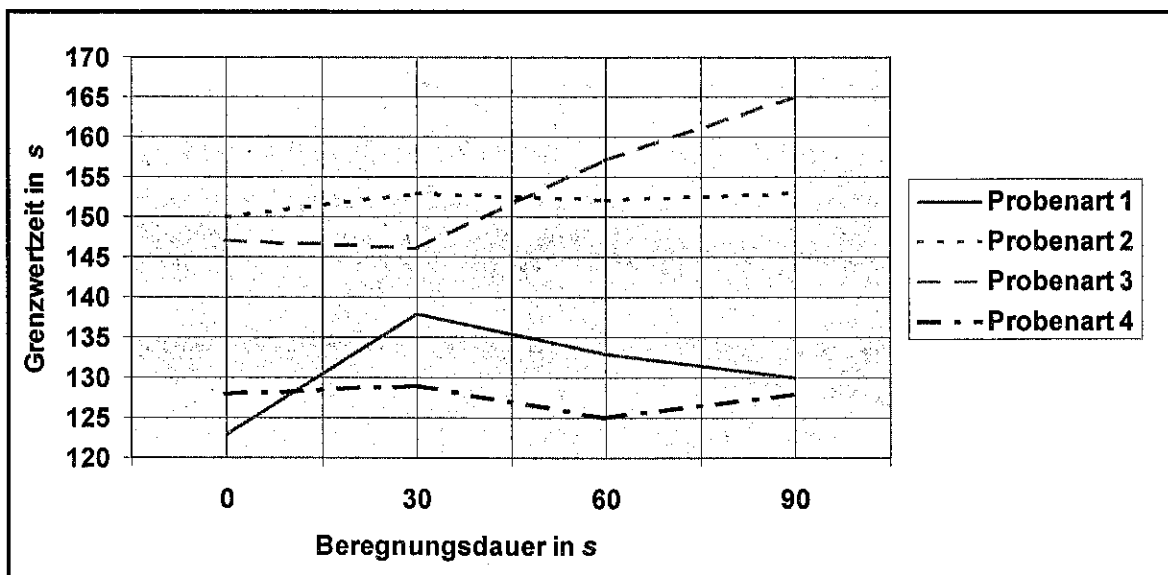


Bild 5.3: Einfluss des Nässezustandes auf die Grenzwertzeit nach [DIN EN 366]

An allen untersuchten Materialien konnten über den jeweiligen Zeitraum der Wärmestrahlungsbelastung Materialveränderungen festgestellt werden. Die gemessenen Grenzwertzeiten werden im Bild 5.3 dargestellt.

Der Oberstoff wurde schwarz und brüchig. Bei der Probenart 4 (Kermel HTA 210) brach der Stoff bereits während der Prüfung. Die Nässe Sperre wurde zerstört, in einigen Fällen einschließlich der Trägerschicht. Die Isolationsschicht zeigte deutliche Verfärbungen, in einigen Fällen war sie versprödet. Das Innenfutter wurde nicht zerstört, zeigte aber in der Regel bräunliche Verfärbungen.

Wie aus den Bildern 5.1 bis 5.3 ersichtlich, gibt es einige Werte, die nicht im Trend liegen. Bei diesen Werten handelt es sich um allgemeine Messfehler oder aber um Proben, die nicht normgerecht aufgespannt waren. Ein typisches Beispiel hierfür liegt vor, wenn sich die Proben beim Positionieren des Kalorimeters verschieben und dadurch nicht mehr vollflächig die Messfläche bedecken. Dies trat trotz größter Sorgfalt auf, was zeigt, dass derartige Messungen äußerst problematisch sind und nicht überinterpretiert werden dürfen. Messergebnisse sind hier mit hohen Schwankungsbreiten zu erwarten, die nur durch eine hohe Stichprobenzahl und damit einen großen Aufwand reduziert werden können.

Folglich lässt die Auswertung der Messungen die folgende Aussage zu. Durch die Anwendung des Verfahrens "Wärmedurchgang Strahlung" konnte der Nachweis einer Abhängigkeit der thermischen Eigenschaften der Materialproben vom Nässezustand der Proben nicht erbracht werden. Damit wäre eine Beeinträchtigung der Schutzwirkung der aus den untersuchten Materialien hergestellten Feuerwehr-Schutzkleidung hiermit zunächst nicht nachweisbar, aber auch nicht ausschließbar. Vielmehr ordnen sich die Ergebnisse in die allgemeine Diskussion zu diesem Untersuchungsverfahren ein, dass nämlich die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und damit die Messgenauigkeit in Fachkreisen umstritten ist.

Für eine detailliertere Betrachtung sind die gesamten Messwerte in der Anlage enthalten.

5.2.2 Verfahren Wärmedurchgang Flamme nach 4.1.2

Aus den gemessenen Zeiten, die bis zum Erreichen der Temperaturdifferenz von $(24 \pm 0.2) \text{ K}$ vergehen, lässt sich ein Wärmeübergangsindex HTI_{24} in Form eines ganzzahlig gerundeten Mittelwertes aus jeweils drei Messungen berechnen. Diese HTI_{24} -Werte sind in Tabelle 5.3 aufgeführt. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erfolgt ein Vergleich dieser Werte zwischen trockenen und nassen Proben. Alle Ergebnisse erfüllen die Bedingung

$$HTI_{24} \geq 13 \text{ s}$$

nach [HuPF 96]. Die Basisdaten können ebenfalls dem Anhang entnommen werden. Eine anschauliche Darstellung vermittelt das Bild 5.4.

Tabelle 5.3: Probenartbezogene HTI_{24} -Werte

Probenart	Versuchsschlüssel	HTI_{24} in s
1	121x	20
	122x	21
	123x	18
	124x	20
2	221x	21
	222x	22
	223x	24
	224x	21
3	321x	24
	322x	24
	323x	24
	324x	24
4	421x	21
	422x	22
	423x	22
	424x	21

¹ x steht für die Probennummer 1, 2 bzw. 3

Ähnlich wie beim Prüfverfahren Wärmedurchgang Strahlung wiesen auch hier sämtliche Materialproben deutliche Verbrennungserscheinungen, bedingt durch die hohe thermische Einwirkung, auf. Der Oberstoff und die Nässeperre sind in den meisten Fällen thermisch geschädigt. Das verbrannte Material brach, wenn man es knickte. Die Isolationsschicht wies je nach Probenart mehr oder weniger starke Zerstörungen auf. Das Innenfutter blieb stabil, zeigte aber auch deutliche Verfärbungen. Aus dem Grad der Zerstörung lässt sich direkt kein Zusammenhang zum Nässegrad der Probe ableiten.

Der Index wurde für jeden Nässezustand berechnet. Das

Diagramm zeigt, dass mit zunehmender Nässe kein eindeutiger Trend beim HTI_{24} -Wert zu erkennen ist. Eine klare deutliche Abhängigkeit vom Nässezustand lässt sich

folglich wiederum nicht nachweisen. Vermutlich ist der Einfluss der Nässe auch für diese Art des Wärmedurchgangs nicht so signifikant, da die aufgebrauchte Energiemenge schnell zum Verdampfen des Wassers führt und der entstehende Wasserdampf infolge der durch die Flamme hervorgerufenen Konvektion aus dem Gewebe abtransportiert wird.

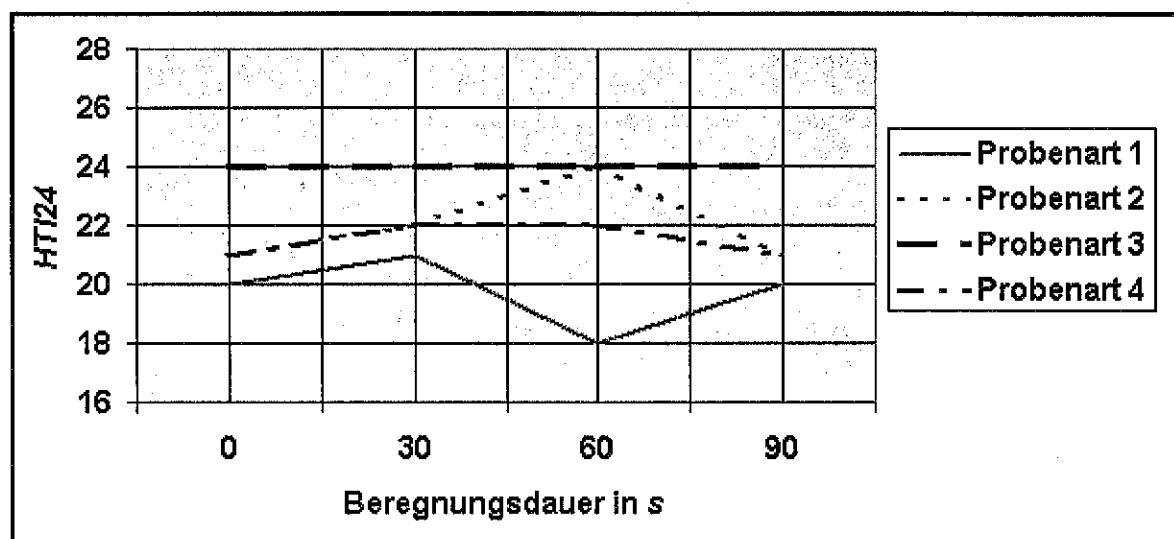


Bild 5.4: Einfluss des Nässezustandes auf den Wärmeübergangsindex nach [DIN EN 367]

5.2.3 Verfahren Begrenzte Flammenausbreitung nach 4.1.3

Insgesamt wurden die vier Probenarten nach Tabelle 5.1 in den festgelegten Nässezuständen (trocken sowie Nässestufen 1 bis 4 nach Tabelle 3.2) untersucht. Nach ersten Voruntersuchungen mit der nach [DIN EN 532] vorgeschriebenen Beflammungszeit von 10 s zeigte sich, dass die Ergebnisse zwischen den einzelnen Materialproben bei gleichem Nässezustand keine erkennbaren Unterschiede aufwiesen und sich deshalb auch keine Erkenntnisse ableiten ließen. Deshalb wurden die Beflammungszeiten gegenüber den Festlegungen der Norm erhöht. Zur Anwendung gelangten die festgelegten Zeiten von 30 s, 60 s, 90 s und 180 s oder Zeiten, bei denen ein Durchbruch der Flamme durch das Innenfutter erfolgte. Insgesamt wurden 48 Materialproben untersucht. Je Probe und Nässezustand wurden die Untersuchungen mit den vorgenannten Beflammungszeiten bis zum Eintritt des festgelegten Abbruchkriteriums durchgeführt.

Abbruchkriterium für die jeweils mit einer Beflammungsdauer von 30 s beginnende Untersuchung war das Feststellen des Nachglimmens der Materialprobe, bei dessen

Nichtauftreten die Lochbildung. Ein Loch im Sinne von [DIN EN 532] ist vorhanden, wenn sich in der Probe eine Öffnung von mindestens $5 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm}$ befindet. Trat eines der beiden Abbruchkriterien nicht auf, wurde die nächste Probe der gleichen Probenart mit der nachfolgend höheren Beflammungszeit oder bis zum Durchbruch der Flamme durch das Innenfutter beflammt.

Gemäß der Norm darf keine Lochbildung in einer Schicht auftreten, die direkt den Flammen ausgesetzt ist. Diese Forderung wurde unter Zugrundelegung der Normbeflammungszeit von 10 s bei allen Materialproben erfüllt. Die genannte Forderung ist natürlich in Bezug auf die mit höheren Beflammungszeiten durchgeführten Versuche nicht relevant. Die Ergebnisse der Untersuchungen enthält die Tabelle 5.4. Die Fälle, in denen ein Nachglimmen auftrat, sind grau unterlegt. Ein Nachbrennen wurde bei keiner der Proben festgestellt.

Tabelle 5.4: Nachglimmzeiten nach [DIN EN 532]

Probenart	Nässezustand	Versuchsschlüssel ¹	Dauer der Beflammung in s	Nachglimmzeit in s	Lochbildung
1	trocken	1411	30	0	x
	nass, 30 s Beregnung	1422	60	0	x
	nass, 60 s Beregnung	1431	30	0	x
	nass, 90 s Beregnung	1442	60	0	x
2	trocken	2415	180	0	x
	nass, 30 s Beregnung	2422	60	13	x
	nass, 60 s Beregnung	2435	180	0	x
	nass, 90 s Beregnung	2445	180	0	x
3	trocken	3416	300	6	x
	nass, 30 s Beregnung	3426	300	5	x
	nass, 60 s Beregnung	3432	60	11	x
	nass, 90 s Beregnung	3442	60	0	x
4	trocken	4411	30	1	x
	nass, 30 s Beregnung	4421	30	1	x
	nass, 60 s Beregnung	4436	310	1	x
	nass, 90 s Beregnung	4441	30	1	x

¹ Abweichend von der Definition des Versuchsschlüssels im Abschnitt 5.1 bezeichnet die 4. Ziffer hier den Wiederholungsgrad bei gleicher Probenart und gleichem Nässezustand. In der Tabelle sind nur die Ergebnisse erfasst, bei denen erstmalig ein Effekt nachweisbar war (Lochbildung oder Nachglimmen).

Im Rahmen der Realisierung dieses Verfahrens konnten in Bezug auf sich einstellende Materialveränderungen folgende Beobachtungen gemacht werden:

- ◆ Durch die definierte Beflammung wurde der Oberstoff schwarz und brüchig. Er hat sich während der Beflammung zum Teil erheblich verzogen. Dadurch veränderte sich in den meisten Fällen der Abstand der Probe zum Brenner. Teilweise wurde der Abstand so gering, dass die Flamme nicht mehr ihre volle Energie entfalten konnte.
- ◆ Die Nässeperre verfärbte sich orange, teilweise schmolz die Membrane inklusive ihrer Trägerschicht und blau-orange Rauchspuren stiegen bis zur Oberkante der Materialprobe auf. Die Isolationslage verfärbte sich braun. Das Innenfutter zeigte bei der Normbeflammungszeit nur leichte Verfärbungen. Für alle Versuche gilt, dass die Lagen stellenweise leicht miteinander verklebt waren, sich jedoch mit geringem Kraftaufwand lösen ließen. Bei den Untersuchungen mit den längeren Beflammungszeiten waren die verbrannten und verfärbten Flächen größer und die Verklebungen der einzelnen Lagen fester. In einigen Fällen trat ein Nachglimmen auf.

Die Auswertung der Messergebnisse nach Tabelle 5.4 ist ausschließlich eine vergleichende Betrachtung. Feststellbar ist, dass, bedingt durch die höheren Energieeinträge infolge von längeren Beflammungszeiten gegenüber der Festlegung in der Norm, bei allen Untersuchungen eine Lochbildung auftrat.

Des Weiteren ist Tabelle 5.4 zu entnehmen, dass bei der Probenart 1 bei jedem Nässezustand kein Nachglimmen zu verzeichnen war. Während bei der Probenart 2 lediglich bei Nässestufe 1 und einer Beflammungsdauer von 60 s ein Nachglimmen auftrat, war dieses bei den Probenarten 3 und 4 in jedem Nässezustand der Fall.

Im Ergebnis der Untersuchungen zur begrenzten Flammenausbreitung lässt sich jedoch feststellen, dass die Unterschiede zwischen den Nässezuständen nicht signifikant sind, um daraus eine Abhängigkeit in Bezug auf die Veränderung der thermischen Eigenschaften der Materialproben ableiten zu können. Dies gilt sowohl in Bezug auf die Normbeflammungszeit als auch hinsichtlich der bei den Folgeuntersuchungen höher angesetzten Beflammungszeiten.

5.2.4 Verfahren Kontaktwärmeprüfung nach 4.1.4

Bei der Versuchsdurchführung wird die Zeit bis zum Erreichen einer Temperaturdifferenz von 10 K automatisch ermittelt. Diese Schwellenwertzeiten sind grafisch in Bild 5.5 dargestellt. Für detailliertere Betrachtungen sind im Anhang wiederum die primären Messdaten enthalten.

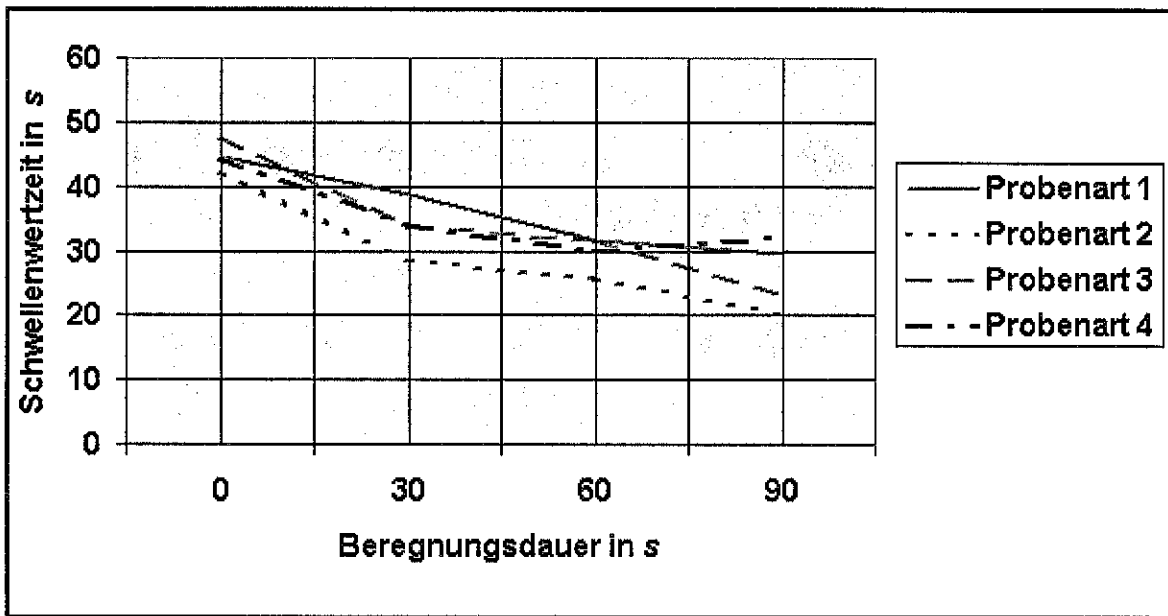


Bild 5.5: Einfluss des Nässezustandes auf die Schwellenwertzeiten bei der Kontaktwärmeprüfung nach [DIN EN 702]

Es lässt sich eine deutliche Abhängigkeit der Schwellenwertzeiten vom Nässezustand der Materialproben erkennen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass durch stärkere „Benässung“ des Materials die Schwellenwertzeiten erkennbar sinken, was mit einer Reduzierung der thermischen Schutzwirkung durch den Einfluss der Nässe gleichzusetzen ist. Das Ergebnis lässt sich so interpretieren, dass beim höchsten Nässegrad im Vergleich zum trockenen Zustand mit einer Reduzierung der thermischen Schutzwirkung auf ca. die Hälfte zu rechnen ist. Die Schwankungen bzw. Streuung der Schwellenwertzeiten bei gleichem Nässezustand liegen im unterschiedlichen Materialaufbau und der damit verbundenen, voneinander abweichenden Wasseraufnahmefähigkeit der Probenarten begründet. Betrachtet man die diesbezüglichen grafischen Darstellungen im Bild 3.4, die die aufgenommenen Wassermengen der Proben wiedergeben, so bestätigt sich die getroffene Aussage.

Deutliche Effekte durch eingelagertes Wasser ließen sich nur bei der Kontaktwärme nachweisen. Es stellt sich damit natürlich die Frage nach den Gründen. Vergleicht man die Verfahren vor diesem Hintergrund, so zeigt sich, dass bei diesem Versuchsaufbau der Gastransport im Gewebe während des Versuches behindert ist. Dadurch kommt es, unter Umständen in Verbindung mit dem Leidenfrost-Phänomen, zu einer Behinderung der weiteren Verdampfung und resultierend damit zu einer besseren Wärmeleitung. Diese Hypothese wurde durch weitere Versuche untermauert.

5.3 Zusätzliche Untersuchungen

Die in den vorhergehenden Abschnitten ausgewiesenen Untersuchungsergebnisse verdeutlichen Folgendes:

- ◆ Eine pauschale Bewertung der Größe des Einflusses von Feuchte bzw. Nässe ist in Bezug auf damit verbundene veränderte thermische Eigenschaften von Materialien für die Feuerwehr-Schutzkleidung nicht möglich. Es deutet sich aber die Tendenz an, dass Nässe die thermischen Eigenschaften negativ beeinflusst, letztendlich zu einer Verschlechterung der Schutzwirkung vor thermischen Einflüssen führt.
- ◆ Nicht jedes der im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen angewandten thermischen Prüfverfahren ist gleich gut geeignet, um den Einfluss der Nässe nachzuweisen. Der deutlichste Hinweis auf eine Veränderung der thermischen Eigenschaften durch die Nässe der untersuchten Materialproben konnte durch das Verfahren der Kontaktwärmepfung erbracht werden.
- ◆ Zur Stützung der Hypothese, dass die freie Konvektion an den Probenoberflächen von entscheidender Bedeutung für den Nässeeinfluss ist, sind zusätzlich Versuche mit unterschiedlichem Energieeintrag sinnvoll.

Die Probenart 1 wurde unter Anwendung des Kontaktwärmepfungsverfahrens mit jeweils 7 verschiedenen Kontakttemperaturen untersucht. Verglichen wurde der Zustand „trocken“ mit dem Zustand „nass“ des Nässegrades 2, d. h. bei einer Berechnungsdauer von 30 s.

Bild 5.6 verdeutlicht die Verhältnisse „trocken“ zu „nass“ in grafischer Form. Aus den Messergebnissen lässt sich ein Abfallen der Schwellenwertzeiten in Abhängigkeit vom eingelagerten Wasser der Materialproben erkennen. Andererseits verdeutlicht der Anstieg der Kurven die Tendenz, dass der Einfluss von Nässe im Material im unteren Temperaturbereich gravierender ist als bei höheren Temperaturen, denn die Differenzen zwischen den Schwellenwertzeiten der nassen und trockenen Proben verringern sich mit zunehmender Temperatur.

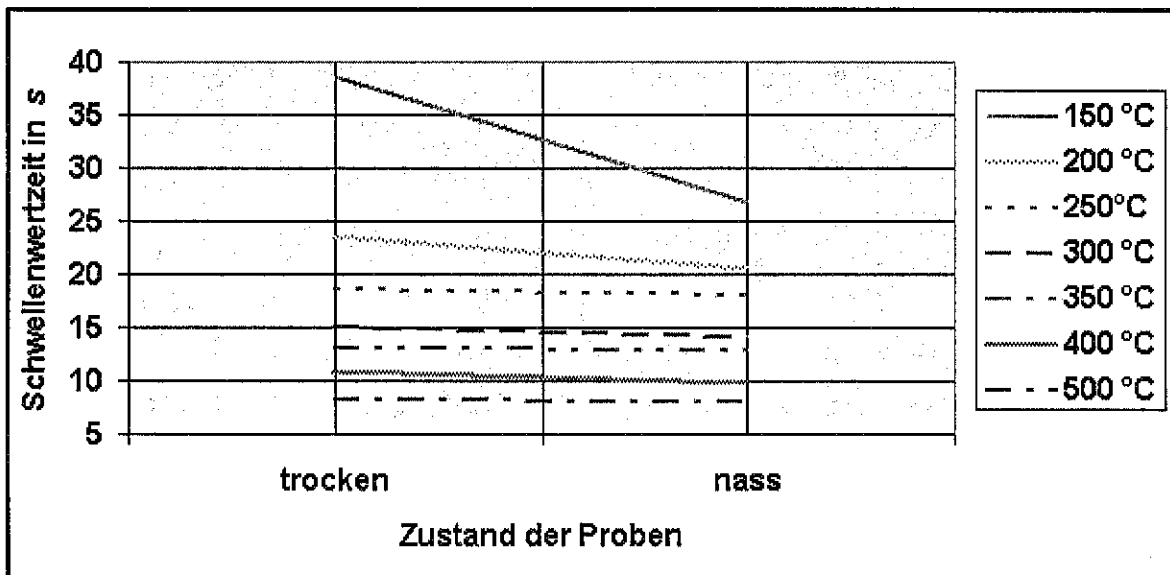


Bild 5.6: Erreichte Schwellenwertzeiten bei den zusätzlichen Untersuchungen

Diese Tendenz kann zu der Annahme führen, dass sich eine nasse Feuerwehr-Schutzkleidung bei thermischer Belastung zumindest im höheren Temperaturbereich nicht schädlich auf deren Träger auswirken würde, da die Schwellenwertzeiten der nassen Kleidung sich nur unwesentlich von denen der trockenen Kleidung unterscheiden. Diese Aussage bestätigt beispielsweise auch die Untersuchungsergebnisse bei den Verfahren Wärmedurchgang Strahlung und Wärmedurchgang Flamme, bei denen keine deutlich erkennbaren Abhängigkeiten der thermischen Eigenschaften der Materialien von ihrem Nässegrad nachgewiesen werden konnte. Insofern erscheint die Anwendung dieser Verfahren nicht geeignet für den Nachweis der Abhängigkeit der thermischen Eigenschaften von Materialien bei eingelagertem Wasser.

Im Anhang sind die Basisdaten für die Zustände „trocken“ und „nass“ der jeweiligen Materialprobe der Probenart 1 für eine detailliertere Betrachtung zusammengestellt.

6 Untersuchung konfektionierter Feuerwehr-Schutzkleidung

Die Untersuchung der konfektionierten Feuerwehr-Schutzkleidung ist insoweit sehr interessant, als sich die Frage stellt, ob der geringe Nässeinfluss auf das Verhalten der Materialproben sich auch unter praxisnahen Testbedingungen der Wärmebelastung wieder finden lässt. Dies gilt um so mehr, als bisherige Erfahrungen deutliche Unterschiede im thermischen Verhalten belegen. Die beiden unterschiedlichen Belastungsarten von Dummies sind hierbei besonders bedeutungsvoll, weil sie sich stark durch die Art und Menge der aufgetragenen Energie unterscheiden. Nach den Ergebnissen der Materialuntersuchungen sollte der „Nässeffekt“ eher bei der Wärmestrahlung erkennbar sein.

6.1 Verfahren Wärmestrahlungstest

Die Untersuchungen wurden nach dem im Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Prüfverfahren "Wärmestrahlungstest" durchgeführt. Untersucht wurden insgesamt 4 Feuerwehrüberjacken gleichen Materials. Davon kamen jeweils 2 neue Jacken für die Untersuchung im trockenen Zustand und 2 neue Jacken für die Untersuchung im nassen Zustand zur Anwendung. Die Untersuchungsdauer betrug für alle Jacken jeweils 15 *min*. Der Zustand "nass" wurde durch Beregnung über einen Zeitraum von 300 s auf einem Drehtisch gemäß Abschnitt 3.3 realisiert. Anschließend erfolgte über eine Zeit von 120 s ein Abtropfen des überschüssigen Wassers, worauf nach nochmaligem, kräftigem dreimaligen Ausschütteln die Probenaufbereitung abgeschlossen wurde.

6.1.1 Auswahl der Feuerwehr-Schutzkleidung

Ausgewählt wurden die nach [HuPF 96] geprüften Feuerwehrüberjacken mit folgendem Materialaufbau:

- ◆ Nomex Delta TA
- ◆ 195 g/m^2
- ◆ Sympatex Fireliner P84/P84-Viskose FR

- ◆ versteppt
- ◆ ohne Zusatzausstattung.

Der Materialaufbau der Feuerwehrüberjacken ist identisch mit dem Aufbau der Materialproben der Probenart 1 nach Tabelle 5.1. Tabelle 6.1 weist das Gewicht der Überjacken im trockenen und nassen Zustand aus.

Das dreimalige kräftige Ausschütteln der Überjacken erfolgt jeweils unmittelbar vor der Wärmebelastung. Die Thermoelemente wurden vor Beginn einer Messung kalibriert. In Tabelle 6.2 sind die Kurzbezeichnungen und die Positionierung der Thermoelemente sowie die Anordnung des Radiometers zusammengestellt.

Tabelle 6.1: Gewicht der Überjacken im trockenen und nassen Zustand

Materialaufbau der Überjacken					
Nomex Delta TA, 195 g/m ² , Sympatex Fireliner P84/P84 / Viskose FR, versteppt, ohne Zusatzausstattung					
Zustand der Überjacke		Gewicht der Überjacke in g			
		Überjacke 1	Überjacke 2	Überjacke 3	Überjacke 4
trocken	Ausgangszustand (1)	2425	2470	2420	2445
	Zustand nach Bestrahlung (2)	2410	2445	-	-
	Differenz (2) - (1)	-15	-25	-	-
nass	Zustand nach Beregnungsdauer 300 s und Abtropfdauer 120 s (3)	-	-	2750	2810
	Differenz (3)-(1)	-	-	330	365
	Zustand nach 3 x Schütteln (4)	-	-	2685	2760
	Differenz (4)-(1)	-	-	265	315
	Zustand nach Bestrahlung (5)	-	-	2550	2620
	Differenz (5)-(1)	-	-	130	175

Tabelle 6.2: Anordnung der Messstellen

Messstellen		Über- jacke 1	Über- jacke 2	Über- jacke 3	Über- jacke 4		
Thermoelemente zur Temperatur- messung	Nr.	Position		Kalibriernummer			
	1	Jacke, Brust links-außen		TE 001	TE 007	TE 013	TE 019
	2	Jacke, Brust links-innen		TE 002	TE 008	TE 014	TE 020
	3	Jacke, Brust Mitte-außen		TE 003	TE 009	TE 015	TE 021
	4	Jacke, Brust Mitte-innen		TE 004	TE 010	TE 016	TE 022
	5	Jacke, Brust rechts-außen		TE 005	TE 011	TE 017	TE 023
	6	Jacke, Brust rechts-innen		TE 006	TE 012	TE 018	TE 024
Radiometer zur Messung der Wärmestrahlung	1	auf der Symmetrieachse des Dummys, 1380 mm über der Standfläche des Dummys		Radiometer-Gerätenummer: 97802 (Die Radiometerspannung von 0.45 mV entspricht 0.1 W / cm ² .); Abstand des Radiometers zur Wärmestrahlerwand: 3270 mm			

6.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen

Die gemessenen Temperaturverläufe beim Wärmestrahlungstest sind für die einzelnen Messstellen in den Bildern 6.1 und 6.2 für die trockenen Feuerwehrüberjacken (Bezeichnung: 1 und 2) und in den Bildern 6.3 und 6.4 für die nassen Feuerwehrüberjacken (Bezeichnung: 3 und 4) dargestellt.

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Nässe der Feuerwehrüberjacken gegenüber deren trockenem Zustand erfolgte eine Gegenüberstellung der Messwerte an den Messstellen zum Zeitpunkt des Abbruches der Messungen in der 13. Minute, da hier die Differenz der Temperaturmesswerte im untersuchten Bereich zwischen den einzelnen Messstellen am größten ist.

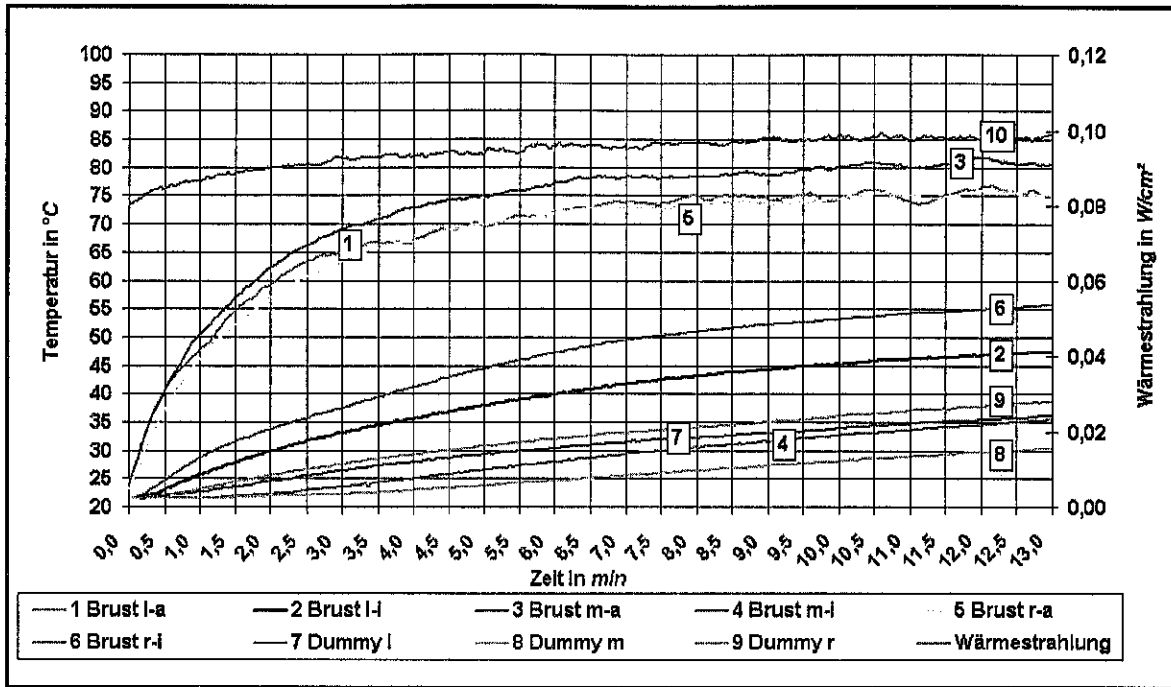


Bild 6.1: Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der trockenen Feuerwehrüberjacke 1

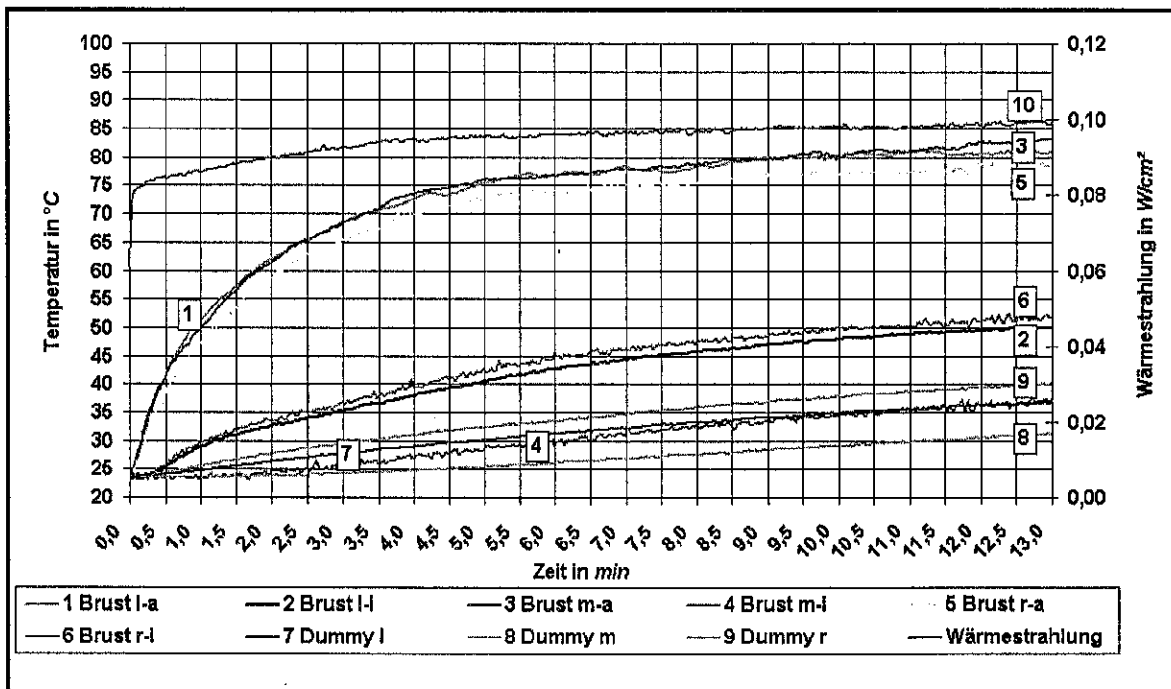


Bild 6.2: Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der trockenen Feuerwehrüberjacke 2

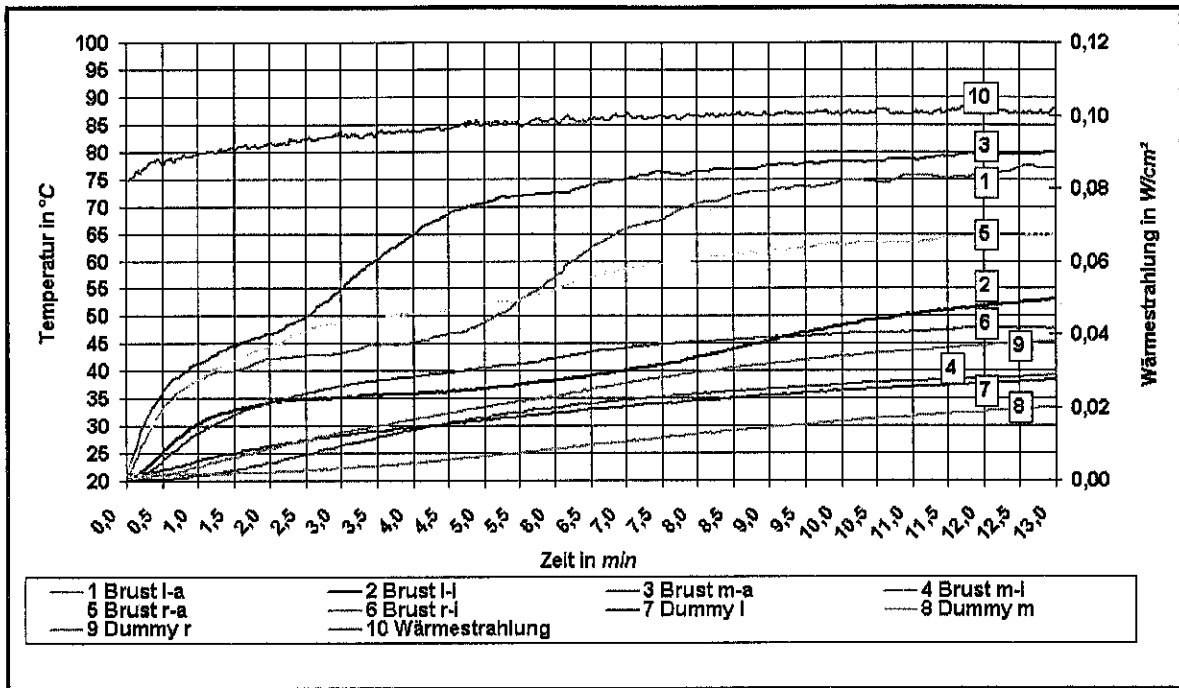


Bild 6.3: Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der nassen Feuerwehrüberjacke 3

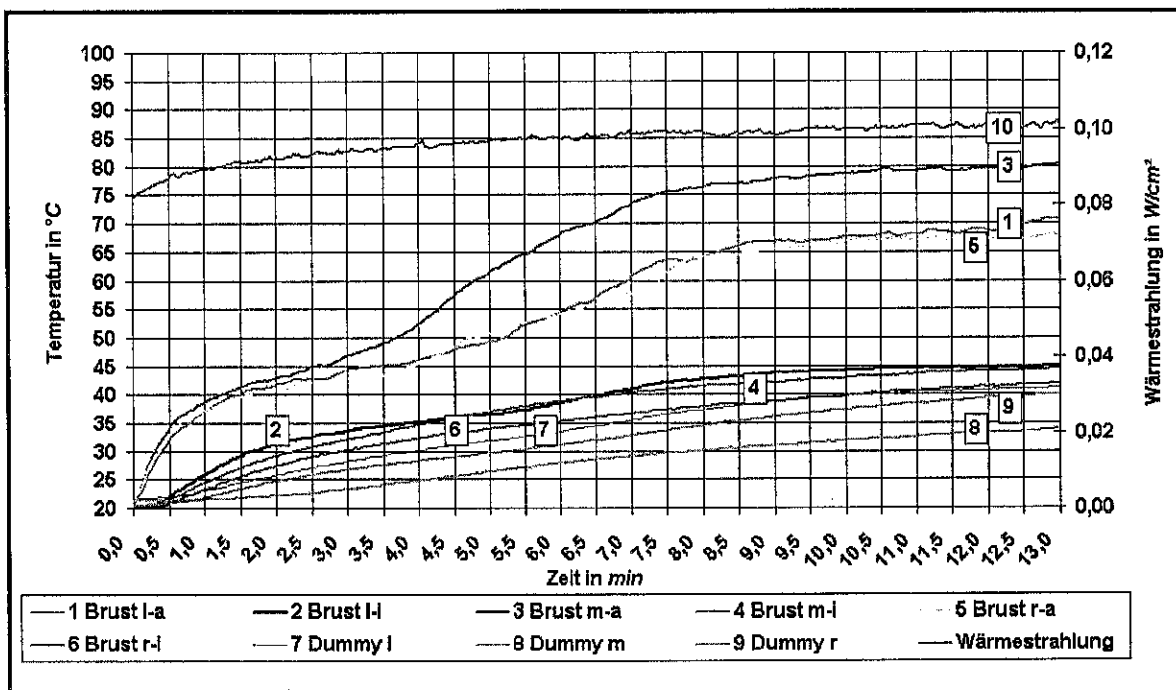


Bild 6.4: Wärmestrahlungstest – Temperaturmesswerte an den Messstellen der nassen Feuerwehrüberjacke 4

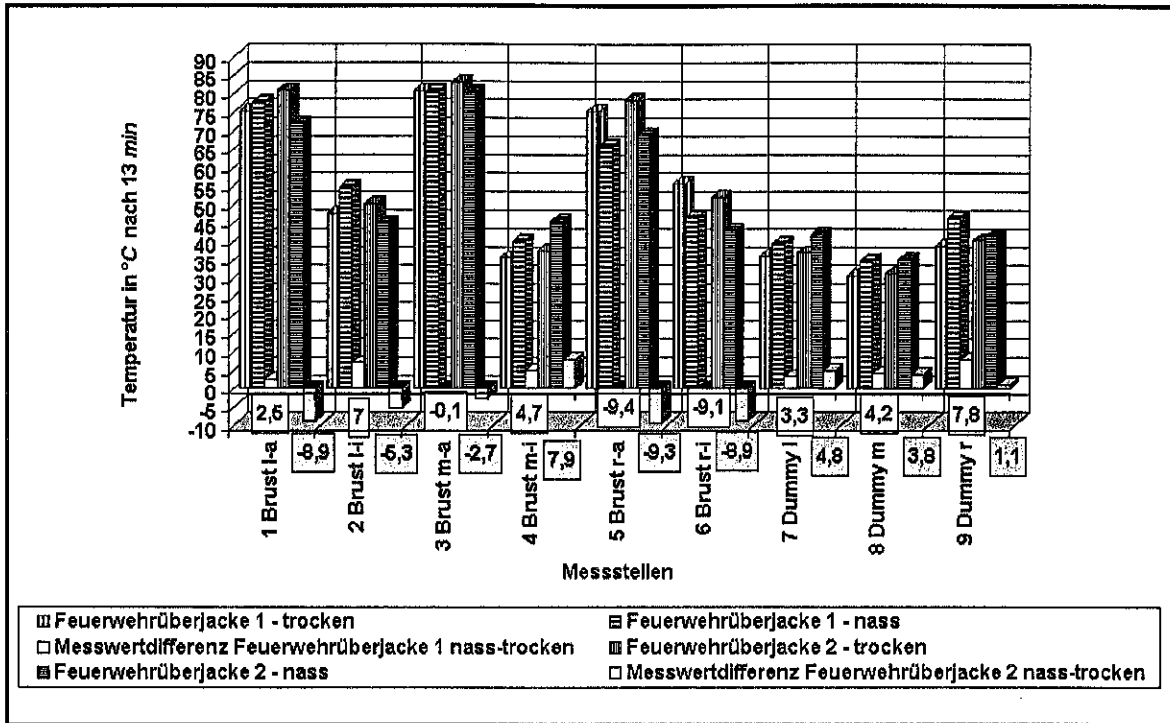


Bild 6.5: Temperaturmesswerte nach 13 min bei einer Wärmestrahlung von 0.1 W/cm^2

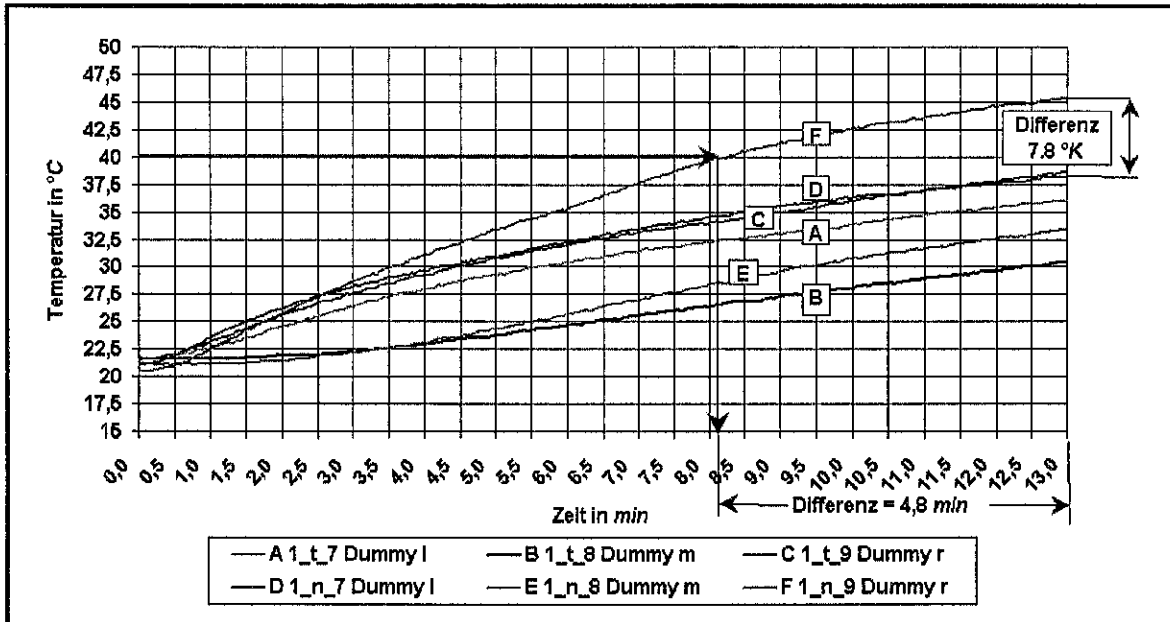


Bild 6.6: Vergleich der Temperaturen an den Messstellen bei trockener Überjacke 1 und nasser Überjacke 3

Die Auswertung dieser Gegenüberstellung wird in Bild 6.5 grafisch dargestellt. Ausgewiesen werden hier zusätzlich die Differenzen der Temperaturmesswerte zwischen den Zuständen "nass" und "trocken" der jeweiligen Überjacken, da diese

den Einfluss der Auswirkungen der Nässe auf das thermische Verhalten der Überjacken am besten widerspiegeln.

Zunächst ist festzustellen, dass bei nasser Feuerwehrüberjacke die Temperaturen auf der Dummykörperoberfläche höher ausfallen als dies beim Tragen einer trockenen Überjacke der Fall wäre. Abhängig vom Ort der Messstelle auf dem Dummy liegen die Temperaturdifferenzen zwischen "nass" und "trocken" im Bereich von 3.3 K bis 7.8 K. Für einen physiologisch relevanten, d. h. bedenklichen Wert der Oberflächentemperatur des menschlichen Körpers von ca. 40 °C (43 °C nach [Pasch 96]) würde dies bezogen auf den Extremfall (7.8 K Temperaturdifferenz, vgl. Bild 6.6) bedeuten, dass eine Einsatzkraft mit nasser Überjacke sich statt ca. 13 *min* nur ca. 8 *min* im Einsatz befinden dürfte.

Natürlich sind in diesem Zusammenhang Einsatzdauer und physiologische Grenztemperatur nur grobe Richtwerte, die allerdings aus medizinischer und feuerwehrtaktischer Sicht vernünftig sind. So berücksichtigen sie unter anderem Überlegungen zum Atemluftvorrat und zur Handlungsfähigkeit unter Einsatzbedingungen. Diese Werte unterliegen naturgemäß Schwankungen. So sind Einsätze selbstverständlich niemals durch die höchste thermische Belastung über die gesamte Einsatzzeit gekennzeichnet. Ungeachtet dessen bleibt der Fakt, dass sich die Einsatzzeit deutlich verkürzt, im dargestellten Beispiel auf immerhin 62 %. Dies muss offensichtlich bei der Einsatztaktik berücksichtigt werden.

Die Messungen weisen also ziemlich eindeutig eine Abhängigkeit des thermischen Verhaltens der Feuerwehr-Schutzkleidung vom Nässegrad der Kleidung in Richtung eines für den Feuerwehrmann ungünstigeren Verhaltens aus. Sie bestätigen damit die oben geäußerte Vermutung, dass sich die Auswirkungen der Nässe vor allem bei der Wärmestrahlungsbelastung zeigen werden.

Bild 6.5 zeigt jedoch bei Betrachtung der Messwerte an anderen Messstellen auch, dass hier die Verhältnisse nicht so eindeutig sind wie im vorgenannten Beispiel. Es sind sogar gegensätzliche Tendenzen erkennbar. In der Regel sind die an den Überjacken außen gemessenen Temperaturen im trockenen Zustand der Jacken höher als im nassen Zustand. Hier tritt offenbar durch Verdampfung der Feuchtigkeit auf der Oberfläche der nassen Überjacke ein gewisser Kühleffekt auf. Eine Ausnahme hierbei bildet die Überjacke 1 an der Messstelle Brust I-a (links-außen).

Betrachtet man die Temperaturen an den Messstellen auf den Innenseiten der Überjacken, so ist auch hier erkennbar, dass die der trockenen Jacken in der Regel höher liegen. Ausnahmen bilden hier die Messstellen Brust m-i (Mitte-innen) der Überjacken 1 und 2 und die Messstelle Brust l-i (links-innen) der Überjacke 1.

Offenbar besteht bezüglich der gemessenen Temperaturen auf den Innenseiten der Überjacken ein direkter Zusammenhang zu denjenigen auf der Außenseite. Die Temperaturen auf der Innenseite sind natürlich wesentlich geringer als auf der Außenseite, was auf die Wärmedämmung durch das Material zurückzuführen ist. Zudem ist der Umstand zu berücksichtigen, dass die nassen Überjacken nur bis zur Nässesperre (Membrane) durchfeuchtet werden, was ja den Sinn der Nässesperre ausmacht. In diesem Bereich ist die Wärmeleitung also besser. Die Materialschichten nach der Nässesperre sind zum Körper hin aber wieder trocken und leiten demzufolge, wie bereits bei den Materialuntersuchungen nachgewiesen, die Wärme schlechter.

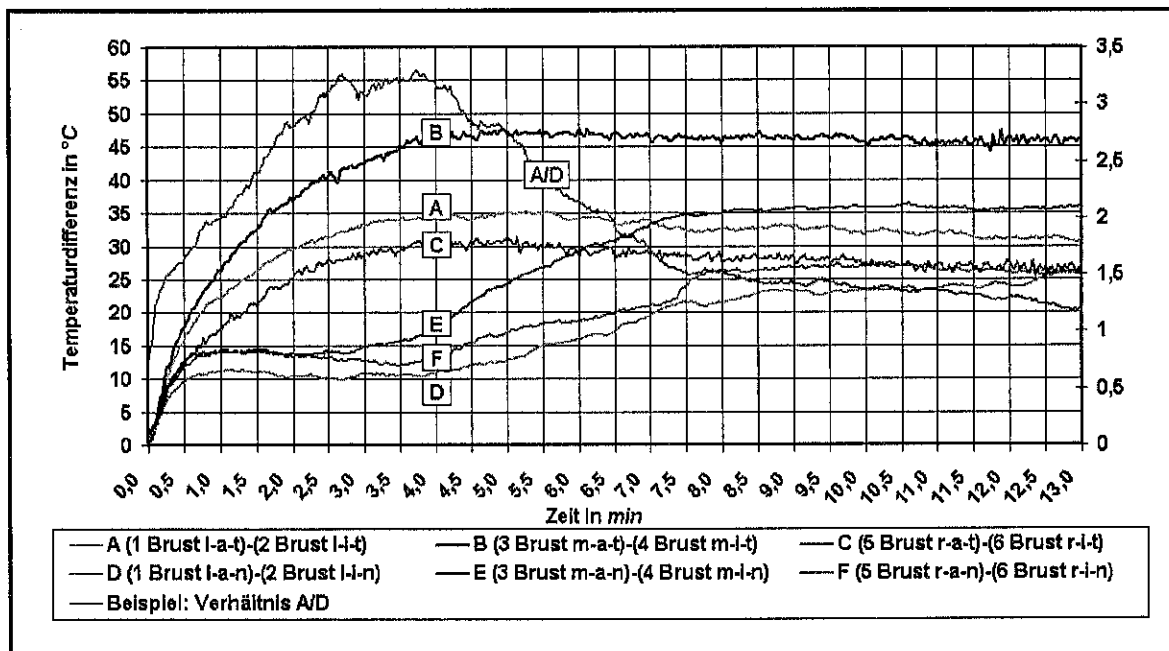


Bild 6.7: Gegenüberstellung der Temperaturdifferenzen für die Überjacke 2

Am Beispiel der Überjacke 2 werden im Bild 6.7 die Temperaturdifferenzen zwischen den Messwerten der außen- und der innenliegenden Messstellen im Zustand "trocken" und "nass" der Überjacken grafisch dargestellt. Hier zeigt sich, dass für den nassen Zustand die Temperaturdifferenzen im Bereich bis ca. 5 min wesentlich unter denen bei der trockenen Jacke liegen. Das ist ein Beleg für die bessere Wärmeleitfähigkeit der nassen gegenüber einer trockenen Überjacke.

Das ebenfalls im Bild 6.7 dargestellte Beispiel des Quotienten aus den Werten der Kurven A und D

$$\frac{A}{D} := \frac{T_{Brust\ i-a-t} - T_{Brust\ i-i-t}}{T_{Brust\ i-a-n} - T_{Brust\ i-i-n}} = \frac{T_{Messstelle\ 1-trocken} - T_{Messstelle\ 2-trocken}}{T_{Messstelle\ 1-nass} - T_{Messstelle\ 2-nass}}$$

zeigt, um welchen Faktor punktuell die Wärmeleitfähigkeit einer nassen gegenüber einer trockenen Überjacke an den Messstellen gleicher Position höher ist. Das Reziproke dieses Faktors (D/A) kann als „thermischer Schutzgrad“ interpretiert werden. Bezogen auf das Maximum der Kurve A/D lässt sich die Aussage treffen, dass die thermische Schutzwirkung einer Feuerwehr-Schutzkleidung bei der konkret erzeugten Nässe auf ca. 1/3 der für trockene Kleidung zu veranschlagenden Schutzwirkung abfällt.

Diese Aussage stimmt mit den Vermutungen aus den Materialuntersuchungen überein. Die Kurve A/D mit ihrem ausgeprägten Maximum im Bild 6.7 zeigt aber auch, dass der Effekt für größere Zeiten verschwindet. Die Ursache ist offensichtlich, dass das Wasser dann wieder aus dem Gewebe entfernt ist.

Insgesamt ermöglichen die Wärmestrahlungsuntersuchungen an konfektionierter Feuerwehr-Schutzkleidung folgende Aussagen:

- ◆ Der thermische Effekt durch den Nässeinfluss ist nur in den ersten ca. 5 min bedeutsam.
- ◆ Die Schutzwirkung der Kleidung verschlechtert sich auf maximal ca. 30 % bei einer Wärmestrahlungsbelastung, die für Feuerwehreinsätze im Brandfall typisch ist.

6.2 Verfahren Thermo Man®

Zur Anwendung gelangte das im Abschnitt 4.2.2 beschriebene Verfahren. Die Untersuchungen wurden bei der Firma DuPont in Genf durchgeführt. Insgesamt wurden drei Jackentypen, jeweils im Zustand „trocken“ und „nass“ untersucht. Da der Charakter der Versuchsdurchführung zu einer Zerstörung der Jacken führt, sind die vergleichenden Untersuchungen trocken/nass mit jeweils einer neuen Jacke derselben Art auszuführen. Auf die an sich wünschenswerte Mittelwertbildung durch

mehrfache Wiederholung wurde aus Kostenüberlegungen verzichtet, da die Versuche nicht zuletzt durch die Zerstörung der Prüfjacken teuer werden.

6.2.1 Auswahl der Feuerwehr-Schutzkleidung

Für die Untersuchungen wurden die in Tabelle 6.3 ausgewiesenen drei Arten von Feuerwehrüberjacken verwendet. Bei allen Jacken besteht der Oberstoff aus Nomex Delta TA, während der andere Materialaufbau variiert. Mit dieser Auswahl sollte gleichzeitig das Verhalten der Feuerwehrüberjacken bei gleichem Oberstoff aber ansonsten unterschiedlichem Lagenaufbau untersucht werden. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass bei gleichem Oberstoff dessen Wasseraufnahmefähigkeit bei allen drei Feuerwehrüberjacken gleich ist.

Tabelle 6.3: Feuerwehrüberjacken für Thermo Man®-Untersuchungen

Materiallage	Feuerwehrüberjacke		
	1	2	3
Oberstoff	Nomex Delta TA, FC-Ausrüstung, 195 g/m ²	Nomex Delta TA, 195 g/m ²	Nomex Delta TA, 93 % Nomex, 5 % Kevlar, 2 % P140 Antistatikfaser, 195 g/m ²
Farbe des Oberstoffes	dunkelblau	dunkelblau	dunkelblau
Nässesperre	Sympatex 181-11	Gore-Tex moisture barrier E89	Gore-Tex moisture barrier E89
Isolationslage	P84 Filz	Aramid-Vlies, 200 g/m ²	P84 Filz
Innenfutter	P84 / Viskose FR Gewebe, 320 g/m ²	50 % Nomex, 50 % Viskose FR Gewebe, 135 g/m ²	P84/Viskose FR Gewebe

Zum Einsatz gelangten jeweils zwei der in Tabelle 6.3 aufgeführten Feuerwehrüberjacken. Davon wurde immer eine Jacke im trockenen Zustand und eine Jacke im nassen Zustand der Prüfung unterzogen. Die Überjacken wurden nach dem im Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Verfahren definiert benässt, d. h. durch

Beregnung, Abtropfen und Ausschütteln. Zur Identifizierung der Jacken und ihres Zustandes wurden die in Tabelle 6.4 zusammengestellte Bezeichnung benutzt.

Tabelle 6.4: Jackenkennzeichnung für Thermo Man[®]-Untersuchungen

Feuerwehrüberjacke	Zustand	Kurzbezeichnung
1	trocken	1.1
1	nass	1.2
2	trocken	2.1
2	nass	2.2
3	trocken	3.1
3	nass	3.2

6.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen

Zunächst erfolgte die Auswertung der Thermo Man[®]-Untersuchungen durch den firmeneigenen Auswertemodus. Danach haben alle 6 untersuchten Feuerwehrüberjacken den Test bestanden, was bedeutet, dass das Versagenskriterium der Jacken in keinem Fall erreicht wurde [HuPF 96]. Damit geht das Untersuchungsergebnis konform mit dem Prüfergebnis im Zuge des Zulassungsverfahrens dieser Jacken nach [HuPF 96]. Die auch in tabellarischer Form vorliegenden Auswerteergebnisse wurden nunmehr weiter hinsichtlich des Auftretens möglicher Unterschiede zwischen den Messergebnissen der trockenen und der nassen Jacken analysiert, wobei zunächst der direkte Vergleich zwischen den beiden Zuständen des gleichen Jackentyps geführt wurde.

Der Auswertung gingen Betrachtungen zu Fragen der Reproduzierbarkeit des Thermo Man[®]-Verfahrens voraus. Grundlage dafür bildeten die bei allen durchgeführten 6 Untersuchungen am ungeschützten Kopf des Thermo Man[®]-Dummys ermittelten Durchschnittswerte der Wärmestromdichte. Einbezogen in diese Betrachtungen wurden die sich am Kopf befindenden 8 Messstellen 11, 12, 13, 14, 25, 26, 27 und 28 (Bild 6.8). Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass die genannten Messstellen keinerlei Berücksichtigung im Rahmen der Anwendung und Auswertung des regulären Verfahrens finden, da sie ungeschützt sind. (Die verfahrenseigene Kalibrierung der Messstellen am Dummy erfolgt vor jeder Prüfung an dessen ungeschütztem Gesamtkörper.) Wegen der Unabhängigkeit von irgendwelchen Jackenmaterialien und deren Zuständen

(„trocken“ oder „nass“) sind diese Messstellen prädestiniert für Betrachtungen zur Reproduzierbarkeit der Untersuchungen.

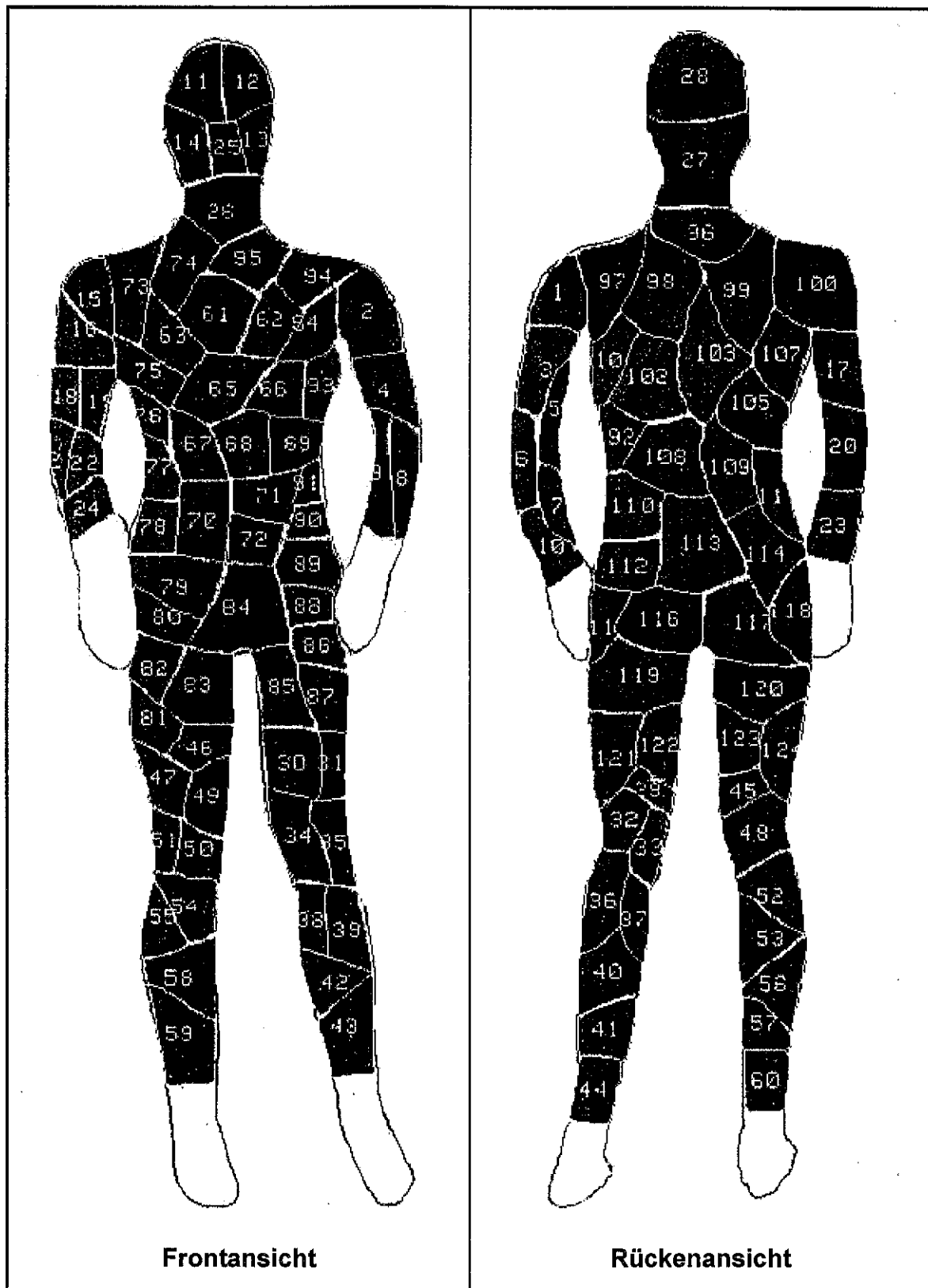


Bild 6.8: Messflächen am Thermo Man®

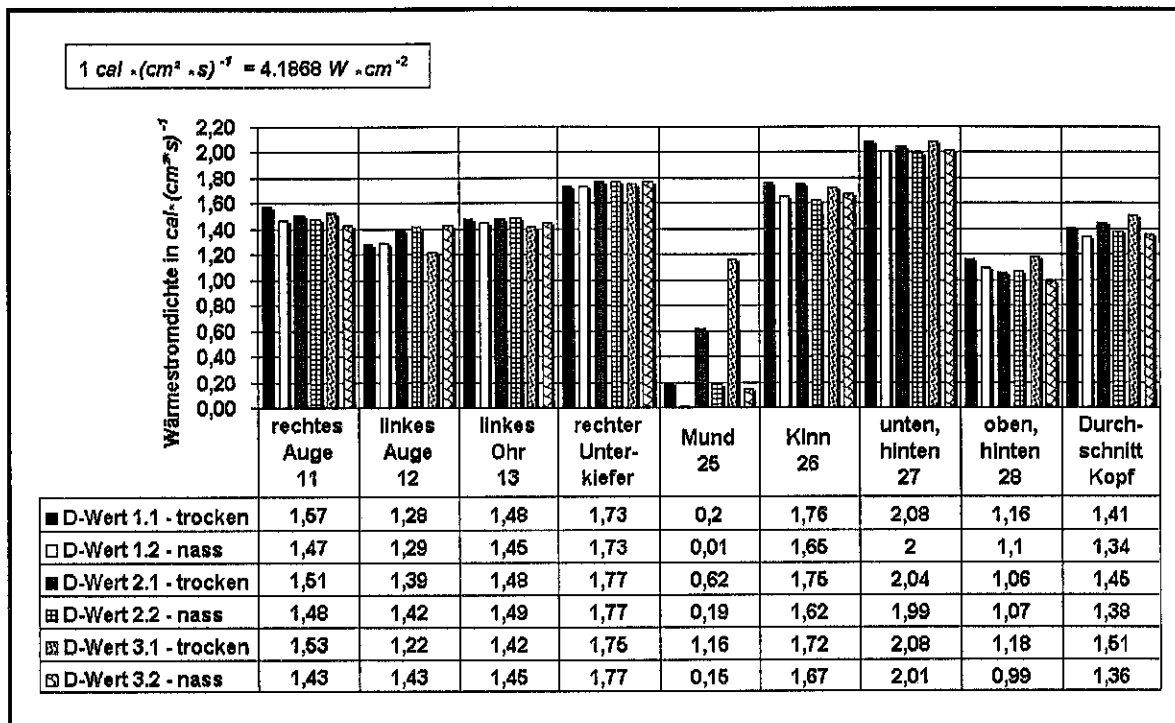


Bild 6.9: Durchschnittswerte am Kopf zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit

Die Untersuchungsergebnisse sind grafisch im Bild 6.9 dargestellt. Bezogen auf die jeweilige Messstelle wurde, mit Ausnahme der Messstelle 25 (Position Mund), eine weitgehende Reproduzierbarkeit des Verfahrens nachgewiesen, d. h. die Messergebnisse an den einzelnen Messstellen waren bei jeder der 6 vorgenommenen Untersuchungen annähernd gleich.

Ein Vergleich der Messstelle untereinander lässt die Aussage zu, dass die thermischen Beanspruchungen der einzelnen Kopfpartien des Dummys erheblich voneinander abweichen. Es liegt deshalb die Vermutung nahe, dass analoge Verhältnisse, d. h. differenzierte thermische Beanspruchungen, auch für die übrigen Körperteile der Versuchspuppe zu verzeichnen sein werden. Diese Tatsache ist in Hinblick auf die Frage der Reproduzierbarkeit der Parameter jedoch nicht schädlich. Sie stört auch die nachfolgenden Betrachtungen zum Vergleich der Messwerte der einzelnen Messstellen an den trockenen sowie nassen Feuerwehrüberjacken insofern nicht, da auch durch die Zusammenfassung über eine Prozentbildung bezogen auf die Gesamtfläche eine Art Mittelung vollzogen wird. Andererseits kann davon ausgegangen werden, dass die Bedingungen für die einzelnen Flächen von Versuch zu Versuch annähernd gleich sind.

Die Ergebnisse der diesbezüglichen Messungen sind in den Bildern 6.10 bis 6.12 zusammengestellt. Insgesamt wird hier der direkte Vergleich von insgesamt 70 der für die Untersuchungen relevanten Messstellen durchgeführt. Davon entfallen 28 Messstellen auf den durch die Feuerwehrüberjacke abgedeckten Frontbereich, 22 Messstellen auf den Rückenbereich und 20 Messstellen auf die Armbereiche des Dummys. Die gesamte Messstellenanzahl repräsentiert den Teil der Körperoberfläche, der durch die jeweilige Feuerwehrüberjacke voll abgedeckt wird.

Gegenübergestellt werden in den grafischen Darstellungen jeweils die Messergebnisse der trockenen und der nassen Feuerwehrüberjacke an den einzelnen Messstellen. Die jeweils zugeordnete Differenz dieser Messergebnisse („trocken“ minus „nass“) soll den Sachverhalt des Einflusses der Nässe auf die Veränderung der thermischen Eigenschaften und damit auf die thermische Schutzwirkung der Feuerwehrüberjacken verdeutlichen. Am deutlichsten sichtbar ist dieser Einfluss im Frontbereich der Feuerwehrüberjacke 1 (Bild 6.10).

Zusammenfassend ist eindeutig die Tendenz erkennbar, dass die Nässe in der Jacke zu einer Erhöhung des sich einstellenden Wärmestromes führt. Die Wärmeleitung der nassen Jacke ist also besser als die der trockenen, und somit wird die thermische Schutzwirkung der nassen Jacke bei äußerer thermischer Belastung durch direkte Flammeneinwirkung herabgesetzt.

Allerdings wird dieser Einfluss bei der Betrachtung der Messergebnisse an den Messstellen auf dem Rücken und an den Armen der Feuerwehrüberjacke 1 nicht so deutlich (Bild 6.10). Dies ist durch die bereits oben erwähnte Tatsache zu erklären, dass die thermische Beanspruchung auf der Körperoberfläche nicht gleichmäßig erfolgt, also nicht als homogen anzusehen ist. Schließlich sind die vorhandenen Temperaturgradienten ausschlaggebend für die sich einstellenden Wärmeflüsse. Da geringere äußere thermische Beanspruchungen geringere Temperaturdifferenzen (außen zu innen) nach sich ziehen, treten zwangsläufig auch geringere Wärmeströme auf.

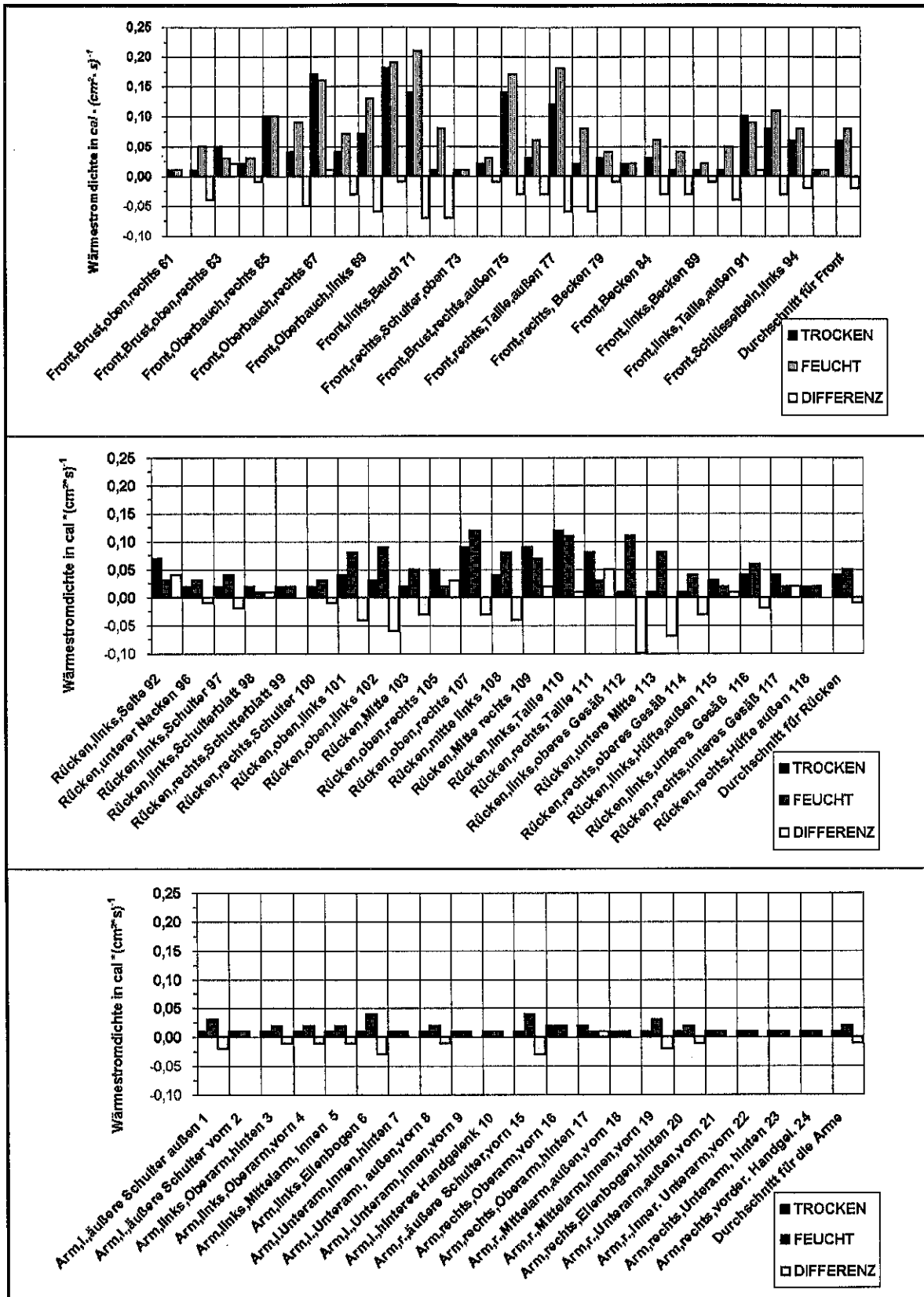


Bild 6.10: Thermo Man[®]-Untersuchungen der Feuerwehr-Überjacke 1 im Front-, Rücken- und Armbereich

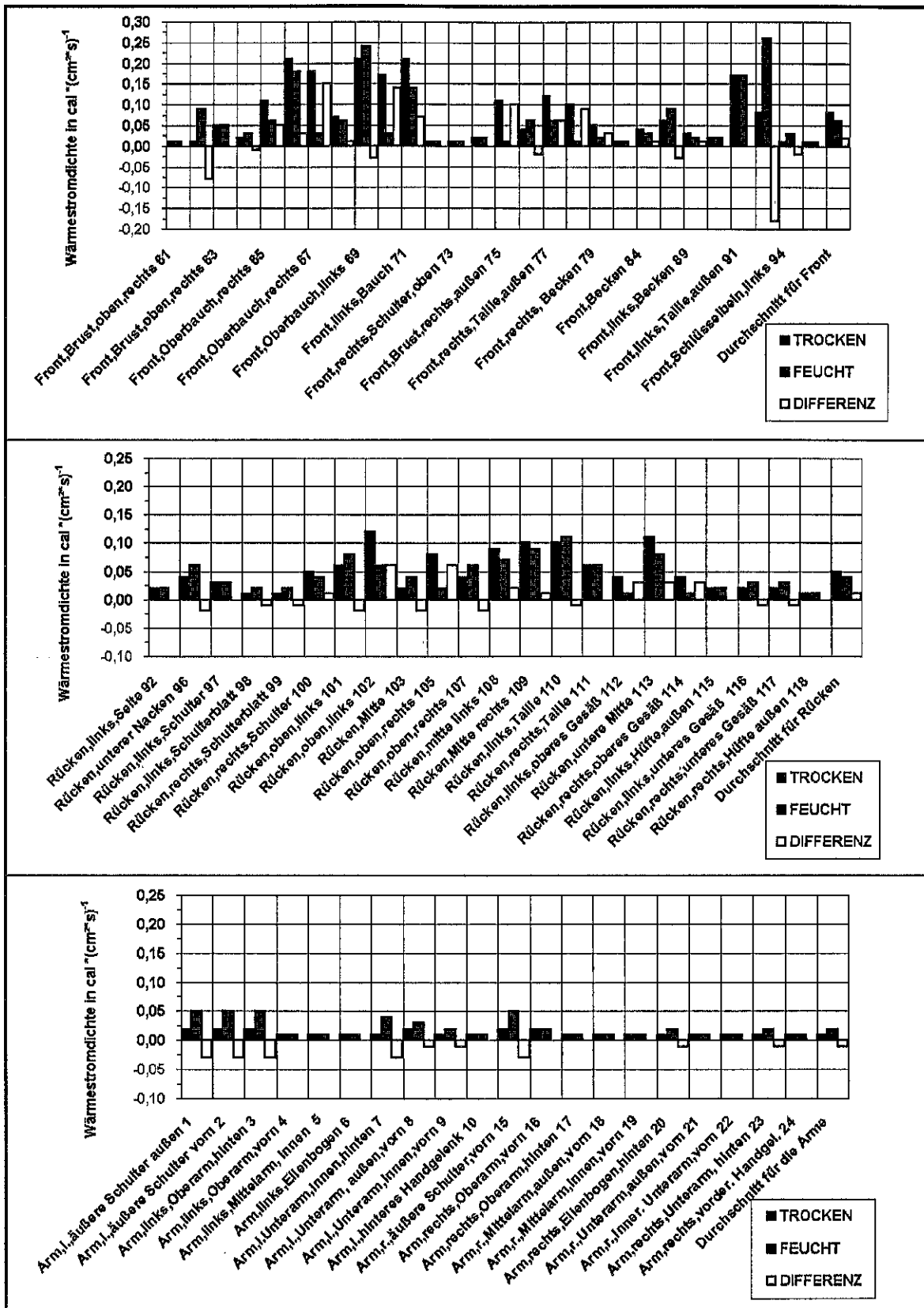


Bild 6.11: Thermo Man®-Untersuchungen der Feuerwehr-Überjacke 2 im Front-, Rücken- und Armbereich

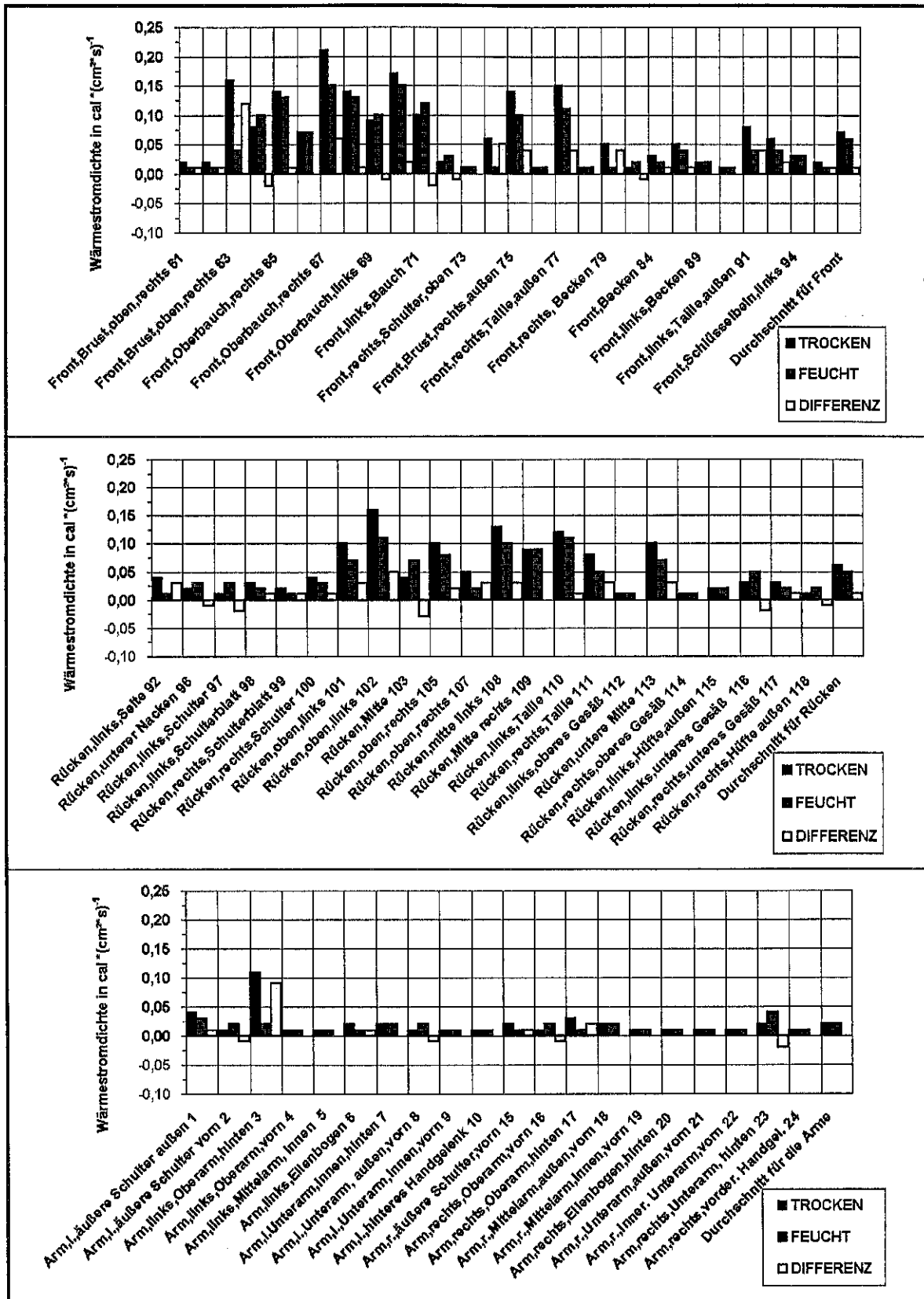


Bild 6.12: Thermo Man[®]-Untersuchungen der Feuerwehr-Überjacke 3 im Front-, Rücken- und Armbereich

Außerdem spielt auch der nicht zu unterschätzende "Sitz" der Jacke auf dem Dummy eine wichtige Rolle, der auch im Zusammenhang mit den Fertigungstoleranzen der Jacke, selbst bei gleicher Konfektionsgröße, zu sehen ist. Er kann aber auch infolge eines nicht ordnungsgemäßen oder gleichmäßigen Aufziehens der Jacke auf die Versuchspuppe schwanken. Dadurch kann der jeweilige "Sitz" der Jacke zum Spannen oder Entspannen der Materialschichten der Jacke führen, wodurch die einzelnen Lagen entweder dicht aufeinander liegen oder aber sich im entspannten Zustand Zwischenräume zwischen den einzelnen Materiallagen in Form von Luftschichten bilden können. Da diese Luftschichten schlechte Wärmeleiter sind, kann durch diese der jeweilige Messwert erheblich schwanken. Die vorgenannten allgemeinen Aussagen sind auch zutreffend in Bezug auf die Messergebnisse, die im Rahmen der Untersuchungen der Feuerwehrüberjacken 2 und 3 gewonnen wurden.

Im Bild 6.13 wird der Zustand der untersuchten Feuerwehrüberjacke 1 nach der Beflammung und differenziert nach den Zuständen "trocken" und "nass" frontseitig und rückseitig dargestellt. Es ist erkennbar, dass trotz herabgesetzter thermischer Schutzwirkung der nassen Jacke diese vom äußeren Erscheinungsbild her intakter erscheint als die trockene Jacke. Deutlich wird dies insbesondere durch den wesentlich besseren Zustand der Reflexstreifen auf der nassen Jacke gegenüber denen auf der trockenen. Wie bereits im Rahmen der Materialuntersuchungen festgestellt, hängt zumindest der bessere Zustand des Oberstoffes und der Reflexstreifen offenbar von der sich einstellenden Kühlwirkung bei der Verdampfung des sich auf der Oberfläche und im Oberstoff befindenden Wassers in Folge der thermischen Beanspruchung ab.

Aus den in den Bildern 6.11 und 6.12 dargestellten Untersuchungsergebnissen zu den Feuerwehrüberjacken 2 und 3 ist erkennbar, dass der Einfluss der Nässe auf das thermische Verhalten dieser Jacken in Bezug auf die Aussage einer dadurch bedingten besseren Wärmeleitfähigkeit sich nicht so gravierend darstellt wie bei der Überjacke 1. Es ist sogar festzustellen, dass sich an einigen Messstellen einerseits gar keine Unterschiede zeigen, andererseits offensichtlich sogar eine Verbesserung der thermischen Eigenschaften und damit der thermischen Schutzwirkung durch den Einfluss von Nässe zu verzeichnen ist.

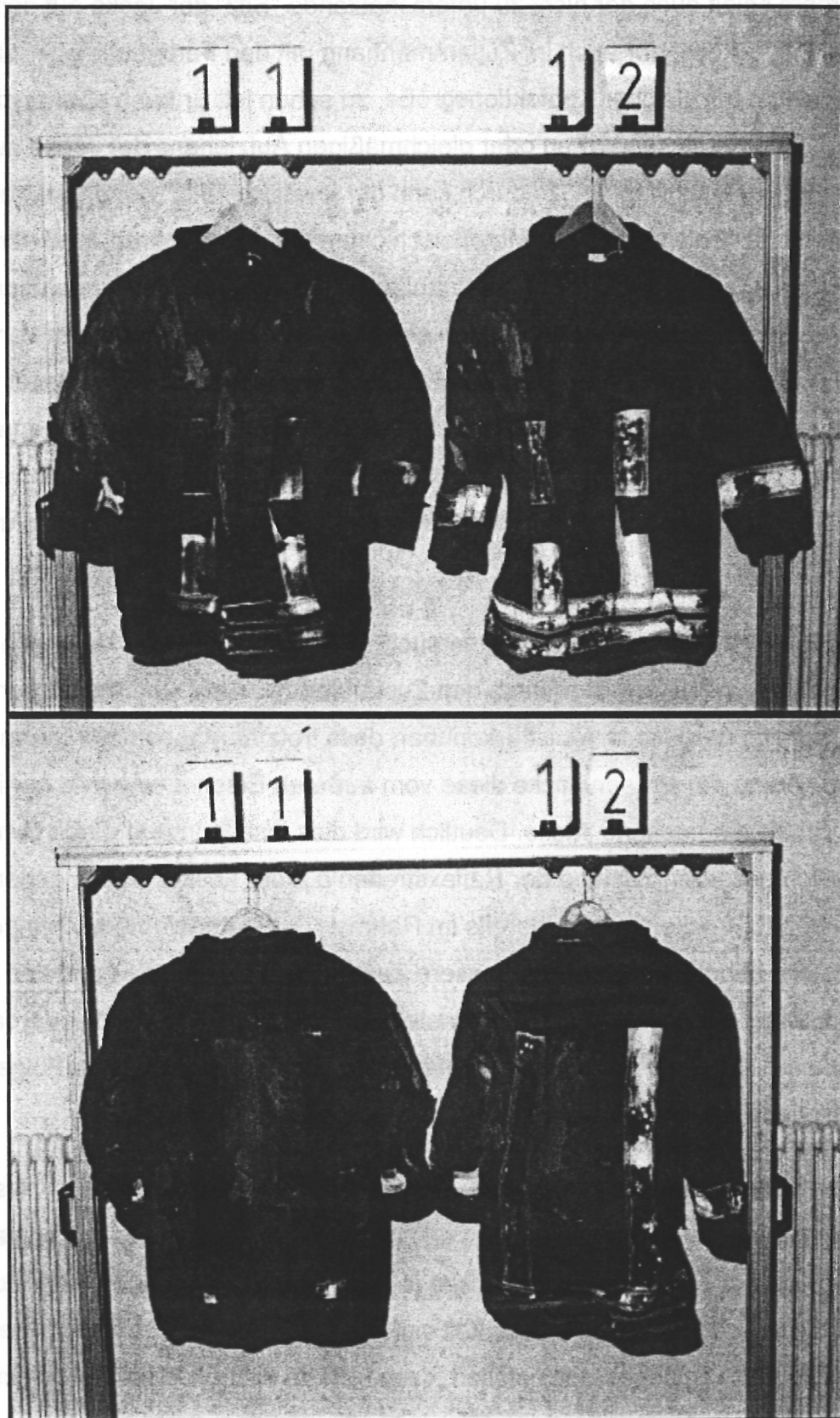


Bild 6.13: Front- und Rückseiten der Feuerwehrüberjacken 1 nach den Thermo Man[®]-Untersuchungen (11-trocken, 12-nass)

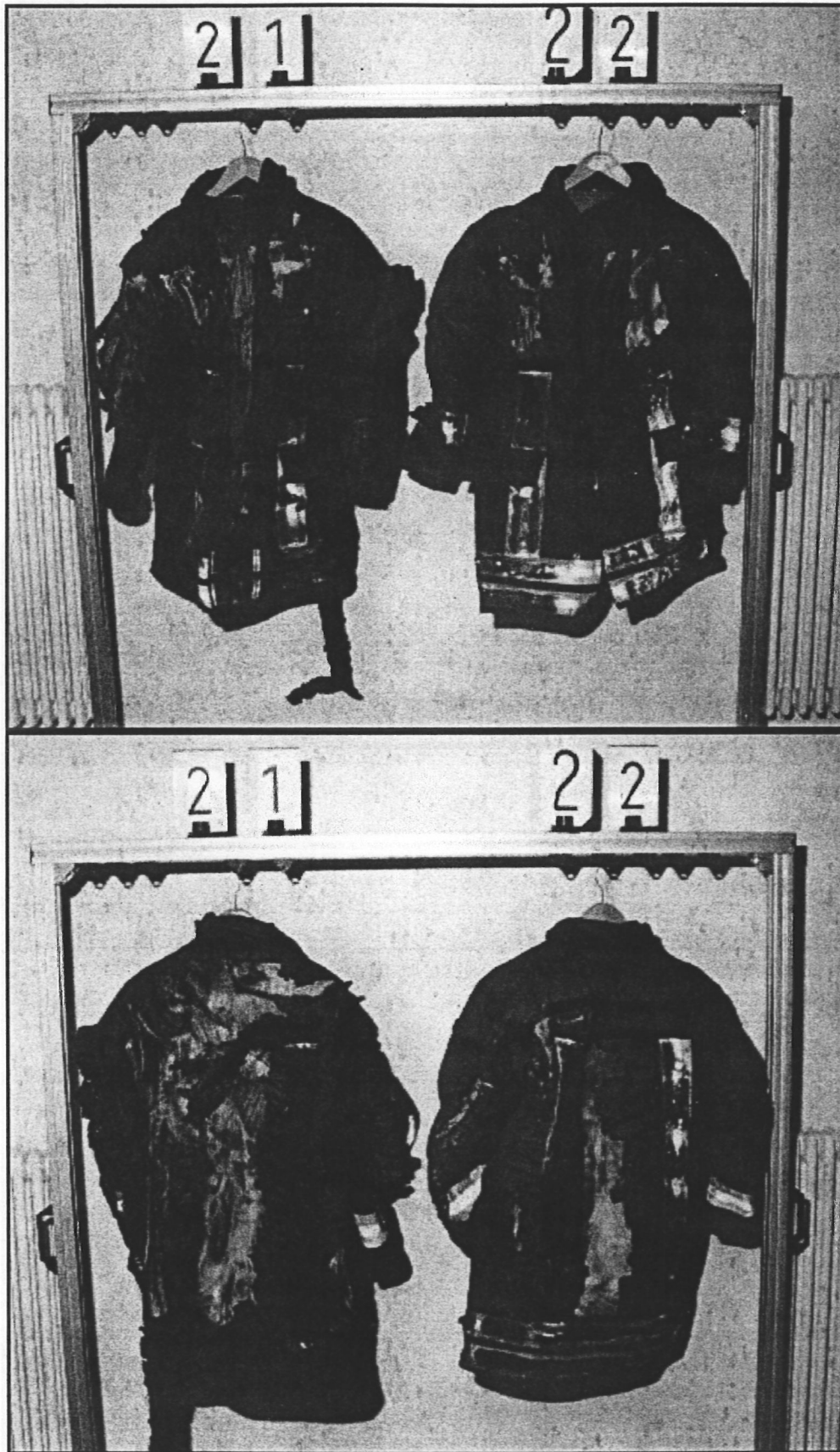


Bild 6.14: Front- und Rückseiten der Feuerwehrüberjacken 2 nach den Thermo Man[®]-Untersuchungen (21-trocken, 22-nass)

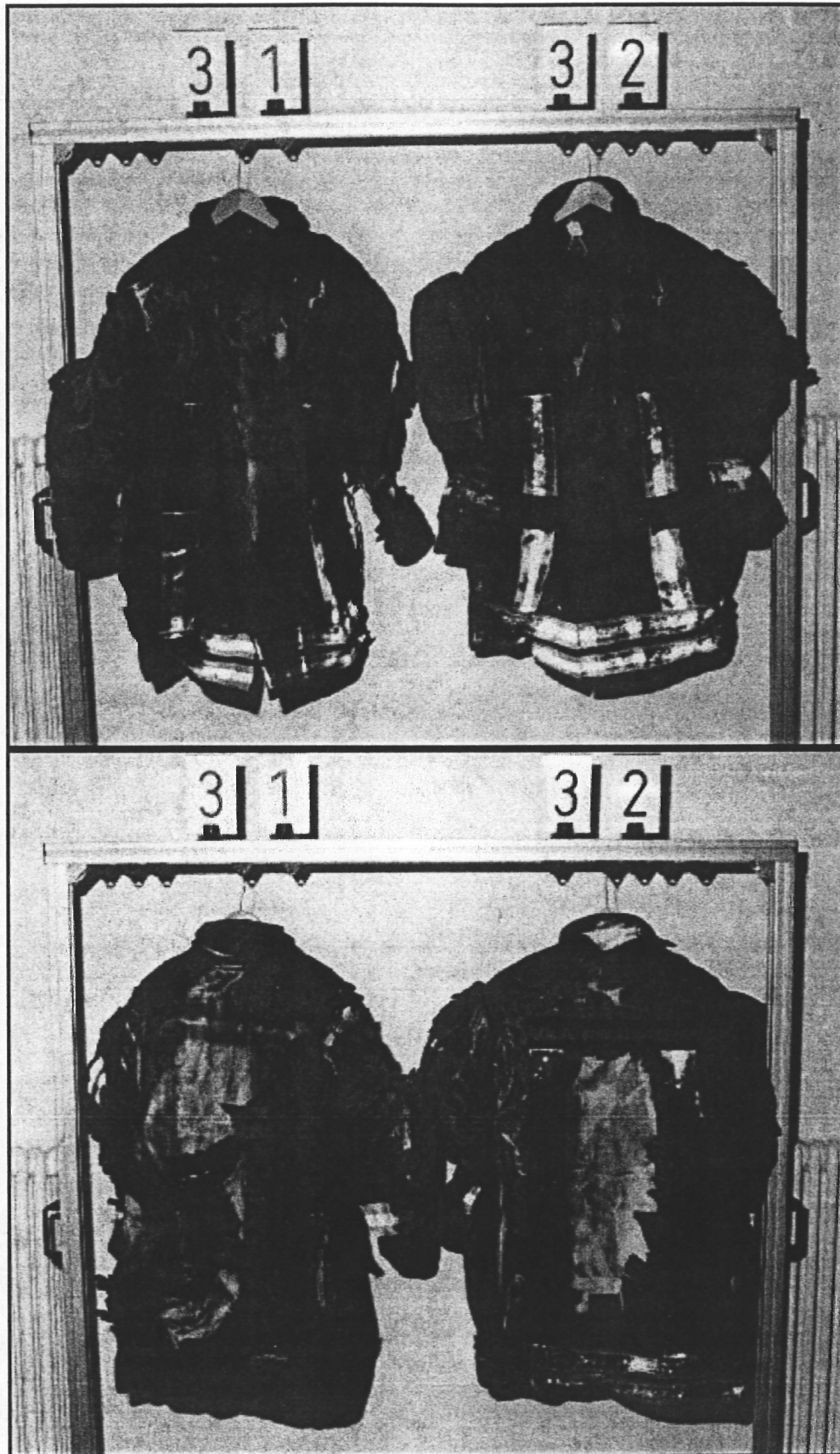


Bild 6.15: Front- und Rückseiten der Feuerwehrüberjacken 3 nach den Thermo Man[®]-Untersuchungen (31-trocken, 32-nass)

In den Bildern 6.14 und 6.15 werden die untersuchten Feuerwehrüberjacken 2 und 3 nach der Beflammung front- und rückseitig dargestellt. Es sind jeweils die Zustände "trocken" und "nass" ausgewiesen. Ähnliche Erscheinungen in Bezug auf den äußeren Zerstörungsgrad wie bei der Feuerwehrüberjacke 1 sind auch bei der Feuerwehrüberjacke 2 erkennbar. Insbesondere die Rückenansicht der Feuerwehrüberjacke 3 weist jedoch einen vergleichsweise höheren Grad der Schädigung gegenüber den Feuerwehrüberjacken 1 und 2 an gleicher Position auf.

Es ist aus den Messergebnissen nicht erkennbar, dass die Ursachen für die Abweichungen bei den einzelnen Untersuchungen ursächlich in der Verwendung verschiedenartiger Materiallagen bei den einbezogenen Feuerwehrüberjacken begründet liegen. Durch die Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren lassen sich keine eindeutigen Aussagen in Bezug auf die durch Nässe bedingten thermischen Veränderungen der Feuerwehr-Schutzkleidung bei der Anwendung des "Thermo Man[®]-Verfahrens" ableiten. Diese Erkenntnis stützt erneut die Vermutung, dass sich der Nässeinfluss bei thermischer Extrembelastung (Flashover) in der Regel nicht deutlich zeigen wird. Dies hängt mit dem starke Wärmeimpuls zusammen, der in kürzester Zeit zum Verdampfen des Wassers führt. Durch die starke Konvektion wird auch der Dampf abtransportiert und man hat für den größten Teil der Versuchsdauer quasi eine Jacke im trockenen Zustand.

Ungeachtet dessen lässt sich ein Effekt, wie das Beispiel der Versuchsjacken 1 zeigt, auch nicht sicher ausschließen. Deshalb muss bei der Beurteilung der Untersuchungsergebnisse aus einsatztaktischer Sicht dennoch von der Möglichkeit einer reduzierten Schutzwirkung ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass auch bei derartigen thermischen Extrembelastungen durch Nässe keine verbesserte Schutzwirkung auftritt, eher das Gegenteil erwartet werden muss. Um auf der sicheren Seite zu bleiben, sollte ein bewusstes Besprühen im Einsatz vermieden werden.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Seit nunmehr fünf Jahren ist die nach [HuPF 96] als universell deklarierte Feuerwehr-Schutzkleidung im größten Teil des Bundesgebietes im praktischen Einsatz. Damit besteht nunmehr die dringende Notwendigkeit, auf Fragen zur Lebensdauer der Kleidung, zur Erhaltung der erforderlichen Gebrauchseigenschaften und zu ihrem Trageverhalten Antwort geben zu können. Der mit der Einführung der neuen Feuerwehr-Schutzkleidung verbundene Einsatz von neuen Materialien und diversen Materialverbunden sowie die in diesem Zusammenhang erstmals zur Anwendung gelangte Nässesperre ließen ein völlig neues Verhalten der Kleidung gegenüber feuerwehreinsatzrelevanten Einflüssen erwarten, was sich zwangsläufig natürlich auch auf den die Feuerwehr-Schutzkleidung tragenden Feuerwehrmann in dieser oder jener Hinsicht auswirkt.

Ausgehend von aktuellen Diskussionen und in Auswertung von Fachliteratur mit zum Teil widersprüchlichen Aussagen wurde aus der Fülle untersuchungswürdiger Fragen das bedeutsame Problem des Einflusses von Nässe auf das thermische Verhalten von Feuerwehr-Schutzkleidung untersucht. Damit wurde ein Erkenntnisgewinn im Hinblick auf die Beeinflussung der thermischen Schutzwirkung der Kleidung unter diesen Bedingungen angestrebt.

Auf der Basis physikalisch-mathematischer Modelle zu diesem Problem erfolgte zunächst ein Nachweis der Relevanz des Einflusses als Grobabschätzung. Diese konnte im Ergebnis zwar das Auftreten gewisser Effekte und Tendenzen ausweisen, konkrete Schlussfolgerungen und Aussagen quantitativer Art in Bezug auf die zu erwartenden Auswirkungen ließ sie jedoch nicht zu. Zur Ableitung auch praktisch umsetzbarer Aussagen bestand deshalb das Erfordernis, umfassende experimentelle Untersuchungen zu zwei grundsätzlichen Fragestellungen durchzuführen:

- ◆ Sind entsprechende Effekte an Materialien und Materialverbunden, aus denen Feuerwehr-Schutzkleidung hergestellt wird, nachzuweisen?
- ◆ Wie verhält sich die konfektionierte Feuerwehr-Schutzkleidung bei thermischer Beanspruchung im trockenen und nassen Zustand? Die Notwendigkeit, derartige Untersuchungen durchzuführen, resultierte aus Erkenntnis- und Erfahrungswerten

hinsichtlich des veränderten Verhaltens von konfektionierter Kleidung gegenüber dem Verhalten von Materialproben bei thermischer Beanspruchung.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen kam ein ganzes Spektrum experimenteller Verfahren zur Anwendung. Es wurden für die Materialuntersuchungen ausschließlich Normverfahren eingesetzt, die für die Bewertung thermisch beanspruchter Materialien üblich sind. Bei den Untersuchungen konfektionierter Feuerwehr-Schutzkleidung gelangten zwei Dummy-Prüfverfahren zur Anwendung, welche die bei Brandeinsätzen der Feuerwehr relevanten thermischen Beanspruchungen durch Wärmestrahlung und Konvektion (bei direkter Beflammung) simulieren.

Zielstellung aller durchgeführten Untersuchungen war die Bewertung des Phänomens "Nässe" bei gleichzeitigem thermischen Einfluss. Zur Erzeugung definierter Nässezustände wurden sowohl für die Materialprobenaufbereitung als auch für die Konditionierung der Feuerwehr-Schutzkleidung entsprechende Beregnungsverfahren entwickelt und bei den Untersuchungen eingesetzt. Durch vergleichende Betrachtungen der Materialproben und der Feuerwehr-Schutzkleidung zwischen den jeweiligen Zuständen "trocken" und "nass" sollten Aussagen zum Einfluss der Nässe in Bezug auf die Veränderung der thermischen Eigenschaften der Untersuchungsobjekte abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der Materialuntersuchungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen. Insgesamt konnten bei den angewandten Verfahren keine besonders ausgeprägten Effekte durch die in den Materialproben enthaltene Nässe festgestellt werden. Lediglich bei der Anwendung des Kontaktwärmeproofverfahrens lagen im Ergebnis deutliche Aussagen derart vor, dass nässebedingt eine Verbesserung der Wärmeleiteigenschaften der Materialverbunde und damit eine Verschlechterung ihrer Schutzwirkung gegenüber thermischen Einflüssen auftritt. Dieser Effekt ist zusätzlich von der Kontakttemperatur abhängig. Ursachen für die bei diesem Verfahren gegenüber den anderen doch recht deutlichen Aussagen sind einerseits der hierbei relativ geringe Wärmeeintrag und andererseits die verfahrensbedingte Behinderung der freien Konvektion, verursacht durch das beidseitige Zusammenpressen der Materialproben.

Aus den Untersuchungen mit der konfektionierten Feuerwehr-Schutzkleidung lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse ableiten, die eine deutliche

Beeinflussung durch den Faktor „Nässe“ belegen. Bei extremer thermischer Belastung der Feuerwehr-Schutzkleidung, in der Praxis des Feuerwehreinsatzes gekennzeichnet durch direkte Stichflammeneinwirkung oder einen Flashover, ist der Einfluss von Nässe vernachlässigbar. Deutlichere Effekte waren feststellbar bei ausschließlicher thermischer Beaufschlagung der Kleidung mit Wärmestrahlung bei vergleichsweise geringerem Wärmeeintrag. Damit wird zugleich die These gestützt bzw. bestätigt, dass bei einer exakten Modellierung des thermischen Belastungsfalles von Mehrschichtensystemen neben der reinen Wärmeleitungsproblematik immer auch die Wärmestrahlung zu berücksichtigen ist. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Messergebnisse relativ großen Schwankungen bzw. Streuungen durch eine Vielzahl nicht oder nur wenig beeinflussbarer Faktoren unterliegen.

Einsatztaktisch führen die Untersuchungsergebnisse zu dem Schluss, dass, insgesamt gesehen, nasse Feuerwehr-Schutzkleidung aus thermischer Sicht deutlich ungünstiger ist. Es kann daher nicht empfohlen werden, sich bewusst der Nässe auszusetzen in der Annahme, man sei dadurch besser geschützt. Feststellbar ist in diesem Zusammenhang natürlich auch, dass je nach thermischer Belastungssituation der Effekt der Minderung der Schutzwirkung durch Nässe zum Teil nur kurzfristig auftritt. Durch hohe Energieeinträge verdampft das Wasser schnell, und es wird danach praktisch wieder der Zustand einer "trockenen Kleidung" mit deren thermischen Eigenschaften erreicht.

Obwohl aus den genannten Gründen im Regelfall nicht ständig und auch nicht an jeder Stelle der nassen Kleidung eine reduzierte Schutzwirkung vor thermischen Einflüssen auftreten wird, ist diese jedoch nicht generell auszuschließen. Da die Sicherheit der Feuerwehreinsatzkraft Priorität besitzt, sollte und muss der Effekt der Minderung der Schutzwirkung durch Nässe bei gleichzeitiger thermischer Beanspruchung im Rahmen von Einsätzen in gebührendem Maße Beachtung finden.

Unberücksichtigt blieb im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen die Problematik der durch Schweißbildung entstehenden Feuchtigkeit im Inneren der Feuerwehr-Schutzkleidung. Kritisch zu sehen ist hier sicherlich das Problem des schlagartigen Verdampfens bei einem Wärmedurchschlag. Ansonsten ist zu

vermuten, dass ähnliche thermische Effekte wie die oben geschilderten auftreten dürften.

Für die Praxis relevant und im Ergebnis der Untersuchungen als kritisch anzusehen, ist der Fall des Kontaktes einer Einsatzkraft bzw. ihrer Einsatzkleidung mit heißen Oberflächen. Bedingt durch die Behinderung der Konvektion wären dann nicht nur Verbrennungen durch den heißen Dampf möglich, sondern auch solche durch die verbesserten Wärmeleiteigenschaften der Kleidung und der damit einhergehenden Verminderung der Schutzwirkung.

Abschließend lässt sich feststellen, dass mit den vorliegenden Ergebnissen der Einfluss von Nässe auf die thermische Schutzwirkung von neuer Feuerwehr-Schutzkleidung nach [HuPF 96], und nur diese wurde betrachtet, nach Meinung der Autoren ausreichend untersucht ist. Interessant wären natürlich auch analoge Untersuchungen mit Alltagskleidung, die im Brandfall von der eventuell betroffenen Bevölkerung getragen wird. Auf der Grundlage der hier durchgeführten Untersuchungen kann keine Aussage abgeleitet werden, ob bei der Rettung oder Selbstrettung die Kleidung zielgerichtet mit Wasser besprüht werden sollte. Als weiterhin untersuchungswürdig wird das Verhalten bei thermischer Beanspruchung von gebrauchter und gewaschener Feuerwehr-Schutzkleidung im Vergleich zu neuer gesehen.

Literatur

[Baehr et al. 98]

Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl: Wärme- und Stoffübertragung. Springer, Berlin - Heidelberg - New York, 1998

[DIN EN 24920]

Textilien, Bestimmung der wasserabweisenden Eigenschaften (Sprühverfahren). Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, August 1992

[DIN EN 366]

Schutzkleidung, Schutz gegen Hitze und Feuer, Prüfverfahren: Beurteilung von Materialien und Materialkombinationen, die einer Hitze-Strahlungsquelle ausgesetzt sind. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Mai 1993

[DIN EN 367]

Schutzkleidung, Schutz gegen Hitze und Flammen, Prüfverfahren: Bestimmung des Wärmedurchganges bei Flammeneinwirkung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, November 1992

[DIN EN 50050, Teil 1]

Prüfung von Werkstoffen, Brennverhalten von Werkstoffen, Kleiner Brennkasten. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, April 1986

[DIN EN 532]

Schutzkleidung. Schutz gegen Hitze und Flammen. Prüfverfahren für die begrenzte Flammenausbreitung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Januar 1995, 7 Seiten

[DIN EN 702]

Schutzkleidung, Schutz gegen Hitze und Flammen, Prüfverfahren: Bestimmung des Kontaktwärmedurchganges durch Schutzkleidung oder deren Materialien. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Januar 1995

[Engineering Guide 00]

Anonymous: Engineering Guide - Predicting 1st and 2nd Degree Skin Burns from Thermal Radiation. SFPE, 2000

[Fan et al. 00]

Fan, Jintu; Luo, Zhongxuan; Li, Yi: Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation. Heat and Mass Transfer, 43, 2000, 2989-3000

[Hohenstein 93]

Prüfung von Textilien - Bestimmung der Pufferwirkung von Textilien mit dem Themoregulationsmodell der menschlichen Haut (Hautmodell) - Versuchsdurchführung und Versuchsanordnung. Standard-Prüfvorschrift BPI 1.2, Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein e. V., 1993

[HuPF 96]

Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung für eine universelle Feuerwehrschutzkleidung. Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten der Innenminister und Senatoren der Länder, Arbeitsgruppe Feuerwehrschutzkleidung, 1996, Fassung 12/96-A

[Lawson 96]

Lawson, J. Randall: Fire Fighters' Protective Clothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting. U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5804, 1996

[Lawson et al. 00]

Lawson, J. Randall; Pinder, Tershia A.: Estimate of Thermal Conductivity for Materials Used in Fire Fighters' Protective Clothing. U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6512, 2000

[Lawson et al. 99]

Lawson, J. Randall; Twilley, William H.: Development of an Apparatus for Measuring the Thermal Performance of Fire Fighters' Protective Clothing. U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6400, 1999

[Lechler 94]

Hauptkatalog Düsen 1995, Seite 4.4 - 4.7. Lechler Präzisionsdüsen GmbH & Co KG, Metzingen, 1994

[Marquardt 98]

Marquardt, Ulrich: Thermische Eigenschaften der Feuerwehreinsatzkleidung bei variabler Feuchte und Nässe. Technische Fachhochschule Berlin, Studiengang Sicherheitstechnik, Diplomarbeit, 1998

[Mell et al. 00]

Mell, William E.; Lawson, J. Randell: A Heat Transfer Model for Firefighters' Protective Clothing. Fire Technology, 36, 2000, 1, 39-68

[Mell et al. 99]

Mell, William E.; Lawson, J. Randell: A Heat Transfer Model for Fire Fighter's Protective Clothing. U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6299, 1999

[Niesing 00]

Niesing, Birgit: Hautmodell ersetzt Tierversuche. Fraunhofer Magazin, 2000, 4, 26

[Nikolski 56]

Nikolski, B. P.: Handbuch des Chemikers - Band 1. VEB Verlag Technik, Berlin, 1956

[Pasch 96]

Pasch, Ulrich: Anforderungsprofil für Schutzkleidung der Feuerwehr für die Brandbekämpfung - Grundschutz der Einsatzkräfte beim gesamten Einsatzspektrum. Brandschutzforschung der Bundesländer - Bericht Nr. 99 - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1996

[prEN ISO 13506]

Schutzkleidung gegen Hitze und Flammen, Prüfverfahren für eine vollständige Bekleidung, Voraussage der Wahrscheinlichkeit für Verbrennungen unter Verwendung einer sensorbestückten Prüfpuppe (Entwurf, ISO/DIS 13506). Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Juli 2000

[Rossi 00]

Rossi, R.: Interaction between Protection and Physiological Parameters in Firefighter's Protective Clothing. Proceedings of the 39th International Man-Made Fibres Congress, Part: Protective Textiles, Dornbirn/Austria, 13. - 15. September, 2000, 12 pages

[Rossi 94]

Rossi, R.: Atmungsaktive Materialien oder PVC-Beschichtungen? Hitzedurchgang bei feuchten Schutzanzügen. Schweizerische Feuerwehr-Zeitung, 1994, 11, 840-844

[Rossi 97]

Rossi, Rene: Breathability of heat protective clothing - Water vapour transmission at high Temperatures. EMPA, 1997

[Rossi et al. 97]

Rossi, Rene M.; Zimmerli, Traugott: Breathability and protection aspects of heat protective clothing after thermal ageing. EMPA, 1997

[Saatdjian 00]

Saatdjian, Esteban: Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester - Weinheim - New York - Brisbane - Singapore - Toronto, 2000

[Stroppe 92]

Stroppe, Heribert: Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften. Fachbuchverlag, Leipzig - Köln, 1992

[Yuen et al. 00]

Yuen, R.; Davis, G. de Vahl; Leonardi, E.; Yeoh, G. H.: The Influence of Moisture on the Combustion of Wood. Numerical Heat Transfer, Part A, 2000, 8, 257-280

Weitere Literaturhinweise

[Ahlborn 95]

Bedienungsanleitung - Almeno 2290-7. Ahlborn Meß- und Regelungstechnik, 1995

[Anonym 97]

Anonym: Kermel-Fachtagung: Rund um die Feuerschutzkleidung. 112 - Magazin der Feuerwehr, 1997, 6, 350-351

[Arbeitsschutzgesetz 96]

Das neue Arbeitsschutzgesetz. Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung, Bonn, 1996

[BAGUV 93]

Bundesverband der Unfallversicherungsträger der öffentlichen Hand e.V. (BAGUV),
Unfallverhütungsvorschrift Feuerwehren GUV 7.13. Feuerwehr-Unfallkasse
Hannover, Hannover, 1993

[Bartels et al. 97]

Bartels, V.; Umbach, K. H.: Die Bedeutung der physiologischen Funktion von
Schutzbekleidung für die Leistungsfähigkeit und Gesundheit des Trägers -
Feuerwehr-, Krankenhaus- und Wetterschutzbekleidung mit optimaler
Gebrauchsfunktion. 36. Internationale Chemiefasertagung Dornbirn 17.-19.09.1997,
1997

[Beitz et al. 90]

Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer
Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1990

[Bilger 92]

Bilger, B.: Grundsatzuntersuchungen über die prozeßgesteuerte Simulation der
Thermoregulation des Menschen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben AIF-Nr.
7504, Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein e.V., Bönningheim, 1992

[Bilger 93]

Bilger, B.: Charlie 4 - ein neues Thermoregulationsmodell des Menschen zur
genaueren physiologischen Bewertung von Kleidung. Bekleidungsphysiologisches
Institut Hohenstein e. V., 1993

[Brockhaus 97]

Der Brockhaus in 15 Bänden. F. A. Brockhaus GmbH, Leipzig - Mannheim,
Mannheim, 1997

[CTIF 94]

Die Feuerwehren Europas und anderer Kontinente. XIX. Symposium (IBS) der CTIF
und vfdB, Hannover, 1994

[de Vries 00]

de Vries, Holger: Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum - Technik und Taktik.
Reihe: Einsatzpraxis. ecomed verlagsgesellschaft AG & CO. KG, Landsberg, 2000

[DFV 97]

Feuerwehr Jahrbuch 1997/98. Deutscher Feuerwehrverband e. V., DFV Medien
GmbH, Bonn, 1997

[DIN EN 20139]

Textilien, Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung. Deutsches Institut
für Normung e. V., Berlin, September 1992

[DIN EN 340]

Schutzkleidung, Allgemeine Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e. V.,
Berlin, September 1993

[DIN EN 469]

Schutzkleidung für die Feuerwehr, Anforderungen und Prüfverfahren für die Schutzkleidung für die Brandbekämpfung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Januar 1996

[DIN EN 471]

Warnkleidung EN 471. DIN EN 471, 1994

[DIN EN 54336]

Prüfung von Textilien, Bestimmung des Brennverhaltens, Lotrechtmethode, Zündung durch Kantenbeflammung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, November 1986

[DIN EN ISO 6942]

Schutzkleidung, Schutz gegen Hitze und Feuer, Prüfverfahren: Beurteilung von Materialien und Materialkombinationen, die einer Hitze-Strahlungsquelle ausgesetzt sind (Entwurf). Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, August 1998

[Domke 96]

Domke, Jürgen: Schutzkleidung zur Brandbekämpfung
Leistungsmerkmale, Entwicklung, Informationen. Florian Hessen, 1996, 10, 7-12

[Domke et al. 96]

Domke, Jürgen; u. a.: Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung für eine universelle Feuerwehrsutzkleidung. Stand 12/96, Änderungsstand 04.97. Arbeitsgruppe Feuerwehrsutzkleidung des Ausschusses für Feuerwehrangelegenheiten (AFW), Forschungsinstitut Hohenstein, Wiesbaden, 1996

[Domke 97]

Domke, Jürgen: Flußschema - rechtliche Zusammenhänge bei der nationalen Umsetzung von Feuerwehrsutzkleidungsstandards. Hessisches Ministerium des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz, Wiesbaden

[EWG 656 89]

Richtlinie des Rates vom 30. November 1989 über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Benutzung persönlicher Schutzausrüstungen durch Arbeitnehmer bei der Arbeit. Rat der Europäischen Gemeinschaft, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 393, Brüssel

[EWG 686 89]

Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1989 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für persönliche Schutzausrüstungen (89/686/EWG). Rat der Europäischen Gemeinschaft, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 399, Brüssel, 1989

[Fuchs et al. 97]

Fuchs, H.; Grabski, R.; Kienert, R.; Pasch, U.: Erfahrungen aus Prüfung und Zertifizierung von Feuerwehranzügen und daraus folgende Entwicklungen. 36. Internationale Chemiefasertagung Dornbirn 17.-19.09.1997, 1997

[Gaspar 97]

Gaspar, N.: Technische Probleme beim militärischen Einsatz von Schutzbekleidung. 36. Internationale Chemiefasertagung Dornbirn 17.-19.09.1997, 1997

[Grabski 97]

Grabski, Reinhard: Jubiläum in Heyrothsberge - 30 Jahre Forschung im Dienste der Feuerwehren - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt (IdF). Unabhängige Brandschutzzeitschrift, 1997, 10, 42-44

[Grabski et al. 97]

Grabski, Reinhard; Starke, Horst; Pleß, Georg; Kohl, Klaus-Jürgen; Pasch, Ulrich; Dorendorf, Detlef: Festschrift - 30 Jahre Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1997

[Grabski et al. 98]

Grabski, Reinhard; Kohl, Klaus-Jürgen: MOBLAB-Einsatz in Barby von 23.05. bis 27.05.98 - Einsatzprotokoll. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1998

[Gröber et al. 88]

Gröber, H.; Erk, Grigull U.: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1988

[GSA 97]

Gefahrstoff-Schnellauskunft (GSA), Version Feuerwehr, Chemis 7.01, Computer Software. Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin, Berlin, 1997

[Hans 95]

Hans, Wolfgang: Gasexplosion in einem Wohnhaus der Stadt Halle (Saale). Vortrag auf der Kreisbrandmeister Dienstbesprechung, Heyrothsberge, 1995

[Hegemann 96]

Hegemann, Jan-Erick: Berlin: Vier Feuerwehrmänner beim Einsatz verletzt - Demo für bessere Schutzkleidung. Feuerwehr, 1996, 4, 42-47

[Hirschler 97]

Hirschler, Marcelo M.: Analysis of Thermal Performance of Two Fabrics Intended for Use as Protective Clothing. Fire and Materials, 21, 1997, 115-121

[Hirschler et al. 96]

Hirschler, Marcelo M.; Hoffmann, Donald J.; Hoffmann, John M.; Kelley, Lester; Kroll, Michael: Tests of Protective Effect of Clothing in Apparel Fires. Journal of Fire Sciences, 14, 1996, March/April, 104-123

[Hohenstein 98]

Gültige Bescheide für Feuerwehrüberjacken, Feuerwehrhosen und Feuerwehrjacken gemäß HuPF, Stand 12.03.98. Forschungsinstitut Hohenstein, Fax-Abruf, Fax-Nummer 07143/2718801, Hohenstein, 1998

[Hornung 96]

Hornung, Wolfgang: Thema "Schutzkleidung" wird zum Ärgernis
LFV will "unendliche Geschichte" beenden. Der Feuerwehrmann, 1996, 5, 128

[IdF LSA 97]

Jahresbericht 1996. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1997

[isulog 96]

Grundseminar im Rahmen des Unternehmermodells, Berufsgenossenschaft der Feinwerk- und Elektrotechnik, Stand 11/96. Institut isulog Sicherheitstechnik, Berlin, 1996

[Jeschar et al. 90]

Jeschar, R.; Alt, R.; Specht, E.: Grundlagen der Wärmeübertragung. Viola-Jeschar-Verlag, Goslar, 1990

[Mdl LSA 98]

Ereignisbericht der Feuerwehren des Landes Sachsen-Anhalt, Jahresbericht 1997. Herausgegeben vom Ministerium des Innern des Landes Sachsen-Anhalt, 1998

[Nothdurft 94]

Nothdurft, B.: Bundesverband der Unfallversicherungsträger der öffentlichen Hand e.V. (BAGUV), Sicherheit im Feuerwehrdienst, Arbeitshilfen zur Unfallverhütung GUV 27.1. Verlag Fachpublika Wehner GmbH, München, 1994

[Owen 99]

Owen, Kirk H.: Protective clothing and equipment for firefighters in the US. Fire, 1999, November, 27

[Pasch 00]

Pasch, Ulrich: Bekleidungsphysiologisch relevante Anforderungen und Parameter im Feuerwehreinsatz. Bericht als Zuarbeit zum Forschungsbericht des Bekleidungsphysiologischen Instituts Hohenstein e.V. im Rahmen der Realisierung des AIF-Projektes Nr. 11990. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 2000

[Pasch 96a]

Pasch, Ulrich: Feuerwehr-Einsatzkleidung - ein "brennendes" Problem. Feuerwehr in Sachsen-Anhalt, 2, 1996, 18-19

[Pasch 96b]

Pasch, Ulrich: Feuerwehr-Einsatzkleidung - ein "brennendes" Problem (Fortsetzung). Feuerwehr in Sachsen-Anhalt, 3, 1996, 18-19

[Pasch et al. 95]

Pasch, Ulrich; Wienecke, Friedrich: Untersuchungen zur Simulation ausgewählter Brandkenngrößen und deren Wirkung auf die persönliche Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen. Brandschutzforschung der Bundesländer - Bericht Nr. 93 - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1995

[Pasch et al. 97]

Pasch, Ulrich; Wienecke, Friedrich: Entwicklung eines reproduzierbaren Prüfverfahrens zur Komplexprüfung persönlicher Schutzausrüstung am Beispiel der Prüfung eines Wärmestrahlschutzanzuges. Brandschutzforschung der Bundesländer - Bericht Nr. 109 - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1997

[Pasch et al. 99]

Pasch, Ulrich; Wienecke, Friedrich: Bestimmung der Parameter für einen zur Prüfung persönlicher Schutzausrüstung vorgesehenen Versuchsraum unter Berücksichtigung der Integration einer gasbetriebenen Wärmestrahlerwand. Brandschutzforschung der Bundesländer - Bericht Nr. 116 - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1999

[Rissi et al. 97]

Rissi, R.; Weder, M.: Neue Prüfmethode zur Beurteilung des Komforts von Schutzbekleidung. 36. Internationale Chemiefasertagung Dornbirn 17.-19.09.1997, 1997

[Römpp 95]

Falbe, Jürgen; Regitz, Manfred (Hrsg.): Römpp Chemie Lexikon auf CD-ROM. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1995

[Schäfer 96]

Schäfer, Lutz: Sympatex im Feuerwehrbereich. GIT Sicherheit + Management, 1996, 4, 226-227

[Schmatz et al. 80]

Schmatz; Nöthlich: Gerätesicherheitsgesetz, Kommentar (Ergänzungslieferung 1993). Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1980

[Schmid 96]

Schmid, Rolf: Universelle Schutzkleidung für die Feuerwehren in Baden-Württemberg. brandschutz, 1996, 9, 686-688

[Scholz et al. 95]

Scholz, J.; Thomas, H. J.: Niedersächsisches Brandschutzgesetz (Kommentar). Deutscher Gemeindeverlag, Hannover, 1995

[Tridini]

Tridini, Roz: Clothing standards. Fire Europe, 9-10

[Truong et al. 97]

Truong, Q.; Wilusz, E.: Materialdesign für chemische und biologische Schutzbekleidung. 36. Internationale Chemiefasertagung Dornbirn 17.-19.09.1997, 1997

[VDI-Wärmeatlas 97]

Verein Deutscher Ingenieure (Herausgeber): VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997

[vfdb 69]

Vorbeugender Brandschutz - Loseblatt-Sammlung. Herausgegeben von der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e. V. (Aktualisierter Stand). Verlag Kultur und Wissen GmbH, Wiesbaden, 1969

[Woitha 94]

Woitha, Claus: Temperaturmessungen an Materialien für die Schutzkleidung der Feuerwehr. brandschutz, 1994, 2, 98-101

Anhang

Verzeichnis der Tabellen

A1	Messwerte Wärmedurchgang Strahlung [DIN EN 366]	81
A2	Messwerte Wärmedurchgang Flamme nach [DIN EN 367]	83
A3	Messwerte Kontaktwärmepfung nach [DIN EN 702]	85
A4	Messwerte der zusätzlichen Untersuchungen nach [DIN EN 702]	87

Tabelle A1: Messwerte Wärmedurchgang Strahlung nach [DIN EN 366]

Spalteninhalte:						
(1) Versuchsschlüssel						
(2) Zeitdauer bis zum Erreichen der Grenztemperatur in s						
(3) Durchschnittliche Zeitdauer für jeweils drei Versuche in s						
(4) Wärmestromdichte auf der Probenrückseite in kW/m^2						
(5) Durchschnittliche Wärmestromdichte für jeweils drei Versuche in kW/m^2						
(6) Wärmedurchlassgrad $TF(q_0)$						
(7) Durchschnittlicher Wärmedurchlassgrad für jeweils drei Versuche						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1. Materialaufbau/Probenart						
1311	139	123	1,846	1,671	0,046	0,042
1312	143		1,598		0,040	
1313	86		1,570		0,039	
1321	144	138	1,605	1,700	0,040	0,043
1322	131		1,817		0,045	
1323	139		1,677		0,042	
1331	134	133	1,738	1,740	0,043	0,044
1332	131		1,780		0,045	
1333	135		1,703		0,043	
1341	129	130	1,820	1,762	0,045	0,044
1342	127		1,766		0,044	
1343	135		1,701		0,043	
2. Materialaufbau/Probenart						
2311	144	150	1,568	1,492	0,039	0,037
2312	148		1,521		0,038	
2313	159		1,386		0,035	
2321	155	153	1,464	1,478	0,037	0,037
2322	152		1,478		0,037	
2323	152		1,493		0,037	
2331	156	152	1,441	1,468	0,036	0,037
2332	152		1,471		0,037	
2333	148		1,493		0,037	
2341	158	153	1,385	1,461	0,035	0,037
2342	153		1,478		0,037	
2343	149		1,521		0,038	

Tabelle A1: Messwerte Wärmedurchgang Strahlung nach [DIN EN 366]
(Fortsetzung)

Spalteninhalte:						
(1) Versuchsschlüssel						
(2) Zeitdauer bis zum Erreichen der Grenztemperatur in s						
(3) Durchschnittliche Zeitdauer für jeweils drei Versuche in s						
(4) Wärmestromdichte auf der Probenrückseite in kW/m^2						
(5) Durchschnittliche Wärmestromdichte für jeweils drei Versuche in kW/m^2						
(6) Wärmedurchlassgrad $TF(q_0)$						
(7) Durchschnittlicher Wärmedurchlassgrad für jeweils drei Versuche						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
3. Materialaufbau/Probenart						
3311	157	147	1,420	1,546	0,035	0,038
3312	143		1,598		0,040	
3313	141		1,620		0,040	
3321	143	146	1,593	1,575	0,040	0,040
3322	146		1,569		0,039	
3323	148		1,564		0,039	
3331	142	157	1,778	1,532	0,044	0,038
3332	155		1,418		0,035	
3333	159		1,399		0,035	
3341	157	165	1,443	1,370	0,036	0,034
3342	154		1,439		0,036	
3343	184		1,227		0,031	
4. Materialaufbau/Probenart						
4311	127	128	1,803	1,803	0,045	0,045
4312	129		1,786		0,045	
4313	128		1,820		0,045	
4321	128	129	1,818	1,799	0,045	0,045
4322	128		1,823		0,046	
4323	132		1,755		0,044	
4331	123	125	1,890	1,868	0,047	0,047
4332	126		1,869		0,047	
4333	125		1,846		0,046	
4341	128	128	1,834	1,817	0,046	0,046
4342	127		1,834		0,046	
4343	130		1,783		0,045	

Tabelle A2: Messwerte Wärmedurchgang Flamme nach [DIN EN 367]

Spalteninhalte:				
(1) Versuchsschlüssel				
(2) Dicke der Probe unter der Zentrierplatte in <i>mm</i>				
(3) Temperaturdifferenz zu Beginn der Messung in <i>K</i>				
(4) Zeitdauer bis zum Erreichen der Temperaturdifferenz von (24 ± 0.2) <i>K</i> in <i>s</i>				
(5) Durchschnittliche Zeitdauer von (4) für jeweils drei Versuche in <i>s</i>				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1. Materialaufbau/Probenart				
1211	4,7	1,04	20	19,67
1212	4,6	1,34	19	
1213	4,6	1,09	20	
1221	4,5	0,82	21	21,00
1222	4,6	0,40	21	
1223	4,5	0,99	21	
1231	4,5	3,15	18	18,33
1232	4,6	0,69	19	
1233	4,6	0,40	18	
1241	4,5	0,82	20	20,00
1242	4,4	0,25	20	
1243	4,6	0,30	20	
2. Materialaufbau/Probenart				
2211	4,4	2,18	22	21,00
2212	4,3	1,04	21	
2213	4,4	0,30	20	
2221	4,4	0,32	21	22,33
2222	4,5	0,25	23	
2223	4,3	0,45	23	
2231	4,4	1,14	27	24,33
2232	4,3	1,56	22	
2233	4,4	1,14	24	
2241	4,3	0,87	23	21,33
2242	4,4	1,59	21	
2243	4,3	0,52	20	

Tabelle A2: Messwerte Wärmedurchgang Flamme nach [DIN EN 367]
(Fortsetzung)

Spalteninhalte:				
(1) Versuchsschlüssel				
(2) Dicke der Probe unter der Zentrierplatte in <i>mm</i>				
(3) Temperaturdifferenz zu Beginn der Messung in <i>K</i>				
(4) Zeitdauer bis zum Erreichen der Temperaturdifferenz von (24 ± 0.2) <i>K</i> in <i>s</i>				
(5) Durchschnittliche Zeitdauer von (4) für jeweils drei Versuche in <i>s</i>				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3. Materialaufbau/Probenart				
3211	5,2	0,17	24	24,00
3212	5,2	0,47	24	
3213	5,3	1,12	24	
3221	5,2	1,49	23	24,00
3222	5,2	0,15	24	
3223	5,3	1,34	25	
3231	5,2	1,86	24	24,33
3232	5,2	2,41	25	
3233	5,1	0,69	24	
3241	5,3	0,72	24	24,33
3242	5,3	0,84	25	
3243	5,2	1,24	25	
4. Materialaufbau/Probenart				
4211	4,6	4,07	23	21,00
4212	4,6	3,72	20	
4213	4,6	3,00	20	
4221	4,6	1,98	20	22,33
4222	4,5	0,05	23	
4223	4,6	0,40	24	
4231	4,6	0,52	22	22,33
4232	4,5	0,60	23	
4233	4,6	0,99	22	
4241	4,7	0,77	20	21,00
4242	4,6	0,99	21	
4243	4,5	0,37	22	

Tabelle A3: Messwerte Kontaktwärmepfung nach [DIN EN 702]

Spalteninhalte:			
(1) Versuchsschlüssel			
(2) Temperatur zu Beginn der Messung in °C			
(3) Zeitdauer bis zum Erreichen der Schwellenwertzeit in s			
(4) Durchschnittliche Schwellenwertzeit für jeweils drei Versuche in s			
(1)	(2)	(3)	(4)
1111	19,9	42,8	44,6
1112	20,3	43,7	
1113	20,3	47,3	
1121	20,6	37,2	38,6
1122	21,1	40,9	
1123	21,2	37,6	
1131	21,3	31,3	31,7
1132	20,6	31,1	
1133	20,7	32,8	
1141	19,9	35,3	29,6
1142	20,1	34,3	
1143	20,4	19,2	
2111	19,0	42,2	42,4
2112	19,4	43,3	
2113	19,0	41,7	
2121	19,1	29,4	28,3
2122	20,7	26,0	
2123	19,8	29,4	
2131	19,4	29,5	25,8
2132	19,7	27,9	
2133	19,6	19,9	
2141	20,9	26,6	20,0
2142	19,8	21,6	
2143	19,7	11,9	

Tabelle A3: Messwerte Kontaktwärmepfung nach [DIN EN 702]
(Fortsetzung)

Spalteninhalte:			
(1) Versuchsschlüssel			
(2) Temperatur zu Beginn der Messung in °C			
(3) Zeitdauer bis zum Erreichen der Schwellenwertzeit in s			
(4) Durchschnittliche Schwellenwertzeit für jeweils drei Versuche in s			
(1)	(2)	(3)	(4)
3111	20,6	47,4	47,7
3112	20,2	48,2	
3113	20,5	47,6	
3121	20,3	34,3	33,6
3122	20,0	30,1	
3123	20,4	36,3	
3131	20,5	38,7	31,5
3132	20,1	27,4	
3133	19,9	28,5	
3141	19,9	20,3	23,1
3142	19,9	27,3	
3143	19,6	21,7	
4111	20,3	44,5	44,4
4112	19,9	45,1	
4113	19,9	43,6	
4121	18,7	33,4	33,9
4122	20,0	34,8	
4123	19,8	33,5	
4131	19,2	29,2	29,9
4132	17,8	30,3	
4133	20,3	30,3	
4141	19,6	32,0	32,2
4142	20,0	32,2	
4143	20,4	32,5	

Tabelle A4: Messwerte der zusätzlichen Untersuchungen nach [DIN EN 702]

Spalteninhalte:				
(1) Probennummer ¹				
(2) Kontakttemperatur in °C				
(3) Zeitdauer bis zum Erreichen der Schwellenwertzeit in s				
(4) Durchschnittliche Schwellenwertzeit für jeweils zwei Versuche in s				
(5) Zustand der Probe				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	150	40,1	38,6	trocken
2	150	37,1		
3	150	23,8	26,8	nass
4	150	29,7		
5	200	23,2	23,6	trocken
6	200	24,0		
7	200	19,8	20,5	nass
8	200	21,1		
9	250	18,2	18,6	trocken
10	250	19,0		
11	250	18,7	18,0	nass
12	250	17,2		
13	300	15,2	15,0	trocken
14	300	14,8		
15	300	14,1	14,1	nass
16	300	14,1		

¹ Alle Proben entsprechen dem Materialaufbau 1 nach Tabelle 5.1.

Tabelle A4: Messwerte der zusätzlichen Untersuchungen nach [DIN EN 702]
(Fortsetzung)

Spalteninhalte:				
(1) Probennummer				
(2) Kontakttemperatur in °C				
(3) Zeitdauer bis zum Erreichen der Schwellenwertzeit in s				
(4) Durchschnittliche Schwellenwertzeit für jeweils zwei Versuche in s				
(5) Zustand der Probe				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
17	350	13,1	13,0	trocken
18	350	12,9		
19	350	12,6	12,8	nass
20	350	12,9		
21	400	10,8	10,9	trocken
22	400	10,9		
23	400	10,4	9,9	nass
24	400	9,4		
25	500	8,1	8,3	trocken
26	500	8,4		
27	500	8,0	8,1	nass
28	500	8,2		