

**2. Workshop  
Automatisierungstechnische  
Verfahren für die Medizin vom  
25. bis 26. Feb. 1999 in  
Darmstadt**



**„Regelungstechnische Konzepte zur  
Hyperthermieprävention an Hitze­arbeits­plätzen“**

M. Hexamer, X. Xu, J. Werner,  
Zentrum für Biomedizinische Methoden der Medizinischen Fakultät, Abteilung für  
Biomedizinische Technik, Ruhr-Universität-Bochum, Bochum, Deutschland

ISBN: 318318317x  
Pages: 43-44

# Regelungstechnische Konzepte zur Hyperthermieprävention an Hitze-arbeitsplätzen

Hexamer M., Xu X. und Werner J.

Zentrum für Biomedizinische Methoden der Medizinischen Fakultät  
Abteilung für Biomedizinische Technik  
Ruhr-Universität, MA 4/59, D-44780 Bochum

## Einleitung

An Arbeitsplätzen mit erhöhter Verbrennungs- oder Kontaminationsgefahr, muß der Mensch von seiner unmittelbaren Umgebung mittels adäquater Schutzkleidung abgeschirmt werden. Derartige Schutzkleidung verhindert jedoch meist weitgehend auch die Abfuhr der metabolisch erzeugten Wärme, mit der Folge einer starken Wärmebelastung für den Organismus. Aus dieser Situation kann es zur Hyperthermie oder einem lebensbedrohlichen Hitzschlag kommen. Um dies zu verhindern, kann mit speziellen Kühlanzügen eine direkte Körperkühlung durchgeführt werden. Ziel dieser Studie war es, ein Automatisierungskonzept für die Hyperthermieprävention zu erarbeiten, das sich am tatsächlichen thermischen Status des Menschen orientiert.

## Kühlanzug (Stellglied)

Ausgangspunkt war ein einteiliger Kühloverall (Stellglied), wie er von der NASA im Apollo-Raumfahrtprogramm eingesetzt wurde. Dieser bedeckt den ganzen Körper (außer Kopf, Händen und Füßen) und besteht aus einem Schlauchgeflecht (Tygon, 91m, 1,6mm/3,2mm innerer/äußerer Durchmesser), das fest auf der Haut anliegt. Das Kühlmittel (Wasser) wird nach Zufuhr durch einen dicken Zuleitungsschlauch auf das Schlauchgeflecht verteilt, durchströmt den Overall und wird in einen ableitenden Schlauch gesammelt. Der Wärmeentzug kann über die Wassertemperatur oder die Durchströmung gesteuert werden, wobei hier die Temperierung des Wassers mit elektrisch steuerbaren Laborthermostaten vorgenommen wurde.

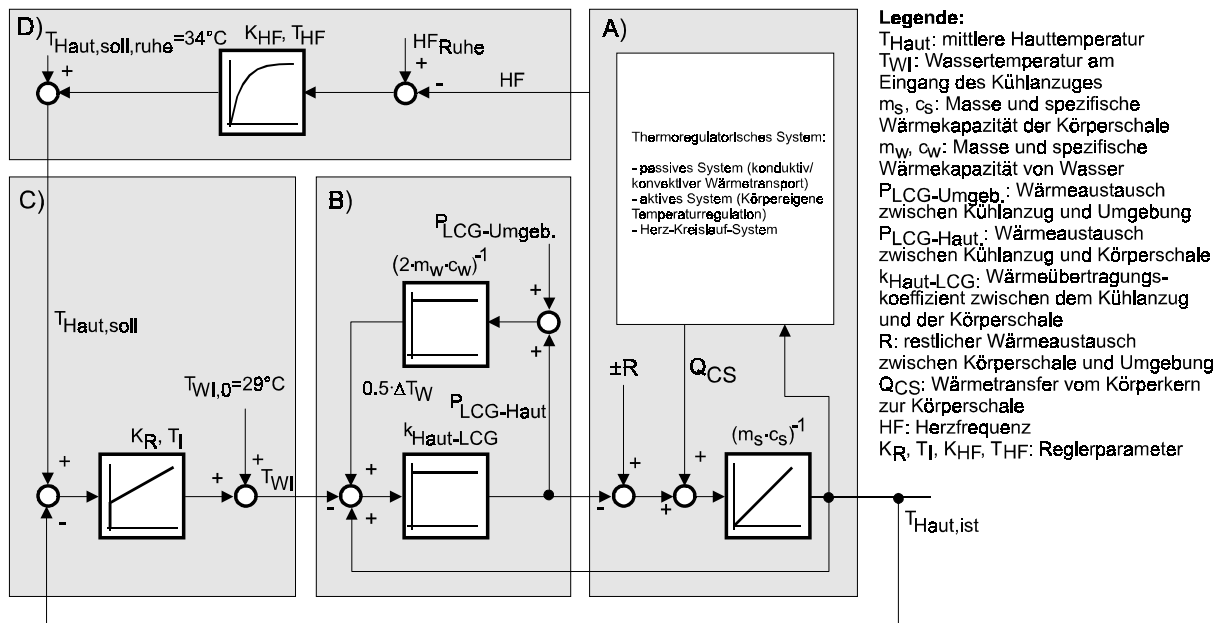


Abbildung 1: Blockschaltbild des Regelungskonzeptes zur Hyperthermieprävention mit einem Kühlanzug (LCG=liquid cooling garment)

- A) thermoregulatorisches System des Menschen mit Darstellung der peripheren Wärmebilanz als Schnittstelle zwischen dem Körper und dem Kühlanzug
- B) einfaches Ersatzmodell des Wärmetransfers eines Kühlanzuges
- C) unterlagerte Regelung der mittleren Hauttemperatur
- D) äußere Rückkopplung physiologischer Variablen (hier Herzfrequenz)

### Automatisierungskonzept

Das realisierte Konzept basiert auf einer Kaskadenregelung mit einem inneren Regelkreis für die mittlere Hauttemperatur (Abb. 1). Ein PI-Regler vermied auf dieser Ebene bleibende Regelabweichungen. Der Sollwert, wird von der äußeren Rückkopplung anhand des thermophysiologicalen Status vorgegeben. Stellgröße der Hauttemperaturregelung ist die Wassertemperatur am Einlaß des Kühlanzuges.

### Unterlagerte Regelung der Hauttemperatur

Der Ansatz als Kaskadenregelung bietet einige Vorteile, die mit dem integralen Anteil der inneren Hauttemperaturregelung begründet werden können. Letztlich wird dadurch der Wärmeentzug des Kühlanzuges immer so eingestellt, daß eine ausgeglichene Wärmebilanz an der Haut aufrechterhalten wird:

- 1) Veränderungen der metabolischen Wärmeproduktion (Arbeit) werden durch den Hauttemperaturregler in ihren Auswirkungen auf die Hauttemperatur kompensiert.
- 2) Das gleiche gilt für externe Wärmebelastungen, die auf die Haut einwirken (Strahlung, Konvektion und Kondensation der Umgebungsfeuchte). Diese exogene Belastung kann durchaus im Bereich der endogenen liegen (100..500W).
- 3) Kompensiert im gleichen Sinne wird auch die direkte Beeinflussung des Kühlanzuges durch die Umgebung und die sich betriebsbedingt ändernden Wärmeübertragungseigenschaften des Systems (Durchfeuchtung, Erhöhung des hydraulischen Fließwiderstandes bei abnehmender Temperatur).

Eine experimentelle Studie, bestätigte diese theoretischen Vorteile der unterlagerten Hauttemperaturregelung. Männliche Versuchspersonen arbeiteten mit unterschiedlicher Intensität auf einem Fahrradergometer bei moderat heißen Umgebungsbedingungen (35°C, 40% r.F.). Der Sollwert der Hauttemperatur betrug konstant 32°C, d.h. die äußere Rückkopplung war hier inaktiv (s. Abb. 1). Es zeigte sich, daß der Hauttemperaturregler auf die unterschiedliche endogene Wärmeproduktion durch entsprechende Variation der Kühlleistung reagierte. Abgesehen von transienten Fluktuationen wurde keine bleibende Regelabweichung beobachtet. Indirekt bewiesen diese Experimente auch, daß variierende exogene Belastungen und betriebsbedingte Änderungen des Wärmeüberganges kompensiert werden. Abhängig vom Probanden wurden ca. 60-70% der anfallenden endogenen Wärme durch den Kühlanzug entzogen, der verbleibende Rest wurde durch Schwitzen abgegeben, was bei höheren Belastungen unangenehm empfunden wurde und eine höhere Beanspruchung für das thermoregulatorische System bedeutet.

### Äußere Rückkopplung physiologischer Variablen

Um den zuletzt genannten Nachteil zu kompensieren, wurde vermittels der äußeren Rückkopplung, eine Anpassung des Hauttemperatursollwertes an die tatsächliche thermische Beanspruchung vorgenommen. Als sehr geeignet erwies sich die Herzfrequenz, die sehr eng mit der endogenen Wärmeproduktion korreliert. Aus den individuellen Belastungsantworten dieser Variablen wurde die äußere Rückkopplung so dimensioniert, daß eine maximale Absenkung des Hauttemperatursollwertes von ca. 4°C ausgehend vom Ruhewert (34°C) stattfindet. Zusätzlich wurde die Herzfrequenz mit einem Verzögerungsglied 1. Ordnung geglättet. Die Rückkopplung der Herzfrequenz über Verzögerungsglieder ist damit zu begründen, daß erstens kurzfristige, psychogene Fluktuationen der Herzfrequenz, die ihre Ursache nicht im thermischen Status haben, gedämpft werden müssen und zweitens ein zu schneller Einsatz der Kühlung bei einem Belastungssprung verhindert werden muß, um eine Konstriktion der Hautgefäße zu verhindern. Letzteres würde zu einer mittelfristigen Reduktion der Wärmeabfuhr führen. Die experimentelle Überprüfung bestätigte diese Vorgehensweise, da sich der Anteil des Wärmeentzug durch den Kühlanzug an der Gesamtwärmeproduktion auf ca. 70..80% erhöhte. Folglich verminderte sich die Schweißrate und das Komfortniveau erhöhte sich.

### Multi-Zonen-Regelung

Ein wesentlicher Nachteil bei dem initial verwendeten Kühlanzug mit einem globalen Kühlkreislauf für den gesamten Körper ist die unphysiologische Verteilung der Kühlleistung. Über den wenig beanspruchten Körperpartien (Bauch) wurde relativ zu stark und über den stark beanspruchten (Beine) relativ zu schwach gekühlt, was zu thermischen Unbehagen führte. Dieser Nachteil wurde durch einen anderen Kühlanzug mit drei unabhängig geregelten Kühlkompartimenten überwunden. Das zuvor beschriebene Regelungskonzept wurde, nach Anpassung der wesentlichen Reglerparameter auf das jeweilige Kompartiment, vollständig übernommen.

Durch diese Maßnahme konnte die Kühlung an die regionalen Erfordernisse angepaßt werden, so daß das subjektive Komfortniveau der Versuchspersonen erheblich zunahm.

### Literatur

- Hexamer, M. and J. Werner** (1997). Control of liquid cooling garments. Technical Control of Mean Skin Temperature and its Adjustment to Exercise. *Appl. Human Sci.* **16** (6), 237-247.
- Xu X., M. Hexamer and J. Werner.** Multi-loop Control of Liquid Cooling Garments. *Ergonomics*, (in press).