

Arbeits- und Entwärmungsphasen in wärmebelasteten Arbeitsbereichen

Hj. Gebhardt, B. Kampmann, B. H. Müller

**Forschung
Projekt F 1860**

**Forschung
Projekt F 1860**

Hj. Gebhardt
B. Kampmann
B. H. Müller

**Arbeits- und Entwärmungsphasen in
wärmebelasteten Arbeitsbereichen**

Dortmund/Berlin/Dresden 2007

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Erprobung der Anwendung des PHS-Modells bei der Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen in wärmebelasteten Arbeitsbereichen“ - Projekt F 1860 - im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dr.-Ing. Hansjürgen Gebhardt
PD Dr. rer. nat. Bernhard Kampmann
Prof. Dr.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Bernd Hans Müller

ASER - Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie e. V. an der Bergischen Universität Wuppertal
Corneliusstr. 31, 42329 Wuppertal
Internet: www.institut-aser.de

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund
Telefon: 0231 9071-0
Telefax: 0231 9071-2454
E-Mail: poststelle@baua.bund.de
Internet: www.baua.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40-42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Proschhübelstr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.

ISBN 978-3-88261-056-7

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat.....	4
Abstract	5
Résumé	6
1 Einleitung und Zielsetzung	7
2 Grundlagen	8
2.1 Zur Physiologie der Hitzearbeit.....	9
2.1.1 Wirkungen von Hitzearbeit.....	9
2.1.2 Physiologische Grenzkriterien	11
2.2 Zum PHS-Modell.....	12
2.2.1 Historie und Modellentwicklung	12
2.2.2 Entwicklung des PHS Index und Verbesserung der Modellannahmen.....	13
2.3 Diskussionsvorschlag zur Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen.....	15
3 Methoden.....	17
3.1 Laboruntersuchungen.....	17
3.1.1 Zielsetzung	17
3.1.2 Durchführung	17
3.2 Modellberechnungen	20
4 Ergebnisse.....	21
4.1 Laboruntersuchungen.....	21
4.2 Vergleich mit Modellberechnungen.....	26
4.3 Anwendung des PHS-Modells bei der Gestaltung von Entwärmungsphasen.....	30
4.4 Möglichkeiten der Einbeziehung der Wärmestrahlung.....	35
4.4.1 Physiologisch äquivalente Temperatur.....	35
4.4.2 Operative Raumtemperatur	37
4.4.3 Zur Abhängigkeit der Globetemperatur bei unterschiedlichen Strahlungsverhältnissen	38
4.4.4 Empfehlung.....	39
5 Handlungshilfe zur Gestaltung von Entwärmungsphasen.....	39
6 Zusammenfassung und Empfehlungen	41
7 Literatur	44
7.1 Schrifttum	44
7.2 Aktuelle Normen.....	47
8 Verwendete Abkürzungen und Symbole	49
9 Abbildungsverzeichnis.....	50
10 Tabellenverzeichnis	52

Arbeits- und Entwärmungsphasen in wärmebelasteten Arbeitsbereichen

Kurzreferat

Wärmebelastete Arbeiten sind in vielen Industrie- aber auch Dienstleistungsbereichen vorzufinden. Dabei handelt es sich häufig um Expositionen, die zwar nur zeitweise erforderlich sind, dann jedoch deutliche klimatische Belastungen aufweisen, als Beispiel seien hier Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an heißen Anlagen und Aggregaten genannt. Die zeitliche Gestaltung der Arbeitsphasen und eine ausreichende Dimensionierung von Entwärmungsphasen bildet hier eine Maßnahme, um den Schutz der Gesundheit zu gewährleisten. Aufbauend auf einem Diskussionsvorschlag von Pangert et al. (2003) wurden hierzu in einem ersten Schritt orientierende physiologische Laboruntersuchungen an Stützstellen durchgeführt, die in ihrem Ergebnis eine gute Übereinstimmung mit den dortigen Empfehlungen zeigten. Dabei wurde jeweils ein Bezugszeitraum von einer Stunde zugrunde gelegt, der in Arbeits- und Entwärmungsphasen unterteilt wurde. Mit Blick auf die Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter – neben den Klimaparametern insbesondere die Arbeitsschwere, die Bekleidung und auch die Zykluszeit –, die im Rahmen physiologischer Untersuchungen naturgemäß nur unvollständig abgedeckt werden können, wurde in einem nächsten Schritt die Anwendung des Predicted-Heat-Strain-(PHS-)Modells (vgl. DIN EN ISO 7933) untersucht. Dieses erlaubt die Modellierung der für die Beurteilung der Wärmebelastung wesentlichen Beanspruchungsgrößen Körperkerntemperatur und Schweißproduktion auf der Grundlage der o.a. Einflussgrößen und kann als „Stand der Technik“ bei der Prognose physiologischer Beanspruchungsgrößen unter Wärmebelastung betrachtet werden. Insbesondere lassen sich auch Vorgangsfolgen - also auch Wechsel zwischen Arbeits- und Entwärmungsphasen – über das Modell beschreiben und prognostizierte Zeitverläufe der Beanspruchungsgrößen ermitteln. Es werden Hinweise zum praxisgerechten Einsatz des Modells bei der Gestaltung von Entwärmungsphasen bei Hitzearbeit gegeben. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sowie der Diskussionsvorschlag fanden dabei im Sinne von Stützstellen Berücksichtigung. Im Ergebnis konnte dabei die grundsätzliche Eignung des Modells aufgezeigt werden, wodurch die genannten Einflussparameter in detaillierterer Form bei der Gestaltung von Entwärmungsphasen berücksichtigt werden können.

Schlagwörter:

Hitzearbeit, Entwärmungsphasen, Modellrechnungen, Predicted-Heat-Strain-Modell

Work-rest-cycles during work in the heat

Abstract

Working under warm and hot conditions are to be found in a lot of industrial working places and also in service areas. Besides, it is frequently associated with expositions, which are required only occasionally, then, however, with clear heat loads, for example maintenance works on hot machines and generators. The temporal organization of the working phases and a sufficient time of cooling phases here forms a measure to guarantee health protection. Based on a suggestion by Pangert et al. (2003) in a first step orienting physiological laboratory tests under defined conditions were performed, which in their result showed a good agreement with the recommendations. Besides, a period of one hour was taken in each case which became partitioned in working and cooling phases. With a look at the multiplicity of the parameters to be considered – besides the climate parameters particularly the work load, the clothing and also the cycle time – which naturally can only be covered incompletely within the framework of physiological experiments, in a next step the application of the Predicted Heat Strain (PHS) model (cf DIN EN ISO 7933) was examined. Based on the parameters given above, this model allows the prediction of the body core temperature and sweat production as the fundamental strain parameters for the assessment of working under hot environmental conditions and can be considered as the "state of the art" concerning the prediction of physiological parameters for thermal stress. Particularly work sequences and therefore also changes between exposition and resting phases can be examined. As a result indications of the practical application of the model concerning the organization of work and cooling phases are given. The results of the performed laboratory studies as well as the Pangert-suggestion found consideration. Besides, in the result the fundamental aptitude of the model could be shown by which the given parameters of influence can be considered in specified form when organizing required cooling phases.

Key words:

work in the heat, cooling phases, model calculations, Predicted Heat Strain model

Régimes d'alternance travail-repos dans des zones de travail en ambiance chaude

Résumé

Les travaux en ambiance chaude existent dans de nombreux milieux industriels, mais aussi dans le secteur tertiaire. Bien qu'il ne s'agisse fréquemment que d'expositions occasionnelles, celles-ci présentent toutefois des contraintes thermiques importantes, comme par exemple lors de travaux de réparation et d'entretien d'installations et d'équipements chauds. L'organisation horaire de phases de travail, en alternance avec des phases de refroidissement suffisamment longues, représente une mesure préventive, qui garantit la protection de la santé. Dans cette optique et sur la base d'une proposition de discussion de Pangert et al. (2003), la première étape fut d'effectuer, à des points de repères, des examens physiologiques en laboratoire, dont les résultats concordèrent avec les recommandations. Pour ce faire, on se basa sur une période de référence d'une durée d'une heure, qui fut subdivisée en phases de travail et de refroidissement. Vu les multiples paramètres à prendre en compte – mis à part les paramètres d'ambiance thermique, en particulier la charge de travail, l'habillement, ainsi que le temps de cycle – qui, dans le cadre d'exams physiologiques, ne peuvent, par la nature des choses, être pris en considération que de manière incomplète, on examina, dans un second temps, l'application pratique du modèle Predicted-Heat-Strain (PHS) (cf. norme DIN EN ISO 7933). Celui-ci permet la modélisation des principales dimensions de sollicitation pour l'évaluation de l'astreinte thermique, à voir la température corporelle rectale et la production de sueur, sur la base des facteurs d'influence susmentionnés, et est considéré comme l'« état de la technique » pour la prédiction de dimensions physiologiques d'astreinte thermique. Ce modèle permet en particulier de décrire le déroulement du processus – ainsi aussi l'alternance entre les phases de travail et de refroidissement – et de déterminer l'évolution chronologique pronostiquée des dimensions de sollicitation. L'application pratique du modèle pour l'organisation horaire de phases de refroidissement en ambiance de travail chaude est expliquée. Les résultats des examens réalisés, ainsi que la proposition de discussion ont été pris en considération en tant que points de repère. Finalement, la validité fondamentale du modèle a pu être démontrée, suite à quoi les paramètres d'influence cités plus haut peuvent être pris en compte de manière plus détaillée lors de l'organisation horaire de phases de refroidissement.

Mots clés:

Travail en ambiance chaude, phases de refroidissement, modèles de calcul, modèle Predicted-Heat-Strain

1 Einleitung und Zielsetzung

Obwohl in der Vergangenheit eine Reihe von Untersuchungen im Bereich wärmebelasteter Arbeitsplätze durchgeführt worden sind, finden sich wenige Erkenntnisse zu Kurzzeitexpositionen. Vielmehr liegt der Schwerpunkt in der Beurteilung der Dauerexposition. Dies zeigt sich z.B. auch in der aktuellen DIN 33403, Teil 3 „Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung: Beurteilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Klimasummenmaße“, innerhalb der bis auf eine Betrachtung bei erhöhter Wärmestrahlungsexposition Kurzzeitexpositionen ausgeklammert werden.

Neben der Beurteilung von Kurzzeitexpositionen an sich ist darüber hinaus im Zusammenhang mit der Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen in wärmebelasteten Arbeitsbereichen ein möglicher erneuter Einsatz nach einer Erholungsphase in einem klima-neutralen Bereich von erheblicher praktischer Bedeutung.

Dabei gilt auch zu berücksichtigen, dass nicht selten erhöhte Außentemperaturen in den Sommermonaten erhöhten Einfluss auf die Klimasituation im Arbeitsbereich haben. Gerade in den letzten Jahren waren vermehrt länger andauernde Hitzeperioden mit Tagesaußentemperaturen oberhalb von 30 °C festzustellen.

Ansätze finden sich u.a. bei NIOSH, innerhalb der ISO 7243 bzw. DIN EN 27243, der Vorgängerversion der aktuellen DIN 33403, Teil 3 sowie im TGL-Normenwerk. Diese verbinden jedoch jeweils nur ausgewählte Klimagrößen und weisen – wie man zeigen kann – zum Teil deutlich sich widersprechende Richtwerte für Kurzzeitexpositionen aus (s.a. Pangert, Bux, Frener (2003) [24]).

Nicht zuletzt diese Widersprüche und die damit verbundenen Unsicherheiten bei der Beurteilung kurzzeitiger, oftmals wiederholter Arbeiten in wärmebelasteten Bereichen führten auf Initiative des Länderausschusses für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) unter der Leitung des Thüringer Ministeriums für Soziales, Familie und Gesundheit zu einer Sammlung von Praxis-Beispielen bei kurzzeitiger Hitzearbeit.

Auf der Grundlage einer Auswertung in Betrieben praktizierter Regelungen zu Arbeits- und Entwärmungsphasen in wärmebelasteten Arbeitsbereichen, die weniger organisatorisch als physiologisch begründet waren und unter Berücksichtigung bestehender Ansätze, wurde ein „pragmatischer“ Vorschlag erarbeitet und zur Diskussion gestellt, der 2003 veröffentlicht wurde (Pangert, Bux, Frener (2003) [24]).

Mit dem PHS- („Predicted-Heat-Strain“-)Modell liegt ein weiterer Ansatz für die Ableitung von Arbeits- und Entwärmungsphasen vor. Das Modell basiert auf einer Wärmebilanzbetrachtung und kann als „Stand der Technik“ bei der Prognose physiologischer Beanspruchungsgrößen unter Wärmebelastung betrachtet werden. Es geht auf erste Vorschläge von Vogt et al. (1978) [30] zurück, wurde im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit weiterentwickelt und als überarbeitete Fassung der ISO 7933 – „Hot environments – Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate“ (1989) in die internationale Normung eingebracht. Die zwischenzeitlich veröffentlichte ISO 7933 – „Hot environments – Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of predicted heat strain“ wurde Ende 2004 als DIN EN ISO 7933 „Ergonomie der thermi-

schen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung“ in das europäische Normenwerk übernommen und hat dort die bisherige DIN EN 12515 „Warmes Umgebungsklima – Analytische Bestimmung und Beurteilung der Wärmebelastung durch Berechnung der erforderlichen Schweißrate“ ersetzt.

Kennzeichnend für dieses Modell ist, dass alle wesentlichen Einflussgrößen und deren Zusammenwirken berücksichtigt werden. Diese Eigenschaft ist grundsätzlich positiv zu beurteilen, birgt jedoch auch Gefahren, da die komplexen Zusammenhänge der Thermoregulation naturgemäß ebenso komplexe Beschreibungen erfordern und damit die Anwendung zunächst Experten vorbehalten sein sollte.

In diesem Zusammenhang wurden für Eckpunkte und ausgewählte Anteile von Arbeits- und Entwärmungsphasen Laborversuche durchgeführt, anhand derer die vorgeschlagenen Arbeits- und Entwärmungsphasen durch physiologische Messungen überprüft wurden.

So konnte die Anwendung des PHS-Modells sowohl bei der Nachbildung der durchgeführten Laborversuche als auch bei Nachbildung weiterer Belastungskombinationen zur Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen erprobt werden, wobei die Berechnungsergebnisse einerseits mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen, andererseits mit dem Diskussionsvorschlag verglichen werden konnten.

2 Grundlagen

Der Mensch muss als „homiothermes“ (d.h. „gleichwarmes“) Lebewesen – wie beispielsweise auch Säugetiere und Vögel – seine Körpertemperatur innerhalb enger Grenzen halten, weil seine Körperfunktionen für einen Temperaturbereich um etwa 37 °C optimal eingerichtet sind. Damit der Körper in unterschiedlichem Umgebungsklima oder bei unterschiedlicher innerer Wärmeproduktion seine Temperatur annähernd konstant hält, wird die Körpertemperatur geregelt; hierzu stehen verschiedene Mechanismen der Temperaturregelung zur Verfügung. – Andere Spezies sind „poikilotherm“ (d.h. „wechselwarm“), beispielsweise Insekten und Reptilien; ihre Körpertemperatur hängt stark von der Umgebungstemperatur ab und damit auch die Funktionsfähigkeit des Körpers.

Nach Aschoff (1971) [1] kann man den menschlichen Körper in einen „Körperkern“ (innere Organe, Gehirn) und eine „Körperschale“ (Haut, Arme, Beine) aufgeteilt denken. Beim Menschen ist nur die Temperatur des Körperkerns geregelt („homiothermes Kerngebiet“). Die im Körper erzeugte Stoffwechselwärme wird an die Umgebung abgegeben; die Körperschale zeigt demzufolge ein Temperaturgefälle zur Umgebungstemperatur hin, das durch den Wärmefluss bedingt ist (und ist also eher poikilotherm).

2.1 Zur Physiologie der Hitzearbeit

Für die Regulation der Körpertemperatur bei unterschiedlicher Arbeitsschwere (innerer Wärmeproduktion) und unterschiedlichen Klimabedingungen (unterschiedlichen Möglichkeiten zur Wärmeabgabe an die Umgebung) stehen dem Körper verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

Die **autonome Thermoregulation** versucht, die Körpertemperatur durch verschiedene Mechanismen in einem engen Bereich um 37 °C zu halten:

- Die Durchblutung der Körperschale kann in weiten Grenzen verändert werden (nach Aschoff (1971) [1]: Finger: mehr als 1:600; Hand: etwa 1:30; Hautbereiche am Rumpf: etwa 1:7) und bewirkt so eine unterschiedliche Wärmeleitung vom Körperkern an die Umgebung: in kalter Umgebung wird die Durchblutung verringert und bewirkt so geringere Wärmeverluste des Körperkerns, bei hohen Umgebungstemperaturen wird die Durchblutung erhöht und es kann dann viel Stoffwechselwärme an die Umgebung abgegeben werden.
- Bei hohen Umgebungstemperaturen können die Schweißdrüsen des Menschen Schweiß produzieren, dessen Verdampfung dazu beitragen kann, erhebliche Wärmemengen aus dem Körper herauszuleiten: die Verdampfung von 1 l Schweiß pro Stunde kann eine Kühlleistung von über 600 W bewirken; eine entsprechend schwere Körperarbeit, die je nach Wirkungsgrad etwa 150 bis 200 Watt abgegebener Leistung (d.h. externer mechanischer Leistung) auf einem Fahrradergometer entsprechen würde, können nicht viele Personen über mehrere Stunden hinweg erbringen.

Eine weitere wichtige Möglichkeit zur Thermoregulation ist die „Verhaltensregulation“: außerhalb des Bereiches des thermischen Komforts versucht der Mensch (bewusst oder auch unbewusst) durch sein Verhalten, seine thermische Befindlichkeit wieder komfortabel zu gestalten: Dies kann darin bestehen, im Sommer Schatten aufzusuchen oder in der Kälte in den Windschatten zu gelangen, sowie – entsprechend dem eigenen thermischen Empfinden – Kleidung abzulegen oder anzuziehen, oder – etwa in Hitze – die Arbeitsschwere (und damit die innere Wärmeproduktion) zu verringern (z.B. Kampmann (2000) [15]).

Für bislang unbekannte Klimabereiche muss Verhaltensregulation gelernt (oder bei anderen Personen abgeschaut) werden; so müssen etwa Bergleute, die bisher in kühlen Arbeitsbereichen gearbeitet haben, sich in Arbeitstempo und notwendigen Trinkmengen an ihren Arbeitskollegen orientieren, wenn sie die gleiche Arbeit in heißem Klima durchführen sollen.

2.1.1 Wirkungen von Hitzearbeit

Entsprechend den physiologischen Mechanismen zur Temperaturregelung findet man folgende Auswirkungen:

- Die Herzschlagfrequenz erhöht sich unter Hitzebelastung, weil mehr Blut in die peripheren Körperpartien geleitet wird; derjenige Anteil der Herzschlagfrequenz, der durch die Klimabelastung (bei gleichbleibender Körperarbeit) verursacht

wird, wird auch als „thermische Pulse“ bezeichnet (z.B. Brouha (1963) [4], Kampmann (2001) [11]).

- Die Schweißproduktion und -verdampfung, die zur Kühlung im Hitzeklima beiträgt, hat einen Wasser- und – wegen des Salzgehaltes im Schweiß – auch Mineralverlust des Körpers zur Folge; wenn diese Verluste nicht ausgeglichen werden, können sie zu Gesundheitsstörungen führen.
- Sofern die erforderliche Ableitung von Wärme aus dem Körper durch die Erhöhung der Blutzirkulation und durch Schweißverdampfung nicht mehr vollständig möglich ist, steigt die Körpertemperatur an. Dies ist bei körperlicher Arbeit in heißem Klima sowie bei Sport oft der Fall. Wenn die Körpertemperatur auf einem erhöhten Niveau stabilisiert werden kann, bestehen grundsätzlich keine Probleme, sofern die Verluste an Wasser und Salz (durch die Schweißabgabe) ersetzt werden.
- Wenn die Körpertemperatur sich nicht mehr konstant einstellen kann und immer weiter ansteigt, muss die Hitzeexposition abgebrochen werden, bevor Gesundheitsstörungen eintreten.

Abb. 2.1 zeigt die Bereiche der Belastung durch warmes Klima schematisch auf:

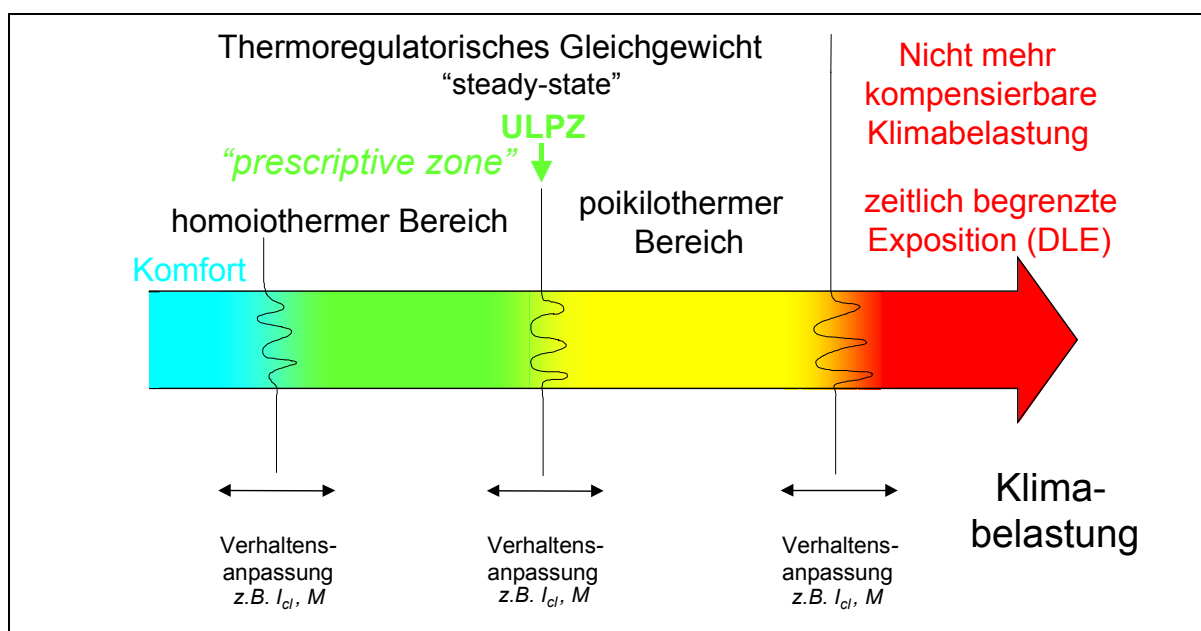


Abb. 2.1 Einteilung der Klimabelastung nach der Auswirkung auf die Körpertemperatur (aus: Kampmann (2000) [15]).

An den **Komfortbereich** schließt sich ein Bereich an, in dem die Körpertemperatur noch konstant ausgeregelt werden kann, obwohl die Herzschlagfrequenz bereits ansteigt (Erhöhung der peripheren Durchblutung) und auch schon die Schweißproduktion einsetzen kann. Lind (1963) [17] bezeichnet diesen Bereich als „**prescriptive zone**“. Da die Körpertemperatur nicht ansteigt, kann die Klimabelastung als unbedenklich eingestuft werden, soweit die Verluste an Wasser und Mineralstoffen im Schweiß im Verlauf der Hitzeexposition ersetzt werden.

Wenn bei zunehmender Klimabelastung oder Arbeitsschwere die Körpertemperatur ansteigt (und damit der Körper sich „poikilotherm“ verhält), hat man den „Upper Limit of the Prescriptive Zone“ (**ULPZ**) überschritten. Auch in diesem Bereich ist noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht („steady-state“) möglich.

Wenn die im Körper produzierte Stoffwechselwärme nicht mehr an die Umgebung abgegeben werden kann, steigt die Körpertemperatur (und damit verbunden auch die Herzschlagfrequenz) immer weiter an: bei einer solch hohen Klimabelastung muss die Exposition abgebrochen werden, bevor Gesundheitsstörungen auftreten (**Duration Limited Exposure, DLE**). In diesem Bereich von Klimabelastungen sind Entwärmungsphasen erforderlich, nach denen die Arbeit im Klima wieder aufgenommen werden kann. So liegen beispielsweise für Einsätze der Grubenwehr (Feuerwehr im Bergbau) Einsatztabellen vor, nach denen die maximale Dauer von Einsätzen im Klima in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit vorgegeben ist [27].

Die Grenzen zwischen diesen Bereichen hängen von den Einzelparametern des Klimas ab. Auf Seiten der Verhaltensregulation können sie durch die geeignete Wahl der Wärmeisolation, durch die Bekleidung und insbesondere durch die Veränderung der Arbeitsschwere, d.h. der inneren Wärmeproduktion des Körpers, verschoben werden.

Neben direkten Auswirkungen der Klimabelastung auf die Gesundheit (z.B. Hitzekollaps, Hitzschlag, u.a. (z.B. Piekarski (1982) [26], Kampmann (2004) [14]) lässt im Vorfeld solcher Schädigungen mit zunehmender Klimabelastung zunächst die maximal ausführbare physische Arbeit nach (z.B. Wenzel, Piekarski (1984) [32], S. 113), und bei weiterem Anstieg der Klimabelastung wird dann auch eine Leistungsminde- rung bei psychischen und psychophysischen Aufgaben beobachtet (z.B. Wenzel, Piekarski (1984) [32], S. 115ff. und Parsons (2003) [25]), wodurch dann beispielsweise auch vermehrt Unfälle verursacht werden können.

2.1.2 Physiologische Grenzkriterien

Die Herzschlagfrequenz – als Parameter für die Herz-Kreislauf-Belastung – soll bei Hitzearbeit nicht über vorgeschlagene Grenzwerte hinaus ansteigen. Diese Grenzwerte hängen von der Arbeitsschwere ab (Lange-Andersen et al. (1971) [33]). Da der maximal beobachtete Wert der Herzschlagfrequenz vom Lebensalter abhängt (WHO [16]), werden meist Grenzwerte wie: „220 – Alter“ oder „200 – Alter“ vorgeschlagen. Bei schwerer körperlicher Arbeit (etwa Feuerwehrleute bei Übungen (z.B. Vogelsang, Ulmer (1986) [29]) oder Bergleute an heißen Arbeitsplätzen (z.B. Kalkowsky et al. (2003) [9]) wird beispielsweise der Grenzwert „200 – Alter“ jedoch häufig überschritten.

Für Arbeiten unter Hitzebelastung werden arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen vorgesehen (BGI 504-30 [3]), mittels derer Gesundheitsrisiken bei Hitzearbeit ermittelt und ausgeschlossen werden sollen.

Für die Körpertemperatur werden in einem WHO-Bericht [33] Grenzwerte angegeben, die von Lind (1963) [17] bei Untersuchungen an der oberen Grenze der „prescriptive zone“ (ULPZ) ermittelt wurden: bei schwerer Körperarbeit liegt diese Grenze (nach Lind) bei 38,0 °C Körperkerntemperatur. – Bei Feldstudien im Bergbau (Kampmann et al. (2001) [13]) wurde beobachtet, dass diese Grenze oft und auch für

längere Zeitabschnitte überschritten wird, ebenso bei Übungen der Grubenwehr (Funkemeyer et al. (1994) [6]).

Einbußen der Leistungsfähigkeit werden in Veröffentlichungen bereits beobachtet, wenn der Flüssigkeitsverlust 1 % der Körpermasse erreicht (s.a. Shirreffs, Maughan (2000) [28]). Entsprechend sollten Flüssigkeits- und Elektrolytverluste, die im Hitze-klima durch Schwitzen verursacht werden, bei länger andauernder Hitzearbeit durch ausreichendes Trinken ausgeglichen werden.

2.2 Zum PHS-Modell

Das PHS-(Predicted-Heat-Strain-)Modell wurde im Rahmen einer internationalen Forschungs Kooperation entwickelt. Grundlage bildete das Modell der Erforderlichen Schweißrate (SW_{req}) (vgl. EN 12515), wobei Kritikpunkte, die im Zusammenhang mit der Übertragung der ISO 7933 (1989) in das europäische Normenwerk deutlich wurden, aufgegriffen wurden und zu wesentlichen Modellverbesserungen beigetragen haben.

2.2.1 Historie und Modellentwicklung

Die Norm ISO 7933 (1989) stellte den letzten Entwicklungsstand des Klimasummenmaßes „Erforderliche Schweißrate“ dar und geht von der Wärmebilanz des Menschen aus. Solche Berechnungen wurden seit den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts versucht; 1955 stellten Belding und Hatch ein Klimasummenmaß auf der Grundlage der Energiebilanz vor: den Heat-Stress-Index (Belding, Hatch (1955) [2]).

Die Berechnung der Energiebilanz hat gegenüber anderen Ansätzen den Vorteil, dass alle wichtigen Parameter - wie die Arbeitsschwere oder die Wärmeisolation der Bekleidung - berücksichtigt werden können, sofern die Auswirkung dieser Parameter auf die Wärmebilanz des Menschen korrekt beschrieben werden kann.

So beschrieb die o.a. Norm ISO 7933 (1989) die Wärmebilanz des Menschen in der Weise, dass die im Körper umgesetzte Energie – abzüglich der nach außen abgegebenen mechanischen Arbeit – durch Konvektion, Wärmeleitung, Verdunstung von Schweiß und durch Wärmestrahlung im thermischen Gleichgewicht vom Körper wieder abgegeben werden muss; ansonsten tritt eine Wärmespeicherung im Körper auf (nähere Einzelheiten z.B. auch in Kampmann, Piekarski (1995) [10]).

Die Widersprüche und Unzulänglichkeiten innerhalb des in ISO 7933 (1989) verwendeten Wärmebilanzmodells der erforderlichen Schweißrate SW_{req} , die zu verschiedenen Fehlbeurteilungen der Klimabelastung geführt haben, wurden von verschiedenen Autoren (z.B. Kampmann, Piekarski (1995) [10], Voß et al. (1991) [31]) aufgezeigt und in das Normungsgremium eingebracht. Es stellten sich deutliche Beschränkungen des Index heraus, die sich bezogen auf

- die Vorhersage der Hauttemperatur,
- den Einfluss der Bekleidung auf konvektiven und evaporativen Wärmeaustausch,

- den kombinierten Einfluss von Bekleidung und Bewegung auf die Wärmeisolation (dynamische Isolationswerte für konvektiven Wärmeaustausch und Wasserdampfdiffusion),
- den Zusammenhang zwischen Energieumsatz und Anstieg der Körperkerntemperatur sowie
- die Vorhersage der maximal zulässigen Aufenthaltsdauer im Klima (DLE).

Die der Norm ISO 7933 zugeordnete CEN-Norm DIN EN 12515 wurde daraufhin mit Warnvermerken für die Anwendung der Norm in feucht-warmen Klimabereichen, bei hoher Windgeschwindigkeit, bei hoher Belastung durch Wärmestrahlung und im Fall schweißdurchtränkter Bekleidung versehen. Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms BIOMED 2 wurde eine internationale Arbeitsgruppe gebildet, die die vorgetragenen Kritikpunkte bearbeitet hat.

2.2.2 Entwicklung des PHS Index und Verbesserung der Modellannahmen

Die Kritikpunkte aufgreifend bezog sich ein wesentlicher Aspekt der Modellverbesserung auf die Überarbeitung der physiologischen Kriterien, die der Abschätzung maximaler Expositionszeiten zugrundeliegen. Dabei wurde u.a. das Konzept der Angabe einer Warn- und Gefahrenschwelle, die alle bzw. die Mehrheit der Betroffenen schützen sollte, ersetzt durch die Betrachtung einer mittleren Beanspruchungsreaktion, welche mit einer Risikoabschätzung verbunden ist. Die Rektaltemperatur darf dabei 38 °C nicht überschreiten und es wird bei länger andauernden Arbeitsphasen ein maximaler Wasserverlust von 7,5 % der Körpermasse unter Einbeziehung einer Rehydrierung von 60 % erlaubt. Weiterhin ist die maximale Schweißrate nun nicht mehr statisch festgelegt, sondern linear mit dem Energieumsatz verknüpft (vgl. Mehnert et al. (2000) [21]).

Im Einzelnen wurde der „Index der Erforderlichen Schweißrate“ in 14 Aspekten überarbeitet (Malchaire et al. (2001) [18]) und aufgrund der erheblichen Änderungen neu „Predicted-Heat-Strain“ (PHS) benannt. Diese 14 Aspekte lassen sich wie folgt zusammenfassen (s.a. Malchaire et al. (2001) [18]):

1. zur Berechnung der respiratorischen (konvektiven und evaporativen) Wärmeverluste wird eine aktuellere Formel verwendet;
2. es werden auch die Reflektionseigenschaften der Kleidung berücksichtigt;
3. es werden neue Algorithmen zur Berechnung des Wärmeaustausches zwischen einer bekleideten Person und ihrer Umgebung verwendet, wobei die Eigenschaften sowohl normaler als auch spezieller Arbeitsschutzbekleidung berücksichtigt werden;
4. die mittlere Hauttemperatur wird entsprechend Mehnert et al. (2000) [22] durch zwei Gleichungen für unbedeckte bzw. bedeckte Probanden abgeschätzt, wobei für Isolationswerte der Bekleidung zwischen 0,2 und 0,6 clo zwischen beiden Gleichungen linear interpoliert wird;
5. die Verwendung eines Exponentialansatzes („exponential averaging“; Malchaire (1991) [20]) für das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes von sowohl

Schweißrate als auch Hauttemperatur, was naturgemäß den physiologischen Gegebenheiten eher entspricht und so die Prognose von Hauttemperatur, Schweißrate und Rektaltemperatur für jeden Zeitpunkt ermöglicht;

6. zur Berechnung der mittleren Körpertemperatur wurde in SW_{req} das Verhältnis der Wärmeinhalte von Körperschale zu Körperkern konstant mit 0,3 angenommen; innerhalb des PHS-Modells wird es mit zunehmender Rektaltemperatur bis auf 0,1 verringert;
7. eine Berechnung der Körperkerntemperatur unter Berücksichtigung der Wärmeverteilung im Körper (Kern-Schale);
8. die Abschätzung der Rektaltemperatur aus der mittleren Körperkerntemperatur;
9. die Berechnung der Verdampfungseffizienz des Schweißes in Abhängigkeit der Hautbenetzung, insbesondere für extrem feucht-warme Klimabedingungen;

wobei ebenfalls solche Aspekte berücksichtigt wurden, die bereits in Malchaire et al. (2000) [19] diskutiert wurden:

10. die Berücksichtigung eines Anstieges der Körperkerntemperatur mit zunehmendem Energieumsatz;
11. eine maximale Hautbenetzung für nichtaklimatisierte Personen;
12. eine Festlegung der maximalen Schweißrate entsprechend dem Energieumsatz; sowohl für akklimatisierte als auch für nichtaklimatisierte Personen;
13. eine zulässige Obergrenze der Rektaltemperatur von 38,0 °C;
14. einen maximalen Wasserverlust von 7,5 % der Körpermasse im Mittel (wobei eine mittlere Rehydratation von 60 % angenommen wurde).

Mit der Zusammenstellung einer großen Datenbasis zu Belastungs-Beanspruchungsuntersuchungen in wärmebelasteten Bereichen konnten die Modell-ergebnisse und -eigenschaften mit real gemessenen physiologischen Beanspruchungsdaten (Schweißrate, Rektaltemperatur) überprüft werden.

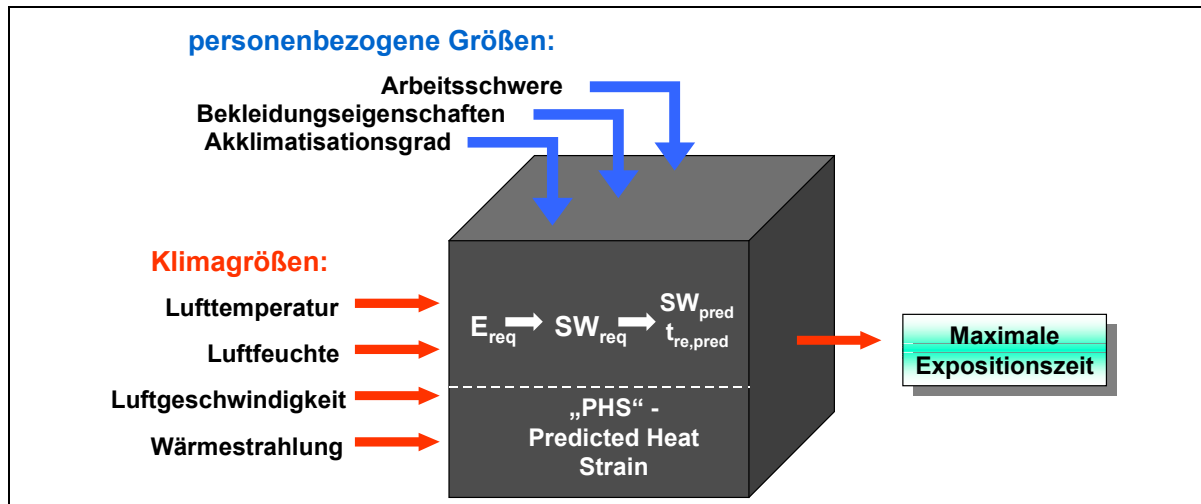


Abb. 2.2 Das PHS-Modell als „Black Box“

Entsprechend der Namensgebung werden auf der Grundlage einer Wärmebilanzbetrachtung physiologische Beanspruchungsreaktionen bei Arbeiten unter Wärmebelastung (Schweißrate, Körpertemperatur) modellhaft nachgebildet, woraus eine Prognose über deren Verlauf abgeleitet wird.

Das so entwickelte Modell ist damit grundsätzlich geeignet, auch Vorgangsfolgen mit unterschiedlichen Belastungen zu betrachten und ist damit auch grundsätzlich geeignet, bei der Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen in wärmebelasteten Bereichen eingesetzt zu werden. Der Einsatz dieses Modells hat den Vorteil, dass – im Gegensatz zu anderen Ansätzen – alle relevanten Einflussgrößen – so auch Bekleidungsseigenschaften und Akklimatisation – berücksichtigt werden können (s. **Abb. 2.2**).

2.3 Diskussionsvorschlag zur Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen

Als Ergebnis einer Auswertung verschiedener bekannter Ansätze und in Betrieben praktizierten Regelungen wurde von Pangert et al. (2003) [24] ein Diskussionsvorschlag abgeleitet, der in **Abb. 2.3** wiedergegeben ist. Bezugszeitraum bildet dabei jeweils eine Stunde, denen je nach Intensität der Klimabelastung Entwärmungsphasen von 15-20 min, 30 min bzw. 45 min pro Stunde zugeordnet werden.

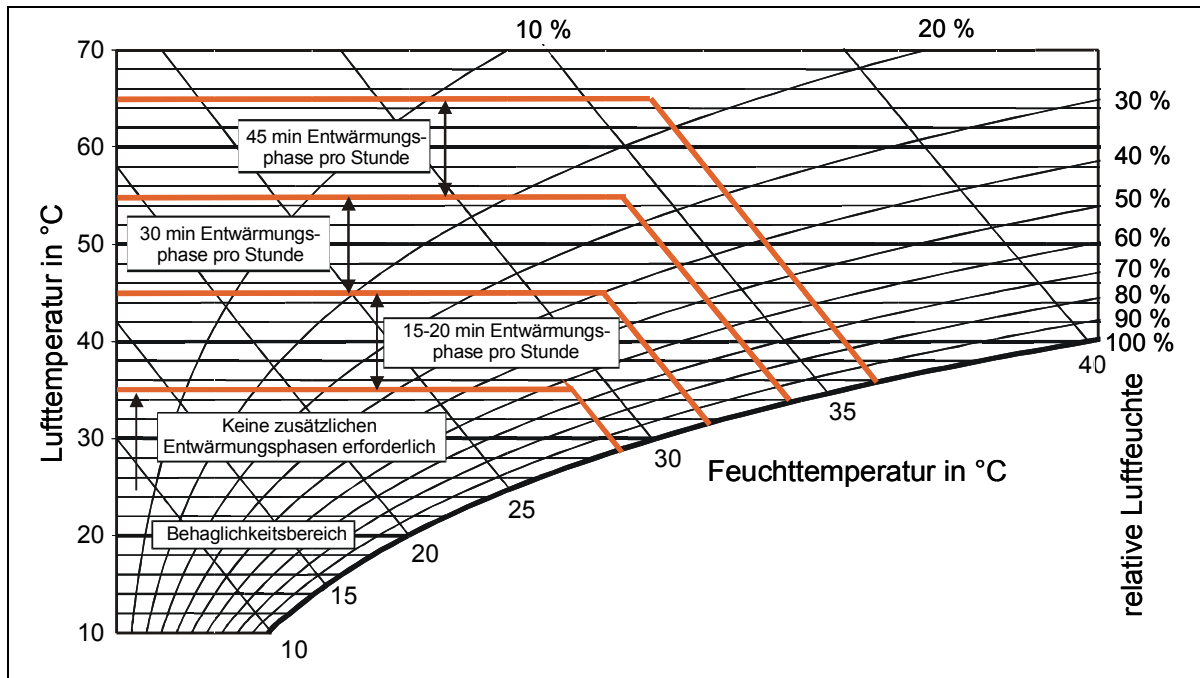


Abb. 2.3 Diskussionsvorschlag für eine Regelung von Expositions- und Entwärmungsphasen nach Pangert, Bux, Frener (2003) [24]

Eingangsgrößen bilden dabei Lufttemperatur und Luftfeuchte. Weiter sind Randbedingungen angegeben, die es zu beachten gilt (vgl. Pangert et al. (2003) [24]):

- nur für gesunde und nicht vorgeschädigte Beschäftigte;
- gilt auch für nicht-akklimatisierte Beschäftigte bei gelegentlicher oder kurzzeitiger Exposition;
- spezifische geringere Belastbarkeit von Frauen ist nicht berücksichtigt;
- leichte bis mittlere Bekleidungsisolierung (entsprechend ca. 0,6 – 0,9 clo);
- leichte bis mittlere Arbeitsschwere (bis ca. 200 W Arbeitsenergieumsatz);
- geringe Luftgeschwindigkeiten (bis ca. 0,2 – 0,5 m/s);
- während der Expositions- bzw. Arbeitsphase weitestgehend konstante Klimabedingungen;
- bei Lufttemperaturen über ca. 65 °C im Trockenem bzw. hohen Feuchten (über der Feuchttemperaturlinie von ca. 36 °C) sind Schutzmaßnahmen (z.B. PSA, technischer Hitzeschutz) einzuleiten bzw. ist der Betriebsarzt hinzuzuziehen, Kontrolle physiologischer Parameter während der Belastung (z.B. Puls, Körperkerntemperatur);
- soweit durch andere Vorschriften bzw. Regelungen besonderer Berufsgruppen Anforderungen an die Entwärmungsphasen gestellt werden, bleiben diese Vorschriften unberührt.

Hinsichtlich einer Berücksichtigung der Wärmestrahlung wird weiter vorgeschlagen, bei Teilkörperbestrahlung anstatt der Lufttemperatur den Mittelwert aus Luft- und Globetemperatur einzusetzen, bei Ganzkörperbestrahlung die Lufttemperatur durch die Globetemperatur zu ersetzen. Dieser Aspekt wird im Ergebnisteil (vgl. Abschnitt 4.4) diskutiert, wobei ein Alternativvorschlag erarbeitet wurde.

3 Methoden

3.1 Laboruntersuchungen

3.1.1 Zielsetzung

Im Rahmen einer Reihe von Laboruntersuchungen wurden für ausgewählte Arbeits- und Klimabedingungen vorgeschlagene Arbeitszeit-Entwärmungszyklen nachgebildet und physiologische Kenngrößen aufgezeichnet. Dabei wurden inter-individuelle Unterschiede im Rahmen dieses Projektes außer Acht gelassen, d.h. die Versuche wurden mit einem Probanden durchgeführt. Hierzu konnte die Klimakammer der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin am Standort Dortmund genutzt werden. Diese verfügt über alle Voraussetzungen zur Regelung der Klimabedingungen sowohl hinsichtlich der Lufttemperatur als auch der Luftfeuchte, so dass während eines Versuches weitestgehend konstante Klimabedingungen sichergestellt werden konnten.

Mittels der Versuche sollte einerseits die grundsätzliche Stimmigkeit der im Diskussionsvorschlag angegebenen Empfehlungen für eine Regelung der Entwärmungsphasen überprüft werden, andererseits sollten Eigenschaften des PHS-Modells im Hinblick auf die Anwendung zur Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen in wärmebelasteten Bereichen aufgezeigt und anhand von Messdaten der physiologischen Größen überprüft werden. Dabei kam dem Zeitverhalten eine besondere Bedeutung zu.

Die Teilnahme an den Versuchen war freiwillig. Im Vorfeld der Untersuchung wurde mittels einer G30-Untersuchung „Hitzearbeit“ die grundsätzliche Eignung des Probanden für Arbeiten unter Hitzebelastung sichergestellt.

3.1.2 Durchführung

3.1.2.1 Ausgewählte Klima- und Arbeitsbedingungen

Im Rahmen einer ersten Beratung wurden die in **Abb. 3.1** wiedergegebenen Klimabedingungen orientierend ausgewählt. Grundlage bildete dabei der in **Abb. 2.3** wiedergegebene Diskussionsvorschlag, wobei 3 Kombinationen im eher trocken-warmen bzw. trocken-heißen und 2 Kombinationen im feucht-warmen Klimabereich ausgewählt wurden.

Bei den Versuchen wurden jeweils die dort vorgeschlagenen Anteile von Arbeits- und Entwärmungsphasen nachgebildet, wobei im Sinne einer „worst-case“-Betrachtung die Arbeitsphase durch schwere muskuläre Arbeit, realisiert durch Laufbandergometerarbeit (Geschwindigkeit: 4 km/h, Steigung 5°), gekennzeichnet war. Der (Gesamt-)Energieumsatz betrug nach gängigen Tabellenwerten ca. 350 W, entsprechend einem Arbeitsenergieumsatz von ca. 270 W.

Die Bekleidungsisolierung der vorgegebenen Arbeitsbekleidung wurde mit einem Isolationswert von ca. 0,8 clo abgeschätzt. Hinsichtlich des Trinkregimes zur Kompensation des Flüssigkeitsverlustes stand Mineralwasser oder wahlweise auch Früchte-tee (kein Kaffee oder Schwarztee) *ad libitum* zur Verfügung.

Vor dem Hintergrund, dass in der betrieblichen Praxis die Entwärmungsphasen i.d.R. nicht durch vollständige Ruhe gekennzeichnet sind, wurde innerhalb der Entwärmungsphasen im klimatisch-neutralen Bereich leichte körperliche Arbeit, realisiert als 20 W-Fahrradergometerarbeit, geleistet. Der (Gesamt-)Energieumsatz betrug hier nach gängigen Tabellenwerten ca. 150 W, entsprechend einem Arbeitsenergieumsatz von ca. 70 W.

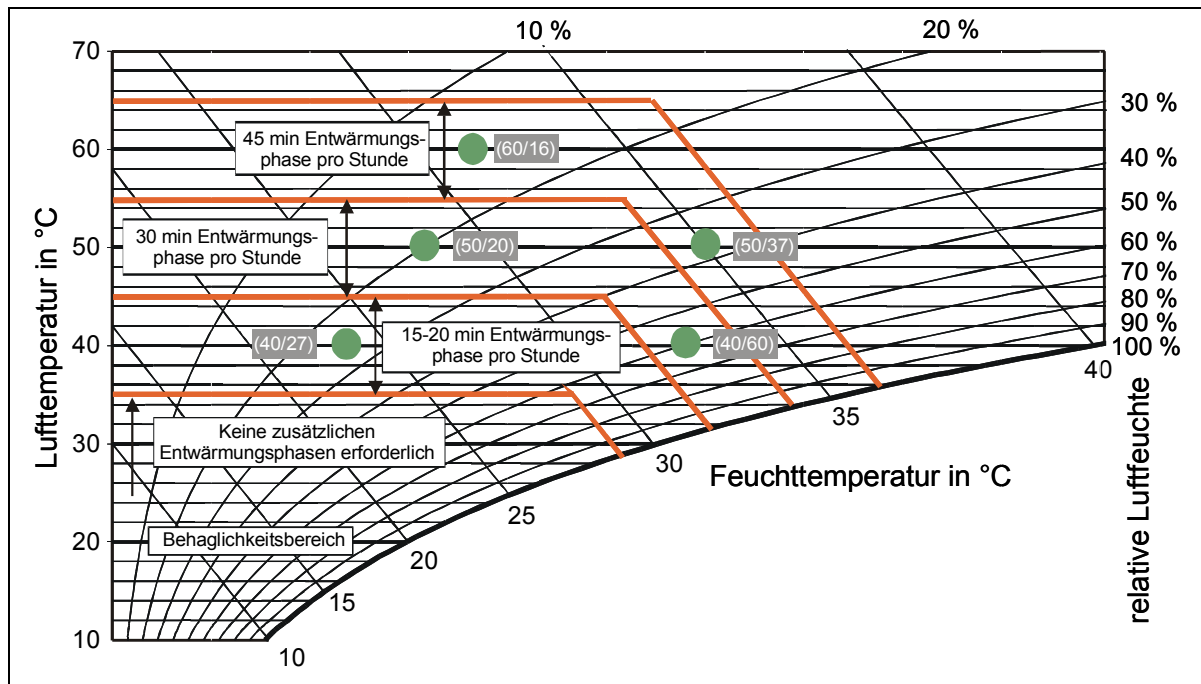


Abb. 3.1 Auswahl von Klimabedingungen

3.1.2.2 Abbruchkriterien

Die Arbeit im Klima wurde abgebrochen, wenn eines der folgenden Abbruchkriterien erfüllt war

- "200-Alter" für die Herzschlagfrequenz oder
- 38,5 °C für die Rektaltemperatur sowie unabhängig hiervon
- der Wunsch des Probanden, den Versuch abubrechen.

Die Abbruchkriterien liegen dabei im Bereich bzw. unterhalb der in der Praxis zu beobachtenden Werte.

3.1.2.3 Vorbereitung und Durchführung der Laborversuche

Im Rahmen der Vorbereitung der Laborversuche wurde der Rektaltemperaturfühler desinfiziert und in einem Wasserbad auf eine Temperatur von 38,5 °C jeweils neu kalibriert (s.a. **Abb. 3.2**). Weiter erfolgte das Anlegen der Messfühler für die Rektaltemperatur und Herzschlagfrequenzerfassung (s.a. **Abb. 3.3**). Eine Gewichtsmessung zu Beginn eines Versuches bildete den Ausgangswert für die Bestimmung der Schweißabgabe im Versuchsablauf.

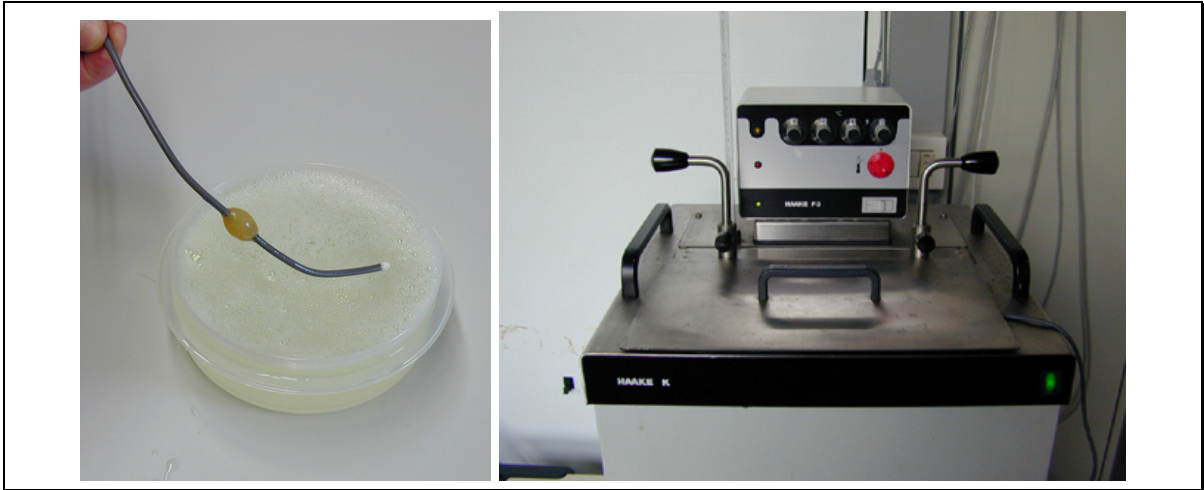


Abb. 3.2 Vorbereitung der Laborversuche (1):
Desinfizierung (links) und Kalibrierung (rechts) des Rektaltemperaturfühlers

Während der Versuchsdurchführung wurden Herzschlagfrequenz und Rektaltemperatur kontinuierlich aufgezeichnet und außerhalb des Klimabereiches durch eine zweite Person überwacht, um bei Überschreiten eines der Abbruchkriterien einzuschreiten (s.a. **Abb. 3.4**). Weiter wurde zur Sicherung des Probanden die Betriebsärztin im Hause informiert und die Verfügbarkeit der Notrufkette sichergestellt. Für Notfälle stand eine Erste-Hilfe-Ausstattung einschließlich eines mobilen Defibrilators bereit.

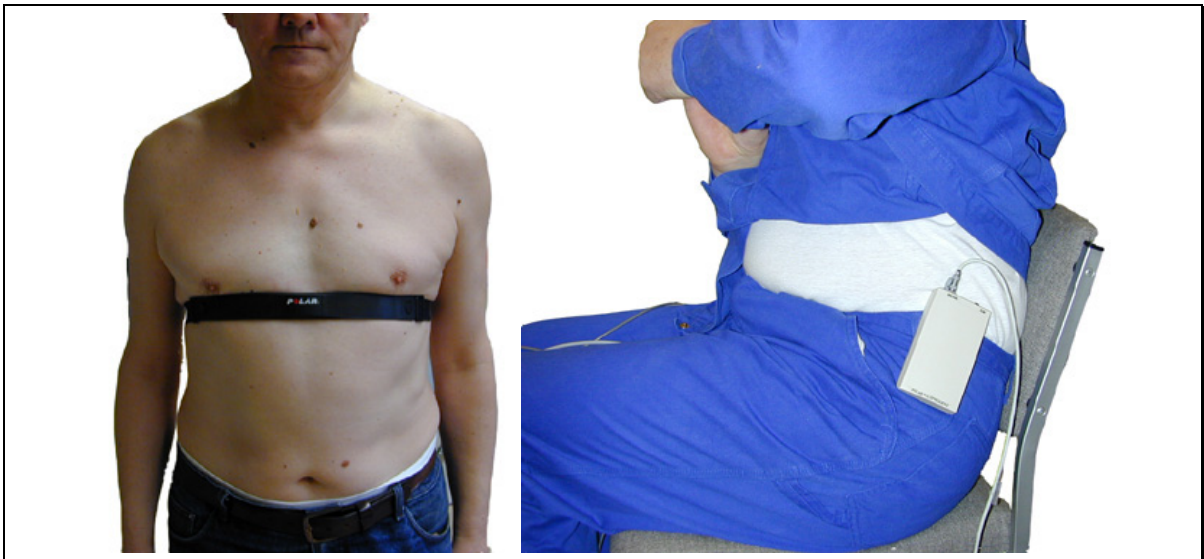


Abb. 3.3 Vorbereitung der Laborversuche (2):
Herzfrequenzerfassung: Messwertaufnehmer (links) und Messumformer (rechts)

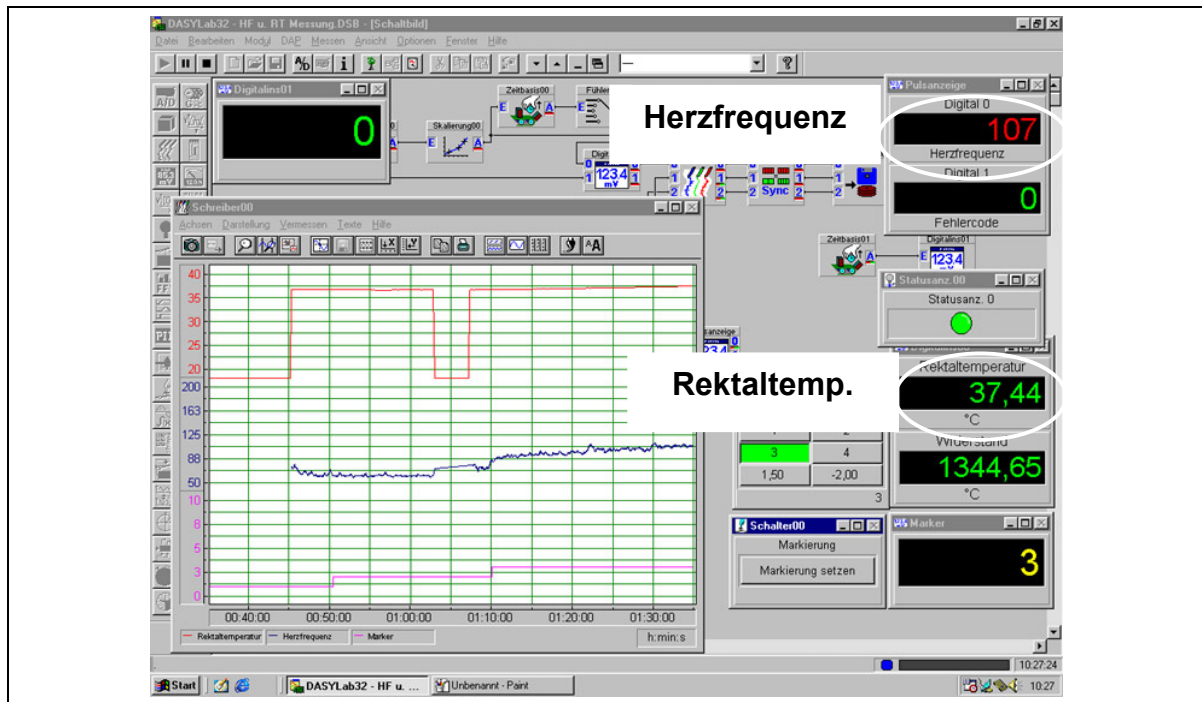


Abb. 3.4 Durchführung der Laborversuche: Aufzeichnung und Überwachung von Herzfrequenz und Rektaltemperatur

Technisch bedingt musste das Messsignal beim Wechsel zwischen Arbeits- und Entwärmungsphase kurzzeitig unterbrochen werden. Im Zuge der Messdatenaufbereitung wurde diese Unterbrechung durch Interpolation ausgeglichen, gleichzeitig konnte dieses für die Abgrenzung von Arbeits- und Entwärmungsphasen genutzt werden.

Im Anschluss an jede Arbeits- und Entwärmungsphase erfolgte eine Gewichtsmessung des Probanden, die zur Bestimmung der Schweißabgabe genutzt wurde. Berücksichtigt wurde dabei die ebenfalls durch Gewichtsmessung ermittelte Flüssigkeits- und Nahrungsaufnahme.

3.2 Modellberechnungen

Die Modellberechnungen erfolgten unter Zugrundelegung des als Teil der DIN EN ISO 7933 (2004) wiedergegebenen BASIC-Programmes. Dieses wurde insofern angepasst, als dass für Auswertungen die dort erforderlichen Eingangsdaten aus separaten Dateien eingelesen wurde. Der so implementierte „Batch-Modus“ ermöglichte die sequentielle Bearbeitung einer Reihe von Bedingungen.

Dabei wurden die in den Laborversuchen untersuchten Bedingungen mit Hilfe des Modells nachgebildet. Ziel war es hier, die Übereinstimmung sowie Möglichkeiten der Individualisierung zu prüfen.

In weitere Modellrechnungen wurden Möglichkeiten der iterativen Bestimmung von Arbeitszeit-Entwärmungsphasen untersucht.

4 Ergebnisse

4.1 Laboruntersuchungen

Abb. 4.1 zeigt den ermittelten Verlauf der Herzfrequenz und der Rektaltemperatur bei einer Abfolge von jeweils 30 min Arbeit und 30 min Entwärmungsphase. Die Klimabedingungen während der Arbeitsphase wurden mit 50 °C Lufttemperatur und 20 % relativer Luftfeuchte vorgegeben. Die Lufttemperatur während der Entwärmungsphasen betrug ca. 23 °C.

Bei einer einleitenden ca. 20-minütigen Ruhephase im Sitzen wurde nach 4 Arbeitszeit- und Entwärmungszyklen eine 30-minütige Ruhephase im Sinne einer Mittagspause eingefügt. Erwartungsgemäß spiegeln sich die einzelnen Zyklen deutlich in der Beanspruchungsreaktion (s. **Abb. 4.1**). Betrachtet man die Herzfrequenz, so ist mit jedem Zyklus eine leichte Erhöhung des Endwertes der Arbeitsphase bei gleichzeitigen Anstieg des Ausgangsniveaus festzustellen.

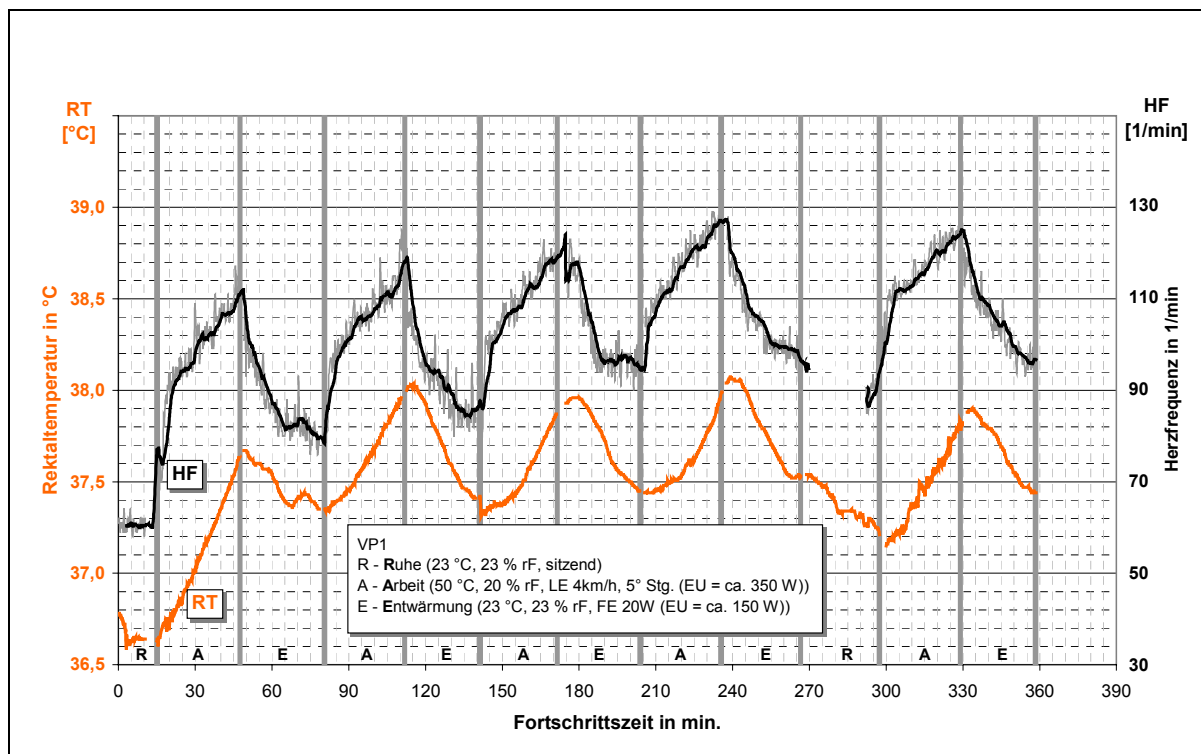


Abb. 4.1 Nachbildung einer Abfolge von Arbeits- und Entwärmungsphasen hier: Ermittelter Verlauf der Herzfrequenz (obere Kurve, original und geglättet, rechte Skalierung) und der Rektaltemperatur (untere Kurve, linke Skalierung)

Hinsichtlich der Rektaltemperatur zeigt sich ab dem 2. Arbeitszyklus ein gleichbleibendes Endniveau von ca. 38 °C.

Betrachtet man die Ergebnisse zur Schweißabgabe und Flüssigkeitsaufnahme, so zeigt sich, dass die Schweißabgabe durch die Flüssigkeitsaufnahme vollständig

kompensiert wurde. Nach Abschluss der Versuchszeit von ca. 6 Stunden lagen Schweißabgabe und Flüssigkeitsaufnahme im Bereich von ca. 4,5 l.

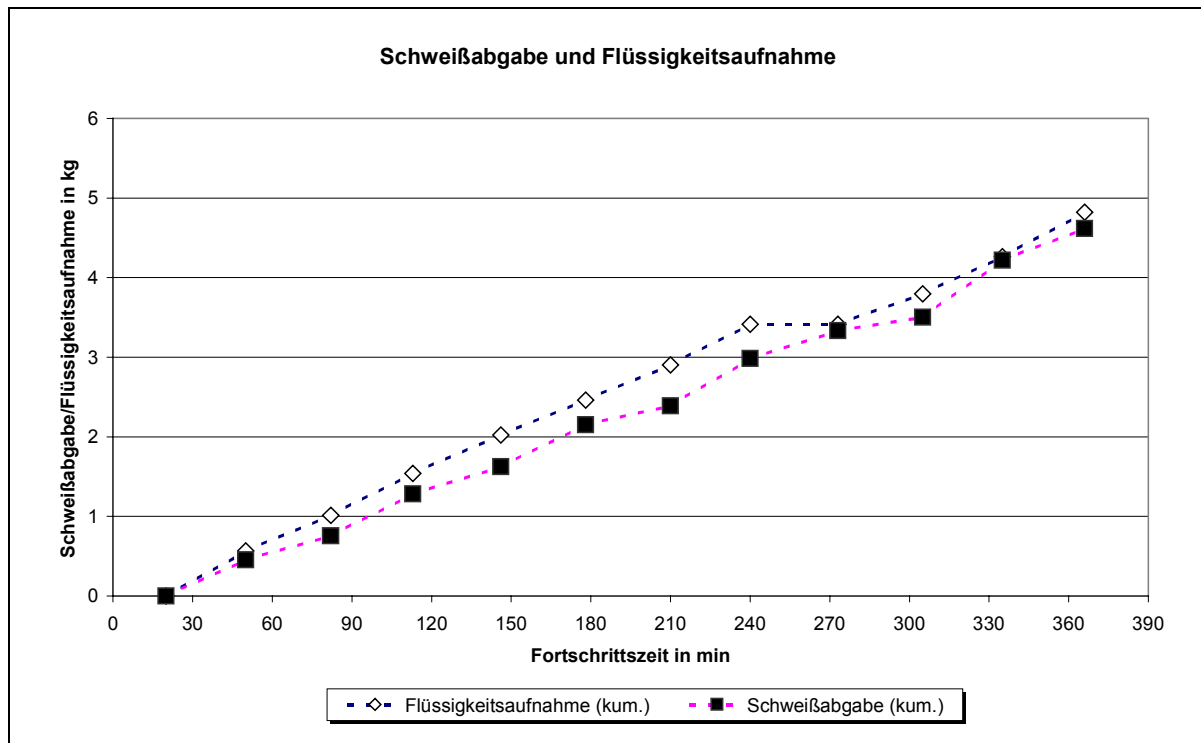


Abb. 4.2 Nachbildung eines Anteils von Arbeits- und Entwärmungsphase hier: Schweißabgabe (untere Kurve) und Flüssigkeitsaufnahme (obere Kurve)

Mit fortschreitender Versuchsdauer führt die Schweißabgabe zu einer zunehmenden Durchfeuchtung der Bekleidung (s. **Abb. 4.3**), wodurch deren Isolationseigenschaften verändert werden.



Abb. 4.3 Veränderung des Bekleidungszustandes mit fortschreitender Versuchszeit links: zu Beginn des Versuchs; mitte: am Ende des 1. Arbeitszyklusses; rechts: am Ende des 4. Arbeitszyklusses

Tab. 4.1 gibt eine Übersicht der durchgeführten Einzelversuche und weist die jeweils vorgegebenen Bedingungen aus.

Dabei wurde für die Versuche im wesentlichen dieselbe Abfolge gewählt wie im Fall des zuvor beispielhaft dargestellten Versuches. Die gewählte Abfolge kann dabei als aussagekräftig sowohl hinsichtlich gelegentlicher Expositionen als auch mehrfacher Expositionen im Verlaufe eines Tages betrachtet werden.

Tab. 4.1 Übersicht der Einzelversuche

Nr	Typ*	t_a [°C]	rel. F [%]	Dauer der Arbeitsphase	Dauer der Entwärmungsphase
1	D	40	27	40 min	20 min
2	K	40	27	60 min	0 min
3	D	40	60	30 min	30 min
4	K	40	60	45 min	15 min
5	D	50	20	30 min	30 min
6	K	50	20	45 min	15 min
7	B	50	20	30 min	30 min
8	D	50	37	15 min	45 min
9	K	50	37	30 min	30 min
10	D	60	16	15 min	45 min
11	K	60	16	30 min	30 min

* Typ **D**: Dauer der Arbeits- und Entwärmungsphase gemäß **D**iskussionsvorschlag

Typ **K**: **K**ontrollversuch in der jeweils nächst-höheren Stufe

Typ **B**: Dauer der Arbeits- und Entwärmungsphase gemäß **D**iskussionsvorschlag, jedoch mit **B**ekleidungswechsel

Tab. 4.2 zeigt hierzu die Maximalwerte von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur am Ende der Arbeitsphasen. Unterlegt gekennzeichnet sind dabei die Kontrollversuche mit dem jeweils ungünstigeren Verhältnis von Arbeits- und Entwärmungsphase. Soweit ein Abbruchkriterium erreicht wurde, wird dieses unter Angabe des Zeitpunktes, an dem es zum ersten Mal erreicht wurde, ausgewiesen. Dabei zeigt sich, dass bei allen Versuchen, in denen die Dauer der Arbeits- und Entwärmungsphase entsprechend dem **D**iskussionsvorschlag gewählt wurde, das Abbruchkriterium nicht erreicht (mit „n.e.“ gekennzeichnet) wurde.

Bei den Kontrollversuchen zeigt sich erwartungsgemäß ein deutlicher Anstieg des Beanspruchungsniveaus, das in 4 der 5 untersuchten Bedingungen zu einem Versuchsabbruch führte. Am kritischsten erweist sich dabei die Bedingung Lufttemperatur 40 °C bei 60 % relativer Luftfeuchte (feucht-warm), hier wird das Kriterium bereits gegen Ende der 1. Arbeitsphase erreicht. Dies konnte erwartet werden, da bei diesen Bedingungen sich auch bei der Wahl der Dauer der Arbeits- und Entwärmungsphase entsprechend dem **D**iskussionsvorschlag das höchste Beanspruchungsniveau zeigte.

Tab. 4.2 Maximalwerte von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während vierstündiger Exposition bei vorgegebenen Anteilen von Arbeitszeit im Klima und Entwärmungsphase im Komfortklima (23 °C)

Klima- bedingungen während der Arbeit	Dauer der Arbeit im Klima [Minuten]	Dauer der Entwärmungsphase [Minuten]	maximale Herzschlag- frequenz [min ⁻¹]	maximale Körper- temperatur [°C]	Abbruch- kriterium erreicht
40 °C 27 % rel. F.	40	20	114	37,9	n.e.
	60	0	122	38,1	n.e.
40 °C 60 % rel. F.	30	30	144	38,4	n.e.
	45	15	142	38,5	1. Stunde; 42. Minute
50 °C 20 % rel. F.	30	30	127	38,0	n.e.
	45	15	145	38,5	3. Stunde; 42. Minute
50 °C 37 % rel. F.	15	45	122	37,9	n.e.
	30	30	147	38,5	2. Stunde; 26. Minute
60 °C 16 % rel. F.	15	45	112	37,5	n.e.
	30	30	142	38,5	4. Stunde; 24. Minute

In einem nächsten Schritt wurde eine 3-stufige Einteilung vorgenommen, die einerseits die in der Literatur und Normung häufig genannte Grenze von 38 °C, andererseits das an Erfahrungswerten unter Berücksichtigung von Tagesgang und eingesetzter Muskulatur orientierte Abbruchkriterium von 38,5 °C berücksichtigt:

Stufe I:	≤ 38,0 °C	Grenzkriterium wird unterschritten (weiß)
Stufe II:	38,0 °C.. 38,5 °C	Grenzbereich (hellgrau unterlegt)
Stufe III:	> 38,5 °C	Abbruchkriterium erreicht (dunkelgrau unterlegt)

Betrachtet wird dabei eine „gelegentliche Exposition“, d.h. mit längeren Entwärmungsphasen, wobei hier die Höhe des Beanspruchungsniveaus (Rektaltemperatur) am Ende der zweiten Arbeitsphase ausgewertet wird. Spiegelt sich im Beanspruchungsniveau am Ende der ersten Arbeitsphase noch zu sehr das Ausgangsniveau, das in der Praxis nicht unbedingt bekannt ist, so ist am Ende der zweiten Arbeitsphase ein Niveau erreicht, das sich entweder in den Folgezyklen stabilisiert oder in dem sich ein Anstieg der Wärmespeicherung spiegelt.

Für eine „mehrfache Exposition“ im Verlaufe eines Tages wird die Höhe des Beanspruchungsniveaus (Rektaltemperatur) am Ende der vierten Arbeitsphase ausgewertet. Diese bildet bei dem gewählten Ablauf naturgemäß das Maximum ab, gleichzeitig sollte die Veränderung gegenüber dem Ende der zweiten Arbeitsphase mit betrachtet werden, d.h. ob durch die gewählte Dauer der Arbeits- und Entwärmungs-

phasen ein in etwa gleichbleibendes Beanspruchungsniveau unterhalb der physiologischen Grenzkriterien sichergestellt werden kann.

Zusätzlich wird der **Einfluss einer längeren Pause** durch Vergleich des Beanspruchungsniveaus am Ende der vierten und am Ende der fünften Arbeitsphase betrachtet.

Tab. 4.3 Ermitteltes Beanspruchungsniveau am Ende der 2., 4. u. 5. Arbeitsphase

Klima- bedingungen während der Arbeit	Dauer der Arbeit im Klima [Minuten]	Dauer der Entwärmungs- phase [Minuten]	Rektaltemperatur am Ende von Arbeitsphase		
			2	4	5
Verhältnis Arbeits-/Entwärmungsphase entsprechend Diskussionsvorschlag					
40 °C 27 % rel. F.	40	20	37,8	37,9	--
40 °C 60 % rel. F.	30	30	38,3	38,4	38,0
50 °C 20 % rel. F.	30	30	38,0	38,0	37,8
50 °C 37 % rel. F.	15	45	37,6	37,9	--
60 °C 16 % rel. F.	15	45	37,3	37,5	37,5
Kontrollversuche - Verhältnis Arbeits-/Entwärmungsphase in der nächst-höheren Stufe					
40 °C 27 % rel. F.	60	0	38,0	38,1	--
40 °C 60 % rel. F.	45	15	38,5	38,5	--
50 °C 20 % rel. F.	45	15	38,3	38,5	38,2
50 °C 37 % rel. F.	30	30	38,5	38,5	--
60 °C 16 % rel. F.	30	30	38,3	38,5	38,3
mit Bekleidungswechsel					
50 °C 20 % rel. F.	30	30	37,9	38,4	37,9

Tab. 4.3 zeigt das Ergebnis dieser Betrachtungen, zusätzlich wurde der Versuch mit dem Wechsel der Bekleidung innerhalb der Entwärmungsphasen aufgenommen. Die Schraffur entspricht hier der zuvor beschriebenen Stufeneinteilung I bis III. Vergleicht man die Werte am Ende der 2. und 4. Arbeitsphase, so zeigt sich für die Versuche, bei denen das vorgeschlagene Verhältnis zwischen Arbeits- und Entwärmungsphase

gewählt wurde, mit bis zu 0,3 °C ein eher geringer Anstieg des Beanspruchungsniveaus, hier stabilisiert sich weitgehend das Beanspruchungsniveau nach der 2. Arbeitsphase. Die zusätzliche Ruhephase führt hier zu einer Reduzierung des Niveaus um bis zu 0,4 °C am Ende der 5. Arbeitsphase. Im Fall des Versuches mit Bekleidungswechsel ist der Effekt mit jeweils 0,5 °C leicht erhöht.

Betrachtet man die Kontrollversuche mit dem jeweils nächst-höheren, ungünstigeren Verhältnis zwischen Arbeits- und Entwärmungsphasen, so werden die Unterschiede bedingt durch das Erreichen des Abbruchkriteriums teilweise verzerrt. Bei 4 der 5 untersuchten Bedingungen liegt die Einstufung am Ende der 2. Arbeitsphase bereits in Stufe II bzw. III.

Die Auswertung der Versuchsreihe zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung hinsichtlich des vorgeschlagenen Verhältnisses zwischen Arbeits- und Entwärmungsphasen (Pangert et al. (2003) [24]) und physiologischen Grenzkriterien auch bei im Tagesverlauf wiederholter Exposition. Hierbei schien ein wesentlicher Faktor zu sein, dass die – meist nassgeschwitzte – Bekleidung in der Entwärmungsphase nicht gewechselt wurde, so dass auch in der Entwärmungsphase eine erhebliche Verdampfungskühlung möglich war.

4.2 Vergleich mit Modellberechnungen

Für die zuvor beschriebene Abfolge von Arbeits- und Entwärmungsphasen wurde das PHS-Modell unter verschiedenen Randbedingungen eingesetzt. Zum Einsatz kam dabei das in der aktuellen europäischen Norm DIN EN ISO 7933 (2004) – „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung“ abgedruckte Programm, das um Routinen zur Beschreibung der Klima- und Arbeitssituation ergänzt wurde.

Tab. 4.4 gibt eine Übersicht der Eingabeparameter zur Klima- und Arbeitssituation.

Tab. 4.4 Übersicht der Eingabeparameter zur Klima- und Arbeitssituation beim Einsatz des PHS-Modells

Phase	Typ*	Dauer [min]	t_a [°C]	rF [%]	v [m/s]	t_r [°C]	EU [W]	sitzen/ stehen	I_{cl1} [clo]	I_{cl2} [clo]
1	A	32	50	20	0,1	50	350	stehen	0,8	0,8
2	E	31	23	23	0,1	23	150	stehen	0,8	0,8
3	A	32	50	20	0,1	50	350	stehen	0,8	0,7
4	E	34	23	23	0,1	23	150	stehen	0,8	0,7
5	A	31	50	20	0,1	50	350	stehen	0,8	0,6
6	E	33	23	23	0,1	23	150	stehen	0,8	0,6
7	A	32	50	20	0,1	50	350	stehen	0,8	0,5
8	E	31	23	23	0,1	23	150	stehen	0,8	0,5
9	R	31	23	23	0,1	23	80	sitzen	0,8	0,4
10	A	32	50	20	0,1	50	350	stehen	0,8	0,4
11	E	29	23	23	0,1	23	150	stehen	0,8	0,4

* zu Spalte **Typ**: **A** – Arbeitsphase; **E** – Entwärmungsphase; **R** - Ruhephase

Hinsichtlich der weiteren Randbedingungen wurden bei den Modellberechnungen folgende Aspekte mit betrachtet:

- **Akklimatisation:**
(nein/ja)
- **Bekleidungsisolation:**
(konstant/Reduzierung aufgrund teilweise durchnässter Kleidung)
- **Körpergewicht:**
(im Modell gesetztes Körpergewicht (75 kg)/reales Körpergewicht des Probanden)

Dabei beeinflusst innerhalb des Modells die **Akklimatisation** die maximale Schweißrate (Erhöhung um 25 % bei „akklimatisiert = ja“ gegenüber „akklimatisiert = nein“) sowie den maximalen Hautbenetzungsgrad (100 % statt 85 %).

Hinsichtlich der **Bekleidungsisolation** wurde einerseits zunächst eine über die Versuchszeit konstante Bekleidungsisolation von $I_{cl} = 0,8$ clo (vgl. I_{cl1} in **Tab. 4.4**) eingesetzt, andererseits erfolgte eine Berücksichtigung der beobachteten reduzierten Bekleidungsisolation aufgrund der teilweise durchnässten Kleidung (s.a. **Abb. 4.3**), diese wurde durch eine stufenweise Reduzierung des Isolationswertes um jeweils 0,1 clo mit jedem Arbeits- und Entwärmungszyklus abgebildet (vgl. I_{cl2} in **Tab. 4.4**).

Das **Körpergewicht** beeinflusst über die Wärmekapazität den Anstieg und das Abklingen der Körperkerntemperatur bei nicht ausgeglichener Wärmebilanz, darüber hinaus beeinflusst diese Größe die Körperoberfläche. Der Standardwert innerhalb des Modells beträgt 75 kg und bildet dabei eine eher vorsichtige Annahme.

Tab. 4.5 zeigt die für die weiteren Berechnungen ausgewählten Kombinationen von Randbedingungen und ordnet diesen Bezeichnungen zu. Die Kombination **PHS - I** beschreibt dabei die Eingangssituation, Kombination **PHS - II** berücksichtigt die zu beobachtende reduzierte Bekleidungsisolationswert aufgrund der teilweise durchnässten Kleidung (s.a. **Abb. 4.3**), wobei diese durch eine stufenweise Reduzierung des Isolationswertes um jeweils 0,1 clo in den folgenden Arbeits- und Entwärmungszyklen abgebildet wurde. Die Kombination **PHS - III** berücksichtigt neben der Reduzierung des Isolationswertes der Bekleidung das reale Körpergewicht des Probanden. Durch jeweils den Zusatz „.1“ und „.2“ wird bei den Berechnungen zusätzlich der Akklimatisationsgrad (nein/ja) berücksichtigt.

Tab. 4.5 Untersuchte Randbedingungen beim Einsatz des PHS-Modells

Bezeichnung	Akklimatisation		Bekleidungsisolationswert		Körpergewicht (KG)	
	nein	ja	konstant (I_{cl1})	abnehmend (I_{cl2})	KG = 75 kg	KG des Probanden
PHS – I.1	X		X		X	
PHS – I.2		X				
PHS – II.1	X			X	X	
PHS – II.2		X				
PHS – III.1	X			X		X
PHS – III.2		X				

Abb. 4.4 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen für verschiedene ausgewählte Kombinationen der zuvor angegebenen Randbedingungen, vergleichend hierzu sind die Ergebnisse der Messung eingetragen.

Dabei ergibt sich mit Ausnahme der Kombination PHS – III.2 eine z.T. deutliche Abweichung der prognostizierten Kurvenverläufe zu dem gemessenen Verlauf, was einer vorsichtigeren Prognose gleichkommt. Diese Kombination PHS – III.2 gibt gleichzeitig den grundsätzlichen Kurvenverlauf am besten wieder, d.h. am Ende eines Arbeitsabschnittes stabilisieren sich die Werte im 2., 3. und 4. Zyklus auf einem gleichbleibenden Niveau. Auch das Anstiegs- und Abklingverhalten ist vergleichbar. Demgegenüber ergeben die Berechnungen z.B. bei der Kombination PHS - I deutlich höhere Werte, wobei mit jedem Arbeitszyklus das Niveau der Beanspruchung zu höheren Werten hin verschoben wird.

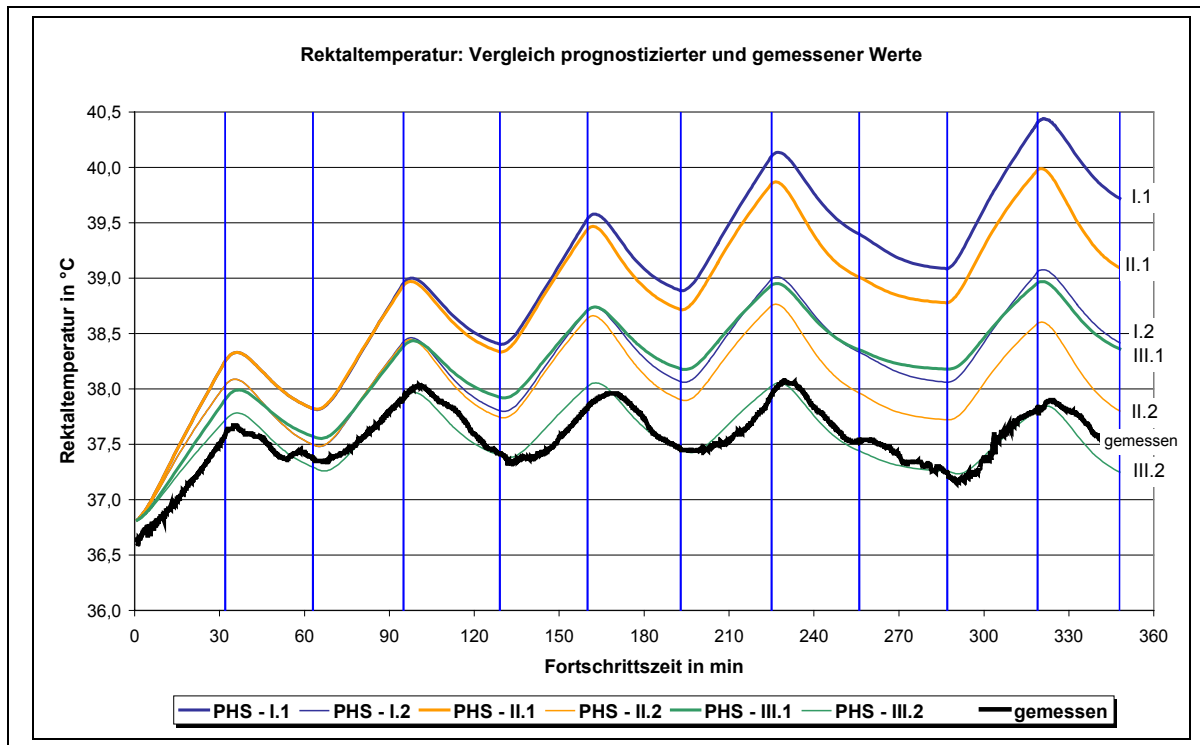


Abb. 4.4 Vergleich zwischen gemessenen und prognostizierten Verläufen unter verschiedenen Randbedingungen hier: Rektaltemperatur; zu den Randbedingungen und (Kurven-)Bezeichnungen siehe **Tab. 4.5**

Betrachtet man die prognostizierte über der Versuchszeit kumulierte Schweißabgabe im Vergleich zu den gemessenen Werten (s. **Abb. 4.5**), so lässt sich eine mögliche Ursache abschätzen. Die prognostizierte Schweißabgabe bleibt in allen Fällen deutlich unterhalb der ermittelten Schweißabgabe, dabei sind die Verläufe während der Arbeitsphasen annähernd parallel, innerhalb der Entwärmungsphasen ergeben sich deutliche Abweichungen, die maßgeblich zu dem kumulierten Unterschied beitragen. Hier führt die jeweils geringer prognostizierte Abkühlung durch Schweißverdunstung zu einer geringeren Entwärmung, wodurch das Ausgangsniveau der Wärmespeicherung bei der nächsten Arbeitsphase hin zu höheren Werten verschoben wird.

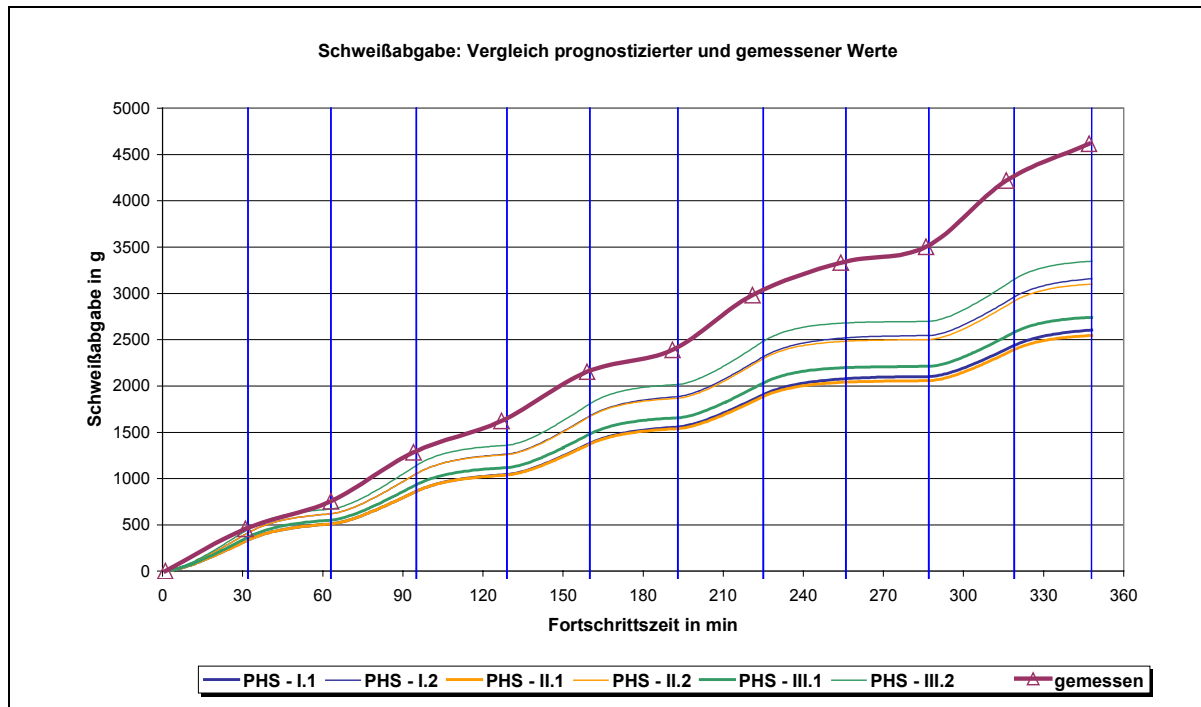


Abb. 4.5 Vergleich zwischen gemessenen und prognostizierten Verläufen unter verschiedenen Randbedingungen hier: Schweißabgabe zu den Randbedingungen und (Kurven-)Bezeichnungen **Tab. 4.5**

Als eine mögliche Ursache kann hier die schweißnasse Kleidung betrachtet werden, die in der Entwärmungsphase eine erhöhte evaporative Kühlung ermöglicht, die im PHS-Modell in dieser Weise nicht nachgebildet wird, da der nicht-verdampfte Schweiß als „abgetropft“ betrachtet wird. Um diese Hypothese zu überprüfen und den Effekt zu quantifizieren wurde für die dargestellte Klima- und Arbeitssituation ein orientierender Versuch durchgeführt, bei dem die Kleidung in den Entwärmungsphasen jeweils gewechselt, d.h. durch trockene Kleidung ausgetauscht wurde (s.a. **Tab. 4.1**, Typ B). Dabei bestätigte sich die geringere Abkühlung in den Entwärmungsphasen.

4.3 Anwendung des PHS-Modells bei der Gestaltung von Entwärmungsphasen

Nachdem sich in Kapitel 4.2 gezeigt hat, dass das PHS-Modell – bei Verwendung individualisierter Probandendaten (d.h. der jeweiligen Körpermasse, Körpergröße und evtl. auch der während einer Hitzeexposition durch Schweißabsorption in der Kleidung verringerten Wärmeisolation der Bekleidung I_{cl}) – die Beanspruchung eines Probanden vergleichsweise gut beschreiben kann, wurde untersucht, in wieweit das PHS-Modell in der Lage ist, Entwärmungsphasen für vorgegebene Klimabelastungen zu bestimmen.

Das PHS-Modell ist dafür vorgesehen, die prognostizierte Beanspruchung für die Abfolge von Abschnitten unterschiedlicher Klimabelastung zu bestimmen. Zur Be-

rechnung von erforderlichen Entwärmungsphasen wurden zwei unterschiedliche Ermittlungsverfahren verwendet, für die die erforderlichen Parameter jeweils dynamisch bestimmt wurden. Als Zykluszeit für eine Arbeits- und Entwärmungsphase wurde eine Stunde gewählt, um eine Vergleichbarkeit mit dem Diskussionsvorschlag (vgl. [24]) zu gewährleisten. Diese beiden Ansätze können wie folgt beschrieben werden:

- Bei Ansatz (1) wird für eine vorgegebene Lufttemperatur und Luftfeuchte eine Klimaexposition so lange durchgeführt, bis der Grenzwert für die Rektaltemperatur ($t_{re,limit}$) erreicht wird. Danach wird der Anteil der Entwärmungsphase am Arbeitszyklus in einer Reihe von iterativen Programmläufen jeweils so verändert, dass der vorgegebene Grenzwert der Rektaltemperatur nach keinem Zyklus von Arbeits- und Entwärmungsphase überschritten wird. Das Schema der Berechnung ist in **Abb. 4.6** wiedergegeben. Resultat ist jeweils eine erste verlängerte Arbeitsphase, gefolgt von Entwärmungs-Expositionszyklen, deren Aufteilung innerhalb des Bezugszeitraumes einer Stunde vergleichbar ist.

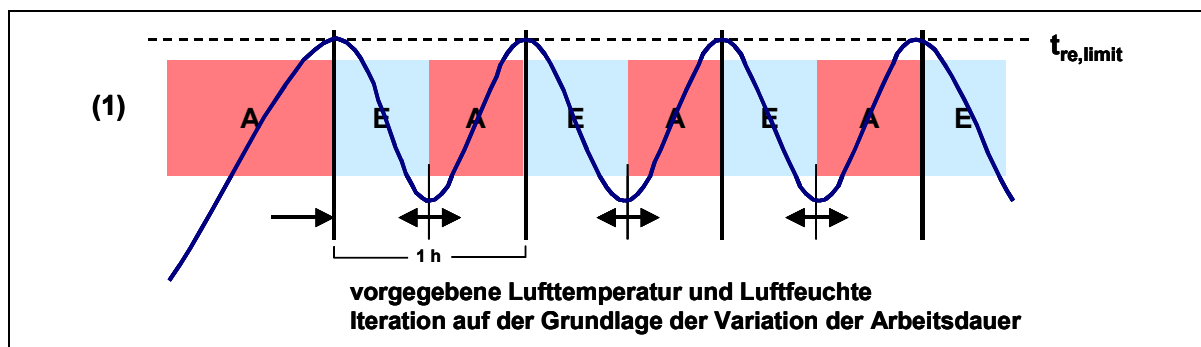


Abb. 4.6 Anwendung des PHS-Modells zur Bestimmung von erforderlichen Entwärmungsphasen – Prinzipskizze zu Ansatz (1): Veränderung der Anteile der Entwärmungsphase am Arbeitszyklus von einer Stunde, so dass ein vorgegebener Grenzwert der Rektaltemperatur nicht überschritten wird.

- Bei Ansatz (2) wird für eine vorgegebene Abfolge von Arbeits- und Entwärmungsphasen – bei fest vorgegebener Lufttemperatur – die Luftfeuchte in einer Reihe von Programmläufen jeweils so verändert, bis der Grenzwert für die Rektaltemperatur ($t_{re,limit}$) frühestens nach vier Zyklen (d.h. einer halben Arbeitsschicht, nach der dann eine Pause folgt) erreicht wird. Das Schema der Berechnung ist in **Abb. 4.7** wiedergegeben. Resultat ist ein leichter Anstieg der maximalen Rektaltemperatur mit jedem Arbeitszyklus bei jeweils konstanter Verteilung von Arbeits- und Entwärmungsphasen.

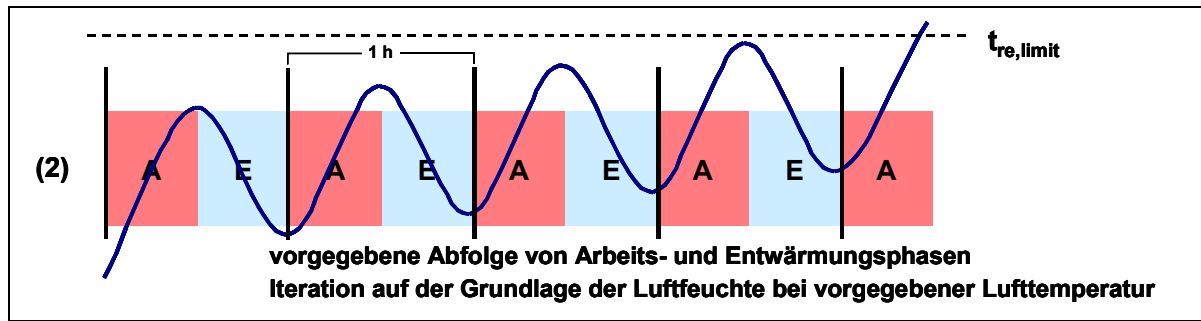


Abb. 4.7 Anwendung des PHS-Modells zur Bestimmung von erforderlichen Entwärmungsphasen – Prinzipskizze zu Ansatz (2): Iterative Veränderung der Luftfeuchte bei vorgegebener Lufttemperatur, so dass ein vorgegebener Grenzwert der Rektaltemperatur in einer halben Arbeitsschicht (vier Stunden; 4 Arbeitszyklen) nicht überschritten wird

Durch orientierende Berechnungen konnte gezeigt werden, dass sich beide Berechnungsmethoden in ihren Ergebnissen nicht nennenswert unterscheiden. Für die Ableitung von Kennlinien bietet dabei die zweite Berechnungsmethode praktische Vorteile, da hier das Verhältnis zwischen Arbeits- und Entwärmungsphasen unmittelbar vorgegeben wird. Die Bedingungen wurden dabei in Anlehnung an den Diskussionsvorschlag (vgl. [24]) wie folgt gewählt:

Arbeits- bzw. Expositionsphase :

Gesamtenergieumsatz:	$EU = 250 \text{ W}$
Bekleidungsisolations:	$I_{cl} = 0,8 \text{ clo}$
Luftgeschwindigkeit:	$v_a = 0,5 \text{ m/s}$
Wärmestrahlung:	$t_r = t_a$

Entwärmungsphase :

Gesamtenergieumsatz:	$EU = 80 \text{ W}$
Bekleidungsisolations:	$I_{cl} = 0,8 \text{ clo}$
Lufttemperatur:	$t_a = 20 \text{ °C}$
relative Luftfeuchte	$rF = 50 \text{ %}$
Luftgeschwindigkeit:	$v_a = 0,1 \text{ m/s}$
Wärmestrahlung:	$t_r = t_a$

Die Bedingung mittlere Strahlungstemperatur (t_r) identisch Lufttemperatur (t_a) – formal beschrieben über $t_r = t_a$ – beschreibt klimatische Bedingungen, bei denen keine zusätzliche Wärmestrahlung durch z.B. heiße Oberflächen herrscht. Während der Arbeits- bzw. Expositionsphase wurde mit 250 W (entsprechend einem Arbeitsenergieumsatz von ca. 170 W) eine mittelschwere Arbeit, während der Entwärmungsphase weitgehend Ruhe angenommen. Die Bekleidungsisolations wurde jeweils konstant mit 0,8 clo angenommen und beschreibt damit eine normale Arbeitskleidung. Die Annahme einer konstanten Bekleidungsisolations stellt dabei vor dem Hintergrund der durchgeführten Laborversuche eine eher vorsichtige Annahme dar, da die Durchnäsung der Kleidung mit einer Reduzierung der Bekleidungsisolations verbunden ist (vgl. Abschnitt 4.1).

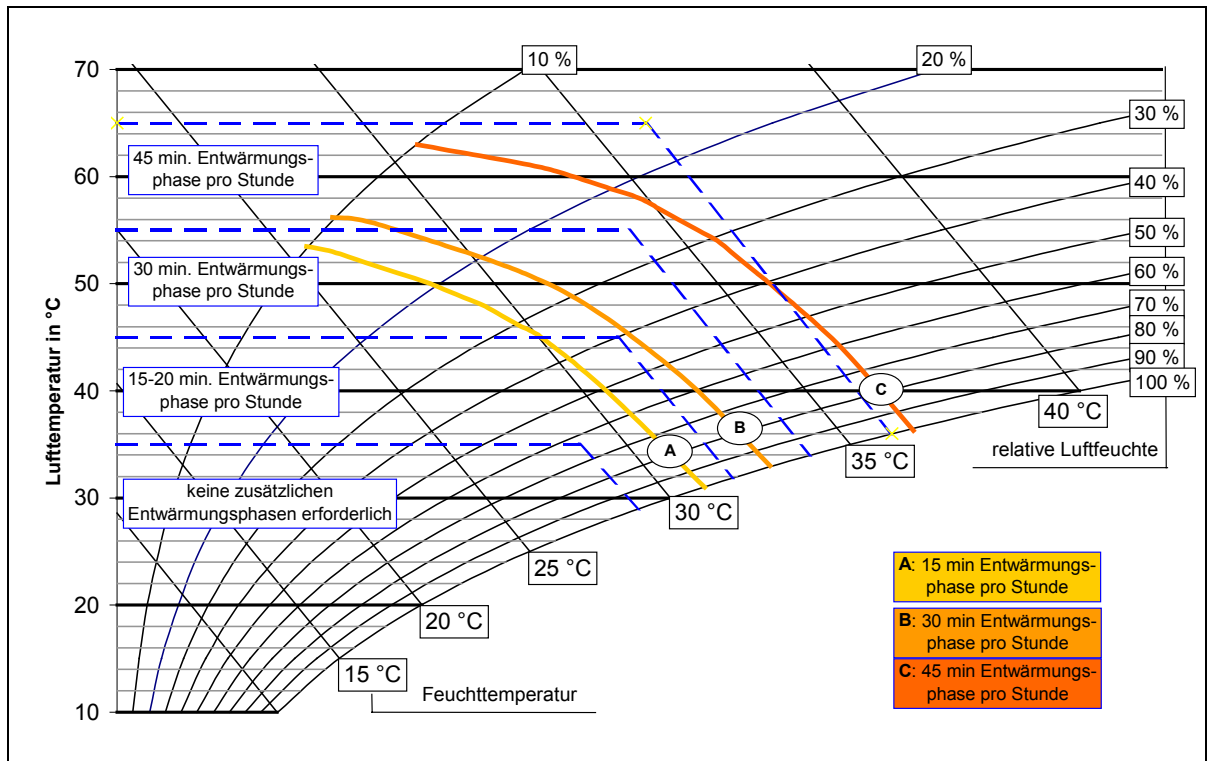


Abb. 4.8 Berechnete erforderliche Dauer von Entwärmungsphasen auf der Grundlage des PHS-Modells

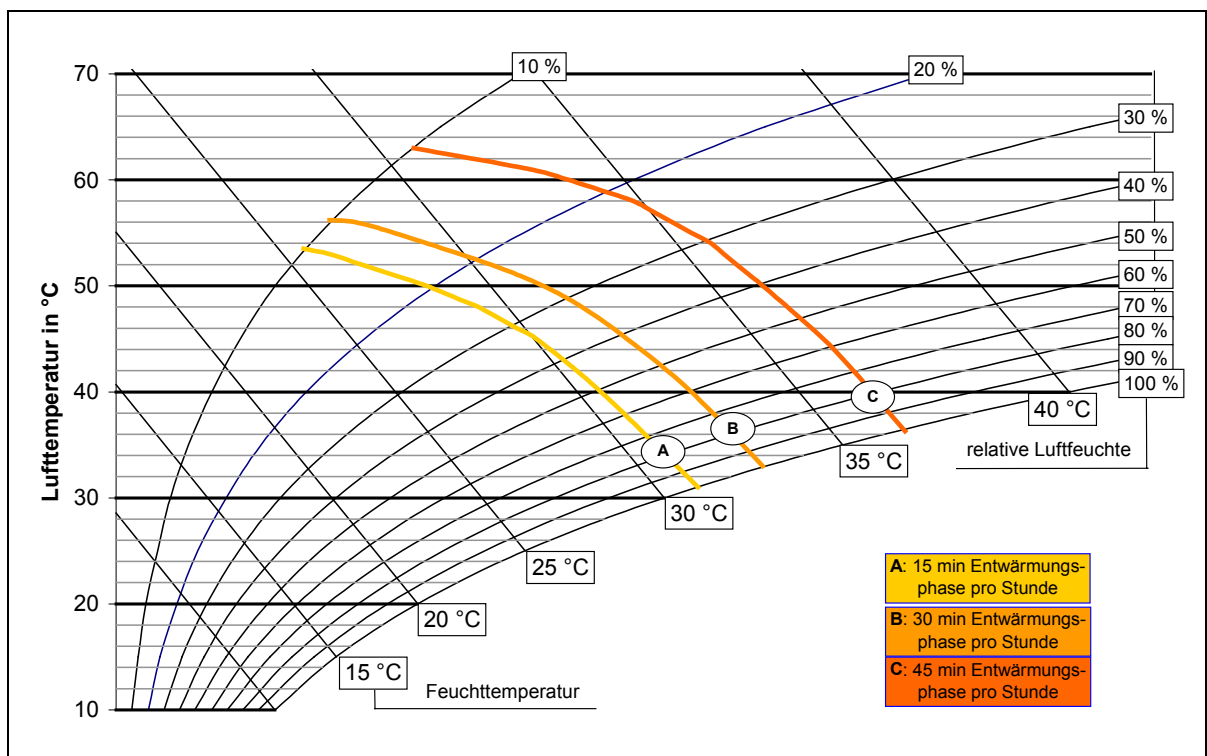


Abb. 4.9 Vergleich der ermittelten Grenzkurven mit dem Diskussionsvorschlag nach Pangert et al. (2003)

Mit Luftgeschwindigkeiten von 0,5 m/s bzw. 0,1 m/s werden in der Industrie übliche Strömungsgeschwindigkeiten beschrieben. Die Klimabedingungen während der Entwärmungsphasen ($t_a = 20\text{ °C}$; $rF = 50\%$) setzen einen Aufenthalt außerhalb des Arbeitsbereiches, z.B. in einem gesonderten Raum, voraus.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in **Abb. 4.8** sowie ein Vergleich mit den Empfehlungen nach Pangert et al. in **Abb. 4.9** wiedergegeben. Die mit A, B und C gekennzeichneten Kurvenverläufe beschreiben diejenigen Klimabedingungen, bei denen die angegebene Entwärmungsphase je Stunde auf der Grundlage der Berechnungen (gerade) ausreicht, um eine Überschreitung der berechneten Körperkerntemperatur zu vermeiden.

Abb. 4.10 zeigt ergänzend hierzu die Verschiebung der berechneten Grenzkurven für Energieumsätze von 150, 250 und 350 W bei einer Entwärmungsphase von 30 min und einer Arbeits- bzw. Expositionsphase von ebenfalls 30 min Dauer.

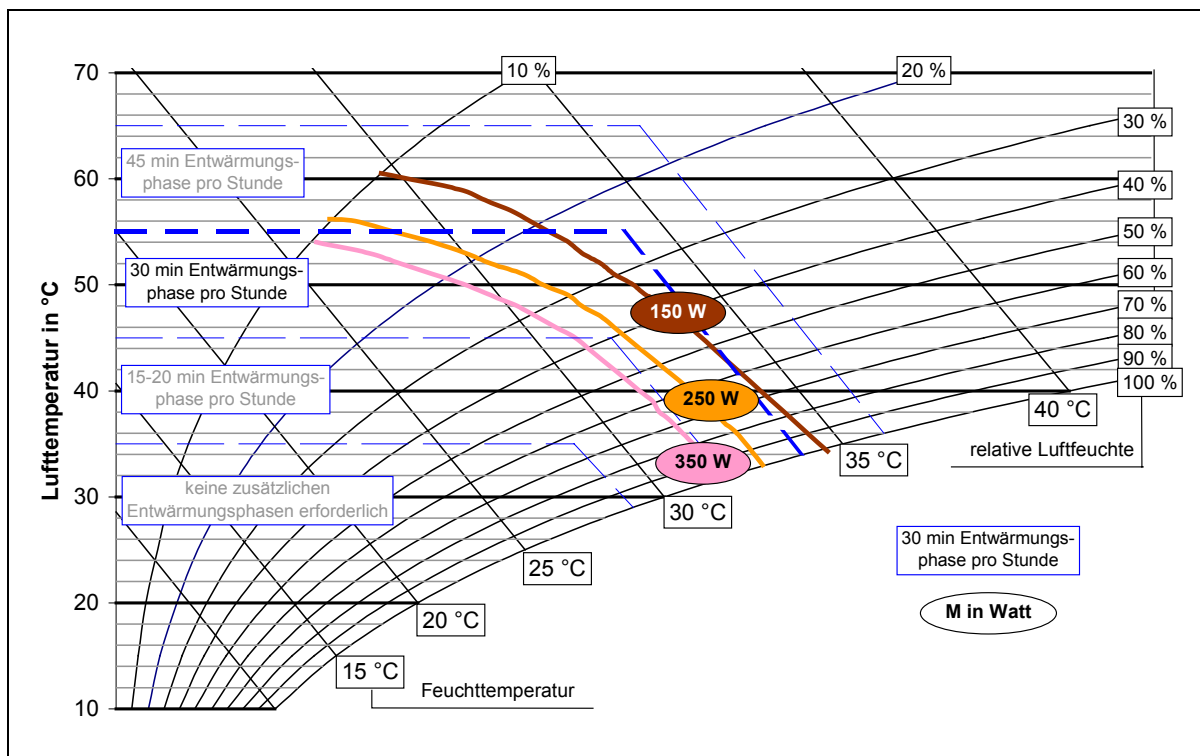


Abb. 4.10 Ermittelte Verläufe der Grenzkurven bei Variation der Arbeitsschwere

Zusammenfassend lässt sich zur Ermittlung der erforderlichen Entwärmungsphasen mittels des PHS-Modells feststellen:

- aus dem PHS-Modell abgeleitete Grenzkurven zur Ermittlung einer erforderlichen Entwärmungsphase stimmen im feucht-warmen Bereich vergleichsweise gut mit dem Diskussionsvorschlag nach Pangert et. al. (2003) überein, zeigen jedoch im trocken-heißen Bereich zum Teil auch deutliche Abweichungen gegenüber dem Diskussionsvorschlag auf;

- das im Diskussionsvorschlag enthaltene „Abknicken“ der Grenzkurven bei geringen Luftfeuchten konnte grundsätzlich bestätigt werden, entsprechend dem stetigen Ansatz des PHS-Modells fällt dieses jedoch weniger stark ausgeprägt aus;
- die Auswirkungen der Variation einzelner Eingangsgrößen konnte am Beispiel der Arbeitsschwere veranschaulicht werden.

4.4 Möglichkeiten der Einbeziehung der Wärmestrahlung

Sieht das PHS-Modell die Einbeziehung der Wärmestrahlung unmittelbar über die Angabe der mittleren Strahlungstemperatur (t_r) vor, so ist eine Darstellung auf der Grundlage des psychrometrischen Diagramms, wie es der Vorschlag von Pangert et al. (2003) [24] vorsieht (vgl. **Abb. 2.3** auf Seite 16), zunächst auf die Größen Lufttemperatur und Luftfeuchte beschränkt. Damit ist die Anwendbarkeit bei ausgeprägter zusätzlicher Wärmestrahlung zunächst nicht gegeben.

Der Einsatz der Globetemperatur anstelle der Lufttemperatur gibt hier die Möglichkeit, zumindest orientierend diesen Faktor mit zu berücksichtigen. Die Globetemperatur wird dabei von der Lufttemperatur, der Wärmestrahlung sowie der Luftgeschwindigkeit beeinflusst.

Sind Luftgeschwindigkeit und zusätzliche Wärmestrahlung gering ausgeprägt, so entspricht die Globetemperatur in erster Näherung der Lufttemperatur. Bei zusätzlicher Wärmestrahlung nimmt die Globetemperatur Werte oberhalb der Lufttemperatur an. Eine erhöhte Luftgeschwindigkeit trägt im Regelfall zur Kühlung der Globekugel bei, so dass die Globetemperatur geringere Werte annimmt als bei vernachlässigbarer Luftgeschwindigkeit.

Setzt man die Globetemperatur anstelle der Lufttemperatur ein, so ist festzustellen, dass der Einfluss der Wärmestrahlung überschätzt wird. Dies wird z.B. deutlich, legt man die Ergebnisse von Untersuchungen von Forsthoff und Neffgen (1993) [5] zugrunde, die im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

4.4.1 Physiologisch äquivalente Temperatur

In dieser Arbeit wurden auf der Grundlage einer Auswertung von ca. 900 laborexperimentellen Untersuchungen Kombinationen von Lufttemperatur, Wärmestrahlung und Luftgeschwindigkeit ermittelt, die zu vergleichbaren (äquivalenten) Beanspruchungsreaktionen führen.

Dabei wurde die Beanspruchung zunächst unter einem bestimmten Bezugsklima, beispielsweise bei 40 °C, ermittelt. In anschließenden Versuchsserien wurde die Lufttemperatur stufenweise reduziert und die Wärmestrahlung stufenweise so lange gesteigert, bis die Beanspruchung gleich der im Bezugsklima war. Der dabei untersuchte Wertebereich der einzelnen Einflussgrößen (Variablen) ist in **Tab. 4.6** wiedergegeben. Bei einem Lufttemperaturbereich von 5 °C bis 55 °C konzentrieren sich die untersuchten Kombinationen mit einem Wasserdampfpartialdruck von 0,5 bis 1,5 kPa auf den trocken-warmen bzw. trocken-heißen Bereich. Der feucht-warme Bereich

wird dabei ausgeklammert. Hinzu kommt sicher, dass nicht alle denkbaren Permutationen der angegebenen Variablen untersucht werden konnten.

Auf diese Weise ermittelte physiologisch äquivalente Klimabedingungen wurden mit dem selben Temperaturwert – dort als t_{eq} für „äquivalente Temperatur“ – bezeichnet, diese entspricht jeweils der Lufttemperatur des jeweiligen Bezugsklimas.

Tab. 4.6 Bereiche der von Forsthoff und Neffgen (1993) [5] untersuchten Variablen

Untersuchte Variable		Wertebereiche, in denen Untersuchungen durchgeführt wurden
Lufttemperatur	t_a	(5 .. 55) °C
mittlere Strahlungstemperatur	\bar{t}_r	(25 .. 160) °C
Luftgeschwindigkeit	v_a	(0,5 .. 2,0) m/s
Wasserdampfpartialdruck	p_a	(0,5 .. 1,5) kPa
Effektive Bestrahlungsstärke	E_{eff}	(-40 .. 1400) W/m ²
Globetemperatur	t_g	(25 .. 76) °C
Bestrahlungsrichtung	--	allseitig, einseitig
Luftströmungsrichtung	--	von vorn, von hinten
(Brutto-)Energieumsatz	EU	(200 .. 350) W
Bekleidungsisolationswert	I_{cl}	0,1 clo sowie 0,7 clo

Forsthoff und Neffgen (1993) [5] geben weiter an, dass die so ermittelten Äquivalenzlinien keine Abhängigkeit von den untersuchten Varianten der Bestrahlungsrichtung (allseitig, einseitig) und der Luftströmungsrichtung (ventral, dorsal) aufwiesen. Dies ist insofern bedeutsam, als dass die integrierende Wirkung der Globekugel offensichtlich die Beanspruchungsreaktion bei allseitiger wie einseitiger Bestrahlung spiegelt.

Für den bekleideten Menschen – angegeben wird ein Isolationswert der Bekleidung von 0,7 clo - kann danach die äquivalente Temperatur t_{eq} mittels folgender Formel bestimmt werden:

$$t_{eq} = \frac{t_g + (0,546 - 0,033 \cdot v_a) \cdot t_a}{1,546 - 0,033 \cdot v_a}$$

mit t_a : Lufttemperatur in °C
 t_g : Globetemperatur in °C
 t_{eq} : Äquivalente Temperatur in °C
 v_a : Luftgeschwindigkeit in m/s

Unter Einsatz dieser Formel ergeben sich für die (physiologisch) äquivalente Temperatur für verschiedene, in der Praxis relevante Luftgeschwindigkeiten folgende Koeffizienten für die Globe- und Lufttemperatur, die als entsprechende Anteile interpretiert werden können:

$$v_a \leq 0,5 \text{ m/s} : t_{eq} = 0,65 \cdot t_g + 0,35 \cdot t_a$$

$$v_a = 1 \text{ m/s} : t_{eq} = 0,66 \cdot t_g + 0,34 \cdot t_a$$

$$v_a = 2 \text{ m/s} : t_{eq} = 0,68 \cdot t_g + 0,32 \cdot t_a$$

Im betrachteten Wertebereich der Luftgeschwindigkeit bis 2 m/s variiert der Anteil der Globetemperatur danach zwischen 65 % und 68 % und nimmt mit steigender Luftgeschwindigkeit zu.

4.4.2 Operative Raumtemperatur

Die operative (Raum-)Temperatur (Formelzeichen t_o) ist insbesondere im thermischen Behaglichkeitsbereich eine häufig eingesetzte Größe, um das Zusammenwirken von Wärmestrahlung und Konvektion zu beschreiben.

Die operative (Raum-)Temperatur (t_o) ist definiert als „die einheitliche Temperatur einer Umgebung, in der der Mensch dieselbe Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauscht wie in der tatsächlichen, uneinheitlichen Umgebung“ (vgl. DIN EN ISO 7730) und wird aus einer Wärmebilanzbetrachtung abgeleitet.

Nach DIN EN ISO 7730 gilt weiter näherungsweise der Zusammenhang:

$$t_o = (1 - A) \cdot \bar{t}_r + A \cdot t_a$$

- mit t_a : Lufttemperatur in °C
 \bar{t}_r : mittlere Strahlungstemperatur in °C
 t_o : operative (Raum-)Temperatur in °C
 A : Koeffizient, dabei gilt:
 A = 0,5 für $v_a < 0,2$ m/s
 A = 0,6 für $v_a 0,2..0,6$ m/s
 A = 0,7 für $v_a 0,6..1,0$ m/s

Dabei gilt nach DIN EN ISO 7726 der Zusammenhang

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot (t_g - t_a)} - 273$$

Nach Linearisierung innerhalb des betrachteten Wertebereiches erhält man

$$v_a = 0,1 \text{ m/s} : t_o \approx 0,66 \cdot t_g + 0,34 \cdot t_a$$

$$v_a = 0,4 \text{ m/s} : t_o \approx 0,67 \cdot t_g + 0,33 \cdot t_a$$

$$v_a = 0,8 \text{ m/s} : t_o \approx 0,69 \cdot t_g + 0,31 \cdot t_a$$

mit t_a : Lufttemperatur in °C
 t_g : Globetemperatur in °C
 t_o : operative (Raum-)Temperatur in °C

Damit ergibt sich ein vergleichbarer formaler Zusammenhang wie für die im vorangehenden Abschnitt diskutierte (physiologisch) äquivalente Temperatur.

4.4.3 Zur Abhängigkeit der Globetemperatur bei unterschiedlichen Strahlungsverhältnissen

Neuschultz (2003) [23] untersuchte u.a. die Globetemperatur bei unterschiedlichen Strahlungsverhältnissen. Einbezogen wurden einseitige frontale und laterale ebenso wie isotrope (allseitige) Einstrahlung. Die Ergebnisse sind in **Abb. 4.11** wiedergegeben. Dargestellt ist die Globetemperatur in Abhängigkeit der Effektiven Bestrahlungsstärke, die einerseits richtungsbezogen, andererseits über alle Raumrichtungen gemittelt ausgewiesen wird.

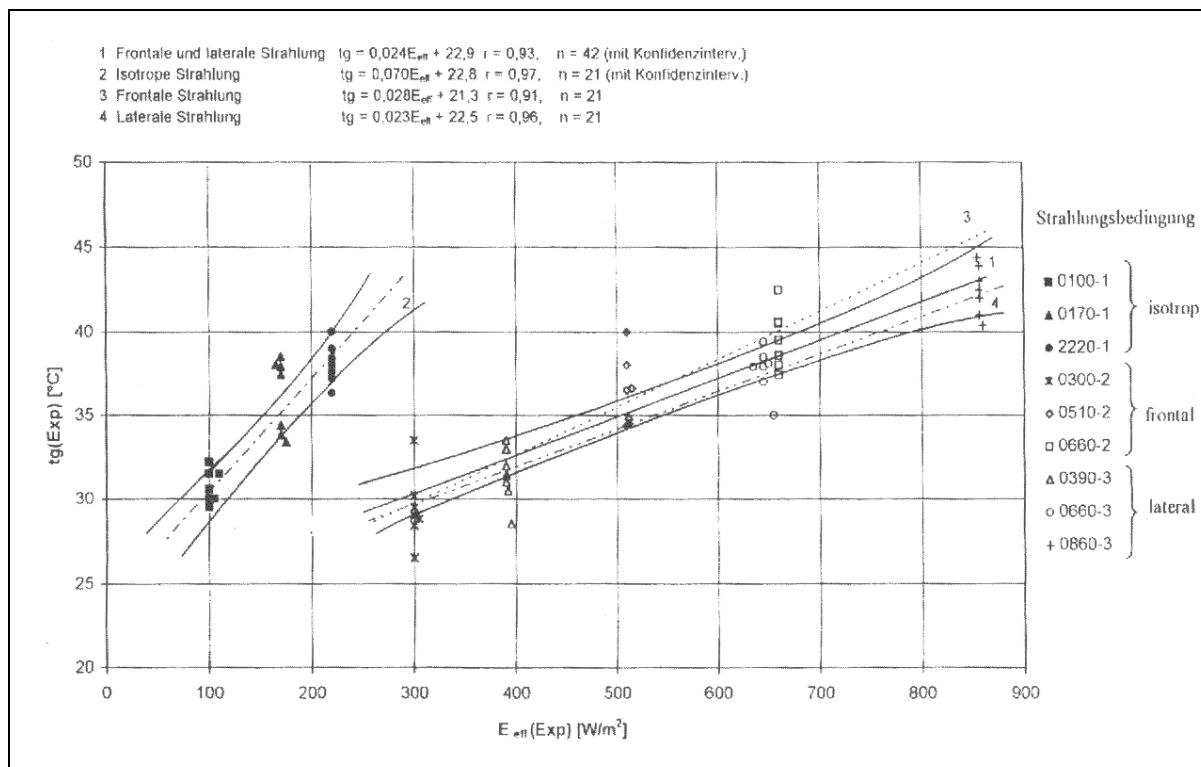


Abb. 4.11 Globetemperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher Strahlungsverhältnisse (Neuschultz (2003) [23])

Durch lineare Regression lässt sich für die eingezeichneten Geraden ermitteln:

$$\left. \begin{array}{l} \text{einseitig (frontal / lateral):} \\ t_g = 0,024 \cdot E_{\text{eff}} + 22,9 \\ \text{allseitig (isotrop):} \\ t_g = 0,070 \cdot E_{\text{eff}} + 22,8 \end{array} \right\} \frac{\text{einseitig}}{\text{allseitig}} \approx 1:3$$

D.h. die Globetemperatur berücksichtigt aufgrund ihrer Geometrie eine gerichtete Einstrahlung in dem Sinne, dass bezogen auf eine allseitige Bestrahlungsstärke in etwa die 3-fache gerichtete Bestrahlungsstärke zu einer vergleichbaren Globetemperatur führt.

4.4.4 Empfehlung

Auf der Grundlage der Ausführungen wird ein Zusammenhang der Form

$$t_{\text{res}} = 0,7 \cdot t_g + 0,3 \cdot t_a$$

unabhängig von der Art der Bestrahlungsrichtung empfohlen. Bei der Anwendung des Diagramms (vgl. **Abb. 2.3** auf Seite 16) kann diese resultierende Temperatur anstatt der Lufttemperatur eingesetzt werden, um die Wärmestrahlung mit zu berücksichtigen.

5 Handlungshilfe zur Gestaltung von Entwärmungsphasen

Der Diskussionsvorschlag nach Pangert et al. (2003) [24] konnte durch die durchgeführten physiologischen Untersuchungen weitgehend bestätigt werden. Einschränkend muss berücksichtigt werden, dass bei den Untersuchungen inter-individuelle Unterschiede der Beanspruchungsreaktion nicht berücksichtigt wurden.

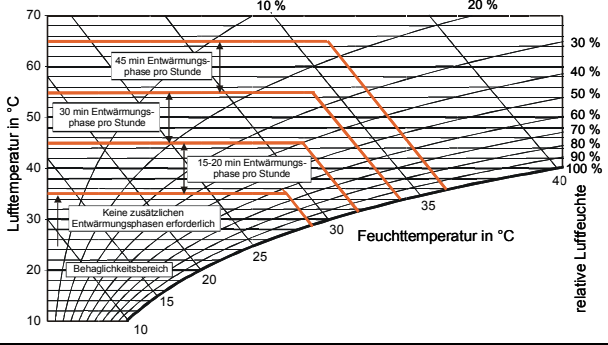
Bei nennenswerter zusätzlicher Wärmestrahlung wird empfohlen, die Lufttemperatur durch eine „resultierende Temperatur“ (t_{res}) zu ersetzen, die auf der Grundlage der Lufttemperatur (t_a) und der Globetemperatur (t_g) nach folgender Formel bestimmt wird:

$$t_{\text{res}} = 0,7 \cdot t_g + 0,3 \cdot t_a$$

Für größere Abweichungen von den im Diskussionsvorschlag gemachten Annahmen hinsichtlich der Eingangsgrößen, insbesondere hin zu ungünstigeren Bedingungen, wird die Anwendung des PHS-Modells zur Überprüfung der Dauer von Arbeits- und Entwärmungsphasen empfohlen.

Tab. 5.1 gibt eine Übersicht zu Bedingungen und Handlungsempfehlungen bei der Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen.

Tab. 5.1 Handlungs- und Entscheidungshilfe bei der Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen

Bedingung	Handlungsempfehlung
<p>Die Randbedingungen für die Anwendung des Diskussionsvorschlages sind erfüllt, d.h. während der Expositionsphase</p> <ul style="list-style-type: none"> - leichte bis mittlere Bekleidungsisolations (ca. 0,6 – 0,9 clo) - leichte bis mittlere Arbeitsschwere (bis ca. 200 W Arbeitsenergieumsatz) - geringe Luftgeschwindigkeiten (bis ca. 0,2 – 0,5 m/s) - weitestgehend konstante Klimabedingungen - Lufttemperatur unter ca. 65 °C und Feuchttemperatur unter ca. 36 °C - keine zusätzliche Wärmestrahlung, z.B. durch heiße Oberflächen oder Aggregate 	<p>Anwendung des Diagramms (vgl. Abb. 2.3 auf Seite 16) zur Bestimmung der Dauer von Expositions- und Entwärmungsphasen auf der Grundlage von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte während der Expositionsphasen.</p> 
<p>Während der Expositionsphasen besteht zusätzliche Wärmestrahlungsbelastung, z.B. durch heiße Oberflächen oder Aggregate</p>	<p>Bestimmung einer resultierenden Temperatur (t_{res}) aus Globetemperatur (t_g) und Lufttemperatur (t_a) nach folgender Formel:</p> $t_{res} = 0,7 \cdot t_g + 0,3 \cdot t_a$ <p>Ersatz der Lufttemperatur durch die resultierende Temperatur bei der Anwendung des Diagramms (vgl. Abb. 2.3 auf Seite 16) zur Bestimmung der Dauer von Expositions- und Entwärmungsphasen</p>
<p>geringere Belastbarkeit, z.B. von weiblichen Beschäftigten, ist zu berücksichtigen</p>	<p>Zur Anpassung an die bei gleichen Anforderungen erhöhte Beanspruchungsreaktion sollte der eingesetzte Arbeitsenergieumsatz erhöht werden, z.B. im Fall von weiblichen Beschäftigten +30 %</p>
<p>schwere körperliche Arbeit, d.h. Arbeitsenergieumsatz > 200 W und/oder schwere Bekleidung (> 0,9 clo) erforderlich</p> <p>erhöhte Luftgeschwindigkeiten und/oder nicht weitgehend konstante Klimabedingungen während der Expositionsphasen</p>	<p>Überprüfung des Ergebnisses auf der Grundlage des PHS-Modells, bei so ermittelten geringeren Expositionsphasen diese verwenden</p>
<p>Lufttemperatur über ca. 65 °C oder Feuchttemperatur über ca. 36 °C oder auf der Grundlage des PHS-Modells ermittelte Expositionsdauer < 15 min</p>	<p>Einleitung technischer Schutzmaßnahmen bzw. Kontrolle physiologischer Parameter während der Belastung (z.B. Herzfrequenz, Körperkerntemperatur) unter Hinzuziehung des Betriebsarztes</p>
<p>generell bzw. darüber hinaus:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beschäftigte auf Gefahren hinweisen und für Anzeichen einer Überbeanspruchung sensibilisieren, nur gesunde und nicht vorgeschädigte Beschäftigte einsetzen; - ausreichendes Trinkregime sicherstellen; - Entwärmungsphasen in klimaneutraler Umgebung bei Ruhe oder höchstens leichter körperlicher Arbeit gewährleisten; - sonstige Vorschriften und Regelungen besonderer Berufsgruppen beachten 	

Ungünstigere Bedingungen liegen z.B. dann vor, wenn die Bekleidungsisolations größer als 0,9 clo ist oder der Arbeitsenergieumsatz während der Expositionsphasen größer als 200 W ist. Ebenso wird die Anwendung des PHS-Modells empfohlen, wenn der Bezug auf eine Stunde aufgrund der organisatorischen Randbedingungen nicht sinnvoll erscheint, d.h. längere Entwärmungsphasen möglich sind und hieraus die Frage resultiert, wie lang unter diesen Umständen die Expositionsphase sein kann. Die durchgeführten Modellrechnungen zeigten, dass eine Berechnung auf der Grundlage „Akklimationsgrad = ja“ gerechtfertigt erscheinen.

Zum Schutz der Gesundheit der Beschäftigten, aber auch aus wirtschaftlichen Überlegungen, sollte generell vorab geprüft werden, ob eine Reduzierung der Belastungssituation während der Expositionsphase möglich ist, d.h. ob Klimabedingungen, Arbeitsschwere und/oder Bekleidungsisolations reduziert werden können. Bei der Bekleidungsisolations sind jeweils u.U. erforderliche zusätzliche Schutzanforderungen zu berücksichtigen.

6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Auf der Grundlage eines „pragmatischen“ Vorschlages für die Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen, der unter Berücksichtigung bestehender Ansätze und einer Auswertung hierzu in Betrieben praktizierter Regelungen in wärmebelasteten Arbeitsbereichen, die weniger organisatorisch als physiologisch begründet waren, erarbeitet und zur Diskussion gestellt wurde (Pangert, Bux, Frener (2003) [24]), wurden einerseits orientierende Laboruntersuchungen andererseits die Anwendung des in der DIN EN ISO 7933 im einzelnen beschriebenen PHS-(„Predicted-Heat-Strain“-)Modells untersucht.

Kennzeichnend für dieses Modell ist, dass alle wesentlichen Einflussgrößen und deren Zusammenwirken berücksichtigt werden. Das Modell basiert auf einer Wärmebilanzbetrachtung und ermöglicht insbesondere auch die Beurteilung von Vorgangfolgen mit unterschiedlichen Expositionsbedingungen. Im Ergebnis werden für die Beanspruchung maßgebliche Parameter wie Schweißrate, Schweißproduktion und Körper(kern-)temperatur prognostiziert, auf deren Grundlage eine Beurteilung der Belastungssituation abgeleitet wird. Diese Eigenschaften sind grundsätzlich positiv zu beurteilen, bergen jedoch auch Gefahren, da die komplexen Zusammenhänge der Thermoregulation ebenso komplexe Beschreibungen erfordern und damit die Anwendung zunächst Experten vorbehalten sein sollte.

In diesem Zusammenhang wurden für Eckpunkte und ausgewählte Anteile von Arbeits- und Entwärmungsphasen Laborversuche durchgeführt, anhand derer einerseits die vorgeschlagenen Arbeits- und Entwärmungsphasen durch physiologische Messungen überprüft, andererseits die Anwendung des Modells für die Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen erprobt wurde.

Auswertung der Versuchsreihe

Die Auswertung der Versuchsreihe kann als weiterer Beleg für die Praktikabilität des Vorschlages von Pangert et al. (2003) [24] gesehen werden. Die Resultate der Versuchsreihe bestätigen weitgehend das für die Klimabedingungen vorgeschlagene

Verhältnis von Arbeits- und Entwärmungsphase. Für den untersuchten Probanden ergeben sich für 3 der untersuchten 5 Klimabedingungen nach der 4. Arbeitsphase Werte für die Rektaltemperatur im Bereich von 38 °C. Für die Klimabedingung 60 °C/16 % rel. Luftfeuchte (trocken-heiß) lag der Wert mit 37,5 °C deutlich darunter, während für die Klimakombination 40 °C/60 % rel. Luftfeuchte (feucht-warm) der Wert mit 38,4 °C darüber lag, wobei jedoch das Abbruchkriterium nicht erreicht wurde.

Eine Betrachtung der Kontrollversuche mit einem ungünstigeren Verhältnis zwischen Arbeits- und Entwärmungsphasen führte mit einer Ausnahme jeweils zum Erreichen des Abbruchkriteriums von 38,5 °C, was als ein zusätzlicher Beleg für die sinnhafte Wahl des Verhältnisses zwischen Arbeits- und Entwärmungsphasen gewertet werden kann. Lediglich im Fall der Klimakombination 40 °C/ 27 % rel. Luftfeuchte wurde das Abbruchkriterium auch bei ununterbrochener Exposition nicht erreicht.

Modellberechnungen unter Einsatz des PHS-Modells, in denen die Laborversuche nachgebildet wurden, wiesen in der Tendenz eine eher vorsichtigere Schätzung aus, was die Arbeitszeit weiter begrenzen bzw. die Entwärmungsphasen verlängern würde. Die Unterschiede lagen dabei weniger im Anstiegs- und Abklingverhalten der Rektaltemperatur begründet als vielmehr darin, dass die Schweißabgabe während der Entwärmungsphasen deutlich geringer prognostiziert wurde als die Messwerte dies zeigten.

Die real ohne Bekleidungswechsel aufgrund der durchnässten Kleidung zu beobachtende z.T. erhebliche Verdampfungskühlung während der Entwärmungsphasen wird im Modell nicht in dieser Form nachgebildet. In einem orientierenden Versuch mit Bekleidungswechsel, d.h. Anlegen trockener Kleidung während der Entwärmungsphasen, konnte dies belegt werden. In diesem Fall war die Beanspruchungsreaktion gemessen an der Rektaltemperatur mit Werten im Bereich von 38,4 °C und 38,5 °C nach der 3. und 4. Arbeitsphase gegenüber dem entsprechenden Versuch ohne Bekleidungswechsel um etwa 0,5 °C erhöht, was den Effekt der Verdampfungskühlung während der Entwärmungsphasen quantitativ belegt.

Auswertung der Modellberechnungen

Bei Anwendung des PHS-Modells zur Ermittlung von Grenzkurven analog zu den im Diskussionsvorschlag abgeleiteten Kurven zeigte sich eine vergleichsweise gute Übereinstimmung im feucht-warmen Bereich, während im trocken-heißen Bereich z.T. auch deutliche Abweichungen festgestellt wurden. Dies liegt vor allem darin begründet, dass das Abknicken der Grenzkurven zwar in der Tendenz bestätigt wird, jedoch aufgrund des stetigen Modellansatzes in weitaus geringerer Form.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Modell im Idealfall ausschließlich die Wärmebilanz und den damit verbundenen Anstieg der Körperkerntemperatur abbildet. Nicht berücksichtigt werden z.B. lokale Hauttemperaturen, die allein bereits Beschwerden hervorrufen können. Dies drückt sich dann insbesondere im trocken-heißen Bereich aus, was auch in einer gesonderten Behandlung des Salzbergbaus in der Klimabergverordnung zum Ausdruck kommt.

Weiter gilt zu berücksichtigen, dass praktizierte betriebliche Regelungen, die in den Diskussionsvorschlag eingeflossen sind, wahrscheinlich auf klimabedingten Zwi-

schenfällen oder anhand von Beschwerden der Mitarbeiter eingeführt wurden. Diese mutmaßlich klimabedingten Zwischenfälle können bei Mitarbeitern in normaler Verfassung durch die hitzeempfindlichsten Mitarbeiter verursacht werden, bei Formschwankungen von sonst „hitzeresistenten“ Mitarbeitern z.B. durch beginnende Infekte ausgelöst werden. In beiden Fällen läge die Grenze niedriger im Verhältnis zum Normalkollektiv, für das die Berechnungen des PHS-Modells durchgeführt werden. Eine so "strengere" Regelung fällt natürlich in den horizontalen Teilen der Grenzlinien deutlicher aus als in den steilen Abschnitten, wo man sie als entsprechend kleinere horizontale Verschiebung ansehen würde.

Aus den genannten Gründen erscheint eine vorsichtigeren Behandlung des trockenheißen Temperaturbereiches im Sinne des Diskussionsvorschlages gerechtfertigt. Der Einsatz des aktuellen PHS-Modells sollte entsprechend auf die Überprüfung bei stark abweichenden Klima- und Arbeitsbedingungen beschränkt sein, was in der in Kapitel 5 abgeleiteten Handlungshilfe zum Ausdruck kommt.

Berücksichtigung der Wärmestrahlung

Hinsichtlich der Berücksichtigung der Wärmestrahlung wurden bestehende Ansätze ausgewertet und hieraus eine resultierende Temperatur abgeleitet, die bei der Bestimmung der Entwärmungsphasen anstatt der Lufttemperatur während der Expositionsphase eingesetzt werden kann. Sie wird bestimmt aus der Globetemperatur und der Lufttemperatur, wobei für die Globetemperatur ein Anteil von 70 %, für die Lufttemperatur ein Anteil von 30 % empfohlen wird.

Ableitung einer Handlungshilfe

Eine in Form einer tabellarischen Übersicht abgeleitete Handlungshilfe fasst die Ergebnisse zusammen. Empfohlen wird dabei, bei gegebenen Expositionsparametern zunächst die Voraussetzungen für die Anwendung des Diskussionsvorschlages zu überprüfen. Sind die Voraussetzungen erfüllt, kann das Verhältnis zwischen Arbeits- bzw. Expositions- und Entwärmungsphase auf der Grundlage des Diagramms nach Pangert et al. (vgl. **Abb. 2.3** auf Seite 16) bestimmt werden. Im Fall zusätzlicher Wärmestrahlung, z.B. bedingt durch heiße Oberflächen oder Aggregate im Arbeitsbereich, ist dabei die resultierende Temperatur entsprechend der abgeleiteten Empfehlung aus der Globetemperatur und der Lufttemperatur zu bestimmen und statt der Lufttemperatur einzusetzen.

Sind die Voraussetzungen nicht erfüllt, z.B. aufgrund erhöhter erforderlicher Arbeitsschwere und/oder Bekleidungsisolierung oder nicht konstanter Klimabedingungen während der Expositionsphase, so wird die Anwendung des PHS-Modells empfohlen. Hierzu sind die Expositions- und Entwärmungsphasen zahlenmäßig nachzubilden und iterativ die maximalen Expositionszeiten und die Dauer der erforderlichen Entwärmungsphasen für eine Anzahl von Belastungswechseln innerhalb einer Schichtdauer zu bestimmen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Grenzkriterien hinsichtlich Körpertemperatur und Schweißabgabe eingehalten werden. Ein ausreichendes Trinkregime ist zu gewährleisten. Liegt die so ermittelte maximale Expositionsdauer unterhalb von 15 Minuten, sollte als zusätzliches Grenzkriterium unter Hinzuziehung des Betriebsarztes eine Kontrolle physiologisch relevanter Parameter erfolgen, um eine mögliche Überbeanspruchung zu vermeiden.

Ausblick

Bei der punktuellen Bestätigung der im Diskussionsvorschlag angegebenen Empfehlungen für eine Regelung von Arbeits- und Entwärmungsphasen muss einschränkend beachtet werden, dass inter-individuelle Unterschiede bei den bisherigen physiologischen Versuchen keine Berücksichtigung fanden, vielmehr ging es hier vorrangig darum, die grundsätzlichen Zeitverläufe relevanter physiologischer Größen zu ermitteln, um sie mit den Verläufen der Berechnungsmodelle zu vergleichen.

Zur Absicherung der Erkenntnisse bedarf es insofern weiterer physiologischer Untersuchungen unter Beteiligung mehrerer Probanden, wodurch die Spannweite der physiologischen Reaktionen aufgezeigt werden kann. Wesentliche Parameter sind hier u.a. körperliche Fitness, Alter ebenso wie Hitzetoleranz. Die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen können so einerseits dazu beitragen, den Diskussionsvorschlag weiter zu optimieren. Gleichmaßen können inter-individuelle "Fehlergrenzen" des Diskussionsvorschlages ebenso wie der Berechnungsergebnisse des PHS-Modells aufgezeigt werden, um so durch weiter abgesicherte Wahl von Arbeits- und Entwärmungsphasen Sicherheit und Gesundheit bei Arbeiten in wärmebelasteten Bereichen zu gewährleisten. Dies nicht nur, aber auch vor dem Hintergrund gerade in den letzten Jahren häufiger zu beobachtender wärmerer Sommermonate, die eine Ausweitung der Relevanz entsprechender Empfehlungen erwarten lassen.

7 Literatur

7.1 Schrifttum

- [1] **Aschoff, J.:** Temperaturregulation. In: Aschoff, J., B. Günther, K. Kramer (Hrsg.): Energiehaushalt und Temperaturregulation. Urban und Schwarzenberg, München 1971, S. 43-116.
- [2] **Belding H. S., Hatch, T. F.:** Index for Evaluating Heat Stress in Terms of Resulting Physiological Strains. Heating, Piping & Air Condit. 27, 129-136 (1955).
- [3] **BGI 504-30:** Auswahlkriterien für die spezielle arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G30 – Hitzearbeiten. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (Hrsg.), Köln, Carl Heymanns Verlag 1-8 (1998). (Vormals: ZH1/600.30)
- [4] **Brouha, L., Maxfield, M. E., Smith Jr., P. E., Stopps, G. J.:** Discrepancy between heart rate and oxygen consumption during work in the warmth. J. Appl. Physiol. 18.6, 1095-1098 (1963).
- [5] **Forsthoff, A., Neffgen, H.:** Ein Klimasummenmaß zur Beurteilung von Klimaten mit Wärmestrahlung. Z. Arb. wiss. 47 (1993), 16
- [6] **Funkemeyer, M., Kampmann, B., Piekarski, C.:** Belastung und Beanspruchung der Grubenwehrmitglieder. Glückauf 130 Heft 9, 591-596 (1994).

- [7] **Gebhardt, Hj., Kampmann, B., Müller, B.H., Peters, H., Piekarski, C.:** Systematische Analyse aktueller Kimasummenmaße für Hitzearbeitsplätze. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): Forschungsbericht Nr. 829, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1999
- [8] **Gebhardt, Hj., Müller, B.H., Hettinger, Th., Pause, B.:** Physiologische Bewertung von Strahlungsheizungen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz (Hrsg.): Forschungsbericht Nr. 726, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1995
- [9] **Kalkowsky, B., Kampmann, B., Piekarski, C.:** Herzschlagfrequenzen von Bergleuten an klimabelasteten Arbeitsplätzen im Vergleich zur Beanspruchung bei der Vorsorgeuntersuchung. In: Dokumentationsband über die 43. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. in Dresden vom 26. bis 29. März 2003, (Hrsg. von K. Scheuch und E. Haufe), Rindt-Druck, Fulda 2003; S. 154-158.
- [10] **Kampmann B., Piekarski, C.:** Bewertung klimabelasteter Arbeitsplätze. Lassen sich mit der Norm ISO 7933 klimabelastete Arbeitsplätze in der Industrie bewerten? Sichere Arbeit, Heft 1/1995, S. 14-21. Sichere Arbeit, Heft 2/1995, S. 55.
- [11] **Kampmann B., Piekarski, C., Morfeld, P.:** Bewertung der ISO 7933: Vergleich der Beanspruchungsprognose der Norm mit Beanspruchungsmessungen in Klimakammern. Z.Arb. Wiss. 46 (1992), 208
- [12] **Kampmann, B., Kalkowsky, B., Piekarski, C.:** Estimation of metabolic rate from cardiac frequency for field studies: correcting for thermal pulses. J. therm. Biol. 26.4-5, 437-440 (2001).
- [13] **Kampmann, B., Kalkowsky, B., Piekarski, C.:** Untersuchung zur Beanspruchung von Bergleuten an heißen Betriebspunkten. Glückauf 137.5, 263-268 (2001).
- [14] **Kampmann, B.:** Klima, Hitze. In: Handbuch der betriebsärztlichen Praxis. Grundlagen - Diagnostik - Organisation - Prävention - Rechtskommentare. 4. Ergänzungslieferung Oktober 2004. Hrsg. von F. Hofmann und N. Kralj. 2. Ergänzungslieferung April 2004, ecomed verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech 2004. Arbeitsplatz-, Arbeits- und Tätigkeitsprofile; Kapitel 9.2. Klima, S. 1-17
- [15] **Kampmann, B.:** Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und aus Feldstudien im Steinkohlenbergbau. Habilitationsschrift zur Erlangung der Venia Legendi im Fach Arbeitsphysiologie des Fachbereiches Sicherheitstechnik an der Bergischen Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Mai 2000, 287 Seiten. <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/edocs/dokumente/fb14/habi2000/kampmann>
- [16] **Lange-Andersen, K., Shephard, R. J., Denolin, H., Varnauskas, E., Masironi, R.:** Fundamentals of exercise testing. WHO, Genf 1971, 1-133 (1971).

- [17] **Lind, A. R.:** A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work. *J. Appl. Physiol.* 18.1, 51-56 (1963).
- [18] **Malchaire, J., Piette, A., Kampmann, B., Mehnert, P., Gebhardt, Hj., Havenith, G., den Hartog, E., Holmér, I., Parsons, K., Alfano, G., Griefahn, B.:** Development and Validation of the Predicted Heat Strain Model. *Ann. Occup. Hyg.* 45.2, 123-135 (2001).
- [19] **Malchaire, J., Kampmann, B., Havenith, G., Mehnert, P., Gebhardt, Hj.:** Criteria for estimating acceptable exposure times in hot working environments: a review. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 73, 215-220 (2000).
- [20] **Malchaire, J.:** Predicted sweat rate in fluctuating thermal conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 63, 282-287 (1991)
- [21] **Mehnert, P., Kampmann, B., Griefahn, B., Gebhardt, Hj.:** Beurteilung hoher Wärmebelastungen am Arbeitsplatz durch den Klimaindex "Predicted Heat Strain" (PHS) im Vergleich zum Klimasummenmaß "Erforderliche Schweißrate" (ISO 7933 (1989)). In: Dokumentationsband über die 40. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. in Berlin vom 15. bis 18. Mai 2000, (Hrsg. G. Schäcke, P. Lüth), Rindt-Druck, Fulda 2000; S. 532-535.
- [22] **Mehnert, P., Malchaire, J., Kampmann, B., Piette, A., Griefahn, B., Gebhardt, Hj.:** Prediction of the average skin temperature in warm and hot environments. *Eur. J. Appl. Physiol.* 82.1-2, 52-60 (2000).
- [23] **Neuschulz, H.:** Thermophysiologische Beanspruchung des menschlichen Organismus durch anisotrope Infrarotstrahlung. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.), Sonderschrift S 76, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2003)
- [24] **Pangert, R.; Bux, K., Frener, P.:** Hitzearbeit – Hitzepausen, *ErgoMed* 3/2003, 82-89
- [25] **Parsons, K. C.:** Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. London, Taylor & Francis, 2. Aufl. (2003).
- [26] **Piekarski, C.:** Störungen und Erkrankungen durch klimatische Einwirkungen. In: Kühn, H. A., J. Schirmeister (Hrsg.): *Innere Medizin. Ein Lehrbuch für Studierende der Medizin und Ärzte.* Begründet von L. Heilmeyer. Springer Verlag, Berlin 1982.
- [27] **Plan für das Grubenrettungswesen,** Hauptstelle für das Grubenrettungswesen, Herne 1997, 45 S.
- [28] **Shirreffs, S. M., Maughan, R. J.:** Rehydration and Recovery of Fluid Balance after Exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 29.1, 27-32 (2000).

- [29] **Vogelsang, H.-C., Ulmer, H.-V.:** Zur Notwendigkeit einer ausreichenden körperlichen Leistungsfähigkeit bei Atemschutzgeräteträgern der Feuerwehren. Zbl. Arbeitsmed. 36, 197-203 (1986).
- [30] **Vogt, J.J., Candas, V., Libert, J. P., Hoefft, A.:** Die erforderliche Schweißabgabe als Index der Wärmebelastung; Z.Arb. Wiss. 32 (1978), 241
- [31] **Voß, J., Walasiak, J., Voß, A.:** Kritische Bemerkungen zum Klimasummenmaß „Erforderliche Schweißrate“; Z.Arb. Wiss. 44 (1991), 106
- [32] **Wenzel, H. G., Piekarski, C.:** Klima und Arbeit. In: Bayerisches Staatsministerium für Arbeit, Sozialordnung (Hrsg.): München, 2. Aufl. 1984, insb. S. 115f.
- [33] **WHO:** Health Factors Involved in Working under Conditions of Heat Stress. World Health Organization. Technical Report Series 412, 1-32 (1969).

7.2 Aktuelle Normen

Grundlagen, Ermittlung der Einfluss- und Zielgrößen

DIN EN ISO 7726, Ausgabe: 2002-04

Umgebungsklima - Instrumente zur Messung physikalischer Größen (ISO 7726:1998); Deutsche Fassung EN ISO 7726:2001

DIN EN ISO 8996, Ausgabe: 2005-01

Ergonomie der thermischen Umgebung - Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes (ISO 8996:2004); Deutsche Fassung EN ISO 8996:2004

DIN EN ISO 9886, Ausgabe: 2004-05

Ergonomie - Ermittlung der thermischen Beanspruchung durch physiologische Messungen (ISO 9886:2004); Deutsche Fassung EN ISO 9886:2004

DIN EN ISO 9920, Ausgabe: 2004-02

Ergonomie des Umgebungsklimas - Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination (ISO 9920:1995); Deutsche Fassung EN ISO 9920:2003

DIN 33403-2, Ausgabe: 2000-08

Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung - Teil 2: Einfluss des Klimas auf den Wärmehaushalt des Menschen

Klimabewertung an wärmebelasteten Arbeitsplätzen

DIN 33403-3, Ausgabe: 2001-04

Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung - Teil 3: Beurteilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Klimasummenmaße

DIN EN 27243, Ausgabe: 1993-12

Warmes Umgebungsklima; Ermittlung der Wärmebelastung des arbeitenden Menschen mit dem WBGT-Index (wet bulb globe temperature) (ISO 7243:1989); Deutsche Fassung EN 27243:1993

DIN EN ISO 7933, Ausgabe: 2004-12

Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (ISO 7933:2004); Deutsche Fassung EN ISO 7933:2004

Ersatz für

DIN EN 12515, Ausgabe: 1997: Warmes Umgebungsklima - Analytische Bestimmung und Beurteilung der Wärmebelastung durch Berechnung der erforderlichen Schweißrate

Spezielle Anwendungen

DIN EN ISO 7730, Ausgabe 2006-05

Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005

DIN EN ISO 11399, Ausgabe:2001-04

Ergonomie des Umgebungsklimas - Grundlagen und Anwendung relevanter Internationaler Normen (ISO 11399:1995); Deutsche Fassung EN ISO 11399:2000

DIN EN ISO 12894, Ausgabe:2002-08

Ergonomie des Umgebungsklimas - Medizinische Überwachung von Personen, die einer extrem heißen oder kalten Umgebung ausgesetzt sind (ISO 12894:2001); Deutsche Fassung EN ISO 12894:2001

DIN EN ISO 15265, Ausgabe:2004-11

Ergonomie der thermischen Umgebung - Strategie zur Risikobeurteilung zur Abwendung von Stress oder Unbehagen unter thermischen Arbeitsbedingungen (ISO 15265:2004); Deutsche Fassung EN ISO 15265:2004

8 Verwendete Abkürzungen und Symbole

Formelzeichen

Symbol	Erläuterungen	Einheit
A	dimensionsloser Koeffizient	--
AU	Arbeitsenergieumsatz	W
E_{eff}	Effektive Bestrahlungsstärke	W/m ²
EU	Energieumsatz	W
I_{cl}	Bekleidungsisolation	clo (m ² ·K/W)
KG	Körpergewicht	kg
M	Energieumsatz/metabolische Wärmeproduktion	W (W/m ²)
p_a	Wasserdampfpartialdruck	kPa
rF	relative Luftfeuchte	%
SW_{req}	Erforderliche Schweißrate	W/m ² (g/h)
t_a	Lufttemperatur	°C
t_{eq}	äquivalente Temperatur	°C
t_g	Globetemperatur	°C
t_o	operative (Raum-)Temperatur	°C
\bar{t}_r	mittlere Strahlungstemperatur	°C
t_{re}	Rektaltemperatur	°C
$t_{\text{re,limit}}$	Grenzwert der Rektaltemperatur	°C
t_{res}	resultierende Temperatur	°C
v_a	Luftgeschwindigkeit	m/s

Abkürzungen

CEN	Europäisches Komitee für Normung
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	International Organisation for Standardisation
PHS	Predicted Heat Strain (-Modell)
ULPZ	Upper Limit of the Prescriptive Zone
WHO	World Health Organisation

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Einteilung der Klimabelastung nach der Auswirkung auf die Körpertemperatur (aus: Kampmann (2000) [15]).....	10
Abb. 2.2	Das PHS-Modell als „Black Box“	15
Abb. 2.3	Diskussionsvorschlag für eine Regelung von Expositions- und Entwärmungsphasen nach Pangert, Bux, Frener (2003) [24].....	16
Abb. 3.1	Auswahl von Klimabedingungen.....	18
Abb. 3.2	Vorbereitung der Laborversuche (1): Desinfizierung (links) und Kalibrierung (rechts) des Rektaltemperaturfühlers.....	19
Abb. 3.3	Vorbereitung der Laborversuche (2): Herzfrequenz Erfassung: Messwertnehmer (links) und Messumformer (rechts).....	19
Abb. 3.4	Durchführung der Laborversuche: Aufzeichnung und Überwachung von Herzfrequenz und Rektaltemperatur	20
Abb. 4.1	Nachbildung einer Abfolge von Arbeits- und Entwärmungsphasen hier: Ermittelter Verlauf der Herzfrequenz (obere Kurve, original und geglättet, rechte Skalierung) und der Rektaltemperatur (untere Kurve, linke Skalierung).....	21
Abb. 4.2	Nachbildung eines Anteils von Arbeits- und Entwärmungsphase hier: Schweißabgabe (untere Kurve) und Flüssigkeitsaufnahme (obere Kurve).....	22
Abb. 4.3	Veränderung des Bekleidungsstatus mit fortschreitender Versuchszeit links: zu Beginn des Versuchs; mitte: am Ende des 1. Arbeitszyklusses; rechts: am Ende des 4. Arbeitszyklusses.....	22
Abb. 4.4	Vergleich zwischen gemessenen und prognostizierten Verläufen unter verschiedenen Randbedingungen hier: Rektaltemperatur; zu den Randbedingungen und (Kurven-)Bezeichnungen siehe Tab. 4.5	29
Abb. 4.5	Vergleich zwischen gemessenen und prognostizierten Verläufen unter verschiedenen Randbedingungen hier: Schweißabgabe zu den Randbedingungen und (Kurven-)Bezeichnungen Tab. 4.5.....	30
Abb. 4.6	Anwendung des PHS-Modells zur Bestimmung von erforderlichen Entwärmungsphasen – Prinzipskizze zu Ansatz (1): Veränderung der Anteile der Entwärmungsphase am Arbeitszyklus von einer Stunde, so dass ein vorgegebener Grenzwert der Rektaltemperatur nicht überschritten wird.	31
Abb. 4.7	Anwendung des PHS-Modells zur Bestimmung von erforderlichen Entwärmungsphasen – Prinzipskizze zu Ansatz (2): Iterative Veränderung der Luftfeuchte bei vorgegebener Lufttemperatur, so dass ein vorgegebener Grenzwert der Rektaltemperatur in einer halben Arbeitsschicht (vier Stunden; 4 Arbeitszyklen) nicht überschritten wird	32
Abb. 4.8	Berechnete erforderliche Dauer von Entwärmungsphasen auf der Grundlage des PHS-Modells	33
Abb. 4.9	Vergleich der ermittelten Grenzkurven mit dem Diskussionsvorschlag nach Pangert et al. (2003).....	33

Abb. 4.10 Ermittelte Verläufe der Grenzkurven bei Variation der Arbeitsschwere	34
Abb. 4.11 Globetemperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher Strahlungsverhältnisse (Neuschulz (2003) [23])	38

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Übersicht der Einzelversuche	23
Tab. 4.2	Maximalwerte von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während vierstündiger Exposition bei vorgegebenen Anteilen von Arbeitszeit im Klima und Entwärmungsphase im Komfortklima (23 °C)	24
Tab. 4.3	Ermitteltes Beanspruchungsniveau am Ende der 2., 4. u. 5. Arbeitsphase.....	25
Tab. 4.4	Übersicht der Eingabeparameter zur Klima- und Arbeitssituation beim Einsatz des PHS-Modells.....	27
Tab. 4.5	Untersuchte Randbedingungen beim Einsatz des PHS-Modells	28
Tab. 4.6	Bereiche der von Forsthoff und Neffgen (1993) [5] untersuchten Variablen	36
Tab. 5.1	Handlungs- und Entscheidungshilfe bei der Gestaltung von Arbeits- und Entwärmungsphasen.....	40