

## **Optimierung der Feuchte- und Wärmeregulation im komplexen System Fuß-Strumpf-Schuh am Beispiel von Arbeitsschuhen**

In der Arbeitswelt müssen zahlreiche Beschäftigte Arbeitsschuhe tragen, um vor den gesundheitlichen Folgen möglicher Arbeitsunfälle geschützt zu sein. Die Anforderungen dieser Schuhe haben vordergründig diesen Gesichtspunkt zu unterstützen. Gleichzeitig werden diese Schuhe aber während des gesamten Arbeitstages getragen. Dabei treten Probleme mit dem Klima in den Schuhen auf. In den oft knöchelhohen Schuhen entsteht ein Feuchte- und Wärmestau. Dieser wird vor allem durch die Ausrüstung mit Zehenschutzkappen, Hinterkappen und in bestimmten Schuhen auch durch Stahlsohlen begünstigt. Dieser Feuchte- und Wärmestau wird von den Trägern als sehr unangenehm empfunden, da er auch zu Problemen an den Füßen führen kann. Ergebnisse können Blasen und aufgeweichte Haut sein. Die Entstehung von Fußpilz wird begünstigt. Fühlt sich der Mensch unwohl, tritt ein Leistungsabfall ein, wie nachgewiesen wurde. Aus diesem Grund wird das Tragen dieser Schuhe verweigert. Vergleichbare Probleme können auch bei Trekking- und Militärschuhen auftreten. Auch bei diesen Einsatzgebieten werden die Schuhe über viele Stunden bei hoher, körperlicher Belastung getragen. Diese Fakten sind den Schuhherstellern bekannt und sie haben darauf durch Einsatz verschiedener, spezieller Schuhmaterialien reagiert. Das Klima im Schuh wird aber auch von den getragenen Strümpfen beeinflusst. Für das Tragen der Sicherheitsschuhe gibt es keine Vorgaben hinsichtlich der Strümpfe. In der Vergangenheit wurde das Verhalten von Schuhen und Strümpfen hinsichtlich Feuchtigkeitsmanagement immer nur getrennt untersucht. Aussagen über das Zusammenwirken von Strumpf und Schuh fehlten bisher.

Aus diesem Grund wurde durch das Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens (PFI) gemeinsam mit dem Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH (HIT) ein Forschungsprojekt bearbeitet, welches den Einfluss der Schuh- und Strumpfkonstruktion auf das Schuhklima im Arbeitsalltag und den resultierenden Tragekomfort von Schuh-Strumpfsystemen erforschte.

Da sich geforderte Schutzeigenschaften, realisiert z.B. durch Stahlkappe, Stahlsohle, Wasserdichtigkeit, auch auf das Wärme- und Feuchtemanagement auswirken, wurden die Forschungsarbeiten auf eine spezielle Anwendung, Arbeitssicherheitsschuhe, beschränkt. Die gewonnenen Erkenntnisse sind jedoch auch auf andere Einsatzgebiete anwendbar. Das wissenschaftlich-technische Ziel war die Entwicklung von Maßnahmen zur passiven Regulierung des Feuchte- und Wärmehaushalts im System Fuß-Strumpf-Schuh (ohne bewegliche Komponenten). Dies sollte durch die Konstruktion und den gezielten Materialeinsatz beim Strumpf und Schuh erfolgen. Ziel waren aufeinander abgestimmte Lösungen von Strumpf und Schuh für den Einsatz in speziellen Arbeitsschuhbereichen. Für die Versuche wurden verschiedene Prüfgeräte unterschiedlicher Wirkprinzipien hinsichtlich der Simulation des Schwitzens der Füße eingesetzt. Diese Ergebnisse wurden durch Trageversuche mit Testpersonen ergänzt.

Für die Versuche wurden der Komforttester des PFI (Bild 1) und das schwitzende Fußmodell des HIT (Bild 2) genutzt. Diese zwei Prüfgeräte wenden unterschiedliche Formen der

Feuchteabgabe im Schuh an. Der Komforttester vernebelt feine Wassertröpfchen. Der Schwitzende Fuß ist in Metallsegmente aufgeteilt, die das Wasser tropfenweise aus Öffnungen abgeben. Dieses Simulationsgerät erlaubt auch die Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstandes für jedes Fußsegment.



Bild 1: Komforttester des PFI



Bild 2: Schwitzender Fuß des HIT

Aus der Vielzahl der eingesetzten Schuhmaterialien wurden fünf Kombinationen für die Herstellung von Testschuhen ausgewählt (Tabelle 1). Sie wurden über den gleichen Leisten mit der gleichen Brandsohle, Stahlkappe, Hinterkappe, Einlegesohle gefertigt. Ziel war es, die Anzahl der Einflussgrößen möglichst auf die verwendeten Materialien zu beschränken. Für die Versuche wurden ebenfalls fünf Strümpfe aus unterschiedlichen Materialien ausgewählt (Tabelle 2).

Tabelle 1: Musterbeschreibung der untersuchten Schuhe






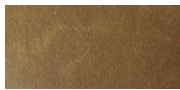
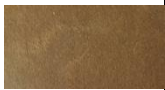













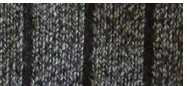
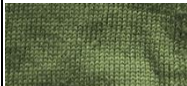
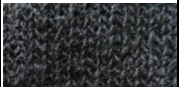

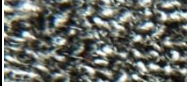



Muster (SC=Schuh)	SC 1	SC 2	SC 3	SC 4	SC 5
					
Masse [g]	669	625	607	658	653
Obermaterial	Leder WBL 	Nubukleder 	Cordura Gewebe PA 6.6 + Nadelfilz PES/PP 	OL-Cow-Haircell hydro 	Narbenleder 
Flächen-gewicht [g/m <sup>2</sup> ]	k.A.	k.A.	760	1730	k.A.
Dicke	k.A.	k.A.	2,5	2,0-2,2	k.A.
Futter	Rindfutter 	Gestrick PES (Bioaktive) + Nadelvlies 	Gewirk PES + Nadelvlies PES 	Fell WO (80%) /Gewirk PES (20%) 	Laminat mit Membran 
Flächen-gewicht [g/m <sup>2</sup> ]	700	315	240	235 / 85	k.A.
Dicke [mm]	1,0-1,2	1,4	1,25	8 / 1	k.A.
Einlegesohle	E1 Standard	E1 Standard	E1 Standard	E1 Standard	E1 Standard

Tabelle 2: Musterbeschreibung der untersuchten Strümpfe

Muster (ST=Strumpf)	ST 1	ST 2	ST 3	ST 4	ST 5
					
Faser-material	PA 54%, PES 23%, CO 20%, EL 3%	PP 40%, CO 23%, PA 23%, PAN 12%, EL 2%	WO 100%	WO 70%, PA 30%	CO 65%, PES 22%, PA 13%
Struktur außen	rechte & linke Maschen 	rechte & linke Maschen 	rechte & linke Maschen 	rechte Maschen 	rechte Maschen 

Struktur innen	frottierende Fäden	Plüschhenkel	rechte & linke Maschen	Plüschhenkel	Plüschhenkel
					
Dicke unter Saum [mm]	3,50	3,23	7,58	5,06	3,41
Dicke Mittelfuß [mm]	6,55	4,93	6,17	5,29	4,71

### Komforttester PFI

Am Komforttester wurden zwei verschiedene Versuche durchgeführt, Kurz- und Langzeittests. Die Versuche wurden bei Normklima durchgeführt. Der Kurzzeittest mit einer Gesamtdauer von 120 min bestand aus zwei Versuchsphasen. Dies ist in Bild 3 in Form eines Zeitstrahls dargestellt. Zuerst wurden der Kunstfuß mit Messsocke, der Schuh und der Strumpf einzeln gewogen. Auf dem Komforttester erfolgte dann eine 10-minütige Erwärmung. Danach wurde die „Schwitzphase“ begonnen, die über einen Zeitraum von 60 Minuten anhielt. Dabei wurde sowohl Wärme als auch Feuchtigkeit zugeführt. Anschließend wurden die drei Komponenten Kunstfuß, Strumpf und Schuh erneut gewogen. Wieder am Komforttester angeschlossen folgte eine 50 Minuten andauernde Wärmezufuhr, die eine Trocknung bewirken sollte. Anschließend wurden Strumpf und Schuh im Normklima ausgelegt und das Trocknungsverhalten durch wiederholtes Wägen ermittelt.

Der Langzeittest diente der Simulation eines 8-stündigen Arbeitstages mit wechselnder, körperlicher Belastung.

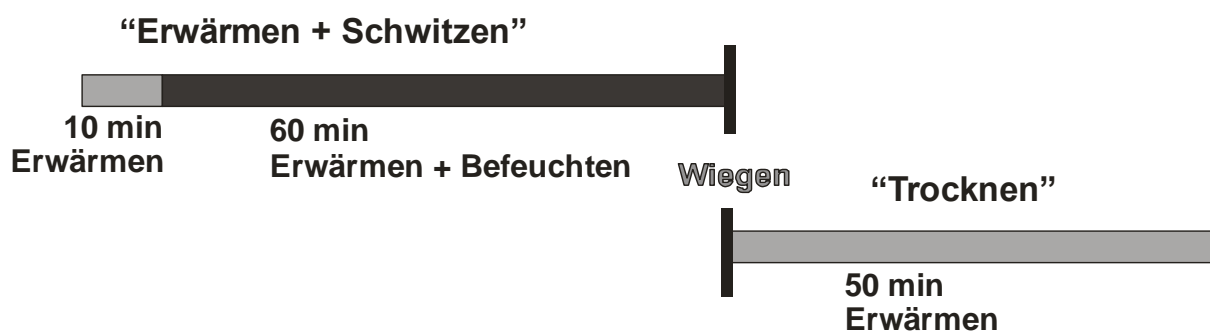


Bild 3: Kurzzeittest auf dem Komforttester

### Schwitzendes Fußmodell HIT

Mit der gleichen Schuh- und Strumpfauswahl wurden Versuche am Schwitzenden Fußmodell durchgeführt. Der Ablauf ist in Bild 4 dargestellt.

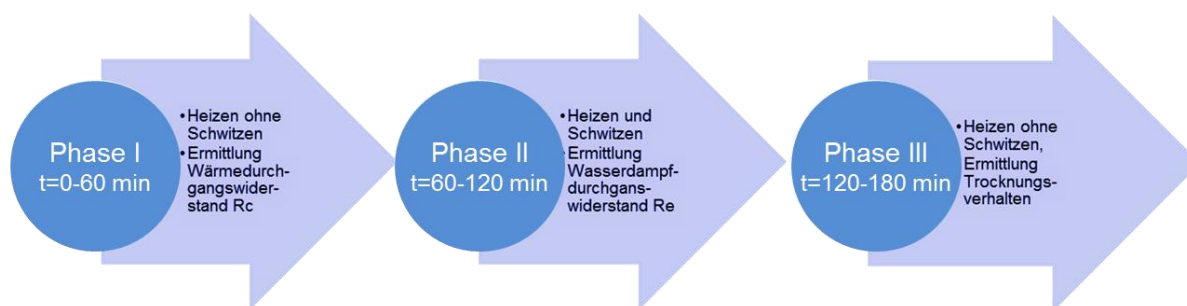


Bild 4: Phaseneinteilung der Messungen mit dem Schwitzenden Fußmodell

Zur Simulation des Schwitzens verfügt das Fußmodell über 32 geometrisch gleichmäßig verteilte „Schweißdrüsen“ (siehe Tabelle 3). Diese werden mit Hilfe zweier peristaltischer Pumpen mit Wasser versorgt. Zur Überwachung der verbrauchten Wassermenge ist der Wasserspeicher auf einer Waage platziert. Vor und nach jeder Messung wird die Masse des Wasserspeichers abgelesen und dokumentiert. Bei den Versuchen wurde eine Pumpleistung 5% gewählt, was einer Schwitzrate von ca. 23,5 g/h entspricht.

Tabelle 3: Nummerierung, Bezeichnung und Oberfläche der Segmente sowie schematische Darstellung des Schwitzenden Fußmodells

Nummer	Bezeichnung	Oberfläche [cm <sup>2</sup> ]	Schematische Darstellung
1	Zehen (unten)	60	
2	Sohle	120	
3	Zehen (oben)	57	
4	Spann	75	
5	seitlicher Fuß (innen)	63	
6	seitlicher Fuß (außen)	61	
7	Fußknöchel (vorne)	77	
8	Anfang Schienbein	81	
9	mittleres Schienbein	42	
10	Ferse	128	
11	Fußknöchel (hinten)	72	
12	Anfang Wade	70	
13	mittlere Wade	38	

## Trageversuche

Die Laborversuche wurden durch Trageversuche mit Testpersonen ergänzt. Hauptziel dieser Versuche war es, die objektiven Messwerte durch das subjektive Empfinden der Träger zu ergänzen. Die Versuche wurden in einem Klimaraum bei 21°C und 65% Luftfeuchtigkeit, mit den fünf Schuhen und drei verschiedenen Strümpfen durchgeführt. Während der Versuche trugen die Testpersonen die gleiche Bekleidung. Die Testpersonen waren auf einem Laufband



unterschiedlichen Belastungen durch zwei Gehgeschwindigkeiten (4 und 6 km/h) ausgesetzt. Die Belastung wurde durch Pulsmessungen erfasst. Zwischen den Belastungsphasen befand sich eine Ruhephase, wie auch aus dem Bild 5 hervorgeht, welches den Pulsverlauf der Testpersonen zeigt. Sowohl vor und nach der Belastung, sowie in der Ruhephase wurden bei den Messungen des PFI Sensoren für die Messung der Temperatur im Schuh eingeführt (Bild 6). Im Abstand von jeweils 10 Minuten wurde das subjektive Empfinden zur Schuhinnentemperatur und Feuchtigkeit im Schuh abgefragt.

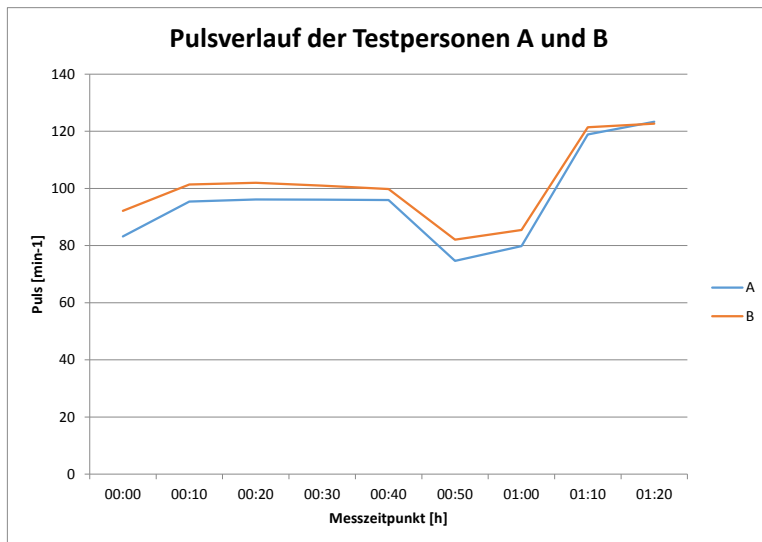


Bild 5: Pulsverlauf von zwei Testpersonen (Mittelwerte) mit erster Belastung, Ruhephase, zweite, höhere Belastungsphase



Bild 6: Trageversuche PFI mit Temperaturmessung im Schuh

Die Trageversuche des HIT erfolgten ebenfalls auf einem Laufband in einer Klimakammer, allerdings bei einer Temperatur von 24°C. In den Ruhephasen absolvierten die Testpersonen einen Fahrsimulationstest. Die Herzfrequenz wurde erfasst. An den Füßen waren kombinierte Temperatur-Feuchte-Sensoren angebracht, wie im Bild 7 zu sehen ist. Das subjektive Empfinden der Testpersonen wurde auch bei diesen Tests erfasst.

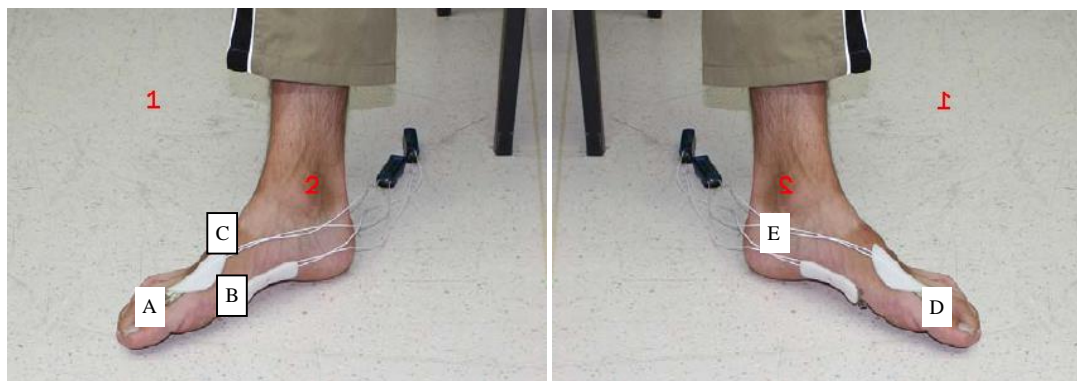


Bild 7: Messfühlerbelegung an den Füßen während der Trageversuche (A - Zehen, rechts; B - unterm Fuß, rechts; C - Spann, rechts; D - Zehen, links; C - Knöchel, links)

Bei allen Trageversuchen wurde die Gewichtsänderung der Probanden, sowie die Schweißaufnahme der Schuhe, Strümpfe und Bekleidung ermittelt

### Optimierte Versionen

Die Ergebnisse aller Versuche wurden ausgewertet und analysiert. Daraus wurden optimierte Versionen erarbeitet und die Labor- und Trageversuche wiederholt. Zum Einsatz kamen spezielle Strümpfe mit ausgewähltem Mischgewebe. Bei den Schuhen wurden sowohl Außen- als auch Innenschaft aus Textil, sowie ein Schaft mit Membran verwendet. Diese hatten bei den bisherigen Versuchen die besseren Ergebnisse beim Feuchtmanagement erbracht. Zusätzlich wurden sie mit speziellen Decksohlen ausgestattet, die eine besonders gute Feuchtaufnahme bzw. Feuchtweiterleitung versprochen.

### Ergebnisse

Hauptergebnis des Forschungsprojektes ist, dass sich Strumpf und Schuh hinsichtlich des Feuchtmanagements gegenseitig erheblich beeinflussen. Eine getrennte Betrachtung führt zwangsläufig zu Fehleinschätzungen. Durch gezielte Kombination von Materialien sowohl bei den Schuhen als auch bei den Strümpfen ist eine Verbesserung des Feuchtmanagements möglich. Dies konnte an Hand der Messwerte im Rahmen des Projektes bewiesen werden.

Die Versuche zeigten, dass der Strumpf für die Aufnahme bzw. Weiterleitung der Feuchtigkeit im Schuh die dominierende Komponente ist, da er unmittelbar am Fuß anliegt. Die Eigenschaften des Strumpfes führen entweder dazu, dass er die Feuchtigkeit aufsaugt und speichert (Sperrschicht) oder sie an den Schuh weiterleitet. Die Eigenschaften der Strümpfe werden durch deren Materialzusammensetzung bestimmt. Besonders Strümpfe aus Wolle

oder Wollgemische saugen die Feuchtigkeit gut auf und speichern sie. Dadurch bleibt die Feuchtigkeit am Fuß. Mischgewebe aus Polypropylen (PP), Baumwolle (Co), Polyamid (PA), Polyacryl (PAN) und Elasthan (EL) leiteten die Feuchtigkeit vom Fuß weg in den Schuh. Schuhe, deren Außen- und Innenschicht aus Textil bestanden, leiteten die Feuchtigkeit besonders gut vom Strumpf weg und gaben sie am besten an die Umgebung ab. Ähnlich gute Eigenschaften bewiesen Schuhe mit Membran. Eine deutlich messbare Verbesserung der Feuchtaufnahme durch die verschiedenen Decksohlen konnte nicht nachgewiesen werden.

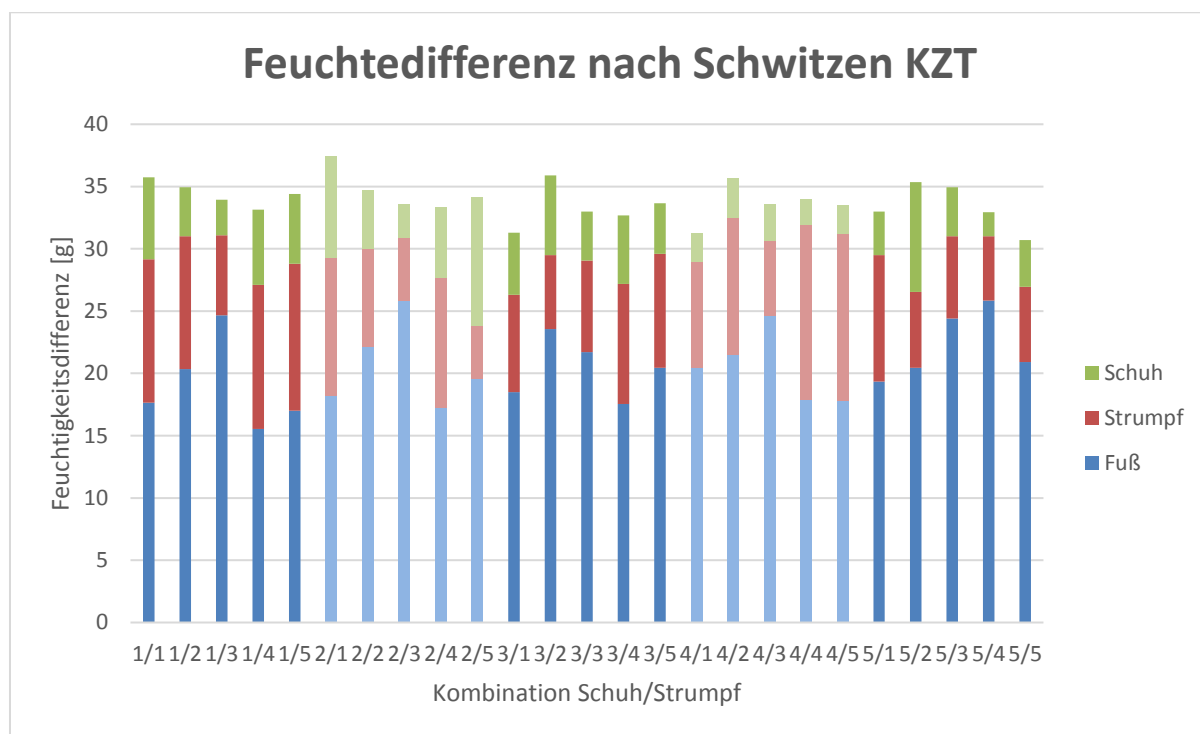


Bild 8: Gewichtsänderung durch Schwitzphase Komforttester

In Bild 8 ist das Ergebnis des Kurzzeittests nach der Schwitzphase auf dem Komforttester abgebildet. Die größte Feuchtigkeitsmenge wurde durch den Kunstfuß aufgenommen, was auf Grund des angewandten Simulationssystems entsteht. Deutlich wird aber auch, dass die Strümpfe den größten Anteil an Feuchtigkeit aufnehmen. Die Unterschiede der verschiedenen Kombinationen sind erkennbar.

In Bild 9 ist als Beispiel für die erreichten Ergebnisse das Feuchtemanagement des Schwitzenden Fußes dargestellt. Auch diese Darstellung lässt die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Kombinationen gut erkennen.

Der Prozess der Feuchteleitung erwies sich auch als zeitabhängig. Der Schuh konnte erst bei den Langzeitversuchen einen deutlicheren Einfluss nehmen, die Feuchtigkeit vom Strumpf aufnehmen und an die Umgebung abgeben.

Beim Wärmedurchgangswiderstand war dagegen der Schuh die dominierende Komponente, wie die Versuche am Schwitzenden Fußmodell belegten. Er bestimmt mit seinen Eigenschaften, wieviel Wärme im System Fuß-Strumpf-Schuh verbleibt oder an die Umgebung



abgegeben wird. Ein Einfluss der Strümpfe auf den Wärmedurchgangswiderstand konnte nicht nachgewiesen werden.

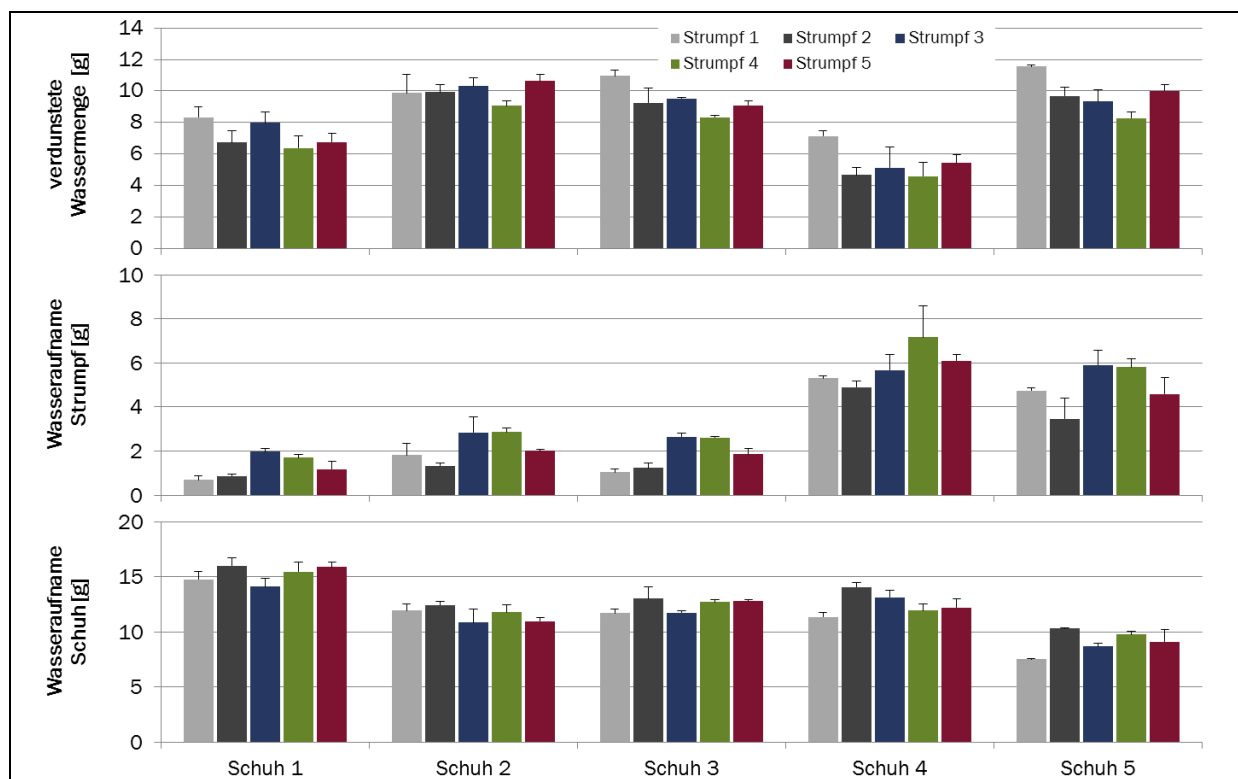


Bild 9: Schweißmanagement der verschiedenen Strumpf-Schuh-Kombinationen als Mittelwert aus drei Einzelmessungen des „Schwitzenen Fußes“

Die subjektive Bewertung der Testpersonen bei den Trageversuchen fiel sehr unterschiedlich aus und spiegelte die Messergebnisse der Laborversuche nicht eindeutig wider. Bereits nach kurzer Tragezeit wurden die Schuh- und Strumpfkombinationen als zu warm empfunden. Dies war bereits bei Temperaturen von ca. 33°C der Fall. Bei den Tragetests konnte die Verbesserung durch die optimierten Versionen den Testpersonen nicht fühlbar gemacht werden. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Das IGF-Vorhaben 17908 N der Forschungsvereinigung Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. – PFI, Marie-Curie-Str. 19, 66953 Pirmasens wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Der Abschlussbericht kann beim PFI (Projektleiterin Dr. Monika Richter) angefordert werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

