

Diss. ETH Nr. 12946

# **Experimentelle Untersuchung zur Wechselwirkung von Schutz und Physiologie bei Feuerwehrschutzkleidung**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

RENE MICHEL ROSSI

Diplôme en électronique physique, Université de Neuchâtel

geboren am 4. Mai 1967

von Poschiavo (GR)

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. H. Krueger, Referent

Prof. Dr. U. Meyer, Korreferent

Dr. T. Zimmerli, Korreferent

1999

## Zusammenfassung

Um die Schutzfunktion zu erfüllen sind Hitzeschutzkleidungen meistens schwer und behindern die Wärme- und Feuchteabgabe vom Körper an die Umgebung. Zusätzlich zu den meist schwierigen Arbeitsbedingungen bedeutet auch diese Ausrüstung eine Belastung für den Körper. Die Kleidung bietet zwar einen genügenden Schutz gegen äussere Hitzequellen, reduziert aber gleichzeitig die Abgabe der produzierten Körperwärme an die Umgebung. Dies führt zu einer Erhöhung der Rektaltemperatur, die den Menschen bei seiner Arbeit beeinträchtigt. (Hitze-)Stress ist die häufigste Unfallursache bei der Feuerwehr (in den USA ca. 50% der Todesfälle).

Da es bis jetzt keine Prüfapparaturen gab, die den menschlichen Körper bei verschiedenen Hitzebelastungen simulierten, wurden solche Situationen häufig mit Hilfe von Probanden untersucht. Neben gewissen ethischen Hindernissen ist eines der grössten Probleme dieser Studien die zum Teil schwache Reproduzierbarkeit zwischen den einzelnen Messungen. Aussagekräftige Resultate können nur durch eine grosse Anzahl Messungen erreicht werden, die zeitraubend und kostspielig sind. Auf der anderen Seite sind normierte Prüfmethode zwar reproduzierbar aber weisen manchmal nur einen sehr geringen Bezug zur Praxis und vernachlässigen die Interaktionen zwischen Schutz- und Komfortparameter.

In dieser Arbeit werden Materialeigenschaften von Kleidungskombinationen bei gleichzeitigem Einwirken mehrerer Parameter wie Hitze, Feuchtigkeit oder abgegebene Körperwärme analysiert. Es werden Methoden zur praxisnahen Untersuchung des Wärme- und Massetransports entwickelt. Die Analyse der physikalischen Vorgänge in den Textilschichten gibt Aufschluss über Anwendungsbereiche und mögliche Schwachstellen von Hitzeschutzkleidungen.

Der Gegensatz zwischen Anforderungen der Thermoregulation des menschlichen Körpers einerseits und des Schutzes andererseits wird bei Feuerwehrschutzkleidungen besonders deutlich, da zwischen zwei Einflussfaktoren unterschieden werden muss:

- Die Hitze- und Feuchtigkeitseinwirkung der Umgebung
- Die Wärme- und Schweissproduktion des Körpers

Diese Faktoren beeinflussen sich gegenseitig und müssen deshalb zusammen betrachtet werden. In dieser Arbeit werden die Wechselwirkungen zwischen Wärme- und Feuchtigkeitstransfer durch mehrere Textilschichten schrittweise analysiert. Zuerst werden die verschiedenen Einflüsse unabhängig voneinander gemessen und dann sukzessive miteinander gekoppelt. Es wurden verschiedene Praxisversuche mit Feuerwehrleuten durchgeführt, um die Bedingungen bei praxisnahen Übungen zu untersuchen. Die Feuerwehrleute waren in den Brandhäusern normalerweise Strahlungsflüssen von 5 bis 10 kW/m<sup>2</sup> ausgesetzt, wobei in einem Fall eine Intensität von ca. 40 kW/m<sup>2</sup> gemessen wurde. Bei diesen Bedingungen stiegen die Rektaltemperaturen der Probanden schnell an, und die Schweissproduktion erreichte im Durchschnitt 1 l/h.

Mit an der EMPA entwickelten Apparaturen, einem Schwitzarm und einem Schwitztorso, wurden Feuchte- und Wärmetransport simultan bei nicht isothermen Bedingungen gemessen, um die Effekte der Kondensation von Wasserdampf zu analysieren. Auch der Einfluss von Luftschichten zwischen Körper und Kleidung konnte mit diesen Messungen abgeschätzt werden. Es zeigte sich, dass die Resultate der Wasserdampfdurchgangsmessungen von Materialkombinationen auf einem Zylinder (ohne Luftschichten) sehr gut mit denjenigen auf einer flachen Platte korrelieren. Es

wurde deutlich, dass die Pufferwirkung von Kleidungskombinationen mit einer relativ grossen Masse wie Feuerwehrkleidungen auf keinen Fall vernachlässigt werden darf.

Auf dem Gebiet des Hitzeschutzes wurde festgestellt, dass sich atmungsaktive Materialien schon nach kurzer Hitzeexposition mikroskopisch verändern können, was in den meisten Fällen zu einer Verminderung der Wasserdampfdurchlässigkeit führt. Es wurde gezeigt, dass atmungsaktive Materialien nur einen bedingten Schutz gegen heissen Dampf bieten. Der Schutz gegen Dampf konnte mit der Wasserdampfdurchlässigkeit der Proben korreliert werden.

Die Feuchtigkeit beeinflusst den Hitzeschutz sehr stark. Wenn nur die Innenschichten oder die Aussenschichten nass sind, kann der Schutz unter Umständen sogar besser sein als bei einer trockenen Kleidung, da die Verdunstung von Feuchtigkeit eine bestimmte thermische Energie verbraucht. Wenn aber die ganze Kombination nass ist, bewirkt die höhere Wärmeleitung des Wassers und der Feuchtigkeitstransport (heisser Dampf) von aussen nach innen, dass sich der Schutz bei allen Materialien drastisch reduziert.

Wärme- und Massetransportmechanismen in mehrschichtigen Kleidungskombinationen wurden mittels mikroskopischer Vorgänge in den Schichten der Schutzkleidung beschrieben. Einige Annahmen zur Erklärung von Messresultaten (Einfluss der Pufferwirkung des Textils auf den Wasserdampfdurchgang, Interaktionen zwischen Wärme- und Feuchtedurchgang, Kondensation und Wiederverdunstung innerhalb einer Textilkombination) konnten bestätigt werden. Allerdings konnten die Verdunstungsrate und auch der Wassertransport nicht exakt quantifiziert werden.

In dieser Arbeit werden einerseits die Zusammenhänge zwischen Wärme- und Feuchtigkeitsmanagement in mehrschichtigen Kleidungskombinationen aufgezeigt, andererseits aber auch die Wechselwirkungen zwischen Schutz- und Komfortkriterien verdeutlicht. Sie zeigt, dass die Bewertung der Komfort- und Schutzeigenschaften von Kleidungskombinationen aufgrund der existierenden (normierten) Prüfungen manchmal nur wenige Rückschlüsse auf die Praxis erlauben, und dass die Messungen unter praxisnahen Bedingungen häufig ganz andere Resultate ergeben.

## Summary

In order to fulfil the protective functions, heat protective clothing is usually bulky and hinders the thermal and moisture transfer from the body to the environment. In addition to the mostly strenuous work conditions, this equipment also means a load for the body. The clothing offers a sufficient protection against external heat sources but at the same time reduces the release of body heat to the atmosphere. This leads to an increase of the core temperature, which will impede the human body during work. (Heat) stress is the most common source of accidents for fire-fighters (about 50% of the lethal cases in the USA).

As there was so far no test apparatus that simulated the human body during different heat loads, such situations have often been analysed by means of tests with human subjects. Apart from certain ethical considerations, one of the biggest problems of such studies is the sometimes weak reproducibility between the single measurements. Meaningful results can only be achieved through a large number of measurements that are time-consuming and expensive. On the other hand, standardised test methods are reproducible but have sometimes only a very weak link to the practice and neglect the interactions between protection and comfort parameters.

In this work, material properties of clothing combinations during simultaneous action of several parameters like heat, moisture or released body heat are analysed. Methods are developed for the practice-related study of heat and mass transport. The analysis of the physical processes in the textile layers gives information about the range of applications and possible weaknesses of heat protective clothing.

The contrast between the requirements of the thermoregulation of the human body and protection is particularly visible for fire-fighters' protective clothing, as it has to be distinguished between two influencing factors:

- Heat and moisture influence of the environment
- Heat and sweat production of the body

These factors influence each other and have therefore to be considered simultaneously. This study analyses the interactions between heat and moisture step by step. Firstly, the different influences were assessed independently from each other and then combined successively. Different practical tests with fire-fighters were performed to analyse the conditions during practice-related exercises. In the firehouses, the fire-fighters were usually exposed to radiant heat flux densities of 5 to 10 kW/m<sup>2</sup>, but in one case approximately 40 kW/m<sup>2</sup> was measured. In these conditions, the core temperature of the subjects rose quickly and the sweat production reached 1 l/h on average.

Moisture and thermal transport have been measured simultaneously under non-isothermal conditions using apparatus developed at EMPA, namely the sweating arm and the sweating torso, to analyse the effect of the condensation of water vapour. The influence of air layers between body and clothing could also be approximated with these measurements. It has been shown that the results of the water vapour permeabilities on the cylinder correlate very well with the ones on the flat plate. It became clear that the buffering action of clothing combinations with a relatively large mass, such as fire-fighters' clothing, cannot be neglected.

In the field of heat protection, it was noticeable that breathable materials can alter microscopically already after a very short heat exposure and this generally leads to a

reduction of the water vapour permeability. Breathable materials offer only a reduced protection against hot steam; the protection time could be correlated with the water vapour permeability of the samples.

Moisture influences heat protection very strongly. If either the inner layers or the outer layers are wet, the protection can under certain circumstances be even higher than in dry state as the evaporation of moisture requires a certain thermal energy. But if the whole combination is wet, the higher heat conductivity of water and the moisture transport (hot steam) from the outside to the inside leads to a clear reduction of protection for all materials.

Mechanisms of heat and mass transport in multilayers clothing combinations have been described with microscopic processes in the layers of protective clothing. Several assumptions taken for the explanation of test results (influence of the buffering effect of the fabrics on water vapour transport, interactions between thermal and moisture transfer, condensation and re-evaporation inside a fabric combination) were confirmed. Nevertheless, the evaporation rate through the textile layer and also the wicking effects could not be quantified exactly.

This study shows the relationships between heat and moisture management in multilayer clothing combinations but also the interactions between protection and comfort criteria. It points out that the assessment of the performance of clothing combinations with the existing (standardised) tests sometimes have only a weak relationship to practice and that measurements under practice-related conditions often give totally different results.