

Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal
Fachbereich Sicherheitstechnik

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

vorgelegt von
Dr. rer. nat. Bernhard Kampmann
Wuppertal 2000

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen der Thermophysiologie.....	6
2.1 Die Regelung der Körpertemperatur.....	6
2.2 Mechanismen der Temperaturregulation	8
2.2.1 Autonome Thermoregulation	8
2.2.1.1 Veränderung der peripheren Durchblutung	9
2.2.1.2 Schweißproduktion	10
2.2.1.3 Muskelzittern in der Kälte.....	11
2.2.1.4 Klimaadaptation.....	11
2.2.1.5 Unterschiede der Thermoregulation bei Frauen und Männern.....	12
2.2.2 Verhaltensregulation	14
2.3 Einflußgrößen auf die Beanspruchung unter Klimabelastung	16
2.3.1 Klimatische Einflußgrößen.....	16
2.3.2 Nichtklimatische Einflußgrößen.....	18
2.3.2.1 Metabolische Wärmeproduktion.....	18
2.3.2.2 Bekleidung	19
2.3.2.3 Akklimatisation.....	21
2.3.2.4 Ausgleich von Wasser- und Elektrolytbilanz	25
2.3.2.5 Expositionszeit - Arbeitsorganisation.....	30
2.3.2.6 Körperliche Leistungsfähigkeit.....	30
2.3.2.7 Alter	31
2.3.2.8 Übergewicht.....	32
2.4 Die Auswirkungen von Hitzebelastung.....	34
2.4.1 Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit.....	34
2.4.2 Selbsteinteilung der Arbeitsschwere (<i>self-pacing</i>).....	36
2.4.3 Physiologische Auswirkungen von Hitzebelastung.....	38
2.4.3.1 Prescriptive Zone	38
2.4.3.2 Dehydratation.....	40
2.4.4 Beschreibung von Einflußgrößen auf die Gesundheit unter Hitzebelastung.....	43
2.4.5 Klinische Einteilung von Gesundheitsstörungen durch Hitzeeinwirkung	45
2.4.6 Langfristige Auswirkungen von Hitzebelastung.....	47
2.5 Bewertung von Hitzeeinwirkung durch Klimasummenmaße	49

3	Laborversuche und Felduntersuchungen: welche Beiträge für das Verständnis der Thermoregulation können sie liefern?	53
4	Laborversuche	55
4.1	Auswertung systematischer Serien von Klimaexpositionen in Klimakammern.....	56
4.2	Vorgehen bei den Messungen in den Klimakammern.....	57
4.3	Versuchsserien.....	59
4.3.1	Einzelversuche.....	60
4.3.2	Beziehungen der physiologischen Einzelwerte untereinander.....	64
4.3.2.1	Thermische Pulse	65
4.3.2.2	Abhängigkeit der Schweißrate von Hauttemperatur und Körperinnentemperatur	66
4.3.2.3	Beschreibung der Rektaltemperatur durch t_a und BET	68
4.3.3	Auswertung von Versuchsserien durch Ausgleichsfunktionen	70
4.3.3.1	Darstellung der Ergebnisse.....	70
4.3.3.2	Berechnungen von Äquivalenzlinien.....	73
4.3.3.3	Vergleich von Ausgleichsfunktionen.....	76
4.4	Mittlere Äquivalenzlinien für vier Probanden	77
4.5	Einfluß der Akklimatisation auf die Beanspruchung	81
4.6	Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Beanspruchung	86
4.7	Ermittlung des Wirkungsgrades der Schweißverdampfung	89
4.8	Einfluß mentaler Belastung auf die Herzschlagfrequenz	98
5	Modellarbeit: Untersuchungen von Gasschutzwehr und Grubenwehr.....	105
5.1	Der Einfluß der Gewöhnung auf die Beanspruchung bei Grubenwehrübungen.....	106
5.2	Einfluß von Dehydratation und Elektrolytverlust.....	113
5.3	Interindividuelle Unterschiede der Beanspruchung bei Übungen der Gasschutzwehr	114
5.4	Verteilung der Körpertemperatur bei der Grubenwehr während verschiedener Untersuchungen	120

6	Feldversuche im Steinkohlenbergbau	124
6.1	Erhebung von Daten in Feldversuchen an heißen Betriebspunkten.....	125
6.1.1	Ablauf einer Messung	126
6.1.2	Beispiele für Einzelschichten	128
6.1.3	Untersuchungskollektiv	132
6.1.4	Klimabelastung.....	134
6.1.5	Übersicht über die Beanspruchung	134
6.1.6	Der Einfluß des Klimas auf die Beanspruchungsgrößen	140
6.1.6.1	Herzschlagfrequenz.....	140
6.1.6.2	Körperkerntemperatur.....	142
6.1.6.3	Flüssigkeitsbilanz: Schweißverlust, Trinkmenge, Harnabgabe und Rehydratation	145
6.1.7	Abschätzung der „thermischen Pulse“	151
6.1.7.1	Einzelschichten.....	151
6.1.7.2	Gesamtheit der untersuchten Schichten an heißen Betriebspunkten.	159
6.1.7.3	Berechnung des Energieumsatzes	162
6.1.7.4	Die Einschätzung der Arbeitsschwere aus Protokollen	164
6.1.8	Empfehlungen aus der Studie zur Beanspruchung von Bergleuten an heißen Betriebspunkten im Steinkohlenbergbau	169
6.2	Studie zu Dehydratation und Rehydratation.....	169
6.3	Weitere Einflußgrößen der Belastung am Arbeitsplatz unter Tage	174
6.3.1	Akklimatisation.....	174
6.3.2	Circadianrhythmik.....	175
6.3.3	Mentale Belastung bei Fahr- und Steuertätigkeiten.....	179
6.3.4	Körperhaltungen in Arbeitsräumen unterschiedlicher Fahrhöhe	181
6.3.5	Beispiel für ein zusätzliches Problem bei der Arbeit im Klima: Hitzeorthostase.....	183
6.3.6	Selbsteinteilung der Leistung (self-pacing).....	187
6.3.6.1	Einfluß der Körperhaltung auf die Beanspruchung	187
6.3.6.2	Energieumsätze bei „typischen Tätigkeiten“	189
6.3.6.3	Fußwege bei der Fahrung.....	190
6.3.6.4	Einteilung von Arbeit und Pausen im Klima.....	192
6.3.6.5	Probleme von Mittelwertbildungen: Beispiel „Atmen von Heißluft“	193
6.4	Vergleich der Beanspruchung an modifizierten Arbeitsplätzen („vorher-nachher“)	196

7	Abschätzung des Risikos von Hitzearbeit.....	201
7.1	Akute Auswirkungen: Erkrankungen unter Hitzebelastung.....	201
7.2	Daten aus dem Deutschen Steinkohlenbergbau.....	204
8	Verbesserung von Klimasummenmaßen am Beispiel von ISO 7933 (1989).....	209
9	Diskussion der Ergebnisse und Schlußfolgerungen für die Praxis	213
9.1	Zur Organisation der Arbeit in Hitze	213
9.2	Regelung der Arbeit an hitzebelasteten Arbeitsplätzen in Deutschland.....	214
9.3	Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen.....	215
9.4	Vergleich der Beanspruchung bei Übungen der Gasschutzwehr und Grubenwehr sowie in Felduntersuchungen mit den Vorgaben für Beanspruchungsgrößen.....	216
9.5	Ergebnisse aus den Felduntersuchungen.....	218
9.6	Verbesserung des Gesundheitsschutzes an hitzebelasteten Arbeitsplätzen im Bergbau	219
10	Zusammenfassung.....	222
11	Literatur.....	225
	Anhang.....	260
A.1	Dreidimensionale Darstellung von Beanspruchungsgrößen für verschiedene Versuchsserien.....	260
A.2	Mittlere Äquivalenzlinien für nicht akklimatisierte Probanden.....	270
A.3	Mittlere Äquivalenzlinien bei erhöhter Windgeschwindigkeit	274
A.4	Untersuchungszahlen für BG 30 und BG 35	278
A.5	Klima-Merkblatt für Steinkohlenbergleute	279

Vorbemerkung

Die hier vorgelegte Arbeit ist während meiner Tätigkeit im Institut für Arbeitswissenschaften der RAG Aktiengesellschaft entstanden und enthält zum größeren Teil Ergebnisse aus Felduntersuchungen im Bergbau und Untersuchungen bei Grubenwehrübungen.

Der erste Teil der Arbeit bezieht sich auf die Untersuchungen in den Klimakammern im Institut für Arbeitsphysiologie in Dortmund, die während meiner Tätigkeit von 1979 bis 1984 dort durchgeführt wurden. Anlaß, mich erneut mit den dort erhobenen Daten zu befassen, war die Auseinandersetzung mit dem Klimaindex „*erforderliche Schweißrate*“ (ISO 7933). Durch Daten aus diesen Untersuchungen konnte eine Argumentation aufgebaut werden, die – gemeinsam mit anderen Einsprüchen – zu einer Überarbeitung der Norm führte. In dieser Arbeit werden einige weitere systematische Auswertungen der Daten aus den damaligen Versuchsserien vorgestellt. Ich danke Herrn Professor H. G. Wenzel und Herrn Professor C. Piekarski für die Anregung, mich noch einmal mit den Untersuchungen in den Klimakammern zu beschäftigen.

Herrn Professor Piekarski als Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaften und Ordinarius für Arbeitsmedizin, Sozialmedizin und Sozialhygiene an der Universität zu Köln danke ich für die freundliche Unterstützung bei den Untersuchungen, die ich als Leiter des Arbeitsbereichs Arbeitsphysiologie seit 1984 durchführen konnte. Herrn Dr. Morfeld bin ich für die Mithilfe bei der Erarbeitung der Methodik für die Feldversuche und der Überlegungen in Kapitel 4.7 sowie für die Anregungen zur Auswertung in Kapitel 6.1.7.4 zu Dank verpflichtet. Herrn Professor Manz vom Forschungsinstitut für Kinderernährung in Dortmund verdanke ich wichtige Einsichten über den Flüssigkeits- und Elektrolythaushalt des Körpers. Herrn Werksarzt Kalkowsky danke ich für die tatkräftige Mithilfe bei der Organisation und Durchführung der Felduntersuchungen an heißen Betriebspunkten unter Tage und für die vielen klärenden Gespräche.

Diese Untersuchungen wären nicht ohne die Mitarbeiter im Institut für Arbeitswissenschaften der RAG Aktiengesellschaft möglich gewesen. – Auf den Bergwerken wurden die Arbeiten von vielen Bergleuten unterstützt, die als Probanden an den Untersuchungen teilnahmen und von vielen weiteren Mitarbeitern der Deutschen Steinkohle AG sowie – bei den Untersuchungen von Gasschutzwehr und Grubenwehr – insbesondere auch von den Grubenwehrkameraden der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Herne. Ihnen allen danke ich sehr für ihre Unterstützung.

Herr Professor Hofmann aus Wuppertal hat mich ermutigt, die zahlreichen einzelnen Untersuchungen in einer Zusammenschau zusammenzufassen – dafür danke ich ihm herzlich.

*Für Irmgard,
Martin und Lisa*

Verzeichnis der häufig verwendeten Formelzeichen

t_a Lufttemperatur in °C

p_a Wasserdampfdruck in kPa

RH relative Luftfeuchte in %

t_w psychrometrische Feuchttemperatur in °C

t_{nw} natürliche Feuchttemperatur in °C

t_r Strahlungstemperatur in °C

v_a Luftgeschwindigkeit in m/s

I_{cl} Wärmeisolation der Bekleidung in $W/(K \cdot m^2)$

t_b Körpertemperatur in °C

t_{co} Körperkerntemperatur in °C

t_{re} Rektaltemperatur in °C

t_{sk} mittlere Hauttemperatur in °C

HSF Herzschlagfrequenz in min^{-1}

HSF_0 Bezugswert der Herzschlagfrequenz während einer Schicht (niedrigster Wert über 3 Minuten während einer Schicht)

HSF_A Arbeitspulse: Erhöhung der Herzschlagfrequenz über den Bezugswert HSF_0

HSF_{th} thermische Pulse: Anteil der Herzschlagfrequenz, der durch die Erhöhung der Körpertemperatur bedingt ist

$HSF_{A_{korr}}$ Arbeitspulse, die um die thermischen Pulse vermindert wurden: $HSF_A - HSF_{th}$

SW Schweißrate in g/h

Abkürzungen:

BET Basis-Effektivtemperatur nach YAGLOU [428] in °C: Index zur Klimabewertung, der auf der subjektiven Bewertung des Klimas durch Probanden basiert (ursprünglich für Probanden mit freiem Oberkörper und langer Hose in Körperruhe erhoben).

NET Normal-Effektivtemperatur nach YAGLOU [428] in °C: Index zur Klimabewertung (ursprünglich für Probanden mit „normaler“ Bekleidung in Körperruhe erhoben).

$WBGT$ Wet Bulb Globe Temperature Index nach YAGLOU & MINARD [429] (ISO 7243 [440])

DLE Duration Limited Exposure (siehe S. 30)

$ULPZ$ Upper Limit of the Prescriptive Zone (siehe S. 38)

1 Einleitung

Der Mensch hält als warmblütiges Lebewesen seine Körpertemperatur in einem engen Bereich um 37 °C konstant. Bei allen auftretenden Umgebungsklimaten – die Klimazonen der Erde schließen Bereiche der Lufttemperatur von -50 °C in der Antarktis bis zu mehr als 50 °C Lufttemperatur in Wüstengegenden ein – darf sich die Körpertemperatur nicht weit von diesem Bereich um 37 °C entfernen (z.B. WENZEL 1968 [404]; Abb. 10 nach MOLNAR & MORRISON), um vorübergehende oder auch bleibende Gesundheitsstörungen zu vermeiden.

Die klimatische Belastung in der Umwelt stellt einen der wesentlichen Faktoren für die Erschließung von Siedlungsräumen durch Menschen dar und führte so entwicklungsgeschichtlich zu entsprechender Anpassung an die Klimabedingungen der unterschiedlichen Klimazonen¹.

Bei extremen Wetterbedingungen treten Beeinträchtigungen der Gesundheit – bis hin zu Todesfällen – auf; bereits im alten Testament und in verschiedenen antiken Schriften ist über solche Erkrankungen durch Klimaeinwirkungen berichtet worden (siehe z.B. PIEKARSKI 1985 [294]).

Von Klimazwischenfällen sind besonders nicht an Hitze gewohnte Personen betroffen, also etwa Touristen, die ohne Hitzegewöhnung ihren Urlaub in heißen Gegenden verbringen oder im militärischen Bereich Rekruten bei der Ausbildung². Bei militärischen Operationen unter extremen Klimabedingungen wurden nicht selten Armeeingehörige Hitzeopfer³. Ein weiteres Problemfeld stellen kurzfristige berufliche Einsätze in klimatisch belasteten Gebieten dar, von dem auch die mitreisenden Familien betroffen sein können⁴; bei einer Ausweitung der Globalisierung sind möglicherweise hiervon immer mehr Menschen betroffen⁵.

¹ Mit der morphologischen und physiologischen Anpassung an die unterschiedlichen Klimate befassen sich z.B. SCHOLANDER (1955) und SCHREIDER (1957, 1963 und 1975); Verhältnisse von Körpermasse zur Körperoberfläche in verschiedenen Klimazonen betrachten SCHREIDER (1950), NEWMAN & MUNRO (1955), BENOIST (1975) und HIERNAUX ET AL. (1975); mit der Entwicklung der Thermoregulation beim Menschen befaßt sich NEWMAN: *Why man is such a sweaty and thirsty naked animal: A speculative review* (1970).

² YAGLOU & MINARD (1957): *Control of Heat Casualties at Military Training Centers*.

³ Z.B.: KLEINHANSS (1980): *Die Hitzekrankheit in den Armeen der Vergangenheit aus wehrmedizinischer Sicht*, SCHICKELE (1947): *Environment and fatal heat stroke. An analysis of 157 cases occurring in the army in the U.S. during World War II*.

⁴ Zur Entwicklung der Wärmetoleranz von Kindern: z.B. PIEKARSKI ET AL. [296].

⁵ Anhaltspunkte für die gezielte Untersuchung von Personen, die sich auf Auslandseinsätze vorbereiten gibt der Berufsgenossenschaftliche Grundsatz 35 „Arbeitsaufenthalt im Ausland unter besonderen klimatischen und gesundheitlichen Belastungen“; Erläuterungen zu die-

Eine große Zahl von Hitzschlägen trat bei der Wallfahrt nach Mekka auf, als der Zeitpunkt der Wallfahrt sich zu Beginn der achtziger Jahre – wegen der Ausrichtung der Wallfahrt am Mondkalender – in den Sommer verschob und die Pilger nicht – wie in früheren Zeiten – durch eine lange Anreise zu Fuß oder auf Reittieren an die klimatischen Verhältnisse gewöhnt waren, sondern zum großen Teil mit dem Flugzeug aus gemäßigteren Klimazonen anreisten⁶.

Im Bereich industrieller Arbeit können sich die Klimabedingungen – durch technologische Prozesse bedingt – über einen größeren Bereich erstrecken als in der natürlichen Umwelt: so können Arbeitsplätze in Lagerhäusern für Tiefkühlkost bei Temperaturen von -30 °C ebenso spezielle Schutzmaßnahmen für Arbeitnehmer erfordern wie Einbrennkammern für lackierte Teile in der Automobilfabrikation, die bei Temperaturen oberhalb von 100 °C im Störfall kurzfristig betreten werden müssen. Gesundheitsschäden durch Hitzeeinwirkung traten früher oft in Kesselräumen von Dampfschiffen auf⁷, später insbesondere unter den schweren Arbeitsbedingungen im Bergbau und dort insbesondere bei der Goldgewinnung⁸: die zahlreichen – auch tödlichen – Zwischenfälle konnten dort durch eine Hitzegewöhnung über Tage deutlich gesenkt werden⁹. Weitere industrielle Arbeitsplätze, die klimatisch zusätzlich durch Wärmestrahlung belastet sind, gibt es in der Eisen- und Stahlindustrie¹⁰ sowie in der Glas- und Keramikindustrie¹¹.

Die stärkste natürliche Klimaschwankung – auf einer Zeitskala von einigen Monaten bis zu einigen Jahren – ist das *El Niño/Southern Oscillation*-Phänomen (z.B. [212]): man bezeichnet hiermit eine großskalige (etwa ein Viertel des Erdumfangs in Äquatornähe)

sem Grundsatz finden sich bei Rieke (1999, [311]). Die Untersuchungszahlen für das Jahr 1997 sind in Anhang A.4, Tabelle 24 angegeben.

⁶ AL-KHAWASHKI et al. (1983): *Clinical Presentation of 172 Heat Stroke Cases seen at Mina and Arafat - September, 1982*, KHOGALI (1987): *Heat Stroke: An overview, with particular reference to the Makkah pilgrimage*, KHOGALI & AL KHAWASHKI (1981): *Heat Stroke During the Makkah Pilgrimage (Hajj)*. BOUCHAMA (1995) berichtet von 2000 Fällen von Hitzschlag während der Wallfahrt nach Mekka im Jahr 1987, von denen 1000 tödlich endeten.

⁷ Z.B. SCHMIDT (1901): *Über Hitzschlag an Bord von Dampfern der Handelsflotte, seine Ursachen und seine Abwehr*.

⁸ WYNDHAM: *A Survey of the Causal Factors in Heat Stroke and of their Prevention in the Gold Mining Industry* (1965) und (1967).

⁹ Vgl.: STRYDOM & WYNDHAM (1966): *A Practical Method for Acclimatizing Labourers to Heat*, WYNDHAM et al. (1967): *An examination of certain individual factors affecting the heat tolerance of mine workers* sowie WYNDHAM & STRYDOM (1969): *Acclimatizing Men to Heat in Climatic Rooms on Mines*.

¹⁰ Im deutschen Sprachraum beispielsweise KAMINSKI (1980), FÖRSTER (1980), HETTINGER & PETERS (1983) sowie SCHNAUBER (1986).

¹¹ In Deutschland etwa GERHARDS (1980), TIELSCH (1984), AVERKAMP & HETTINGER (1985) oder HETTINGER ET AL. (1992).

Erwärmung der Deckschicht des gesamten tropischen Pazifiks, die im Mittel etwa alle vier Jahre wiederkehrt und mit der auch Klimaveränderungen in anderen Regionen verknüpft sind: etwa Dürre in Südostasien und Nordostaustralien sowie starke Regenfälle über dem westlichen Südamerika. Dies führt zu Auswirkungen etwa auf die Volkswirtschaft und die Gesundheitssysteme der betroffenen Länder: die Mißernten an Kokosplantagen in Südostasien führen zu einem stark erhöhten Preis für Kokosöl im Folgejahr; in Kolumbien führt die Erwärmung, die mit *El Niño* verbunden ist, zu stärkerer Vermehrung auch derjenigen Mückenarten, die Malariaerreger übertragen, so daß die Inzidenzrate mit Malaria infizierter Personen in den Jahren des *El Niño*-Phänomens stark ansteigt.

Eine neue Forschungsrichtung beschäftigt sich mit der allgemeinen Mortalität während Hitzewellen, durch die insbesondere ältere Menschen betroffen sind. In den U.S.A.¹² zählen Armut (kein Besitz einer Klimaanlage, kein Zugang zu Transportmitteln, Lebensmittel müssen auch bei Hitze weiter selbst eingekauft werden, usw.) und soziale Isolation (insbesondere für ältere Personen die in innerstädtischen Wohnbereichen wohnen, aber auch für bettlägerige Personen, auch wenn diese regelmäßig von Krankenschwestern oder durch Sozialdienste besucht wurden) zu den Risikofaktoren für einen tödlichen Hitzschlag während einer Hitzewelle. KELLERMANN & TODD schlagen Vorbeugemaßnahmen auf kommunaler Ebene vor (1996 [191]). MORIMOTO ET AL. berichten 1997 [262] von einer Hitzewelle im Jahr 1994 in Japan mit Temperaturen bis zu 39 °C, die 589 Tote durch Hitzschlag zur Folge hatte; in den Jahren 1968 bis 1994 traten 47 % aller tödlichen Hitzschläge in Japan bei Personen auf, die älter als 65 Jahre waren.

Weitergehende Betrachtungen richten sich auf die Auswirkung von Klimaeinflüssen aus soziologischer Sicht: etwa auf Auswirkungen auf die Mentalitätsgeschichte – beispielsweise auf die frömmigkeitsgeschichtlichen Auswirkungen der "Kleinen Eiszeit"¹³ – oder auf den Zusammenhang von Hitzewellen und Gewaltausbrüchen. BARON & RANSBERGER beobachteten 1978 [21] eine Zunahme von gewalttätigen Unruhen (*collective violence, riots*) mit zunehmender Umgebungstemperatur bis zu einem Maximum bei etwa 30 °C (wobei die Temperatur der vorhergehenden 7 Tage ebenfalls signifikant erhöht war); bei weiter ansteigenden Temperaturen nahm die Anzahl der Unruhen wieder ab. ANDERSON ET AL. fanden 1997 eine positive Korrelation zwischen der Zahl der heißen Ta-

¹² Etwa: JONES ET AL. (1983): *Morbidity and Mortality Associated With the July 1980 Heat Wave in St. Louis and Kansas City, Mo.*; COOPER & VEALE (1983): *The Elderly and their Risk of Heat Illness*; MARTINEZ et al. (1989): *Geographic Distribution of Heat-Related Deaths Among Elderly Persons*; BUECHLEY ET AL. (1972): *Heat Island = Death Island?*; ELLIS ET AL. (1975): *Mortality during Heat Waves in New York City July, 1972 and August and September, 1973*; ELLIS ET AL. (1976): *Ecrrine Sweating and Mortality During Heat Waves in very Young and very Old Persons*; SEMENZA ET AL. (1996): *Heat-Related Deaths During the July 1995 Heat Wave in Chicago* (1996, samt der darauffolgenden Diskussion [160] und [348]).

¹³ LEHMANN (1990 [217]): *Frömmigkeitsgeschichtliche Auswirkungen der "Kleinen Eiszeit"*.

ge im Sommer ($t_a \geq 90$ °F, bzw. $t_a \geq 32$ °C) und der Anzahl von verübten Gewaltverbrechen, während die Zahl der Eigentumsdelikte und die Zahl der heißen Tage im Sommer in keiner Beziehung standen¹⁴. – Für Belgien fanden MAES ET AL. 1994 [236] einen hochsignifikanten Zusammenhang zwischen Selbstmorden mit Gewaltanwendung (*violent suicide*) und Umgebungstemperatur sowie Tageslichtdauer und einen negativen Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchtigkeit; für *nonviolent suicides* (Selbstmord durch Vergiften) ergab sich kein signifikanter Zusammenhang mit diesen Größen. – In einer Studie über den Zusammenhang zwischen der Umgebungstemperatur und politischer Gewalt in 136 Ländern fanden VAN DER VLIERT ET AL. (1999 [386]), daß politische Unruhen und bewaffnete Attentate in Ländern mit warmem Klima häufiger beobachtet werden als in Ländern mit kaltem oder heißem Klima, wobei der Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und politischer Gewalt durch Unterschiede des nationalen soziokulturell ausgeprägten Rollenverhaltens für Männer (*cultural masculinity*) noch modifiziert wird.

So hat sich die Blickrichtung innerhalb der Forschung vom Einzelfall in der Betrachtung hin zu evolutionären Auswirkungen der Anpassung an Lebensbereiche in unterschiedlichen Klimaten auf der Erde und – im Zeitalter der Weltraumfahrt – auch darüber hinaus¹⁵, sowie zu soziologischen Betrachtungen der Auswirkung von Klimaeinflüssen hin erweitert.

In der hier vorgelegten Arbeit stehen der systematische Einfluß der Hitzebelastung auf die Beanspruchung von Menschen, die dem Klima ausgesetzt sind, sowie die intra- und interindividuellen Unterschiede der Beanspruchung – sowohl in Klimakammern als auch im Feldversuch – im Mittelpunkt der Betrachtung.

Im Laborversuch können die Beanspruchungsdaten sehr genau vorgegeben werden: dies ist zur systematischen Analyse der Daten und für die Modellbildung der Beanspruchungsreaktionen sehr vorteilhaft. Andererseits kann man mit hitzeungewohnten Probanden sich nur vorsichtig den Grenzwerten der Beanspruchung nähern, die in der wissenschaftlichen Literatur vorgeschlagen werden.

In der Arbeitspraxis finden sich Hitzearbeiter, die sich durch langjährige Arbeit an schweres Klima gewöhnt haben und die man – im ungünstigen Klima – größtenteils als

¹⁴ Eine angewandte Fragestellung in diesem Zusammenhang ist, ob es kostengünstiger ist, ein Gefängnis zu klimatisieren oder das Verhältnis von Wärtern zu Gefangenen zu erhöhen, um die Anzahl von Unruhen in Gefängnissen zu verringern. – Eine andere Konsequenz dieses Zusammenhangs zwischen der Zahl von heißen Tagen im Jahr und Gewaltdelikten wäre im Fall einer globalen Erwärmung eine Zunahme der Zahl von Gewaltdelikten (ANDERSON ET AL., 1997 [10]).

¹⁵ Z.B. LEACH (1976): *Evaporative water loss in man in a gravity-free environment* [214] oder BILLINGHAM (1959): *Heat exchange between man and his environment on the surface of the moon* [28].

„selbstselektiertes Kollektiv“ betrachten kann: wer die Arbeit nicht über längere Zeit gut ausführen konnte, hat sich mit großer Sicherheit einen anderen Arbeitsplatz gesucht. Hier ist es nun von großem Interesse, welche Werte der Beanspruchungsgrößen etwa bei Bergleuten an heißen Arbeitsplätzen bei regulärer Arbeit – im Unterschied z.B. zu Rettungseinsätzen von Feuerwehr oder Grubenwehr – auftreten und zu sehen, wie sich die alltäglich erreichten Werte der Herzschlagfrequenz oder Körpertemperatur zu den in Laboruntersuchungen verwendeten Grenzwerten verhalten.

Die Diskrepanz zwischen den Werten, die im Berufsalltag – und damit im Feldversuch – vorgefunden werden und den zulässigen Werten der Beanspruchungsgrößen, die in Laboruntersuchungen sowie Untersuchungsgrundsätzen (z.B. im Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz 26 hinsichtlich der Ergometrie), Vorschlägen der WHO (*Tech. Rep. 412* [439]) oder den Annahmen, die Klimasummenmaßen wie z.B. WBGT (ISO 7243 [440]) oder der „Erforderlichen Schweißrate“ (ISO 7933 [443]) zugrundegelegt werden, bildet den Rahmen für die hier vorgelegte Arbeit.

Auch wenn im Steinkohlenbergbau in Deutschland seit Jahren die Anzahl der Beschäftigten zurückgeht, werden die hier erarbeiteten Ergebnisse in den Ländern angewendet werden können, in denen sich Bergleute in immer größeren Teufen auch zunehmenden klimatischen Belastungen gegenübersehen – in China beispielsweise arbeiten zur Zeit im Steinkohlenbergbau etwa 5 Millionen Bergleute.

2 Grundlagen der Thermophysilogie

2.1 Die Regelung der Körpertemperatur

Der Mensch ist ein warmblütiges Lebewesen, das seine Körpertemperatur innerhalb weiter Temperaturgrenzen der Umgebung konstant halten muß. Die Körperinnentemperatur wird normalerweise innerhalb eines engen Bereichs um 37 °C gehalten. Bei Körpertemperaturen oberhalb von etwa 38 °C bis 39 °C tritt eine Überwärmung ein – in dem Sinn, daß der Körper die Stoffwechselwärme nicht in ausreichendem Maß an die

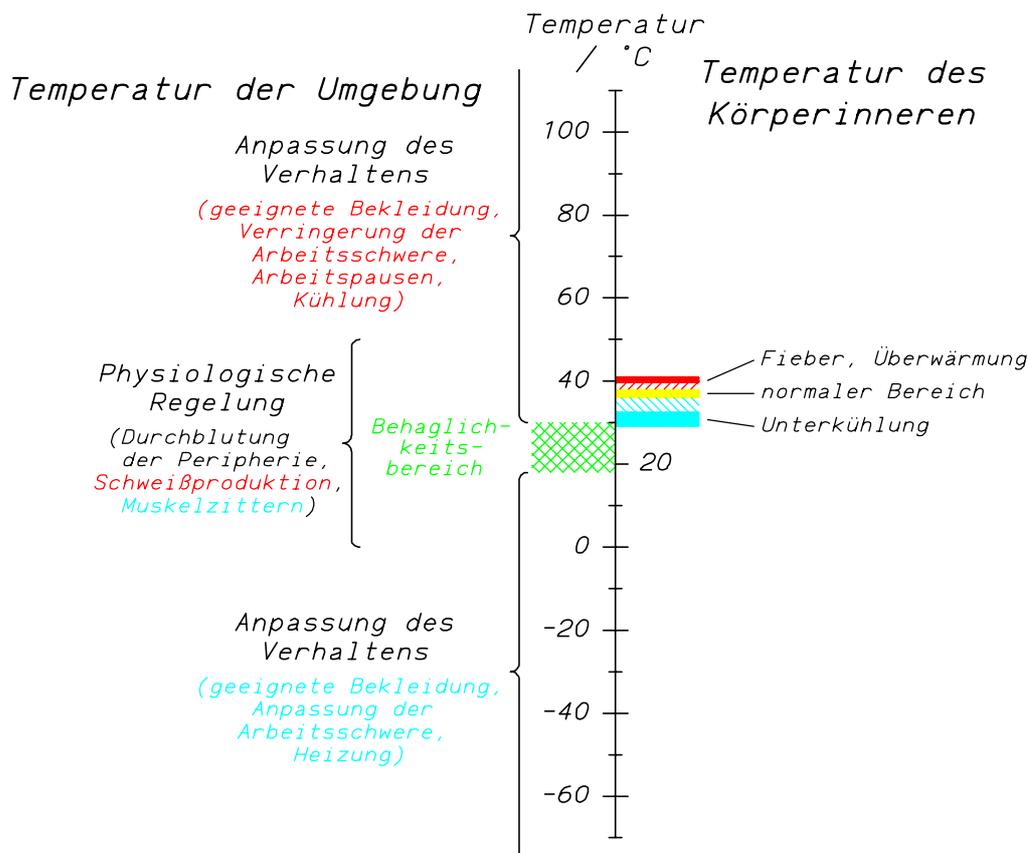


Abb. 1: Regelung der Körpertemperatur (nach HARDY (1971), modifiziert).

Umgebung abgeben kann –, oder Fieber, wo der Sollwert der Körpertemperatur erhöht ist¹⁶. Bei Körperinnentemperaturen unterhalb von 33 °C ist der Betroffene kaum noch

¹⁶ ASCHOFF (1971) [18]: *Temperaturregulation*: „Schon 1875 hat LIEBERMEISTER den das Fieber einleitenden Schüttelfrost im Sinne eines höher gestellten Sollwertes gedeutet: Der Patient friert, die Haut ist blaß und trocken, Wärmebildung und Körperkerntemperatur steigen an. Stets ist einleitend die Wärmeabgabe eingeschränkt, in Kälte durch Vasokonstriktion, in Wärme durch Hemmung der Schweißsekretion. ... Die Regeleigenschaften bleiben (wie bei Arbeit) erhalten... Das Entfiebern schließlich ist von den Zeichen eines plötzlich tiefergestellten Sollwertes begleitet: Der Patient fühlt sich heißer als zuvor, Hauttemperatur und Durchblutung steigen an, und unter Schweißausbruch kehren Umsatz und Kerntemperatur zur Norm zurück.“

aus eigenem Antrieb handlungsfähig und seine Reaktionen sind erheblich beschränkt; Absenkungen der Kerntemperatur auf etwa 30 °C führen in der Regel zum Bewußtseinsverlust und erreichen den Bereich, der als akut lebensbedrohlich gilt¹⁷.

Die Steuer- und Regelmechanismen, die zur Verfügung stehen, um die Körpertemperatur für einen weiten Bereich der Umgebungstemperatur in einem engen Bereich zu halten, sind in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Die physiologischen Regulationsmechanismen der autonomen Thermoregulation setzen innerhalb des Behaglichkeits- oder Komfortbereichs des Klimas ein und werden nachfolgend näher erläutert. Ebenfalls bereits innerhalb des Komfortbereichs findet – bewußt oder auch unbewußt – eine Anpassung des Verhaltens an die klimatischen Gegebenheiten statt. So kann man, wenn man die Wohnung verläßt, die notwendige Bekleidung beispielsweise für einen Spaziergang im Freien als Erwachsener meist gut vorausschauend einschätzen, wobei ein Blick nach draußen oder auch die Kenntnis des Wetterverlaufs während der letzten Stunden oder des Wetterberichts die Auswahl der notwendigen Bekleidung erleichtert: niemand wird normalerweise im Winter seine Wohnung im leichten Pullover verlassen – weil er ja momentan noch nicht friert – und erst umkehren und seinen Mantel holen, wenn er friert.

Außerhalb des Komfort- oder Behaglichkeitsbereichs sind – vom Begriff her einleuchtend – für klimaexponierte Personen starke Anreize zur Änderung der Situation gegeben. Eine Anpassung des Verhaltens an die klimatischen Bedingungen – auch *Verhaltensregulation* genannt (vgl. 2.2.2) – findet man auch bei Tieren, die z.B. in der Sonne Schatten aufsuchen oder im Winter bei starkem Wind Windschatten. In der Kälte lagern Tiere beieinander, um ihre Wärmeverluste zu verringern¹⁸. Auch wechselwarme Spezies können etwa durch unterschiedliche Körperhaltung bei Sonneneinstrahlung ihre Körpertemperatur regulieren (DE WITT 1971) und so z.B. nach einer Infektion ihre Körpertemperatur – entsprechend einem Fieber – erhöhen und damit auch ihre Überlebenschance (KLUGER ET AL. 1975 [203]).

¹⁷ Z.B.: WENZEL & PIEKARSKI (1980) [410]: *Klima und Arbeit*.

¹⁸ Nachgewiesen z.B. für Küken; KLEIBER & WINCHESTER (1933), zitiert nach KLEIBER [201].

2.2 Mechanismen der Temperaturregulation

Nach ASCHOFF [18] kann man den Körperkern mit den wichtigsten inneren Organen als homoiotherm, die Körperschale dagegen als poikilotherm ansehen; die Ausdehnung des Körperkerns wird – entsprechend dem Umgebungsklima und der geleisteten Körperarbeit verändert: in Wärme erstreckt sich der Körperkern bis in die Extremitäten: die Körperschale ist „konvektiv überbrückt“. In zunehmender Kälte verkleinert sich der Körperkern zunächst annähernd auf den Bereich der wichtigsten Organe und kühlt dann insgesamt ab (LLOYD 1994 [228]).

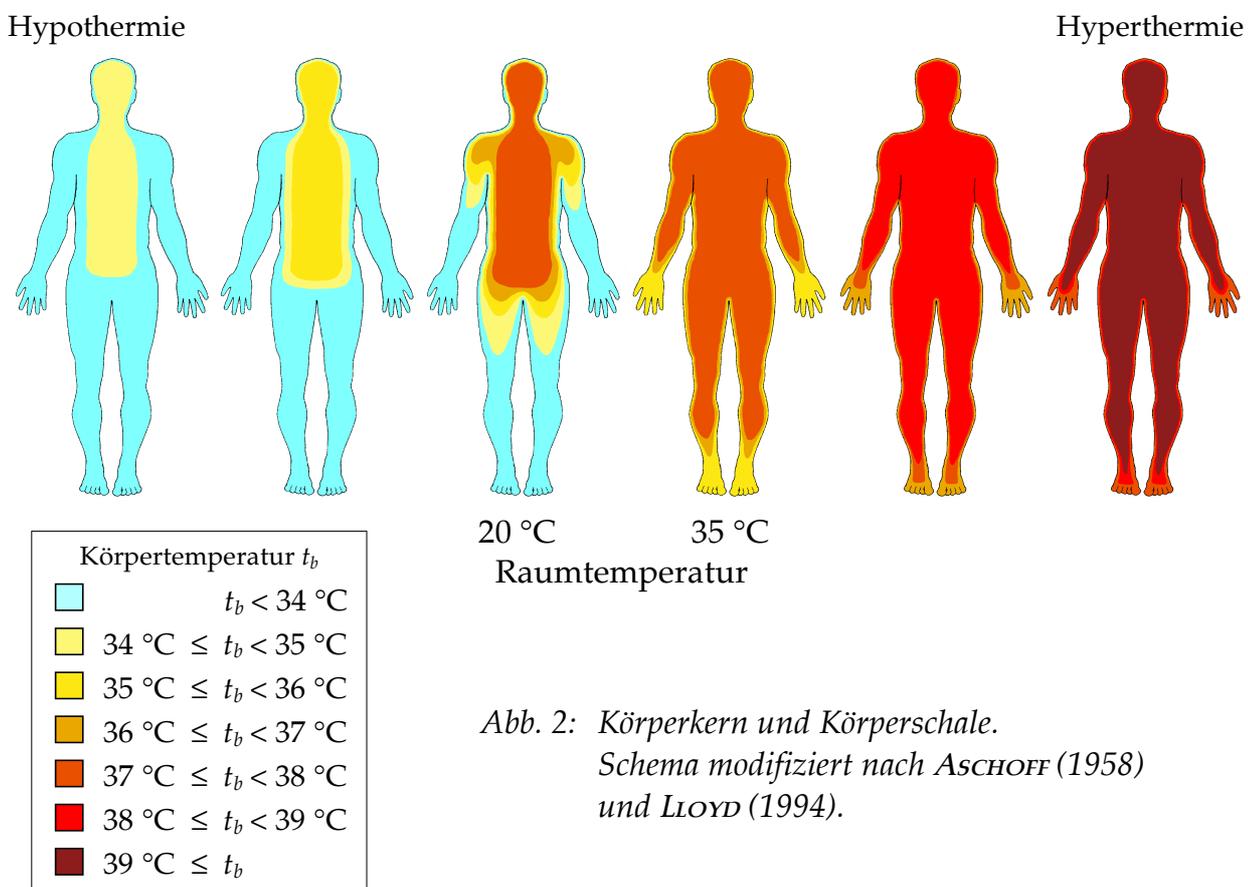


Abb. 2: Körperkern und Körperschale.
Schema modifiziert nach ASCHOFF (1958)
und LLOYD (1994).

2.2.1 Autonome Thermoregulation

Der autonomen Thermoregulation stehen mehrere unterschiedliche Regulationsmechanismen zur Verfügung, die eingesetzt werden, um den Wärmehaushalt des Körpers auszugleichen:

2.2.1.1 Veränderung der peripheren Durchblutung

Eine einfache Möglichkeit des Körpers, die Wärmeabgabe an die Umgebung zu verändern, besteht in der Veränderung der Durchblutung peripherer Körperteile. Die vermutlich erste quantitative Untersuchung zu diesem Thema findet sich bei MÜLLER 1905 [269]: MÜLLER führte bei horizontal gelagerten Probanden in Körperruhe eine *Partialwägung* – eine gleichzeitige Wägung von Kopf, Brust, rechtem sowie linkem Arm, Bauch und Beinen – durch, die insgesamt das Körpergewicht ergab, bei der sich aber nach dem Verursachen von Kälte- bzw. Wärmereizen Verschiebungen der Gewichte der einzelnen Körperteile herausstellten, die Müller als Veränderung der Durchblutung deutete¹⁹.

Durch die Veränderung der peripheren Durchblutung wird die Ankopplung des Körperinneren an die Umgebung hinsichtlich des Wärmedurchgangs verbessert (in warmem Klima) oder auch verschlechtert (in kaltem Klima); die Extremitäten haben bei kleinem Durchmesser bezogen auf ihr Volumen eine relativ größere Oberfläche als etwa der Körperstamm und ermöglichen daher eine höhere Wärmeabgabe. Mit ansteigender Durchblutung werden Teile der Körperschale konvektiv überbrückt, so daß die Isolierung des Körperkerns abnimmt (ASCHOFF 1971 [18]).

Die Variabilität der Durchblutung beträgt nach ASCHOFF [18] für einen Finger mehr als 1:600 (zwischen 0,2 cm³/100 cm³ Gewebe-min in Kälte [bei Vasokonstriktion] und 120 cm³/100 cm³ Gewebe-min bei Dilatation), für die Hand etwa 1:30 und für die Körperschale am Rumpf ungefähr 1:7. Dies zeigt, daß durch eine Veränderung der peripheren Durchblutung der Wärmeübergang zwischen Körperkern und Umgebung in weiten Grenzen verändert werden kann. – Die Steuerung der Durchblutung hat sowohl zentrale Komponenten (z.B. ROWELL 1983 [315]) als auch lokale Komponenten (z.B. BURTON & EDHOLM 1955 [42]).

Besonders drastisch ändert sich die Verteilung der Durchblutung in Körperruhe, weil dann die Versorgung der Muskulatur mit Blut keinen hohen Anteil der gesamten vom Herzen geförderten Blutmenge benötigt. ROWELL [316] bestimmte 1986 die Blutmenge, die vom Herzen gefördert wird (*cardiac output*) für einen ruhenden Probanden in kalten bzw. komfortablen Klimabedingungen zu 6 l/min: hiervon werden etwa 10 % zur Durchblutung der Haut und fast die Hälfte zur Durchblutung der inneren Organe benötigt. Unter hoher Klimabelastung (Kerntemperatur 39 °C) steigert sich die Förderleistung des Herzens auf fast 13 l/min, wovon etwa 2/3 zur Durchblutung der Haut und

¹⁹ MÜLLER faßt zusammen: „1. Ein die Haut an einer beliebigen Stelle treffender Kaltreiz bewirkt - genügende Intensität vorausgesetzt - eine Verengerung (sic!) der muskelführenden Gefäße in der gesamten Peripherie (Haut und Muskulatur). Das aus der Peripherie dislozierte (sic!) Blut findet in den Gefäßgebieten des Bauches und des Gehirnes Platz. 2. Ein die Haut an einer beliebigen Stelle treffender Warmreiz bewirkt eine Erweiterung der Gefäße in der gesamten Peripherie. Das in die Peripherie dislozierte Blut wird aus den Gefäßgebieten des Bauches und des Gehirnes ergänzt. ...“

weniger als 20 % zur Durchblutung der inneren Organe verwendet werden. Die Muskeldurchblutung nimmt gegenüber den neutralen Klimabedingungen auf die Hälfte ab.

Unter Wärmebelastung wird das venöse Blut stärker durch die oberflächlich liegenden Venen geleitet, so daß eine bessere Wärmeabgabe erreicht wird²⁰. In kalten Umgebungsbedingungen kann das Blut dagegen durch arteriovenöse Anastomosen vor dem Erreichen der Extremitäten („kurzgeschlossen“ im Hinblick auf den Blutkreislauf) bereits wieder zurückgeleitet werden, um die Wärmeverluste zu senken. Weiterhin werden statt oberflächlich liegender Venen tief liegende Venen stärker durchblutet, um eine geringere Wärmeabgabe an die Umgebung zu erreichen. Da in den Extremitäten Arterien und die tiefliegenden Venen auf weite Strecken parallel geführt sind, findet eine Gegenstromkühlung statt, die in kalter Umgebung zusätzlich hilft, Wärmeverluste zu vermeiden.

Bei noch stärkerer Kälteexposition setzen *cold induced vasodilations* (CIVD) ein, die die Durchblutung periodisch erhöhen; möglicherweise werden hierdurch Gewebeschäden vermieden (z.B. UEDA (1981) [378], DAANEN (1992) [58]).

2.2.1.2 Schweißproduktion

Der Mensch kann unter Wärmebelastung Schweiß produzieren und so die hohe Verdampfungswärme von Wasser zur Kühlung nutzen. Bei Lufttemperaturen oberhalb der Hauttemperatur ist die Schweißverdampfung der vorrangige Mechanismus für die Wärmeabgabe, da in den meisten feucht-warmen Klimaten die Strahlungstemperatur nicht unterhalb der Lufttemperatur liegt.

Bei einer Verdampfungswärme von 2426 kJ/kg Schweiß (WENGER [398]) erhält man bei einer Schweißrate von 1000 g/h eine Kühlleistung von 674 Watt. Diese Leistung entspricht einem Bruttoenergieumsatz, den nicht viele Personen über mehrere Stunden aufrechterhalten können (zwischen etwa 150 und 200 Watt abgegebener Leistung auf einem Fahrradergometer, abhängig vom Wirkungsgrad der Muskulatur).

Die Höhe der Schweißrate wird sowohl von der Körperkerntemperatur als auch von der lokalen Hauttemperatur beeinflusst, die jeweils unterschiedliche Schwellwerte für den Einsatz der Schweißproduktion besitzen (z.B. HEISING 1989 [135]).

Im feucht-warmen Klima kann der Schweiß oft nicht vollständig verdunsten, so daß ein Teil des produzierten Schweißes abtropft, oder von der Kleidung aufgesaugt wird und in der Kleidung zwar verdampft, aber die Kühlleistung – z.B. bei mehrschichtiger

²⁰ HIRATA ET AL. (1989 [143]): *Increase in evaporative and non-evaporative heat loss from the forearm depends on venous return from the hand during exercise.*

Bekleidung – nicht bis zur Haut gelangt. Der Körper verliert dann Wasser und Elektrolyte, ohne den entsprechenden Vorteil der Kühlung zu erreichen.

Wenn – beispielsweise im feucht-warmen Klima oder unter Schutzkleidung – Schweiß die Haut ganz bedeckt, quellen die oberen Hautschichten auf und die Ausgänge der Schweißdrüsen werden verschlossen. Als Folge sinkt die Schweißrate deutlich ab (*hidromeiosis*, vgl. z.B. Abb. 7); diese Beobachtung wurde zunächst als Schweißdrüsenermüdung (*sweat gland fatigue*) bezeichnet. Da aber nach einem Wechsel von Probanden in trocken-heißes Klima, wo wieder aller produzierter Schweiß verdampfen kann, die Schweißrate ihren alten Wert wieder erreicht, war die ursprüngliche Deutung dieser Erscheinung als Schweißdrüsenermüdung nicht mehr haltbar²¹.

Frauen schwitzen weniger stark als Männer (z.B. MEHNERT ET AL. [248], siehe auch Kapitel 2.2.1.5). Insgesamt hängen die maximal beobachteten Schweißraten von der Dauer der Hitzeexposition und der Arbeitsschwere im Klima ab. Bei eigenen Untersuchungen der Grubenwehr während einer zweistündigen Standardübung erhielten wir für 52 Übungsteilnehmer eine Schweißrate von $(1,0 \pm 0,3)$ kg/h [36]. Eine Übersicht über die maximalen beobachteten Schweißraten gibt TORII 1995 [376].

2.2.1.3 Muskelzittern in der Kälte

In der Kälte kann der Metabolismus durch Muskelzittern erhöht werden. Soweit noch Glukosevorräte zur Verfügung stehen bzw. die Glykogenspeicher gefüllt sind, können in der Kälte ganz erhebliche Wärmemengen durch Muskelzittern gebildet werden: EYOLFSEN ET AL. (1998) [79] berichten von maximalen Wärmeleistungen (Mittelwerte von 15 Probanden) vom 4,7-fachen des Grundumsatzes, von 41,5 % der $\dot{V}O_{2\max}$ und einem Energieumsatz entsprechend einem Sauerstoffverbrauch von 1,6 l/min.

2.2.1.4 Klimaadaptation

Bei der Hitzeadaptation unterscheidet man in der angelsächsischen Literatur zwischen *acclimation* (durch eine experimentell herbeigeführte Situation verursacht, in der z.B. ein Faktor (etwa die Umgebungstemperatur) erhöht wird und die daraus folgenden Umstellungen betrachtet werden) – hier handelt es sich z.B. um die Laboruntersuchungen in Klimakammern oder um einzelne Untersuchungen unter Schutzkleidung – und *acclimatization*, der natürlichen Umstellung des Körpers während der Jahreszeiten, aber auch bei einem Wechsel der Klimazone oder auch beispielsweise die Umstellungen bei Bergleuten, die regelmäßig in der Hitze arbeiten. – Da der Begriff „Akklimation“ in der deut-

²¹ Z.B. BROWN & SARGENT II, 1965 [38].

schen Sprache nicht geläufig ist, wird im folgenden der Begriff Akklimatisation umfassend gebraucht²². Die Adaptation an heiße Klimabedingungen wird in Kapitel 2.3.2.3 näher dargestellt.

Das Ausmaß von Kälteadaptation ist umstritten – einige Autoren sprechen von einer Gewöhnung (*habituation*), andere geben eine erhöhte Fingerdurchblutung – und damit auch eine höhere Fingertemperatur und Geschicklichkeit – an, des weiteren ein schnelleres Einsetzen von CIVDs (z.B. ENANDER & HYGGE [75]).

2.2.1.5 Unterschiede der Thermoregulation bei Frauen und Männern

Eine Reihe von Studien betrachtet die Unterschiede der Beanspruchung von Frauen und Männern unter Hitzebelastung; auf die wesentlichen Ergebnisse soll hier kurz eingegangen werden. NUNNELEY [280] stellt in einem Überblick zum Stand der Forschung 1978 dar, daß Frauen in den meisten Untersuchungen weniger hitzetolerant erscheinen als Männer, insbesondere bei Körperarbeit. Dies liegt an mehreren Faktoren: Frauen sind im Mittel kleiner als Männer und haben so ein Verhältnis von Körperoberfläche zur Körpermasse, das um 10 bis 12 % größer ist als dasjenige von Männern. Bei mittelschwerer Hitzebelastung kann so leichter ein thermoregulatorisches Gleichgewicht erzielt werden, während extreme Hitzebelastung von kleineren Personen schlechter ertragen wird, weil das große Verhältnis von Körperoberfläche zur Körpermasse eine hohe Wärmeaufnahme bei geringer Wärmekapazität des Körpers ermöglicht. Zudem haben Frauen einen höheren Anteil von Fettgewebe (22 bis 30 % gegenüber 11 bis 22 % bei Männern), wobei dieser Unterschied schon bei mäßiger körperlicher Aktivität geringer wird und bei Langstreckenläuferinnen – gegenüber Langstreckenläufern – fast verschwindet. Die Hormonumstellung während des Menstruationszyklus bewirkt postovulatorisch einen Anstieg der Körpertemperatur um 0,3 °C, wobei umstritten war, ob diese Erhöhung während einer Hitzebelastung erhalten bleibt. Ein großer Teil der gefundenen Unterschiede lassen sich auf die geringere körperliche Leistungsfähigkeit und mangelnde Hitzeakklimatisation von Frauen zurückführen und verschwinden, wenn die Arbeitsschwere im Klima auf die individuelle maximale Leistungsfähigkeit bezogen wird. Individuelle Körpergröße, körperliche Leistungsfähigkeit und Akklimatisationsgrad spielen für die Beanspruchung unter Hitzebelastung eine größere Rolle als die Geschlechtszugehörigkeit einer Person.

STEPHENSON & KOLKA [361] gaben 1993 eine weitere Übersicht über die Thermoregulation bei Frauen: seit NUNNELEYS Überblick hatte es sich herausgestellt, daß die hormo-

²² Nach der Einführung dieses begrifflichen Unterschiedes verfährt z.B. auch WENGER 1986 [399] im englischen Text so.

nellen Umstellungen während des Menstruationszyklus einen so großen Einfluß auf die Thermoregulation haben, daß die Phasenlage von Probandinnen im Menstruationszyklus in Studien erfaßt und für die Auswertung kontrolliert werden muß. Die Körpertemperatur zeigt eine circadiane Schwankung, der ein Anstieg um etwa 0,4 °C im post-ovulatorischen Teil des Menstruationszyklus überlagert ist: diese Verschiebungen der Körpertemperatur zeigen sich sowohl in Ruhe als auch bei Körperarbeit und entsprechen sowohl einer Verschiebung der Temperaturschwelle für den Schweißesinsatz als auch derjenigen für den Anstieg der Hautdurchblutung mit der Körperinnentemperatur. Dies entspricht einer Erhöhung des Sollwerts der Körpertemperatur (KOLKA 1992 [205]). – In vielen Untersuchungen in trocken-heißen Bedingungen haben Männer höhere Schweißraten als Frauen (z.B. auch MEHNERT ET AL. 1998 [248]; dies kann aber auch so gedeutet werden, daß Frauen wegen der im Mittel geringeren Körpermasse auch geringere metabolisch erzeugte Wärmemengen an die Umgebung abgeben müssen als Männer; NUNNELEY [280]) – die Frauen haben entsprechend höhere Körpertemperaturen und Herzschlagfrequenzen; bei Körperarbeit, die dem gleichen Prozentsatz der maximalen Leistungsfähigkeit entspricht, verringern sich die Unterschiede. – In feucht-warmen Klimabedingungen scheinen Frauen „effizienter“ zu schwitzen [361], insofern ein größerer Anteil des produzierten Schweißes verdunstet und weniger Schweiß abtropft, was zu niedrigeren Körpertemperaturen und Herzschlagfrequenzen führt, während Männer eher im trocken-heißen Klima Vorteile haben (SHAPIRO ET AL. 1981 [350], PANDOLF ET AL. 1987 [284], EPSTEIN 1990 [77]).

2.2.2 Verhaltensregulation

Innerhalb eines „Komfortbereichs“, in dem man sich behaglich fühlt, besteht keine Notwendigkeit für eine Veränderung des Verhaltens. Die Lage und die Ausdehnung des Behaglichkeitsbereichs hängt wesentlich von der Wärmeisolation der Bekleidung ab; für unbedeckte Menschen in Körperruhe liegt die Behaglichkeitstemperatur bei etwa 30 °C, für normal bedeckte Personen bei leichter Körperarbeit liegt sie um 20 °C²³.

Außerhalb des Bereichs der thermischen Behaglichkeit fühlt man sich unbehaglich; dies führt – wo möglich – zu einer Anpassung des Verhaltens. Dies kann im Verstellen der Heizung, der Belüftung oder auch der Kühlung in der Wohnung oder im Auto bestehen, oder führt z.B. zum Aufsuchen von Schatten (Verringerung der Bestrahlungsstärke), zum Ablegen von Kleidung (Verringerung der Wärmeisolation der Bekleidung), zum Aufsuchen von Orten erhöhter Luftbewegung (Durchzug) oder zum Herstellen erhöhter Windgeschwindigkeit (Fächer, Ventilator), wobei es die Erhöhung der konvektiven und/oder der evaporativen Wärmeverluste gestattet, die Wärmebilanz leichter auszugleichen. Die Menschen können körperliche Aktivität in die kühleren Tageszeiten, d.h. in den frühen Morgen oder den späten Abend verlegen, wodurch in der heißen Tageszeit die metabolische Wärmeproduktion verringert wird, was bei starker Klimabelastung den Ausgleich der Wärmebilanz erleichtert²⁴.

Unterhalb des Bereichs der Behaglichkeit wird man sich vor Wärmeverlusten schützen, also z.B. wärmer anziehen, den Windschatten (etwa an Bushaltestellen) aufsuchen und/oder Bereiche erhöhter Wärmestrahlung aufsuchen: etwa Sonnenstrahlung im Freien; in Fabrikhallen, die nicht völlig beheizt werden können oder sollen, können Zonen mit Infrarotstrahlung geschaffen werden, in denen sich Arbeitnehmer aufhalten können. Zusätzlich kann man sich durch Bewegung aufwärmen, beispielsweise durch Hin- und Herstapfen, wodurch die innere Wärmeproduktion erhöht wird.

Außerhalb der ihnen bekannten Klimabereiche müssen Menschen entsprechende angemessene Verhaltensweisen erlernen: so kann etwa ein Kind, das im Winter aus dem Haus tritt, die Folgen der Kälteeinwirkung z.B. nach einer Stunde Expositionszeit nicht abschätzen und wird meistens eine zu leichte Bekleidung für ausreichend halten, da es seinen thermischen Zustand momentan ja als ausreichend warm empfindet. Eine entsprechende Eingewöhnung brauchen Rekruten und Touristen in extremen Klimaver-

²³ Eine ausführliche Darstellung zur Bewertung des Klimas im Komfortbereich durch Personen („Predicted Mean Vote“, *PMV*), sowie des Anteils der mit dem jeweiligen Klima unzufriedenen Personen („Predicted Percentage of Dissatisfied“, *PPD*) einschließlich der Berechnungsmöglichkeiten dieser Kenngrößen gibt FANGER [81] (1970), dessen Ergebnisse sich in der Norm DIN EN 27 730 (1994) wiederfinden.

²⁴ Eine größtmögliche Reduktion der metabolischen Wärmeproduktion liegt im Schlaf vor: die Siesta in heißen Ländern.

hältnissen (z.B. ein Überlebenstraining für arktische Bedingungen oder Ratschläge zur Vermeidung gesundheitlicher Schäden in warmen Ländern²⁵) sowie Arbeitnehmer für Arbeiten unter schwerer Schutzkleidung, etwa bei der Feuerwehr, Grubenwehr oder in der chemischen Industrie.

Im Bereich industrieller Arbeit liegen oft widersprüchliche Anforderungen vor, die nur schwer erfüllbar sind: so muß etwa im Hochofenbereich trotz erheblicher thermischer Belastung Schutzkleidung getragen werden, die vor Wärmestrahlung schützt, gleichzeitig aber auch Spritzer von flüssigem Metall abhalten kann; die Schutzkleidung kann also nicht so dünn und luftdurchlässig sein, wie es wünschenswert wäre und darf auch nicht abgelegt werden, wenn es dem Träger zu warm ist. Falls keine hinreichende Kühlung möglich ist und unter solchen Bedingungen die Arbeitsschwere durch entsprechende Mechanisierung nicht ausreichend gesenkt werden kann, müssen hier zusätzliche Arbeitspausen eingelegt werden.

Die Bewertung von Verhaltensregulation und autonomer Thermoregulation für die Regulation der Körpertemperatur ist in unterschiedlicher Weise möglich: je nach der Betrachtungsweise und der Bedeutung, die man der Verhaltensregulation zumißt, sprechen verschiedene Autoren von *behavioural thermoregulation*²⁶ bzw. von *thermoregulatory behaviour*²⁷.

Die Vermutung liegt nahe, daß das eingeübte Verhalten unter Klimabelastung – z.B. „ausreichendes Trinken“ (Kapitel 2.3.2.4) und die Wahl eines angemessenen Arbeitstempos (Kapitel 2.4.2) – länger erhalten bleibt als die physiologischen Umstellungen des Körpers (siehe Kapitel 2.3.2.3).

²⁵ VON HALLER: *Gesundheitsbüchlein für die Tropen. Ratschläge zur hygienischen Lebensweise und zur Verhütung von Krankheiten und gesundheitlichen Schäden in den warmen Ländern*, 1972 [119].

²⁶ STOLWIJK & HARDY 1977 [363]: „Behavioral control of the microenvironmental temperature is clearly the most important method of human body temperature regulation.“ Sehr stark betont CORBIT (1971) [54] den großen Wert der Verhaltensregulation: „The learning of new behavioral thermoregulatory responses permits rapid adaptation to new situations of thermal stress, and the utilization of external sources of energy allows animals and men to extend their habitats to environments that would otherwise not support life. In these ways behavioral thermoregulation expands the thermoregulatory capacity afforded by the limited source of metabolic energy and the limited repertoire of responses available to physiological thermoregulation.“

²⁷ Z.B. PIEKARSKI 1985 [294]: „Hierzu dienen... in Fällen, in denen die autonome Thermoregulation nicht mehr ausreichend ist, Maßnahmen der Verhaltensregulation zu deren Entlastung...“

2.3 Einflußgrößen auf die Beanspruchung unter Klimabelastung

2.3.1 Klimatische Einflußgrößen

Der Wärmeaustausch des Körpers wird zunächst von vier meteorologischen Grundgrößen bestimmt:

- durch die Lufttemperatur t_a : die Temperaturdifferenz zwischen der Lufttemperatur und der Hauttemperatur t_{sk} bestimmt den konvektiven Wärmeaustausch zwischen Körper und Umgebung: für $t_a < t_{sk}$ wird Wärme an die Umgebungsluft abgegeben, für $t_a > t_{sk}$ wird Wärme konvektiv von der Haut aufgenommen.
- die Luftfeuchtigkeit läßt sich durch den Wasserdampfpartialdruck p_a , durch die relative Luftfeuchtigkeit RH oder die psychrometrische Feuchttemperatur t_w kennzeichnen. Die Differenz des Wasserdampfdrucks auf der schweißbedeckten Haut und dem Wasserdampfdruck der Umgebungsluft bestimmt das Ausmaß der Schweißverdampfung und damit der evaporativen Kühlung – bzw. im Fall, daß der Wasserdampfdruck in der Umgebungsluft höher ist als der Wasserdampfdruck auf der Haut, das

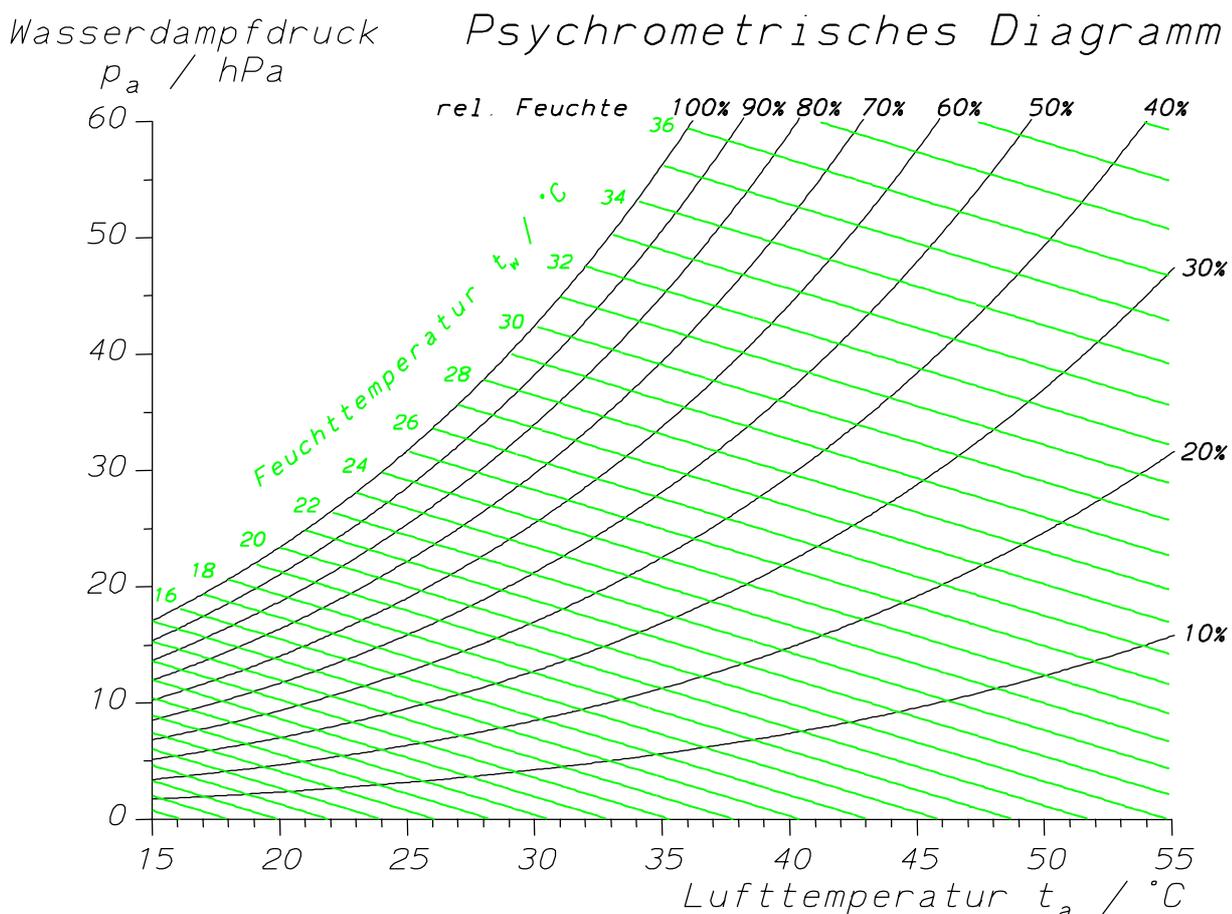


Abb. 3: Psychrometrisches Diagramm, in dem die Beziehung zwischen Lufttemperatur t_a , Wasserdampfdruck p_a und relativer Feuchte RH , sowie die Abhängigkeit der psychrometrischen Feuchttemperatur t_w von diesen Größen (entsprechend der Sprungschens Formel) abgelesen werden kann.

Ausmaß der Kondensationswärme, die auf der Haut freigesetzt wird. – Die Zusammenhänge zwischen diesen Größen lassen sich gut in einem *psychrometrischen Diagramm* (Abb. 3) darstellen.

- durch die Windgeschwindigkeit v_a : die Höhe der Windgeschwindigkeit bestimmt die Größenordnung des *trockenen* (konvektiven) bzw. *feuchten* (evaporativen) Wärmeaustauschs. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf den konvektiven Wärmeaustausch hängt qualitativ davon ab, ob die Lufttemperatur unterhalb oder oberhalb der Hauttemperatur liegt: im ersteren Fall wird Wärme vom Körper abgeführt und diese Abfuhr steigt mit steigender Luftgeschwindigkeit an, im zweiten Fall wird dem Körper Wärme zugeführt. Bezüglich der Schweißverdampfung liegt bei höherer Windgeschwindigkeit eine höhere Geschwindigkeit des Austauschs der wasserdampfgesättigten Grenzschicht über der Haut vor, so daß die Schweißverdampfung erhöht wird. – Es ist also recht einleuchtend, daß der Einfluß der Windgeschwindigkeit innerhalb der Wärmebilanz des Körpers nicht ganz einfach beurteilt werden kann, weil er von mehreren anderen Größen abhängt.
- durch die Strahlungstemperatur der Umgebung t_r : die Absorption und Emission von Wärmestrahlung – die im kurz- und langwelligen Wellenlängenbereich durchaus auch unterschiedlich sein kann – stellt einen weiteren Mechanismus für den Wärmeaustausch dar. So kann etwa in Räumen, die nicht gut beheizt werden können²⁸, bei niedrigen Lufttemperaturen durch Wärmestrahlung – z.B. durch Einsatz von elektrischen oder gasbeheizten Infrarotstrahlern – eine ausgeglichene Wärmebilanz des Körpers hergestellt werden.

In DIN 33 401T1 bzw. ISO 7726 [441] sind die Meßmethoden zur Erfassung dieser Größen festgelegt.

²⁸ In früheren Jahren, als in vielen Wohnungen noch nicht alle Wohnräume beheizt wurden, wurden in Badezimmern oft Infrarotstrahler eingesetzt: trotz der vorhandenen niedrigen Lufttemperaturen konnte so im Winter ein einigermaßen komfortables Klima erzeugt werden. Weiter wurden Infrarotstrahler in Kirchen (für die kurze Nutzungszeit im Winter während der Gottesdienste brauchte nicht der gesamte Kirchenraum beheizt zu werden) oder werden auch heute noch in Industriehallen (in einigen Fällen - wo etwa regelmäßig große Tore geöffnet werden müssen, oder wo eine Abdichtung gegen Zugluft nicht möglich ist - ist eine Heizung oft nicht sinnvoll möglich, in anderen Fällen halten sich Personen nur in einem begrenzten Arbeitsbereich auf, so daß das Beheizen einer gesamten großen Halle unnötig ist) eingesetzt. Zur physiologischen Bewertung siehe GEBHARDT ET AL. 1995 [99].

2.3.2 Nichtklimatische Einflußgrößen

Den klimatischen Belastungsgrößen der Umgebung stehen Größen auf Seiten des Menschen gegenüber, die zunächst vom äußeren Klima unabhängig sind und von der Arbeitssituation – Arbeitsschwere sowie Bekleidung – oder zum Teil von der Vorgeschichte des Aufenthalts im Klima – Akklimatisation oder auch Dehydratation – sowie durch weitere Eigenschaften des Menschen vorgegeben werden.

Innerhalb des Belastungs-Beanspruchungs-Schemas können diese Größen als *intervenierende Variablen* angesehen werden, wenn die Klimagrundgrößen als Belastungsgrößen und die physiologischen Größen als Beanspruchungsgrößen betrachtet werden. Die Zuordnung dieser Größen in das Belastungs-Beanspruchungs-Schema (z.B. ROHMERT [312]) ist aber nicht immer eindeutig: so kann bei bestimmten Arbeitsaufgaben etwa die Arbeitsleistung dem Beanspruchungsempfinden angepaßt werden (Kapitel 2.3.2.1; siehe auch z.B. LAVENNE [213]); in einem solchen Fall könnte man dann die Arbeitsleistung als Beanspruchungsreaktion betrachten, die mit zunehmender Klimabelastung zurückgeht. Als weiteres Beispiel für einen komplexen Zusammenhang kann bei schwerer Körperarbeit bzw. Hitzebelastung die Wärmeisolation der Bekleidung verändert werden (durch das Ausziehen einer Jacke, das Aufknöpfen eines Hemdes); die Bekleidung kann aber auch durchgeschwitzt werden, so daß sich ihre Wärmeisolation stark verändert; dann würde sich die Wärmeisolation der Bekleidung – eine Belastungsgröße – als Funktion der Schweißrate – also einer Beanspruchungsgröße – verändern und so eine Rückkopplung in das betrachtete System einbringen.

2.3.2.1 Metabolische Wärmeproduktion

Die Einhaltung der Körpertemperatur wird dadurch erschwert, daß die innere Energieproduktion in weiten Grenzen schwanken kann: der menschliche Körper besitzt bereits im Ruhezustand eine metabolische Wärmeproduktion von 70 bis 80 Watt. Wenn diese erzeugte Wärme nicht aus dem Körper abgeleitet werden könnte, würde dies zu einem Anstieg der Körpertemperatur von etwa 1 °C/h führen. Bei körperlicher Arbeit führt der endliche Wirkungsgrad der Muskeln bei der Erzeugung mechanischer Arbeit – bei großen Muskelgruppen zwischen 20 und 24 %, bei kleinen Muskeln niedriger²⁹ – zur Freisetzung zusätzlicher Wärmemengen. Schwere körperliche Arbeit kann so

²⁹ Bei einer Arbeitsleistung von z.B. 100 Watt auf einem Fahrradergometer werden 300 bis 400 Watt Wärmeleistung im Körper frei; die extern abgegebenen 100 W werden im Fahrradergometer freigesetzt. - Bei Arbeiten, bei denen keine mechanische Arbeit geleistet wird - etwa beim Gehen in der Ebene - verbleibt die gesamte metabolische Wärmeleistung im Körper.

– ebenfalls unter der Annahme, daß alle Wärme im Körper gespeichert würde – einen Anstieg von mehr als 5 °C/h zur Folge haben³⁰.

Um eine ausgeglichene Wärmebilanz zu erzielen, muß die im Körper erzeugte metabolische Wärme wieder an die Umgebung abgegeben werden. In Abhängigkeit von der Arbeitsschwere sind Gleichgewichtszustände bei unterschiedlich hohen Körpertemperaturen möglich: NIELSEN [275] stellte 1938 fest, daß die Körpertemperatur im thermoregulatorischen Gleichgewicht – bei nicht allzu hohen Lufttemperaturen – ausschließlich von der Arbeitsschwere bestimmt ist. Der Komfortbereich zeichnet sich unter den möglichen Gleichgewichtszuständen dadurch aus, daß hier ein minimaler Regelbedarf vorliegt.

Im Gegensatz zum äußeren Klima kann diese wichtige Komponente der Wärmebilanz von einem Betroffenen geregelt werden³¹, falls nicht etwa ein äußerer Arbeitstakt vorgegeben ist, wie etwa am Fließband oder in einer Marschkolonne beim Militär. Die Siesta in südlichen Ländern stellt unter diesem Gesichtspunkt eine sinnvolle Anpassung an die hohen Temperaturen während der Mittagszeit dar.

Sehr gut trainierte Sportler (z.B. Bergsteiger bei Expeditionen) können über Tage oder Wochen so schwere Arbeit leisten, daß sie die verbrauchte Energie nicht mehr durch die Ernährung decken können; sie müssen dann Körpersubstanzen aufbrauchen (z.B. ULMER [381]).

2.3.2.2 Bekleidung

In ISO 9920 (1995) ist die Wärmeisolation einer Bekleidung I_{cl} als die mittlere Wärmedämmung zwischen Haut und Bekleidungsoberfläche in $\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ definiert. Traditionell wird in der Thermophysik die Einheit *clothing unit* (*clo*) verwendet, wobei $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ ist und z.B. in der Arbeitswelt einer Bekleidung mit „kurzer Unterwäsche, Oberhemd, langer Hose, Jacke, Socken und Schuhen“ entspricht. ISO 9920 gibt viele Beispiele für I_{cl} -Werte für Kombinationen von Kleidungsstücken und auch Berechnungsvorschriften zur Errechnung der Gesamtisolation der Bekleidung aus den Kennwerten der einzelnen Kleidungsstücke.

Zur Bestimmung der Wärmeisolation ist die Messung mit einem *thermal manikin* sicherer als die Berechnung für eine Kombination von Kleidungsstücken: einer Schaufensterpuppe (in Lebensgröße), deren Oberfläche mittels elektrischer Oberflächenheizelemente auf eine festgesetzte „Hauttemperatur“ erwärmt wird; nachdem

³⁰ Z.B. CALLAHAM [43]. - In Abb. 68 ist in einem Feldversuch ein Anstieg der Körpertemperatur von 2,2 °C/h während einer Phase schwerer körperlicher Arbeit im feucht-warmen Klima über mehr als 30 Minuten Dauer aufgezeichnet.

³¹ Z.B. LAVENNE 1967 [213].

die Puppe mit der zu untersuchenden Bekleidungskombination bekleidet wurde, benötigt man weniger elektrische Heizleistung, um die vorherige Oberflächentemperatur zu erreichen: die Reduktion der Heizleistung ist dann ein Maß für die Wärmeisolation der Bekleidung.

Untersuchungen von HAVENITH ET AL. [128] ergaben 1990, daß Körperhaltung, Windgeschwindigkeit und Bewegung des Körpers einen teilweise erheblichen Einfluß auf den Wert der Bekleidungsisolation haben. Die Bekleidungsisolation kann beispielsweise bei eng anliegender Kleidung um 6 % bis 31 % niedriger sein als bei locker anliegender Bekleidung. Ähnliches gilt für den Wasserdampfdiffusionswiderstand der Bekleidung (HAVENITH ET AL. 1990 [130]), der bei hoher Windgeschwindigkeit für eine gehende Person im Einzelfall um bis zu 89 % verringert sein kann.

Insbesondere bei Bewegung wird die Luft, die unter der Bekleidung eingeschlossen ist, stärker ausgetauscht als in Körperruhe (*pumping effect*). Da diese dynamische Veränderung der Wärmeisolation nur schwer rechnerisch zu erfassen ist, bietet sich hier der Einsatz von beweglichen *thermal manikins* zur Ermittlung der Daten an (HOLMÉR ET AL. 1992 [150]; NILSSON ET AL. 1992 [276]). Auch der Wasserdampfdiffusionswiderstand kann durch den *pumping effect* deutlich verringert werden. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden *thermal manikins* entwickelt, die an einzelnen Körperteilen oder insgesamt schwitzen können (DOZEN ET AL. 1986 [64], MEINANDER 1992 [250] und 1994 [251]; LAAMANEN ET AL. 1996 [209]).

Einen Überblick zum Stand der Beschreibung des Wärmeaustauschs durch die Bekleidung, wie er in die Neufassung der Norm ISO 7933 eingehen wird, geben HOLMÉR ET AL. (1999 [151]) zum konvektiven Wärmeaustausch und HAVENITH ET AL. (1999 [133]) zum evaporativen Wärmeaustausch; PARSONS ET AL. (1999 [287]) fassen die Ergebnisse dieser beiden Arbeiten in Form eines Computerprogramms zusammen.

Bei schweißdurchnässter Kleidung bilden sich „Kältebrücken“ und die Wärmeisolation kann stark abnehmen. Zu dieser Problematik sind Untersuchungen dringend notwendig, da Arbeitsbedingungen, die zu durchgeschwitzter Kleidung führen, durchaus auch in ISO 7243 und ISO 7933 bewertet werden.

Im Fall hoher Belastung durch Wärmestrahlung kann eine Schutzkleidung mit hohem Reflexionsgrad die Belastung verringern, z.B. am Hochofen. Auch wenn beispielsweise die Feuchttemperatur oberhalb der Hauttemperatur liegt, so daß Kondenswärme auf der Haut frei wird, ist es sinnvoll, wärmeisolierende Bekleidung zu tragen, damit die Kondenswärme auf der Oberfläche der Bekleidung frei wird und möglichst wenig Wärmeleitung zum Körper hin stattfindet³².

³² H. BRIGGS 1923 (in der Diskussion zu Moss [263], p. 304) über Bergarbeiter in einem Schacht, in dem Dampf aus Dampfleitungen austrat, so daß die Feuchttemperatur oberhalb der Kör-

Für manche Probleme in der Arbeitswelt widersprechen die Schutzziele einer Schutzbekleidung den ergonomischen Anforderungen an eine Arbeitsbekleidung: so muß etwa am Hochofen die Schutzbekleidung Wärmestrahlung reflektieren und Spritzer von flüssigem Eisen abhalten können; gleichzeitig sind eine gute Wärmeabgabe des Körpers an die Umgebung und eine gute Beweglichkeit des Trägers der Bekleidung wünschenswert. – Ähnliches gilt auch für die Bekleidung der Feuerwehr oder für die Flammenschutzbekleidung der Grubenwehr, deren Schutz vor Flammen nur durch eine entsprechende Wärmeisolation bewirkt werden kann.

2.3.2.3 Akklimatisation

Der Mensch kann unter Hitzebelastung an fast der gesamten Körperoberfläche schwitzen; gegenüber Spezies die hecheln (z.B. Hunden), kann so ein weitaus größerer Teil der Körperoberfläche als die oberen Respirationswege zur evaporativen Kühlung genutzt werden. Dieser Vorteil hat jedoch Folgen: zum einen muß die Wasser- und Elektrolytbilanz aufrechterhalten werden, zum anderen wird es schwieriger, die Anforderungen, die an den Kreislauf bei Körperarbeit gestellt werden, auch unter Hitzebelastung einzuhalten. – Zum ersten Aspekt: die Elektrolyte, die im Schweiß ausgeschieden werden, sind für den menschlichen Körper verloren – ein Hund, der hechelt, kann dagegen seinen Speichel schlucken, so daß die Körperflüssigkeit nicht verlorengeht und auch die Elektrolyte wieder genutzt werden können. Insbesondere in feucht-warmem Klima kann der Mensch mehr Schweiß absondern als verdunsten, so daß Schweiß abtropft: der Schweiß ist dann vergeudet bzw. die Kühlleistung, die im Fall der Verdunstung entstanden wäre, für den Körper nicht nutzbar. Zum zweiten Aspekt: wenn die Kühlleistung des verdampfenden Schweißes effizient genutzt werden soll, um die metabolische Wärme, die in den inneren Organen und der Skelettmuskulatur bei Körperarbeit erzeugt wird, wieder aus dem Körper herauszuführen, muß die Hautdurchblutung sehr gesteigert werden. Dieser Anstieg der Hautdurchblutung (vgl. Kapitel 2.2.1.1) führt zur Ansammlung einer Blutmenge in den erweiterten oberflächennahen Venen der Haut, die einen Abfall des zentralen Venendrucks und daraus folgend dann auch des Herzschlagvolumens zur Folge hat. – Dies führt dazu, daß Hitzebelastung die Fähigkeit des Menschen zu Ausdauerarbeit vermindert³³.

Menschen können sich an Hitzebelastungen gewöhnen und können dann z.B. längere Zeit in einem Hitzeklima arbeiten, in dem sie sich vor dieser Eingewöhnung nur kurz

pertemperatur lag (> 105 °F ≈ 40,5 °C): „One of us remarking afterwards to Dr. Haldane on the (at first sight) excessive amount of clothing they wore, he very rightly observed that when working at a wet-bulb temperature above blood-heat one should put on a lot of clothes to keep the heat out!“

³³ Z.B. WENGER 1987 [399].

hätten aufhalten können. Diese Hitzeakklimatisation des Menschen besteht aus einer Anzahl unterschiedlicher Anpassungsreaktionen, die im einzelnen mehr oder weniger gut verstanden sind. Sie sollen einerseits die thermoregulatorischen Funktionen des Körpers bei Hitzearbeit aufrechterhalten und andererseits die Kreislaufbeanspruchung und die Salzverluste unter Hitzebelastung verringern.

Eine Hitzegewöhnung oder Akklimatisation findet statt, wenn der Mensch wiederholt Hitzeexpositionen erfährt, die ausreichen, die Körpertemperatur zu erhöhen und mäßiges bis starkes Schwitzen verursachen³⁴. Mittelschwere Körperarbeit von etwa einer Stunde Dauer pro Tag im Hitzeklima reicht aus, um bereits nach wenigen Tagen eine Auswirkung hervorzurufen: Umstellungen im Herz-Kreislauf-System führen zu einer Absenkung der Herzschlagfrequenz und zu niedrigerer Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems bei vorgegebener Arbeitsschwere in der Hitze. Weiterhin beginnt die Schweißproduktion während einer Hitzeexposition früher, die Schweißraten sind bei gleicher Erhöhung der Körperkerntemperatur höher und diese höheren Schweißraten können auch über eine längere Zeit aufrechterhalten werden als vor der Hitzegewöhnung; hieraus resultiert eine Absenkung der Körpertemperatur. – Für eine vorgegebene Arbeitsschwere von Körperarbeit unter Klimabelastung kann so eine recht deutliche Verringerung der Beanspruchung auftreten: die Absenkung von Herzschlagfrequenz, Körper- und Hauttemperatur sowie die Zunahme der Schweißproduktion finden – bei täglicher Hitzeexposition – zum größten Teil innerhalb der ersten Woche der Akklimatisation statt; die Herzschlagfrequenz erreicht innerhalb von drei bis sechs Tagen ihr neues Niveau, die Körpertemperatur erreicht ihren neuen Wert nach fünf bis zehn Tagen, während der Anstieg der Schweißrate bis zu einem Monat andauern kann (z.B. WENGER 1988 [399] oder ARMSTRONG & MARESH 1991 [16]).

Während einer länger andauernden Hitzeexposition – insbesondere bei hoher Luftfeuchtigkeit – verringert sich die Schweißrate nach einiger Zeit (Kapitel 2.2.1.2; vgl. auch Abb. 7). – Bei einer Akklimatisation im feucht-warmen Klima vermindert sich dieser Rückgang der Schweißrate, so daß akklimatisierten Probanden auch während länger andauernder Hitzeexpositionen in diesen Klimaten eine höhere Schweißrate zur Verfügung steht (z.B. WYNDHAM ET AL. [419]). Die Schweißproduktion nimmt bei einer Akklimatisation im feuchtwarmen Klima auch auf den Gliedmaßen deutlich zu, so daß die

³⁴ SCHMIDT (1901) [332] im Zusammenhang mit Gesundheitsstörungen in Hitze und deren unterschiedlicher Ausprägung bei verschiedenen Personen: „Der wichtigste dieser im Individuum selbst liegenden Faktoren ist die Gewöhnung des Organismus an hohe Temperaturen nicht allein, sondern vor allem an die Arbeit bei hohen Temperaturen. Es ist eine ganz bekannte Tatsache, dass Neulinge, die als Trimmer durchaus die leichtere Arbeit zu verrichten haben und der strahlenden Wärme so gut wie gar nicht ausgesetzt sind, unverhältnismäßig viel häufiger erkranken als als trainierte Leute (ältere Heizer).“ (sic!) - Selbstselektion der Kollektive wird von SCHMIDT nicht in Betracht gezogen.

Schweißproduktion insgesamt gleichförmiger auf der gesamten Körperoberfläche stattfindet (z.B. HÖFLER 1968 [144], LAASER 1968 [210] und WENGER 1988 [399]).

Als deutliches Zeichen einer Hitzeakklimatisation wird bei einem hitzeexponierten Menschen bei Körperarbeit ein geringerer Anstieg der Körpertemperatur beobachtet. Diese verringerte Körpertemperatur bei Arbeit im Klima wird Anpassungen des Körpers zugeschrieben: erhöhte Schweißraten, ein vergrößertes Volumen des Blutplasmas, eine erhöhte periphere Durchblutung und einem Training der Herz-Kreislauf-Systems; eine andere Möglichkeit der Erklärung wäre eine Verringerung des Energieumsatzes, der dazu führen würde, daß weniger Wärme im Körper freigesetzt würde. Zur Frage einer Veränderung des Energieumsatzes nach Akklimatisation liegen eine Reihe unterschiedlicher Ergebnisse vor. Zum einen wird ein Anstieg des Energieumsatzes um 10 % pro Grad Erhöhung der Körpertemperatur erwartet (Q_{10} -Effekt), zum anderen treten während einer längeren Akklimatisationsserie Übungseffekte auf, die den Energieumsatz – durch bessere Koordination der Bewegungen – auch bei scheinbar einfachen Tätigkeiten wie Laufbandarbeit oder insbesondere auch einem *step-test* verringern können, so daß auch durch Training in kühlem Umgebungsklima bereits eine Absenkung des Energieumsatzes beobachtet wird (z.B. STRYDOM ET AL. 1966 [365] und [366]). Methodisch müssen zur Klärung dieser Frage die Gewöhnung an die Arbeitssituation, die Übungseffekte der Körperarbeit und auch die Verluste an Körpermasse während der Klimaexposition in Betracht gezogen werden. Eine Übersicht über Studien zur Abnahme des Energieumsatzes bei Körperarbeit nach Akklimatisation – bis zu 17 % Verringerung des Energieumsatzes – geben SAWKA ET AL. 1983 [323], die drei eigene Studien auf diese Fragestellung hin analysieren und eine Verringerung des Energieumsatzes von 3 % nach Akklimatisation und 5 % nach Training in kühlem Umgebungsklima erhielten – die Jahreszeit sowie das Geschlecht der Probanden hatten keinen signifikanten Einfluß auf diese Ergebnisse. Ein weiterführender Ansatz wurde von DIMRI ET AL. 1980 [60] verfolgt: sie maßen neben dem aeroben Energieumsatz auch den anaeroben Energieumsatz für drei Arbeitsschweren und drei Hitzebelastungen, wobei sie den anaeroben Energieumsatz durch die Erfassung des Sauerstoffverbrauchs nach der Exposition, genauer: die Erhöhung über den Ruhewert, errechnen konnten. Mit zunehmender klimatischer Belastung erhöhte sich der gesamte Energieumsatz (als Summe von aerobem und anaerobem Energieumsatz), wobei allerdings der aerobe Energieumsatz mit zunehmender Klimabelastung zugunsten des anaeroben Energieumsatzes abnahm. Bei der üblicherweise ausschließlichen Bestimmung des aeroben Energieumsatzes wäre dieses Ergebnis als eine Abnahme des gesamten Energieumsatzes beschrieben worden. – Dieses Ergebnis von DIMRI ET AL. wird dadurch gestützt, daß eine Reihe von Untersuchungen, die eine Abnahme des Energieumsatzes bei Körperarbeit nach Akklimatisation feststellten, von erhöhten Lactatspiegeln in Muskeln bzw. im Blutplasma berichteten und in anderen Studien bei submaximaler Körperarbeit in Hitze höhere Lactatkonzentrationen im Blutplasma gefunden wurden als bei der gleichen Arbeit unter komfortablen Klimabedingungen (vgl. SAWKA & WENGER 1988 [324]).

Es gibt Beobachtungen der Hitzegewöhnung während recht unterschiedlicher Zeiträume (4 bis 23 Tage) in unterschiedlichen Klimaten; Übersichten finden sich etwa bei SAWKA ET AL. 1983 [323] und PIEKARSKI 1985 [294].

Bei Ausdauertraining – auch in komfortablem Umgebungsklima – kommt es zu einer Erhöhung von Körpertemperatur und Schweißproduktion; hierdurch wird das thermoregulatorische System gefordert und auch die Hitzetoleranz verbessert; die Hitzeakklimatisation kann durch Training in kühler Umgebung aber nicht ersetzt werden (STRYDOM ET AL. 1966 [366])³⁵. Eine kontroverse Diskussion zu dieser Fragestellung wurde von GISOLFI & COHEN 1979 [106] dahingehend beigelegt, daß es sehr auf die Dauer und Intensität eines aeroben Trainings (und damit auch auf die Dauer und das Ausmaß der Erhöhung der Körpertemperatur) ankommt, wenn eine Hitzeakklimatisation durch aerobes Training in kühlen Klimabedingungen erzielt werden soll: zwei Wochen intensiven Trainings in normalem Klima ersetzen kein Training im Hitzeklima; acht bis elf Wochen Zirkeltraining können jedoch die Hitzetoleranz bereits deutlich verbessern und Langstreckenläufer können leichte Körperarbeit in trockener oder feuchter Wärme über vier Stunden im thermoregulatorischen Gleichgewicht ausführen.

Die aerobe Leistungsfähigkeit zu Beginn der Akklimatisation ist jedoch direkt mit der Dauer der Akklimatisation als Umstellungsprozeß verknüpft (PANDOLF ET AL. 1977 [283]): bei einer maximalen spezifischen Sauerstoffaufnahme von 65 ml/min/kg erreicht die Körpertemperatur bereits nach vier Tagen ein neues Plateau, während dieser Akklimatisationsprozeß bei einer maximalen Sauerstoffaufnahme von 40 ml/min/kg acht Tage dauert. Power [302] vertritt 1967 die Auffassung, daß Probanden (Soldaten) der natürlichen Akklimatisation für Hitze um so näher sind, je höher ihre körperliche Fitneß ist. Nach GOLDMAN findet für Probanden mit einer spezifischen maximalen Sauerstoffaufnahme unterhalb von 30 bis 32 ml/min/kg keine nennenswerte Hitzegewöhnung statt³⁶.

Im Verhältnis zum Blutplasma oder zur interzellulären Flüssigkeit ist Schweiß hypoton, d.h., daß die Schweißdrüsen Salz reabsorbieren. Mit zunehmender Schweißrate nimmt die Rate der Reabsorption nicht im gleichen Ausmaß zu, so daß der Salzgehalt im Schweiß ansteigt. Während einer Akklimatisation nimmt der Salzgehalt im Schweiß signifikant ab (ALLAN & WILSON 1971 [8] beobachten einen Abfall bis zu einem Faktor fünf), wobei der Anstieg des Salzgehaltes mit zunehmender Schweißrate weiter stattfindet. Wenn die Salzzufuhr zum Körper nicht ausreichend hoch ist, um den Salzverlust im Schweiß gut auszugleichen, kann der Körper die Salzausscheidung im Urin sehr stark verringern („chlorfreier Harn“ bei Personen mit Hitzekrämpfen, die durch Salzangel

³⁵ KOLKA (1993 [206]) hält regelmäßige, schwere Körperarbeit in der Hitze für die beste Methode zur Hitzegewöhnung: „... the best method for heat acclimation is regular, heavy exercise in the heat.“

³⁶ R. F. GOLDMAN, persönliche Mitteilung.

bedingt sind (erwähnt z.B. bei LEHMANN & SZÁKAL 1937 [216]); eindrucksvoll im Labor dargestellt von SMILES & ROBINSON 1971 [355]). In den ersten Tagen der Hitzeexposition empfehlen einige Autoren Salzzusatz zur Nahrung (vgl. Kapitel 2.3.2.4, S. 29).

Zum Abklingen der Akklimatisation liegen unterschiedliche Beobachtungen vor. WENZEL stellt 1968 [404] im trocken-heißen Bereich ($t_a = 45 \text{ °C}$; $RH = 25 \%$) bereits nach zwei expositionsfreien Tagen am Wochenende einen merklichen Rückgang der Akklimatisation bei einem Probanden fest. WYNDHAM & JACOBS 1957 [416] beobachteten einen signifikanten Rückgang der Akklimatisation von 73 Probanden im feucht-warmen Klima nach 6 Tagen Arbeit im kühlen Klima. PANDOLF ET AL. messen 1977 [283] für Probanden mit hoher körperlicher Leistungsfähigkeit nach 3, 6, 12 und 18 Tagen nur einen Abfall der Akklimatisation von 0 % - 12 % für t_{re} , und 2 % - 29 % für die Herzschlagfrequenz.

2.3.2.4 Ausgleich von Wasser- und Elektrolytbilanz

Obwohl – oder vielleicht auch gerade weil – Hunger und Durst zu den unmittelbaren Gefühlen des Menschen gehören, sind Eß- und Trinkgewohnheiten oft stark kulturell überformt: etwa durch Fastenvorschriften³⁷, durch Idealbilder der Figur, die angestrebt werden, durch ethische Grundsätze (Vegetarier) oder durch medizinische Vorschriften (wie etwa Stillvorschriften (MANZ ET AL. 1997 [242])).

Im Bereich von Hitzearbeit treten oft dann Probleme auf, wenn die Trinkgewohnheiten, von denen im Folgenden die Rede sein soll, sich bislang zwar unter „normalen“ Lebens- und Arbeitsbedingungen bewährt haben, aber dann unhinterfragt für Hitzeexpositionen übernommen werden. Solche Problemlagen ergaben sich in der Vergangenheit bei Reisen in andere Klimazonen oder bei militärischen Operationen, bei denen nicht ausreichend Trinkwasser mitgeführt werden konnte, oder die unter ungewohnten Klimabedingungen durchgeführt wurden (vgl. Fußnote 3). Auf das Trinken bei Hitzearbeit soll im Folgenden etwas ausführlicher eingegangen werden.

Mit der Industrialisierung entstanden Arbeitsplätze, deren klimatische Bedingungen unerträglich waren, wie beispielsweise Arbeitsplätze in Eisenhütten, in Bergwerken und Heizkesselräume von Schiffen. SCHMIDT (1901) [332]: „Dass auch unter dem Heizer- und Maschinenpersonal [auf Schiffen, d.A.] fast ausnahmslos nur die Leute erkranken, die allzu reichlich trinken und schwitzen, ist eine alte Erfahrung.“ – Andererseits ist es auch

³⁷ NEUMANN, T. W.: *A Biocultural Approach to Salt Taboos: The Case of the Southeastern United States*. gibt 1977 ein Beispiel für einen Erklärungsversuch kultureller geprägter Verhaltensweisen durch korrespondierende physiologische Vorteile [272]. - Durch den Abdruck einer großen Anzahl von Kommentaren und Einwänden werden in dieser Veröffentlichung die Probleme eines solchen Erklärungsversuchs gut dargestellt.

gefährlich, zu wenig zu trinken: SCHMIDT schildert ausführlich einen Fall von Hitzschlag bei einem Maschinenassistenten, der zum ersten Mal in die Tropen fuhr; der Hitzschlag trat im Maschinenraum bei einer Temperatur von 65 °C ein³⁸.

Nach Moss (1923) [263] traten Krämpfe bei Bergleuten (*miners' cramp*) in der zweiten Schichthälfte in denjenigen Muskeln auf, die beansprucht wurden; die Bergleute nahmen mehr und salzigeres Essen zu sich als andere Arbeiter, obwohl die hohen Temperaturen den Appetit eher dämpften. Moss sieht übermäßiges Trinken (*excessive drinking*) als Ursache einer Wasservergiftung (*water poisoning*) an, die zu den beobachteten Muskelkrämpfen führt. Die Urinprobe eines Bergmanns – der an Krämpfen gelitten hatte –, die am Ende der Schicht genommen wurde, enthielt praktisch kein Cl⁻. – Hitzegewohnte Bergleute verloren die doppelte Schweißmenge wie ihre nicht akklimatisierten Kollegen. Bei Ausgabe eines Getränks mit Salzzusatz traten keine Krämpfe mehr auf, die weitaus meisten Bergleute fühlten sich gegen Ende der Schicht und nach der Schicht frischer; einige berichteten aber auch, daß sie keinen Effekt des Salzzusatzes feststellten.

MARSCHAK ET AL. zeigten 1929 ([243] und [244]), daß Wasser ohne Salzzusatz schnell durch Schweiß und Urin wieder ausgeschieden wird. GLOVER [108] teilte (1931) mit, daß 1926 und 1927 in Stahl- bzw. Aluminiumfabriken ein Salzzusatz zum Trinkwasser vorgeschlagen wurde. Dazu wurden Salztabletten ausgegeben, die jeweils eingenommen werden sollten, wenn Wasser getrunken wurde. Bei denjenigen Mitarbeitern, die regelmäßig Salztabletten eingenommen hatten, trat kein Fall von Krämpfen auf.

TALBOTT berichtete (1935) [371], daß Muskelkrämpfe äußerst schmerzhaft sein können; beim Bau des Boulder Staudamms wurde berichtet, daß im Sommer 1931 mehrere Bauarbeiter wegen der schmerzhaften Krämpfe in den Colorado sprangen, obwohl eine Rettung aus dem reißenden Fluß sehr unsicher war. Bei Prädisposition für Krämpfe ist keine Adaptation für schwere Arbeit unter Hitzebelastung möglich; am Boulder-Staudamm wurden alle Patienten mit Hitzekrämpfen in den ersten Tagen einer Hitzewelle eingeliefert, die nach einer Periode von kühlem Wetter einsetzte. TALBOTT referiert, daß es allgemein für zutreffend gehalten wird, daß Kohlenbergleute in England, die Bier trinken, keine Hitzekrämpfe haben, wobei diese Bergleute vor dem Trinken Salz ins Bier tun. – Hauptfaktoren für Krämpfe sind nicht übermäßiges Trinken (da Krämpfe auch auftreten können, wenn nicht übermäßig oder auch, wenn gar nicht getrunken wird), sondern der

³⁸ Bei dem Patienten stellte sich eine Axillartemperatur von über 43 °C ein, wobei eine Malariainfektion ausgeschlossen werden konnte. Der Patient wurde durch Trinken von gekühltem Tee - so lange er noch bei Bewußtsein war - und durch Abkühlen in einer Badewanne mit Eiswasser sowie anschließendes Besprengen der Brust mit Eiswasser auf eine Temperatur von 38,5 °C abgekühlt. Nachdem der Patient sich wieder vollständig erholt hatte, erzählte er, daß er dem Rat eines erfahrenen Maschinisten gefolgt war, in den Tropen so wenig wie möglich zu trinken, um eine Infektion mit Malaria zu vermeiden, und entsprechend auch bei den sehr hohen Temperaturen gedürstet hatte.

Verlust von Chlorid und Wasser. Die Schlußfolgerung von TALBOTT ist, daß ein Zusatz von Kochsalz von 0,1 % zur Verhütung von Hitzekrämpfen sinnvoll ist, während die Verwendung von Salztabletten in der Anwendung zu unsicher bleibt.

LEHMANN & SZÁKALL untersuchen 1937 die Bedeutung des Flüssigkeits- und Salzersatzes bei Hitzearbeit [216]. LADELL fand (1949) [211], daß Hitzekrämpfe durch eine Verringerung der Chloridkonzentration verursacht werden; für das Einsetzen von Muskelkrämpfen reichte es aus, wenn diese Verringerung lokal bestand.

1959 schreibt der ARBEITSKREIS FÜR FRAGEN DES WERKSÄRZTLICHEN DIENSTES IM BERGBAU³⁹: „Anpassung an die Hitze ist möglich und erfolgt in zwei Stufen. Die erste Stufe der Anpassung dauert ungefähr eine Woche. In dieser Zeit soll der Körper wasser- und salzarm werden. Deshalb: Während der ersten Woche – auch außerhalb der Schicht – wenig trinken. Die Arbeitsleistung darf nur langsam gesteigert werden.“

HAUER empfiehlt 1941 [127] für militärische Operationen in Nordafrika: „...Einschränkung der Flüssigkeitszufuhr durch Trinkdisziplin, mit deren planmäßiger Durchführung nach Möglichkeit schon während, besser noch kurz vor Beginn des Transports anzufangen ist...“.

Ähnliche Vorschriften bestanden auch für die britische Armee in Indien: „Maultiere werden getränkt wann immer möglich, Mannschaften trinken nur nach Anweisung durch einen Vorgesetzten“⁴⁰. POWER 1967 [302] hält fest: Trinkdisziplin (*water discipline*) kann und darf nicht trainiert werden – stattdessen kann und muß trainiert werden, die enormen Mengen an Wasser zu trinken, die erforderlich sind, um Hitzeerkrankungen in sehr ungünstigem Klima vorzubeugen!

BRÜCK [39] rügt in einer Zuschrift an die Frankfurter Allgemeine Zeitung 1969 eine Empfehlung des verkehrsmedizinischen Ausschusses der Bundesärztekammer – der in der Zeitung abgedruckt worden war –, während Autofahrten möglichst wenig zu trinken. „Bei starker Hitze schwitzt man, und die Flüssigkeit muß ergänzt werden; wenn man das nicht tut, treten früher oder später erhebliche Funktionsstörungen auf. ... Ein paar Salzstangen können auch nicht schaden, da mit dem Schweiß reichlich Kochsalz verloren geht.“

KNOCHEL (1974) [204] hält – obwohl er den genauen Mechanismus noch nicht für aufgeklärt hält – akute Verluste von Natriumionen – bei möglicherweise ausgeglichenen Wasserverlusten – für die Auslöser von Hitzekrämpfen (Hyponatriämie; die Bezeichnung „Hitzekrämpfe“ wäre dann falsch, weil die Hitze die Krämpfe nicht direkt verursacht). Drei Faktoren sind nach seiner Einschätzung dafür maßgeblich: 1) große

³⁹ Arbeitsgruppe 5, Arbeitsphysiologie und Arbeitspsychologie, in: *Ärztliche Hinweise für den Betrieb*; 3. Folge [13].

⁴⁰ „Mules will be watered whenever possible, men will be permitted to drink only when ordered to by an officer.“, Field Service Regulations, British Army, (India); zit. nach POWER 1967 [302].

Schweißverluste (bei üblicherweise gut akklimatisierten Personen), 2) Aufnahme entsprechend hoher Wassermengen, 3) kein Ersatz der Natriumverluste.

Obwohl der Salzgehalt des Schweißes für hitzeakklimatisierte Personen insgesamt sinkt, steigt er als Funktion der Schweißrate stark an: insofern die Schweißmenge einer gut akklimatisierten Person stark erhöht ist, kann für sie der Natriumverlust deshalb höher sein als bei einer nicht akklimatisierten Person.

Unter Klimabelastung muß der durch Schwitzen bedingte Flüssigkeitsverlust wieder ausgeglichen werden. So berichtet HUNT (1912 [155]), daß Europäer in extrem trockenheißen Wetter in Indien mehr als 13 l Flüssigkeit pro Tag trinken. Ob der Flüssigkeitsausgleich allerdings schon während der Arbeit oder während sportlicher Aktivitäten beginnen soll, wurde in der Vergangenheit unterschiedlich beurteilt. Das Trinkverhalten wird jedoch oft nicht über das Durstgefühl gesteuert, das spät einsetzt und oft nicht ausreicht, sondern durch die Gewohnheiten der betroffenen Personen – hier können durch Anleitung und Anweisungen deutliche Verbesserungen erzielt werden (vgl. Kapitel 2.4.3.2).

JENSEN (1983 [157]) erwähnt, daß Arbeiter in einer Aluminiumschmelze Schweißverluste im Bereich von 4,5 bis 6,8 kg fast exakt durch Nachtrinken während der Schicht ersetzen. GERTNER ET AL. (1984 [103]) berichten, daß Arbeiter in Werkstätten in Israel bei leichter bis mittelschwerer Arbeit, die freien Zugang zu Getränken haben, ihren Wasser- und Elektrolythaushalt ausgleichen, so daß zu Schichtende keine Gewichtsabnahme der Arbeiter festgestellt werden konnte. In eigenen Untersuchungen im Steinkohlenbergbau (KAMPMANN & KALKOWSKY 1999 [189]) ergab sich bei hoher Klimabelastung jedoch eine Dehydratation am Ende der Arbeitsschicht von etwa 2 % der Körpermasse.

Die Vorstellung, daß während einer längeren andauernden Körperarbeit oder einer sportlichen Anstrengung getrunken werden sollte, ist nicht alt (NOAKES 1998 [279]): den Ruderern der Universitätsmannschaft in Oxford wurde 1860 eine maximale Trinkmenge von nur 1,2 l pro Tag erlaubt (an die sich aber nicht alle Ruderer hielten bzw. halten konnten); Marathonläufer erhielten kurz nach 1900 als Ratschlag, vor dem 25. Kilometer nichts zu sich zu nehmen⁴¹. Fünfzig Jahre später war dies immer noch der Stand der Lehrbücher⁴². Eine Abkehr von diesen Ansichten wurde von einer Veröffentlichung von WYNDHAM & STRYDOM 1969 [425] eingeleitet: *The danger of an inadequate water intake during*

⁴¹ SULLIVAN: *Marathon running* (1909): „Don't get into the habit of drinking and eating in a Marathon race; some prominent runners do, but it is not beneficial.“ (zit. nach NOAKES [279])

⁴² PETERS ET AL.: *Modern middle and long distance running* (1957): „... (in the marathon race) there is no need to take any solid food at all and every effort should also be made to do without liquid, as the moment food or drink is taken, the body has to start with its digestion, and in so doing some discomfort will almost invariably be felt.“ (zit. nach NOAKES [279])

marathon running; WYNDHAM und STRYDOM stellten fest, daß Marathonläufer, die mehr als 3 % ihrer Körpermasse an Wasser verloren hatten, nach dem Rennen eine erhöhte Rektaltemperatur hatten; sie schlossen daraus, daß das Ausmaß der Dehydratation der wichtigste Faktor für eine Erhöhung der Rektaltemperatur bei Ausdauerarbeit war und somit die Vermeidung einer Dehydratation der wichtigste Faktor zur Vermeidung von Gesundheitsstörungen wäre. Einige Schlußfolgerungen von WYNDHAM und STRYDOM wurden in der Zwischenzeit in Frage gestellt bzw. erweitert, aber das Interesse an der Rolle von Flüssigkeitsersatz während Körperarbeit und Sport blieb und regte eine Reihe von Forschungsarbeiten an.

Eine Rehydratation durch große Mengen (in der Reaktion auf die Ratschläge von WYNDHAM und STRYDOM [425]) hypotoner Getränke – d.h. Getränken, deren Salzgehalt [und insbesondere der Na^+ -Gehalt] niedriger liegt als im extrazellulären Flüssigkeitsvolumen – kann bei extremen Ausdauerleistungen wie „Ultramarathon“⁴³ zu einer „Wasserintoxikation“ und Salzverlust (*Hyponatriämie*) mit erheblichen Gesundheitsstörungen führen. Die Schlußfolgerung mehrerer Autoren ist die, daß bei dem – notwendigen – Flüssigkeitsersatz darauf geachtet werden muß, daß genug Na^+ in den Getränken enthalten ist. – Diese Erkenntnisse schließen an die oben geschilderten früheren Beobachtungen in der Industrie an, daß freizügiges Trinken während der Hitzearbeit zu Gesundheitsproblemen führen kann, sofern den Getränken nicht ausreichend Salz zugefügt wird. GISOLFI (1994 [107]) referiert über Untersuchungen, die über eine signifikante Erhöhung der Aufnahme einer Glukose- Na^+ -Lösung im Magen-Darm-Trakt gegenüber reinem Wasser berichten, so daß sich ein so zusammengesetztes Getränk zur Rehydratation empfiehlt.

SOHAR & ADAR zeigten 1962 [356], daß auch unter extremen Bedingungen – Hitzebelastung (Märsche durch die Wüste in Israel im Monat August), schwere Körperarbeit sowie unterschiedliche Höhe der Na^+ -Aufnahme – kein Salzverlust in einer der getesteten Gruppen von akklimatisierten Personen beobachtet wurde; sie führen das Problem des Salzverlusts, über das in der Literatur berichtet wird, darauf zurück, daß unakklimatisierte Personen in den ersten Tagen einer Hitzeexposition nicht in der Lage sind, in ausreichendem Maß Salz einzusparen. So empfiehlt die amerikanische Marine den „großzügigen Gebrauch des Salzstreuers bei den Mahlzeiten während der ersten drei Tage einer Akklimatisation (sofern nicht Personen eine salzarme Diät einhalten müssen)“⁴⁴.

Das *American College of Sports Medicine* gab 1996 einen Grundsatz zum Flüssigkeitersatz bei körperlicher Anstrengung (*exercise*) heraus, der helfen soll, Leistungseinbußen und Hitzeerkrankungen zu vermeiden, die durch Dehydratation oder Hyperthermie

⁴³ Fallbeispiele von 4 betroffenen Sportlern beim *Comrades Marathon* 1981 (88 km) bei NOAKES ET AL. [278] 1985; eine Übersicht bei JOHNSON & THOMPSON 1987 [158].

⁴⁴ Zitiert nach COOPER 1997 [52]: „Liberal use of the salt shaker during the first 3 days of acclimatization“ (except for individuals on salt-restricted diets) may be recommended.“

bedingt sind: Bereits etwa zwei Stunden vor Beginn der Körperarbeit sollen etwa 500 ml getrunken werden, um einen ausgeglichenen Zustand der Hydratation herzustellen; die Getränke sollen etwas kühler als die Umgebungstemperatur (15 °C bis 22 °C) und aromatisiert sein, um das Trinken der erforderlichen Mengen zu erleichtern; es wird empfohlen, bei Anstrengungen, die länger als eine Stunde dauern, Kohlenhydrate (30 bis 60 g/h) und Kochsalz (0,6 g/l Na⁺) den Getränken zuzusetzen.

2.3.2.5 Expositionszeit - Arbeitsorganisation

Wenn die Klimabelastung so hoch ist, daß sie nicht während einer ganzen Arbeitsschicht ertragen werden kann, müssen technische Maßnahmen ergriffen werden oder es muß die Arbeitszeit im Klima verkürzt werden.

An technischen Maßnahmen ist eine Ventilation oder Kühlung des Arbeitsplatzes denkbar – so sind im deutschen Steinkohlenbergbau zur Zeit über 250 MW Gesamtkälteleistung installiert (vgl. S. 124), aber an manchen Arbeitsplätzen ist auch nach Ausschöpfung dieser Möglichkeiten die Arbeit nicht über eine ganze Schicht möglich; hier bietet sich eine Verkürzung der Arbeitszeit im Klima an (z.B. KLIMABERGVERORDNUNG [432]) sowie die Einfügung von Pausen im Klima (z.B. WBGT / ISO 7243 [440]) oder auch die Begrenzung der Arbeitszeit (*DLE; Duration Limited Exposure*), etwa in ISO 7933 [443] oder auch für Grubenwehreinsätze unter klimatischer Belastung [437].

Bei entsprechendem technischen Aufwand kann auch eine Kühlung an der hitzeexponierten Person vorgesehen werden, etwa durch Preßluftwesten oder –anzüge (wegen des hohen Luftverbrauchs ist dies nur bei Schlauchversorgung mit Druckluft möglich, was die Beweglichkeit einschränkt) oder Kühlwesten bei Grubenwehreinsätzen [437]. Im Bergbau steht für extreme Klimabelastungen auch ein Kühl- und Atemschutzsystem (KAS) zur Verfügung, das CO₂-Eis zur Kühlung benutzt und über eine Schlauchsystem den gesamten Körper kühlt (BRESSER 1994 [35]), ähnlich wie ein Astronautenanzug. Eine systematische Übersicht über die möglichen Maßnahmen zur Beherrschung ungünstiger Grubenklimate und über Kriterien zur Beurteilung der Wirksamkeit von Kühlkleidung als persönlicher Schutzbekleidung findet man bei GOEDECKE 1984 [109].

Einen Teil der Gefährdung durch hohes Klima vermeiden erfahrene Personen durch die Selbsteinteilung der Arbeitsschwere (vgl. unten Kapitel 2.4.2, *self-pacing*).

2.3.2.6 Körperliche Leistungsfähigkeit

Die körperliche Leistungsfähigkeit einer exponierten Person ist während einer Hitzexposition von großer Bedeutung, weil nicht nur die Versorgung der Muskulatur sichergestellt werden muß, sondern auch durch eine deutlich erhöhte periphere Durchblutung

dafür gesorgt werden muß, daß die notwendige Wärmeabgabe an die Umgebung an der Körperoberfläche stattfinden kann (vgl. Kapitel 2.2.1.1).

Eine erhöhte körperliche Leistungsfähigkeit verkürzt den Zeitraum der Umstellung während der Akklimatisation (vgl. Kapitel 2.3.2.3). In neueren Untersuchungen hat sich herausgestellt, daß unter ABC-Schutzkleidung, wo Schweiß nicht verdampfen kann, weder Hitzeakklimatisation noch Ausdauertraining die Toleranzzeit bis zum Abbruch der Klimaexposition verlängert, weil eine erhöhte Schweißabgabe zu einer Verringerung des Blutplasmavolumens führt, ohne eine Kühlung des Körpers zu bewirken (AOYAGI ET AL. 1994 [11]). Bei Klimaexpositonen in ABC-Schutzkleidung, bei denen kein thermoregulatorisches Gleichgewicht mehr erzielt werden konnte, ergab sich, daß eine zweiwöchige Hitzeakklimatisation in Schutzkleidung die Toleranzzeit bis zum Abbruch der Klimaexposition nicht verlängert, während aerobe Fitneß signifikant zu erhöhten Toleranzzeiten führt (CHEUNG & McLELLAN 1998 [49]).

Die Fragen, ob Übergewicht oder Alter das Risiko einer hitzeexponierten Person, eine Gesundheitsstörung zu erleiden, beeinflussen, sind methodisch schwierig zu bearbeiten, da die körperliche Leistungsfähigkeit oft bei übergewichtigen Personen niedrig ist und meist auch im Alter zurückgeht. Daher wird auf diese Frage in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

2.3.2.7 Alter

Ältere Personen weisen während Hitzewellen eine deutlich erhöhte Mortalität auf (vgl. S. 3); STRYDOM [368] zeigte 1971, daß für ältere Bergarbeiter in fünf südafrikanischen Goldbergwerken ein signifikant erhöhtes Risiko bestand, einen Hitzschlag zu erleiden, als für jüngere Bergleute.

PANDOLF ET AL. 1987 [284] gaben eine Übersicht über verschiedene Untersuchungen; es stellte sich heraus, daß für ältere Personen (46 - 67 Jahre) Körpertemperatur, Hauttemperatur und Herzschlagfrequenz – im Vergleich zu jüngeren Personen (20 – 29 Jahre) sowohl vor als auch nach Hitzeakklimatisation erhöht waren. Weiter wurden bei älteren Hitzeexponierten ein späterer Einsatz der Schweißproduktion und niedrigere Schweißraten beobachtet.

KIELBLOCK 1987 [198] stellt fest, daß in einer Untersuchung mit 809 Probanden im Alter von 18 bis 62 Jahren das Alter *per se* keinen Einfluß auf die Hitzetoleranz der Probanden zeigt und zitiert mehrere Arbeiten mit gleichlautenden Ergebnissen. PANDOLF (1994 [285]) stützt sich in einer Übersicht auf Untersuchungen, in denen unterschiedliche Altersgruppen hinsichtlich aerober Fitneß und morphologischen Größen (Körperoberfläche, Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpermasse und prozentualem Fettanteil an der

Körpermasse) gruppiert wurden: für die einzelnen Gruppen ergab sich nur eine geringe Beeinträchtigung des thermoregulatorischen Systems mit dem Alter.

HAVENITH ET AL. 1995 [131] untersuchten die Reaktion von 56 Probanden (20 bis 73 Jahre alt) in feucht-warmem Klima und erhielten als Ergebnis, daß mit zunehmendem Alter Herzschlagfrequenz und Hautdurchblutung abnehmen, während die thermoregulatorischen Größen (Körperkerntemperatur, Wärmespeicherung im Körper und Schweißrate) keinen signifikanten Einfluß des Alters zeigten und von der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der physischen Aktivität (*physical activity level*) signifikant beeinflusst wurde.

Für 51 Mitglieder der Grubenwehr erhielten BRESSER & KAMPMANN 1997 [36] das Ergebnis, daß die Beanspruchung am Ende einer Standardübung und die Toleranzzeit bei einer Klimaexposition in Flammenschutzkleidung (vgl. Kapitel 5.4) ebenfalls keinen signifikanten Einfluß des Alters zeigt, wobei die körperliche Fitneß aller Untersuchungsteilnehmer durch die arbeitsmedizinische Untersuchung [438] gesichert ist.

2.3.2.8 Übergewicht

Der Einfluß des Körpergewichts auf die Beanspruchung unter klimatischer Belastung wird uneinheitlich eingeschätzt: der *Berufsgenossenschaftliche Grundsatz 30* [433] nennt „ausgeprägte Fettsucht“ als Ausschlußgrund für Hitzearbeit – in der vorhergehenden Fassung wurde ein Broca-Index von 130 % als Grenzwert für Hitzeexponierte genannt, der im BG 26 auch jetzt noch als Grenzwert dient. Andererseits wurde ein starker Einfluß von Übergewicht auf die Beanspruchung unter klimatischer Belastung auch schon bei weit geringeren Werten der Körpermasse oberhalb des Normalgewichts nach Broca beobachtet. Für den Einsatz bei Hitzearbeiten, insbesondere auch in Grubenwehren oder Feuerwehren bei erhöhten Temperaturen, ist die physiologische Auswirkung von Übergewicht im Hinblick auf die Hitzetoleranz ihrer Mitglieder von großer Bedeutung. Als Beispiel für eine strenge Auffassung in der Literatur – im Vergleich zum BG 30 – soll hier die Forderung des Ausschlusses von Arbeitnehmern von Hitzearbeit bei einem Übergewicht von mehr als 5 kg über dem Normalgewicht bei TSCHIRNER [377] angegeben werden.

An empirischen Studien wird meist auf 96 tödliche Hitzschläge Bezug genommen, die SCHICKELE [328] bei Soldaten der U.S. Army analysierte: die Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Hitzschlages war bei einem Übergewicht von 15 kg bereits um den Faktor 10 erhöht. Unklar bleibt, ob das Übergewicht ursächlich thermophysiologisch zu dieser Risikoerhöhung führt, oder ob es ein Indikator für mangelnde körperliche Leistungsfähigkeit und damit auch für verringerte Hitzeverträglichkeit (z.B. GISOLFI & COHEN 1979 [106]) ist. WENZEL ET AL. [411] stellten für einen einzelnen Probanden – nach einem Urlaub und nachfolgender Erkrankung – bei einer Zunahme der Körpermasse von 80,5 kg um

4,4 kg – eine Erhöhung der Herzschlagfrequenz um 30 min^{-1} und der Körperinnentemperatur um $0,7 \text{ °C}$ bei gleicher Klimaexposition fest. Da die vollständige Genesung des Probanden internistisch sichergestellt war – während die körperliche Leistungsfähigkeit vor und nach der Erkrankung nicht erfaßt worden war –, wurde die Beanspruchungserhöhung als Hinweis darauf gedeutet, daß auch ein scheinbar relativ geringes Übergewicht eine erhebliche Bedeutung als Risikofaktor bei Hitzearbeit haben kann. CHUNG & PIN fanden 1996 [50] für Rekruten mit einem *Body Mass Index (BMI)* größer als 27 kg/m^2 ein 3,5-faches Risiko für das Auftreten von Hitzeerkrankungen (218 Soldaten mit Hitzeerkrankungen im Vergleich zu 537 Soldaten ohne Hitzeerkrankung).

In Studien zur Wärmetoleranz sahen HAVENITH und VAN MIDDENDORP [129] für 12 Frauen und 12 Männer keinen Einfluß des Fettanteils der Körpermasse auf die Beanspruchung unter Klimabelastung, wenn gleichzeitig auch die individuelle körperliche Leistungsfähigkeit in der Analyse berücksichtigt wurde. KAMPMANN ET AL. [185] fanden 1996 für 52 Grubenwehrmitglieder ebenfalls keinen Einfluß des Broca-Index auf die Einsatzzeit bei einer Übung mit Flammenschutzkleidung in schwerem Klima.

In einer Längsschnittuntersuchung zur Hitzetoleranz von vier Grubenwehrmitgliedern über vier Jahre (KAMPMANN ET AL. 1996 [184]; mittleres Alter von jeweils 33, 34, 36 und 42 Jahren) konnten bei Schwankungen der Körpermasse um maximal 2,5; 6,1; 3,7 bzw. 8,4 kg (wobei die Körpermasse in keinem Fall nur monoton zu- oder abnahm) für keinen der Probanden ein signifikanter Zusammenhang zwischen der körperlichen Leistungsfähigkeit und der Körpermasse ($p > 0,2$ für alle Probanden) festgestellt werden: alle Probanden waren während dieser Zeit Mitglieder der Grubenwehr und erfüllten so die vorgegebenen Anforderungen an die körperliche Leistungsfähigkeit entsprechend [438]. Während die Werte von Herzschlagfrequenz und Körperinnentemperatur am Ende der untersuchten Klimaexposition individuell stark schwankten, hatte die Körpermasse zwar in einigen Fällen einen tendenziellen Einfluß auf die Beanspruchung, in keinem Fall aber wurde ein 5 % - Signifikanzniveau erreicht.

Aus Feldstudien ist bekannt, daß Hitzearbeiter oft ein erhebliches Übergewicht haben: so stellte FRANK 1970 [87] für 126 Hitzearbeiter in der Stahlindustrie im Alter über 55 Jahren fest, daß 25 % des Untersuchungskollektivs ein Übergewicht von mehr als 20 kg aufwiesen, THIEN [374] erhob 1981 für 225 Arbeiter im Kalibergbau ein mittleres Übergewicht von $(11 \pm 7) \text{ kg}$ (Mittelwert \pm Standardabweichung) und HETTINGER ET AL. [139] gaben 1985 für 493 Hitzearbeiter in der Eisen- und Stahlindustrie einen Broca-Index von $(112 \pm 14) \%$ an. In einer Studie zur Beanspruchung von Bergleuten an heißen Arbeitsplätzen (KAMPMANN & KALKOWSKY 1999 [189] siehe Kapitel 6.1) liegt das Körpergewicht im Mittel nach dem Broca-Index bei $(111 \pm 12) \%$ und der *BMI* bei $(27,1 \pm 3,1) \text{ kg/m}^2$: für Rekruten mit $\text{BMI} > 27 \text{ kg/m}^2$ hatten CHUNG & PIN (1996 [50], s.o.) für Soldaten ein um den Faktor 3,5 höheres Risiko für Hitzeerkrankungen ermittelt. Dieses Ergebnis weist darauf hin, daß Übergewicht *an sich* vermutlich kein erhöhtes Risiko für Hitzeerkrankungen darstellt, so weit es nicht gleichzeitig ein Indikator für mangelnde Fitness ist. Zur

Beurteilung dieser Frage ist weiterhin wichtig zu berücksichtigen, daß die Kollektive der langjährigen Hitzearbeiter zum einen arbeitsmedizinisch überwacht werden und zum anderen als selbstselektiertes Kollektiv zu betrachten sind: diejenigen, die die Arbeit langfristig nicht ausüben können, wechseln gewöhnlich an einen anderen Arbeitsplatz.

2.4 Die Auswirkungen von Hitzebelastung

In Kapitel 1 wurden verschiedene Auswirkungen des Klimas auf das Befinden und den Gesundheitszustand des Menschen sowie weitergehende Einflüsse des Klimas auf Mensch und Gesellschaft angeführt. Im folgenden sollen akute Auswirkungen einer Hitzebelastung auf Menschen erläutert werden.

2.4.1 Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit

Unter Hitzebelastung gehen eine Reihe von Fähigkeiten des Menschen zurück, insbesondere die Fähigkeit zu körperlicher Arbeit, weil alle metabolisch erzeugte Wärme wieder an die Umgebung abgegeben werden muß. Dieser Rückgang der Arbeitsfähigkeit unter Hitzebelastung ist einleuchtend und durch Untersuchungen gut dokumentiert.

Nach WYNDHAM ET AL. (1959) [417] nimmt der Energieumsatz von Bergleuten ab $BET = 25\text{ °C}$ ab und fällt – weil die Arbeitsleistung mit zunehmendem Klima abnimmt – bis $BET = 33\text{ °C}$ um etwa $1/3$. Während bei 25 °C Effektivtemperatur eine strengere Aufsicht eine um etwa 10% erhöhte Arbeitsleistung – im Vergleich zu einer unbeaufsichtigten Gruppe von Bergleuten – zur Folge hat, unterscheidet sich die Arbeitsleistung von drei Gruppen mit unterschiedlich strenger Aufsicht bei 33 °C nicht mehr: hier ist offenbar eine Grenze der Beanspruchung erreicht, bei der eine externale Motivation keine Erhöhung der Arbeitsleistung mehr bewirken kann.

COOKE ET AL. (1961) geben die Anzahl von Wagen an, die bei unterschiedlich strenger Aufsicht und unterschiedlichen Temperaturen von Bergleuten gefüllt werden: unter strenger Aufsicht werden bei $t_w \leq 30\text{ °C}$ etwa ein Drittel mehr Wagen mit Gestein pro Stunde gefüllt als ohne Aufsicht. Oberhalb dieser Temperatur ist eine Einbuße der Leistungsfähigkeit festzustellen und bei $t_w = 35\text{ °C}$ ist die Arbeitsleistung auf die Hälfte zurückgegangen und die beiden Gruppen unterscheiden sich in ihrer Arbeitsleistung nicht mehr signifikant. Bei Feuchttemperaturen oberhalb von $t_w = 30\text{ °C}$ und strenger Aufsicht kann die Körpertemperatur auf Werte oberhalb von 39 °C ansteigen, was als zu hoch angesehen wird.

MISAQI (1977) berichtet von einem Rückgang der Arbeitsleistung für zwei Tätigkeiten: *Beladen von Grubenwagen* und *Gesteins-Bohrarbeiten* auf 50% bei 33 °C bzw. 36 °C Umgebungstemperatur und auf etwa 25% bei 35 °C bzw. 37 °C .

Arbeiten, die Geschicklichkeit, Aufmerksamkeit, Reaktionsvermögen und Motivation erfordern, können in einem mittleren Temperaturbereich am besten ausgeführt werden. Hierzu gibt es eine Anzahl von Untersuchungen. Eine Übersicht, auch über Modelle zur Erklärung, geben ENANDER & HYGGE 1990 [75] und RAMSEY 1995 [305]. Der Grenzbereich, ab dem Leistungseinbußen zu erwarten sind, kann für geübte und motivierte Personen verschoben sein.

RUTENFRANZ ET AL. finden 1971 [320] bei einer psychomotorischen Aufgabe (Kompensationstracking) einen Rückgang in der Leistungsfähigkeit einer Versuchsperson erst oberhalb $BET = 34\text{ °C}$, obwohl sich bei dieser Klimabelastung kein thermoregulatorisches Gleichgewicht mehr einstellt und die Herzschlagfrequenz sich bereits um $20\text{ min}^{-1}/\text{h}$ erhöht. WENZEL & ILMARINEN zeigten 1977 [407], daß sich die Herzschlagfrequenz während der Durchführung einer solchen Tracking-Aufgabe durch einen Probanden im thermisch neutralen Bereich um etwa 10 min^{-1} , unter schwerer Klimabelastung aber um bis zu 30 min^{-1} erhöht (vgl. auch Kapitel 4.8).

HANCOCK 1982 [120] hält die Geübtheit einer Person (*performer skill level*) für denjenigen Einflußfaktor, der einen Leistungsabfall unter Klimaexposition möglicherweise am stärksten vermindert (z.B. MACKWORTH 1946 [235]). Bei Tests ohne Körperarbeit kann er Leistungseinbußen bei Zweifach-Aufgaben – bei denen die stärkste Auswirkung des Klimas vorliegt – bereits ab $BET = 29,5\text{ °C}$ (85 °F) nachweisen; ab dieser Klimabelastung findet sich auch ein klimabedingter Anstieg der Körpertemperatur.

Entsprechend der erhöhten Leistungsfähigkeit für komplexe Aufgaben in einem mittleren Temperaturbereich ist auch die Unfallhäufigkeit für mittlere Temperaturen minimal (VERNON & BEDFORD 1927). RAMSEY ET AL. (1983) beobachten bei $WBGT = 20\text{ °C}$ eine minimale Rate von „Beinaheunfällen“ (*unsafe behaviors*) in verschiedenen Industriezweigen; diese Rate nimmt sowohl zu höheren als auch zu tieferen Temperaturen hin zu.

HANCOCK & VASMATZIDIS [121] geben 1998 eine umfangreiche Analyse der Arbeitssituation im Klima: in hochmechanisierten Arbeitssystemen ist es das Ziel, die Arbeit effizient und fehlerfrei durchzuführen. Während die Arbeit in der Schwerindustrie immer entsprechend der physiologischen Änderungen, die sie bewirkt, bewertet werden konnte⁴⁵, gewinnen heutzutage immer stärker kognitive Leistungen innerhalb der industriellen Arbeit Bedeutung. HANCOCK & VASMATZIDIS werfen daher die Frage auf, ob es heute noch sinnvoll ist, sich auf die Einhaltung von Grenzwerten zu beschränken, die durch die Erhöhung physiologischer Größen markiert sind, wenn kognitive, mentale und motorische Fähigkeiten schon bei geringerer Klimabelastung Einbußen erleiden und somit

⁴⁵ „...the currency of heavy industry was physiological response.“ [121]. Zu diesem Thema siehe auch: HERGT, G.: *Die Marginalisierung der schweren körperlichen Arbeit im modernen Produktionsprozeß. Ein Essay zur geistigen Situation des Reviers* (1985) [136].

Arbeitsicherheit und Produktivität sowohl des einzelnen Arbeitnehmers, als auch des Gesamtsystems beeinträchtigt sind.

2.4.2 Selbsteinteilung der Arbeitsschwere (*self-pacing*)

In Laborversuchen läßt sich zeigen, daß der Mensch seine Leistung entsprechend Vorgaben gezielt einteilen (ULMER 1976 [379], Korrelationskoeffizient $r = 0,99$) und andererseits auch – bei vorgegebener Belastung – seine Beanspruchung gut einschätzen kann (ULMER 1978 [380], $r = 0,99$), wobei Erwachsene – im Gegensatz zu Kindern – keinen Lerneffekt zeigen, d.h. vermutlich aufgrund überwiegend unbewußter Gewöhnung nicht erst üben müssen.

HASSE beobachtete 1935 [126] im Bergbau, „... daß ungefähr 50 % der Arbeitszeit mit leichten Arbeiten und Pausen zugebracht werden, die teils durch den Arbeitswechsel, teils durch die Arbeit als solche (Betriebsstörungen u. dgl.) bedingt sind. Er [der Bergmann, d.A.] braucht zur Ausführung seines Tagespensums gar nicht dauernd 100 % seiner Leistungsfähigkeit einzusetzen. Sinkt diese also, so kann sie trotzdem noch zur Ausfüllung der vollen Schichtarbeit genügen. Erst wenn die Leistungsfähigkeit beträchtlich abfällt, reichen die natürlichen Pausen nicht mehr aus, es tritt eine Diskrepanz zwischen Leistungsfähigkeit und Arbeitspensum ein. Um diese erfolgreich bekämpfen zu können, muß die Arbeitsmenge entsprechend herabgesetzt werden oder was dem gleichbedeutend ist, die Arbeitszeit verkürzt werden.“ Es standen den Bergleuten also genügend Reservezeiten für eine Selbsteinteilung der Arbeitsschwere zur Verfügung und mit der fortschreitenden Mechanisierung wird sich der Anteil dieser Reservezeiten – in Bezug auf schwere körperliche Arbeit – bis heute eher vergrößert haben.

Fast allen Personen ist es möglich, ihre Beanspruchung bis zu etwa 45 % ihrer maximalen Leistungsfähigkeit entsprechend ihrem Beanspruchungsempfinden einzustellen⁴⁶. Diese Selbsteinteilung der Arbeitsschwere konnte für schwere Arbeit (Gepäckmärsche) bei 45 % der maximalen aeroben Leistungsfähigkeit dokumentiert werden (EVANS ET AL. 1980 [78]): weder für Männer noch für Frauen unterschieden sich die Herzschlagfrequenz oder der relative Energieumsatz (als Prozentsatz der maximalen aeroben Leistungsfähigkeit) signifikant auf vier Geländestrecken ohne Gepäck bzw. mit 10 kg oder 20 kg Last, wenn das Marschtempo selbst gewählt werden konnte. Bei sehr schwerem Gepäck – bis über 50 % des Körpergewichts – blieb der Energieumsatz unabhängig vom Gelände, wenn das Tempo frei gewählt werden konnte, während die Last den Energieumsatz mit beeinflusste (GOLDMAN 1965 [110]).

MAIRIAUX & MALCHAIRE [237] zeigten (1985) am Beispiel von Arbeitern, die einen Glühofen in der Glasindustrie reinigten und Reparaturarbeiten ausführten, den Einfluß einer

⁴⁶ R. F. GOLDMAN, persönliche Mitteilung.

Selbst-Einteilung von Arbeits- und Pausenzeiten. Im Ofenbereich war überall $WBGT \geq 34 \text{ °C}$ und $t_g \geq 65 \text{ °C}$. Die Einteilung des Arbeit- und Pausenregimes unterschied sich zwischen den Arbeitern und für die einzelnen Arbeiter in verschiedenen Schichten ebenfalls. Die Dauer der Arbeitsphasen korrelierte am stärksten ($r = 0,63$) mit der körperlichen Leistungsfähigkeit der Arbeiter, nicht dagegen mit der Herzschlagfrequenz am Ende der Arbeitsperiode, was von VOGT ET AL. (1983) bei Laboruntersuchungen beobachtet worden war. Das Verhältnis von Arbeits- zu Pausenzeit betrug im Mittel 25 %; bei sechs von sieben Arbeitern blieben Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur bei diesem Pausenregime unterhalb angemessener Grenzwerte.

LAVENNE (1967) betont [213], daß die Bergleute eine wichtige Komponente der Wärmebilanz selbst regeln können: die Arbeitsschwere. So sank in der tiefsten belgischen Schachanlage vor Einführung einer Kühlanlage die Produktion in den Sommermonaten um etwa 25 %. Die oben zitierten Arbeiten ([51], [426]) zeigen den Einfluß der Aufsicht – die einer externalen Motivation entspricht – auf die Produktivität bei manueller Arbeit.

GERTNER ET AL. (1984) [105] stellen fest, daß bei Arbeitern in Werkstätten (Metallarbeiten, Achtstundenschicht) die Herzschlagfrequenz während mindestens 50 % der Schichtzeit zwischen 80 und 100 min^{-1} liegt, wobei in Beer Sheva (tägliches Temperaturmaximum im Sommer: 38 °C; im Winter: 25 °C) die registrierten Herzschlagfrequenzen im Winter höher als im Sommer lagen, trotz leistungsabhängigen Lohns. In Sdom (tägliches Temperaturmaximum im Sommer: 44 °C; im Winter: 26 °C) unterschieden sich die Herzschlagfrequenzen der Arbeiter – bei hohen Löhnen, wodurch eine entsprechende Motivation für höhere Produktivität weniger ausgeprägt war – überraschenderweise sommers und winters nicht. Bei dringenden Wartungsarbeiten im Freien arbeiteten Mitarbeiter einer anderen Abteilung in Sdom im Sommer für längere Anteile ihrer Arbeitsschicht bei Herzschlagfrequenzen oberhalb von 150 min^{-1} . Die Autoren schließen daraus, daß Personen bei körperlicher Arbeit (*physical workers*) dazu tendieren, ihre Herzschlagfrequenz auf Kosten der Arbeitsleistung und -produktivität zu regeln.

RAMSEY (1986) [304] gibt an, daß, wenn es Bergleuten möglich ist, ihr eigenes Arbeitstempo zu bestimmen, sie ihre Arbeitsintensität so begrenzen, daß ihre Körperkerntemperatur unterhalb von 37,6 °C (oral gemessen) bleibt – trotz Bezahlung nach Arbeitsleistung. RAMSEY fand für 15 Bergleute bei mittleren Lufttemperaturen von $(26,5 \pm 1,5) \text{ °C}$ und im Mittel um 1 °C geringeren Feuchttemperaturen maximale Anstiege der Oraltemperatur von 1,8 °C, eine maximale Herzschlagfrequenz von 173 min^{-1} und einen maximalen Verlust an Körpermasse während der Schicht von 2,8 %.

Auch zum Einfluß von Motivation und Aufmerksamkeit gibt es Untersuchungen: Beim Betrachten der Montagefehler bei monotoner Arbeit am Fließband bei der Automontage (WARMUTH (1991) [394]) ergibt sich als Parameter mit dem größten Einfluß die hohe Hallentemperatur vor mehreren anderen betrachteten Einflußgrößen; Spitzenwer-

te der Temperatur liegen im Hochsommer zwischen 26... 31 °C (bei 45... 65 % relativer Feuchte); bei einem Anstieg der Hallentemperatur von 24 °C auf 27 °C wurde eine um 73 % erhöhte Zahl von Montagefehlern ermittelt. – Dagegen kann bei hoher Konzentration eine Hitzebelastung für geraume Zeit kompensiert werden: so können etwa Piloten für zwei Stunden die Hitzebelastung während Mehrfach-Aufgaben kompensieren, obwohl ein erhöhtes Gefühl von Anstrengung sowie thermischer Diskomfort vorliegt (BRADLEY & HIGENBOTTAM (1998) [33], $t_a = 40$ °C; RH = 60 % und $t_a = 42$ °C, RH = 57 %).

2.4.3 Physiologische Auswirkungen von Hitzebelastung

2.4.3.1 Prescriptive Zone

Wenn – vom Komfortbereich aus betrachtet – die Klimabelastung langsam erhöht wird, ist der Körper zunächst in der Lage, die Klimabelastung mithilfe der autonomen Thermoregulation zu kompensieren. NIESEN [275] stellte 1938 fest, daß bei Untersuchungsreihen mit unterschiedlicher Arbeitsschwere und Klimabelastung die Körpertemperatur nur von der Arbeitsschwere abhing, während die Klimabedingungen keinen Einfluß hatten. LIND [224] erhielt 1963 bei Versuchsreihen mit einer größeren Spanne der Klimabelastung für geringere Klimabelastungen das gleiche Ergebnis: bei niedriger Klimabelastung hing die Körpertemperatur seiner Probanden zunächst nur von der Arbeitsschwere ab; bei immer weiter zunehmender Klimabelastung stieg dann schließlich die Körpertemperatur des Probanden immer stärker an (Abb. 4). Den Bereich, in dem das Umgebungsklima noch keinen Einfluß auf die Körpertemperatur hatte (d.h. in dem die Probanden im Hinblick auf das Umgebungsklima homiotherm blieben), nannte LIND *prescriptive zone*. Er schlug vor, diesen Bereich als unbedenklich für Arbeit im Klima zu betrachten, da ja das Klima keinen Einfluß auf die Körpertemperatur hatte. Die Ausdehnung dieses Bereichs hing von der Arbeitsschwere ab: je höher die Arbeitsschwere war, bei desto niedrigerer Klimabelastung endete die *prescriptive zone*. Die Obergrenze der *prescriptive zone* (Upper Limit of the Prescriptive Zone, ULPZ) schätzte LIND für die unterschiedlichen Arbeitsschweren mit $BET = 30,2$ °C, $27,4$ °C und $26,9$ °C ab.

Bei der höchsten Arbeitsschwere lag die Körpertemperatur im Bereich der *prescriptive zone* bei etwa $t_{re} = 38$ °C. Eine Expertengruppe der WHO nahm 1969 LINDs Argumentation in ihren Bericht auf [439]: in dieser Weise fand dieser Wert als höchste zulässige Körpertemperatur bei schwerer Arbeit ($t_{re} = 38$ °C) Aufnahme in die WHO-Vorschläge⁴⁷ und

⁴⁷ "In any case, it is considered inadvisable for the deep body temperature to exceed 38 °C for prolonged daily exposures in heavy work; the levels of deep body temperature that should not be exceeded for lower rates of work are indicated in Fig. 3 [entspricht hier Abb. 4, d. A.]" [439]

daraus – in den Vereinigten Staaten über die NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) (1972 [277]) – in die Normung des WBGT-Index ISO 7243 [440] (z.B. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) 1996 [2]).

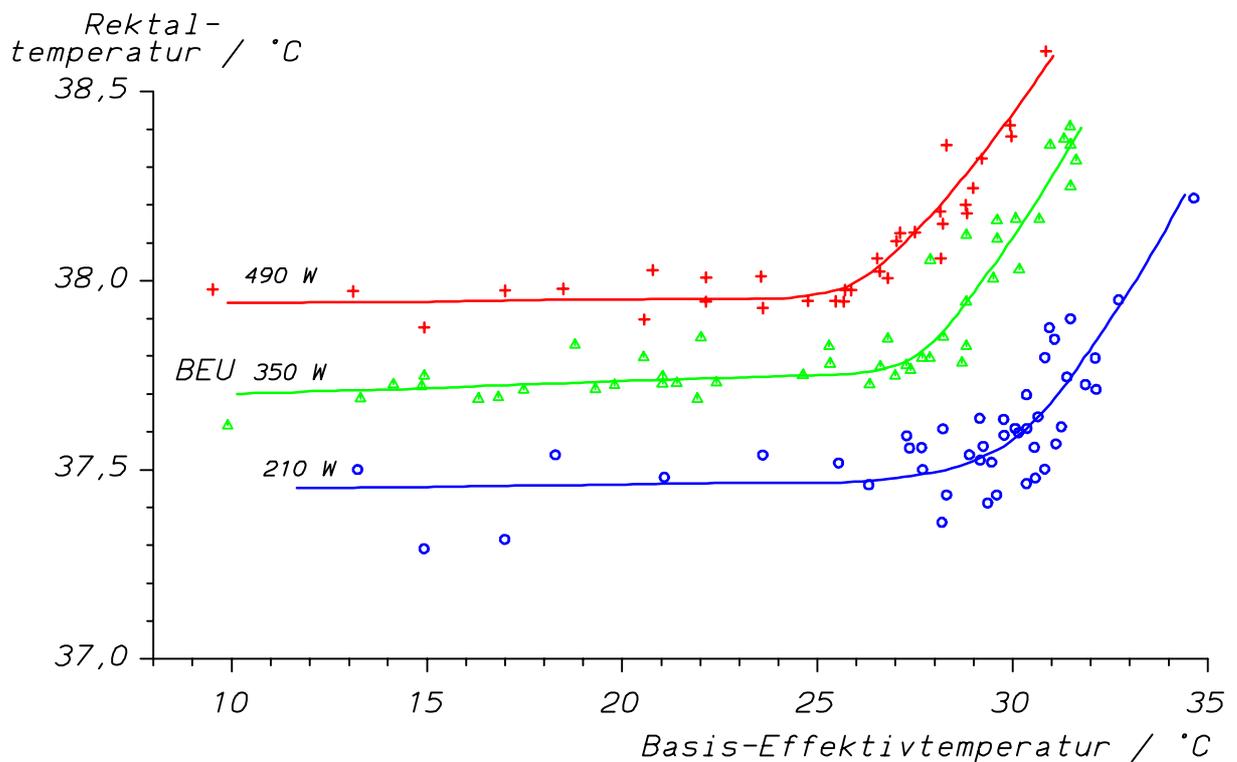


Abb. 4: Abhängigkeit der Rektaltemperatur von der Klimabelastung im Laborversuch. Nach LIND [224] (ein Proband, 60 bis 90 Minuten Expositionszeit); vgl. auch Abb. 11 unten.

Die Grenzen dieses Bereichs lassen sich bei vorgegebener Arbeitsschwere in Abhängigkeit z.B. von der Jahreszeit oder einer beruflichen Hitzegewöhnung überprüfen: KUHLEMEIER ([208] 1977) untersuchte Gruppen von Arbeitern aus Industriezweigen mit heißen, neutralen und kalten Arbeitsplätzen sowohl im Sommer als auch im Winter, um die obere Grenze der *prescriptive zone* festzustellen. Der Grad der Hitzegewöhnung verschob die Obergrenze der *prescriptive zone* zu höheren Temperaturen hin: für die Gruppe aus den heißen Betrieben erstreckte sich bei mittlerer und hoher Arbeitsschwere die *ULPZ* deutlich zu höheren Temperaturen hin. Der Einfluß der Jahreszeiten auf diese Grenze war jedoch höher als die Zugehörigkeit zu den verschiedenen Gruppen; hieraus schließt KUHLEMEIER, daß die täglichen Aktivitäten in der Sommerzeit einen größeren Einfluß auf die Akklimatisation seiner Probanden haben als die Arbeit in den heißen Betrieben.

BRICKNELL [37] benutzte das Konzept der *ULPZ* 1997, um Klimagrenzen für Gepäckmärsche (*Combat Fitness Test*; Marsch über 12,8 km in zwei Stunden mit 18 kg Ausrüstung) festzulegen: es ergab sich eine Grenze von $WBGT = 25\text{ °C}$, wenn ein klimabedingter Anstieg der Körpertemperatur von $0,6\text{ °C}$ (95 % Vertrauensbereich $0,2\text{ °C}$ bis $1,0\text{ °C}$) nicht überschritten werden sollte.

2.4.3.2 Dehydratation

Es ist einleuchtend, daß im Verlauf einer langfristigen Hitzeexposition die Flüssigkeitsverluste des Körpers ausgeglichen werden müssen, um eine völlige Austrocknung zu verhindern. Allerdings dauert es nach einer Dehydratation eine geraume Zeit, bis die Wasserverluste des Körpers vollständig ersetzt sind.

HUNT beobachtete 1912, daß erst 16 Stunden nach einer längeren Hitzeexposition der Körper wieder in einen normal rehydratierten Zustand gelangt; er führt dies darauf zurück, daß während der Hitzeexposition Wasser aus Vorräten in Muskeln und Haut genommen wird, das anschließend nur langsam wieder diesen Vorräten zurückgeführt werden kann. VERNON & WARNER beschrieben 1932, daß nur 56 % des Schweißverlustes nach einer Klimaexposition im Labor ersetzt wurde, wenn das Trinken von Wasser freigestellt war; dieser Prozentsatz wurde von ADOLPH & DILL 1938 bei Untersuchungen in der Wüste bestätigt. PITTS ET AL. fanden 1944, daß bei sechsstündiger Arbeit in heißem Klima ($t_a = 37,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $RH \approx 40 \%$) die Körpertemperatur eines Mannes ohne Wasserzugabe deutlich stärker anstieg als bei einer Trinkmöglichkeit *ad libitum*, daß jedoch die Körpertemperatur noch weniger anstieg, wenn die Menge des Schweißverlustes durch die Getränkemenge ausgeglichen wurde. ADOLPH ET AL. prägten 1947 [4] den Begriff der "freiwilligen Dehydratation" (*voluntary dehydration*): bei hohen Schweißraten ($> 600 \text{ g/h}$) findet erst nach großen Verlusten von Körperflüssigkeit ein Nachtrinken statt; wenn das Trinkwasser nicht wohlschmeckend sondern salzig oder warm ist, ist das Nachtrinken weiter eingeschränkt; Durst wird erst ab 2 bis 5 % Wasserverlust (bezogen auf das Körpergewicht) empfunden; Wasserverluste werden während Mahlzeiten ausgeglichen; ohne Essen wird das Nachtrinken eingeschränkt und umgekehrt (zit. nach GREENLEAF 1992 [114]). SZLYK ET AL. 1989 [370] und BATES ET AL. 1996 [23] bestätigten die Grenze für Wasserverluste, ab der Durst empfunden wird, bei 2 % der Körpermasse.

In Veröffentlichungen wurden in den letzten Jahren deutliche Auswirkungen der Dehydratation auf das Leistungsvermögen im Hitzeklima beschrieben: Auswirkungen der Dehydratation wurden ab 1 % Wasserverlust, bezogen auf die Körpermasse, von EKBLOM ET AL. 1970 [66] berichtet: in der *prescriptive zone* (vgl. Kapitel 2.4.3.1) wird bei 62 % der maximalen physischen Leistungsfähigkeit ein Anstieg der Körpertemperatur beobachtet, der um 0,3 bis 0,4 °C höher ist als für euhydratierte Personen, bei denen der Flüssigkeitsverlust genau ersetzt wurde. STRYDOM & HOLDSWORTH fanden 1968 [367] für zunehmende Dehydratation in den Stufen "Euhydratation", "Trinken *ad libitum*", "3-5 % Flüssigkeitsdefizit" und "5-8 % Flüssigkeitsdefizit" einen monotonen Anstieg der Körpertemperatur um insgesamt rund 0,7 °C und einen Anstieg der Herzschlagfrequenz um insgesamt gut 20 min^{-1} ; die Schweißrate nahm mit zunehmender Dehydratation ab. SAWKA (1988 [325]) referiert Anstiege der Körperinnentemperatur zwischen 0,1 °C und 0,4 °C für jedes Prozent Abnahme der Körpermasse durch Dehydratation; eine Übersicht über die Auswirkung von Dehydratation auf eine Reihe von physiologi-

schen Parametern geben COYLE & MONTAIN 1993 [56]. MONTAIN ET AL. 1998 [259] erhielten für neun Probanden einen Anstieg der Rektaltemperatur von 0,12 °C pro 1 % Flüssigkeitsverlust bezogen auf die Körpermasse, bis hin zu einer Dehydratation von 5 %.

PICHAN ET AL. [288] beschreiben 1988 bei einer Dehydratation von 1 %, 2 % und 3 % der Körpermasse eine Abnahme der PWC_{180} von 6 %, 8 % und 20 % in feucht-heißen Klimabedingungen. SAWKA ET AL. (1996 [326]) geben eine Literaturübersicht zur Auswirkung der Dehydratation; für die körperliche Leistungsfähigkeit wurden bei einer Dehydratation von 2 % bzw. 4 % Abnahmen der $\dot{V}O_{2\max}$ um 10 % bzw. 27 % und im Fall der PWC (physical work capacity) um 22 % bzw. 48 % beobachtet; mit zunehmender Dehydratation nimmt bei gleicher Rektaltemperatur die Schweißproduktion ab und die Schweißproduktion setzt auch erst bei höheren Körperkerntemperaturen ein. CANDAS ET AL. [44] beschreiben 1986, daß eine Dehydratation von 3 % eine hypertone Hypovolämie des Blutplasmas bewirkt, die mit einer erhöhten Herzschlagfrequenz und eine abgesenkten Einsatzschwelle der Schweißproduktion einhergeht.

Als nach 1980 der Fastenmonat Ramadan – der nach dem Mondkalender festgelegt wird – in den Sommer wanderte, waren nach SCHMAHL ET AL. ((1990) [330] und (1997) [331]) angestiegene Unfallraten bei moslemischen Arbeitnehmern in Deutschland, die die Fastenvorschriften – während des Tages weder zu essen noch zu trinken – einhielten, zu beobachten; die Unfälle fanden vorwiegend nachmittags statt.

Da durch eine Euhdratation die Leistungsfähigkeit bei der Arbeit im Hitzeklima gegenüber dem Trinken *ad libitum* verbessert wird, ergab sich die Frage, ob Hyperhydratation nicht vielleicht zu weiteren Vorteilen führt: KRISTAL-BONEH ET AL. zeigten 1995 [207], daß die Zeit, die benötigt wurde, um 15 km auf dem Fahrradergometer bei freigewählter Geschwindigkeit (im komfortablen Klima: $t_a \approx 21$ °C; $RH \approx 50$ %) zu fahren, für partiell dehydratierte Probanden um 7,5 % signifikant zunahm, während Probanden, die während einer Woche ihre Trinkmengen verdoppelt hatten (*forced water intake; chronic water loading* von 1840 g/d auf 4003 g/d), ihre Fahrtzeit um 10 % signifikant verkürzten. Während eines Hitzetoleranztests ließ sich sowohl durch eine Akklimatisationsphase als auch durch forciertes Trinken die Expositionszeit im Klima – bis zum Erreichen von Grenzwerten der Herzschlagfrequenz und der Körpertemperatur – signifikant erhöhen. SAWKA ET AL. geben 1996 [326] eine Übersicht über eine Reihe von Studien, die die Auswirkung von Hyperhydratation beschreiben: bei Trinkmengen zwischen 1 l und 2 l Flüssigkeit vor Beginn einer Körperarbeit wurde in fast allen Arbeiten eine Absenkung der Körperkerntemperatur (bis zu 0,8 °C) beobachtet; in allen Studien war die Herzschlagfrequenz erniedrigt und in drei von sieben Studien wurde eine erhöhte Schweißrate beobachtet.

Für die “freiwillige Dehydratation“ – die von einigen Autoren auch *involuntary dehydration* genannt wird, weil sie ja nicht beabsichtigt ist, sondern insbesondere bei körperlicher Arbeit im Klima das mangelnde Nachtrinken aufgrund des unzureichenden

Durstgefühls widerspiegelt – gibt es einige Erklärungsansätze. BERLYNE ET AL. [27] schlagen 1976 als Erklärung vor, daß der „Durstmechanismus“ als Teil der Umstellungen während der Akklimatisation versagt; hierauf weisen die hohen Werte der Urin-Osmolalität hin, die von den Autoren gemessen wurden: so hatten beispielsweise die Mitarbeiter eines Hospitals bei durchschnittlichem Sommerwetter eine Urin-Osmolalität von (1028 ± 310) mosmol/kg; einen solchen Wert hätten die Autoren für Personen in England nach 24 Stunden Wasserentzug erwartet. – KIELBLOCK stellt 1987 ebenfalls fest [199], daß die Wasseraufnahme *ad libitum* signifikant niedriger als der Flüssigkeitsverlust bei Hitzearbeit ist; er hält jedoch die Fähigkeit akklimatisierter Personen, ihren Flüssigkeitsbedarf abzuschätzen, für ausreichend, zum einen, weil die Erhöhungen der Rektaltemperaturen bei Wasseraufnahme *ad libitum* sich gegenüber „Nachtrinken unter Aufsicht“ (*forced hydration*) nicht signifikant unterscheiden, und zum anderen die Gefahr einer zu hohen Wasseraufnahme (*water intoxication*, NOAKES ET AL. [278], JOHNSON & THOMPSON [158]) vermieden wird. – Eine detaillierte Erklärung der zugrundeliegenden Mechanismen wird von GREENLEAF & MORIMOTO 1996 [115] versucht.

Um dehydrierte Personen zum Nachtrinken von Wasser zu motivieren, wurde untersucht, bei welcher Wassertemperatur nach einer standardisierten Belastung am meisten getrunken wurde; BOULZE ET AL. [32] erhielten 1982 sowohl für das Trinken nach Körperarbeit (Bergtour) als auch nach einer Klimaexposition eine maximale Wasseraufnahme bei 15 °C (bei Wassertemperaturen von 0 °C bis 50 °C in Stufen von 5 °C; gemessen wurde die schnell – in 10-15 Sekunden – getrunkene Wassermenge nach der Belastung), obwohl die Bewertung der Temperatur des Trinkwassers durch die Probanden als „indifferent“ bei 20 °C zu „angenehm“ bei 10 °C und 0 °C anstieg. SZLYK ET AL. stellten 1989 Probanden bei Laufbandarbeit im Klima Wasser von 15 °C und 40 °C jeweils nicht-aromatisiert und aromatisiert zur Verfügung. Während einer sechsstündigen Klimaexposition war der Verbrauch an kaltem Trinkwasser gegenüber warmem Trinkwasser signifikant erhöht und führte zu drastischen Verringerungen des Verlustes an Körperflüssigkeit; von der aromatisierten warmen Trinkflüssigkeit wurde signifikant mehr getrunken als von der nicht-aromatisierten Trinkflüssigkeit. Die Autoren sehen sowohl Kühlung von Getränken als auch die Verwendung aromatisierter Trinkflüssigkeiten als Mittel an, das Ausmaß der „freiwilligen Dehydratation“ zu vermindern.

Eine Übersicht und Vorschläge zum Ersatz nicht nur von Wasser und Elektrolyten sondern auch von Kohlenhydraten während schwerer Arbeit bzw. Hitzearbeit finden sich z.B. bei COYLE & MONTAIN 1992 [55], MILLARD-STAFFORD 1992 [252] und beim ACSM 1996 [1]. Empfehlungen zum Flüssigkeitsausgleich bei Mannschaftssportarten geben BURKE & HAWLEY 1997 [41]; für intermittierende Körperarbeit – etwa beim Sport – erstellen SHI & GISOLFI Regeln zum Ersatz von Kohlenhydraten und Flüssigkeit (1998 [351]).

2.4.4 Beschreibung von Einflußgrößen auf die Gesundheit unter Hitzebelastung

Eine schematische Einteilung der gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch Hitzeeinwirkung wurde von vielen Autoren vorgeschlagen; in Kapitel 2.4.5. wird die Klassifizierung von PIEKARSKI 1982 [291] wiedergegeben. Da hier kein Anspruch auf eine vollständige Literaturübersicht erhoben werden kann, werden im folgenden jeweils beispielhaft einige Literaturstellen angegeben, um aufzuzeigen, welche Fragestellungen in der Forschung bearbeitet wurden.

Ein mehr praktischer Zugang, etwa als allgemeine Anleitung zur ersten Hilfe, findet sich bei:

MURPHY (1973): *Heat illness*, COOPER & VEALE (1983): *The Elderly and their Risk of Heat Illness*; CALLAHAM (1988): *Heat illness*, SCOTT (1989): *Heat-related illnesses. When are they a true emergency?* oder ARMSTRONG (1994): *Considerations for Replacement Beverages: Fluid-Electrolyte Balance and Heat Illness*.

Vorschläge zur Prävention bei militärischen Einsätzen:

ELLIS (1947): *Effects of a Tropical Climate on Men in Warships*, RENBOURN (1959): *Physiological Problems of the Soldier in Tropical Warfare*, ADAM (1967): *Military Problems of Air-Transport and Tropical Service*, MILLER (1982): *Scientific and military aspects of heat stress, acclimatization, and heat illness: Literature review and introduction of laboratory experiment*.

oder auch für zivile Arbeitseinsätze sowie touristische Tropenreisende finden sich bei:

ELLIS ET AL. (1954): *The upper tolerable levels of warmth for acclimatized European men working in the tropics*, LEITHEAD ET AL. (1958): *Incidence, Aetiology, and Prevention of Heat Illness on Ships in the Persian Gulf*, BOROFFKA (1968): *Vorbeugung seelischer Erkrankungen bei Europäern in den Tropen*, RUDLOFF & JUNGSMANN (1968): *Wärmebelastung des Tropenreisenden*, HAAS (1968): *Untersuchungen über die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen in einem tropischen Klima*, HAAS (1968): *Arbeitsmedizin und Arbeitsphysiologie in den Tropen*, HAAS (1970): *Untersuchungen über die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen und seine Bruttoenergieumsätze bei industriellen und traditionellen Arbeiten in einem tropischen Klima*, VON HALLER (1972): *Gesundheitsbüchlein für die Tropen. Ratschläge zur hygienischen Lebensweise und zur Verhütung von Krankheiten und gesundheitlichen Schäden in den warmen Ländern*, FRANZEN (1978): *Medizinische Aspekte der Arbeit in tropischen Ländern*, JOHNSON & MERULLO (1993): *Subjective Reports of Heat Illness*, PIEKARSKI ET AL. (1993): *Gesundheitsgefahren durch Hitzeeinwirkung* sowie PIEKARSKI ET AL. (1994): *Gesundheitsgefahren in warmen Wettern*.

wobei auch nachgehende Beobachtungen und Untersuchungen in Betracht gezogen werden:

MOHR (1968): *Beobachtungen bei Rückkehrern aus tropischen Ländern*, CARROLL BERNADETTE ET AL. (1993): *Post-tropical screening: how useful is it?*

sowie auch die besonderen Probleme von Kindern unter klimatischer Belastung Beachtung fanden:

MACKINNON (1920): *European children in the tropical highlands*, PIEKARSKI ET AL. (1986): *Heat-stress Reactions of the Growing Child*. Eine Übersicht gibt etwa FALK (1998): *Effects of Thermal Stress During Rest and Exercise in the Paediatric Population*.

Speziell die Klimabelastung bei Ausdauersportarten wird betrachtet von:

MURPHY (1984): *Heat illness in the athlete*, SQUIRE (1990): *Heat Illness. Fluid and Electrolyte issues for Pediatric and Adolescent Athletes* oder FRANCIS ET AL. (1991): *Heat Illness in Football Players in Alabama*.

Ein mehr systematisch orientierter Zugang findet sich bei:

WEINER & HORNE (1958): *A Classification of Heat Illness. A Memorandum Prepared for the Climatic Physiology Committee of the Medical Research Council*, KING & BARRY (1962): *The physiological adaptations to heat-stress with a classification of heat illness and a description of the features of heat exhaustion*, DONOHO & RYLANDER (1966): *Physiology, treatment and prevention of heat illness*; KNOCHEL (1974): *Environmental heat illness. An eclectic review*, ELLIS (1976): *Heat illness. I. Epidemiology*, ders. (1976): *Heat illness. II. Pathogenesis*, ders. (1976): *Heat illness. III. Acclimatization*, sowie HUBBARD & ARMSTRONG (1988): *The heat illnesses: Biochemical, ultrastructural and fluid-electrolyte considerations*.

Eine Frage von Bedeutung für die Vorbeugung von Gesundheitsstörungen bei oder nach Klimaeinwirkung ist, inwieweit die Hitzetoleranz im Anschluß an eine akute Hitzeerkrankung oder an andere Erkrankungen herabgesetzt, bzw. die Thermoregulation beeinflusst ist:

LINDHOLM ET AL. (1992): *The heat tolerance after an acute heat illness – A follow up study among military conscripts*.

nach vorhergegangenen Herzinfarkt:

KEREN ET AL. (1981): *Temporary heat intolerance in a heatstroke patient*, ARMSTRONG ET AL. (1990): *Evaluation of a temperate-environment test of heat tolerance in prior heatstroke patients and controls* und SHAPIRO ET AL. (1979): *Heat intolerance in former heatstroke patients*.

bei vorliegenden Erkrankungen:

Etwa: SCOTT ET AL. (1987): *Diabetes mellitus and thermoregulation*, EPSTEIN ET AL. (1980): *Thyroid functions in heat-intolerant persons*.

oder auch nach Medikamenteneinnahme:

(FUHRMAN (1963): *Modification of the action of drugs by heat*, FURMAN (1966): *Effects of Heat on Drug Action in Man*, GOLDSMITH ET AL. (1967): *Effects of drugs on heat acclimatization by controlled hyperthermia*, LOMAX (1983): *Drug-Induced Changes in the Thermoregulatory System* und ders. (1987): *Implications of drugs for heat and exercise tolerance*, GORDON (1985): *Effect of selective and nonselective beta-adrenoceptor blockade on thermoregulation during prolonged exercise in heat*, FREUND ET AL. (1987): *Thermoregulation during prolonged exercise in heat: alterations with beta-adrenergic blockade*. BERLYNE ET AL. (1974): *The effect of β -adrenoceptor blockade on body temperature and plasma renin activity in heat-exposed man*, GORDON ET AL. (1985): *Effect of beta-adrenoceptor blockade on thermoregulation during prolonged exercise*, MACK ET AL. (1986): *Influence of beta-adrenergic blockade on the control of sweating in humans*, KENNEY (1994): *Effects of selective α -adrenergic blockade on control of human skin blood flow during exercise*, MITTLEMAN ET AL. (1992): *Influence of angiotensin blockade during exercise in the heat in normotensive males and females*.

sowie bei oder nach Drogen- oder Alkoholkonsum:

Neben älteren allgemeineren Betrachtungen (FIEBIG (1901): *Über den Einfluss des Alkohols auf den Europäer in den Tropen*) finden sich neue detaillierte Untersuchungen über die Auswirkung von Alkoholkonsum auf einzelne Aspekte innerhalb der Thermoregulation (obwohl

die Untersuchungen zum Einfluß des Alkohols bei kalten Umgebungsbedingungen überwiegen) wie bei ALLISON & REGER (1992): *Thermoregulatory, cardiovascular, and psychophysical response to alcohol in men in 40 °C water*, WHITE ET AL. (1994): *Orthostatic intolerance during 63° head-up tilt following hot bath immersion is longer after ethanol ingestion*, BOISVERT ET AL. (1994): *Acute effect of alcohol on thermal sensation and perceived exertion during exercise in a warm environment in man* und SAINI ET AL. (1995): *Influence of alcohol on the hydromineral hormone responses to exercise in a warm environment*.

2.4.5 Klinische Einteilung von Gesundheitsstörungen durch Hitzeeinwirkung

Als vorherrschende Frühzeichen von Gesundheitsstörungen durch Hitzeeinwirkung werden Verwirrungszustände angesehen (CARTER & CAMMERMEYER 1988 [46]), die zur Unfähigkeit der betroffenen Personen führen, ihren Gesundheitszustand richtig einzuschätzen und so z.B. zur Verweigerung medizinischer Behandlung führen können.

In diesem Abschnitt wird eine kurze systematische Aufzählung von akuten Gesundheitsstörungen durch Hitzeeinwirkung gegeben (PIEKARSKI 1982 [291]):

Lokale Überwärmung kann zu

- *Verbrühungen, Verbrennungen* sowie zu
- *Sonnenbrand* führen.

An Hautveränderungen werden unter chronischer Hitzeeinwirkung beobachtet:

- *Erythema caloricum pigmentosum et reticulatum* und
- *Miliaria rubra*

Bei langandauernder intensiver Einwirkung von Wärmestrahlung können Augenschäden (*Feuerstar, Glasbläserstar, Schmiedestar*) auftreten.

Gesundheitsstörungen durch generalisierte Überwärmung sind in Tabelle 1 zusammengestellt (PIEKARSKI 1982 [291]).

Die WHO klassifiziert in der 10. Auflage des ICD-Schlüssels eine Reihe von hitzebedingten Gesundheitsstörungen:

T67 Schäden durch Hitze und Sonnenlicht:

- T67.0 *Hitzschlag und Sonnenstich*
- T67.1 *Hitzekollaps*
- T67.2 *Hitzekrampf*
- T67.3 *Hitzeerschöpfung durch Wasserverlust*
- T67.4 *Hitzeerschöpfung durch Salzverlust*
- T67.5 *Hitzeerschöpfung ohne nähere Angaben*
- T67.6 *Passagere Hitzeermüdung*
- T67.7 *Hitzeödem*

T67.8 Sonstige Schäden durch Hitze und Sonnenlicht.

T67.9 Schäden durch Hitze und Sonnenlicht, nicht näher bezeichnet sowie

L55 *Dermatitis solaris. Sonnenbrand* und

L74.0 *Miliaria rubra.*

Tabelle 1: Krankheitsbilder bei generalisierter Überwärmung (PIEKARSKI 1982 [291]).

Krankheit	Ätiologie	Klinische Symptome	Rektaltemperatur	Hauttemperatur	Elektrolyte	Organmanifestation	Spätfolgen	Therapie
Hitzekollaps	Kreislaufinsuffizienz	Schwindel, Übelkeit, Ohnmacht	Leicht erhöht	Normal	Normal	-	-	Lagerung in kühler Umgebung, Kreislaufkontrolle
Sonnenstich	Lokale zerebrale Insolation	Schwindel, Übelkeit, Flimmerskotom, Kollaps, evtl. Nackensteife, Meningismus Krämpfe	Normal bis leicht erhöht	Normal	Normal	Gefahr des Hirnödems	Selten neurologische Defekte	Lagerung in kühler Umgebung, Kreislaufkontrolle, Hirnödemprophylaxe, evtl. Sedierung, Antikonvulsiva
Hitzschlag	Wärmestau, Insuffizienz der Entwärmung, zentrales Kreislaufversagen	Kollaps bei plötzlicher (!) Anhidrose, Schwindel, Übelkeit, evtl Krämpfe, erst rotes später blasses Hautkolorit, protrazierter Schock	Stark erhöht	Heiß im Schock, später kühler	Na ↑ K ↓ später K ↑	Nierenversagen Lebernekrosen, Rhabdomyolysen, Myokardnekrosen, Hämolyse, Gerinnungsstörung, ZNS-Schäden	Multiple Organdefekte, psychische Alterationen	Abkühlung (!!), intensivmedizinische Überwachung, Elektrolytbilanzierung Volumenbilanz, Gerinnungsstatus, Schockbehandlung antikonvulsive Maßnahmen
Salzverarmung	Salzverluste, besonders des Nichtaklimatisierten mit dem Schweiß	Reizbarkeit, Mattigkeit, Kollaps, Muskelkrämpfe	Normal bis leicht erhöht	Normal	Na ↓	-	-	Orale Gabe von kochsalzreicher Flüssigkeit (Brühe, Ringertee), evtl. parenterale Substitution
Dehydratation	Ungenügende Wassereinfuhr bei gesteigertem Wasserverlust	Aktivitätsminderung, Delirium, Koma	Erhöht	Normal / warm	Normal, später Na ↑ K ↑	Nierenversagen	Selten	Volumenersatz, Kreislaufkontrolle, Elektrolytkontrolle

2.4.6 Langfristige Auswirkungen von Hitzebelastung

Eine mögliche Auswirkung langfristiger Hitzeexposition ist die Bildung von Harnsteinen. Aus Israel ist eine Reihe von Untersuchungen bekannt, in denen die Inzidenz von Nierensteinen untersucht wurde: FRANK et al. (1959 [89]) berichten über eine erhebliche Erhöhung der Inzidenz von Harnsteinen bei Wehrpflichtigen in Israel (4 ‰ im Alter von 18 bis 27 Jahren) verglichen mit Wehrpflichtigen der U.S.A. (0,14 ‰ im Alter von 18 bis 30 Jahren und 0,4 ‰ in Florida, das als Verbreitungsgebiet von Harnsteinen (*stonebelt*) gilt). Innerhalb Israels ergeben sich in verschiedenen Siedlungen Unterschiede der Inzidenz von Harnsteinen von 1,6 ‰ bis 34 ‰; bezüglich der Herkunft der Patienten stellte sich heraus, daß die Einwanderer aus Europa die höchste und die in Israel geborenen Bewohner der Siedlungen die niedrigste Inzidenz aufwiesen. Als Erklärung wird eine zu geringe Flüssigkeitsaufnahme vorgeschlagen: im Tal des Jordan, wo die Temperatur 47 °C erreichen kann, muß ein Arbeiter in der Landwirtschaft bis zu 15 Liter Flüssigkeit trinken, um einen Liter Urin ausscheiden zu können. Ein wichtiger Grund für die unzureichende Flüssigkeitsaufnahme scheinen die Gewohnheiten der Einwanderer zu sein: die meisten Einwanderer haben vor der Einwanderung im Handel gearbeitet und haben ihre Flüssigkeitsaufnahme nicht an die Erfordernisse ihrer neuen Berufe – mit großen körperlichen Anforderungen – in Israel angepaßt. – Möglicherweise spielt noch die Härte des verfügbaren Trinkwassers – mit hohen Magnesium- und Kalziumanteilen – eine Rolle bei der Häufigkeit der Steinbildung, obwohl dies nicht nachgewiesen werden konnte. Auch FRANK ET AL. (1961 [90]) sehen die Trinkgewohnheiten der Bevölkerung als Hauptursache der unterschiedlichen Häufigkeiten von Harnsteinen. Ein Erziehungsprogramm, in dem die Siedler der neuen Siedlung Arad darauf hingewiesen wurden, die tägliche Urinmenge durch hohe Trinkmengen größer als 1200 ml zu halten, zeigte insofern Erfolg, als einerseits im Verlauf mehrerer Jahre die täglich ausgeschiedenen Urinmengen zunahmten und andererseits die Inzidenz von Nierensteinen deutlich niedriger lag als in der benachbarten älteren Siedlung Beersheba (FRANK ET AL. 1966 [91]). DE VRIES ET AL. (1968 [393]) finden in Israel keinen Zusammenhang der Prävalenz von Nierensteinen mit der Zusammensetzung des Trinkwassers, und erklären die hohe Prävalenz von Nierensteinen in Israel durch unzureichende Flüssigkeitsaufnahme, die eine geringe Ausscheidungsmenge von hoch konzentriertem Urin zur Folge hat. BERLYNE ET AL. (1976 [27]) vermuten ein Versagen des Durstmechanismus als Teil der Hitzegewöhnung als Ursache für die geringen Trinkmengen: obwohl Personen freien Zugang zu Trinkwasser haben ist ihre Urinosmolalität nahe den maximal möglichen Werten.

PIN ET AL. (1992 [300]) berichten, daß die Prävalenz von Harnsteinen bei Arbeitern im Freien (*outdoor workers*) fünfmal höher lag als bei anderen Arbeitskräften (*indoor workers*). Arbeiter im Freien mit geringer Arbeitsschwere (*quarry drivers*) haben keine erhöhte Prävalenz von Steinleiden. Die Autoren folgern, daß chronische Dehydratation der wichtigste Risikofaktor für die Harnsteinbildung ist und eine Erhöhung der Trinkwassermenge als Prävention betrachtet werden kann.

FRANK ET AL. (1975 [88]) berichten aus einem Stahl- und Walzwerk, daß bei 650 untersuchten Hitzarbeitern 1,22 % Steinpatienten, in einem Vergleichskollektiv von 484 Personen dagegen 3,67 % Steinpatienten gefunden wurden. Dieses Ergebnis weist darauf hin, daß Hitzarbeit an sich zunächst kein Risikofaktor für Steinleiden ist und unterstützt die Beobachtungen aus Israel. – Bei 90 Hitzarbeitern, bei denen der Harn untersucht wurde, lag die Trinkmenge während der Schicht zwischen 1 und 6 Litern, im Mittel bei 2,3 Litern.

SCHWARZ hat 1959 [342] den Verlauf einer Grippeepidemie 1957 im Ruhrgebiet verfolgt und die Erkrankungszahlen nach verschiedenen Kriterien aufgeschlüsselt. Unter anderem lag der Prozentsatz der täglich durch die Grippe ausgefallenen Schichten in Schachtanlagen mit vorwiegend heißen Betriebspunkten nur bei etwa 30 bis 50 % desjenigen Prozentsatzes von Schachtanlagen mit überwiegend kühlen Betriebspunkten. SCHWARZ führt dies darauf zurück, daß in Bergwerken mit warmen Betriebspunkten die Bergleute meist im Streb (und damit im Gedinge, d.h. Akkord) arbeiten und somit nach seiner Einschätzung dort höhere Körpertemperaturen vorliegen. Er stützt die Hypothese, daß eine erhöhte Körpertemperatur zu einer niedrigeren Anfälligkeit gegenüber einer Grippevirusinfektion führt, durch Beobachtungen während anderer Grippeepidemien im Ruhrgebiet und an anderen heißen Industriearbeitsplätzen. – Es stellt sich die Frage, ob eine erhöhte Körpertemperatur (siehe z.B. im folgenden Abb. 77) einem Fieber entspricht und entsprechend einen günstigen Einfluß auf den Verlauf eines grippalen Infekts hat (vgl. z.B. KLUGER ET AL. 1975 [203]; für wechselwarme Spezies ist die protektive Wirkung eines Fiebers nachgewiesen, für den Menschen wird die Frage kontrovers diskutiert). Eine weitere Hypothese soll hier im Zusammenhang mit der erhöhten Körpertemperatur der Bergleute kurz vorgestellt werden:

Während reine Quarzstäube von der *International Agency for Research of Cancer* als krebserregend eingestuft werden, ergibt sich – gestützt durch zahlreiche Studien – kein erhöhtes Risiko für Krebs oder Lungenkrebs bei Steinkohlenbergleuten (MORFELD & PIEKARSKI 1998 [260]); zur Erklärung werden Selektionsmechanismen innerhalb der Studien (*survivor*-Selektion, besondere medizinische Kontrolle bezüglich nicht-maligner Erkrankungen der Atmungsorgane im Rahmen der arbeitsmedizinischen Untersuchungen) und grundlegende methodologische Probleme der Auswertung solcher Studien (Betrachtung der Pneumokoniose als konfundierende und zugleich intermediäre Variable; MORFELD ET AL. 1999 [261]) herangezogen. – VON ARDENNE entwickelte ab 1959 ein Konzept zur Krebsbekämpfung durch Hyperthermie – zum aktuellen Stand von regionaler (40 °C - 44 °C) und Ganzkörperhyperthermie (40 °C - 41,8 °C) siehe z.B. WENDTNER ET AL. 1999 [397]. – Abb. 77 zeigt, daß die Körpertemperaturen der von uns in [189] untersuchten Bergleute verhältnismäßig hoch sind: der Mittelwert der beobachteten maximalen Körpertemperatur liegt für alle Schichten bei $(38,27 \pm 0,34)$ °C, aber auch die Mittelwerte über die gesamte Schicht ((415 ± 19) Minuten) liegen in 13 von 112 hierzu

auswertbaren Schichten oberhalb von 38,0 °C. Für die Arbeitszeit vor Ort von (258 ± 40) Minuten liegt die mittlere Körpertemperatur bei (37,79 ± 0,32) °C; der Mittelwert der Rektaltemperatur in der Zeit vor Ort liegt in 31 von 110 auswertbaren Schichten oberhalb von 38,0 °C. Obwohl diese Werte der Körpertemperatur weit unterhalb der Werte liegen, die in der Hyperthermie therapeutisch eingesetzt werden, haben die Bergleute während ihrer Arbeit über viele Stunden eine Körpertemperatur, die weit höher liegt als bei anderen Arbeitnehmern – die Möglichkeit, daß diese Erhöhung der Körpertemperatur zu einer Senkung der Krebsmortalität beiträgt, sollte als Hypothese in Betracht gezogen werden.

Bei langjährigem Aufenthalt in den Tropen wurde zu Kolonialzeiten bei Europäern ein Symptomkomplex beobachtet, der als *tropical fatigue* bezeichnet wurde. Nach ELLIS 1953 [68]⁴⁸ ist diese „Tropenmüdigkeit“ aber nicht nur durch Hitze, sondern auch durch Trägheit, Monotonie, Isolation, Alkohol, landestypische Probleme, Insekten und kulturelle Entbehrungen mit verursacht.

2.5 Bewertung von Hitzeeinwirkung durch Klimasummenmaße

Die physiologische Auswirkung einer klimatischen Belastung auf einen arbeitenden Menschen ist nicht einfach zu bewerten: wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, bestimmt das Zusammenspiel aller Klimagrößen sowie der inneren Wärmeproduktion, der Bekleidung, der Dehydratation und der Akklimatisation die Wärmebilanz.

Wenn das komplizierte Einwirken dieser Größen auf den Wärmetransport innerhalb der Wärmebilanz zu einfach angenähert wird, oder Vorschriften sich auf einzelne Klimagrößen beziehen, die genau eingehalten werden müssen, sind leicht falsche Konsequenzen die Folge. So schreibt HASSE 1935 [126] zur Temperaturgrenze von $t_a = 28$ °C, oberhalb derer nach dem allgemeinen preußischen Bergbaugesetz § 93c die Arbeitszeit verkürzt wurde: „In der Praxis hatte sich eine Zeitlang das Verfahren eingebürgert, in heißen Gruben die Luft zu befeuchten, um die Temperatur um einige Grade herabzudrücken. Vielfach gelang es durch dieses Mittel, die Temperaturgrenze von 28 °C zu unterschreiten. Sowohl den Bergarbeitern als den beaufsichtigenden Beamten war es klar, daß hierdurch zwar den Gesetzen der Bergpolizei genüge getan war, ohne daß sich aber die klimatischen Verhältnisse gebessert hätten. Statt der hohen Temperaturen resultierte eine drückend schwere Luft, deren Temperatur zwar unter 28 °C lag, die aber die Arbeitsfähigkeit infolge der hohen Luftfeuchtigkeit nicht verbesserte, die Ermüdbarkeit nicht verminderte.“

⁴⁸ ... determined by the heat 'plus inertia, plus monotony, plus isolation, plus alcohol, plus domestic stress, plus insects, plus cultural deficiencies.'

So hängt beispielsweise die Körpertemperatur eben nicht nur von der Lufttemperatur ab, sondern auch von der Luftfeuchtigkeit (siehe nachfolgend Abb. 13 und Abb. 11 oben) und von weiteren Einflußgrößen. Daher versucht man seit langem, den Einfluß aller Parameter summarisch in „Klimasummenmaßen“ oder Klimaindizes zusammenzufassen, damit man zur Klimabewertung mit einer einzigen Zahl auskommt. Da dieses Vorhaben aber nicht leicht durchzuführen ist und verschiedene Möglichkeiten bestehen, an das Problem heranzugehen, gibt es eine ganze Anzahl von Klimaindizes.

„Die Zahl der vorgeschlagenen Indizes zur Bewertung von Hitzebelastung ist Legion.“ – Diese Feststellung trifft LEE 1975 [215] in einem Übersichtsartikel, und in der Zwischenzeit sind noch viele weitere Vorschläge für Klimasummenmaße ausgearbeitet worden.

Grundsätzlich kann man fünf unterschiedliche Zugänge zur Bewertung von Hitzebelastung unterscheiden:

- die Ermittlung von Meßwerten durch speziell entwickelte Meßgeräte, wie trockenes bzw. feuchtes Katathermometer (z.B. PARSONS 1993 [286]) oder das *Feuchtkugelgerät der Wetterwirtschaftsstelle* der WBK in Bochum [227]; eine Übersicht über weitere spezielle Meßgeräte gibt EISSING 1995 [65], Tab. 3), deren Anzeige entweder direkt zur Klimabewertung verwendet wird oder in weitere Klimasummenmaße eingeht. Heute wird von diesen speziellen Meßgrößen noch die natürliche und die psychrometrische Feuchttemperatur t_{nw} und t_w sowie die Globetemperatur t_g verwendet⁴⁹.
- die subjektive Bewertung des Klimas durch Probanden; realisiert z.B. in der Effektivtemperatur (YAGLOU 1927 [428]): Probanden (in Körperruhe) vergleichen zwei Klimabedingungen, die in zwei Klimakammern dargestellt werden; in einer Klimakammer ist immer Wasserdampfsättigung der Luft ohne Luftbewegung eingestellt. Gleich bewertete Klimate haben die gleiche „Effektivtemperatur“. Yaglou hat Nomogramme für zwei Bekleidungsarten (mit freiem Oberkörper: Basis-Effektivtemperatur (BET) und „normal“ bekleidet: Normal-Effektivtemperatur (NET)) angegeben. Obwohl YAGLOU Untersuchungen durchgeführt hat, nach denen die Nomogramme auch im

⁴⁹ Die Feuchttemperatur ist die Temperatur eines Thermometers, dessen Kuppe (bzw. temperaturempfindlicher Bereich) mit einem Baumwollgewebe überzogen ist; das Gewebe wird befeuchtet und die Temperatur des Thermometers gibt dann Auskunft über die mögliche Abkühlung eines nassen Gegenstandes in der untersuchten Atmosphäre. Man kann die Temperatur des „feuchten“ Thermometers strahlungsgeschützt und zwangsventiliert bestimmen (Assmannsches Psychrometer; *psychrometrische Feuchttemperatur* t_w für die Bestimmung von BET und NET) oder als *natürliche Feuchttemperatur* t_{nw} bei derjenigen Wärmestrahlung und Windgeschwindigkeit, die am Ort der Messung herrscht; sie wird zur Ermittlung des WBGT-Index gebraucht. Die *Globetemperatur* t_g ist die Temperatur einer geschwärzten Kupferhohlkugel von 6" \approx 15,1 cm Durchmesser und zeigt einen Meßwert an, der sich entsprechend der Lufttemperatur, der Wärmestrahlung und der Windgeschwindigkeit einstellt; die Globetemperatur wird für die Berechnung des WBGT-Index benötigt.

Fall von Körperarbeit anwendbar seien, bemängelt HASSE 1935 [126] zu Recht das Fehlen eines Diagramms speziell für Schwerarbeit, da die metabolische Wärmeproduktion bei Körperarbeit zu einer Veränderung der Bewertung der Klimabelastung führen muß. – Die Basis-Effektivtemperatur hat sich bis heute zur Festlegung von Einsatzgrenzen im englischen und deutschen Steinkohlenbergbau bewährt. – Da heutzutage oft eine rechnergestützte Ermittlung der Klimasummenmaße der Ablesung aus den Nomogrammen vorgezogen wird, wurden mehrere Verfahren zur Ermittlung von *BET* (z.B. VOSS [391], MÜLLER & GEBHARDT [266]) und *NET* (z.B. MÜLLER & GEBHARDT [266]) durch Rechenprogramme vorgeschlagen.

- die Verrechnung der physikalischen Klimaparameter zu einer Summengröße; z.B. - im *WBGT-Index* (YAGLOU & MINARD 1957 [429]; ACGIH [2]; ISO 7243 [440]):

innerhalb von Gebäuden oder im Freien ohne direkte Sonneneinstrahlung:

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nw} + 0,3 \cdot t_g \quad \text{bzw.}$$

außerhalb von Gebäuden bei Einwirkung von Sonneneinstrahlung:

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nw} + 0,2 \cdot t_g + 0,1 \cdot t_a \quad ,$$

wobei je nach Arbeitsschwere unterschiedliche Grenzwerte des *WBGT-Index* – etwa in ISO 7243 – angegeben werden

- oder im *Oxford-Index* (auch *Wet-Dry-* oder *WD-Index*; LIND ET AL. 1957 [223]), der zur Bewertung von extremen Klimabelastungen im feucht-warmen Bereich verwendet wird, wie beispielsweise für Einsätze der Grubenwehr (BRESSER & FUNKEMEYER 1990 [34]):

$$WD = 0,85 \cdot t_w + 0,15 \cdot t_a \quad .$$

- die Ermittlung von Kombinationen der Klimaparameter, die physiologisch die gleiche Wirkung hervorrufen; etwa: gleiche Schweißraten (*Predicted four Hour Sweat Rate (P4SR)* von McARDLE ET AL. 1947 [247]) oder gleich hohe Herzschlagfrequenzen (z.B. WENZEL 1978 [408]) oder Körpertemperaturen (z.B. WENZEL ET AL. 1989 [412]) und
- die Berechnung der Energiebilanz des Menschen unter Klimabelastung (z.B. ISO 7933 (1989) [443]; eine Erläuterung von Problemen, die bei der Erstellung dieses Modells der Wärmebilanz über die Berechnung der *erforderlichen Schweißrate* SW_{req} und bei der Bewertung von Klimabelastungen auftreten finden sich u.a. in KAMPMANN & PIEKARSKI 1995 [182] und 2000 [190]).

Diese Klimasummenmaße haben nun alle sowohl Vor- als auch Nachteile: die Effektivtemperaturen, die aufgrund subjektiver Skalierung durch Probanden erhoben wurden, verwenden sozusagen den Probanden als Bewertungsinstrument, der alle subjektiven Eindrücke der Klimaexposition in seine Bewertung zusammenfaßt; dies erklärt möglicherweise, daß diese Indizes sich seit 1927 bewährt haben und auch heute noch im Bergbau – unter feucht-warmen Klimabedingungen – in Großbritannien und Deutschland verwendet werden. Die Effektivtemperaturen berücksichtigen jedoch weder Ar-

beitsschwere noch Hitzegewöhnung von Probanden und haben im trocken-heißen Klimabereich eine starke Mißweisung, weshalb beispielsweise die Klimabergverordnung [432] die *BET* zu Recht nur im feucht-warmen Bereich anwendet.

Die Verrechnung von Klimaparametern (*WBGT* und *WD-Index*) ist in der Anwendung sehr einfach; der Index berücksichtigt jedoch die in Kapitel 2.2 vorgestellten physiologischen Mechanismen der Thermoregulation nicht. In ISO 7243 [440] werden jedoch unterschiedliche Arbeitsschwere und die Hitzeakklimatisation für die Ermittlung von Grenzwerten für die Hitzearbeit in die Bewertung einbezogen.

Die analytische Berechnung der Wärmebilanz des arbeitenden Menschen (z.B. in ISO 7933 (1989) [443]) würde den Königsweg der Klimabewertung darstellen: Körpergröße, Gewicht, das Verhältnis von Körperoberfläche zu Körpermasse, die körperliche Leistungsfähigkeit, die Hitzegewöhnung oder das Geschlecht der klimaexponierten Personen könnten bei den analytischen Indizes in die Wärmebilanz einbezogen werden, wenn nur ausreichend verlässliche Daten vorhanden wären. Dies betrifft zum einen die Gleichungen für den Wärmeübergang (z.B. den konvektiven Wärmeaustausch bei laminarer oder turbulenter Anströmung einer so komplizierten geometrischen Form, wie sie der Mensch darstellt, oder auch die Verdampfungseffizienz des gebildeten Schweißes, der ja im feucht-warmen Klimabereich oft nicht vollständig verdampft sondern abtropft), die Kenngrößen des thermoregulatorischen Systems (z.B. die lokale Schweißproduktion als Funktion lokaler und zentraler Körpertemperatur sowie als Funktion der Hydratation des Körpers, Abhängigkeit der Herzschlagfrequenz von der Körpertemperatur: „thermische Sensitivität“ usw.) und der zulässigen Grenzwerte (maximale Herzschlagfrequenz, Körperkerntemperatur, Dehydratation), die ebenfalls nicht ganz einfach festzulegen sind (vgl. etwa Kapitel 9.4). – Ein großes Problem bei der Sammlung entsprechender physiologischer Daten ist die wechselseitige Abhängigkeit der Einflußgrößen, wie z.B. der Wärmeisolation der Bekleidung von der Windgeschwindigkeit, von der Bewegung der betrachteten Person (*pumping effect*) – d.h. letztlich vom Energieumsatz – und von der Schweißrate (Kältebrücken bei durchnässter Bekleidung), vgl. Kapitel 2.3.2.2.

Bei der Beurteilung von Klimabelastungen ist große Umsicht erforderlich: es darf nicht nur ein einzelner Parameter oder ein einzelnes Klimasummenmaß betrachtet werden; letztlich muß ein beaufsichtigter und/oder physiologisch-meßtechnisch begleiteter Arbeitsversuch die Möglichkeit der Arbeit in einem vorgegebenen Klima abklären. – Beispiele für eine extreme Fehlbeurteilung einer Klimabelastung durch ISO 7933 (1989) für zusammengesetzte Klimaexpositionen, die durch Inkonsistenzen im Modell der Wärmebilanz verursacht werden, sind in KAMPMANN & PIEKARSKI (2000 [190]) angegeben.

3 Laborversuche und Felduntersuchungen: welche Beiträge für das Verständnis der Thermoregulation können sie liefern?

In Laborversuchen können die einzelnen Bedingungen einer Klimaexposition sehr genau vorgegeben und auch gemessen werden. Durch die Meßumstände und durch die Art der vorgegebenen Belastungsgrößen (z.B. Laufen auf einem Laufbandergometer oder Fahren auf einem Fahrradergometer mit konstanter Tretfrequenz) ist allerdings meist keine gute Vergleichbarkeit mit der Arbeitswelt mehr gegeben.

Andererseits kann man auf diese Weise sehr gut Einsicht in Mechanismen der Thermoregulation gewinnen und systematische Fragenstellungen untersuchen. Hierzu zählen etwa die Einflüsse zentraler und/oder lokaler Steuergrößen auf die Thermoregulation (z.B. HEISING & WERNER (1985) [134]⁵⁰ oder HEISING (1989) [135]⁵¹), die im Labor systematisch variiert werden können, oder auch der Einfluß einzelner Einflußgrößen: Akklimatisation (siehe unten Kapitel 4.5), Windgeschwindigkeit (siehe z.B. im nachfolgenden Kapitel 4.6) oder auch der Tagesrhythmik – jeweils bei Ausschaltung der Variation der nicht untersuchten Größen – auf die Beanspruchungsgrößen. Durch die Vorgabe der Arbeitsschwere kann z.B. eine wichtige Möglichkeit von Verhaltensregulation ausgeschaltet werden, was die Zusammenhänge zwischen Belastungs- und Beanspruchungsgrößen klarer hervortreten läßt.

Eine Annäherung an die Arbeitswelt stellt die Untersuchung von Modellarbeit dar: hierzu werden einzelne Arbeitsvorgänge unter standardisierten Bedingungen, wie etwa vorgegebener Arbeitsgeschwindigkeit (z.B. Schaufeln von Sand bei verschiedenen Takt-raten des Schaufelns (WYNDHAM ET AL. [421]) oder simulierte Rettungsarbeiten in einem „Übungshaus“ durch Feuerwehr oder Grubenwehr (BRESSER & KAMPMANN [36])), durchgeführt. Diese Vorgehensweise erlaubt den Einsatz aufwendiger Labormesstechnik, der im Feldversuch aus verschiedenen Gründen nicht immer möglich ist: Abmessungen der technischen Geräte für die Meßauswertung, Umgebungsbedingungen (Schmutz, Feuchtigkeit, Explosionsgefahr) erhöhte Gefährdung z.B. von Feuerwehrleuten im Einsatz, wo die Meßausrüstung eine Zusatzbelastung darstellen sowie Untersuchungspersonal (was evtl. ebenfalls gefährdet wäre) stören würde. Bei sehr hoher Belastung kann die Modellarbeit so organisiert werden, daß die Untersuchung jederzeit – sowohl vom Probanden, als auch von den Untersuchern – abgebrochen werden kann (etwa in einem Übungshaus der Grubenwehr), was – etwa während eines Feuerwehreinsatzes – nicht unbedingt

⁵⁰ Unterschiedliche Aufheizung von Körperstamm und Extremitäten.

⁵¹ Bestimmung der lokalen Schweißrate in Versuchen in Kälte mit Wärmebelastung eines Beines und umgekehrt; Versuche mit einseitiger Kältebelastung eines Beines oder unterschiedlicher Belastung beider Beine / eines Armes und eines Beins in Ruhe oder bei Körperarbeit.

möglich ist (z.B. muß ein verrauchter Raum voller toxischer Gase erst verlassen werden, bevor das Atemschutzgerät abgenommen werden kann).

Im Feldversuch bestehen meist eingeschränkte Möglichkeiten für Messungen, wenn die Arbeit der Probanden nicht beeinträchtigt werden soll; selbst die Protokollführung kann zu einer Beeinträchtigung eines Probanden führen, wenn er sich ständig beobachtet fühlt. Andererseits lassen sich im Feldversuch Strategien zur Belastungsbewältigung (*coping*) sowie die Leistungseinteilung und Selbstregulation der Beanspruchung am Arbeitsplatz erfassen. Die Messung und Bewertung der Belastungsgrößen wird oft schwierig – etwa die Bestimmung des Energieumsatzes, wenn kein Arbeitstakt vorgegeben ist –, oder die Messung der Klimaparameter, wenn sich der Proband in weiten Arbeitsräumen bewegt oder inhomogene Belastungsbedingungen vorhanden sind – z.B. stark unterschiedliche Windgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich. Die Beurteilung des Zusammenhangs von Belastung und Beanspruchung aufgrund von Mittelwerten erfordert besondere Aufmerksamkeit (zur Problematik mittlerer Beanspruchungswerte siehe z.B. MÜLLER & HETTINGER 1981 [265]; ein Beispiel für eine mögliche Irreführung der Interpretation durch die Betrachtung von Mittelwerten der Beanspruchung bei unterschiedlichen Bewältigungsstrategien einzelner exponierter Personen findet sich in Kapitel 6.3.6.5).

Es besteht insgesamt die Problematik, daß man in Klimakammern mit Probanden, die gewöhnlich jung sind (Rekruten, Zivildienstleistende) und weder gewohnt sind körperlich noch in Hitze zu arbeiten, experimentelle Expositionen bis hin in Grenzbereiche der Beanspruchung durchführen will. In Feldversuchen, in denen man die tatsächliche Exposition bei der Arbeit messend begleitet, steht meist ein hoch ausgelesenes Kollektiv von Arbeitnehmern zur Verfügung: alle, die die Belastung der Arbeit nicht über Jahre ertragen konnten, haben sich einen anderen Arbeitsplatz gesucht; die Arbeitnehmer, die an diesen Arbeitsplätzen geblieben sind, sind hitzegewohnt und sehr erfahren, etwa was die Einteilung des Arbeitstempos und das Erkennen von Vorzeichen von Gesundheitsstörungen in Hitze betrifft. Hierdurch entsteht die ethische Frage, wie hoch man – bei allen getroffenen Vorsichtsmaßnahmen und Notfallvorbereitungen – junge, unerfahrene Probanden belasten darf.

4 Laborversuche

Schon früher gab es ein Interesse an Untersuchungen der Beanspruchung unter definierter klimatischer Belastung. Lichtenberg gibt im „Goettinger Taschen Calender vom Jahr 1778“ einen Überblick über die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen.⁵²

YAGLOU bezog sich 1927 [428] auf die subjektive Bewertung des Klimas durch Probanden in Körperruhe, um Klimabelastungen zu vergleichen. NIELSEN erfaßte 1938 [275] physiologische Größen bei vorgegebener Schwere von Körperarbeit in einem Bereich von Klimabelastungen, in dem die Beanspruchung der Probanden von der Körperarbeit bestimmt wurde und die Klimabelastung noch keine Auswirkungen auf die physiologischen Größen zeigte. LIND ermittelte 1963 durch systematische Messungen im feuchtwarmen Klimabereich [224] die – von der Klimabelastung her betrachtet – obere Grenze dieses Bereichs (ULPZ, vgl. Kapitel 2.4.3.1).

WENZEL untersuchte die Beanspruchungsreaktionen von Probanden in systematischen Versuchsserien, in denen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in kleinen Stufen variiert wurden und die Belastungsparameter oberhalb des von LIND untersuchten Bereichs lagen (z.B. [405], 1973). Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen ermöglichten es, Äquivalenzlinien der Beanspruchungsgrößen zu errechnen und mit denjenigen Parameterkombinationen zu vergleichen, für die die verschiedenen Klimaindizes gleiche Bewertungen ergeben [406]. Diese Vergleiche ermöglichen es, systematisch falsche Bewertungen

⁵² „Von der erstaunlichen Hitze, die der menschliche Körper auszuhalten fähig ist, haben uns schon vor mehreren Jahren Hr. Tilleys Versuche überzeugt. Ein Mädchen hielt nemlich in einem Backofen 10 Minuten lang aus, in welchem das Fahrenheitische Thermometer auf 268 Graden stund, da schon bey 212 das Wasser kocht, auch kochte das Mädchen Obst und Fleisch neben sich. Diese Versuche sind neuerlich in England durch den Dr. Fordyce und die Hr. Banks, Solander und Blagden wiederholt worden, mit einigen Umständen, die Erwähnung verdienen. Als das Fahr. Therm. auf 120 im Zimmer stund, stieg ein anderes, das Dr. Fordyce unter seine Zunge hielt, nur auf 100, und sein Puls schlug 145 mal in einer Minute. Das Athemholen litt nicht viel. Hr. Banks und Solander und die übrigen ertrugen eine Hitze von 110 und 111 Graden ohne Beschwerlichkeit des Athems. Hr. Banks schwitzte stark, die anderen nicht. Im Januar 1775 gieng Dr. Blagden in ein Zimmer, in welchem das Thermometer an der Thür auf 240, bey dem Ofen auf 260 stund. Er hielt 8 Minuten aus. Die Luft fühlte sich sehr heiß, war aber nichts weniger als schmerzend: gegentheils glaubte er, und einige andere Personen, die es versuchten, daß sie eine weit grössere Hitze hätten aushalten können. Die ersten 7 Minuten war das Athemholen nicht beschwert, in der 8ten fühlte er sich engbrüstig, und hielt für rathsam den Versuch zu endigen. Als er wieder ins Kühle kam, schlug sein Puls 144 mal in einer Minute. Man bemerkte hierbey, daß die Hitze der Luft am empfindlichsten war, wenn man sich bewegte, und diese heisse Luft aus einem Blasebalg auf einen geblasen, war kaum auszuhalten. Auch in den Nasenlöchern war die Empfindung schmerzhaft. Der Athem fühlte sich kühl an. Ein Ey wurde in 20 Minuten völlig hart, und Carbonnade war in 47 schon zu stark gebraten. Die Versuche überhaupt scheinen, der eine mehr, der andere weniger, den Satz zu bestätigen, daß der menschliche Körper eine Gabe besitze, Kühlung hervorzubringen, ausschließlic derjenigen, die vom Ausdunsten erzeugt wird.“

durch die Klimaindizes aufzudecken; in ähnlicher Weise wurden von KAMPMANN & PIEKARSKI (1995 [182], [183] und 2000 [190]) Argumente gegen die Norm ISO 7933 (1989) vorgetragen.

Von den Daten, die von 1979 bis 1984 während meiner Mitarbeit im Institut für Arbeitsphysiologie erfaßt und von mir ausgewertet wurden, wurde bisher nur ein Teil der Ergebnisse in Veröffentlichungen und Vorträgen (z.B. [170], [292], [293] oder [295]) publiziert, so daß sich hier die Gelegenheit bietet, diese Ergebnisse systematisch darzustellen.

4.1 Auswertung systematischer Serien von Klimaexpositionen in Klimakammern

Im Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund wurden Klimakammern gebaut, die eine Weiterentwicklung der von MÜLLER & WENZEL (1957 [268]) sowie WENZEL & STRATMANN (1968 [403]) beschriebenen Kammern darstellten (WENZEL ET AL. 1980 [409]). Die Klimakammern stellen jeweils einen endlosen Windkanal dar: die Luft wird vertikal umgelenkt und nach entsprechender Aufbereitung erneut durch den Versuchsraum geleitet, der sich in einem äußeren Mantelklima befindet. Das äußere Mantelklima hat die Funktion einer „dynamischen Isolierung“, insofern die Lufttemperatur im Mantelraum getrennt von der inneren Klimakammer auf Temperaturwerte etwas unterhalb des innen gewählten Wertes geregelt werden kann. Dies hat zur Folge, daß die Regelcharakteristik unabhängig von den absoluten Temperaturwerten wird und insbesondere Konvektionsströmungen an den Wänden der inneren Klimakammer verringert werden können. Die Kammern besitzen einen weiten Bereich von Klimawerten, in dem ein gewünschtes Klima recht genau eingehalten werden kann [409] (Tabelle 2).

Zur Erfassung der Meßdaten wurde ein PCM-System entwickelt (PIEKARSKI & KAMPMANN 1982 [290]), das über einen Prozeßrechner PDP 11/34 die Erfassung (KAMPMANN [168]) und die Überwachung (SONNENSCHNEIN ET AL. [357]) der physiologischen Meßdaten ermöglichte.

Weitere Einzelheiten zum Aufbau der Klimakammern und zur Erfassung der physiologischen Meßdaten finden sich bei KAMPMANN & PIEKARSKI (1982 [290]: Beschreibung der Meßdatenerfassung), PIEKARSKI & KAMPMANN (1982 [289]: Kalibrierung der verwendeten Thermistor-Hautfühler gegen aufgesetzte Thermolemente) sowie PIEKARSKI (1985 S. 76ff [294]).

Tabelle 2: *Arbeitsbereich der Klimakammern im Institut für Arbeitsphysiologie, Dortmund zur Zeit der Durchführung der Untersuchungen.*

Lufttemperatur t_a	Bereich von -30 °C bis 65 °C; Standardabweichung: räumlich und zeitlich < 0,05 K, auch bei Störeinflüssen bis zu 3600 kJ/h und 1000 g/h Wasserdampf, wie sie bei Unter- suchungen an arbeitenden Personen auftreten können
Wasserdampfdruck p_a	von < 5 hPa bis zu relativen Feuchten von 95 % (bei Lufttemperaturen oberhalb von 10 °C)
Windgeschwindigkeit v_a	von 0,2 m/s bis 2,3 m/s (bei fast allen Luftzuständen)

4.2 Vorgehen bei den Messungen in den Klimakammern

Alle im folgenden betrachteten Untersuchungen wurden in gleicher Weise durchgeführt: Damit keine tageszeitlichen Schwankungen der physiologischen Meßgrößen die Ergebnisse überlagerten, wurden alle Versuche um die gleiche Tageszeit – um 7 Uhr morgens – begonnen. Zu Beginn wurden die Probanden instrumentiert: Es wurden EKG-Elektroden zur Registrierung einer freien Brustwandableitung angeklebt (modifizierte Ableitung nach WILSON) und Hautfühler (Thermistor-Fühler YSI 427; Yellow Springs Industries) auf Stirn, Brust, Oberarm, Ober- und Unterschenkel sowie auf dem Rücken befestigt. Einzelheiten zu den verwendeten Halterungen und zur Kalibrierung gegenüber Thermoelementen, die zur Messung jeweils auf die Haut aufgesetzt wurden, sind in PIEKARSKI & KAMPMANN (1982) ausgeführt. Mithilfe dieser Hautfühler war es möglich, den Verlauf der Hauttemperatur während der Klimaexposition kontinuierlich zu erfassen und mit einer Gewichtung der 6 Einzeltemperaturen von Stirn: 5 %, Brust: 20 %, Oberarm 20 %, Oberschenkel: 25 %, Unterschenkel: 15 % und Rücken: 15 % eine mittlere Hauttemperatur zu errechnen. Der Proband führte sein Rektalthermometer (Thermistorfühler YSI 401, Yellow Springs Industries; mit Gummiolive als Sicherung gegen das Herausrutschen; Messung der Rektaltemperatur etwa 10 cm hinter dem Schließmuskel) selbst ein. Anschließend begann eine Ruheperiode von mindestens 30 Minuten Dauer. Die Werte der Körpertemperaturen am Ende der Ruheperiode und der

Mittelwert der Herzschlagfrequenz über 10 Minuten gegen Ende der Ruheperiode wurden als Ausgangswerte für die nachfolgende Klimaexposition registriert.

Nach dem Ende der Ruheperiode begab sich der Proband mit Sporthose, Socken und Turnschuhen bekleidet ($I_{cl} = 0,1$ clo) in die Klimakammer und wurde dort gewogen, um das Ausgangsgewicht festzustellen. Die Klimaexposition wurde in jeweils 30-minütige Arbeitsperioden unterteilt, denen jeweils 3-minütige Pausen zur Bestimmung des Körpergewichts folgten. Die gesamte Klimaexposition umfaßte maximal 8 solcher Arbeitsperioden und dauerte somit maximal $8 \cdot 33$ Minuten = 264 Minuten. Wenn sich ein Gleichgewicht der Thermoregulation eingestellt hatte, wurde die Klimaexposition in einigen beanspruchenden Versuchen bereits nach der 6. Arbeitsperiode beendet; für die Auswertungen wurden die Mittelwerte der 5. und 6. Arbeitsperiode verwendet. Während der Arbeitsperioden gingen die Probanden auf einem Laufbandergometer; bei den im folgenden vorgestellten Versuchsserien betrug die Gehgeschwindigkeit jeweils 4 km/h bei ebenem Laufband. – Die Probanden gingen mit dem Rücken zur Windrichtung.

Die physiologischen Messungen erfolgten kontinuierlich während der Arbeitsperioden; während der Wägungen wurden die Probanden vom Meßsystem getrennt, um Verfälschungen der Messungen durch das Meßkabel zu vermeiden.

Der Energieumsatz wurde in der Mitte jeder zweiten Arbeitsperiode mittels indirekter Kalorimetrie durch die Analyse der Ausatemluft bestimmt: Die Ausatemluft wurde zunächst in einem Douglassack während etwa 5 Minuten gesammelt und anschließend analysiert (das ventilierte Volumen wurde mittels einer feuchten Gasuhr bestimmt, der CO_2 -Gehalt der Ausatemluft mittels Infrarotabsorptionsspektroskopie (UNOR Mark 2) und der Sauerstoffgehalt der Ausatemluft mithilfe einer Bestimmung des Paramagnetismus der Gasprobe (Firma Servomex)).

Während der Klimaexposition konnten die Probanden Früchtetee (Pfefferminztee, Hibiscustee, Malventee), der mit Süßstoff gesüßt worden war, ad libitum trinken. Die Trinkmenge wurde jeweils durch Wägung ermittelt und in die Flüssigkeitsbilanz eingerechnet. Nach der Klimaexposition wurde eine Ruheperiode von mindestens 30 Minuten Dauer angeschlossen.

Die Meßdatenerfassung war so ausgelegt, daß vier Probanden (je zwei in jeder Klimakammer) gleichzeitig untersucht und überwacht werden konnten. Der Meßfehler betrug für die Rektaltemperatur nach einer Kalibrierung im gerührten Wasserbad im Bereich von Temperaturen zwischen 35 °C und 40 °C maximal 0,003 °C; für die Hauttemperaturen lag der Meßfehler der Fühler im Bereich zwischen 10 °C und 40 °C maximal bei 0,07 °C (der Meßfehler bei der Hauttemperaturmessung am Probanden ist in [289] diskutiert). Die Messung der Körpermasse erfolgte mittels einer Abbrandwaage (Fa. Toledo) mit einer Genauigkeit von ± 5 g.

4.3 Versuchsserien

Im folgenden werden Versuchsserien im Hinblick auf die Hitzegewöhnung der Probanden und auf den Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Beanspruchungsreaktionen näher analysiert.

Die Akklimatisierung erfolgte bei einem Klima von $t_a = 38\text{ °C}$ bis 40 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % bis zu 70 % (vgl. [294]), d.h. im feuchtwarmen Bereich. Als Abbruchkriterium der Klimaexposition wurde sowohl während der Akklimatisierungsperioden als auch während der späteren Einzelversuche eine Rektaltemperatur von $t_{re} = 38,5\text{ °C}$ gewählt. Alle Probanden leisteten eine mittelschwere Geharbeit von (4 km/h Gehen in der Ebene) an fünf Wochentagen, wobei das Wochenende (Samstag und Sonntag) jeweils arbeitsfrei war. Die Akklimatisation wurde nach drei bis vier Wochen als beendet angesehen, wenn die Probanden sechs Arbeitsperioden von 30 Minuten im Klima verbringen konnten (zwischen den Arbeitsperioden waren jeweils 3 Minuten Arbeitspause innerhalb der Klimakammer zur Durchführung der Gewichtsmessungen, zur Bewertung der Hautbenetzung usw.), ohne daß die Rektaltemperatur $38,5\text{ °C}$ überschritt. – In den Fällen, wo das Klima zu niedrig belastend angesetzt wurde, so daß die Probanden sechs Arbeitsperioden gut durchstehen konnten, ohne die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit zu erreichen, wurde die Klimabelastung nach zwei Wochen erhöht.

Für die anschließenden Versuchsreihen wurde nun der so erzielte Akklimatisationszustand erhalten, indem in den Untersuchungswochen, die an die Akklimatisationsperiode anschlossen, montags unter denjenigen Klimabedingungen, unter denen die Akklimatisation abgeschlossen worden war, „reakklimatisiert“ wurde, und an den anschließenden vier Untersuchungstagen der Woche die Klimabedingungen ausgewogen verteilt wurden (d.h.: nicht vier leichte Expositionen hintereinander). – Während von anderen Untersuchern meist vorrangig die Veränderung der Körperfunktionen während wiederholter Expositionen in einer einzelnen Klimabedingung untersucht wurde, wurde bei den hier vorgestellten Versuchsserien die Auswirkung einer „mittleren“ Hitzegewöhnung auf Expositionen bei unterschiedlichen Lufttemperaturen und Luftfeuchtigkeiten erfaßt. Der Grenzwert für den Abbruch der Akklimatisationsversuche lag mit $t_{re} = 38,5\text{ °C}$ im Verhältnis zu anderen Untersuchern zwar verhältnismäßig niedrig (vgl. z.B. STRYDOM ET AL. [366]: $t_{re} \geq 40,0\text{ °C}$ oder PANDOLF ET AL. [283]: $t_{re} \geq 39,5\text{ °C}$); da aber der Mittelwert der jeweils maximalen Rektaltemperatur über alle Schichten in einer Untersuchung an heißen Arbeitsplätzen im Steinkohlenbergbau [189] bei $t_{re} = 38,6\text{ °C}$ lag (Kapitel 6.1.6.2), ist der in diesen Serien erzielte Akklimatisationsgrad dem Akklimatisationsgrad im Steinkohlenbergbau vermutlich – trotz der im Bergbau wesentlich längeren Expositionzeiten – vergleichbar.

Für eine Untersuchung der Probanden im nichtakklimatisierten Zustand wurde das Winterhalbjahr gewählt, um eine mögliche „natürliche“ Akklimatisation (im Hinblick

auf heißes Sommerwetter) zu verhindern, und es wurden nur zwei Untersuchungstage pro Woche durchgeführt, um eine Hitzegewöhnung auszuschließen.

4.3.1 Einzelversuche

Die anthropometrischen Daten der Personen, die an den Versuchsserien teilnahmen, sind in Tabelle 2 angegeben; die Probanden waren gesund und ihre körperliche Leistungsfähigkeit war normal.

Tabelle 3: Anthropometrische Daten der Probanden.

Proband	Alter / Jahre	Körpergröße / cm	Körpermasse / kg	Körperober- fläche / m ²	$\dot{V}O_{2\max}$ / l/min
A	20	186	72	1,97	3,9
B	20	184	72	1,93	4,1
C	20	188	72	1,94	3,0
D	20	188	68	1,92	3,1
E	21	183	70	1,90	3,4
F	21	186	83	2,07	2,6
G	20	180	63	1,80	3,4

Einige Beispiele für die Aufzeichnung der Meßdaten geben die folgenden Abbildungen: in Abb. 5 ist der Verlauf der physiologischen Größen während einer leichten Klimabelastung dargestellt: in der Ruhephase (liegend, zugedeckt) sinken Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur ab; die Hauttemperaturen steigen an. Während der Klimaexposition steigt die Körpertemperatur – durch die metabolische Wärme, die bei der Körperarbeit auf dem Laufbandergometer erzeugt wird – an, bis dieser Anstieg durch die Schweißverdampfung kompensiert wird, wobei der Schweiß bei der vorliegenden trocken-warmen Klimabedingung gut verdampfen kann. Während der zweiten Expositionsstunde stellen sich die physiologischen Größen recht konstant ein, so daß diese Körperarbeit auch weitaus länger als 7 Arbeitsperioden hätte ausgeführt werden können.

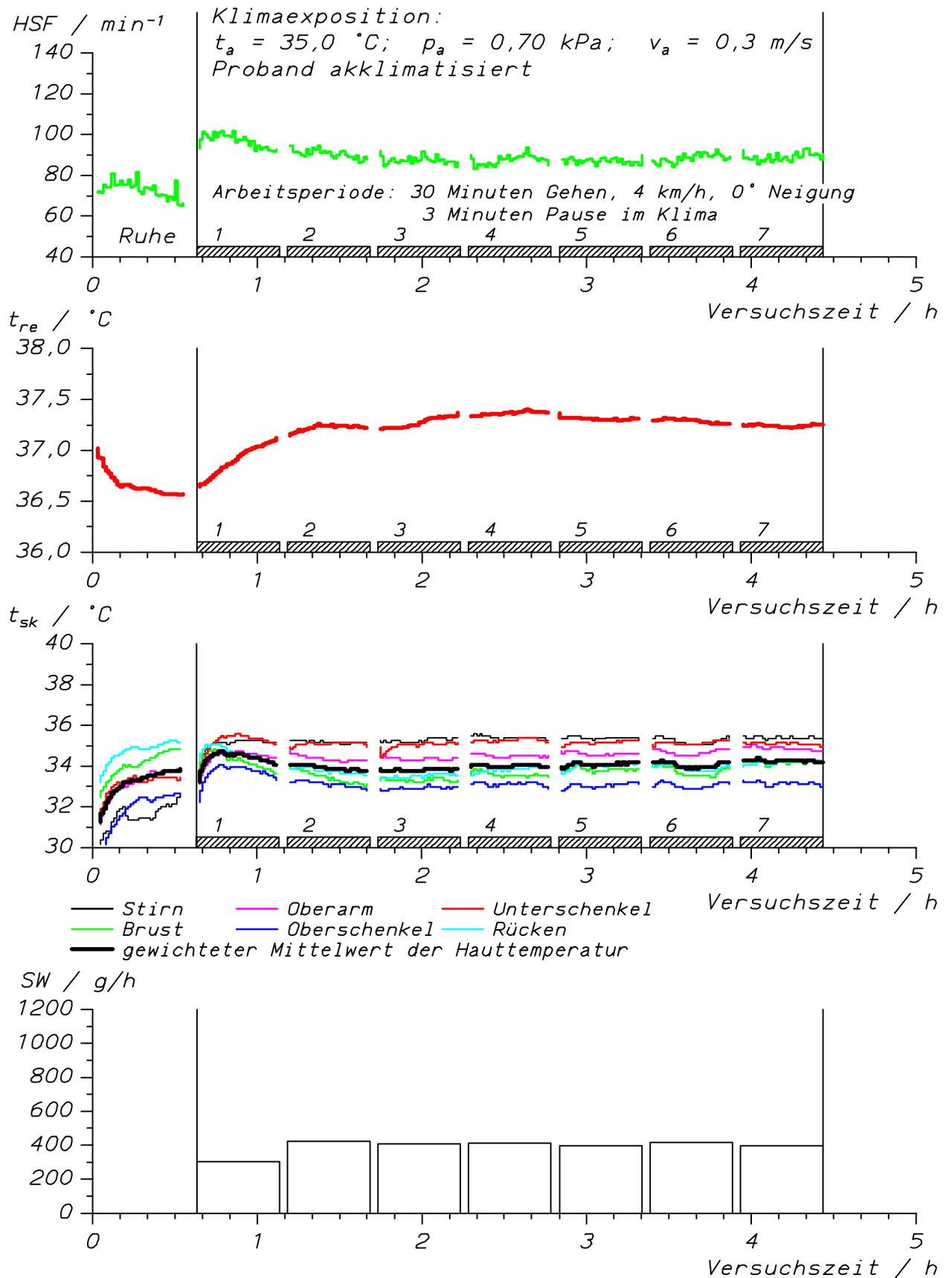


Abb. 5: Verlauf der physiologischen Größen während einer leichten Klimaexposition ($t_a = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$; rel. Feuchte = 12 %; leichte bis mittelschwere Geharbeit auf dem Laufbandergometer).

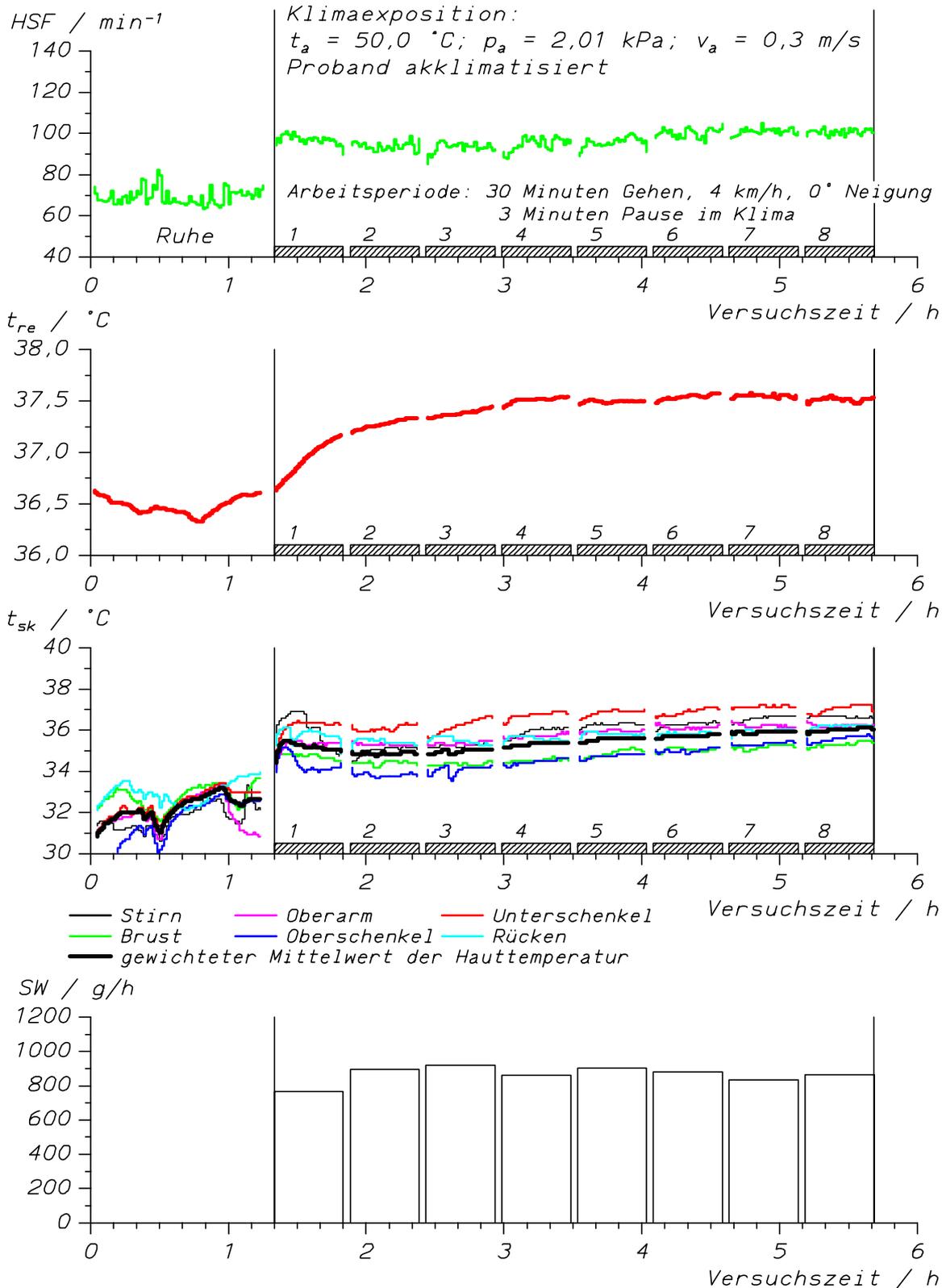


Abb. 6: Verlauf der physiologischen Größen während einer mittelschweren Klimaexposition ($t_a = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$; rel. Feuchte = 16 %; leichte bis mittelschwere Geharbeit auf dem Laufbandergometer), bei der sich noch deutlich ein thermoregulatorischer Gleichgewichtszustand einstellt.

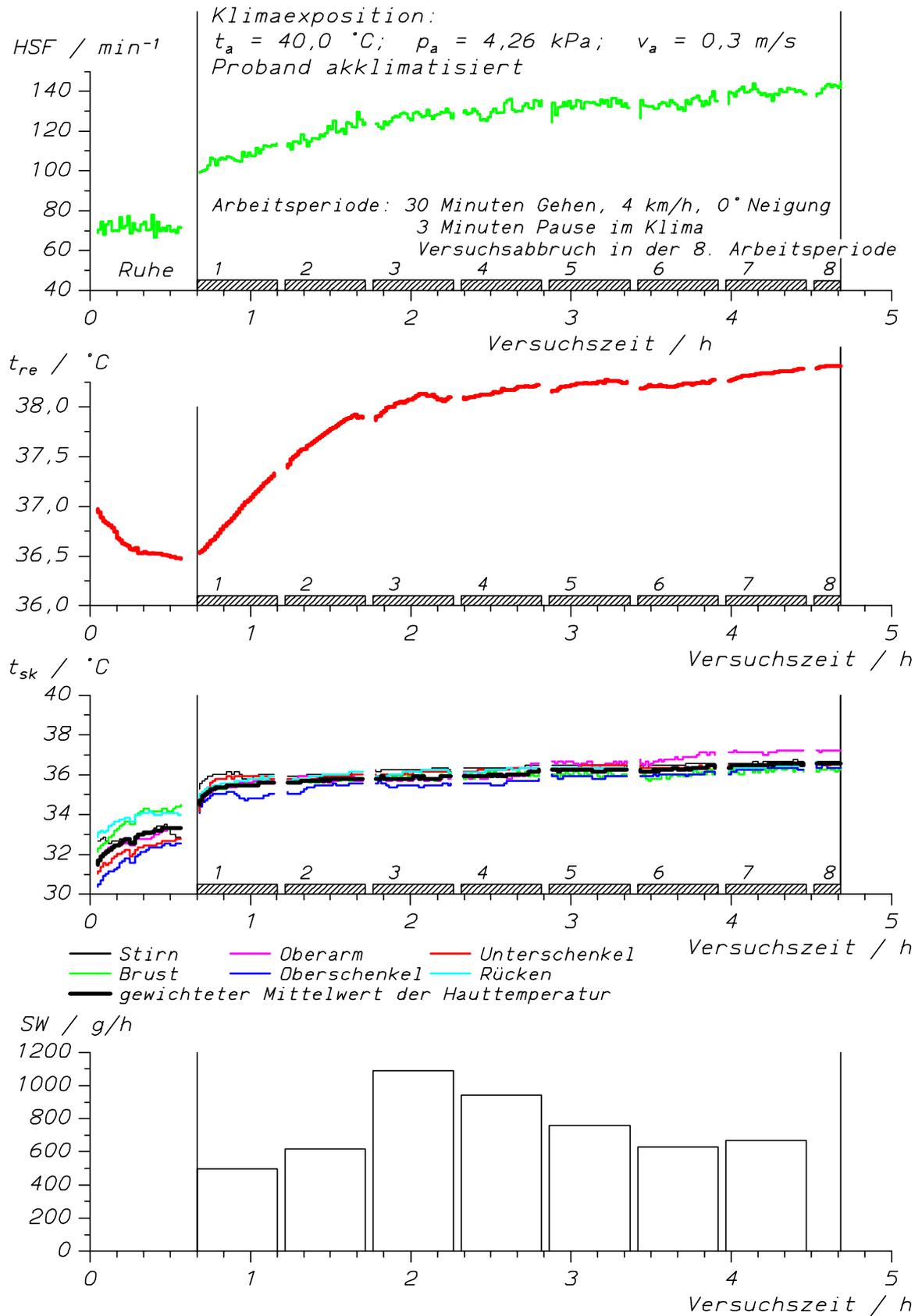


Abb. 7: Verlauf der physiologischen Größen während einer schweren Klimaexposition ($t_a = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$; rel. Feuchte = 58 %; leichte bis mittelschwere Geharbeit auf dem Laufbandergometer), bei der sich gerade kein stationärer Zustand mehr einstellt.

Abb. 6 zeigt den Verlauf der physiologischen Größen bei gleicher Körperarbeit, aber bei einer deutlich höheren Klimabelastung im trocken-heißen Bereich: bei einer annähernde verdoppelten Schweißrate stellen sich Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur gegen Ende der zweiten Expositionsstunde auf einen stationären Wert ein, der nicht viel höher liegt als die Werte in Abb. 5.

In Abb. 7 wird ist eine Klimabeanspruchung im feucht-warmen Klimabereich dargestellt, die in der Nähe der Grenze einer kompensierbaren Hitzebelastung liegt (der Anstieg ist aber noch geringer als $0,1 \text{ }^\circ\text{C} / \text{h}$, was – entsprechend der Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Versuche (vgl. Abb. 13 und Tabelle 5) als Grenzwert für eine Einstufung als „stationärer Zustand“ (*steady state*) verwendet werden kann. Nachdem während der zweiten Expositionsstunde die Schweißrate nach einem ursprünglichen starken Anstieg wieder abfällt, wird der weitere langsame Anstieg der anderen physiologischen Größen nicht mehr aufgehalten. Die Hauttemperaturen nähern sich einander deutlich mehr an als in den Fällen geringerer Klimabelastung (Abb. 5 und Abb. 6): dies zeigt die Ausweitung des homiothermen Bereichs im Körper (vgl. Abb. 7). In dieser Abbildung sieht man auch deutlich den Abfall der Schweißrate nach $1 \frac{1}{2}$ Stunden (vgl. Kapitel 2.2.1.2: *hidromeiosis* bei schweißbedeckter Haut in feucht-warmem Klima).

Für eine systematische Erfassung der Klimaauswirkungen auf die Beanspruchungsgrößen ist es günstig, wenn man eine Versuchsserie, bei der z.B. nur Lufttemperatur und -feuchtigkeit variiert wurden, systematisch erfaßt.

Im folgenden werden zunächst die Daten jeweils einzelner Probanden ausgewertet, um – durch den Ausschluß interindividueller Unterschiede – einen besseren Einblick in die Beziehungen zwischen der Klimabelastung und den Beanspruchungsgrößen zu erhalten.

4.3.2 Beziehungen der physiologischen Einzelwerte untereinander

Da bei den Versuchen in der Klimakammer sowohl die Körperarbeit als auch die Tageszeit des Versuchsbeginns konstantgehalten wurde, ist die Veränderung der erfaßten physiologischen Größen wesentlich von der Klimabelastung verursacht – eine unterschiedliche Tagesform der Probanden mag durch unterschiedliche Ernährung, Schlafverhalten und Aktivitäten in der Freizeit – Sport, eventuell auch durch Feiern und/oder Alkoholgenuß – bedingt sein, die im Rahmen der Untersuchungen nicht kontrolliert

werden konnten⁵³ oder sollten, da eine so strikte Kontrolle der Lebensbedingungen den Arbeitsbedingungen z.B. in der Industrie in keiner Weise entsprochen hätte.

Die Gesamtheit der Einzelmesswerte erlaubt nun eine Reihe von Abschätzungen, von denen einige im Folgenden dargestellt werden sollen.

4.3.2.1 Thermische Pulse

Eine erhöhte Körpertemperatur führt zu einer erhöhten Herzschlagfrequenz, die benötigt wird, um eine erhöhte periphere Durchblutung zu ermöglichen (z.B. WENZEL [402], ROWELL [316]). VOGT ET AL. [389] geben Werte für den thermisch bedingten Anstieg der Herzschlagfrequenz pro Grad Celsius Erhöhung der Körperkerntemperatur zwischen 16 min^{-1} und 60 min^{-1} für 9 Probanden (jeweils einzelne Expositionen) an; der von ihnen berechnete Mittelwert beträgt $33,5 \text{ min}^{-1} / ^\circ\text{C}$.

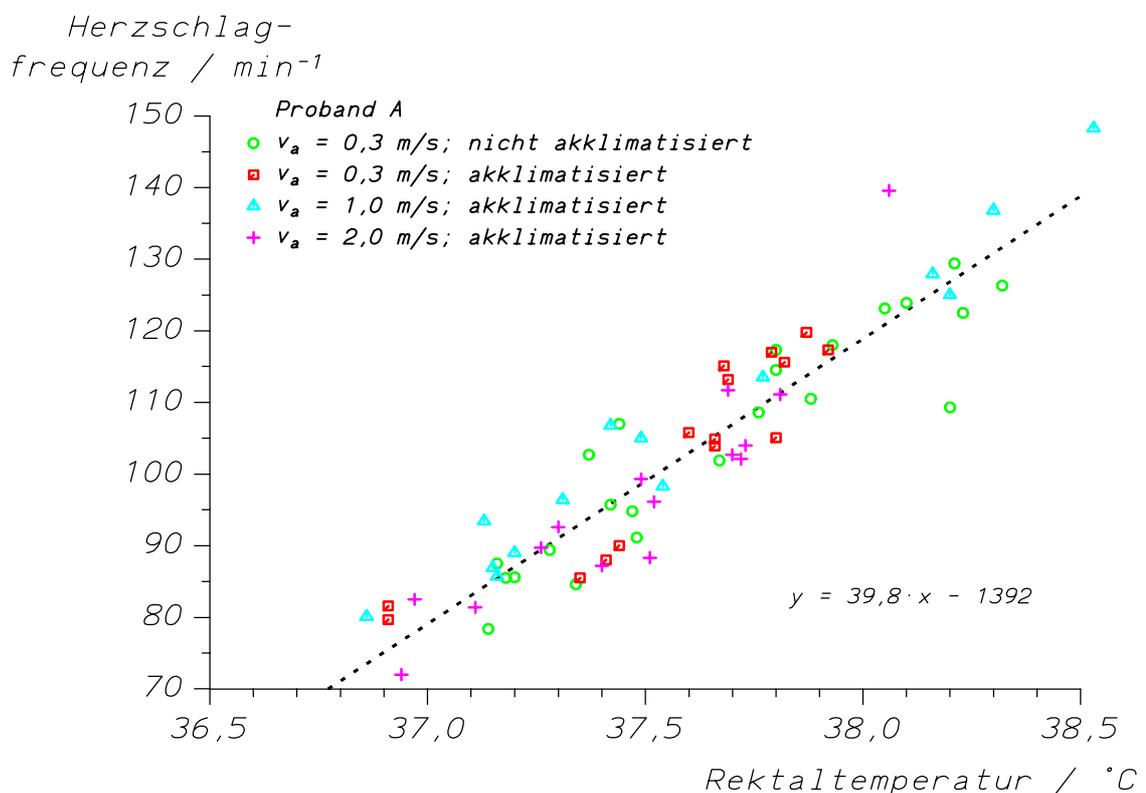


Abb. 8: Zusammenhang zwischen Herzschlagfrequenz und Rektaltemperatur t_{re} für verschiedene Versuchsserien eines Probanden.

Die systematischen angelegten Versuchsserien ermöglichen es, den Anstieg der Herzschlagfrequenz aufgrund der Erhöhung der Rektaltemperatur aus einer Vielzahl von Messungen zu bestimmen (Abb. 8).

⁵³ So waren regelmäßig Versuche, die am Folgetag der jährlichen Instituts-Weihnachtsfeier durchgeführt wurden, nicht verwendbar, obwohl diese Feiern durchaus nicht in Exzessen endeten!

Für alle sieben betrachteten Probanden gibt Tabelle 4 den Zusammenhang:

$$HSF / \text{min}^{-1} = a \cdot t_{re} / ^\circ\text{C} + b \quad (1)$$

für die Ausgleichsgeraden, jeweils für alle Versuchsserien berechnet, an.

Die mittlere Erhöhung der Herzschlagfrequenz von 41 min^{-1} pro Grad Erhöhung der Rektaltemperatur weist darauf hin, daß die Erhöhung der Körpertemperatur bei schwerer Körperarbeit oder schwerer Klimabelastung eine erhebliche Erhöhung der Herz-Kreislauf-Beanspruchung zur Folge haben kann.

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Herzschlagfrequenz und Körperinnentemperatur (t_{re}) bei gleicher Körperarbeit („thermische Pulse“) für verschiedene Klimabelastung.

Proband	Anzahl der Versuche	Korrelationskoeffizient r	Standardabweichung s	a	b
A	67	0,93	6,08	39,76	-1392
B	69	0,92	5,95	43,36	-1526
C	42	0,95	4,46	37,80	-1330
D	40	0,88	8,01	54,10	-1930
E	44	0,92	5,03	39,27	-1368
F	35	0,86	7,92	39,16	-1366
G	22	0,95	6,28	36,55	-1288
Mittelwert	45,6	0,92	6,25	41,43	-1457

4.3.2.2 Abhängigkeit der Schweißrate von Hauttemperatur und Körperinnentemperatur

Im allgemeinen kann die Schweißrate als Funktion von $t_{sk} - t_{sk0}$ und $t_{re} - t_{re0}$ beschrieben werden wo t_{sk0} und t_{re0} die jeweiligen Schwellen für den Einsatz der Schweißproduktion sind (z.B. HEISING [135]). Abb. 9 und Abb. 10 weisen darauf hin, daß im Parameterbereich der hier vorgestellten Untersuchungen die Schweißproduktion stärker durch die Hauttemperatur bestimmt wird und daher als Funktion der Hauttemperatur – im Vergleich zur Rektaltemperatur – eine wesentlich kleinere Streuung aufweist.

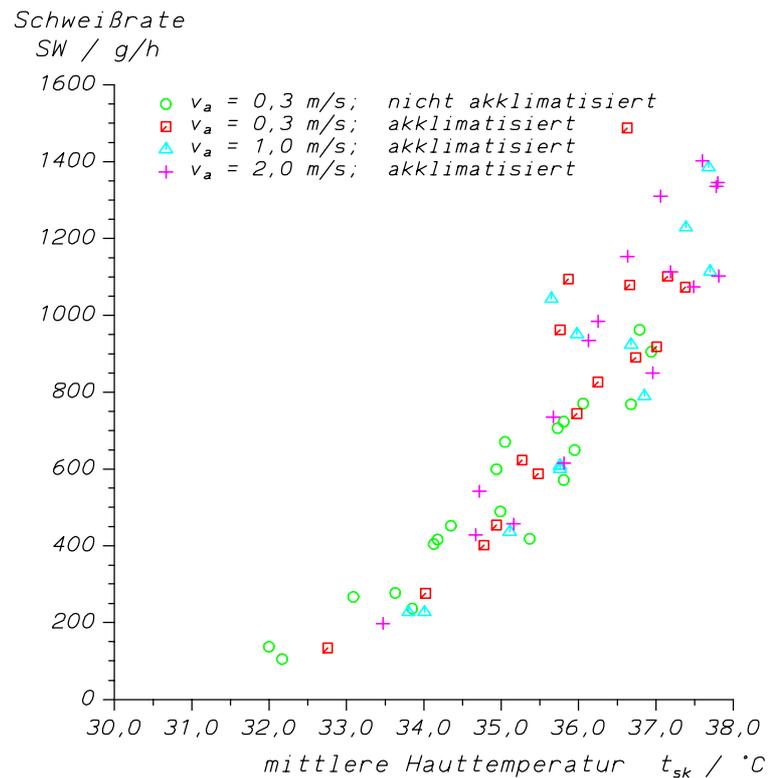


Abb. 9: Zusammenhang zwischen der Hauttemperatur t_{sk} und der Schweißrate SW für vier Versuchsserien von Proband A.

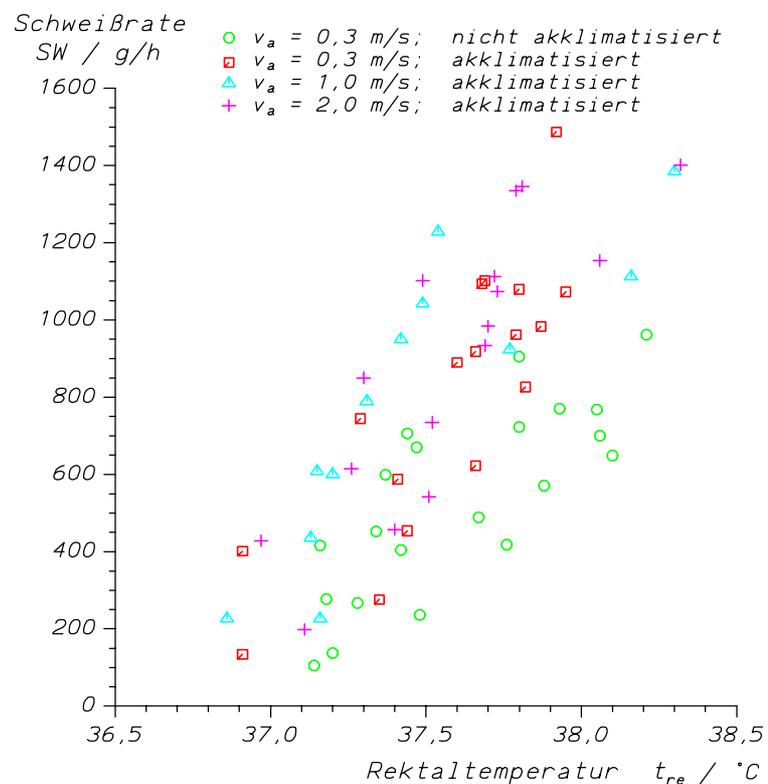


Abb. 10: Zusammenhang zwischen der Rektaltemperatur t_{re} und der Schweißrate SW für vier Versuchsserien von Proband A.

4.3.2.3 Beschreibung der Rektaltemperatur durch t_a und BET

Für ein Klimasummenmaß erwartet man, daß die Beanspruchungsgrößen als Funktion des Klimasummenmaßes besser skalieren als z.B. für einen einzelnen Klimaparameter (Kapitel 2.5) wie etwa die Lufttemperatur t_a . Für die Rektaltemperatur soll dies am Beispiel der Basis-Effektivtemperatur BET in Abb. 11 aufgezeigt werden: dort sind die Daten der Rektaltemperatur für mehrere Versuchsserien zum einen über der Lufttemperatur, zum anderen über der BET aufgetragen worden.

Ganz offensichtlich ist die Streuung der Datenpunkte im unteren Diagramm deutlich geringer, insbesondere für die Versuchsserien, in denen der Proband akklimatisiert war. Im unteren Teildiagramm läßt sich gut ablesen, daß mit zunehmender Effektivtemperatur die Rektaltemperatur immer schneller ansteigt; dies entspricht der Erfahrung, daß es – bei der vorgegebenen Laufbandarbeit – oberhalb von $t_{re} = 38,0$ °C immer schwieriger wird, stationäre Zustände (*steady-state*) der physiologischen Daten zu erreichen.

Die Daten aus der Versuchsreihe, in der der Proband nicht akklimatisiert war, liegen in beiden Diagrammen deutlich höher als die anderen Werte: dies zeigt eine Absenkung der Körperinnentemperatur im akklimatisierten Zustand. Dieses Ergebnis ist im unteren Diagramm besonders deutlich zu sehen. Die Kopplung zwischen Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur zeigt dagegen keinen Einfluß des Akklimatisationsgrades (Abb. 8). Hieraus läßt sich ableiten, daß, um gleiche Beanspruchungswerte zu erhalten, die Belastungsgrenzen für nicht akklimatisierte Personen – etwa bei der Erstellung von Klimagrenzwerten – niedriger angesetzt werden müssen als für akklimatisierte Personen. – Dies ist beispielsweise im $WBGT$ -Index (EN 27 243 [440]) auch so festgelegt.

Der untere Teil der Abbildung ist gut mit Abb. 4 (LIND 1963 [224])vergleichbar; die Datenpunkte liegen bei geringer Klimabelastung allerdings im Vergleich zu LIND bei etwas niedrigeren Rektaltemperaturen: dies ist möglicherweise durch die Bettruhe vor den Versuchen bedingt, die zu einer Absenkung der Körpertemperatur führt (vgl. Abb. 5 und Abb. 7); LIND gibt in seiner Veröffentlichung keine vorgeschaltete Ruhephase vor der Klimaexposition an. Ein weiterer Unterschied zu den Ergebnissen von LIND besteht darin, daß von uns auch Klimabelastungen untersucht wurden, in denen sich ein thermoregulatorischer Gleichgewichtszustand später als nach 60 bis 90 Minuten – wie von LIND als Expositionsdauer verwendet – einstellte (z.B. in Abb. 6).

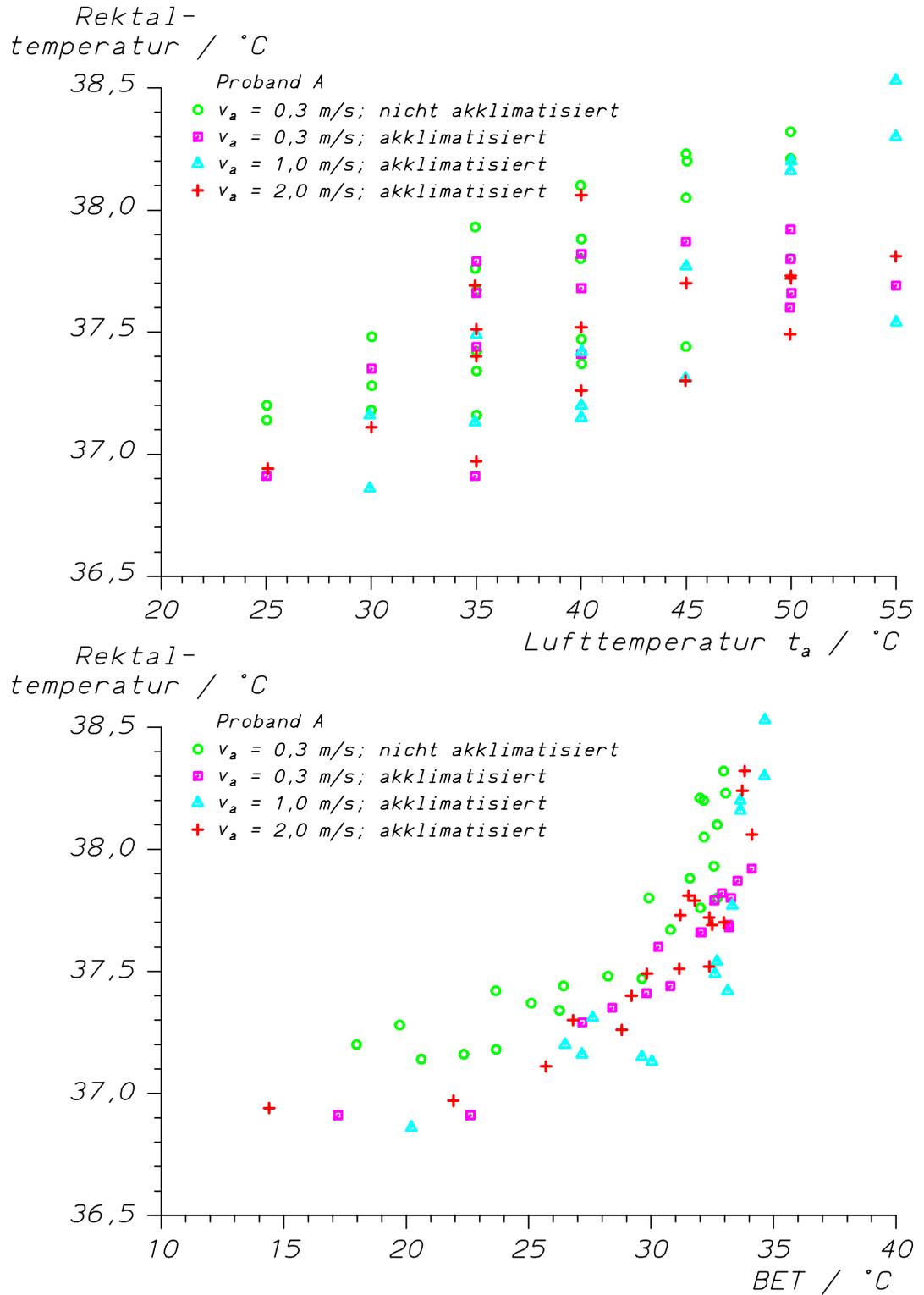


Abb. 11: Rektaltemperatur t_{re} als Funktion der Lufttemperatur t_a sowie der Basis-Effektivtemperatur BET.

4.3.3 Auswertung von Versuchsserien durch Ausgleichsfunktionen

Für eine systematische Erfassung der Klimaauswirkungen auf die Beanspruchungsgrößen ist es günstig, wenn man in einer Versuchsserie nur wenige Belastungsparameter, z.B. nur Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, systematisch variiert.

Zur Auswertung solcher Versuchsserien wurde ein heuristischer Ansatz gewählt, der sich für alle vier Beanspruchungsgrößen HSF , t_{re} , t_{sk} und SW bewährt hat: für jede Versuchsserie wurden für die Beanspruchungsgrößen B die Koeffizienten a_i , ($1 \leq i \leq 7$) einer Regressionsfläche:

$$B = a_1 + a_2 t_a + \exp(a_3 + a_4 t_a + a_5 p_a + a_6 t_a^2 + a_7 p_a^2) \quad (2)$$

iterativ so optimiert, daß die Residuenquadratsumme minimiert wurde. Datenpunkte, die eine Normalverteilung der Residuen deutlich beeinträchtigten, wurden als Ausreißer aus der Analyse ausgeschlossen. Unter der Annahme, daß die Streuung der Beanspruchungsgrößen von Tag zu Tag zufallsverteilt sind, sind die so erhaltenen Ausgleichsflächen besser für weitere systematische Auswertungen geeignet als einzelne Meßwerte.

Einige solcher Ausgleichsflächen sind im Anhang A.1 dargestellt; in den folgenden Abschnitten werden Projektionen dieser Ausgleichsfläche in die B - p_a -Ebene zur Darstellung der Beanspruchungsfunktionen B und in die p_a - t_a -Ebene zur Darstellung von Äquivalenzlinien der Beanspruchungsfunktionen B verwendet.

4.3.3.1 Darstellung der Ergebnisse

Um die Anzahl der Versuche, die zur Kartierung der Beanspruchungsreaktion eines Probanden erforderlich waren, gering zu halten, wurden die Versuche meist relativ dicht im trocken-heißen Klimabereich und im Bereich der „steady-state“-Grenze im feucht-warmen Klimabereich, in dem sich gerade noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht einstellt, durchgeführt. Die Lufttemperaturen wurden gewöhnlich in Stufen von 5 °C erhöht.

Im folgenden sind für die Beanspruchungsgrößen HSF , t_{re} , t_{sk} und SW eines akklimatisierten Probanden die Daten (Mittelwerte der dritten Expositionsstunde) und die Ausgleichskurven – jeweils bei einer Windgeschwindigkeit $v_a = 0,3$ m/s und der Arbeit *Gehen in der Ebene: 4 km/h auf einem Laufbandergometer* – in Abb. 12 bis Abb. 15 angegeben.

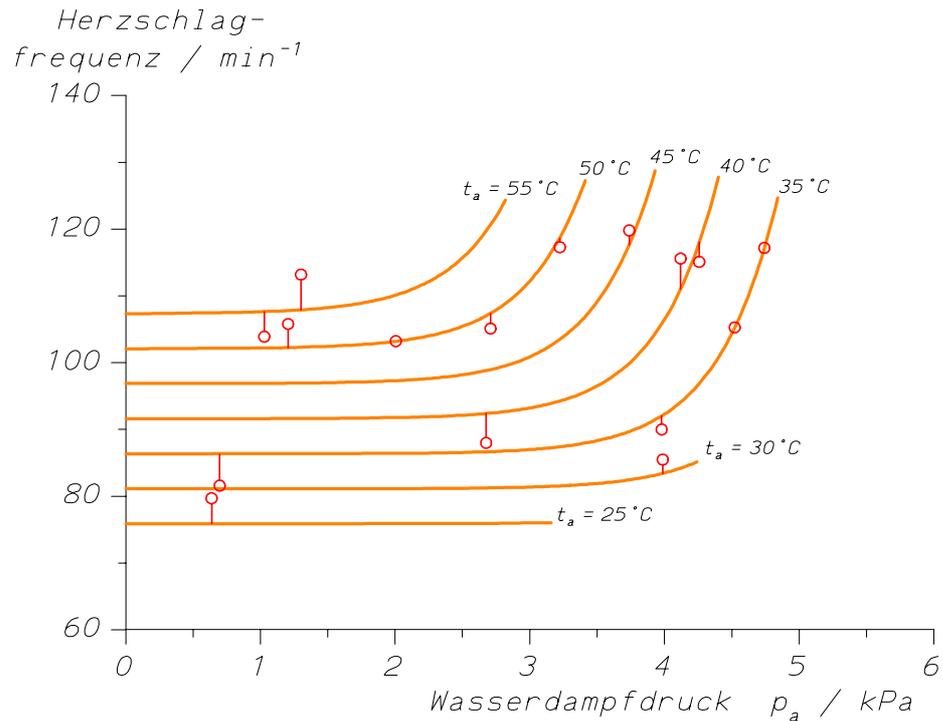


Abb. 12: Herzschlagfrequenz bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a (in einem Raster von 5°C) und Wasserdampfdrucken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

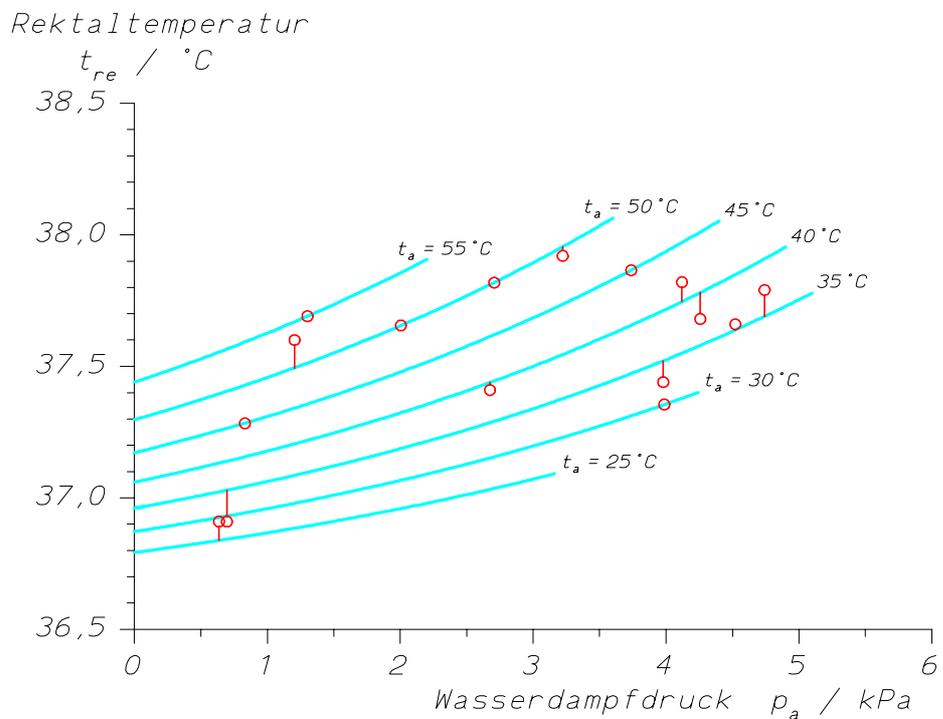


Abb. 13: Rektaltemperatur t_{re} bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a und Wasserdampfdrucken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

Für die dargestellten Beanspruchungsgrößen HSF , t_{re} , t_{sk} und SW liegt in der Art ein gleichsinniges Verhalten vor, daß bei geringer Luftfeuchtigkeit die Lufttemperatur einen linearen Einfluß auf die Beanspruchungsgröße hat: besonders bei der Hauttemperatur (Abb. 14) und der Schweißrate (Abb. 15), bei der die Streuung der Datenpunkte recht gering ist, ist dies deutlich ausgeprägt. Für die Datenpunkte, die zu einer Temperatur t_a gehören, zeigt sich mit zunehmendem Wasserdampfdruck p_a eine Zunahme, die unterschiedlich ausgeprägt ist: für die Rektaltemperatur ist ein Einfluß schon bei niedrigen Werten von p_a zu erkennen; bei den anderen Beanspruchungsgrößen beginnt der Einfluß des Wasserdampfdrucks umso früher, je höher die Lufttemperatur ist. Der steilste Anstieg der mittleren Beanspruchungslinien über dem Wasserdampfdruck ist bei Schweißrate und Herzschlagfrequenz zu beobachten, der geringste Anstieg bei der Hauttemperatur.

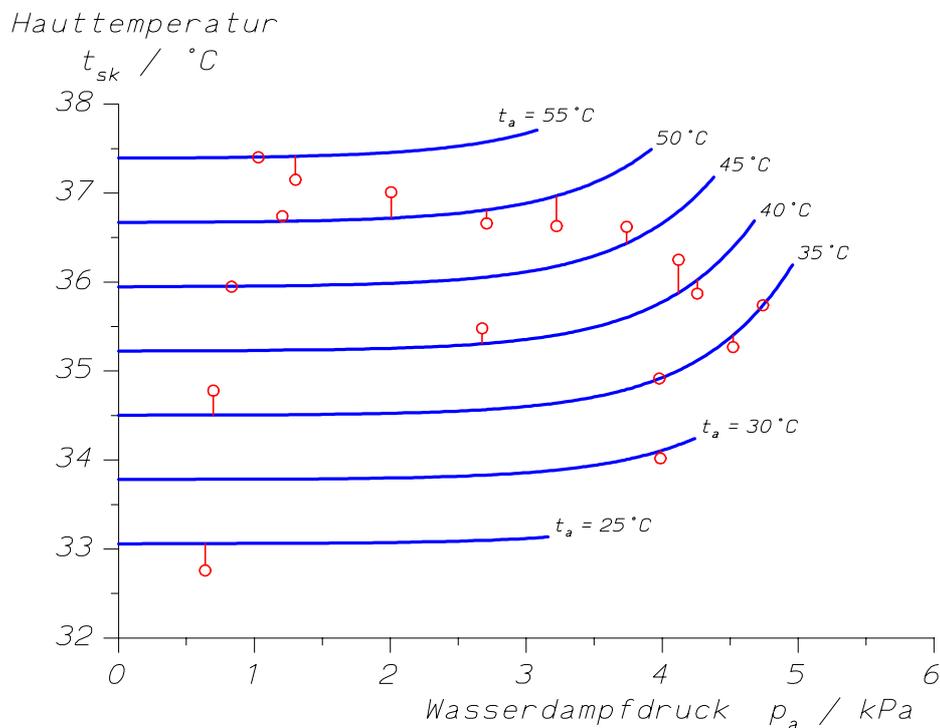


Abb. 14: Mittlere Hauttemperatur bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a und Wasserdampfdrücken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

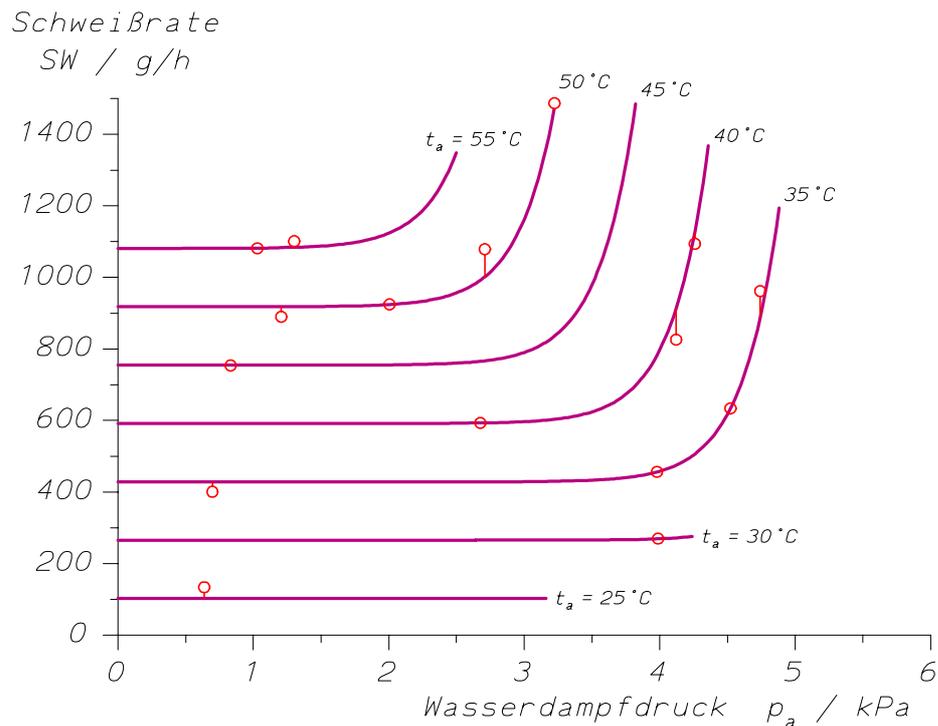


Abb. 15: Schweißrate SW bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a und Wasserdampfdrücken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

4.3.3.2 Berechnungen von Äquivalenzlinien

Die Beschreibung von physiologisch äquivalenten Kombinationen von Klimaparametern ist von vielen Forschungsgruppen angewendet worden. Sie ermöglicht die Abschätzung des Einflusses einzelner Parameter auf die Beanspruchungsgrößen (z.B. WENZEL 1978 [408]) und eignet sich insbesondere zum Vergleich der von Klimasummenmaßen als äquivalent ausgewiesenen Parameterkombinationen mit den physiologischen Ergebnissen (WENZEL 1976 [406]).

Man kann sich die Koordinaten der Äquivalenzlinien durch horizontale Linien in den Diagrammen der Beanspruchungsfunktionen entstanden denken, deren Koordinaten (t_a, p_a) dann in die nachfolgenden Diagramme eingetragen wurden. Bezogen auf die errechneten Ausgleichsflächen (Kapitel 4.3.3) stellen die Äquivalenzlinien der Beanspruchungsgrößen in Abb. 16 - Abb. 19 Höhenlinien in den dreidimensionalen Darstellungen im Anhang A.1 dar, und die Diagramme stellen Projektionen dieser Höhenlinien auf die Grundflächen von Abb. A - 2 - Abb. A - 5 dar.

Die Diagramme in Abb. 16 - Abb. 19 sind mit einem speziellen Rechenprogramm berechnet worden. Die Datenpunkte, die den jeweiligen Ausgleichsfunktionen in Abb. 16 bis Abb. 19 zugrundeliegen, sind in die Abbildungen mit eingetragen, um deutlich zu machen, wie weit die errechneten Linien von den erhobenen Daten unterstützt werden.

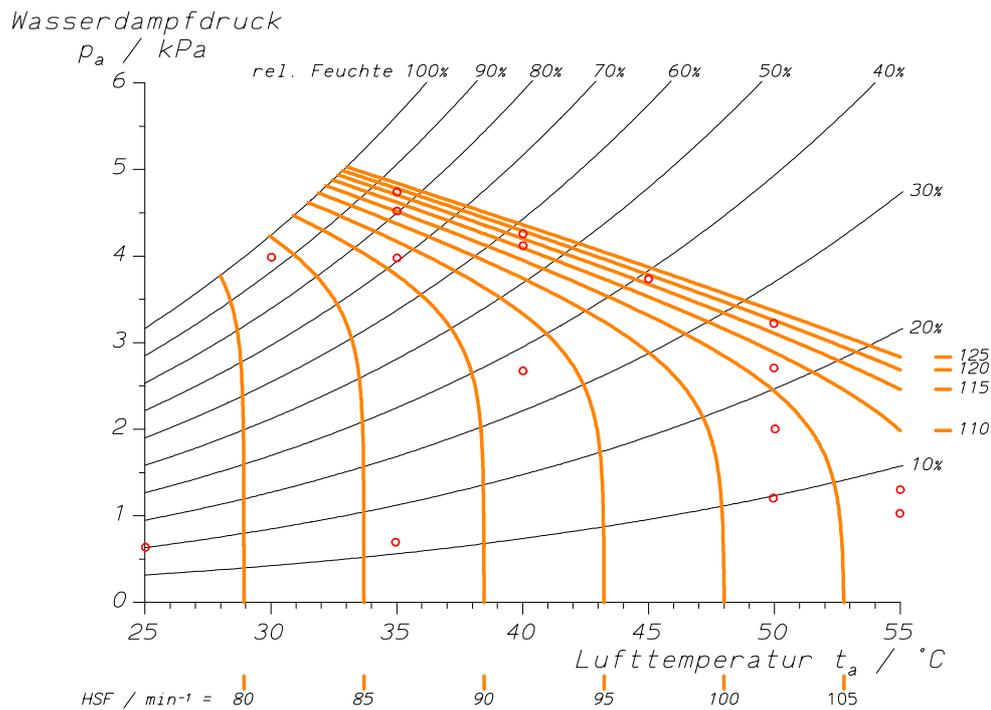


Abb. 16: Herzschlagfrequenz bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a (in einem Raster von 5°C) und Wasserdampfdrücken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

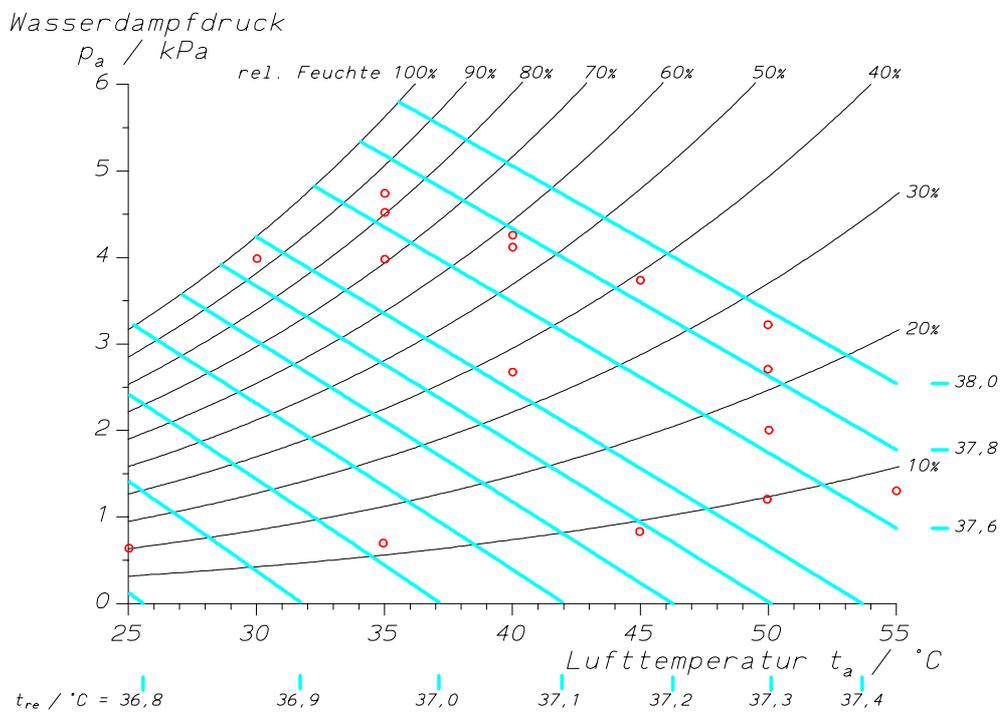


Abb. 17: Rektaltemperatur t_{re} bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a und Wasserdampfdrücken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

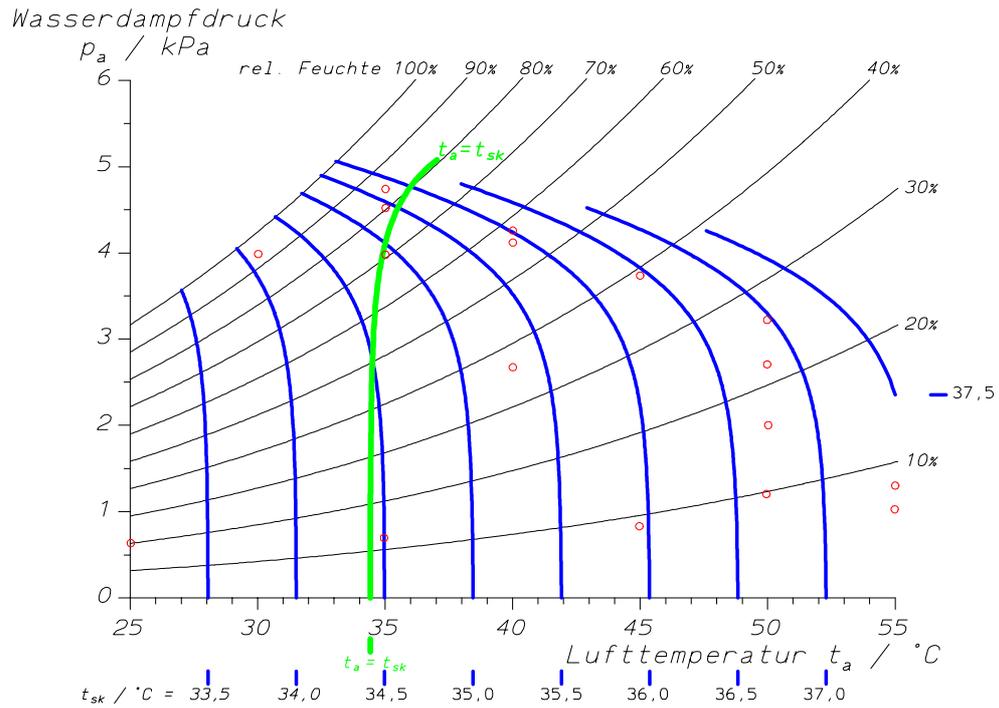


Abb. 18: Hauttemperatur t_{sk} bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a und Wasserdampfdrucken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

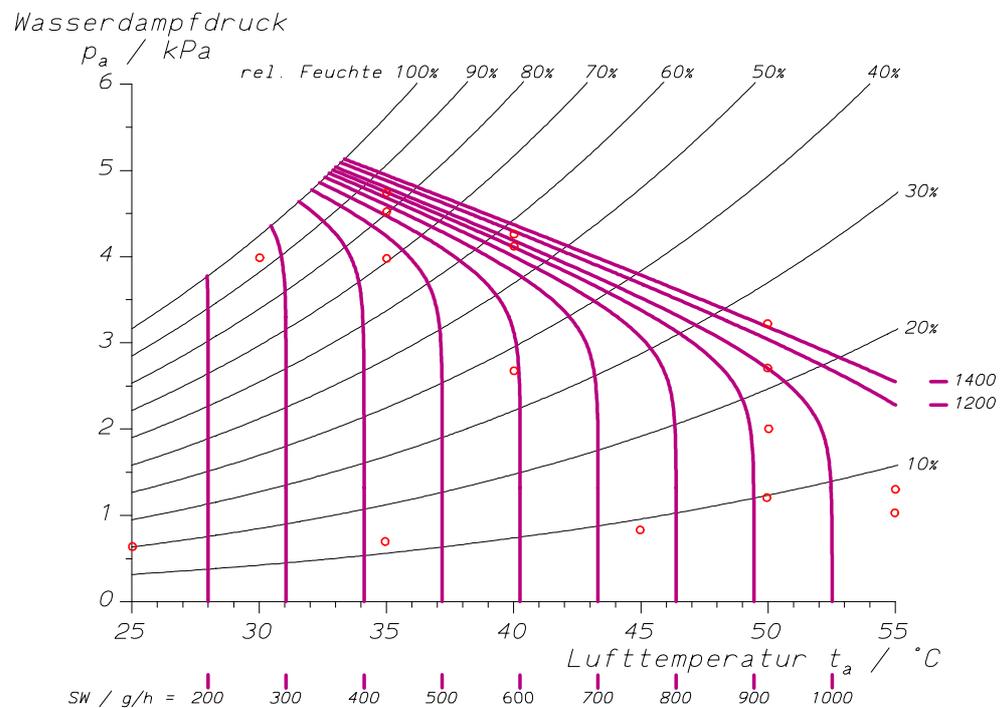


Abb. 19: Schweißrate SW bei unterschiedlichen Lufttemperaturen t_a und Wasserdampfdrucken p_a : Datenpunkte mit eingezeichneten Ausgleichskurven für vorgegebene Lufttemperaturen (Proband A).

In Abb. 18 ist zusätzlich eine Linie $t_a = t_{sk}$ eingezeichnet worden (zum Berechnungsverfahren siehe Kapitel 4.3.3.3), längs derer kein konvektiver Wärmetransport stattfindet.

4.3.3.3 Vergleich von Ausgleichsfunktionen

Die ermittelten Ausgleichsfunktionen erlauben die Berechnung weiterer Kenngrößen im gesamten Bereich des psychrometrischen Diagramms. Da zum einen in den betreffenden Versuchsserien (z.B. bei unterschiedlicher Windgeschwindigkeit) die Einzelversuche nicht immer bei den gleichen Bedingungen von (t_a, p_a) durchgeführt werden konnten oder wurden und zum anderen die jeweilige Streuung der einzelnen Datenpunkte durch die Ausgleichsfunktionen ausgeglichen wird, bietet es sich an, zum Vergleich zweier Versuchsserien die jeweiligen Ausgleichsfunktionen zu vergleichen, um Aussagen im gesamten Bereich der durchgeführten Untersuchungen – in dem die Ausgleichsfunktionen definiert sind – innerhalb des psychrometrischen Diagramms zu erhalten. Dies soll hier an einem Beispiel gezeigt werden:

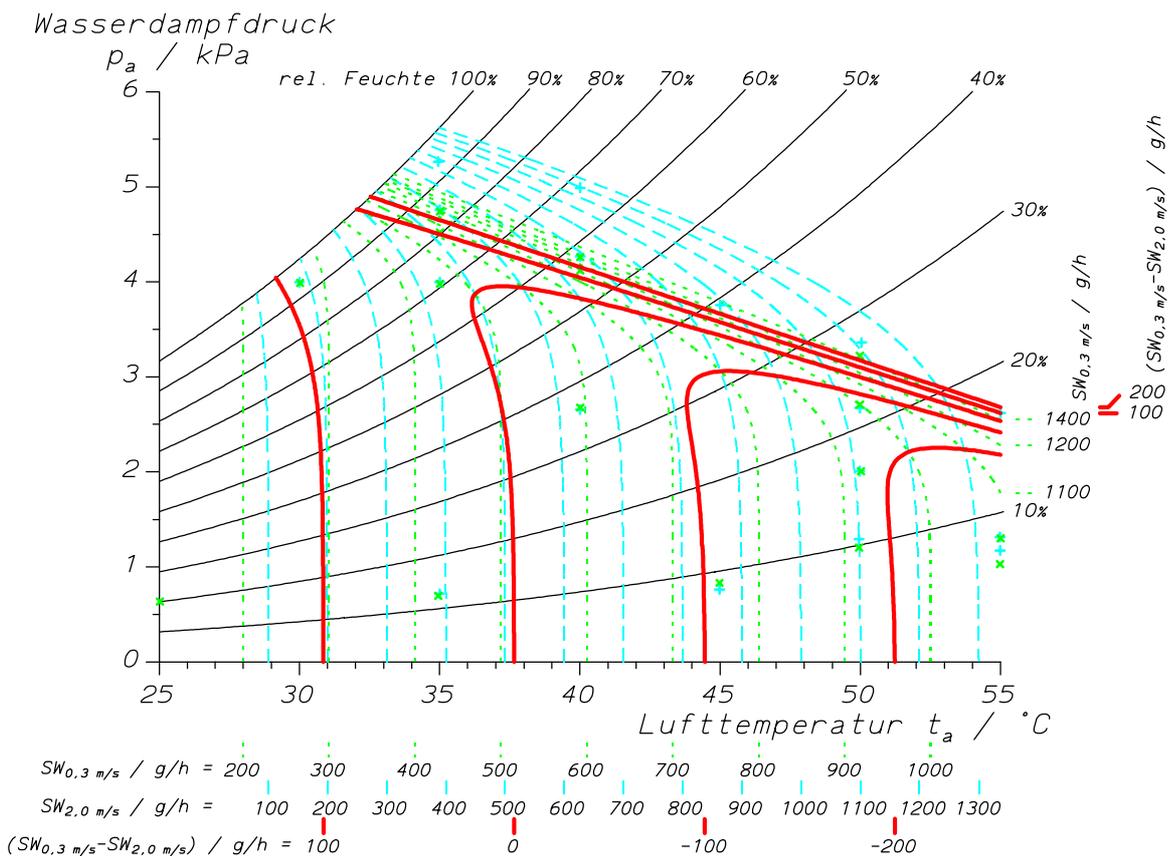


Abb. 20: Berechnung von Differenz-Äquivalenzlinien zur Darstellung der Unterschiede zwischen der Schweißrate SW in zwei Versuchsserien mit $v_a = 0,3 \text{ m/s}$ und $v_a = 2,0 \text{ m/s}$.

In Abb. 20 sind zunächst zwei Systeme von Äquivalenzlinien gestrichelt eingezeichnet, die die Ergebnisse zweier unterschiedlicher Versuchsserien mit $v_a = 0,3 \text{ m/s}$ und

$v_a = 2,0$ m/s darstellen. Die Werte (t_a, p_a) , bei denen die Messungen durchgeführt wurden, sind ebenfalls in das psychrometrische Diagramm eingezeichnet. Mit einem Rechenprogramm wurden nun Äquivalenzlinien für die Differenzen zwischen beiden Ausgleichssystemen berechnet und in das Diagramm eingetragen (die Differenz-Äquivalenzlinie für -200 g/h geht beispielsweise rechts unten im Diagramm durch die Schnittpunkte der Linien "1200 g/h bei $v_a = 2,0$ m/s" und "1000 g/h bei $v_a = 0,3$ m/s"). Da für $v_a = 2,0$ m/s weit höhere Klimabelastungen möglich waren als für $v_a = 0,3$ m/s erstreckt sich das zugehörige Äquivalenzliniensystem auch weiter in den feucht-warmen Bereich des psychrometrischen Diagramms; die Berechnung von Differenz-Äquivalenzlinien ist natürlich nur in Bereichen des psychrometrischen Diagramms sinnvoll, in dem beide Ausgleichssysteme von Meßdaten gestützt sind. – In dieser Weise wurde auch die Linie $t_a = t_{sk}$ in Abb. 18 berechnet.

4.4 Mittlere Äquivalenzlinien für vier Probanden

Zur Berechnung von Ausgleichsfunktionen für mehrere Probanden wurden die jeweiligen Ausgleichsfunktionen gemittelt, statt Ausgleichsfunktionen für Datengesamtheit zu errechnen: Es sollen in der Auswertung die Eigenschaften der Ausgleichssysteme (z.B. ein mögliches Schwellenwertverhalten) erhalten bleiben.

Natürlich ist die Abweichung der Datenpunkte von dem mittleren Ausgleichssystem höher als in einem Ausgleichssystem für einen einzelnen Probanden; Einzelheiten gibt Tabelle 5 an.

Tabelle 5: Mittlerer quadratischer Fehler der Abweichung der Datenpunkte vom Ausgleichssystem für vier Probanden.

		Bewertung für einzelne Probanden				Mittleres Ausgleichssystem	
		A	B	E	F	Datenpunkte	A, B, E und F
Proband akklimatisiert $v_a = 0,3$ m/s	HSF / min^{-1}	3,2	3,2	2,6	2,1	63	6,2
	$t_{re} / ^\circ\text{C}$	0,064	0,12	0,099	0,091	62	0,18
	$t_{sk} / ^\circ\text{C}$	0,21	0,14	0,21	0,16	63	0,42
	$SW / \text{g/h}$	38	48	16	11	58	77

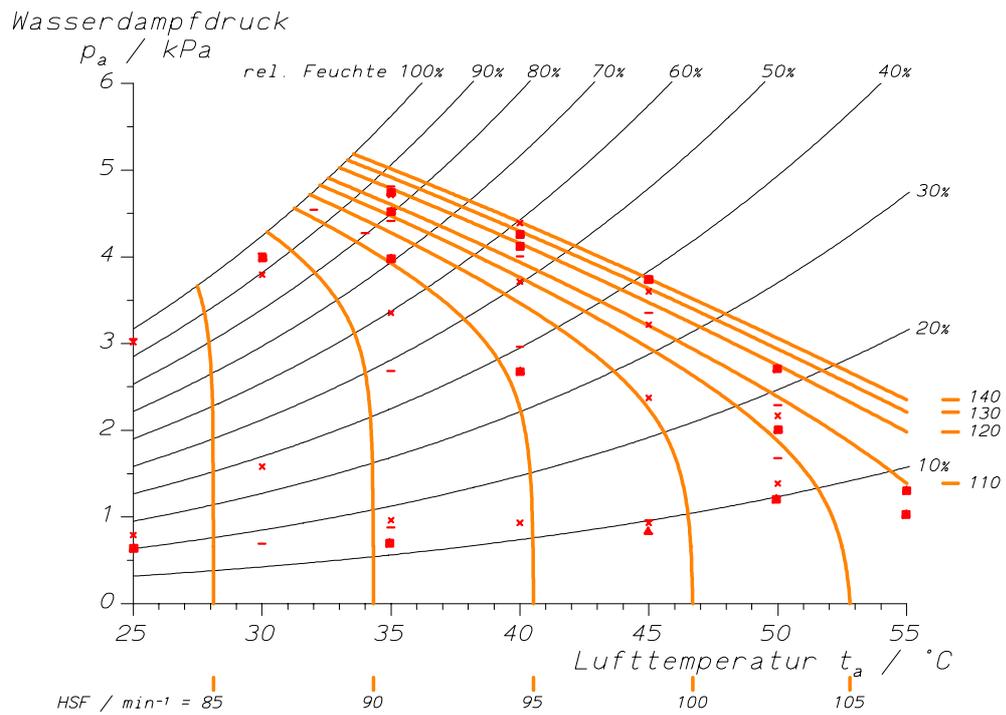


Abb. 21: Äquivalenzlinien der Herzschlagfrequenz für vier Probanden (A, B, E, F); Temperatur und Wasserdampfdruck der Meßwerte sind für die einzelnen Probanden mit unterschiedlichen Symbolen im psychrometrischen Diagramm markiert.

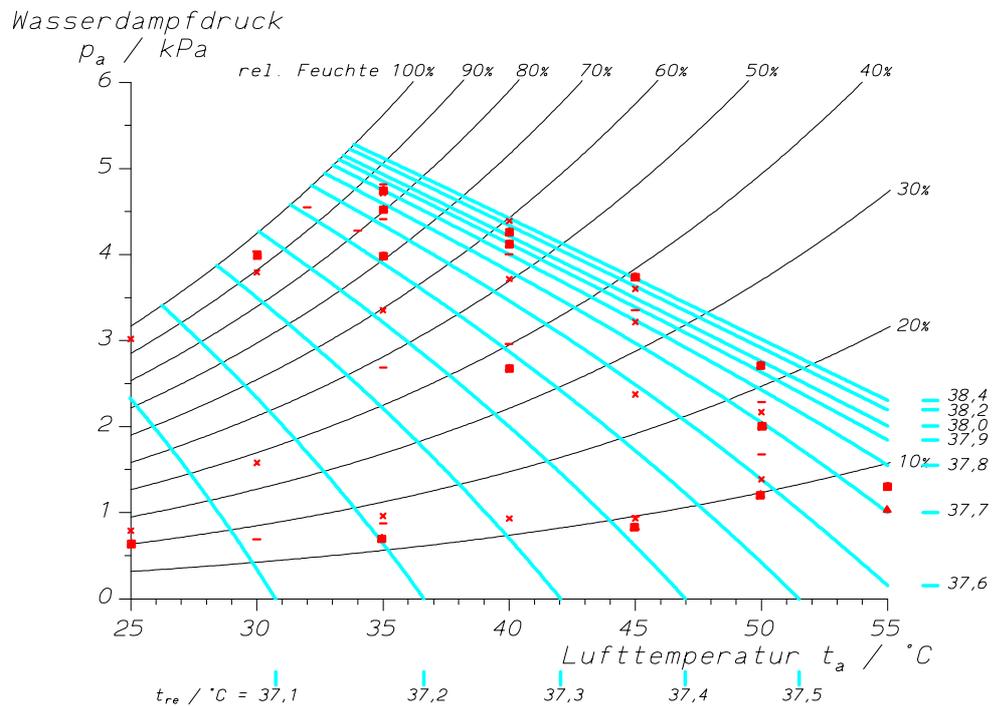


Abb. 22: Äquivalenzlinien der Rektaltemperatur t_{re} für vier Probanden (A, B, E, F); Temperatur und Wasserdampfdruck der Meßwerte sind für die einzelnen Probanden mit unterschiedlichen Symbolen im psychrometrischen Diagramm markiert.

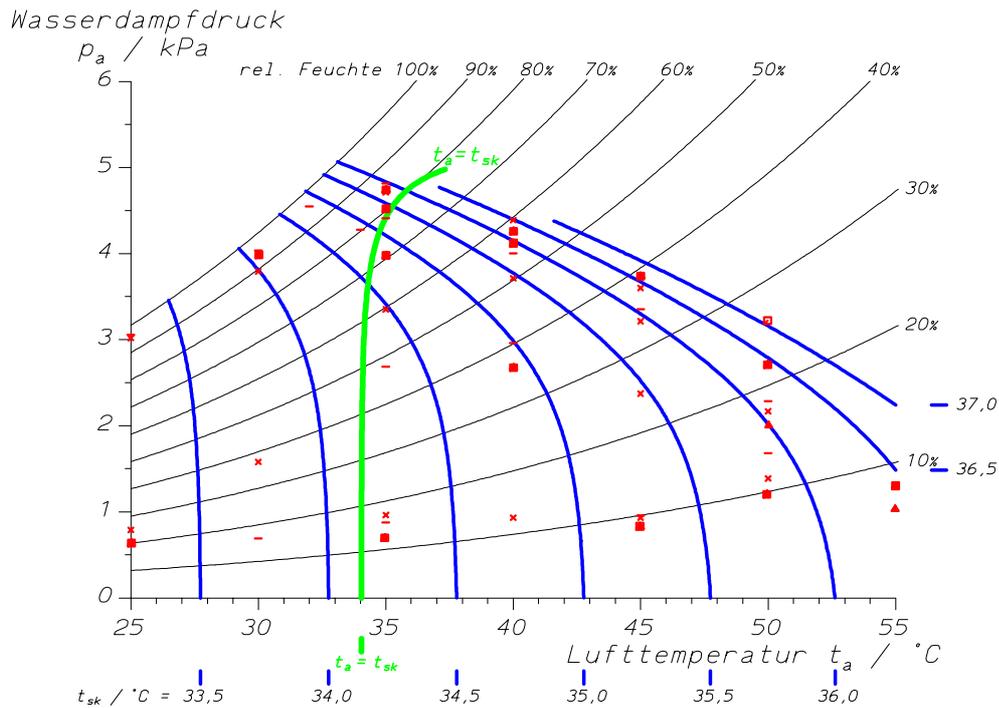


Abb. 23: Äquivalenzlinien der Hauttemperatur t_{sk} für vier Probanden (A, B, E, F); Temperatur und Wasserdampfdruck der Meßwerte sind für die einzelnen Probanden mit unterschiedlichen Symbolen im psychrometrischen Diagramm markiert. – Zusätzlich ist die Linie " $t_a = t_{sk}$ " eingezeichnet; entlang dieser Linie findet kein konvektiver Wärmeaustausch statt.

Die Äquivalenzlinien für vier Probanden (Abb. 21 - Abb. 24) ähneln im Verlauf den Linienfeldern für einen Probanden.

Abb. 25 stellt ein „Kennlinienfeld“ für den Wärmetransport aus dem Körper dar: t_{sk} hängt einerseits von der inneren Wärmeleitung und der peripheren Durchblutung ab – d.h. vom inneren Wärmetransport im Körper – und andererseits von der Schweißverdampfung, der Bekleidung (als Wärmewiderstand für den Wärmeübergang von der Haut in die Umgebung und Diffusionswiderstand für den auf der Haut verdampften Schweiß) und den Klimaparametern (vgl. Abb. 14).

Der innere Wärmetransport WF_i – vom Körperkern zur Körperoberfläche – kann nach SAWKA & WENGER 1988 [324] wie folgt beschrieben werden:

$$WF_i = (SkBF \cdot 3.85 \text{ kJ} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} + K_0) \cdot (t_c - t_{sk}) \quad (3)$$

$SkBF$ ist in (3) die mittlere Hautdurchblutung in l/s. K_0 ist die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Gewebe im Fall, daß keine Durchblutung vorhanden ist; K_0 hängt von der Größe der Körperoberfläche und der Dicke des Unterhautfettgewebes ab und liegt typischerweise zwischen 10 W/°C und 18 W/°C (HARDY & DuBOIS [123]). Der Wert von " $t_c - t_{sk}$ " kann durch " $t_{re} - t_{sk}$ " in Abb. 25 angenähert werden; im Fall klimatischer Belastung in Wärme wird der innere Wärmetransport wesentlich durch die Hautdurchblutung bestimmt, so daß der innere Wärmetransport proportional zu $SkBF \cdot (t_{re} - t_{sk})$ ist.

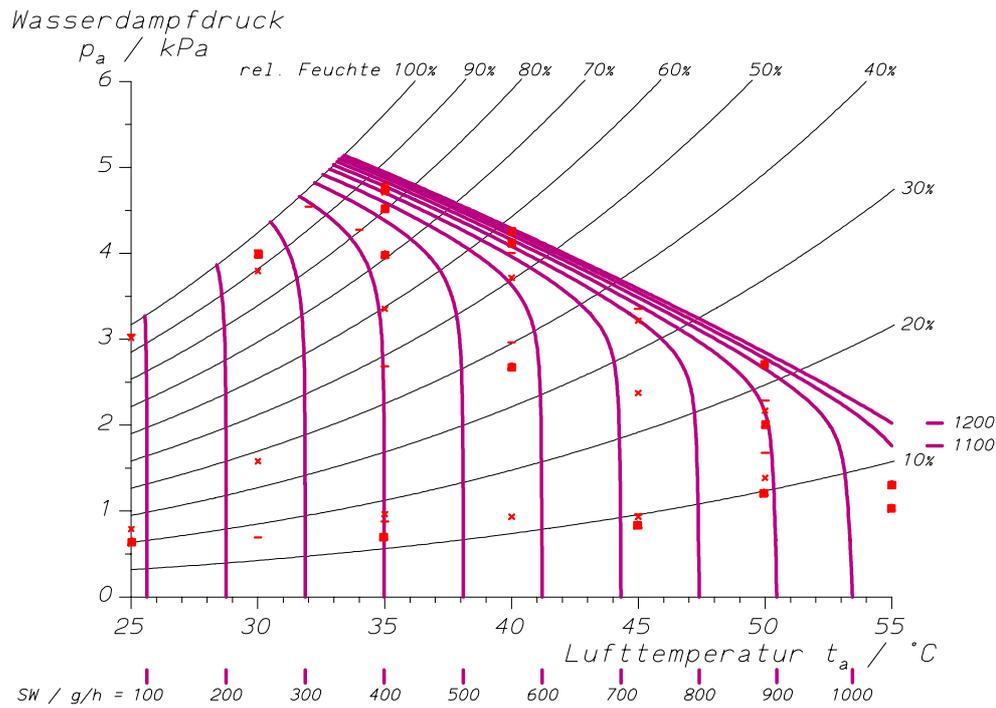


Abb. 24: Äquivalenzlinien der Schweißrate SW für vier Probanden (A, B, E, F); Temperatur und Wasserdampfdruck der Messwerte sind für die einzelnen Probanden mit unterschiedlichen Symbolen im psychrometrischen Diagramm markiert.

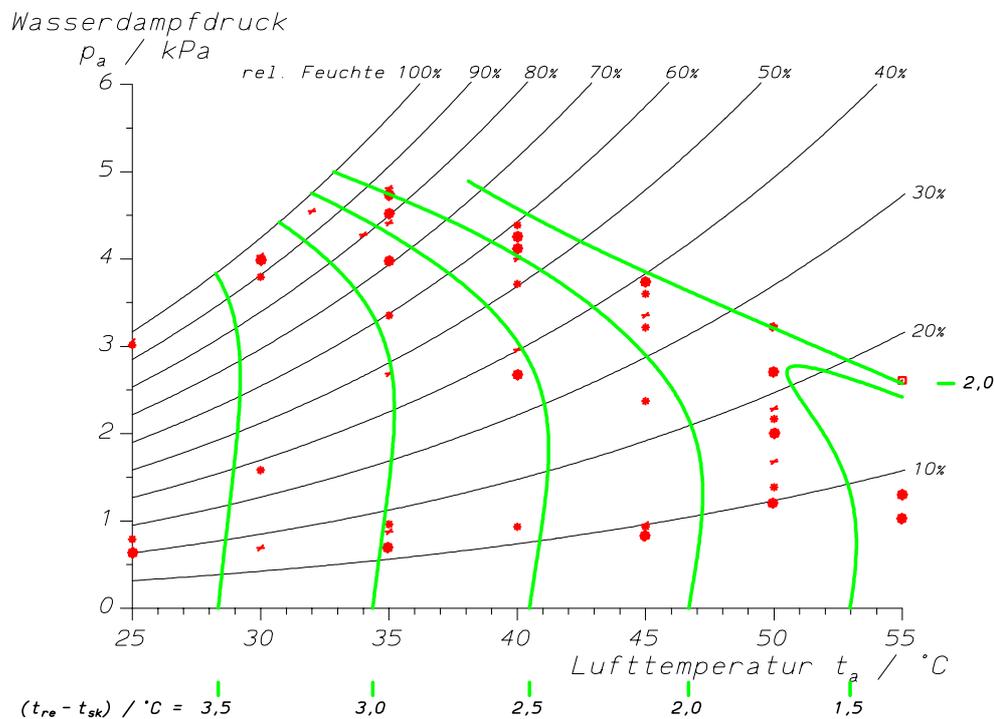


Abb. 25: Äquivalenzlinien der Differenz " $t_{re} - t_{sk}$ " für vier Probanden (A, B, E, F); Temperatur und Wasserdampfdruck der Messwerte sind für die einzelnen Probanden mit unterschiedlichen Symbolen im psychrometrischen Diagramm markiert. Die Differenz $t_{re} - t_{sk}$ stellt den Temperaturgradienten zwischen dem Körperinneren und der Körperoberfläche dar.

4.5 Einfluß der Akklimatisation auf die Beanspruchung

Als Beispiel für die Differenz zwischen gemittelten Ausgleichssystemen zeigt Abb. 26 zwei Ausgleichslinien – bei $t_a = 35\text{ °C}$ und $t_a = 45\text{ °C}$ – für die Rektaltemperatur von vier Probanden mit den dazugehörigen Meßwerten, jeweils für akklimatisierte und nicht akklimatisierte Klimaexpositionen. Im unteren Diagramm sieht man, daß der Unterschied in den Rektaltemperaturen mit zunehmender Luftfeuchte immer weiter abnimmt: bei $t_a = 35\text{ °C}$ wird dieser Unterschied fast zu null, bei $t_a = 45\text{ °C}$ schneiden sich die Linien der mittleren Beanspruchung sogar. – In Abb. 28 kann man dieses Verhalten direkt ablesen: oberhalb der t_a -Achse bei 45 °C beträgt die Differenz der Rektaltemperaturen null bei einem Wert von $p_a \approx 3,7\text{ kPa}$; oberhalb von 35 °C liegt keine solche Differenz-Äquivalenzlinie.

In dieser Weise lassen sich aus den Diagrammen in Abb. 27 bis Abb. 31 gut die Unterschiede zwischen den Versuchsserien mit nicht-akklimatisierten und den akklimatisierten Probanden ablesen.

Die Diagramme für die mittleren Äquivalenzlinien für HSF , t_{re} , t_{sk} , SW und " $t_{re} - t_{sk}$ " – entsprechend Abb. 21 - Abb. 25 – sind für vier nicht-akklimatisierte Probanden in Anhang A.2 (Abb. A - 10 bis Abb. A - 14) abgebildet. Da nicht alle Versuchsserien von den gleichen Probanden durchlaufen wurden, sind für diese Auswertung die Daten der Probanden A, B, E und F (entsprechend Tabelle 4) verwendet worden.

Für die Herzschlagfrequenz ergibt sich in Abb. 27 eine deutliche Verringerung für die akklimatisierten Probanden längs der Grenze, wo sich gerade noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht einstellt: sowohl im feucht-warmen Bereich, als auch im trocken-heißen Klimabereich ist eine geringere Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems zu beobachten.

Für die Rektaltemperatur läßt sich in Abb. 28 eine Verringerung für akklimatisierte Probanden nur im trocken-heißen Klimabereich – oberhalb von $t_a \approx 50\text{ °C}$ – finden; dies ist überraschend, weil ja die Akklimatisation im feucht-warmen Klimabereich – vgl Kapitel 4.3 – durchgeführt wurde. Es entspricht aber den Ergebnissen von PIEKARSKI 1985 ([294], Abb. 96, 103 und 104) während der Akklimatisationsverläufe, daß nach der ersten Woche der Akklimatisation für die Rektaltemperatur kein weiterer Abfall festzustellen ist. Diese Ergebnisse sind möglicherweise durch die Wahl eines feucht-warmen Klimas für die Akklimatisation sowie durch das – vgl. Kapitel 4.3 – verhältnismäßig niedrige Kriterium für den Abbruch der Exposition bei $t_{re} = 38,5\text{ °C}$ bedingt.

Die Hauttemperatur zeigt nach Akklimatisation (Abb. 29) im feucht-warmen Bereich eine leichte Abnahme und im trocken-heißen Bereich eine Tendenz zur Abnahme; im komfortablen Bereich dagegen liegt eine leichte Zunahme – vermutlich durch die während der Akklimatisation verbesserte Hautdurchblutung bedingt – vor.

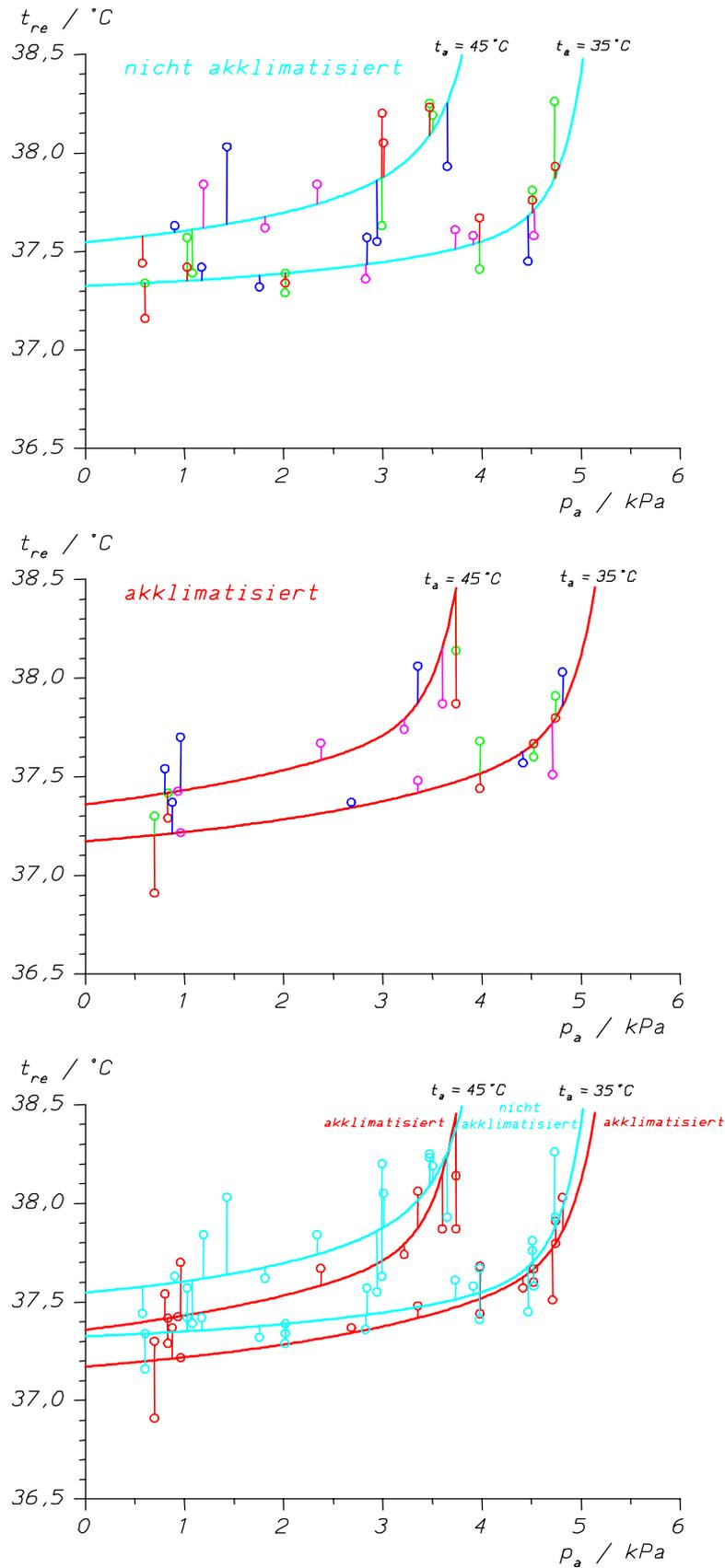


Abb. 26: Darstellung der Differenz von Ausgleichskurven für die mittlere Rektaltemperatur t_{re} von 4 Probanden (A, B, E, F); die Darstellung veranschaulicht die Differenzäquivalenzlinien in Abb. 28 für $t_a = 35^\circ\text{C}$ und $t_a = 45^\circ\text{C}$.

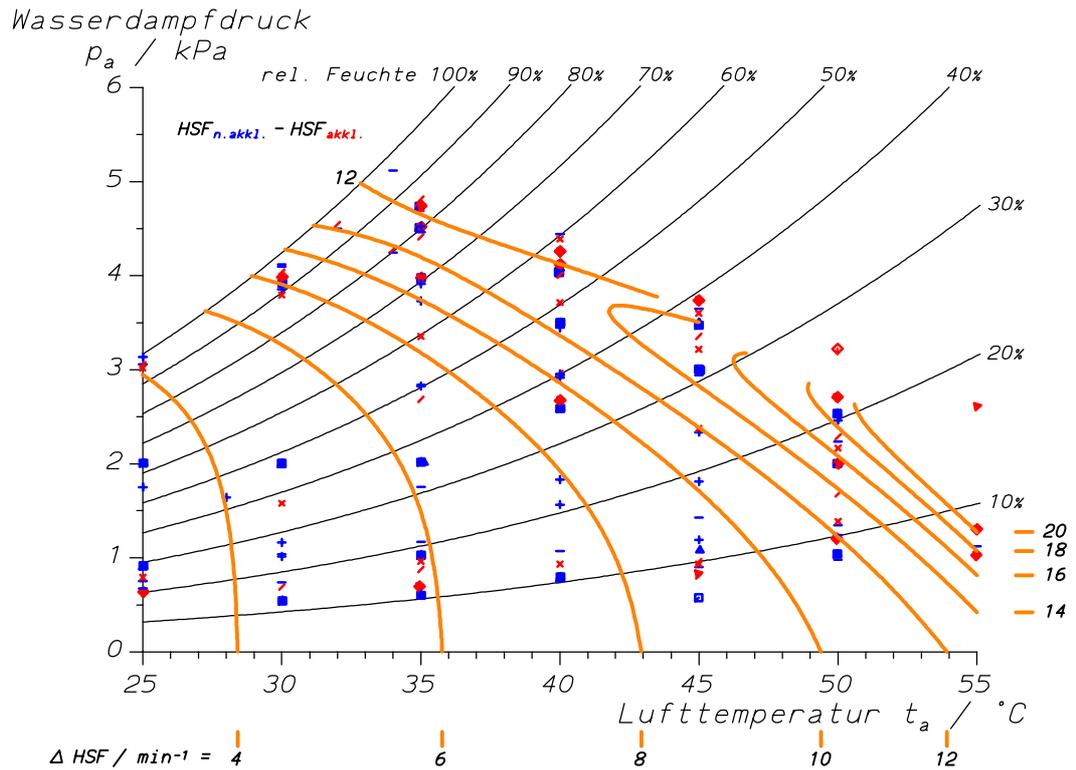


Abb. 27: Veränderung der Herzschlagfrequenz nach Akklimation dargestellt im psychrometrischen Diagramm (4 Probanden; A, B, E, F); die Parameterkombinationen (t_a , p_a), bei denen gemessen wurde, sind für die Probanden mit unterschiedlichen Symbolen markiert.

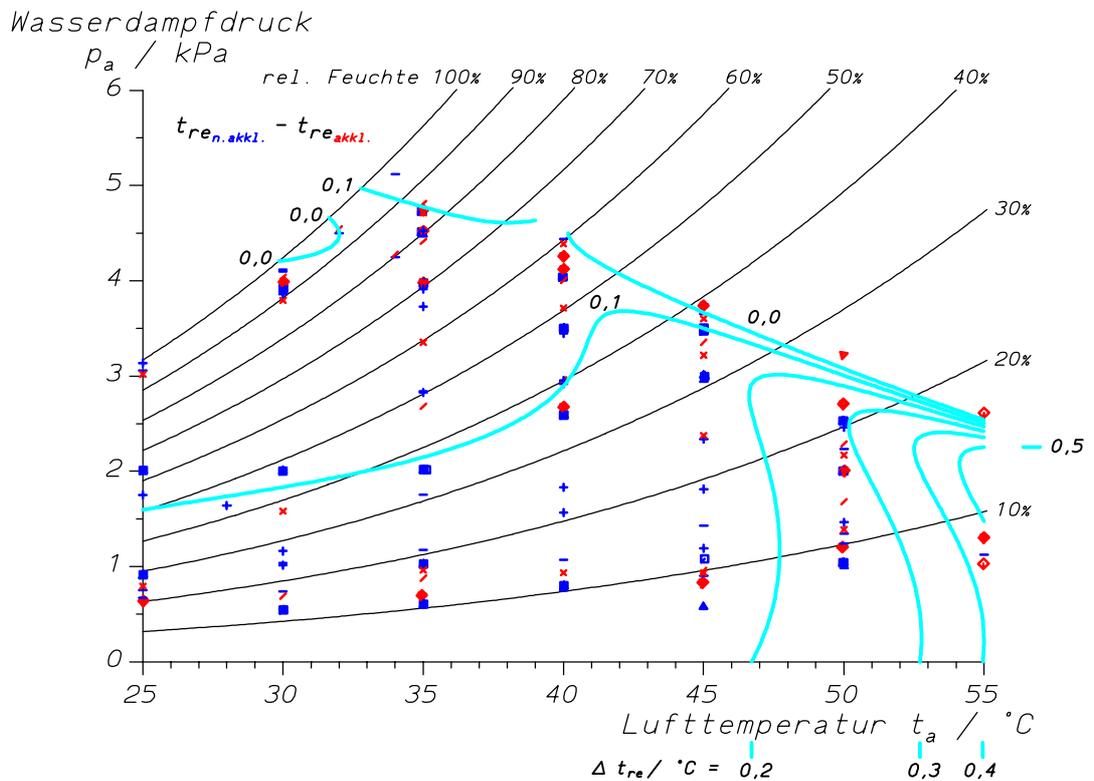


Abb. 28: Veränderung der Rektaltemperatur t_{re} nach Akklimation (4 Probanden; A, B, E, F).

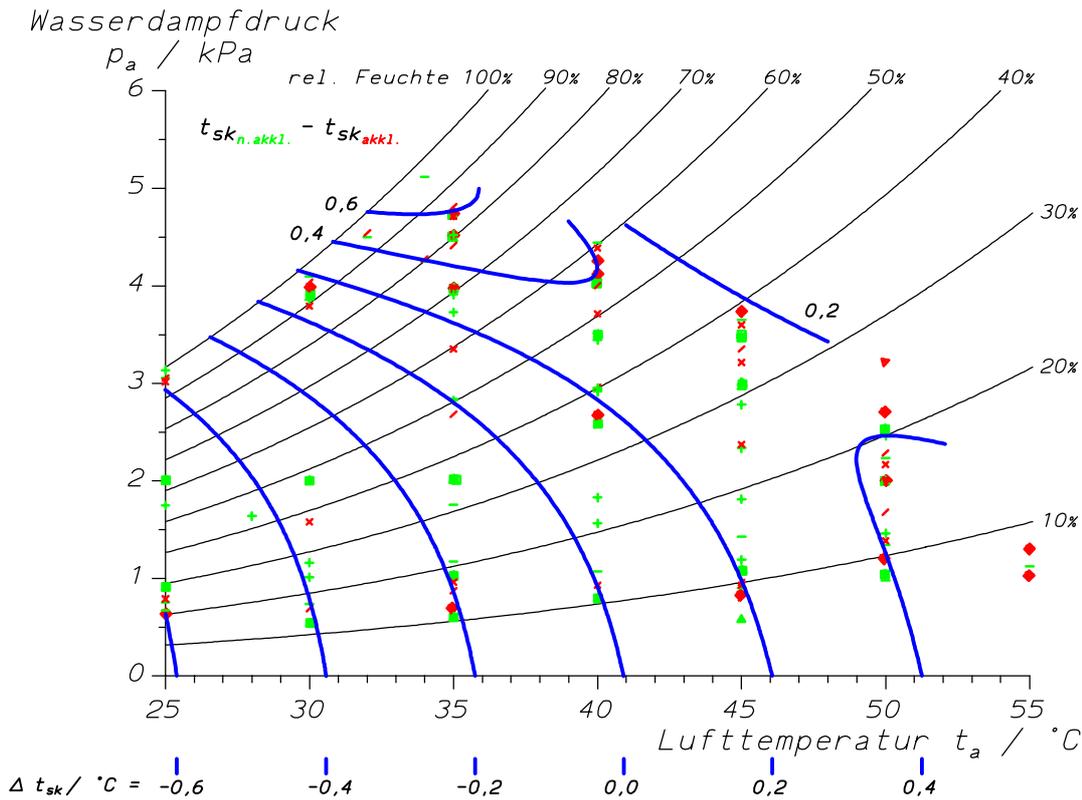


Abb. 29: Veränderung der Hauttemperatur t_{sk} nach Akklimation (4 Probanden; A, B, E, F).

Die Schweißrate (Abb. 30) zeigt nur im Grenzbereich des psychrometrischen Diagramms, wo sich gerade noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht einstellen kann, eine Veränderung: im trocken-heißen Bereich findet man für akklimatisierte Probanden eine leichte Abnahme der Schweißproduktion, die aber bei den dort vorhandenen hohen Werten der Schweißrate (Abb. 24) kaum eine Rolle spielt. Im feucht-warmen Bereich findet eine deutliche Erhöhung der Schweißproduktion statt; dies entspricht den Angaben in der Literatur (siehe Kapitel 2.3.2.3).

Der innere Temperaturgradient (Abb. 31) zeigt für akklimatisierte Probanden eine tendenzielle Abnahme im Komfortbereich, die der erhöhten Hauttemperatur in Abb. 29 entspricht: durch die verbesserte Hautdurchblutung wird die Ankopplung des Körperkerns an die Körperschale verstärkt und somit die Wärmeabgabe an die Umgebung erhöht.

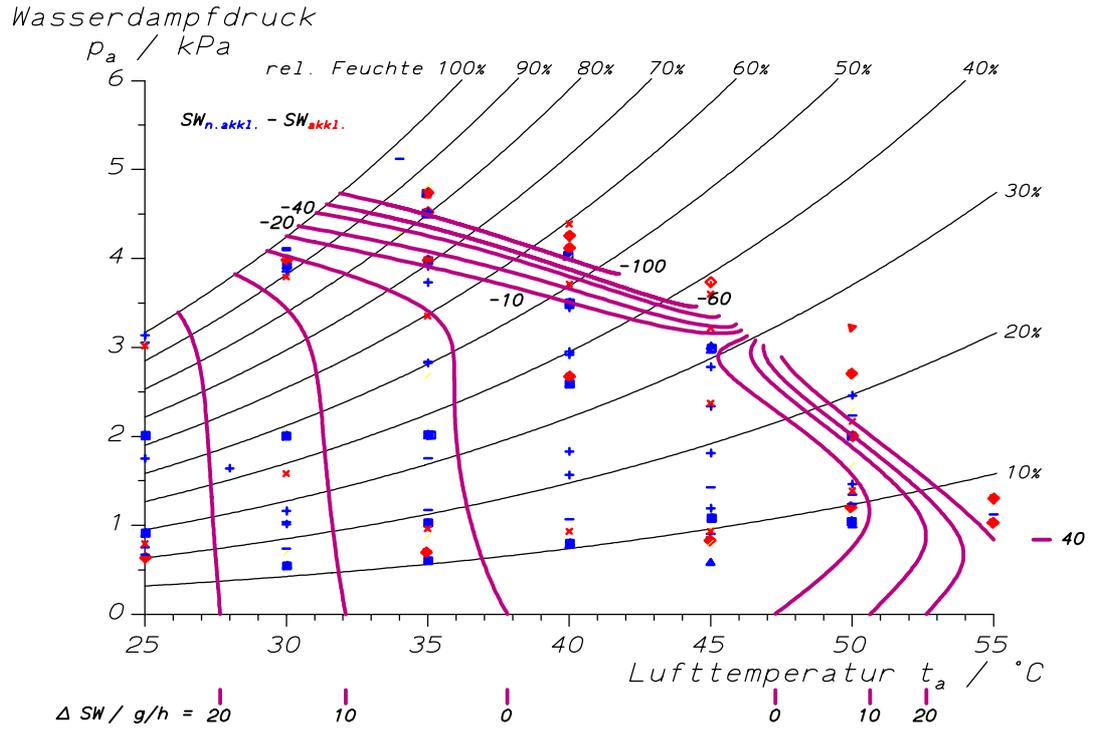


Abb. 30: Veränderung der Schweißrate SW nach Akklimatisation (4 Probanden; A, B, E, F).

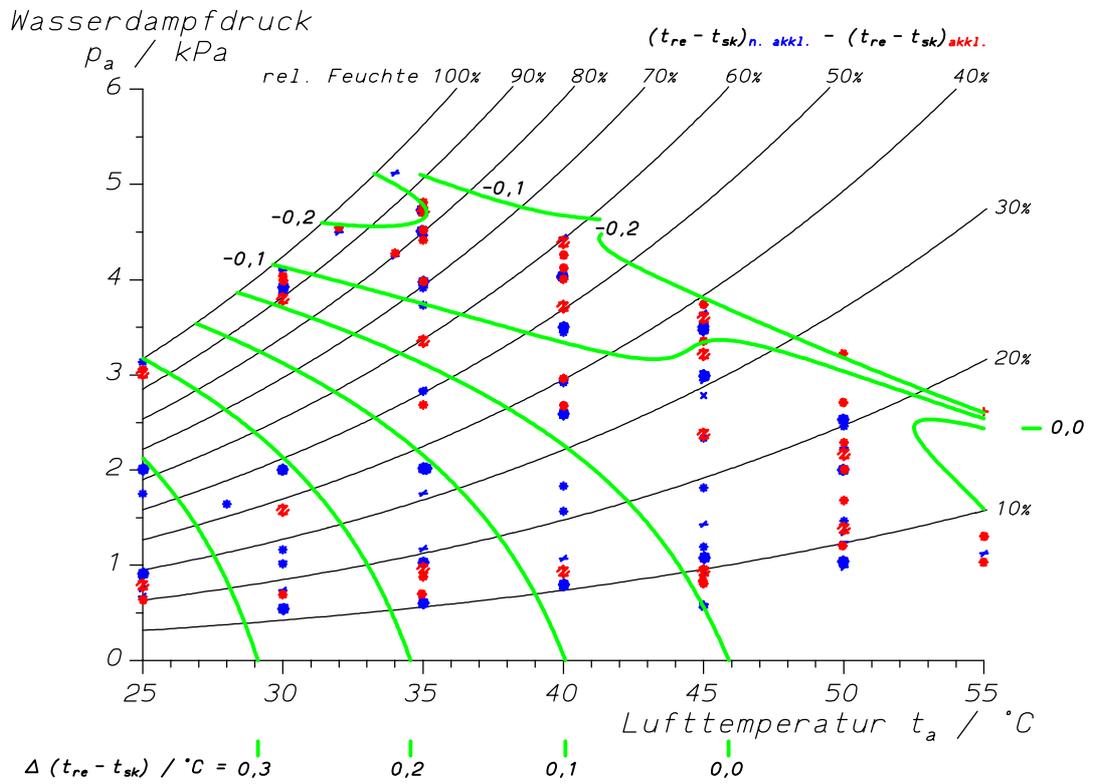


Abb. 31: Veränderung des Temperaturgradienten im Körper ($t_{re} - t_{sk}$) nach Akklimatisation, dargestellt im psychrometrischen Diagramm (4 Probanden; A, B, E, F).

4.6 Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Beanspruchung

Die Diagramme für die mittleren Äquivalenzlinien für vier akklimatisierte Probanden für HSF , t_{re} , t_{sk} , SW und " $t_{re} - t_{sk}$ " sind für $v_a = 2,0$ m/s in Anhang A.3 (Abb. A - 15 bis Abb. A - 19) abgebildet; hier werden die Diagramme für die Abweichungen der Beanspruchungsgrößen bei einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit angegeben (Abb. 32 bis Abb. 36).

Die Erhöhung der Windgeschwindigkeit bewirkt deutliche Erhöhung des konvektiven Wärmetransports: dies hat für hohe Lufttemperaturen erhöhte Wärmezufuhr und damit eine höhere Hauttemperatur sowie eine erhöhte Schweißrate, Herzschlagfrequenz und eine geringfügig erhöhte Rektaltemperatur zur Folge. – Bei Lufttemperaturen deutlich unterhalb der Hauttemperatur wird der Körper bei der höheren Windgeschwindigkeit stärker gekühlt und die Auswirkung der erhöhten Luftgeschwindigkeit kehrt sich um: Hauttemperatur und in der Folge Schweißrate und Herzschlagfrequenz nehmen ab; die Rektaltemperatur sinkt ebenfalls geringfügig ab. Im trockenen Bereich des psychrometrischen Diagramms zeigt sich im Bereich der Hauttemperatur zwischen $t_a = 35$ °C und 40 °C für alle Parameter ein „neutraler“ Punkt, bei dem sich die beschriebenen Auswirkungen umkehren.

Im feucht-warmen Klimabereich führt die erhöhte Windgeschwindigkeit einerseits zu einem höheren konvektiven Wärmeverlust (sofern die Lufttemperatur unterhalb der Hauttemperatur liegt) und andererseits zu einem schnelleren Austausch der hautnahen Luftschichten: hierdurch wird die Schweißverdampfung erhöht und der Anteil des abtropfenden Schweißes verringert. Das führt zu einer deutlichen Absenkung der Hauttemperatur, die eine deutliche Abnahme der Schweißrate, der Körpertemperatur und auch der Herzschlagfrequenz zur Folge haben. – Es entspricht der Erfahrung, daß im feucht-warmen Klima – für $t_a \leq t_{sk}$ – eine gegebene Klimabelastung (t_a, p_a) bei höherer Windgeschwindigkeit eine geringere Belastung zur Folge hat: dies geht aus den Nogrammen für BET und NET hervor (die auf der subjektiven Klimabewertung durch Probanden beruhen) und entspricht auch beispielsweise dem Verhalten von Bergleuten, die unter Tage in feucht-warmem Klima – wenn eine Wahlmöglichkeit besteht – vorzugsweise gegen die Wetter gehen (also gegen die Luftströmung) anstatt mit den Wetter, auch wenn sie dazu einen begrenzten Umweg in Kauf nehmen müssen.

Der innere Temperaturgradient im Körper verringert sich im trocken-heißen Klimabereich bei erhöhter Windgeschwindigkeit (Abb. 36); dies ist durch die Erhöhung der Hauttemperatur (Abb. 34) bedingt. Im Komfortbereich führt die Absenkung der Hauttemperatur zu einer Erhöhung des Temperaturgradienten. Im feucht-warmen Grenzbereich des thermoregulatorischen Gleichgewichts liegen sehr starke Anstiege dieser Differenz vor, die durch die starke Absenkung des inneren Temperaturgradienten in diesem Bereich bedingt sind (Abb. A - 19).

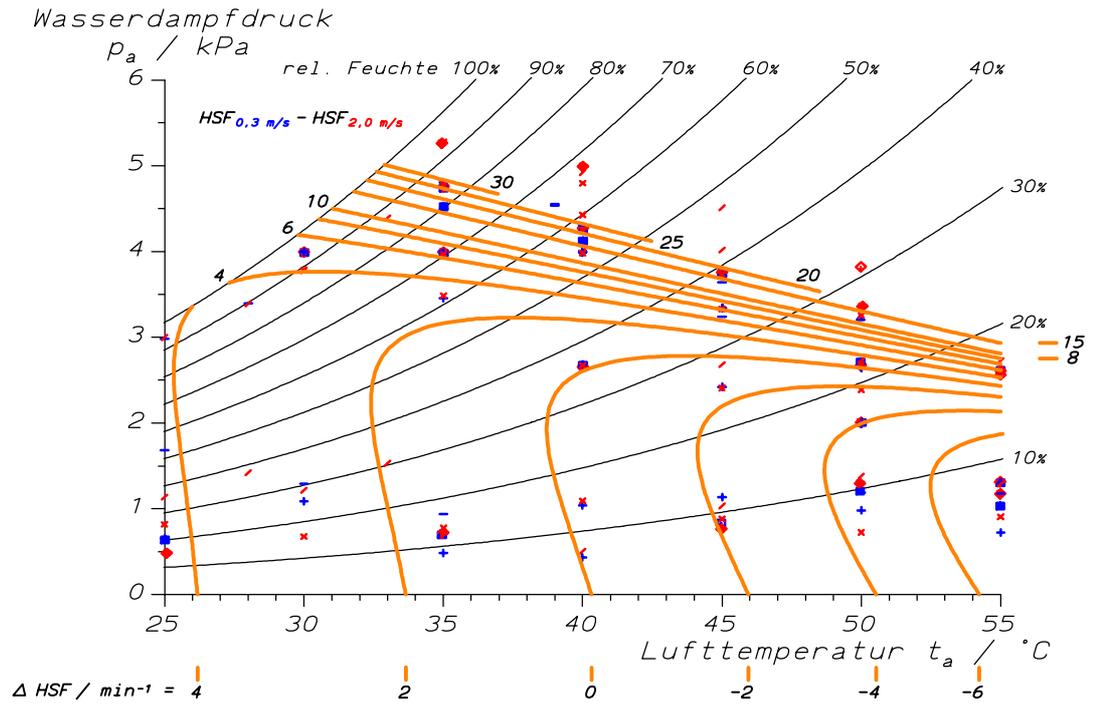


Abb. 32: Veränderung der Herzschlagfrequenz bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit v_a von 0,3 m/s auf 2,0 m/s (4 Probanden; A, B, C, D).

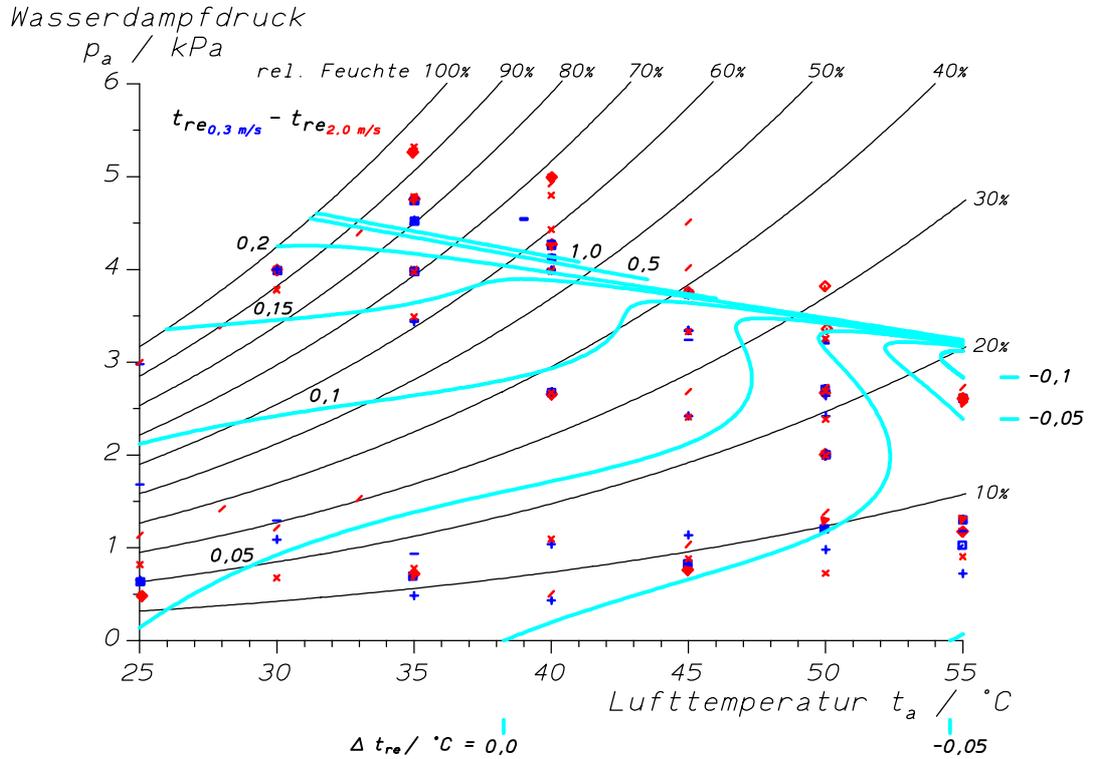


Abb. 33: Veränderung der Rektaltemperatur t_{re} bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit v_a von 0,3 m/s auf 2,0 m/s (4 Probanden; A, B, C, D).

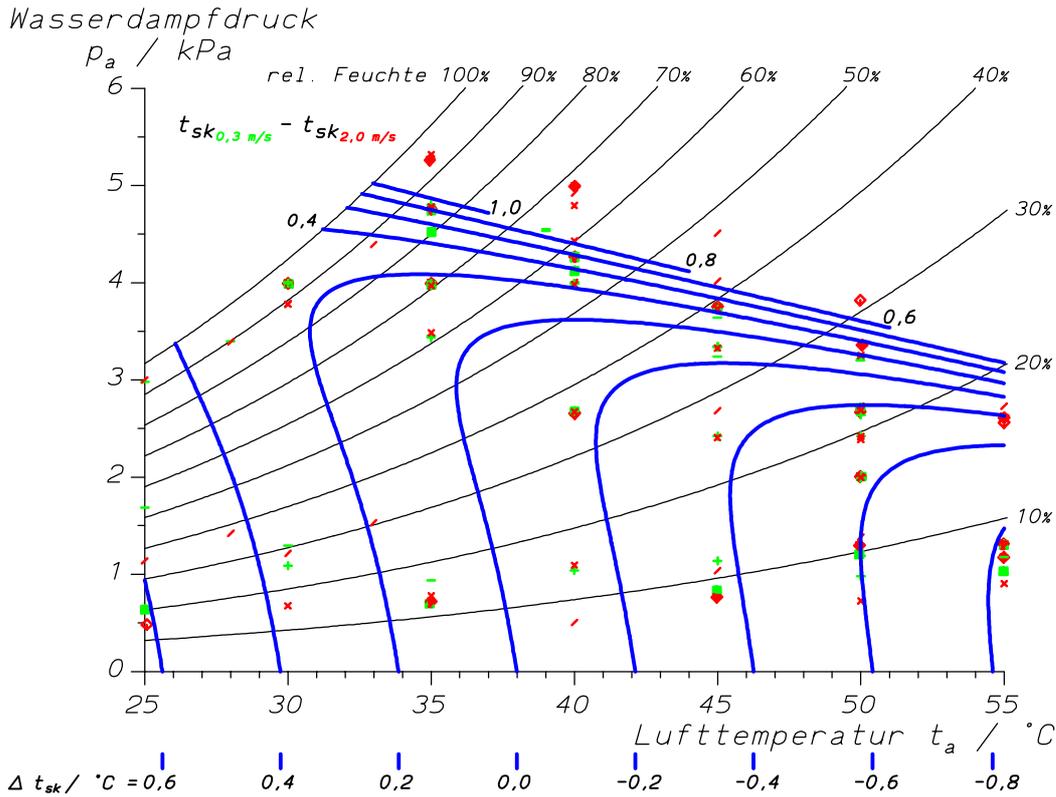


Abb. 34: Veränderung der Hauttemperatur t_{sk} bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit v_a von 0,3 m/s auf 2,0 m/s (4 Probanden; A, B, C, D).

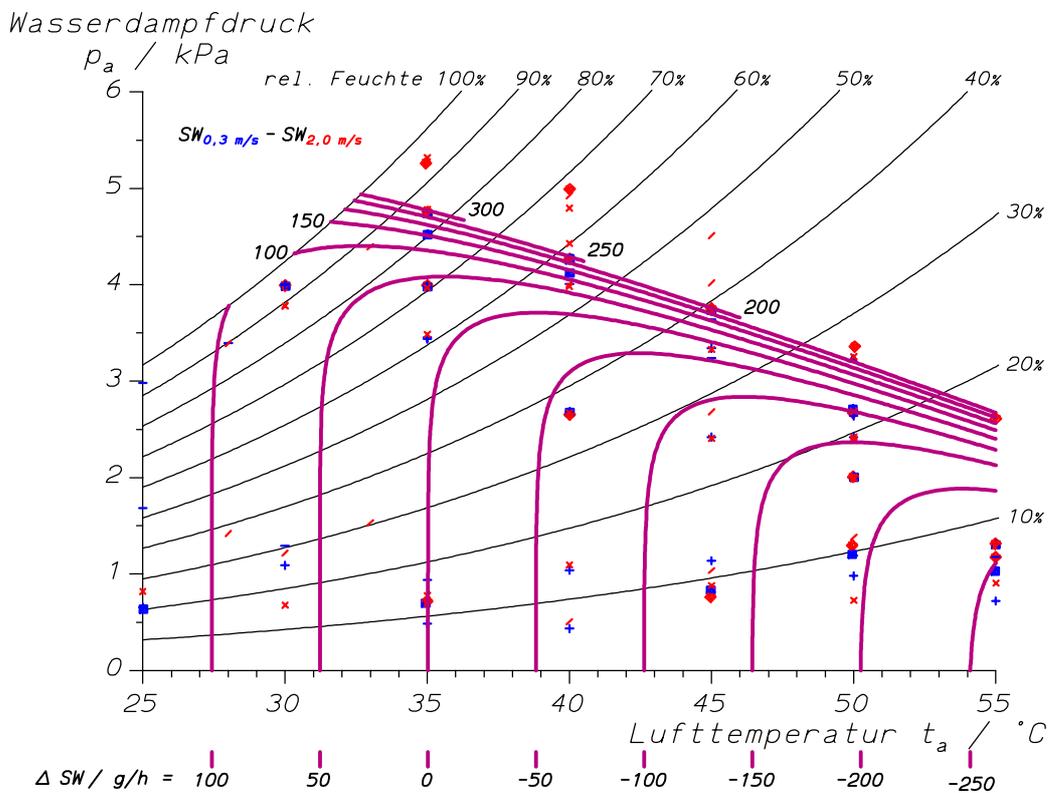


Abb. 35: Veränderung der Schweißrate SW bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit v_a von 0,3 m/s auf 2,0 m/s (4 Probanden; A, B, C, D).

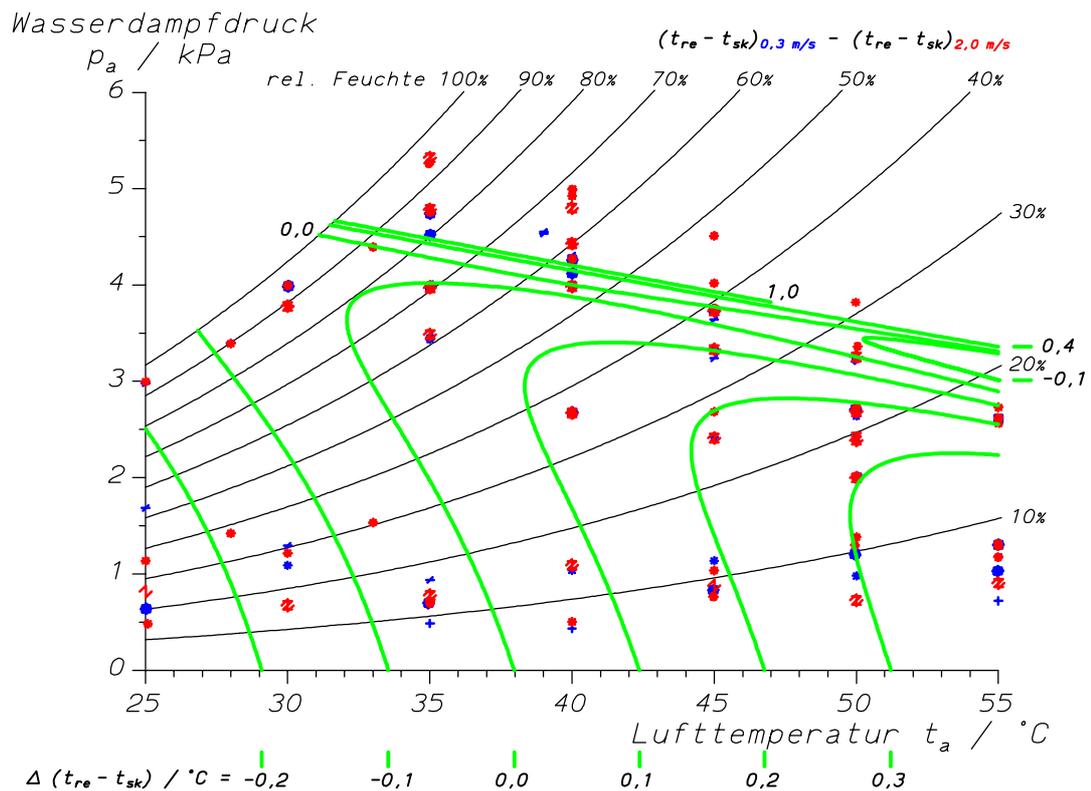


Abb. 36: Veränderung des inneren Temperaturgradienten $(t_{re} - t_{sk})$ bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit v_a von 0,3 m/s auf 2,0 m/s (4 Probanden; A, B, C, D).

4.7 Ermittlung des Wirkungsgrades der Schweißverdampfung⁵⁴

Für die Berechnung der Wärmebilanz des menschlichen Körpers durch analytische Modelle ist – insbesondere im feucht-warmen Klima, wo ein erheblicher Teil des Schweißes abtropft, und damit der Wirkungsgrad der Schweißverdampfung im Hinblick auf die Kühlung absinkt – die Kenntnis des Verdampfungswirkungsgrades des Schweißes als Funktion der Belastungsgrößen dringend erforderlich. Zur Bestimmung des Verdampfungswirkungsgrades sind nicht viele Untersuchungen durchgeführt worden – einige Arbeiten sind bei ALBER-WALLERSTRÖM & HOLMÉR 1985 [5] aufgeführt.

Um die Möglichkeiten aufzuzeigen, die sich durch die systematische Erfassung von Daten in Versuchsserien und die Auswertung der resultierenden Ausgleichssysteme ergeben, soll in diesem Abschnitt eine Methode zur indirekten Ermittlung des Wirkungsgrades der Schweißverdampfung aufgezeigt werden.

⁵⁴ Die hier referierten Ergebnisse wurden teilweise in [172] (KAMPMANN, B., P. MORFELD: *Zur Bedeutung der Hauttemperatur für die Beschreibung der Wärmebilanz des hitzebelasteten arbeitenden Menschen - Klimakammeruntersuchungen und analytische Modelle*. XIX. Kolloquium der Hessischen und Nordrhein-Westfälischen Lehrstühle für Arbeitsphysiologie, Arbeitswissenschaft und Arbeitsmedizin am 17. und 18. Dezember 1987 in der katholischen Akademie Schwerte. - Emeritierungskolloquium für Herrn Prof. H. G. Wenzel) vorgetragen.

ALBER-WALLERSTRÖM & HOLMÉR haben 1985 über eine Versuchsserie berichtet [5], bei der Probanden in einer Klimakammer Arbeit auf einem Fahrradergometer leisteten. Die Lufttemperatur in der Klimakammer wurde so justiert, daß sie jeweils der mittleren Hauttemperatur des untersuchten Probanden entsprach: es fand dann kein konvektiver Wärmeaustausch mehr statt. Der Energieumsatz des Probanden wurde durch die Messung des Sauerstoffverbrauchs bestimmt und der abtropfende Schweiß wurde in einer mit Paraffin gefüllten Wanne unterhalb des Ergometers aufgefangen. Aus der Bestimmung des gesamten Schweißverlustes und des abgetropften Anteils und dem Energieumsatz ließ sich dann der Wirkungsgrad der Schweißverdampfung für verschiedene Luftfeuchtigkeiten und vorgegebene Arbeitsschwere berechnen.

Einem ähnlichen Prinzip folgt die hier vorgestellte Auswertung: in Abb. 18 ist die Linie errechnet, längs der kein konvektiver Wärmeaustausch stattfindet, weil die Lufttemperatur gleich der Hauttemperatur ist ($t_a = t_{sk}$). Man kann nun längs der gleichen Linie in Abb. 19 nachsehen, ob und wie sich die Schweißrate längs dieser Linie verändert. Für $p_a = 0$ kPa würde man – wenn dort kein Schweiß abtropft – erwarten, daß die Verdampfungswärme, die der dort vorhandenen Schweißrate zugeordnet ist, dem Energieverbrauch entspricht, der durch die Messung des Sauerstoffverbrauchs bestimmt wurde (Mittelwert aller Meßwerte innerhalb der Versuchsserie) – wie Tabelle 6 zeigt, stimmen beide Werte für mehrere Versuchsserien recht gut überein; für die Versuchsserie mit einer Windgeschwindigkeit $v_a = 2,0$ m/s ergibt sich eine etwas höhere Differenz "E-BEU", die aber noch unter 10 % des Brutto-Energieumsatzes liegt.

Tabelle 6: Energiebilanz für $t_a = t_{sk}$ und $p_a = 0$ (vgl. z.B. Abb. 18: Aufpunkt der Linie auf der x-Achse) für verschiedene Versuchsserien (Proband A).

Serie	n	SW / g/h	E^{55} / W	BEU / W (MW±Std.Abw.)	(E - BEU) / W
akklimatisiert $v_a = 0,3$ m/s	17	410	276	278 ± 13	-2
akklimatisiert $v_a = 1,0$ m/s	13	414	279	274 ± 9	5
akklimatisiert $v_a = 2,0$ m/s	19	377	254	277 ± 14	-23
nicht akklimatisiert; $v_a = 0,3$ m/s	24	396	267	278 ± 13	-11

⁵⁵ Der Argumentation von WENGER [398] folgend wurde für die Berechnung der Verdampfungswärme der Wert von 2426 J/g für reines Wasser verwendet; Werte der Verdampfungswärme, die aus physiologischen Untersuchungen ermittelt werden, liegen geringfügig höher.

Abb. 37 gibt einen Satz von Linien mit: " $t_a - t_{sk} = \text{const.}$ " im psychrometrischen Diagramm wieder, der in gleicher Weise gewonnen wurde wie die Linie für $t_a = t_{sk}$ in Abb. 18; die Linien sind jeweils nur so weit gezogen, wie die Klimaexpositionen durch Datenpunkte belegt sind.

Der Verlauf der Hauttemperatur längs dieser Linien " $t_a - t_{sk} = \text{const.}$ " ist in Abb. 38 dargestellt: die Hauttemperatur erhöht sich längs dieser Linien um weniger als $1,5\text{ }^\circ\text{C}$. Durch das leichte Abknicken der Kurven im psychrometrischen Diagramm ist für den Strahlungsanteil in der Wärmebilanz zu berücksichtigen, daß die durch Strahlung transportierte Energie nicht in t_{sk} sondern in t_{sk}^4 linear ist; dieser Einfluß macht längs der Kurven allerdings deutlich weniger als 5 % des Strahlungsanteils aus: im Rahmen der Meßgenauigkeit der gemessenen Brutto-Energieumsätze (Tabelle 6) kann der Einfluß der unterschiedlichen Anteile der Wärmestrahlung in der Wärmebilanz längs der " $t_a - t_{sk} = \text{const.}$ "-Linien vernachlässigt werden.

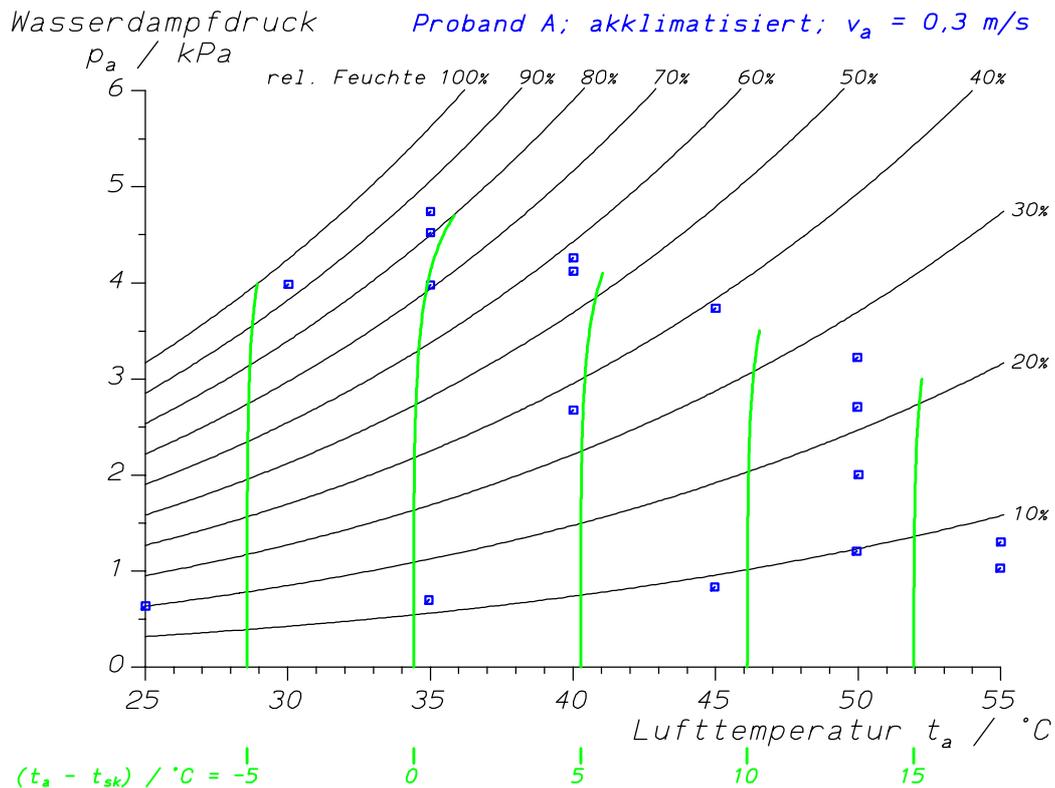


Abb. 37: Linien gleichen konvektiven Wärmeaustauschs im psychrometrischen Diagramm; die Meßpunkte der Versuchsserie sind eingezeichnet.

Die Schweißrate steigt längs dieser Linien " $t_a - t_{sk} = \text{const.}$ " jedoch beträchtlich an (Abb. 39) und erreicht z.B. für $t_a = t_{sk}$ bei $p_a = 4,5\text{ kPa}$ den 2,5-fachen Wert wie bei trockener Luft. Weil die Versuche im trockenen Bereich jeweils Wärmebilanzen im thermoregulatorischen Gleichgewicht besaßen, ist die bei $p_a = 0\text{ kPa}$ gemessene Schweißrate ausreichend, um die für den Ausgleich der Wärmebilanz erforderliche Verdampfungskühlung sicherzustellen – falls nicht schon bei $p_a = 0\text{ kPa}$ Schweiß abtropft. Da der konvekti-

ve Wärmeverlust längs der Linien mit " $t_a - t_{sk} = \text{const.}$ " konstant bleibt, muß der überschüssige Schweiß (oberhalb der gestrichelten Linien in Abb. 39) offenbar abtropfen. Falls der Proband im feucht-warmen Zustand kein thermoregulatorisches Gleichgewicht mehr erreichen könnte, würde entsprechend noch mehr Schweiß abtropfen, da die Verdampfungsleistung – die der in Abb. 39 gestrichelten Linien entspricht – nicht mehr vorläge. Thermoregulatorische *steady-state*-Zustände liegen aber fast bis zur Beanspruchungsgrenze in Abb. 37 vor.

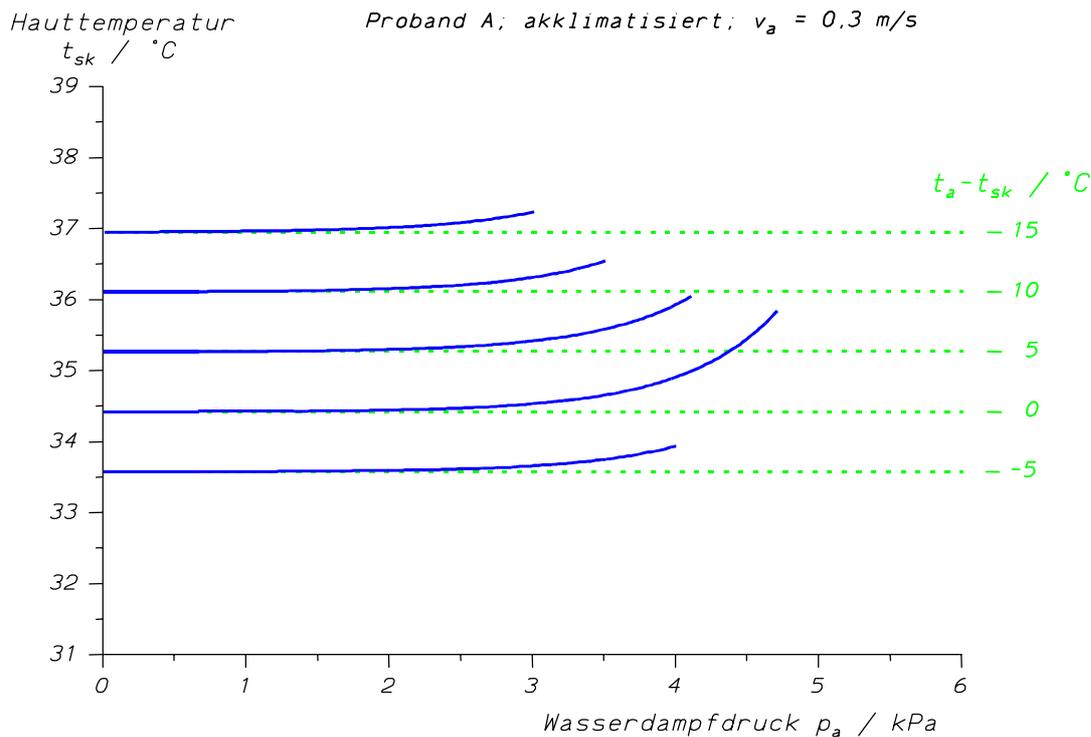


Abb. 38: Verlauf der Hauttemperatur t_{sk} längs einiger Linien mit $t_a - t_{sk} = \text{const.}$ (entsprechend Abb. 37).

Anhand dieser Überlegungen kann man nun die so erhaltenden abtropfenden Schweißmengen in ein psychrometrisches Diagramm eintragen; wegen der Schätzgenauigkeiten der Ausgleichskurven für die Schweißrate wurde als untere Grenze 50 g/h gewählt. Abb. 40 gibt die errechneten Abtropfraten für einen akklimatisierten Probanden bei $v_a = 0,3 \text{ m/s}$ Windgeschwindigkeit an, Abb. 42 für denselben Probanden bei $v_a = 2,0 \text{ m/s}$. Auffällig ist, daß in einem weiten Teil des psychrometrischen Diagramms kein Schweiß abtropft und nur für die jeweils oberen 1,0 bis 1,2 kPa ein Abtropfen errechnet wird – dieses Verhalten trifft für insgesamt 18 ausgewertete Versuchsserien zu. Um dieses Ergebnis zu untermauern, kann eine unabhängige Erhebung hinzugezogen werden: bei allen Expositionsversuchen wurde in den Arbeitspausen der Befeuchtungsgrad der Haut entsprechend Tabelle 7 eingeschätzt. Wenn Schweiß abtropft sollte Stufe 5 oder 6 vorhanden sein. Die Einschätzungen der dritten Expositionsstunde sind für die (t_a, p_a) -Werte der Versuche in die Diagramme eingezeichnet, wobei in Abb. 40 und Abb. 42 jeweils die Mittelwerte für die Einschätzung von Brust und Rücken und in Abb. 41 und Abb. 43 die (gleichgewichteten) Mittelwerte aller Einschätzungen in die

Diagramme eingetragen sind. Brust und Rücken repräsentieren den Körperstamm, an dem die Schweißproduktion schon auch im trocken-heißen Klimabereich annimmt, während die Schweißproduktion an den Extremitäten im feucht-warmen Klimabereich hohe Werte annimmt (vgl. Kapitel 2.3.2.3., S. 22).

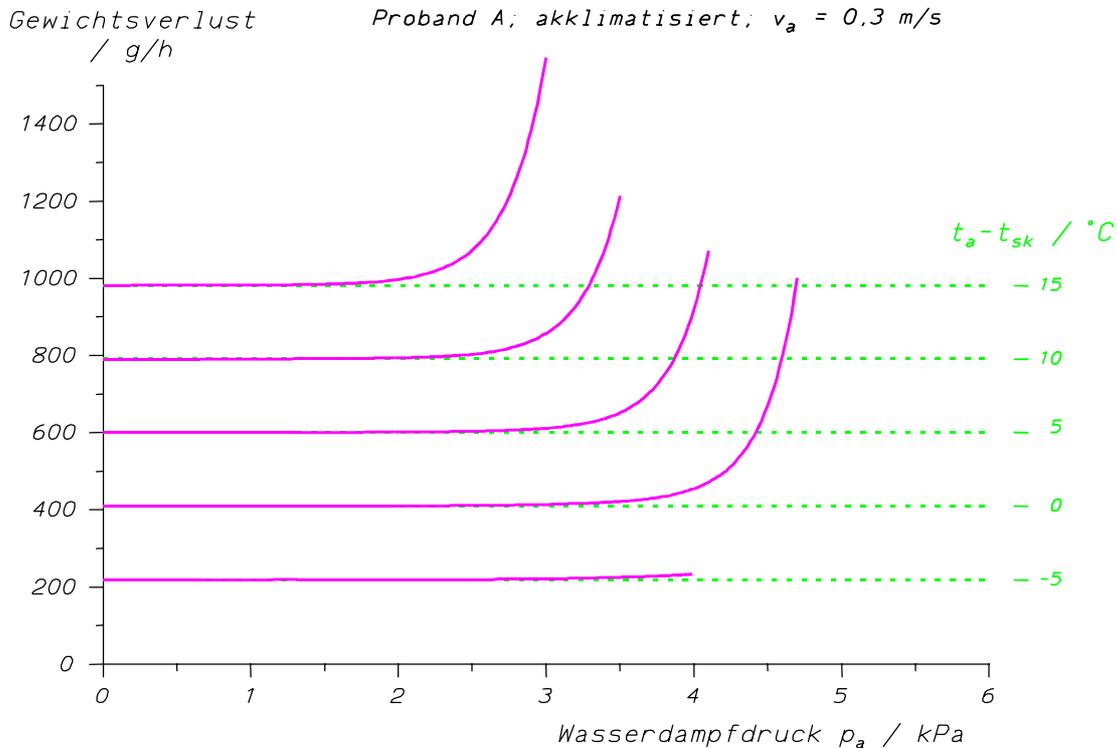


Abb. 39: Verlauf des Gewichtsverlustes SW längs einiger Linien mit $t_a - t_{sk} = \text{const.}$ (entsprechend Abb. 37).

Tabelle 7: Einstufung des Befeuchtungsgrades der Haut (für Stirn, Gesicht, Brust, Rücken, Arme, Beine, Hände)

Stufe	Beschreibung des Zustands der Haut
1	Fühlt sich trocken an, sieht matt aus
2	Fühlt sich feucht an, sieht nicht glänzend aus
3	Glänzend, noch keine deutlichen Schweißtropfen
4	Deutlich sichtbare Schweißtropfen
5	Herablaufende Schweißtropfen
6	Abtropfen von Schweiß

Diese Ergebnisse lassen sich in Abb. 40 und Abb. 41 nachvollziehen: während für Brust und Rücken auch im trocken-heißen Klimabereich hohe Hautbefeuchtungen eingeschätzt werden, ist dies für die mittlere Gesamtschätzung nicht der Fall. – Oberhalb von $t_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ist die Annahme, daß im trocken-heißen Klimabereich kein Schweiß abtropft, nicht erfüllt, so daß dort die errechneten Linien nicht interpretiert werden dürfen.

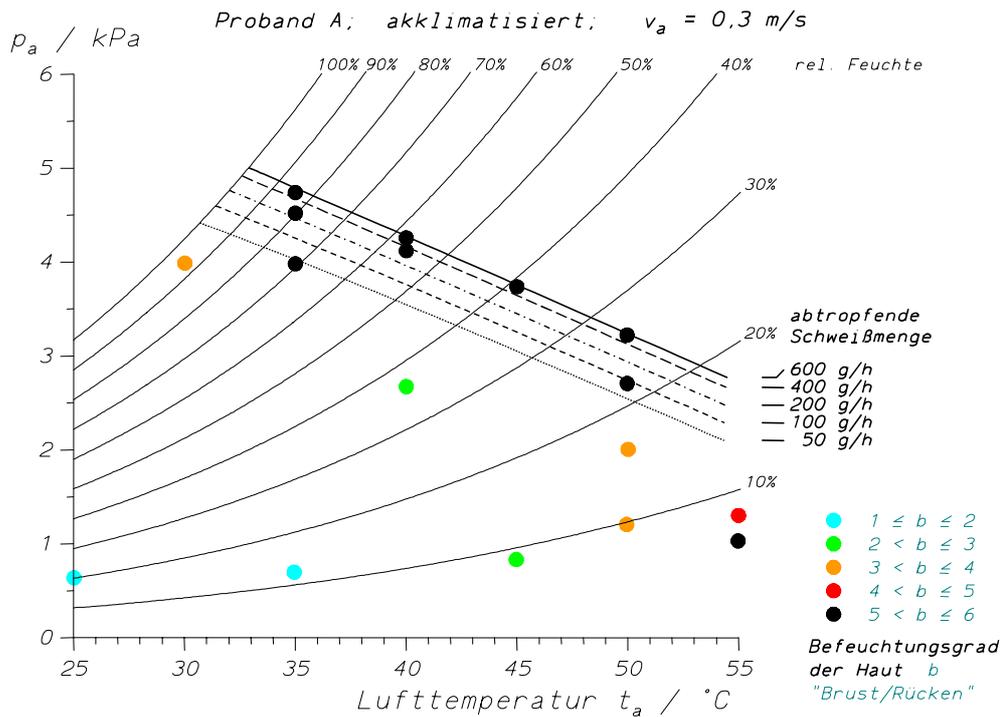


Abb. 40: Abtropfende Schweißmenge für einen akklimatisierten Probanden bei $v_a = 0,3 \text{ m/s}$. Für die Kombinationen von t_a und p_a , an denen gemessen wurde, ist der Befeuchtungsgrad b entsprechend Tabelle 7 für den gemittelten Wert von „Brust“ und „Rücken“ angegeben.

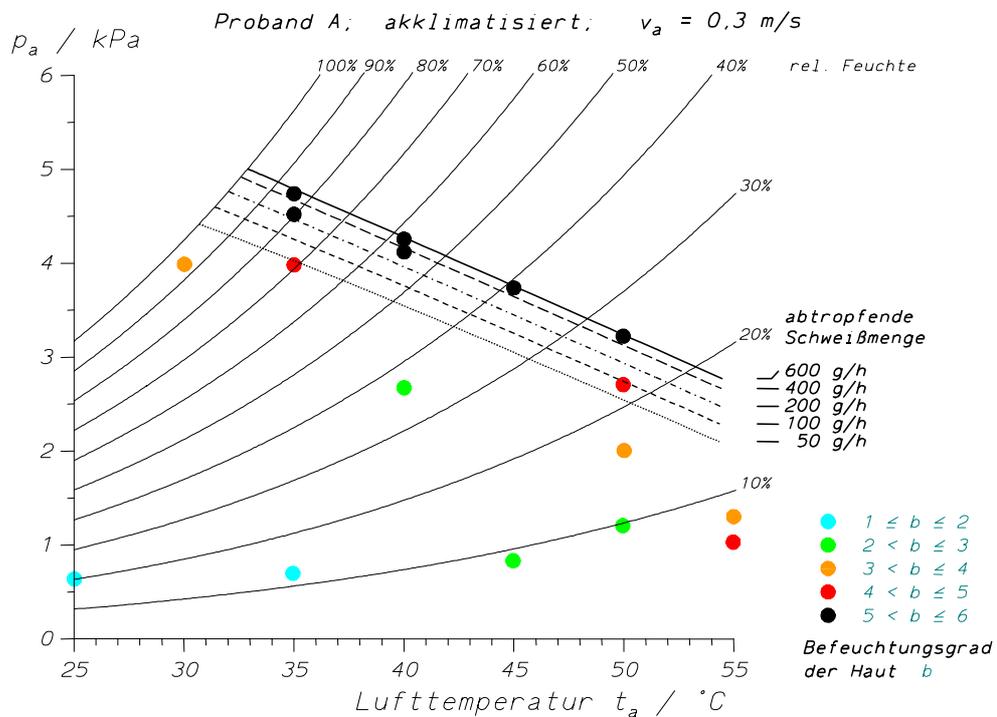


Abb. 41: Abtropfende Schweißmenge für einen akklimatisierten Probanden bei $v_a = 0,3 \text{ m/s}$. Für die Kombinationen von t_a und p_a , an denen gemessen wurde, ist der Befeuchtungsgrad b entsprechend Tabelle 7 für den gemittelten Wert aller Einschätzungen angegeben.

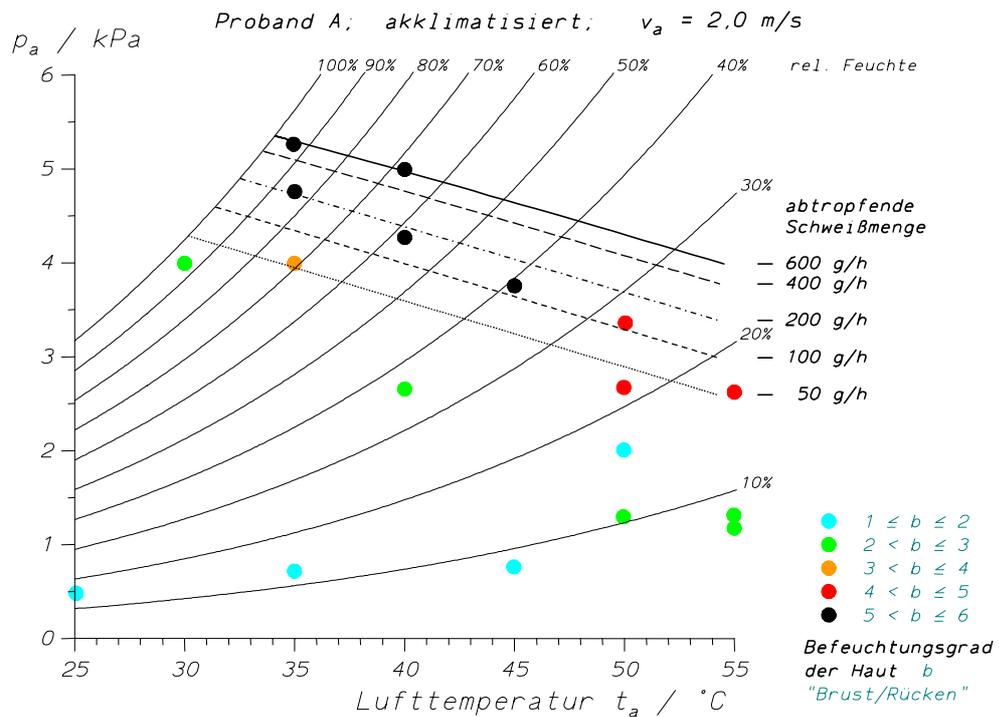


Abb. 42: Abtropfende Schweißmenge für einen akklimatisierten Probanden bei $v_a = 2,0 \text{ m/s}$. Für die Kombinationen von t_a und p_a , an denen gemessen wurde, ist der Befeuchtungsgrad b entsprechend Tabelle 7 für den gemittelten Wert von „Brust“ und „Rücken“ angegeben.

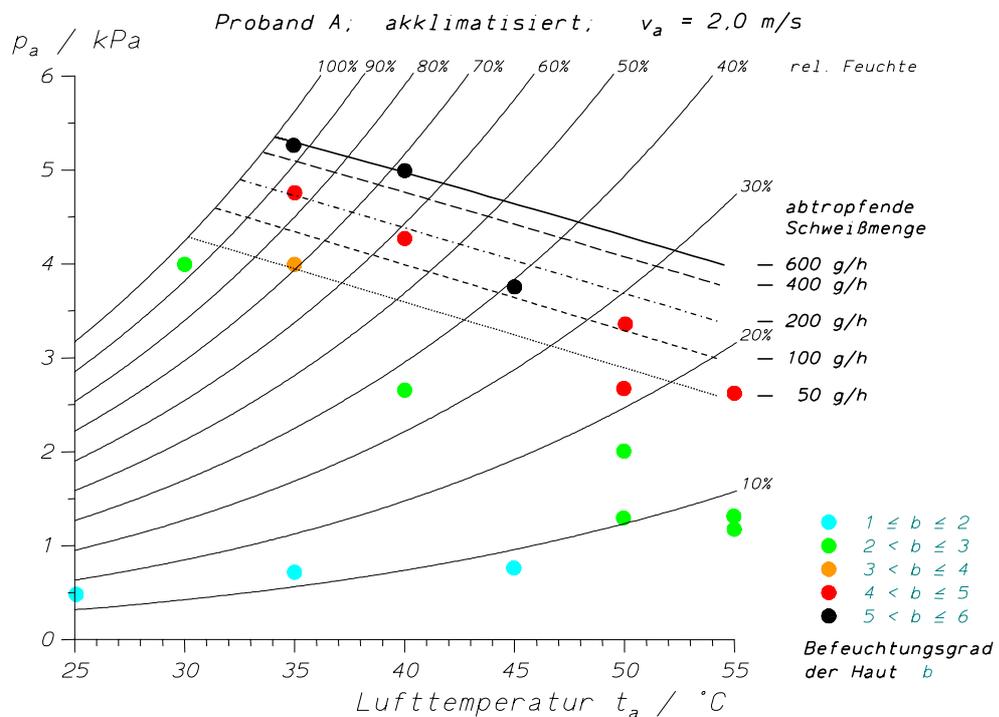


Abb. 43: Abtropfende Schweißmenge für einen akklimatisierten Probanden bei $v_a = 2,0 \text{ m/s}$. Für die Kombinationen von t_a und p_a , an denen gemessen wurde, ist der Befeuchtungsgrad b entsprechend Tabelle 7 für den gemittelten Wert aller Einschätzungen angegeben.

Für $v_a = 2,0$ m/s ist der Bereich der Klimabelastungen, in dem kein Schweiß abtropft, deutlich größer als für $v_a = 0,3$ m/s (Abb. 42 und Abb. 43): bei der erhöhten Windgeschwindigkeit findet der Austausch der Luftschicht, die sich dicht oberhalb der Haut befindet und wasserdampfgesättigte Luft enthält, schneller statt (vgl. S. 17).

Da in der Literatur oft die Prozentzahlen für die abtropfenden Schweißmengen genannt werden, sind diese Werte in Abb. 44 und Abb. 45 ebenfalls eingezeichnet. In Abb. 44 markiert die 10 % - Linie recht gut die Einschätzungen der Hautbefeuchtung Stufe 5 und 6, wobei die für die Berechnung gewählte Annahme: „kein abtropfender Schweiß für $p_a = 0$ kPa“ oberhalb von $t_a = 50$ °C wohl nicht mehr erfüllt ist. Für $v_a = 2,0$ m/s ist diese Annahme im trocken-heißen Klimabereich gut erfüllt. – Das Abknicken der 10 % - Linie im feuchten Klimabereich bei etwa $t_a = 30$ °C liegt möglicherweise daran, daß dort die absoluten Werte der Schweißrate gering sind (vgl. Abb. 15), so daß 10 % dieses Wertes unterhalb der Streuung der Meßwerte liegen.

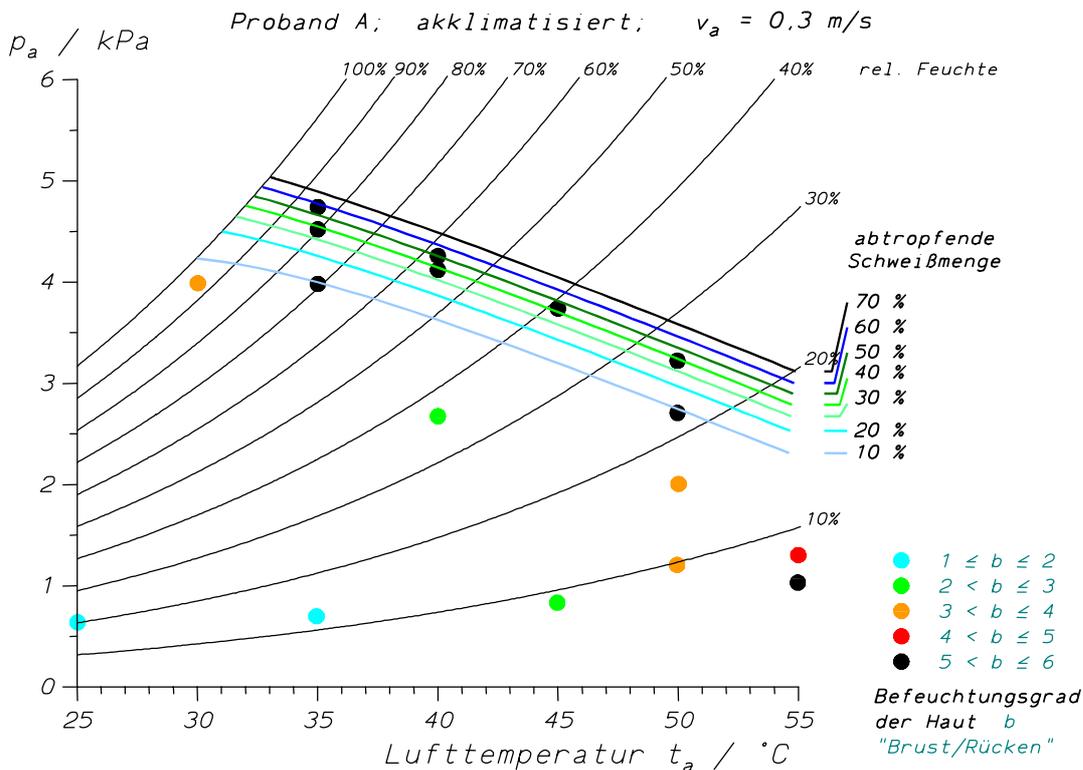


Abb. 44: Anteil des abtropfenden Schweißes für einen akklimatisierten Probanden bei $v_a = 0,3$ m/s; die Meßpunkte und ihre Bewertung entsprechend Tabelle 7 für „Brust / Rücken“ als große Flächen des Körperstamms sind eingezeichnet.

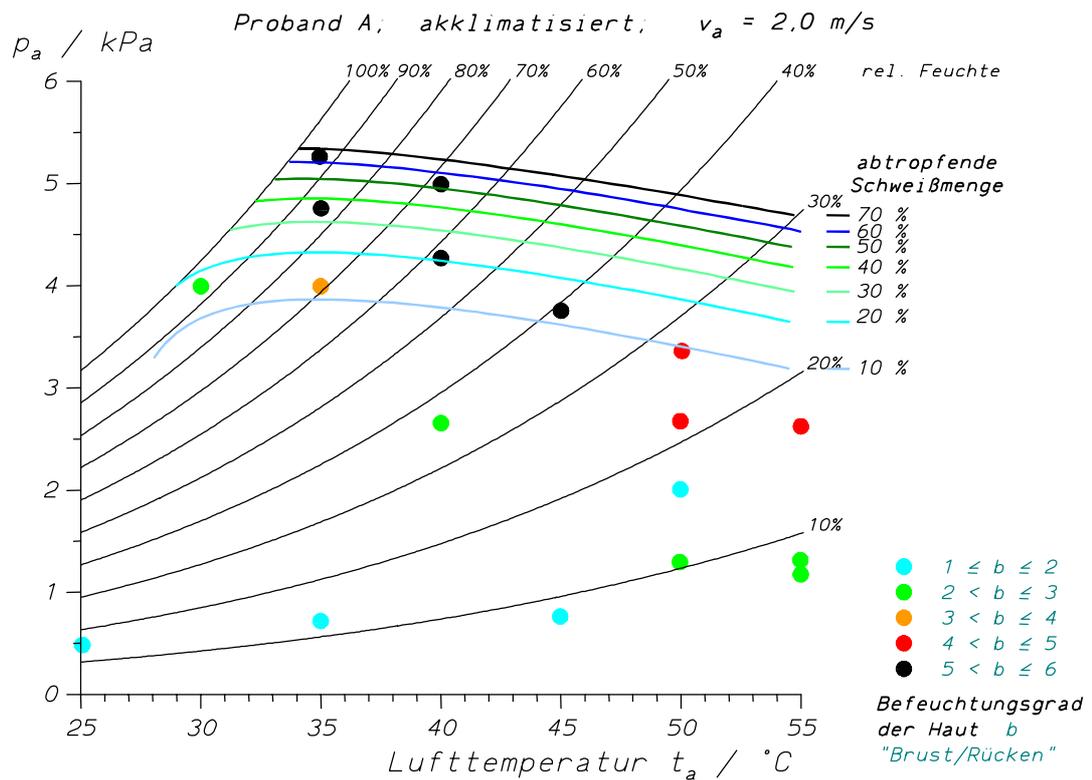


Abb. 45: Anteil des abtropfenden Schweißes für einen akklimatisierten Probanden bei $v_a = 2,0 \text{ m/s}$; die Messpunkte und ihre Bewertung entsprechend Tabelle 7 für „Brust / Rücken“ als große Flächen des Körperstamms sind eingezeichnet.

4.8 Einfluß mentaler Belastung auf die Herzschlagfrequenz

Unter Klimabelastung ist ein Rückgang der Leistungsfähigkeit von mehreren Autoren beschrieben worden (Kapitel 2.4.1). Im Institut für Arbeitsphysiologie wurde 1983 eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der Wahrnehmungsaufgaben in verschiedenen Klimaten untersucht wurden; die Ergebnisse von Sehschärfemessungen in Abhängigkeit von der Klimabelastung wurden an anderer Stelle veröffentlicht ([146], [147] und [148]). In diesem Abschnitt werden die Hauptergebnisse eines Vortrags auf dem 30. Arbeitswissenschaftlichen Kongreß der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft 1984 in Düsseldorf (KAMPMANN ET AL. [167]) vorgestellt, die anderweitig bisher nicht veröffentlicht wurden.

Bei der Durchführung der Wahrnehmungsaufgaben zeigte sich, daß die Herzschlagfrequenz während der Ausführung der Aufgaben über das durch die Klimabelastung bedingte Niveau der Herzschlagfrequenz hinaus anstieg. Dieser Anstieg war reversibel und ließ sich offenbar auf die zusätzliche psychische bzw. mentale Belastung bei der Ausführung der Aufgaben zurückführen; dieses Ergebnis soll im folgenden näher betrachtet werden.

Die Untersuchung wurde an 10 Probanden durchgeführt. Abb. 46 zeigt den Verlauf der Herzschlagfrequenz für drei Versuche eines Probanden: es war zunächst jeweils eine Ruhephase vorgesehen, danach eine Messung in komfortablem Klima, dann eine Klimaexposition mit stündlichen Messungen, anschließend wieder eine Ruhephase und danach nochmals eine Messung in komfortablem Klima. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg der Herzschlagfrequenz während der Durchführung der Wahrnehmungsaufgaben und ein Abfall nahezu unmittelbar nach dem Ende der Aufgabe auf den Ausgangswert, der offenbar thermoregulatorisch benötigt wird. Während der Messungen wurde die Sehschärfe bei niedriger und hoher Beleuchtungsstärke ermittelt und es wurden Tests zum Schätzen von Gewichten durchgeführt. Bei dem Probanden in Abb. 46 ist die Erhöhung der Herzschlagfrequenz besonders stark ausgeprägt und liegt zwischen 20 und 30 Herzschlägen pro Minute. Da die Probanden zu Beginn und zum Ende der Messung vom Untersuchungsplatz auf einen Ruheplatz wechseln mußten (damit die Sehabstände genau eingehalten werden konnten), sieht man – zu Beginn und zum Ende der Messungen – einen durch das Aufstehen bedingten kurzen Anstieg der Herzschlagfrequenz, der interindividuell unterschiedlich stark ausgeprägt ist (die Höhe dieses Anstiegs ist bei den hier dargestellten Minutenmittelwerten der Herzschlagfrequenz mit dadurch bedingt, wie dieser Anstieg in das 1-Minuten-Raster der Mittelwertbildung fällt).

Interindividuell ist die angesprochene Frequenzerhöhung der Herzschlagfrequenz während der Messung sehr unterschiedlich ausgeprägt – ein Beispiel für einen Probanden mit einer geringen Frequenzerhöhung während der Messung zeigt Abb. 47: hier ist zu Beginn der Messung oft nur die Erhöhung der Herzschlagfrequenz beim Aufstehen und Hinübergehen an den Meßplatz erkennbar.

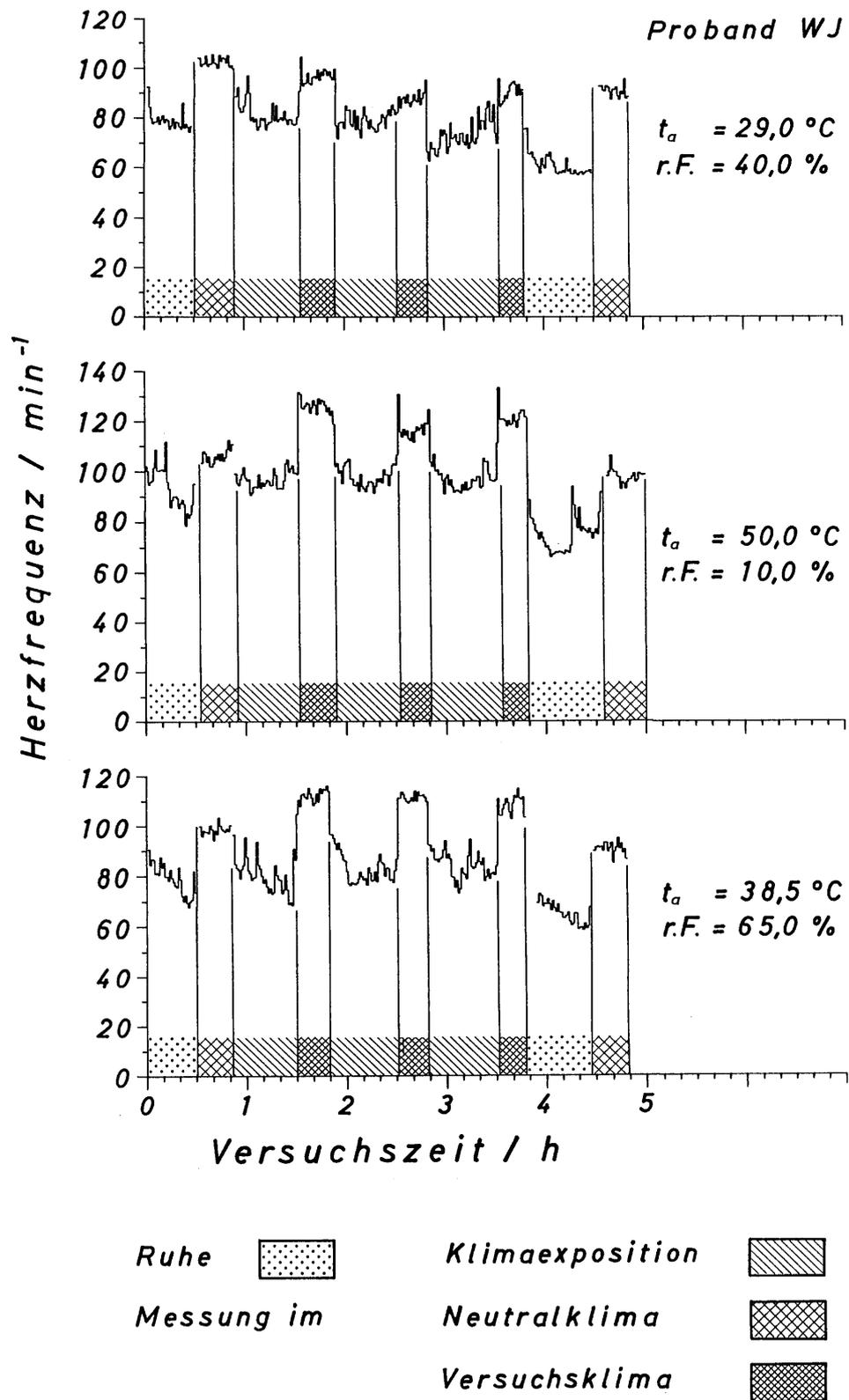


Abb. 46: Verlauf der Herzschlagfrequenz eines Probanden während der Messung der Sehschärfe in verschiedenen Umgebungsklimaten.

In Abb. 48 sind die Verläufe der Herzschlagfrequenz zu Beginn und zu Ende eines Meßintervalls für beide Probanden als Intervallplot (*beat-to-beat*) dargestellt; hier lassen sich die Erhöhungen der Herzschlagfrequenz beim Aufstehen und Wechsel von der Ruhe-

auf die Meßplatzposition und – anschließend an die Meßphase – wieder zurück gut erkennen.

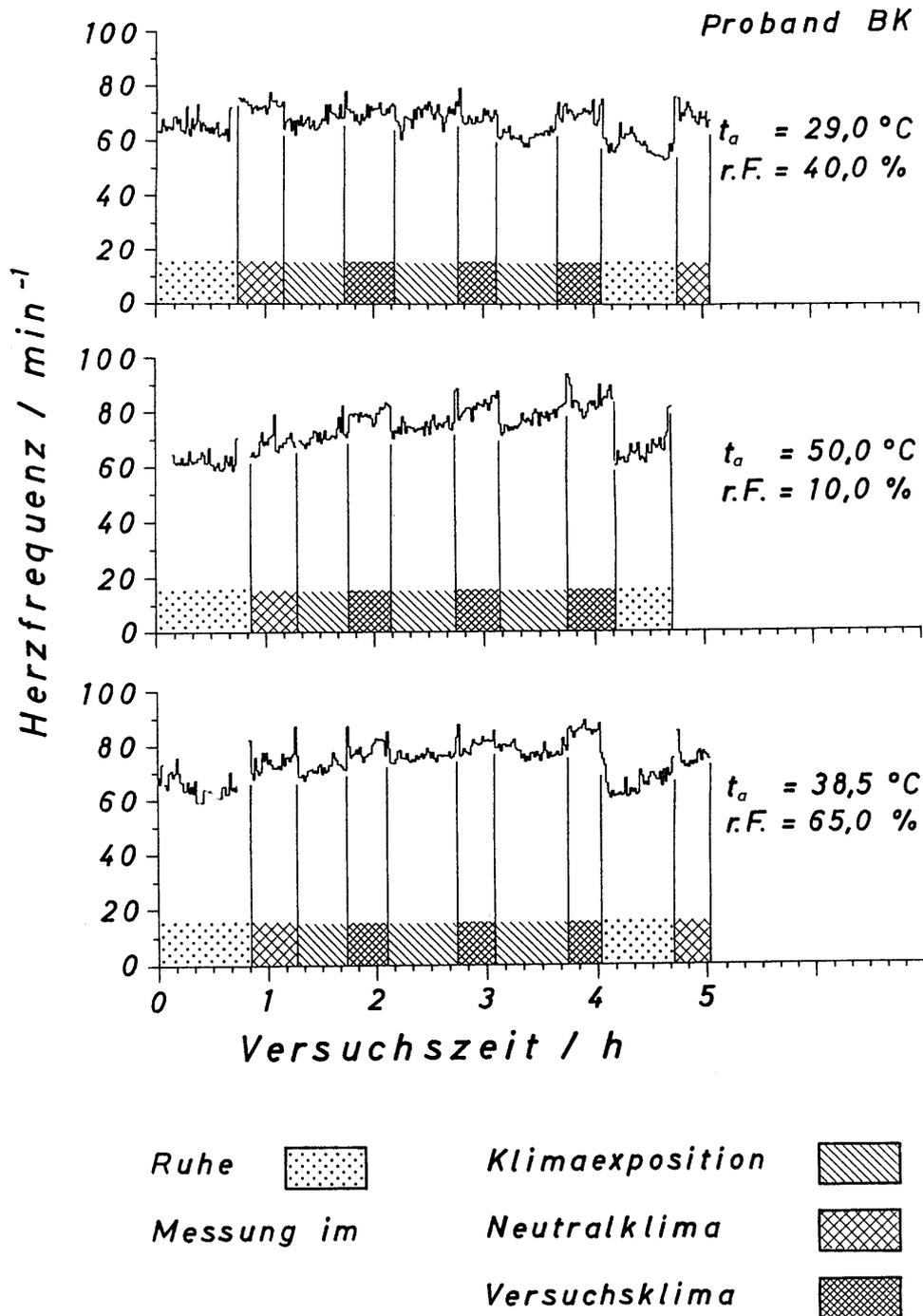


Abb. 47: Verlauf der Herzschlagfrequenz eines Probanden während der Messung der Sehschärfe in verschiedenen Umgebungsklimaten.

Die Reihenfolge der Klimabedingungen wurde für die Probanden unterschiedlich gewählt. Es wurden immer zwei Probanden in einem Durchgang untersucht. Alle Untersuchungen begannen um 8:00 Uhr (bzw. für den zweiten Probanden 30 Minuten später),

um circadiane Einflüsse auszuschalten. Die Probanden trugen nur Shorts. Bei einigen Probanden wurde zum Abschluß der Meßserie noch einmal die erste Versuchsbedingung wiederholt, um mögliche Gewöhnungseffekte sichtbar zu machen. Hier zeigte sich bezüglich des Verlaufs der Herzschlagfrequenz kein deutlicher Unterschied: weder während der Klimaexposition noch während der Messungen ergab sich bezüglich der Herzschlagfrequenz ein systematischer Unterschied zur ersten Exposition.

Die heißen Klimabedingungen waren so ausgesucht worden, daß sich gerade noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht in Körperruhe einstellte. Die Windgeschwindigkeit in der Nähe der Probanden betrug $v_a = 0,3$ m/s, die Klimabedingungen waren: ($t_a = 50$ °C; $RH = 10$ %); ($t_a = 38,5$ %, $RH = 65$ %); und als Kontrolle: ($t_a = 29$ °C, $RH = 40$ %). Die beiden heißen Bedingungen stellten eine erhebliche Belastung der Probanden dar; im Mittel stellte sich gerade kein *steady state* für Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur mehr ein (vgl. das für die Akklimatisation – allerdings bei zusätzlicher Körperarbeit – in Kapitel 4.3 gewählte Klima von ($t_a \approx 39$ °C; $RH \approx 65$ %)). Um eine Akklimatisation der Probanden zu vermeiden, lagen mindestens zwei Ruhetage zwischen den Expositionsversuchen im heißen Klima (weitere Einzelheiten in [147]).

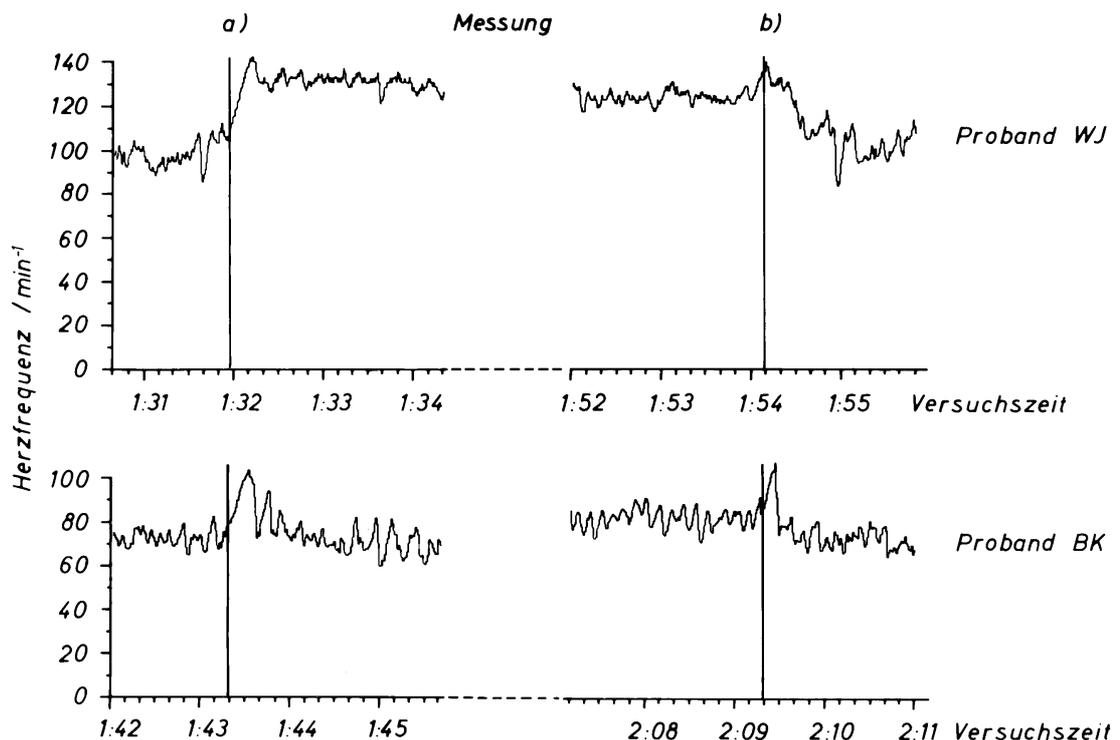


Abb. 48: Verlauf der Herzschlagfrequenz (Intervallplot; „beat-to-beat“) zu Beginn und Ende eines Meßintervalls für die Probanden in Abb. 46 bzw. Abb. 47.

Für alle 10 Probanden sind in Abb. 49 die Mittelwerte der Herzschlagfrequenz in verschiedenen Versuchsabschnitten und die Erhöhung der Herzschlagfrequenz während der Messung der Sehschärfe dargestellt. Unter komfortablem Klima fällt die mittlere Herzschlagfrequenz ohne psychische Belastung leicht ab; unter Klimabelastung stellt

sich – ebenfalls ohne psychische Belastung – die Herzschlagfrequenz zum Ende der Klimaexposition offenbar auf einen gleichbleibenden Wert ein, was darauf hinweist, daß die thermische Belastung gerade noch zu kompensieren war und sich ein Gleichgewichtszustand einstellte. Die Erhöhung der Herzschlagfrequenz nahm während der Ausführung der Wahrnehmungsaufgaben einerseits bis zur dritten Messung im Untersuchungsklima zu und war andererseits unter Klimabelastung stets größer als im Neutralklima. Bei der dritten Messung betrug die Erhöhung im Neutralklima $11,5 \text{ min}^{-1}$, im trocken heißen Klima $14,3 \text{ min}^{-1}$ und im feuchtwarmen Klima $15,8 \text{ min}^{-1}$. Beide Zunahmen unter Klimabelastung unterscheiden sich signifikant von der Zunahme im Neutralklima.

Dieses Ergebnis stellt ein gutes Beispiel für die Erfahrung dar, daß bei kombinierten Belastungen die Reaktion der Beanspruchungsgrößen stärker als additiv sein kann. Weiterhin wird deutlich, daß die psychische Komponente der Herzschlagfrequenz bei einer Frequenz um 90 min^{-1} noch stärker ausgeprägt sein kann als im Normalklima. – Der Einfluß dieser Belastungskomponente verringert sich – etwa nach (z.B. ISO 9886, [445]; 4.1) – bei höherer Herz-Kreislauf-Beanspruchung; wie hier gezeigt wird, trifft dies für höhere *thermische* Anteile der Herzschlagfrequenz gerade nicht zu.

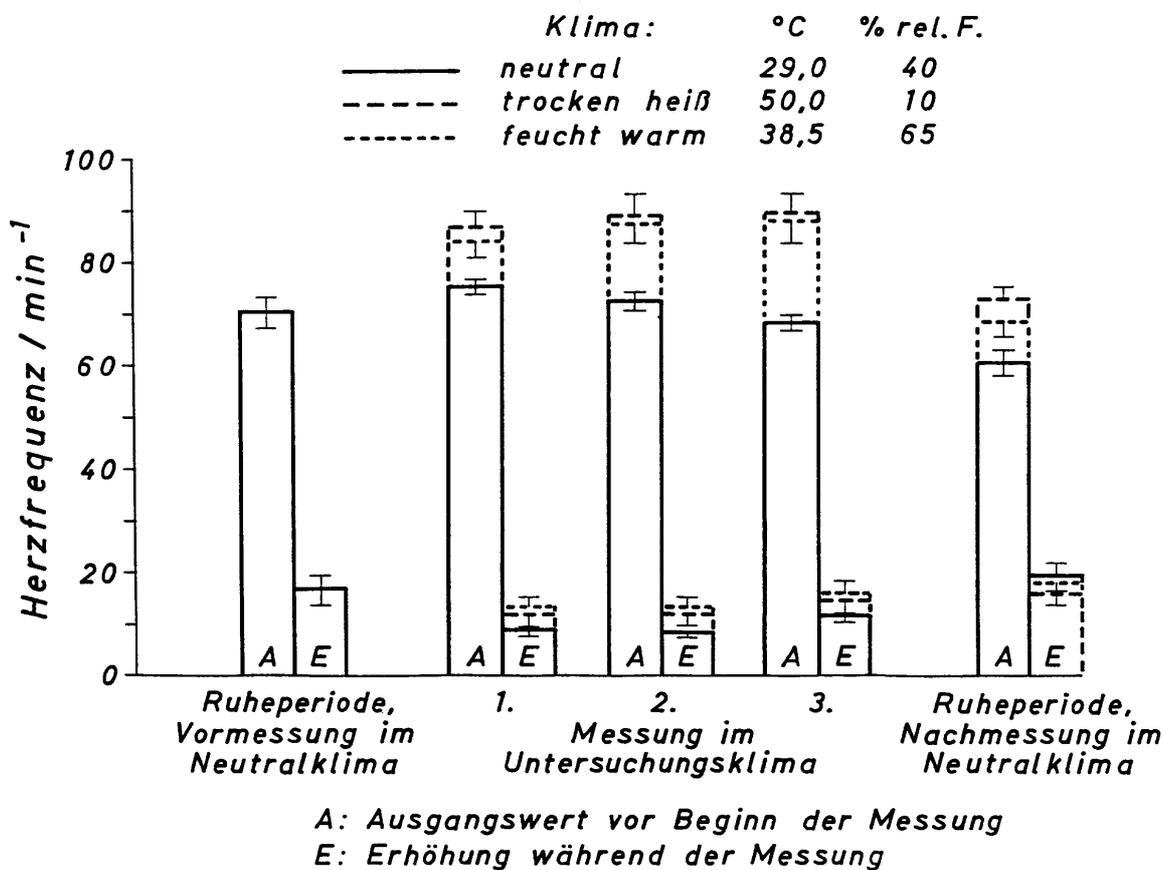


Abb. 49: Auswirkung der Klimabelastung auf die Erhöhung der Herzschlagfrequenz während der Messungen.

Das Vorgehen bei der Sehschärfemessung (Erkennen von Landolt-Ringen, deren Größe sehr fein abgestuft war – entsprechend 10 % der Sehschärfe [147]) war für die Messung des psychischen Einflusses auf die Herzschlagfrequenz sehr günstig: die Experimentatoren wählten immer wieder Vorlagen aus (je vier Landolt-Ringe einer Größe in unterschiedlicher Orientierung), auf denen die Probanden nur für wenige Ringe die Orientierung richtig erkannten; die Probanden bekamen keine Rückmeldung über die Zahl ihrer richtigen Ergebnisse und hatten so während des größten Teils der Messungen ein Gefühl der Ungewißheit dahingehend, wie gut sie die Ringe erkennen konnten. Eine Gewöhnung konnte so nur für die Untersuchungssituation insgesamt entstehen, nicht aber für Einschätzungen der Sehschärfe: die Vorlagen mit den Landolt-Ringen wurden von den Versuchsleitern immer wieder aus demjenigen Bereich gewählt, in dem nur wenige richtige Einschätzungen vorlagen.

Im Jahr 1969 hat eine Expertengruppe um BELDING einen Vorschlag zur Bewertung der Herzschlagfrequenz für kombinierte Belastung durch Klima und körperliche Arbeit für die WHO erarbeitet ([439], vgl. auch Abb. 128). Dargestellt ist in Abb. 128 die Herzschlagfrequenz, die mit zunehmender Arbeitsschwere in neutralem Klima linear zunimmt. Im Fall einer zusätzlichen Hitzebelastung sind die beobachteten Herzschlagfrequenzen zu höheren Werten hin verschoben (vgl. Kapitel 4.3.2.1). In gleicher Weise steigt auch diejenige Herzschlagfrequenz an, die nach Ansicht der Autoren als Grenzkriterium für die Gefahr einer Überforderung des Kreislaufs angesehen wird. Der gerasterte Bereich gibt an, für welche Werte des Energieumsatzes und der Herzschlagfrequenz sich kein Gleichgewicht der Wärmebilanz mehr ergibt.

In Abb. 50 sind einige Ergebnisse unserer Untersuchung eingezeichnet: Für die gewählte thermisch neutrale Bedingung liegt der mittlere Wert der Herzschlagfrequenzen recht gut in der Nähe der dazugehörigen Linie; ebenso liegen die Werte, die unter Klimabelastung erhalten wurden, an der Linie gerade noch kompensierbarer Hitzebelastung. Während der Durchführung der Wahrnehmungsaufgaben erhöhen sich die Herzschlagfrequenzen deutlich bis in den Bereich nicht mehr kompensierbarer Hitzebelastung hinein. Für den Probanden in Abb. 46 ergibt sich beispielsweise eine Erhöhung der Herzschlagfrequenz von 95 min^{-1} auf 125 min^{-1} , was nach der Darstellung der WHO eine Herzschlagfrequenz nahe der Präkollapsgrenze bedeuten würde, wenn diese Erhöhung allein auf die Hitzebelastung zurückzuführen wäre.

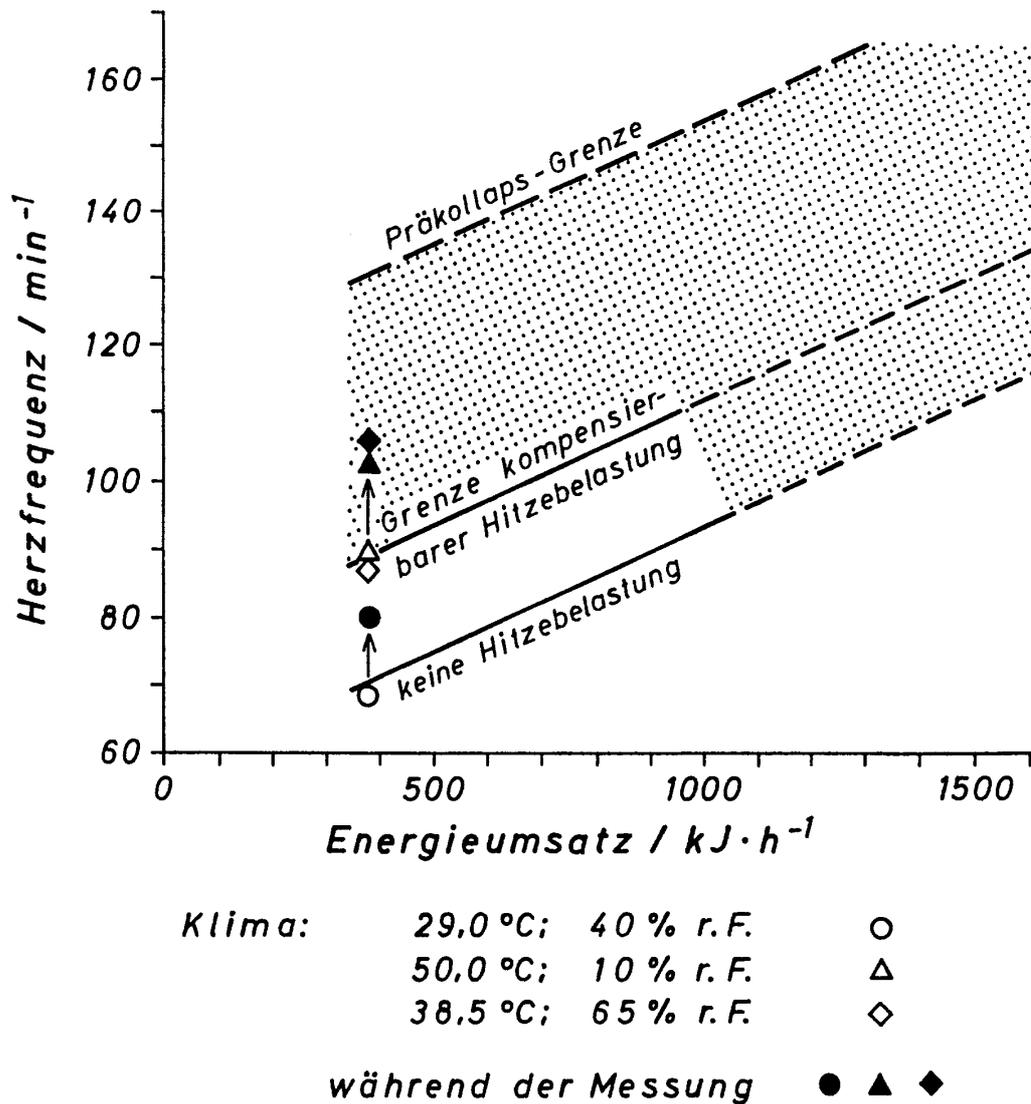


Abb. 50: Verschiebung der Bewertung der Herz-Kreislauf-Belastung während der Messungen mit Bezug auf das im WHO Tech. Rep. No. 412 [439] vorgeschlagene Diagramm.

Zusammenfassung

Zur Bewertung der Herzschlagfrequenz ist es sinnvoll, denjenigen Anteil der Herzschlagfrequenzerhöhung, der durch die psychische Belastung bedingt ist, gesondert zu betrachten, so weit dies durchführbar ist. Im Fall unserer Versuche war dies dadurch möglich, daß die psychische Belastung während der Messungen zu einer reversiblen Erhöhung der Herzschlagfrequenz über das thermoregulatorisch bedingte Frequenzniveau führte. – Die Erhöhung der Beanspruchung unter der kombinierten Belastung von Hitze und psychischer Belastung war größer als nur additiv.

5 Modellarbeit: Untersuchungen von Gasschutzwehr und Grubenwehr

In früheren Jahren wurde die einleuchtende Forderung aufgestellt, bei der Auswahl von Grubenwehrmannschaften für Einsätze an feuchtwarmen Betriebspunkten solche Bergleute zu bevorzugen, die durch ihre tägliche Arbeit sowohl an die zu erwartende schwere Arbeit, als auch an das feuchtwarme Klima gewöhnt sind (z.B. HOLLMANN 1952 [149], *Plan für das Grubenrettungswesen* 1965 [436]). LIND ET AL. [222] stellten jedoch bereits 1955 im englischen Bergbau fest, daß die dort untersuchten Mitglieder von Grubenwehren zwar hoch motiviert und gut trainiert, im allgemeinen aber gar nicht an schwere Arbeit unter Klimabelastung gewöhnt wären. Durch die fortschreitende Mechanisierung im Steinkohlenbergbau wird diese Entwicklung sich inzwischen vermutlich weiter fortgesetzt haben.

Es ist daher notwendig, die Grubenwehren auf Einsätze in feuchtwarmem Klima vorzubereiten und Kriterien für Einsätze in schwerem Klima zu entwickeln. In der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Essen wurden beispielsweise Einsatz Tabellen für Einsätze bei hoher klimatischer Belastung entwickelt (BRESSER & FUNKEMEYER 1990 [34]). Mehrere Arten von standardisierten Übungen der Grubenwehr in einem „Übungshaus“, in dem Bewegungsabläufe wie gebücktes Gehen, Kriechen, Klettern und Kraftübungen durchgeführt und geübt werden können, wurden untersucht und beschrieben (FUNKEMEYER ET AL. 1993 [95]) und Untersuchungen zur Wärmeverträglichkeit von Grubenwehrmitgliedern wurden für die gesamte Grubenwehr eines Bergwerks (52 auswertbare komplette Datensätze) von BRESSER & KAMPMANN 1997 [36] dargestellt.

Da sich schon bei so einfachen Tätigkeiten wie Laufbandarbeit oder einem *step-test* (Auf- und Abstieg auf eine Stufe) durch Übung eine Verringerung des Energieumsatzes erreichen läßt (vgl. S. 23), läßt sich erwarten, daß bei Übungen in einem Übungshaus – in Flammenschutzbekleidung, unter schwerem Atemschutz, in niedrigen und halb hohen Räumen und bei Kraftübungen (Schlaghammer) – ganz erhebliche Auswirkungen der Gewöhnung festgestellt werden können. – Daher ist im *Plan für das Grubenrettungswesen* [437] auch vorgesehen, daß zu Beginn der Ausbildung der Grubenwehrmitglieder in der Regel zwei Einstundenübungen durchgeführt werden, d. h., daß die zweistündige Standardübung für die Anfänger entsprechend verkürzt wird (Ziffer 4.1.2).

Um das Ausmaß der Gewöhnung bei Grubenwehrübungen abzuschätzen, wurden die Übungen, an denen der Autor in den letzten 15 Jahren teilgenommen hat, in dieser Hinsicht ausgewertet und die Ergebnisse werden im folgenden dargestellt. Des weiteren wurden interindividuelle Unterschiede der Beanspruchung bei Übungen der Gasschutzwehr (der Feuerwehr auf Kokereien) untersucht ([413] und [174]) und es wurde für die gleichen Übungen ebenfalls die Beanspruchung von Grubenwehrmitgliedern erhoben [173]; so können sowohl interindividuelle Unterschiede innerhalb beider Gruppen, als auch Unterschiede zwischen beiden Gruppen – die sich unter anderem durch

die Anforderung an die körperliche Leistungsfähigkeit bei der arbeitsmedizinischen Untersuchung unterscheiden – bewertet werden. In den folgenden Abschnitten werden einige Aspekte dieser Fragestellungen dargestellt.

5.1 Der Einfluß der Gewöhnung auf die Beanspruchung bei Grubenwehrübungen

Die erste Übung ist die schwerste Übung – hat diese Redensart in den Grubenwehren eine Entsprechung in den Beanspruchungsgrößen? Hierzu wurden während aller Grubenwehrübungen des Autors Herzschlagfrequenz, Körperkerntemperatur und Schweißverlust erhoben und für diese Fragestellung ausgewertet.

Neben Sonderuntersuchungen wurden im Übungshaus der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Essen vier Typen von Übungen standardmäßig durchgeführt: neben der *Standardübung* (120 Minuten Dauer) eine *Standardübung mit Klimeteil* (100 Minuten Dauer), eine *Übung in Flammenschutzkleidung* (Dauer 90 Minuten) und eine *Übung bei erhöhter Klimabelastung* (90 Minuten Dauer), bei der das gesamte Übungshaus aufgeheizt wurde (Einzelheiten in [95] und [96]). Den Verlauf verschiedener Kenngrößen während einer Standardübung zeigt Abb. 51.

Bei der benutzten Meßausrüstung (MEDILOG, Oxford Industries) ist eine Ablesung der aufgenommenen Daten nicht vorgesehen, sondern nur die Aufzeichnung und nachträgliche Auswertung. Ein anschließbarer kleiner Monitor dient eher dazu, festzustellen, ob die Meßaufnehmer angeschlossen sind, als dazu, die augenblicklichen Meßwerte abzulesen. Daher wurde während der ersten Übung auch keine Kontrolle der Herzschlagfrequenz bzw. der Körpertemperatur durchgeführt und die Übung aus diesem Grund auch nicht abgebrochen⁵⁶. – Da sich die Flammenschutzübung im Übungsprogramm bewährt hatte und nicht als unangemessen schwierig galt, wurde nach Rücksprache mit

⁵⁶ Die erste Übung wurde - bei großer Erschöpfung und leichten Koordinationsstörungen zum Ende der Übung hin - absolviert. Als nach der ersten Übung die hohen Werte der Körpertemperatur ausgewertet wurden, wurde zunächst die Meßausrüstung nachkalibriert, um die Meßwerte zu sichern und danach der Meßbereich - in einer Neukalibrierung - nach oben hin erweitert. Leider liegt zwischen dem 3. und 11. Monat eine Lücke, die wie folgt entstand:

4. Übung bei 4,7 Monaten: 7 Grubenwehrmitglieder führten eine spezielle „Heißübung“ instrumentiert durch. Die Abbruchkriterien betragen $t_{re} = 38,8 \text{ °C}$ bzw. $HSF = \text{„220-A“ min}^{-1}$. Alle sieben instrumentiert teilnehmenden Grubenwehrmitglieder brechen wegen Erreichens des Grenzwertes der Körpertemperatur vorzeitig die Übung ab; dieser Übungstyp wird als „zu schwer“ eingestuft und aus dem Übungsprogramm genommen.

5. Übung: Verletzungsbedingt keine Teilnahme.

6. Übung: Fünf Grubenwehrmitglieder übten instrumentiert mit den Abbruchkriterien $t_{re} = 38,8 \text{ °C}$ bzw. $HSF = \text{„220-A“ min}^{-1}$ (Flammenschutzübung): drei der fünf Grubenwehrmitglieder (einschließlich des Autors) brachen die Übung wegen Überschreitens des Grenzwertes der Körpertemperatur vorzeitig ab.

Arbeitsmedizinern auf die Kontrolle der Körpertemperatur während der weiteren Übungen verzichtet.

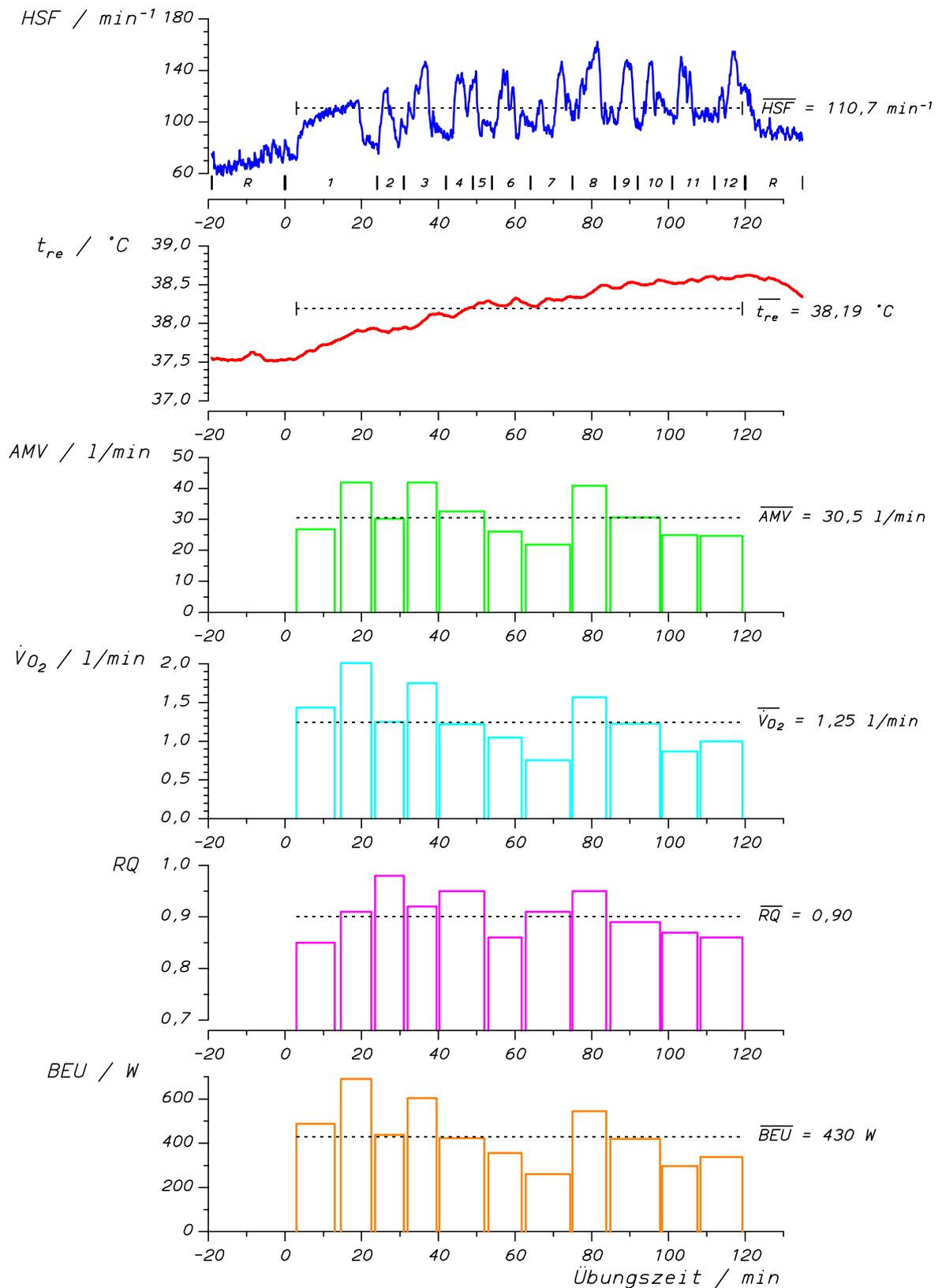


Abb. 51: Herzschlagfrequenz, Körpertemperatur t_{re} und die mittels einer Gasuhr bestimmten Kenngrößen während einer Standardübung der Grubenwehr.

Abb. 52 zeigt statistische Kennwerte der Herzschlagfrequenz und der Körpertemperatur für alle Übungen, die während sieben Jahren nach der ersten Grubenwehrübung durchgeführt wurden. Da die maximal registrierte Herzschlagfrequenz leicht von Störungen in der Auswertung beeinflusst wird, wurde als Kenngröße das 95. Perzentil der

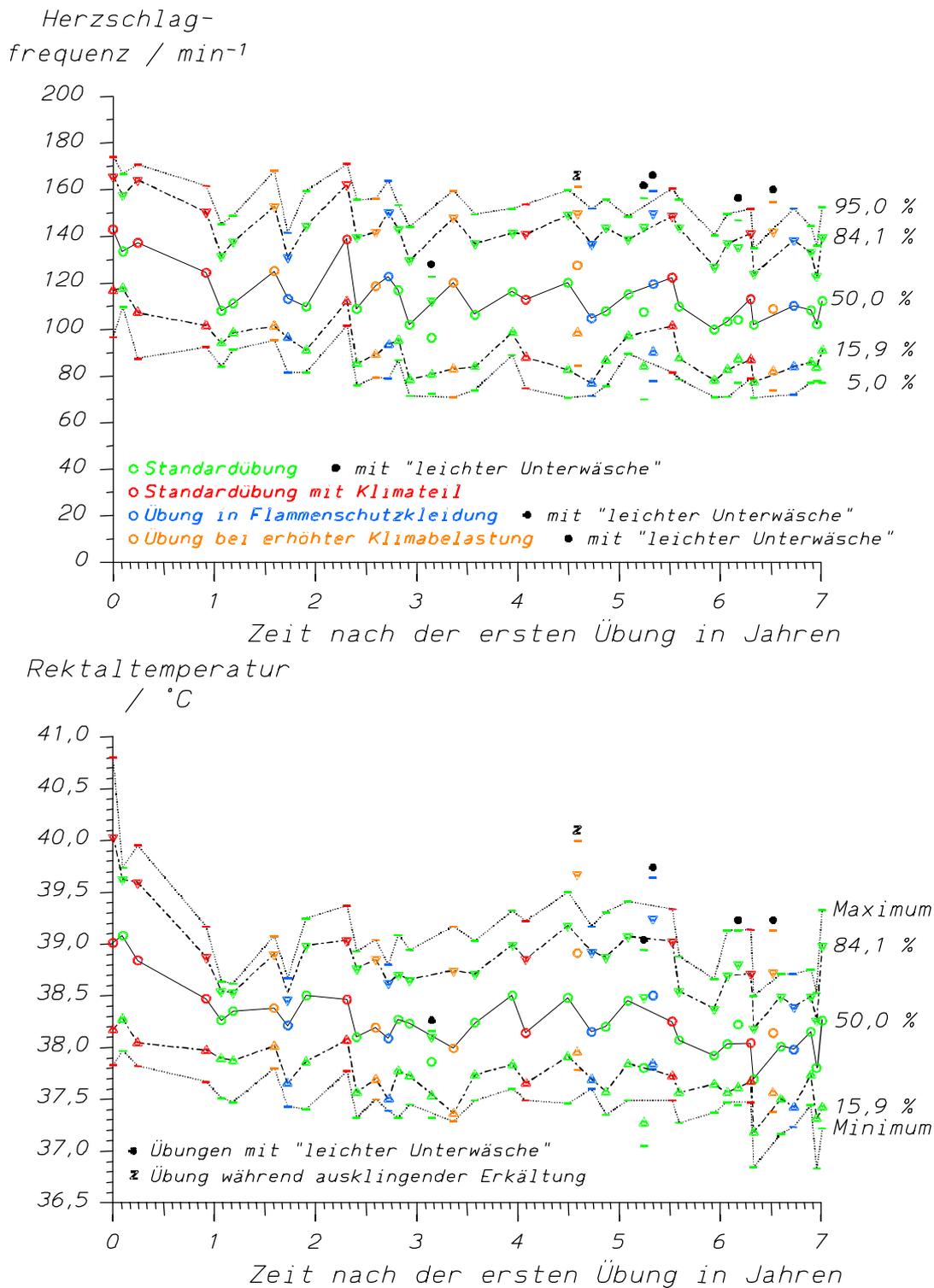


Abb. 52: Statistische Kennwerte für verschiedene Übungstypen während sieben Jahren nach der ersten Übung für ein Grubenwehrmitglied.

Herzschlagfrequenz dargestellt. Die maximale Körpertemperatur innerhalb der Auswertung in Abb. 52 liegt am Ende der Übung vor; die Körpertemperatur steigt kurz danach noch etwas an, weil das warme Blut aus den Muskeln nach dem Ende der Körperarbeit noch umverteilt wird (vgl. Abb. 53). Bei der Körpertemperatur fällt ein deutlicher Abfall während der ersten 1,5 Jahre auf: die maximal gemessene Temperatur fällt um 1,5 °C ab! Der Abfall der Kenngrößen der Herzschlagfrequenz ist nicht so stark ausgeprägt – etwa 20 min^{-1} –, erstreckt sich aber über einen längeren Zeitraum.

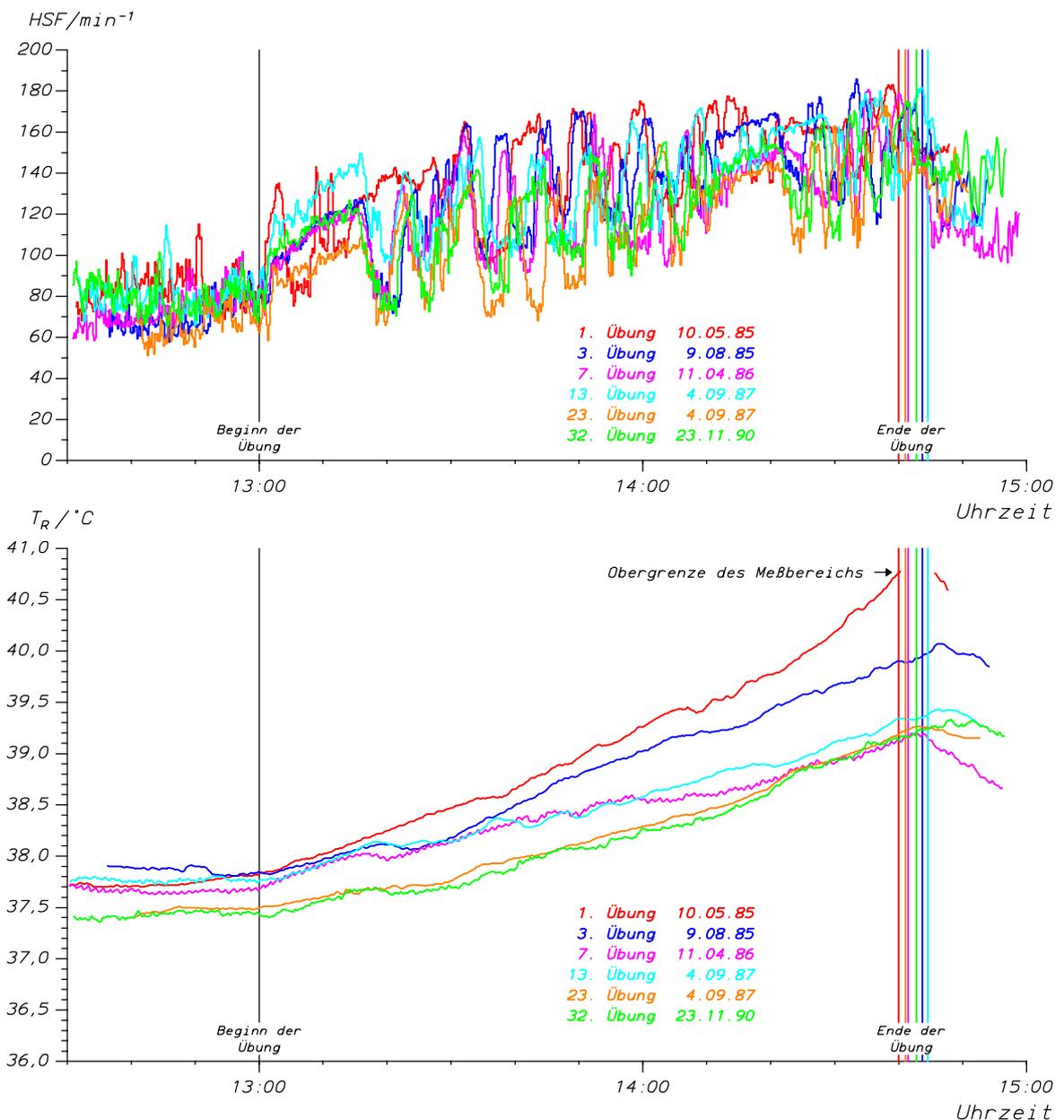


Abb. 53: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Rektaltemperatur t_{re} während der ersten sechs „Übungen mit Klimarteil“ (der besseren Übersichtlichkeit halber wurde der Übungsbeginn aller Übungen in der Darstellung auf genau 13:00 Uhr festgesetzt).

Bei diesen vier Typen von Grubenwehrübungen wurden einige Untersuchungen mit leichter Unterwäsche (anstatt der Unterwäsche nach DIN 23 320) durchgeführt, was im Fall der Standardübung zu einer signifikanten Erniedrigung der Körpertemperatur um

0,5 °C führte ([95] und [96]) – diese Übungen wurden in Abb. 52 aus dem Linienzug ausgenommen und markiert. – Eine Übung wurde bei einer ausklingenden Erkältung und subjektivem Wohlbefinden nach Rücksprache mit dem Betriebsarzt und einer ergometrischen Untersuchung – wobei sich nach ärztlichem Ermessen kein Ausschlußgrund für eine Übungsteilnahme fand – durchgeführt. Obwohl die Ausgangswerte von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur nur leicht über dem Normbereich lagen, war die Körpertemperatur bei einer *Übung mit erhöhter Klimabelastung* gegen Ende der Übung deutlich erhöht. Da keine Einschränkung der subjektiven Fitneß zum Zeitpunkt der Übung vorlag, ist in solchen Fällen für den Übungs- und Ernstfalleinsatz große Vorsicht angebracht.

Tabelle 8: Statistische Kennzahlen der Herzschlagfrequenz für die ersten sechs „Standardübungen mit Klimeteil“

Laufende Nr. der Übung	Datum	Dauer / min	Herzschlagfrequenz / min ⁻¹				
			5 %	15,9 %	Median	84,1 %	95 %
1	10.05.85	103,0	96,7	116,6	142,8	165,6	174,1
3	9.08.85	103,7	87,7	107,2	137,1	164,0	170,7
7	11.04.86	101,5	92,3	101,5	124,3	150,3	161,5
13	4.09.87	104,5	101,7	112,0	138,7	162,1	170,9
23	9.06.89	101,0	74,6	88,0	112,8	140,8	153,6
32	23.11.90	102,8	81,5	101,4	122,2	148,6	160,6

Tabelle 9: Statistische Kennzahlen der Körpertemperatur für die ersten sechs „Standardübungen mit Klimeteil“.

Laufende Nr.	Datum	Rektaltemperatur / °C						
		Minimum	5 %	15,9 %	Median	84,1 %	95 %	Maximum
1	10.05.85	37,83	37,92	38,17	39,01	40,03	40,62	40,80
3	9.08.85	37,82	37,89	38,04	38,84	39,59	39,86	39,95
7	11.04.86	37,67	37,81	37,97	38,47	38,87	39,04	39,17
13	4.09.87	37,77	37,82	38,07	38,46	39,03	39,31	39,37
23	9.06.89	37,49	37,55	37,65	38,14	38,85	39,07	39,22
32	23.11.90	37,49	37,57	37,72	38,25	39,02	39,25	39,34

Die verschiedenen Übungstypen stellen eine jeweils verschiedene Belastung dar (unterschiedliche Arbeitselemente, unterschiedliche Dauer, unterschiedliches Klima); hierdurch ist ein Teil der Streuung der Kennwerte in Abb. 52 bedingt. In Abb. 53 sind die

Ergebnisse von sechs *Übungen mit Klimeteil* dargestellt: trotz einiger im Übungsablauf getauschter Arbeitselemente ist für die Herzschlagfrequenz deutlich eine Absenkung bei den späteren Übungen zu erkennen; bei der Körpertemperatur fällt die starke Absenkung bis zur dritten Übung auf. Diese Absenkung der Beanspruchung wird auch von den statistischen Kenngrößen in Tabelle 8 und Tabelle 9 wiedergegeben.

Während des vierten Jahres nach der ersten Grubenwehrübung wurde das Trainingspensum von zweimal $\frac{1}{2}$ Stunde Dauerlauf pro Woche auf zweimal 1 Stunde pro Woche erhöht; hierdurch könnten möglicherweise die physiologischen Werte in der Zeit danach beeinflusst sein, was aber in Abb. 52 – bei den dort vorhandenen Streuungen – nicht der Fall zu sein scheint.

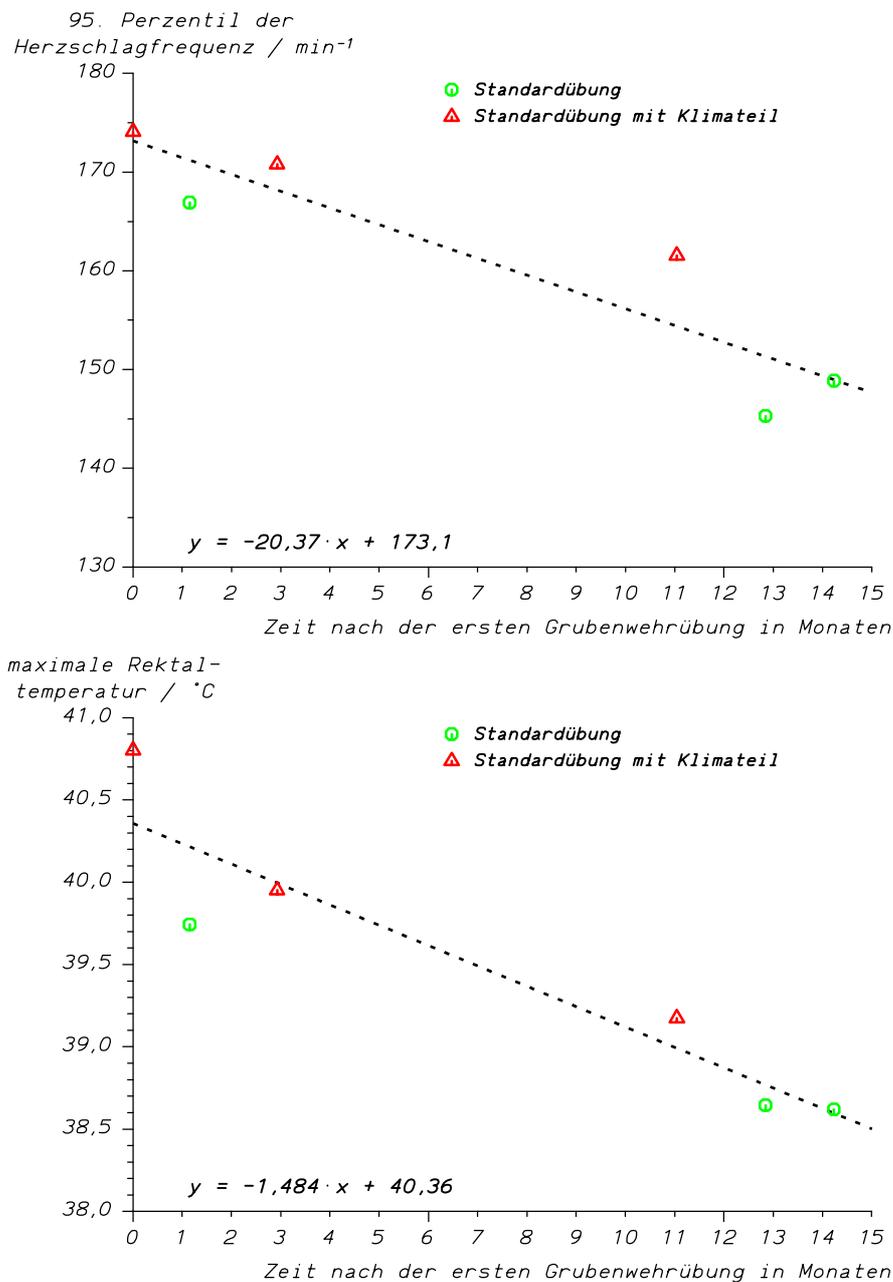


Abb. 54: Einfluß der Gewöhnung an die Grubenwehrübungen auf Herzschlagfrequenz (95. Perzentil) und Körpertemperatur (Maximalwert) während der ersten Übungen (jeweils in linearer Regression).

In Abb. 54 ist – trotz der Lücke hinsichtlich der Übungen zwischen dem 3. und dem 11. Monat nach der ersten Übung – ein deutlicher Rückgang sowohl der Herzschlagfrequenz als auch der Körpertemperatur zu erkennen. Weiter ist die *Standardübung mit Klimarteil* in allen Fällen etwas mehr beanspruchend als die *Standardübung*.

Da die Standardübung am häufigsten durchgeführt wurde, ist für alle Standardübungen nach der Eingewöhnungsphase (d.h. mehr als 1 ½ Jahre nach der ersten Übung) nach Einflußgrößen – insbesondere für die Körpertemperatur – gesucht worden:

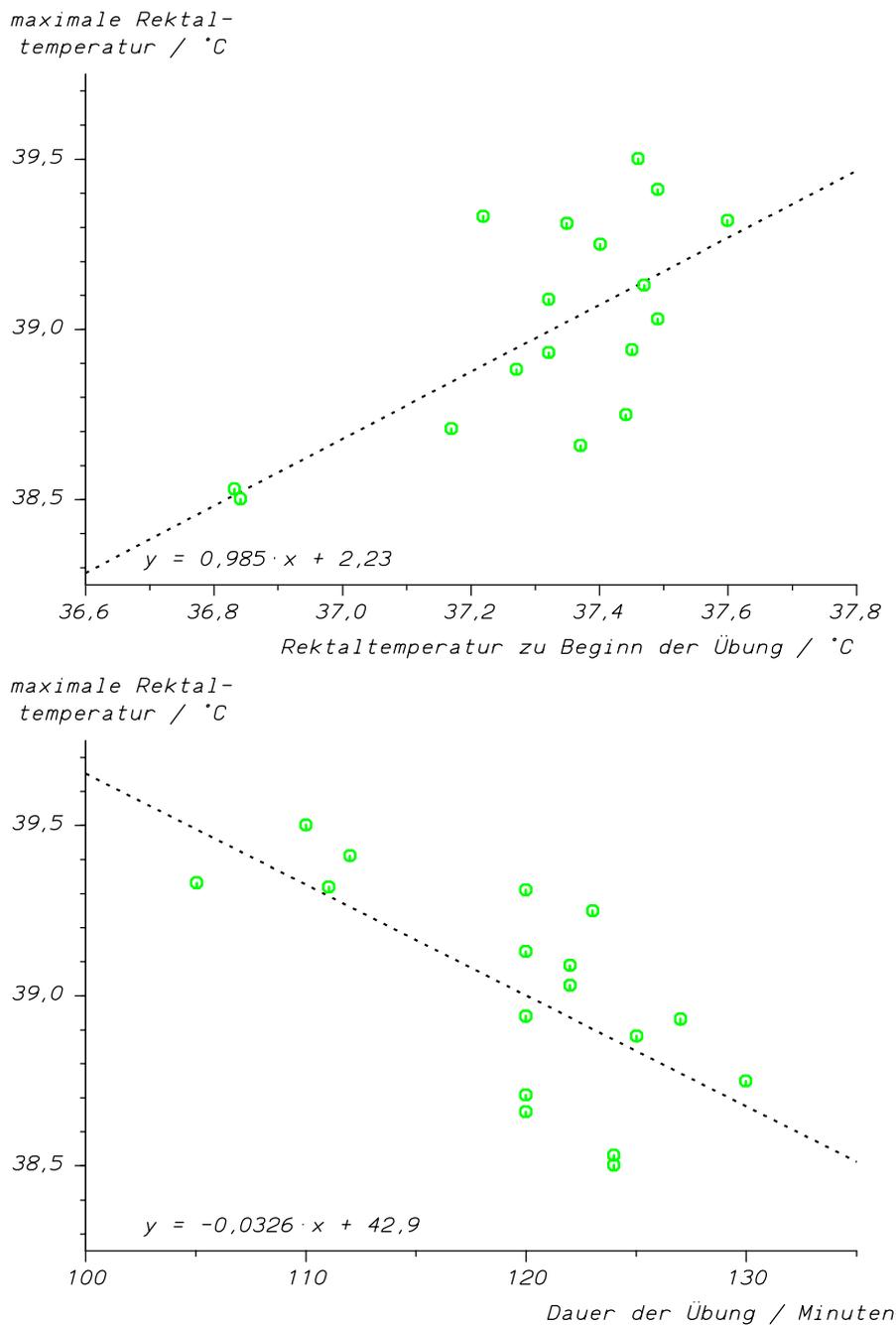


Abb. 55: Einfluß von Ausgangswert der Körpertemperatur und Übungszeit auf die maximale Rektaltemperatur bei Standardübungen, die mehr als 1½ Jahre nach der ersten Übung durchgeführt wurden (jeweils in linearer Regression: oberes Teildiagramm: $r = 0,67$; $p < 0,005$; unteres Teildiagramm: $r = 0,68$; $p < 0,005$).

Abb. 55 zeigt die Abhängigkeit der Rektaltemperatur am Ende der Übung vom Ausgangswert der Rektaltemperatur und von der Dauer der Übung: in linearer Näherung bestimmt die Ausgangstemperatur direkt die Endtemperatur; je schneller die Übung durchgeführt wird, umso mehr steigt die Körpertemperatur bis zum Ende der Übung an.

Eine multivariate lineare Regression, die beide Einflußgrößen in Betracht zieht, ergibt:

$$t_{re,max} = 0,768 \cdot t_{re,min} - 0,0258 \cdot D + 13,42 ; \quad R = 0,85; p < 0,0001 \quad (4)$$

wenn $t_{re,min}$ der Ausgangswert der Rektaltemperatur vor der Übung und D die Dauer der Übung in Minuten ist.

5.2 Einfluß von Dehydratation und Elektrolytverlust

Um den Einfluß der Flüssigkeits- und Elektrolytverluste während einer Übung abschätzen zu können, wurden Herzschlagfrequenz und Rektaltemperatur während eines Übungstages aufgezeichnet. Nach dem Dynavit®-Test zur Ermittlung der körperlichen Leistungsfähigkeit wurde eine etwa zweistündige Pause eingelegt, in der nur die Flamenschutz-Unterwäsche gewechselt wurde. Nach der Grubenwehrübung wurde der weitere Verlauf der physiologischen Größen aufgezeichnet; es wurde ebenfalls nur die Unterwäsche gewechselt (und nicht geduscht). Zwischen Dynavit-Test und Übung wurde mit den anderen Übungsteilnehmern gegessen und getrunken (kein Kaffee!) sowie über laufende Forschungsprojekte gesprochen ; nach der Übung wurde zu Mittag gegessen und *ad libitum* getrunken sowie weiter über Auswertung laufender Projekte verhandelt.

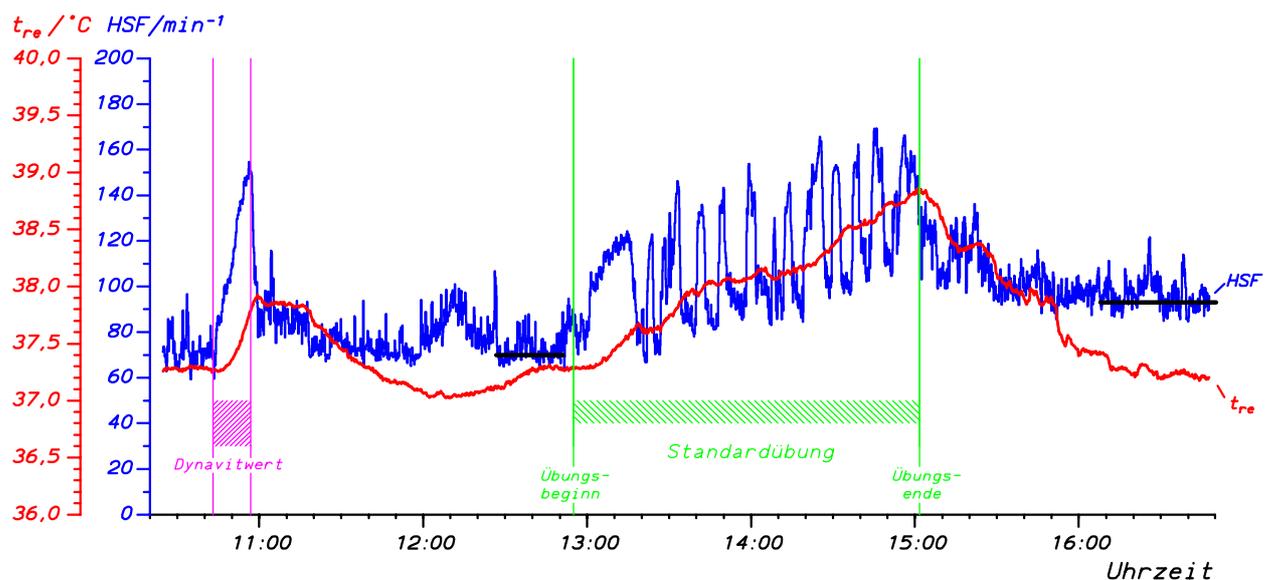


Abb. 56: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während eines Untersuchungstages mit Bestimmung des Dynavit®-Werts und einer Standardübung der Grubenwehr; eingezeichnet sind Bezugswerte der Herzschlagfrequenz vor und nach der Grubenwehrübung bei annähernd gleicher Körpertemperatur.

Der Schweißverlust betrug während der Übung 3,2 kg oder 3,4 % der Körpermasse. Die eingezeichneten Bezugswerte der Herzschlagfrequenz betragen 70 min^{-1} und 93 min^{-1} . Die Herzschlagfrequenz bleibt um etwa 23 min^{-1} erhöht, was für möglicherweise geplante Mehrfacheinsätze von Bedeutung ist.

Wenn eine normale Maske für das Atemschutzgerät verwendet wird, ist es nicht möglich, während einer Grubenwehrübung zu trinken; bei schwerer klimatischer Belastung sollte der Einsatz einer Trinkmaske in Betracht gezogen werden, damit schon während der Übung getrunken werden kann, um die Höhe der Dehydratation zu verringern und die Leistungsfähigkeit während des Einsatzes hoch zu halten (vgl. Kapitel 2.4.3.2).

5.3 Interindividuelle Unterschiede der Beanspruchung bei Übungen der Gasschutzwehr⁵⁷

Nachdem in Kapitel 5.1 die Auswirkung der Gewöhnung auf die Beanspruchung eines Grubenwehrmitgliedes während verschiedener Übungen im Längsschnitt dargestellt wurde, soll hier in einem Querschnitt das Ausmaß der interindividuellen Streuung der Beanspruchung während einer Übung der Gasschutzwehr dargestellt werden. – Darüberhinaus wird die Beanspruchung zweier unterschiedlicher Kollektive verglichen: der Gasschutzwehr (für die die Kriterien der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung weitgehend denen der Feuerwehr entsprechen) und der Grubenwehr, deren Vorgaben für körperliche Leistungsfähigkeit bei der medizinischen Vorsorgeuntersuchung unterschiedlich hoch sind. Bei der Gasschutzwehr wurde zum Zeitpunkt der Untersuchung eine körperliche Leistungsfähigkeit von 2,1 W/kg bei einer Ergometrie (W 150) gefordert.

Bei der Übung handelt es sich um die Standardübung der Gasschutzwehr im ehemaligen Übungshaus der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Essen, die zum Abschluß von Lehrgängen für Truppführer der Gasschutzwehr durchgeführt wurde. Die Übung wurde in Schutzkleidung unter schwerem Atemschutz durchgeführt und dauerte 30 Minuten; Ausrüstung und Bekleidung wogen etwa 23 kg (Einzelheiten siehe WERNER ET AL. 1988 [413]). Da bei der Übung ein Flammenschutzanzug getragen wird und das Übungshaus auf 30 °C aufgeheizt ist, stellt die Übung eine Hitzebelastung dar.

In Abb. 57 ist der Verlauf der Herzschlagfrequenz während einer solchen Standardübung für zwei Übungsteilnehmer aufgezeichnet, die die Übung gemeinsam in einem Trupp absolvierten. Für den Probanden 1 – der vor Proband 2 im Trupp war – beginnen so alle Übungselemente etwas früher, insbesondere das Klettern an der Endlosfahrtleiter, an der nur jeweils ein Truppmitglied gleichzeitig klettern konnte. Die Mittelwerte der Herzschlagfrequenz betragen $105,5 \text{ min}^{-1}$ für Proband 1 bzw. $166,0 \text{ min}^{-1}$ für

⁵⁷ Teile dieses Kapitels wurden von WERNER ET AL. 1988 [413] veröffentlicht und von KAMPMANN ET AL. 1988 [173] und 1989 [174] in Vorträgen vorgestellt.

Proband 2; das Alter betrug 44 bzw. 24 Jahre und der Broca-Index 85 % bzw. 88 %. Proband 1 war ein ausdauertrainierter Leistungssportler; seine Herzschlagfrequenz liegt nicht nur sowohl in Ruhe als auch unter Belastung deutlich niedriger als bei Proband 2, sondern fällt auch zwischen den einzelnen Übungsabschnitten schneller und um größere Anteile ab. Während Proband 1 die Herzschlagfrequenz von 150 min^{-1} , bis zu der bei der medizinischen Untersuchung belastet werden soll, nicht überschreitet, liegt die Herzschlagfrequenz von Proband 2 selbst während der kurzen Pausen zwischen den Übungselementen in der zweiten Hälfte der Übung weitaus höher.

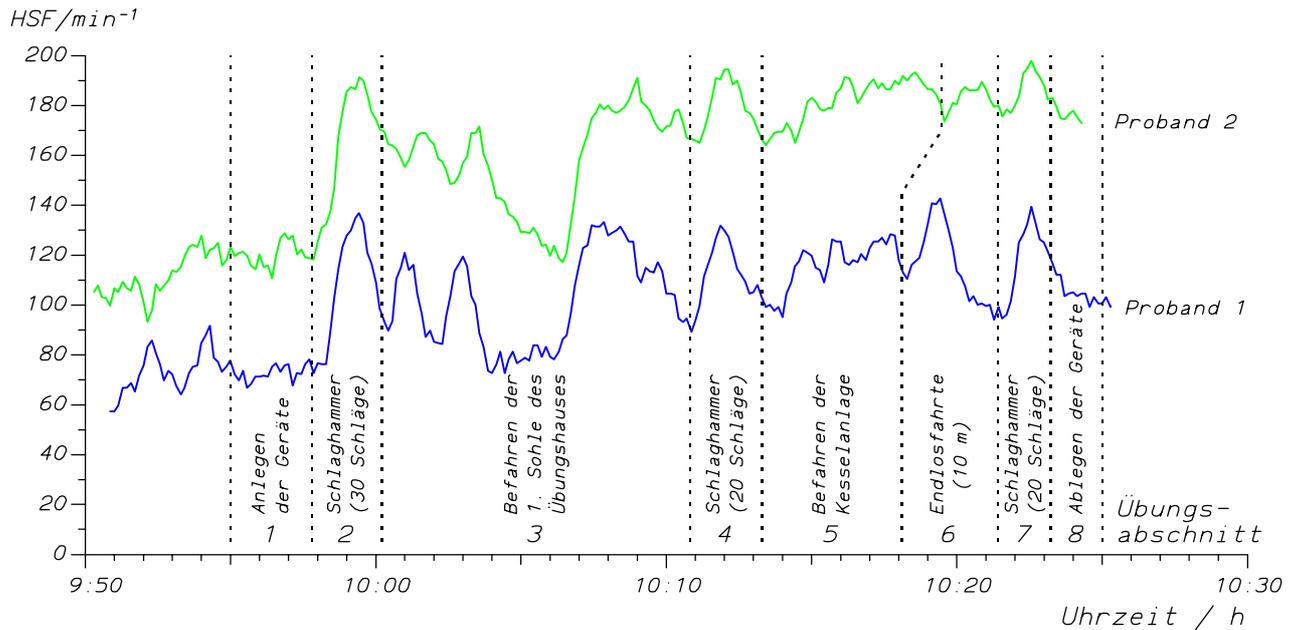


Abb. 57: Der Verlauf der Herzschlagfrequenz während einer Gasschutzwehübung von 30 Minuten Dauer mit Preßluftatmer für zwei Mitglieder der Gasschutzwehr.

Der mittlere Verlauf der Herzschlagfrequenz für alle 44 untersuchten Gasschutzwehrmitglieder – gemittelt über 3-Minuten-Abschnitte – ist in Abb. 58 eingezeichnet: der Median der Beanspruchung geht etwa gegen 150 min^{-1} ; dies bedeutet, daß die Beanspruchungsspitzen innerhalb der ausgewerteten Intervalle deutlich höher sein können (vgl. Abb. 57).

Da die von uns auf die hohen Beanspruchungen angesprochenen Arbeitsmediziner vermuteten, daß die Belastung während der Übung insgesamt viel zu hoch sei, wurde ein Kollektiv von 12 Mitgliedern der Grubenwehr, die eine höhere körperliche Leistungsfähigkeit aufweisen müssen (eine „maximale Ergometrie“: W „200-Alter“ mit $3,0 \text{ W/kg}$ bei der medizinischen Untersuchung vgl. [438]), bei der gleichen Übung untersucht. Es zeigte sich, daß die Mediane der Herzschlagfrequenzen der Grubenwehrmitglieder während fast aller Übungsabschnitte um 20 bis 30 min^{-1} niedriger lagen als die Werte der Mitglieder der Gasschutzwehr (Abb. 58). Das 95. Perzentil der Herzschlagfrequenz unterschied sich in beiden Gruppen nicht sehr stark, was darauf hinweist, daß auch unter den Teilnehmern der Grubenwehr ein Mitglied sehr hohe Beanspruchungen aufwies.

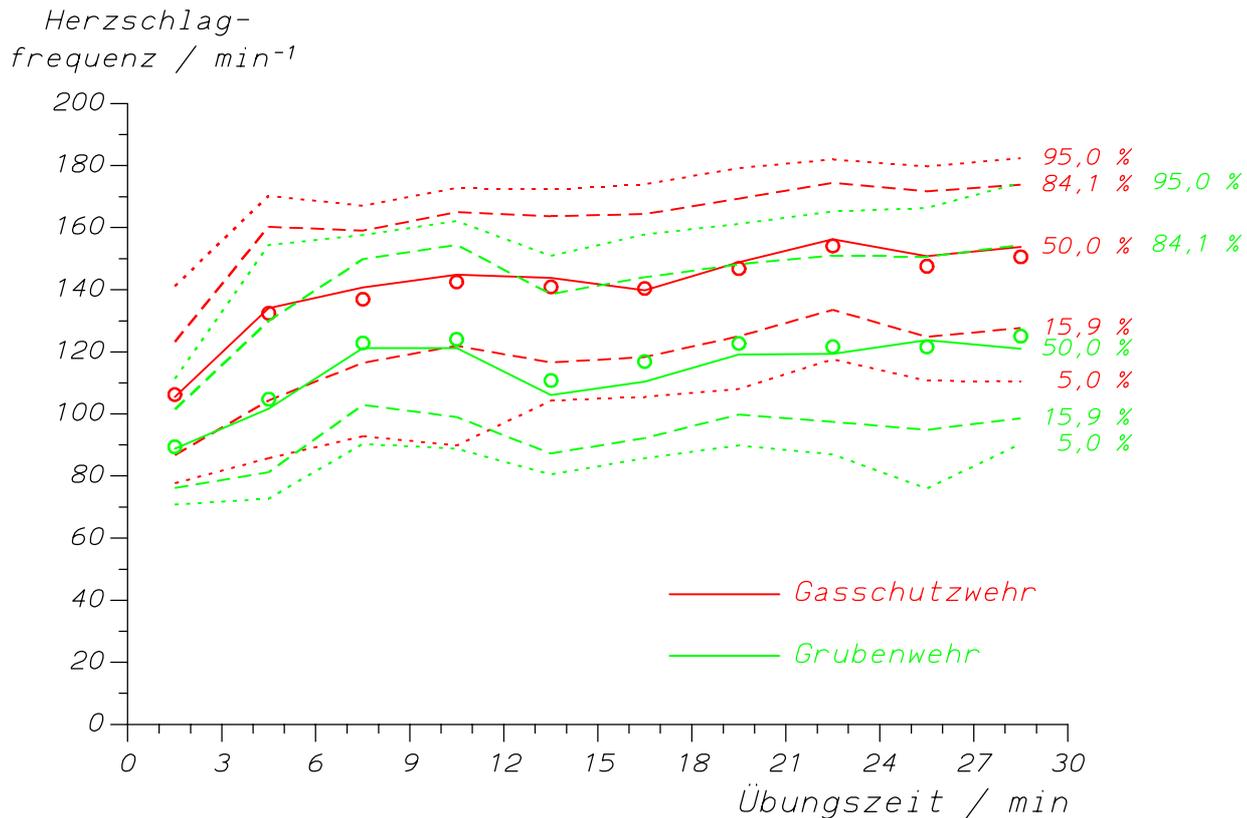


Abb. 58: Vergleich der Beanspruchung während einer Gasschutzwehrrübung von 30 Minuten Dauer für 44 Mitglieder der Gasschutzwehr und 12 Mitglieder der Grubenwehr. Statistische Kenngrößen jeweils für 3-Minuten-Abschnitte der Übung.

Die Verteilungen der Herzschlagfrequenzen aller Übungsteilnehmer beider Gruppen während der Übung sind in Abb. 59 dargestellt: Die Verteilungen unterscheiden sich im Mittelwert um 23 min^{-1} . Die Verteilung der Herzschlagfrequenz der Grubenwehrmitglieder zeigt eine leichte Rechtsschiefe: für eine Übung, bei der die Herzschlagfrequenz in den Pausen zwischen den einzelnen Übungselementen deutlich abfällt ist eine solche Form zu erwarten. Die Verteilung der Herzschlagfrequenz für die Gasschutzwehrmitglieder zeigt dagegen eine ausgeprägte Linksschiefe, die dadurch bedingt ist, daß die Verteilung bei einer Frequenz von "200-Alter" deutlich einbricht: offenbar sind höhere Herzschlagfrequenzen nur noch für wenige Mitglieder der Gasschutzwehr möglich, und es findet in den Pausen zwischen den Übungselementen keine deutliche Absenkung der Herzschlagfrequenz mehr statt (vgl. Abb. 57, Proband 2).

In Abb. 60 ist aufgeführt, welchen Zeitanteil der Übung die Mitglieder der beiden Untersuchungskollektive bei Herzschlagfrequenzen oberhalb verschiedener Grenzwerte verbringen. Nur drei von 44 Mitgliedern der Gasschutzwehr bleiben unterhalb der Herzschlagfrequenz von 150 min^{-1} , bis zu der bei der arbeitsmedizinischen Untersuchung belastet wird; drei Mitglieder verbringen 80 – 90 % der gesamten Übungszeit oberhalb dieser Frequenz! Bei der Grubenwehr bleiben zwar nur vier von 12 Mitgliedern unterhalb von 150 min^{-1} , aber fünf weitere Mitglieder überschreiten diesen Wert nur während weniger als 10 % der Übungszeit. Neun von zwölf Mitgliedern der Gruben-

wehr bleiben unterhalb der Frequenzgrenze von „200–Alter“, bis zu der bei der „maximalen Ergometrie“ während der arbeitmedizinischen Untersuchung der Grubenwehrmitglieder untersucht wird, während 40 von 44 Mitgliedern der Gasschutzwehr diesen Wert überschreiten, 31 sogar um mehr als 10 % der Übungszeit – dies ist länger, als eine Belastungsstufe während der Ergometrie dauert. Die Grenze „220–Alter“ überschreitet nur ein Mitglied der Grubenwehr, während immerhin 18 von 44 Mitgliedern der Gasschutzwehr diese Grenze während der Übung überschreiten.

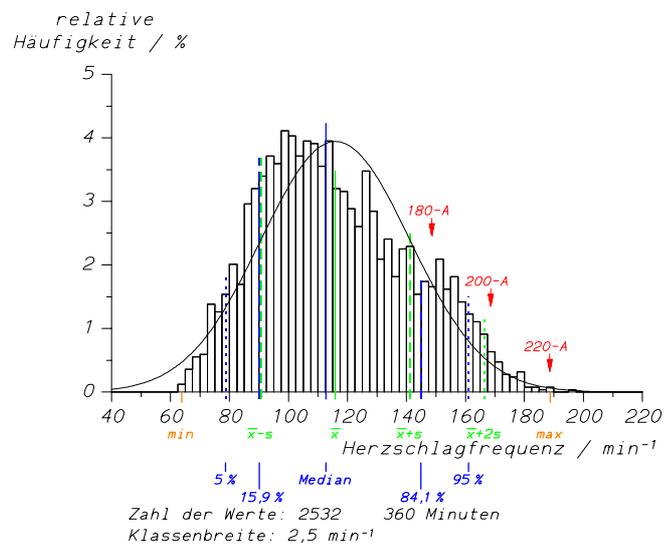
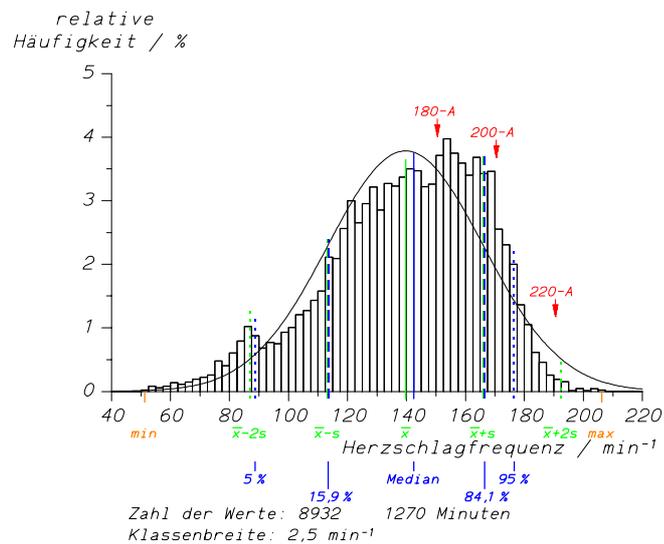


Abb. 59: Herzschlagfrequenzverteilung während einer Gasschutzwehübung für 44 Gasschutzwehrmitglieder (oben) und zum Vergleich für 12 Grubenwehrmitglieder (unten).

Eine sehr hohe Beanspruchung von Feuerwehrleuten bei Übungen wurde auch in anderen Untersuchungen festgestellt: HÜBNER & SZADKOWSKI erhielten bei einer Atemschutzübung der Hamburger Berufsfeuerwehr maximale Herzschlagfrequenzen oberhalb von

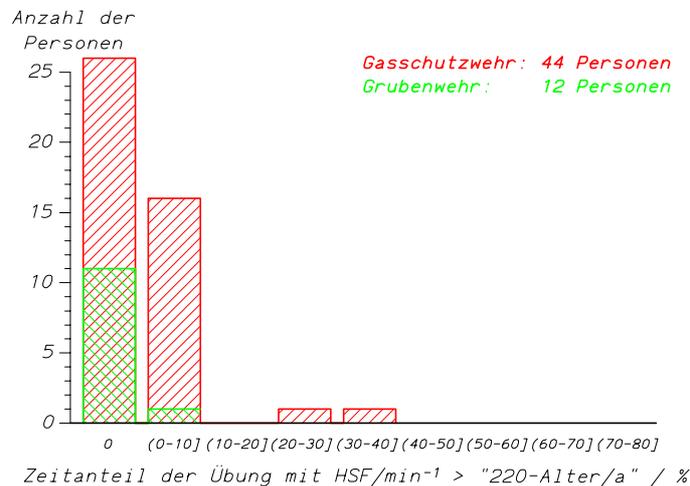
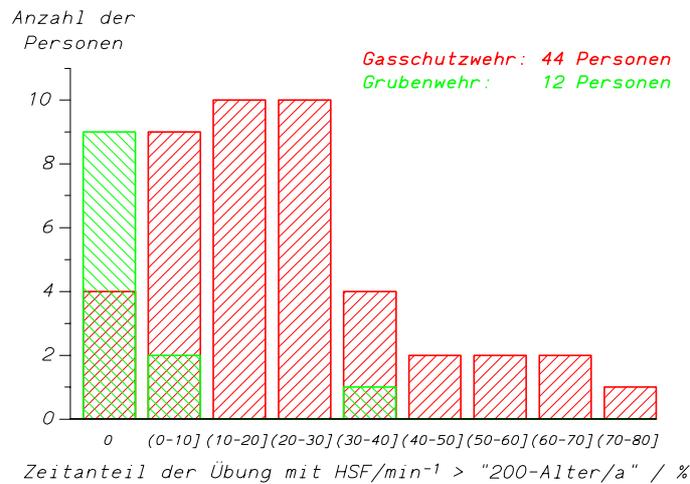
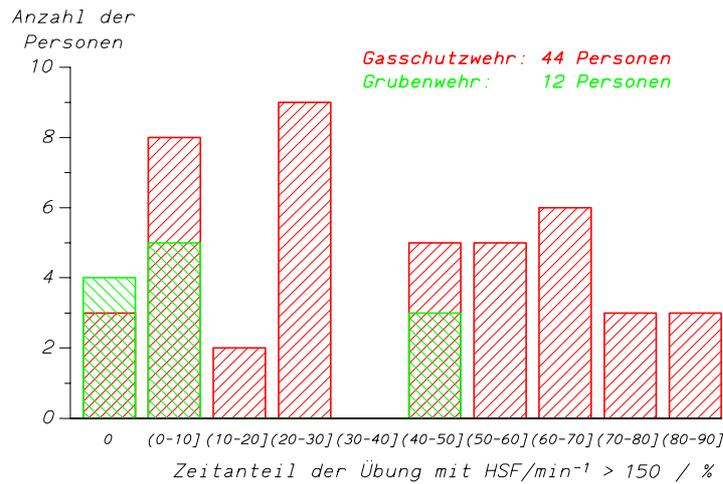


Abb. 60: Zeitanteile der Gasschutzwehrrübung, die oberhalb der Beanspruchungsgrenzen der Herzschlagfrequenz von 150 min⁻¹, "200-Alter" und "220-Alter" zugebracht werden für Mitglieder der Gasschutz- und Grubenwehr.

200 min⁻¹ [154]; LOUHEVAARA ET AL. registrierten beim Löschen unter Rauchentwicklung („Rauchtauchen“ in Schiffen) Herzschlagfrequenzen oberhalb von 180 min⁻¹ [231], BENDIEK berichtet von Maximalwerten der Herzschlagfrequenz oberhalb von 190 min⁻¹ während einer Übung der Mainzer Berufsfeuerwehr [24]. ROMET & FRIM fanden als höchste

Herzschlagfrequenz während einer Übung der Feuerwehr 193 min^{-1} [313]. Für die weit- aus meisten von uns untersuchten Mitglieder der Gasschutzwehr liegt die Herzschlag- frequenz während des größten Teils der Standardübung deutlich oberhalb der Grenz- frequenz von 150 min^{-1} , bis zu der sie bei der arbeitsmedizinischen Untersuchung be- lastet werden sollen.

Zusammenfassung:

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, daß Gasschutzwehrmitglieder bei einer Stan- dardübung sehr hohe Herzschlagfrequenzen erreichten; dies wurde auch in anderen Untersuchungen beschrieben. Wenn die Ergometrie zur Gesundheitskontrolle (ULMER 1985 [382]) durchgeführt werden soll, d.h. als klinische Methode zur leistungsabhän- gigen und kontrollierten Provokation pathologischer Zustände (RUTENFRANZ 1984 [321]), dann sollten die Gasschutzwehrmitglieder bei der arbeitsmedizinischen Vorsorgeunter- suchung bis zu Beanspruchungswerten der Herzschlagfrequenz von mindestens 180 min^{-1} belastet werden, so weit dies zum einen aus der Sicht des untersuchenden Arztes zulässig und zum anderen bei sehr gut trainierten Personen erreichbar ist. Dies ent- spricht weitgehend der Forderung von VOGELSANG & ULMER [387], bei der arbeitsmedizi- nischen Untersuchung von Feuerwehrleuten Herzschlagfrequenzen von 170 min^{-1} bis 195 min^{-1} zu provozieren.

Erstmals wurde von uns – neben den Gasschutzwehrleuten, für die die Standard- übung entwickelt wurde – ein Kollektiv mit einem höheren Anforderungsgrad an die körperliche Leistungsfähigkeit während der gleichen Übung untersucht. Es ergab sich im Mittel eine deutlich niedrigere Beanspruchung, wobei aber in beiden Gruppen von Wehrmitgliedern eine große Streuung der Beanspruchung besteht. – Dies läßt den Schluß zu, daß durch gezieltes Training bzw. entsprechende Erhöhung der Anforderun- gen im Hinblick auf die körperliche Leistungsfähigkeit von Gasschutzwehr- oder auch Feuerwehrleuten die Beanspruchung während der Übungen – und damit auch während der Einsätze – deutlich gesenkt werden kann.

5.4 Verteilung der Körpertemperatur bei der Grubenwehr während verschiedener Untersuchungen

LIND stellte 1970 [225] dar, daß die Risikoabschätzungen für Gesundheitsstörungen für Arbeit in heißer Umgebung von WYNDHAM (1965) [420] (siehe Kapitel 7.1) auf Verteilungen der Rektaltemperatur beruhen, die bei eingeborenen Bergleuten gemessen wurden und stark rechtsschief waren; WYNDHAMS Annahme war, daß die Bergleute im „wärmeren“ Teil der Verteilung stärker gefährdet sind, einen Hitzschlag zu erleiden. WYNDHAM & HEYNS veröffentlichen 1973 [427] Verteilungen der Rektaltemperatur bei Körperarbeit im Klima für 10 nichtakklimatisierte und 13 hoch akklimatisierte Probanden für verschiedene Klimabelastungen und Arbeitsschwere. Diese Verteilungen weisen alle eine hohe Rechtsschiefe auf. Auf diesen Verteilungen beruhen die Abschätzungen des Risikos der Hitzarbeit von WYNDHAM & HEYNS in der angegebenen Arbeit und beispielsweise auch von WENZEL ET AL. 1989 [412], wobei die stark rechtsschiefe Verteilung extrem extrapoliert wird, um ein Risiko von 1:500000 oder 1:1000000 abzuschätzen, das für Personen besteht, eine Körpertemperatur von 42 °C (bzw. 39 °C) bei einem vorgegebenen Mittelwert der Verteilung von beispielsweise 38,0 °C zu erreichen.

LIND stellt – im Zusammenhang der Beurteilung der Häufigkeit von Hitzschlägen im europäischen Bergbau – weiter fest, daß für europäische (*caucasian*) Probanden nicht geklärt ist, ob bei ihnen ebenfalls so schiefe Verteilungen der Körpertemperaturen bei hoher Klimabelastung auftreten, wie in WYNDHAMS Untersuchungen: bei den extremen Extrapolationen aus Verteilungen der Körpertemperatur, die für solche Risikoabschätzungen benutzt werden, hätte eine unterschiedliche Form und Breite der Verteilung erhebliche Auswirkungen.

Aus unseren Untersuchungen lassen sich Verteilungen der Körpertemperatur für ein Kollektiv von 51 Grubenwehrmitgliedern angeben, die bei verschiedenen Klimaexpositionen (BRESSER & KAMPMANN 1997 [36]) gewonnen wurden. In Abb. 61 - Abb. 63 sind die Verläufe der Rektaltemperatur der einzelnen Grubenwehrmitglieder in den Untersuchungen dargestellt, sowie die Zeitpunkte, zu denen die Verteilungen gewonnen wurden (bei der Standardübung in Abb. 61 sind die Mittelwerte der einzelnen Übungsabschnitte dargestellt). Weitere Einzelheiten zu den Untersuchungen finden sich in [36].

Tabelle 10 gibt die Kennwerte der ermittelten Verteilungen an; in Abb. 64 sind die Summenhäufigkeiten in einer Wahrscheinlichkeitsskala dargestellt, in der normalverteilte Verteilungen auf Geraden liegen und die Steigung die Breite der Verteilung angibt. Es zeigt sich, daß die Verteilungen in guter Näherung normalverteilt sind und die Breite der Verteilungen mit der Dauer der Hitzeexposition – für WVT und Std – zunimmt. Die Verteilungen “Std9” und “Std12” zeigen eine Rechtsschiefe im Bereich der äußeren Meßwerte der Verteilung.

Tabelle 10: Kenngrößen der Verteilungen der Körpertemperatur bei verschiedenen Untersuchungen

Art der Übung	Zeitpunkt der Bewertung	Rektaltemperatur $t_{re} / ^\circ\text{C}$	Standardabweichung / $^\circ\text{C}$
Wärmeverträglichkeitstest (Einzelheiten siehe [36])	WVT 10	37,27	0,25
	WVT 20	37,60	0,28
	WVT 30	38,01	0,35
Flammenschutzübung (Einzelheiten siehe [36])	FL A1	37,54	0,27
	FL A2	37,80	0,27
Standardübung (Einzelheiten siehe [36])	Std 4	38,12	0,25
	Std 9	38,56	0,30
	Std 12	38,78	0,36

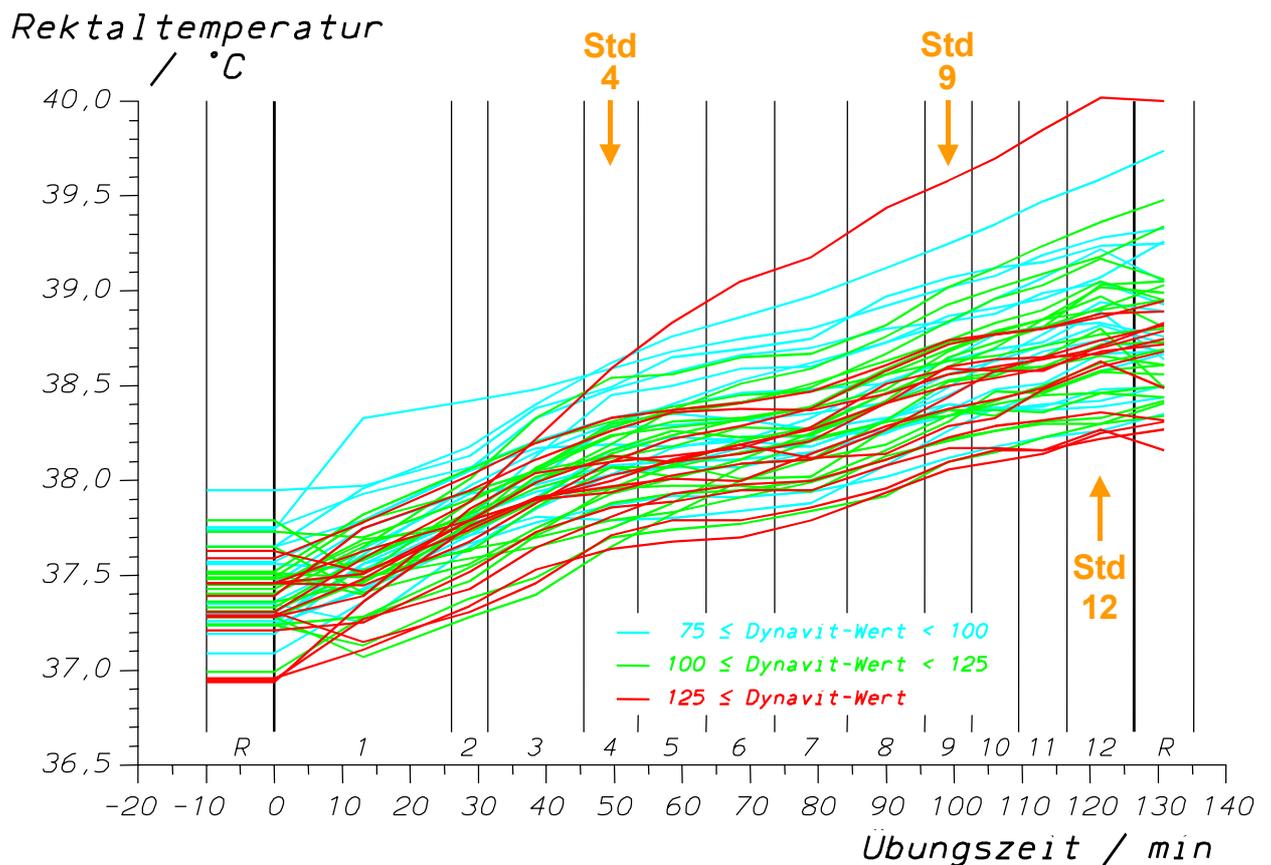


Abb. 61: Verläufe der Rektaltemperatur von 51 Mitgliedern einer Grubenwehr während einer Standardübung [36] mit eingezeichneten Zeitpunkten für die Bestimmung der Verteilung in Abb. 64.

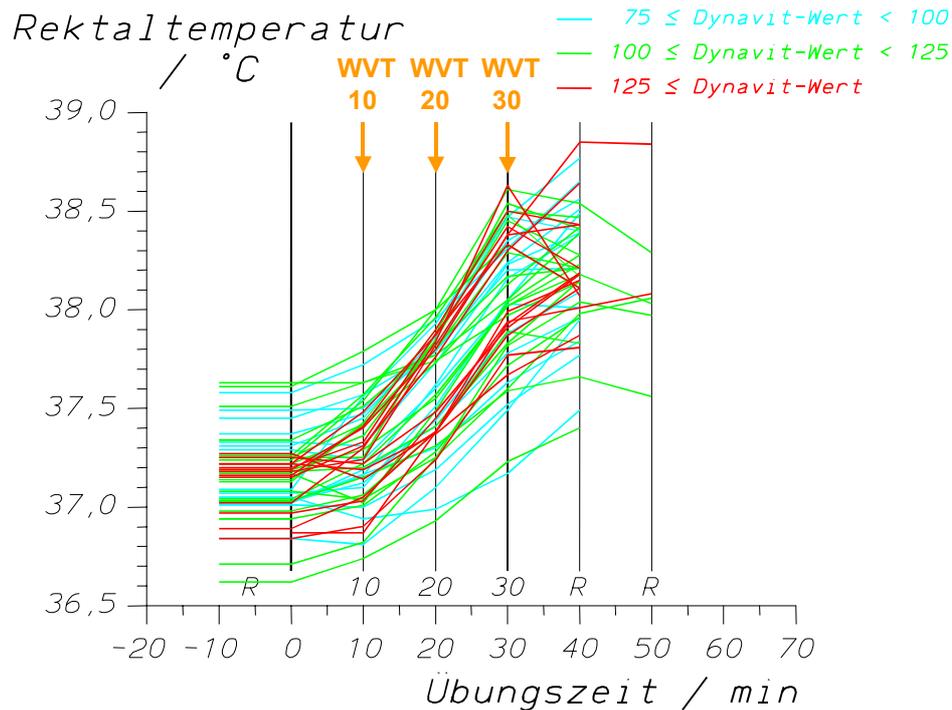


Abb. 62: Verläufe der Rektaltemperatur von 51 Mitgliedern einer Grubenwehr während eines Wärmeverträglichkeitstests [36] nach STOKLOSSA [362] mit eingezeichneten Zeitpunkten für die Bestimmung der Verteilung in Abb. 64.

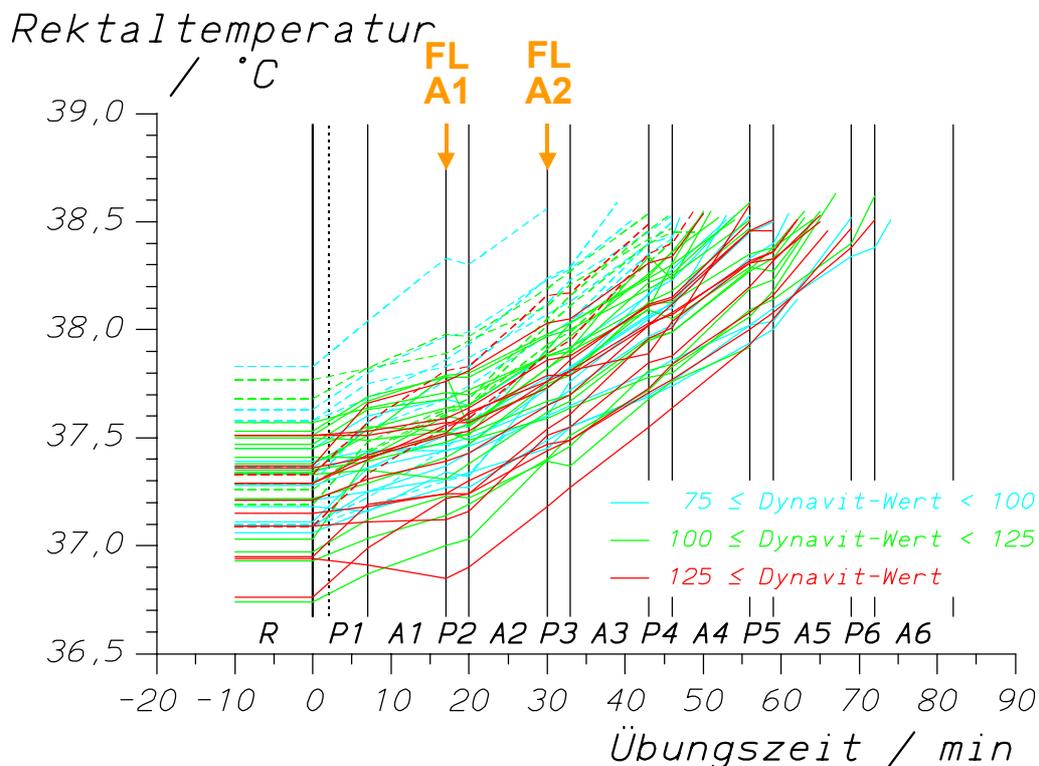


Abb. 63: Verläufe der Rektaltemperatur von 51 Mitgliedern einer Grubenwehr während einer Übung in Flammenschutzbekleidung [36] mit eingezeichneten Zeitpunkten für die Bestimmung der Verteilung in Abb. 64.

Innerhalb der Arbeitsgruppe in BIOMED 2 wurde die weitgehend normalverteilte Verteilung "Std4" für die Risikoabschätzung verwandt, in einer Population bei einer mittleren Rektaltemperatur von 38,0 °C eine Rektaltemperatur von 39,2 °C oder 42,0 °C aufzufinden [240]. Diese Abschätzung wird in den Neuentwurf der Norm ISO 7933 eingehen.

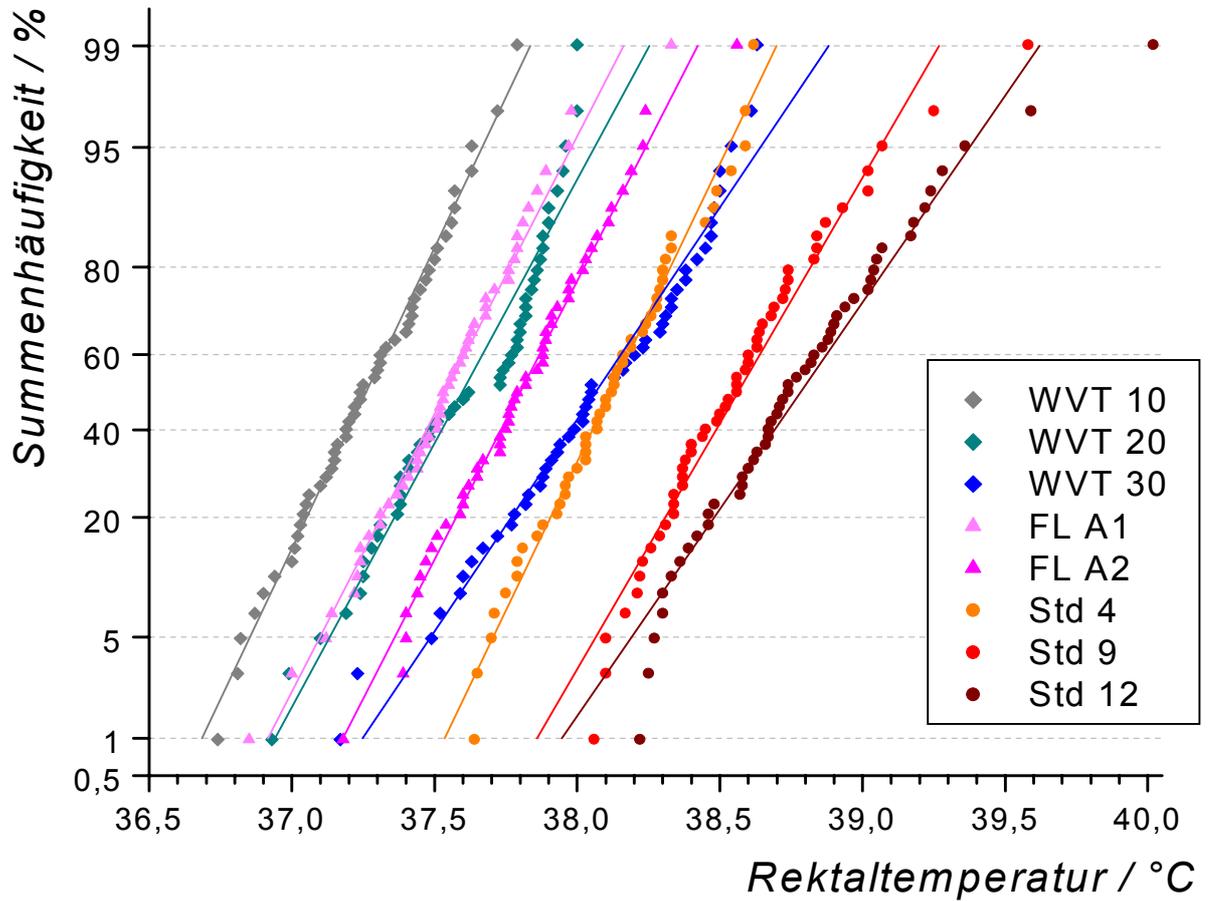


Abb. 64: Verteilungen der Körpertemperatur von 51 Grubenwehrmitgliedern während verschiedener Übungen.

6 Feldversuche im Steinkohlenbergbau

Überblicke zu arbeitsmedizinischen Aspekten der Tätigkeiten im Bergbau, sowie zu Tätigkeiten und spezifischen Belastungen im Bergbau finden sich beispielsweise bei PIKARSKI ET AL. (1986 [297]) und LENAERTS-LANGANKE (1997 [220]).

LINSEL stellte bereits 1951 fest [227]: „Das Grubenklima wird in sehr kurzer Zeit eine ernste Aufgabe des Ruhrbergbaus werden“. – Im Ruhrbergbau hat in den letzten Jahrzehnten die Klimabelastung immer weiter zugenommen. Dies liegt zum einen an der Nordwanderung des Bergbaus, wobei im Norden – in größerer Teufe – wegen der geothermischen Tiefenstufe von etwa 30 m Teufe pro K ein entsprechender Temperaturanstieg des Gebirges vorliegt; zum anderen werden in Hochleistungsstreben immer größere elektrische Leistungen für Gewinnung und Transport der Kohle installiert und zum Einsatz gebracht.

Im deutschen Steinkohlenbergbau wurden – durch die zunehmende Abbauteufe und durch die Regelung der Arbeitszeit vor Ort in der Klima-Bergverordnung [432] bedingt – immer höhere Kälteleistungen zur Wetterkühlung aufgewendet: von 10 MW im Jahr 1970 [391] bis 256 MW im Jahr 1993 [329].

Trotz erhöhter Aufwendungen für die Klimatisierung nimmt die Klimabelastung zu: so betrug beispielsweise im Jahr 1990 die mittlere Abbauteufe 919 m, je Abbaueinheit waren 2154 kW durchschnittliche Gesamtkälteleistung installiert, und im Monat Juli wurden 50,1 % aller Schichten im Grubenbetrieb unter Tage in klimabelasteten Bereichen verbracht (t_a über 28 °C oder BET über 25 °C). 1997 war die mittlere Abbauteufe bereits auf 966 m angestiegen, je Abbaueinheit waren mehr als 4000 kW durchschnittliche Gesamtkälteleistung installiert, und im Bezugsmonat Juli wurden 54,3 % aller Schichten in klimabelasteten Bereichen verbracht ([254], [255] und [318]).

Bisherige physiologische Untersuchungen im Ruhrbergbau behandelten die Auswirkung der Mechanisierung (SIEBER (1963) [354], TEMMING & ROHMERT (1972) [373]) und die Beanspruchung im Transport (KAMPMANN & MORFELD 1986 [169]) sowie beim Herrichten und Ausrauben von Schildstreben (KAMPMANN & MORFELD 1989 [175]). Diese Untersuchungen waren nicht bei schwerer klimatischer Belastung durchgeführt worden, und in [354] und [373] war keine Körperkerntemperatur gemessen worden, die zur Beurteilung, inwieweit sich ein thermophysiologisches Gleichgewicht unter Klimabelastung einstellt, unbedingt benötigt wird.

Es wurde daher 1995 mit eine Studie „*Untersuchung und Bewertung von Hitzeeinwirkungen auf Bergleute im Steinkohlenbergbau*“ [189] begonnen, deren Ergebnisse in Hinblick auf Herzschlagfrequenz, Körpertemperatur und Flüssigkeitsbilanz der Bergleute im Folgenden vorgestellt werden sollen.

6.1 Erhebung von Daten in Feldversuchen an heißen Betriebspunkten

Es wurden in 125 Schichten folgende Beanspruchungsgrößen erhoben: Herzschlagfrequenz, Rektaltemperatur, Gewichtsverlust, zu Beginn der Studie auch der Energieumsatz bei typischen Tätigkeiten, Körperstellungen und -haltungen sowie statische und dynamische Arbeitsanteile. Auf seiten der Belastungsgrößen wurden Arbeitsablaufprotokolle – orientiert an Arbeitszyklen – erstellt, sowie als wesentliche Parameter der Arbeitsumgebung Klima, Lärm, Fahrhöhe und Einfallen erfaßt. An anthropometrischen Größen wurden Körpergröße, Körpermasse, Alter und Untertagejahre erfaßt. Die körperliche Leistungsfähigkeit wurde ergometrisch bestimmt und daraus die maximale Sauerstoffaufnahme $\dot{V}_{O_2, max}$ ermittelt – aus organisatorischen Gründen war eine solche Bestimmung nicht für alle untersuchten Bergleute möglich.

Die Untersuchung ist orientiert am Modell von Belastung und Beanspruchung (siehe etwa ROHMERT 1984 [312]). In diesem Modell wird die Gesamtheit der objektiv auf den Arbeitnehmer unter den jeweiligen Arbeitsbedingungen einwirkenden Umstände als *Belastung* bezeichnet; die individuelle Reaktion des Menschen auf die Belastung heißt *Beanspruchung*. Die Art der untersuchten Tätigkeiten wie auch die räumlichen und klimatischen Verhältnisse, unter denen sie ausgeführt werden, fällt somit unter „Belastung“, die sich unter diesen Arbeitsbedingungen einstellende Herzschlagfrequenz unter „Beanspruchung“. Entsprechend der in den Natur- und Ingenieurwissenschaften üblichen Gliederung funktionaler Zusammenhänge in die drei Bereiche der unabhängigen Variablen, abhängigen Variablen und der verknüpfenden Parameter kennt die Arbeitswissenschaft neben Belastung und Beanspruchung den Bereich der intervenierenden oder moderierenden Faktoren. Anthropometrische Kennwerte der untersuchten Bergleute wie Alter, Körpergröße und -masse haben im Konzept von Belastung und Beanspruchung eine solche parametrische Funktion.

Um einen repräsentativen Überblick über die Arbeit der Bergleute an einem Betriebspunkt zu erhalten, wurde angestrebt, jeden Bergmann möglichst während vier Untersuchungsschichten zu untersuchen; die vorhandene Meßausrüstung ließ es zu, jeweils mehrere Bergleute gleichzeitig zu untersuchen. In Vorbesprechungen über das Ziel der Untersuchungen, die angewandten Meßverfahren (insbesondere die Erhebung von EKG und Rektaltemperatur) und den Ablauf der Untersuchung mit Vertretern der Betriebsführung, Aufsichtspersonen, Betriebsrat und den Bergleuten, die an den in Frage kommenden Betriebspunkten arbeiteten, wurde geklärt, inwieweit die Bergleute zur Mitarbeit als Probanden bereit waren. Die Teilnahme an den Untersuchungen war freigestellt; es wurde insbesondere darauf hingewiesen, daß die Bergleute die Teilnahme an der Untersuchung jederzeit – auch ohne Begründung – abbrechen konnten und daß ihnen daraus keinerlei Nachteile entstehen würden.

Da ein großer Anteil der Bergleute raucht, stellt sich möglicherweise die Frage, ob die Abstinenz während der Zeit unter Tage die Ergebnisse – etwa der Messung der Herzschlagfrequenz – beeinflusst: zumindest diejenigen Bergleute, die Schupftabak benutzen, können den Nikotinspiegel im Blutplasma durch Schnupfen ohne weiteres auf vergleichbare Werte bringen wie durch Rauchen (RUSSELL ET AL. 1981 [319]).

Die Untersuchungen fanden statt, als die Vorschriften der Klima-Bergverordnung über die zulässige Beschäftigungszeit im Klima betrieblich durch eine Gesamtdauer der Schicht von sieben Stunden umgesetzt wurden.

6.1.1 Ablauf einer Messung

An den Untersuchungstagen trafen die Untersucher etwa anderthalb Stunden vor der Anfahrt auf der Schachanlage ein, so daß sie eine Stunde vor der Anfahrt umgezogen waren und die Meßausrüstung für den Einsatz vorbereitet war. Die Bergleute kamen dann eine Stunde vor der Anfahrt und wurden in der Verbandsstube unbekleidet gewogen und instrumentiert. Die EKG-Elektroden wurden angeklebt und zusätzlich mit Heftpflastern gegen Ablösen gesichert; die Bergleute legten die Rektaltemperaturfühler selbst an. Das Gewicht aller Getränke und Nahrungsmittel (Obst, Brote) wurde gemessen. Zum Abschluß wurden die Bergleute abmarschfertig einschließlich der mitgeführten Ausrüstung nochmals gewogen.

Zuvor wurden gesundheitliche Auflagen und Einschränkungen, Medikation, Rauchgewohnheiten und sportliche Aktivitäten in der Freizeit durch Befragen erhoben. Vor jeder Untersuchungsschicht wurden Schlafdauer, momentane Befindlichkeit, aktuelle Medikation und die Bedingungen auf dem Weg zur Arbeit abgefragt.

Die Bergleute fuhren dann für die gesamte Schichtdauer an und verrichteten ihre normale Arbeit. Im Fall, daß mehrere Bergleute an der Untersuchung teilnahmen, wurden sie gewöhnlich auch von mehreren Mitarbeitern des Instituts für Arbeitswissenschaften der RAG Aktiengesellschaft begleitet; je zwei Mitarbeiter beobachteten einen Bergmann während eines Arbeitszyklus oder eines längeren Teils der Schicht, wobei ein Protokollant ein standardisiertes Ablaufprotokoll verfaßte und der andere Protokollant die Körperhaltungen sowie die Anteile statischer und dynamischer Körperarbeit einschätzte. Danach wechselte das Protokoll auf einen anderen Bergmann, so daß die physiologischen Größen während der gesamten Schicht für alle untersuchten Bergleute vorliegen, während das Protokoll in diesem Fall nur Teile der Schicht detailliert erfaßt.

Nach der Ausfahrt wurde den Bergleuten zunächst die Meßausrüstung abgenommen, danach wurden sie nochmals unbekleidet gewogen. Die Trinkmenge wurde durch erneutes Wiegen der Teeflasche bestimmt, ebenso wurden die nicht gegessenen Mengen an Obst und Broten gewogen. Aus der Gewichts Differenz der Bergleute, der

Trink- und Essensmenge und gegebenenfalls der unter Tage mit einem Meßbecher bestimmten Harnmenge konnte dann die Schweißmenge errechnet werden.

Nachdem die Messung der Energieumsätze mit einer Gasuhr nach MÜLLER & FRANZ [267] wegen der Tragepflicht für eine Staubschutzmaske und auch wegen der schweren Klimabelastung nicht mehr als sinnvoll erschien (vgl. [189]), wurde im weiteren Verlauf der Untersuchung versucht, die körperliche Leistungsfähigkeit der Bergleute durch eine Ergometrie zu erfassen, was leider nicht mehr in allen Fällen möglich war: ein Teil der Bergleute war inzwischen in den Vorruhestand gegangen, einige Bergleute hatten den Konzern verlassen und einige weitere hatten kein weiteres Interesse an dieser zusätzlichen ärztlichen Untersuchung.

Im Anschluß an die Auswertung wurde dann jedem Bergmann ein Diagramm seiner Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur mit entsprechenden Vermerken aus dem Ablaufprotokoll erläutert und auf Wunsch mitgegeben. Es wurden zwei Abschlußbesprechungen durchgeführt, zu denen alle beteiligten Bergleute eingeladen waren und auf denen Grundzüge der Klimaphysiologie und die Ergebnisse der Studie den Bergleuten erläutert wurden.

Einzelheiten zur Meßtechnik, zur Protokollführung und zur Einschätzung von Körperstellungen und -haltungen finden sich in [189]. Die Klimamessungen beziehen sich auf den jeweiligen Arbeitsplatz des Bergmanns (nicht etwa auf den Streckenquerschnitt) und wurden bei wechselnden Aufenthaltsorten des Bergmanns während der Zeit vor Ort zeitgewichtet gemittelt, so weit dies möglich war.

6.1.2 Beispiele für Einzelschichten

Jede der in die Auswertung eingegangenen Schichten wurde entsprechend den Arbeitsablaufprotokollen nach den verschiedenen Kriterien unterteilt. Abb. 66 zeigt Herzschlagfrequenz- und Rektaltemperaturverlauf am Beispiel eines Bergmanns, der an einem Arbeitsplatz entsprechend Abb. 65 arbeitete: Hier lag – bis auf die unmittelbare Umgebung des Lüfters – ein räumlich und zeitlich ziemlich gleichförmiges feucht-warmes Klima vor ($t_a = 32,7\text{ °C}$; $t_w = 29,6\text{ °C}$; $v_a = 0,9\text{ m/s}$; $BET = 28,7\text{ °C}$; alle Werte sind zeitlich und räumlich gemittelt).

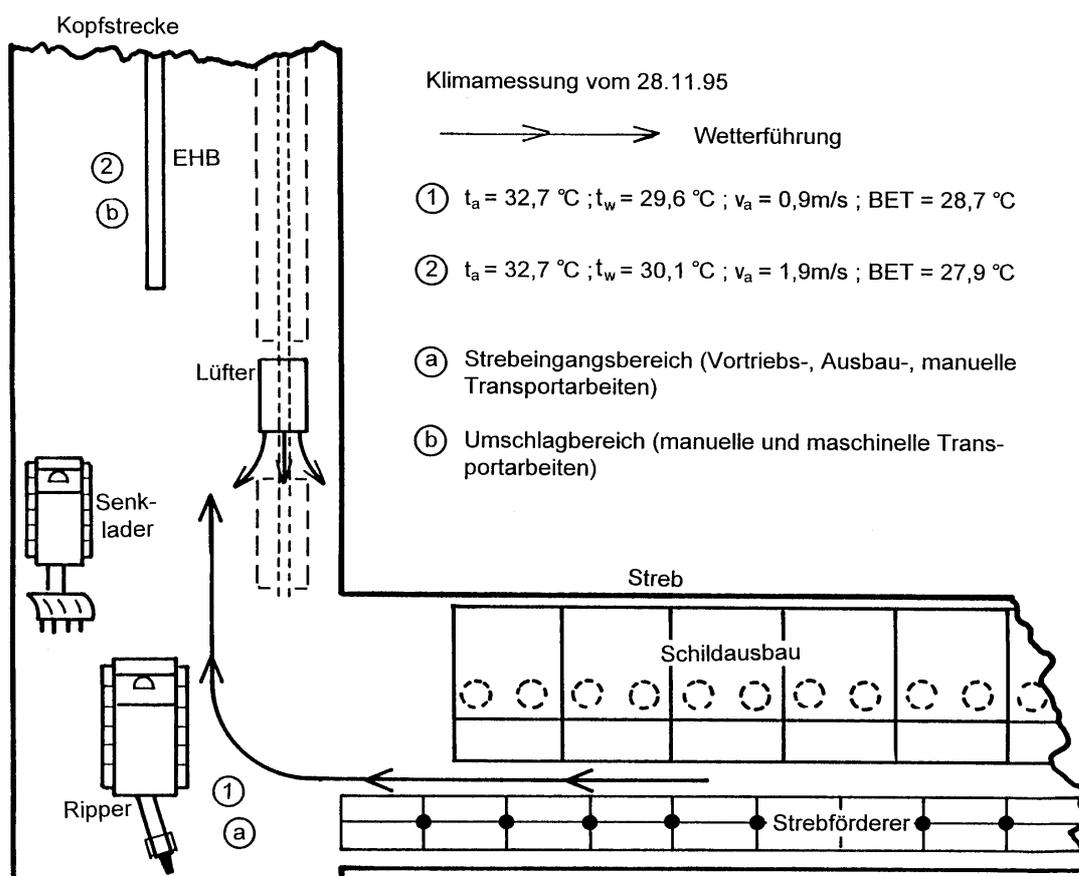


Abb. 65: Skizze zum Arbeitsbereich eines Bergmanns im Abwetterbereich des Streb-Strecken-Übergangs bei mitgeschnittener Strecke. Eine Kühlmöglichkeit besteht nur in der Nähe des Lüfters.

Anhand der Herzschlagfrequenz kann man viele Einzelheiten des Arbeitsablaufs nachvollziehen: Nach dem Anlegen der Meßausrüstung geht der Bergmann mehrere Treppen zum Schacht hoch; im Anschluß an die Seilfahrt folgt ein kurzer Fußmarsch zum Personenzug. Nach dem Ende der Zugfahrt (ca. 15:50 Uhr) folgt ein Fußmarsch von etwa 10 Minuten Dauer zum Blindschacht, und anschließend an die Seilfahrt im Blindschacht geht es zu Fuß weiter zum Streb-Strecken-Übergang. Nach der Ankunft vor Ort ist der Bergmann zunächst mit Bohrarbeiten beschäftigt; danach folgen manuelle Transport- und Ausbauarbeiten.

Nach dem Ende der Personenzugfahrt auf dem Hinweg fällt während des ersten Fußmarschs die gemessene Rektaltemperatur zunächst ab: Dies ist dadurch zu erklären, daß während des Fußmarschs zwar auch metabolische Wärme erzeugt wird, jedoch das während der Ruhephase im Personenzug abgekühlte Venenblut aus den peripheren Körperpartien zum Körperkern zurückströmt und dort während der ersten 10 Minuten die Rektaltemperatur deutlich absenkt. Nach der Ankunft vor Ort beginnt der Bergmann zu arbeiten, wodurch sich der Anstieg der Körpertemperatur fortsetzt. Nach etwa 50 Minuten (17:10 Uhr) wird eine Rektaltemperatur von 38,0 °C überschritten, danach flacht der Anstieg der Körperinnentemperatur deutlich ab, und die Rektaltemperatur bleibt in der zweiten Hälfte der Zeit vor Ort bemerkenswert konstant.

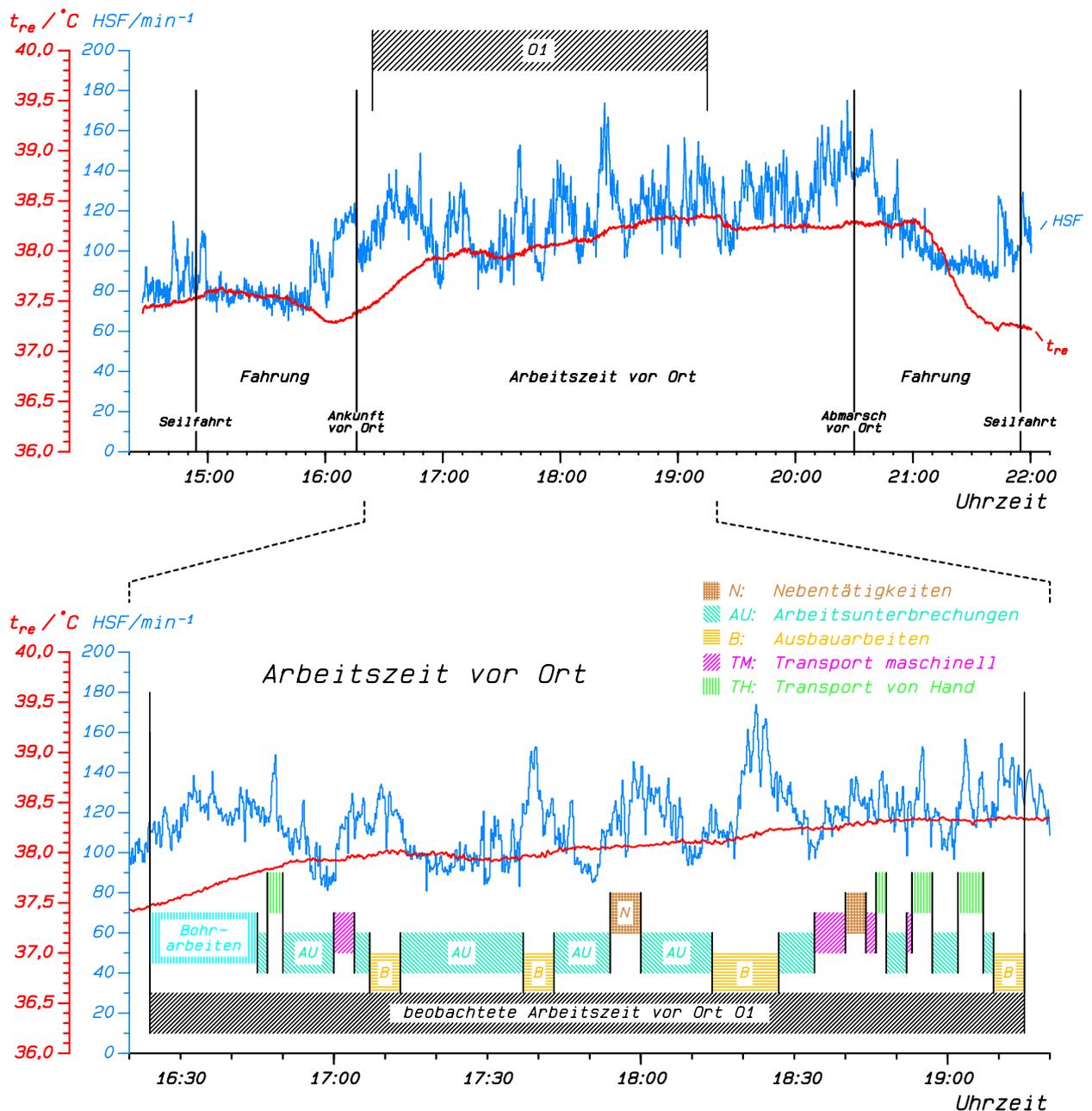


Abb. 66: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während einer Arbeitsschicht.

Auf dem Rückweg lassen sich aus der Herzschlagfrequenz wieder der Weg bis zum Blindschacht und der kurze Fußmarsch zur Haltestelle des Personenzugs und nach der Zugfahrt der Fußmarsch bis zum Schacht und das Treppensteigen zum Förderkorb abgrenzen. Die Körpertemperatur fällt während der Rückfahrt im Personenzug – bei deutlich kühlerem Klima als vor Ort – auf Werte unterhalb der Ausgangswerte ab.

Abb. 68 zeigt die physiologischen Größen während einer Schicht mit einer sehr hohen Beanspruchung an einem Arbeitsplatz an einem Betriebspunkt entsprechend Abb. 67: manuelle Senkarbeiten wurden im Streb durchgeführt; zum Entwärmen wechselte der Bergmann in den kühleren Wetterbereich, wo er maschinelle Senkarbeiten vornehmen konnte. Im Mittel lagen während der Zeit vor Ort die Klimawerte bei: $t_a = 33,7\text{ °C}$; $t_w = 29,9\text{ °C}$, $v_a = 2,8\text{ m/s}$ und $BET = 27,3\text{ °C}$.

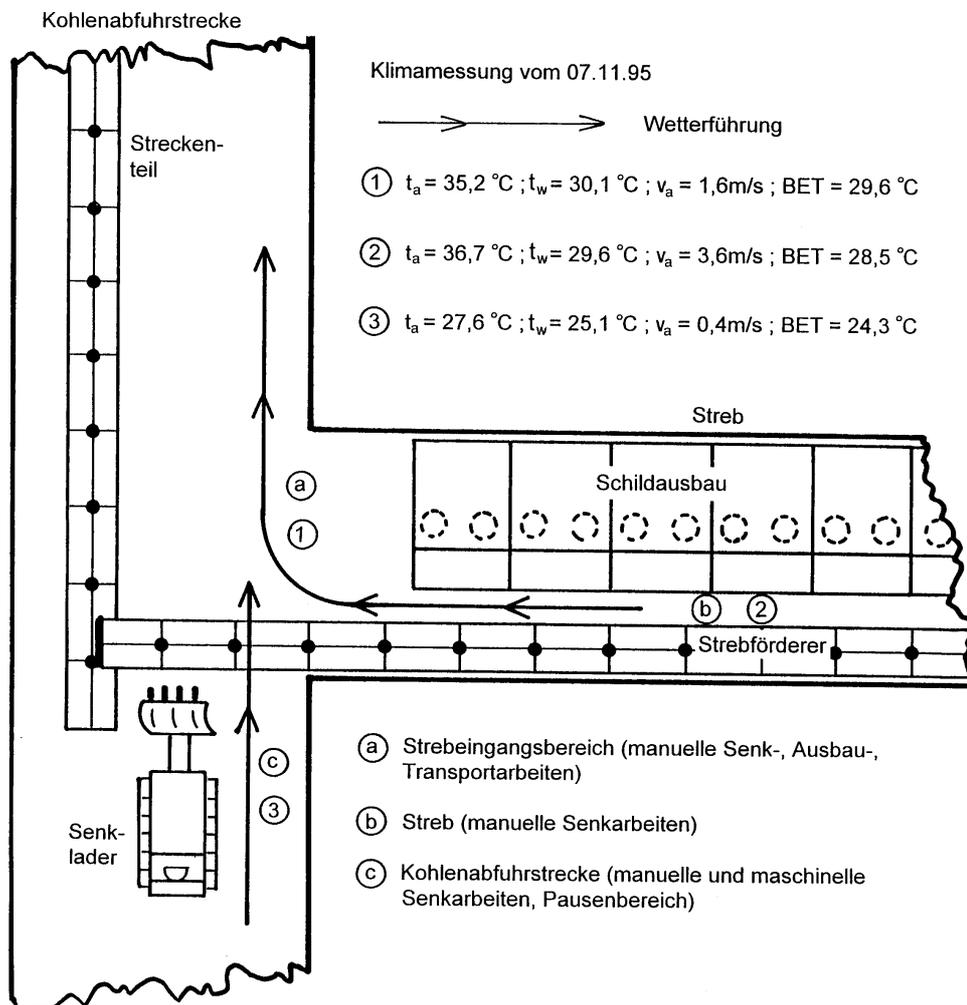


Abb. 67: Skizze zum Arbeitsbereich von Bergleuten im Abwetterbereich eines Strebs. Die Bergleute, die am Streb-Strecken-Übergang (a) oder im Streb (b) arbeiten, haben die Möglichkeit, in die vergleichsweise kühlen Frischwetter nach (c) zu wechseln.

Die Herzschlagfrequenz zeigt während der Fahrung wieder die Fußmärsche zum Personenzug, zum Blindschacht und zum Arbeitsplatz vor Ort, danach aber folgt ein steiler Anstieg von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur: Der Bergmann führt manuelle

Senkarbeiten (abwechselnd Lösen der Sohle und Schaufeln der Berge) durch. Die Herzschlagfrequenz erreicht mit 170 min^{-1} den Wert „200-Alter“, der für eine maximale Ergometrie angestrebt wird. Die Körpertemperatur überschreitet bereits 20 Minuten nach Ankunft vor Ort den Wert von $38,0 \text{ }^\circ\text{C}$ und erreicht nach etwa 50 Minuten maximal einen Wert von $39,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

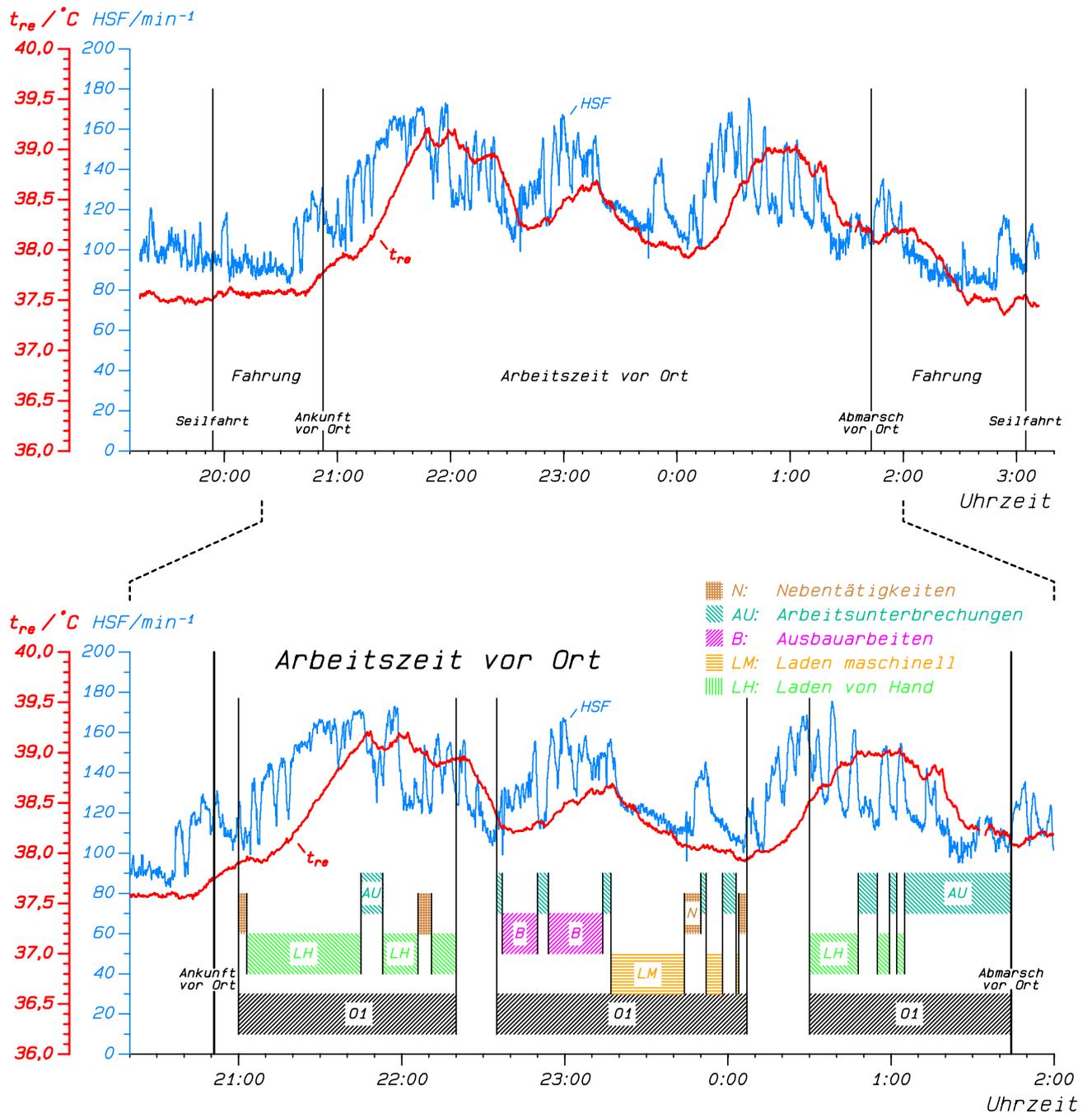


Abb. 68: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während einer Arbeitsschicht mit schwerer Körperarbeit. Für die Zeiten, in denen Protokoll geführt wurde (O1) sind im unteren Teil die Einzeltätigkeiten eingezeichnet: Lösen und Schaufeln von Gestein: LH; Laden mit Seitenkipplader: LM; Ausbauarbeiten: B; Arbeitsunterbrechungen: AU und Nebentätigkeiten N.

Während der ersten 50 Minuten der Zeit vor Ort legt der beobachtete Bergmann kaum Pausen ein. Im mittleren Teil führt er Ausbauarbeiten mit geringerer Arbeitsschwere durch. Beim Fahren eines Senkladers im Frischwetterbereich fällt die Körpertemperatur gegen 0:10 Uhr wieder knapp unter 38,0 °C ab. Anschließend folgten wieder Ladearbeiten von Hand, wobei die Körpertemperatur fast wieder auf 39,0 °C ansteigt; wegen zunehmender Erschöpfung legt der Bergmann nun deutlich häufiger Ruhepausen ein. (Gegen 1:32 Uhr fehlen für etwa 2 Minuten die Aufzeichnungsdaten wegen starker Störung der aufgezeichneten Signale.)

Während des Rückwegs in kühleren Wettern fällt die Körpertemperatur wieder annähernd auf den Ausgangswert ab; während der zwei Fußmärsche im zweiten Teil des Rückwegs läßt sich die zuvor schon angesprochene Umverteilung des kühleren peripheren Blutes gut beobachten: zu Beginn des Fußmarschs fällt die Rektaltemperatur jeweils zunächst um 0,1 °C bzw. 0,15 °C ab, bevor dann ein Anstieg sichtbar wird.

6.1.3 Untersuchungskollektiv

In Tabelle 11 wird eine Übersicht zu den anthropometrischen Daten der untersuchten Bergleute gegeben:

Tabelle 11: Auswertung der anthropometrischen Daten für 38 Bergleute, die an der Untersuchung teilgenommen haben.

Anthropometrische Daten - personenbezogen					
	Körpergröße / cm	Körpermasse / kg	Broca-Index / %	BMI / kg/m ²	Alter / Jahre
Mittelwert	177	85,2	111	27,1	34,3
Standardabweichung	8	14,2	12	3,1	5,8

Die Mittelwerte von Körpergröße und Körpermasse liegen leicht bzw. deutlich oberhalb der Normalwerte nach SELIGER & BARTUNEK [346]: Für das mittlere Alter von 33 Jahren finden sich dort Mittelwerte für die Körpergröße von 176,1 cm und für die Körpermasse von 78,1 kg. Der mittlere Broca-Index von 111 % ist nicht nur durch die meist gute Ausprägung der Muskulatur der Bergleute zu erklären, sondern auch durch einen erhöhten Fettanteil.

Für die 18 Bergleute, die an einer Ergometrie teilnahmen, betrug das mittlere Alter (36 ± 9) Jahre (Mittelwert \pm Standardabweichung), die Körpergröße war (175 ± 7) cm und die Körpermasse betrug (82 ± 12) kg.

Tabelle 12: Ergometrisch bestimmte körperliche Leistungsfähigkeit von 18 Bergleuten. (A: Lebensalter in Jahren.)

Ergometrische Untersuchung						
	W 150 / W	W 170 / W	W "200-A" / W	spezif. W 150 / W/kg	spezif. W 170 / W/kg	spezif. W "200-A" / W/kg
Mittelwert	161	204	196	1,99	2,52	2,40
Std.- abw.	33	39	45	0,47	0,55	0,57

ROST ET AL. [314] geben als Normalwerte für Männer für die W 150: 2,1 W/kg und für die W 170: 2,8 W/kg an; diese Werte werden von den Bergleuten um 5 % bzw. 10 % unterschritten. SELIGER & BARTUNEK [346] geben als Normalwert für die W 170 bei 35 Jahre alten Männern 2,6 W/kg an; dieser Wert entspricht etwa unserem Ergebnis.

Tabelle 13: Aus den Ergometriedaten entsprechend ÅSTRAND (1960) [19] bestimmte maximale Sauerstoffaufnahme von 18 Bergleuten.

Maximale Sauerstoffaufnahme			
	$\dot{V}_{O_2; max}$ (W 150) / l/min	$\dot{V}_{O_2; max}$ (W 170) / l/min	$\dot{V}_{O_2; max}$ (W "200-A") / l/min
Mittelwert	3,05	3,12	3,14
Std.- abw.	0,68	0,73	0,73

Aus Tabelle 13 ergibt sich ein mittlerer Wert für $\dot{V}_{O_2; max}$ von 3,10 l/min und weiter eine mittlere maximale spezifische Sauerstoffaufnahme von 38 ml/min/kg. SELIGER & BARTUNEK [346] geben als Normalwert für die maximale spezifische Sauerstoffaufnahme bei 35 Jahre alten Männern 39,3 ml/min/kg an; dieser Wert entspricht ebenfalls in etwa unserem Ergebnis. – Bezüglich der körperlichen Leistungsfähigkeit, die erforderlich ist, um eine Hitzeakklimatisation beobachten zu können (Kapitel 2.3.2.3, S. 24) liegt der Mittelwert der spezifischen maximalen Leistungsfähigkeit der Bergleute unerwartet niedrig.

6.1.4 Klimabelastung

Die Klimabelastung für die untersuchten Schichten ist in Tabelle 14 angegeben; als Klimasummenmaße sind Basis-Effektivtemperatur *BET* („Grubenklima“) und zum Vergleich auch der *WBGT*-Index (ISO 27 243 [440]) in der Tabelle mit aufgeführt.

Bei den niedrigeren Klimabelastungen fanden Untersuchungen statt, wenn die Bergleute kurzfristig an kältere Betriebspunkte verlegt wurden, die Untersuchung aber schon fest abgesprochen war; die Messungen dienen im folgenden zum Vergleich mit den klimatische belasteten Arbeitsplätzen.

Tabelle 14: Kennwerte der klimatischen Belastung für die untersuchten Schichten.

	Trocken- temperatur ^a $t_a / ^\circ\text{C}$	Psycho- metrische Feucht- temperatur ^a $t_w / ^\circ\text{C}$	Wetterge- schwindig- keit ^a $v_a / \text{m/s}$	Basis- Effektiv- temperatur <i>BET</i> / $^\circ\text{C}$	<i>WBGT</i> ^c / $^\circ\text{C}$
Mittelwert	31,2	28,2	1,8	26,3	29,1
Std.-Abw.	2,9	3,3	1,1	3,5	3,1
Minimum	21,6	20,0	0,2 ^b	16,6	20,5
Maximum	36,3	33,0	6,0	32,2	33,7

^a Gemessen wurde jeweils am Arbeitsort des untersuchten Bergmanns, nicht über den Strecken- oder Strebquerschnitt.

^b Meßwerte unter 0,2 m/s können auf Grund der Trägheit des Flügelrades des eingesetzten Anemometers nicht erfaßt werden.

^c Die Werte für den *WBGT*-Index (Wet Bulb Globe Temperature) wurden berechnet, indem die natürliche psychrometrische Feuchttemperatur nach der Formel von MALCHAIRE [239] ermittelt wurde.

6.1.5 Übersicht über die Beanspruchung

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht zur Beanspruchung der Bergleute während aller Schichten der Untersuchung gegeben.

Herzschlagfrequenz

Abb. 69 zeigt die Verteilung und die relative Summenhäufigkeit der Herzschlagfrequenz: der Mittelwert der Verteilung liegt für die gesamte auswertbare Untersuchungszeit von 52053 Minuten bei $102,8 \text{ min}^{-1}$; die Verteilung besitzt eine leicht Rechtsschiefe. 5 % der gesamten Schichtzeit werden bei Herzschlagfrequenzen oberhalb von „180-

Alter“ verbracht. Während der Zeit vor Ort, in der die Fahrungszeiten mit meist langen Fahrten im Personenzug nicht enthalten sind, liegt die Herzschlagfrequenz bei $108,6 \text{ min}^{-1}$ (Abb. 70). Die Kennwerte für die unterschiedlichen Zeiten sind in Tabelle 15 angegeben. Da das Protokoll in einigen Schichten zwischen mehreren untersuchten Bergleuten wechselte und so nicht für alle Arbeitsschichten vollständig erhoben wurde, zeigen die Daten in Tabelle 15, daß sich die Herzschlagfrequenzen für die protokollierten Teile der Zeit vor Ort und für die gesamte Zeit vor Ort nur um $0,4 \text{ min}^{-1}$ unterscheiden: das heißt, daß die Bergleute während der protokollierten Zeiten nicht mehr oder schneller arbeiteten als sonst. Eine Auflistung der Herzschlagfrequenz für Einzeltätigkeiten innerhalb der Schichten ist in [189] aufgeführt.

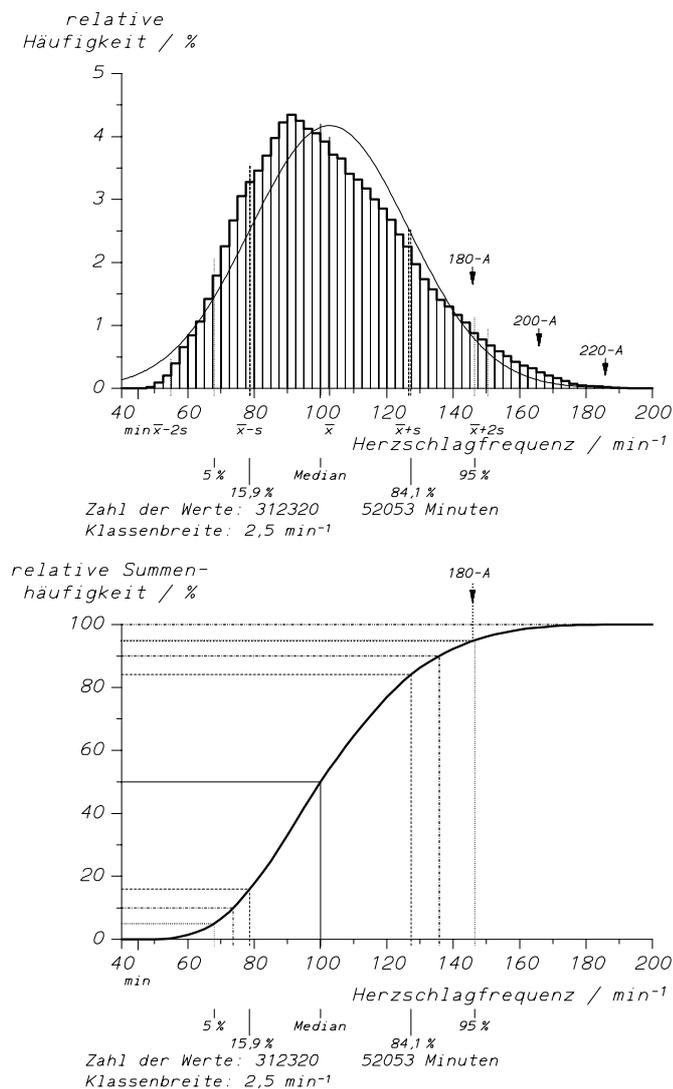


Abb. 69: Verteilung der Herzschlagfrequenz aller 38 Bergleute für alle 125 auswertbaren Schichten: gesamte Zeit von Seilfahrt zu Seilfahrt (G0).

Im Vergleich zu anderen Studien im Bergbau liegen die Herzschlagfrequenzen mit $102,8 \text{ min}^{-1}$ recht hoch: TEMMING & ROHMERT erhielten 1972 Schichtmittelwerte von $90,1 \text{ min}^{-1}$ [373], LÜRIG & THIEN ermittelten im Kalibergbau 1983 Werte von 90 min^{-1} [232] und PALENCIANO ET AL. geben für Klimabedingungen bis $t_a = 23 \text{ °C}$ im spanischen Steinkohlenbergbau 1996 eine mittlere Herzschlagfrequenz von $97,3 \text{ min}^{-1}$ an. Die Höhe der Herzschlag-

frequenz bei der hier vorgestellten Untersuchung könnte dadurch bedingt sein, daß zum großen Teil schwere Arbeit im Bereich des Streb-Strecken-Übergangs und im Vortrieb untersucht wurden.

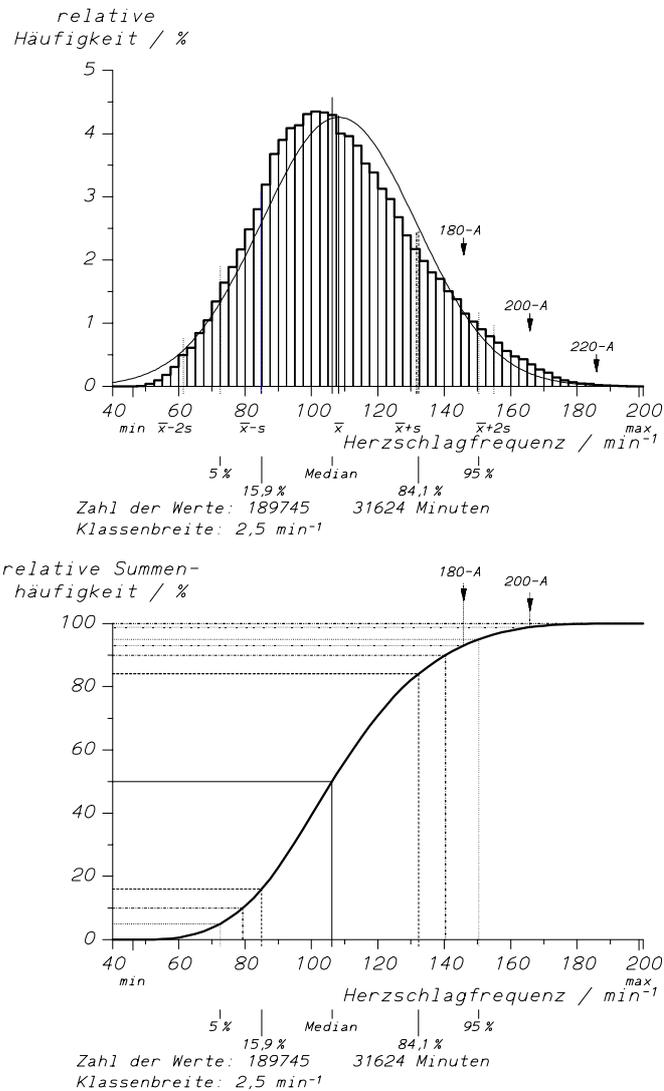


Abb. 70: Verteilung der Herzschlagfrequenz aller 38 Bergleute für alle 125 auswertbaren Schichten für die Zeit vor Ort (O0).

Für die Zeit vor Ort liegt die Herzschlagfrequenz mit $108,2 \text{ min}^{-1}$ in der Nähe der – nach den Kriterien der WHO – maximal zulässigen Werte, für die noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht erwartet wird (vgl. Abb. 128 in Kapitel 9.4).

Überraschend hoch sind – für die untersuchten Arbeitsplätze – die Zeitanteile der Fahrung mit 38 % der gesamten Schichtzeit, die durch die weiten Wege und langen Zugfahrten bis zum Arbeitsplatz unter Tage bedingt sind. Die Arbeitsunterbrechungen – arbeitsablaufbedingt oder auch Erholungspausen – stellen mit 34 % der protokollierten

Zeit vor Ort einen Reservebereich zur Erholung dar, ohne den die Beanspruchungswerte sicherlich erheblich höher liegen würden.

Tabelle 15: Kennzahlen zur Herzschlagfrequenz für alle untersuchten 38 Bergleute über insgesamt 125 Schichten. Als „Bezugswert“ wurde der niedrigste Wert der Herzschlagfrequenz gewählt, der sich über ein Zeitintervall von ca. 3 Minuten einstellte.

Klassifizierung der Arbeitszeit	ausgewertete Zeit / min	Herzschlagfrequenz			
		Mittelwert/ min ⁻¹	Standardabweichung / min ⁻¹	5. Perzentil / min ⁻¹	95. Perzentil / min ⁻¹
Gesamte Schicht	52053	102,8	23,9	67,9	146,5
Fahrung	19712	93,1	21,3	63,8	132,2
Zeit vor Ort	31624	108,2	23,4	72,5	150,4
Protokollierte Zeit vor Ort	26070	108,6	23,7	71,9	151,3
Protokollierte Arbeitszeit vor Ort	17079	112,8	23,4	76,0	154,3
Arbeitsunterbrechungen	8999	100,6	22,3	67,4	141,9
Bezugswert HSF	52053	72,2	10,7	50	100

Rektaltemperatur:

Die Verteilung der Rektaltemperaturen – über die gesamten 111 Schichten über 48414 Minuten – ist in guter Näherung normalverteilt; der Mittelwert der Verteilung liegt bei 37,67 °C (Abb. 71). Während der Zeit vor Ort – über 29450 Minuten – ist die Verteilung ebenfalls normalverteilt; der Mittelwert der Verteilung liegt bei 37,77 °C und der von der WHO angegebene Grenzwert von 38,0 °C wird während etwa 30 % der Zeit vor Ort überschritten. Weitere Kennwerte zu den Verteilungen der Rektaltemperaturen sind in Tabelle 16 angegeben.

Eine kontinuierliche Aufzeichnung der Rektaltemperatur über ganze Schichten im Bergbau wurde erstmals von unserer Arbeitsgruppe 1986 in [169] sowie 1989 in [175] durchgeführt; die mittleren Rektaltemperaturen betragen dort 37,5 °C. LÜRIG & THIEN

[232] erhielten 1983 – bei mehreren Einzelmessungen während der Schicht im Kalibergbau – einen Mittelwert der Rektaltemperatur von 37,6 °C und einen maximalen Wert von 38,9 °C. In der hier vorstellten Studie liegt der Maximalwert der Rektaltemperatur bei 39,2 °C.

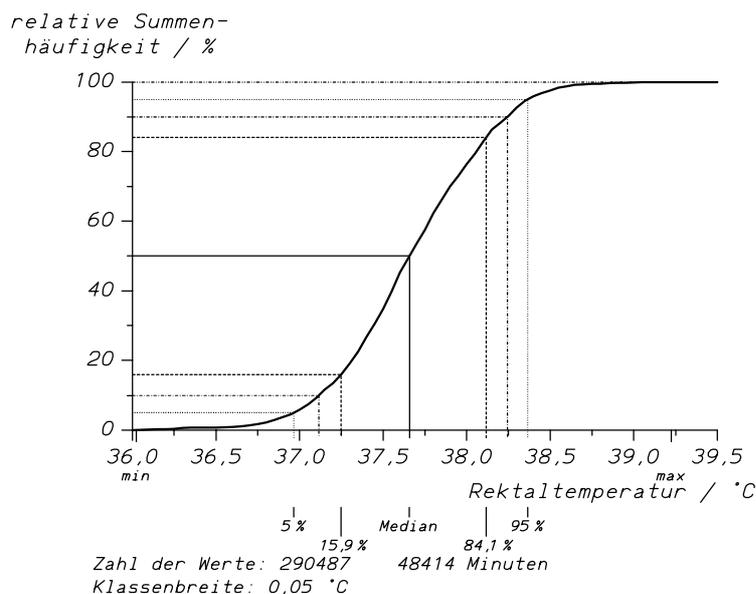
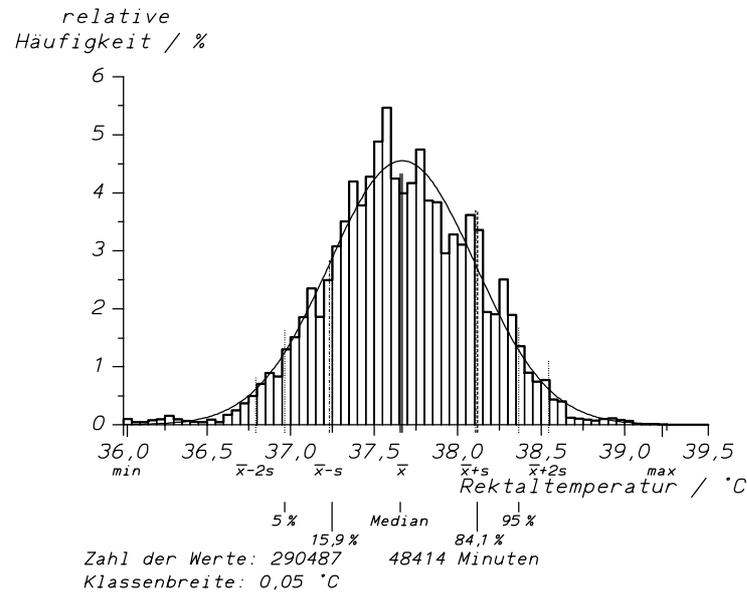


Abb. 71: Verteilung der Rektaltemperatur aller 38 Bergleute für alle 111 auswertbaren Schichten während der gesamten Zeit von Seilfahrt zu Seilfahrt (G0).

Dehydratation:

Der Gesamtverlust an Flüssigkeit während der untersuchten Schichten liegt im Mittel bei $(1,35 \pm 0,83)$ % der Körpermasse, und in etwa 15 % aller Schichten wird ein Wert von 2 % überschritten.

Tabelle 16: Kennzahlen der Rektaltemperatur für 38 Bergleute in allen 111 Schichten mit auswertbarer Rektaltemperatur. Das Minimum der Rektaltemperatur wurde – als Bezugswert – für alle auswertbaren Schichten ausgewertet.

Klassifizierung der Arbeitszeit	ausgewertete Zeit / min	Rektaltemperatur			
		Mittelwert / °C	Standardabweichung / °C	5. Perzentil / °C	95. Perzentil / °C
Gesamte Schicht	48414	37,67	0,44	36,97	38,36
Fahrung	18247	37,49	0,43	36,84	38,26
Zeit vor Ort	29451	37,77	0,40	37,13	38,39
Protokollierte Zeit vor Ort	24516	37,78	0,41	37,13	38,39
Protokollierte Arbeitszeit vor Ort	16122	37,80	0,39	37,20	38,40
Arbeitsunterbrechungen	8403	37,73	0,43	37,03	38,38
Minimum	48414	37,04	0,31	36,57	37,52

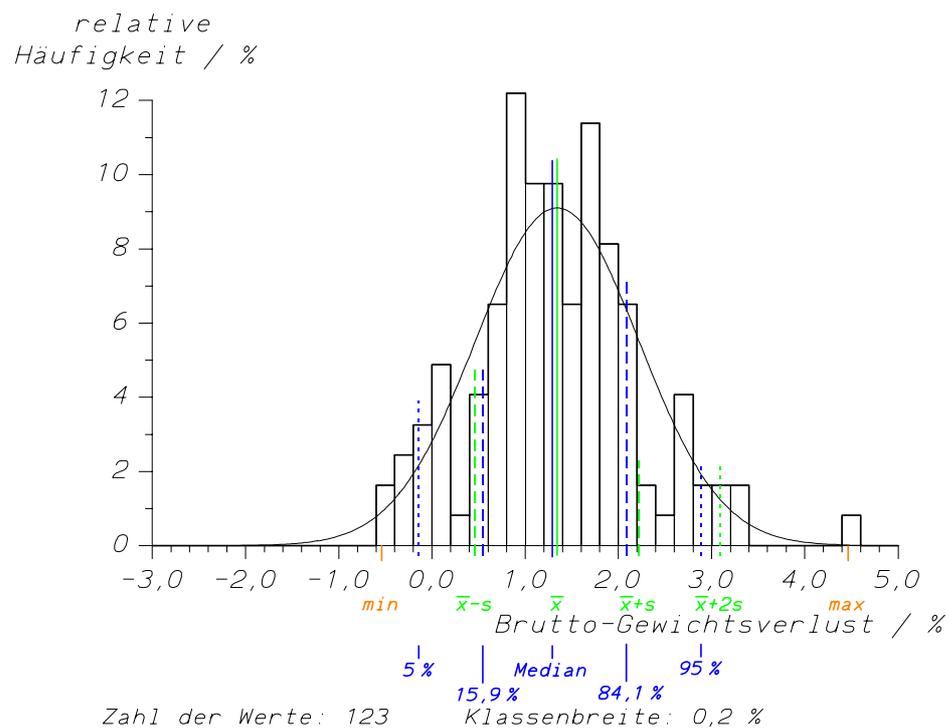


Abb. 72: Verteilung der Brutto-Gewichtsverluste während der Schicht (Seilfahrt-Seilfahrt).

6.1.6 Der Einfluß des Klimas auf die Beanspruchungsgrößen

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung der Klimabelastung auf Herzschlagfrequenz, Körpertemperatur und die Flüssigkeitsbilanz der Bergleute beschrieben.

6.1.6.1 Herzschlagfrequenz

Abb. 73 zeigt die Mediane der Herzschlagfrequenz, jeweils über die gesamte Schichtzeit G_0 bestimmt. Die Datenpunkte streuen relativ stark, weil verschiedene Bergleute – mit unterschiedlicher körperlicher Leistungsfähigkeit – unterschiedliche Tätigkeiten ausführen: vom Steuern eines Haspels bis zum Schaufeln von Gesteinsbrocken. Uner-

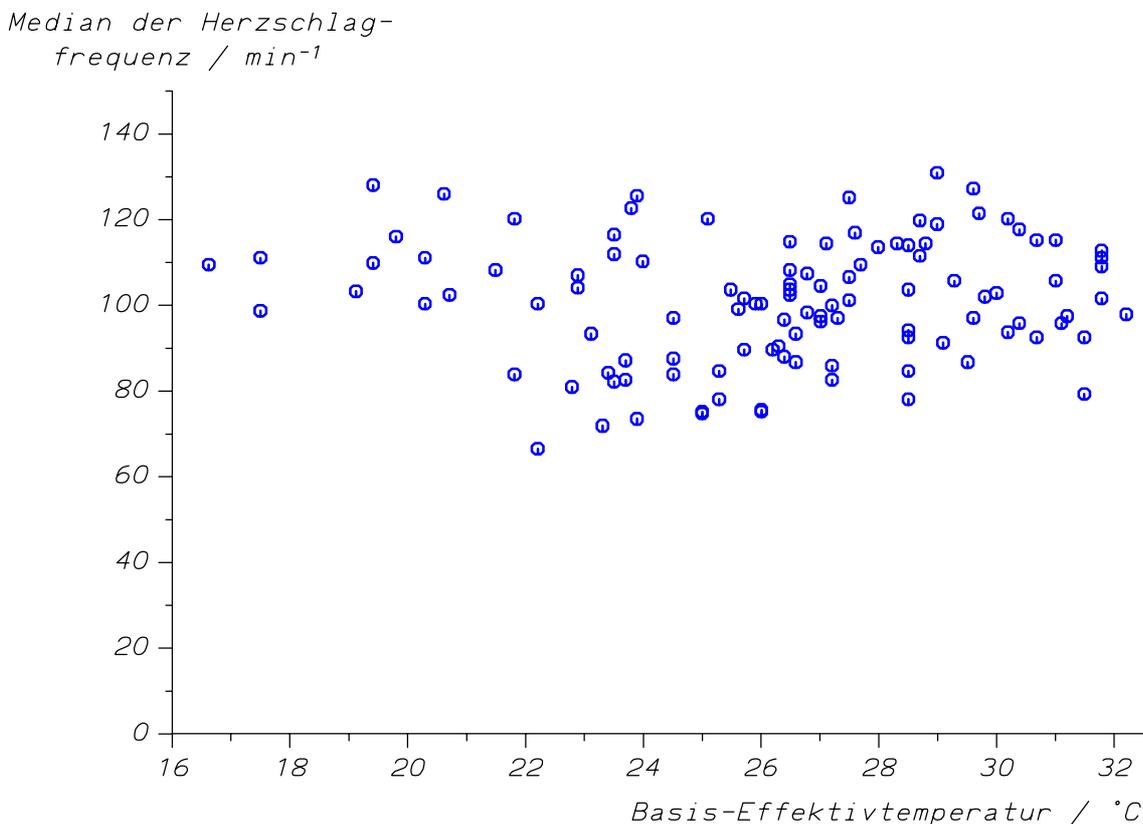


Abb. 73: Abhängigkeit des Medians der Herzschlagfrequenz (jeweils über die gesamte Schicht; G_0) von der Klimabelastung.

wartet war, daß dieses breite Band von Datenpunkten mit zunehmender klimatischer Belastung nicht zu höherer Beanspruchung (d.h. nach oben) hin abknickt. Statistisch ergibt sich kein signifikanter Anstieg in einem linearen Modell ($r < 0,04$; $p > 0,6$).

Das gleiche Ergebnis findet man für hohe Herzschlagfrequenzen – da die maximal auftretenden Herzschlagfrequenzen zum Teil durch Störungen verfälscht sind, wird in Abb. 74 das 95. Perzentil der Herzschlagfrequenz dargestellt ($r < 0,1$; $p > 0,3$). Wenn man

von den Klimabedingungen unterhalb von etwa $BET = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ absieht, die nicht mit sehr vielen Meßwerten belegt sind, kann man den Eindruck gewinnen, daß mit ansteigender Klimabelastung niedrige Herzschlagfrequenzen weniger stark vertreten sind.

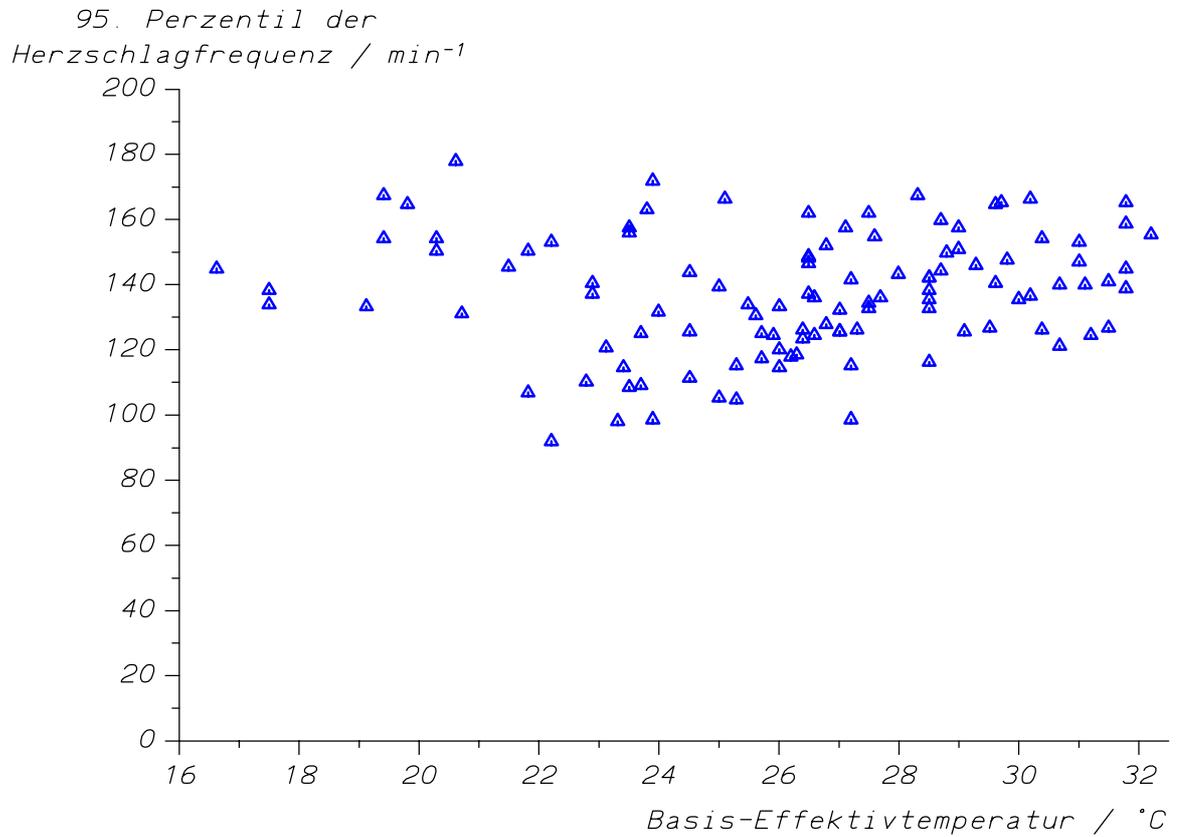


Abb. 74: Abhängigkeit des 95. Perzentils der Herzschlagfrequenz (jeweils über die gesamte Schicht; G0) von der Klimabelastung.

6.1.6.2 Körperkerntemperatur

Abb. 75 - Abb. 77 zeigen auf, wie verschiedene Kenngrößen der Rektaltemperatur von der Klimabelastung abhängen: Die Mediane der Rektaltemperatur zeigen im linearen Ansatz keine Klimaabhängigkeit ($r < 0,1$; $p > 0,4$); das 95. Perzentil zeigt jedoch eine signifikante (wenn auch schwache) Abhängigkeit von der Effektivtemperatur ($r = 0,21$; $p < 0,05$; $t_{re95} = 0,0191 \cdot BET + 37,64 \text{ °C}$); eine Zunahme der BET von 10 °C – was oberhalb von z.B. 25 °C eine ganz erhebliche Erhöhung der Klimabelastung darstellen würde – würde nach diesem Ergebnis nur zu einer Zunahme der Rektaltemperatur von $0,2 \text{ °C}$ führen, was in Anbetracht der inter- und auch intraindividuellen Streuung recht unbedeutend wäre.

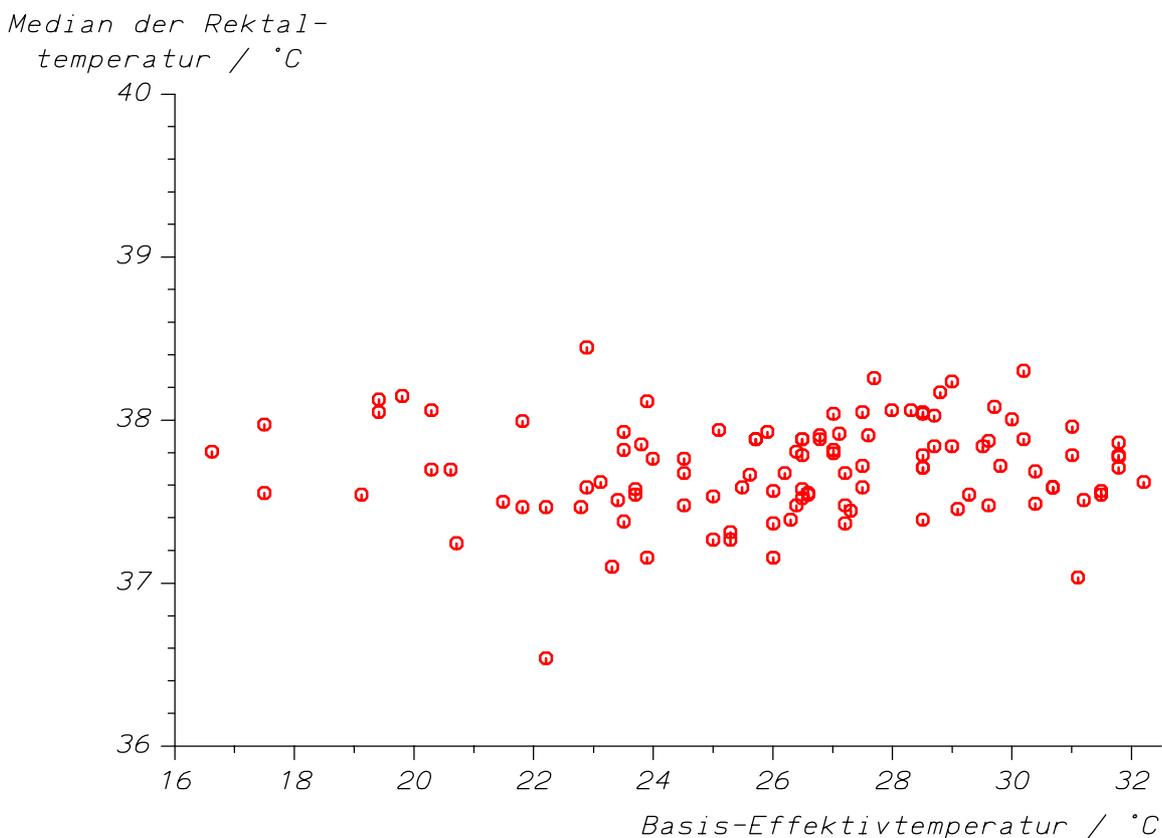


Abb. 75: Abhängigkeit des Medians der Rektaltemperatur (jeweils über die gesamte Schicht; G0) von der Klimabelastung; die tiefliegenden Punkte bei $BET = 22 \text{ °C}$ und $BET = 31 \text{ °C}$ wurden während Nachtschichten erhoben.

Für die maximalen Rektaltemperaturen, die während jeder Schicht beobachtet wurden, ergibt sich ebenfalls eine geringe, aber signifikante Zunahme: ($r = 0,22$; $p < 0,02$; $t_{re_{max}} = 0,0207 \cdot BET + 37,72 \text{ °C}$), dies gilt auch für den Anstieg der Rektaltemperatur (Abb. 78: $r = 0,25$; $p < 0,01$; $t_{re_{Anstieg}} = 0,0210 \cdot BET + 0,670 \text{ °C}$).

95. Perzentil der Rektal-
temperatur / °C

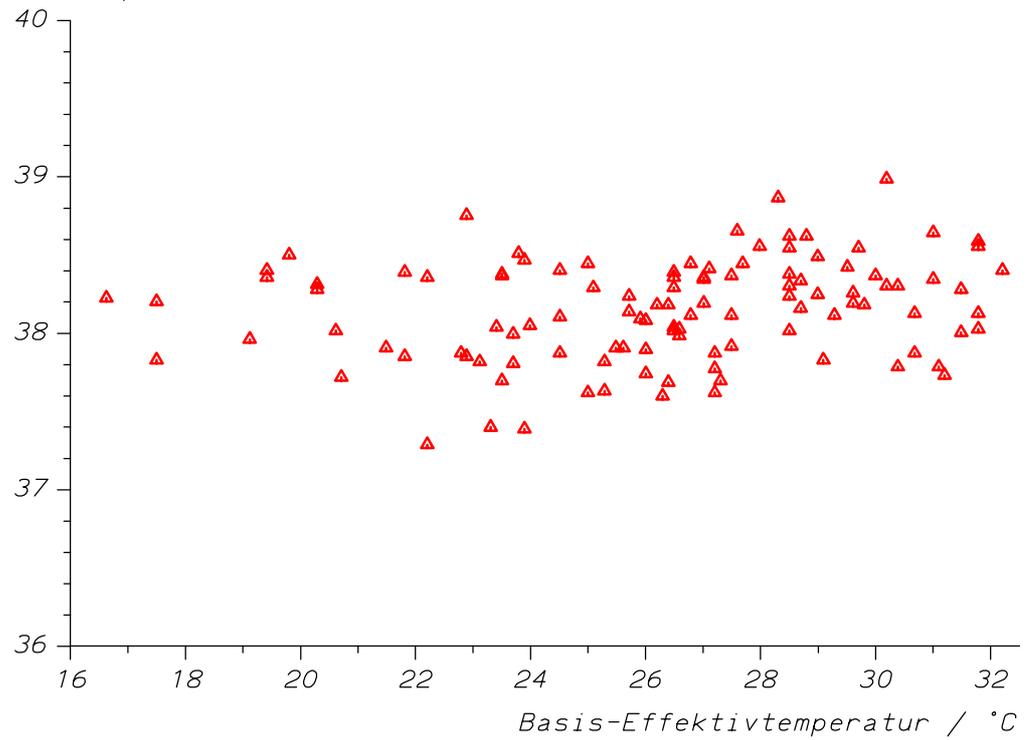


Abb. 76: Abhängigkeit des 95. Perzentils der Rektaltemperatur (jeweils über die gesamte Schicht; G0) von der Klimabelastung.

Maximum der Rektal-
temperatur / °C

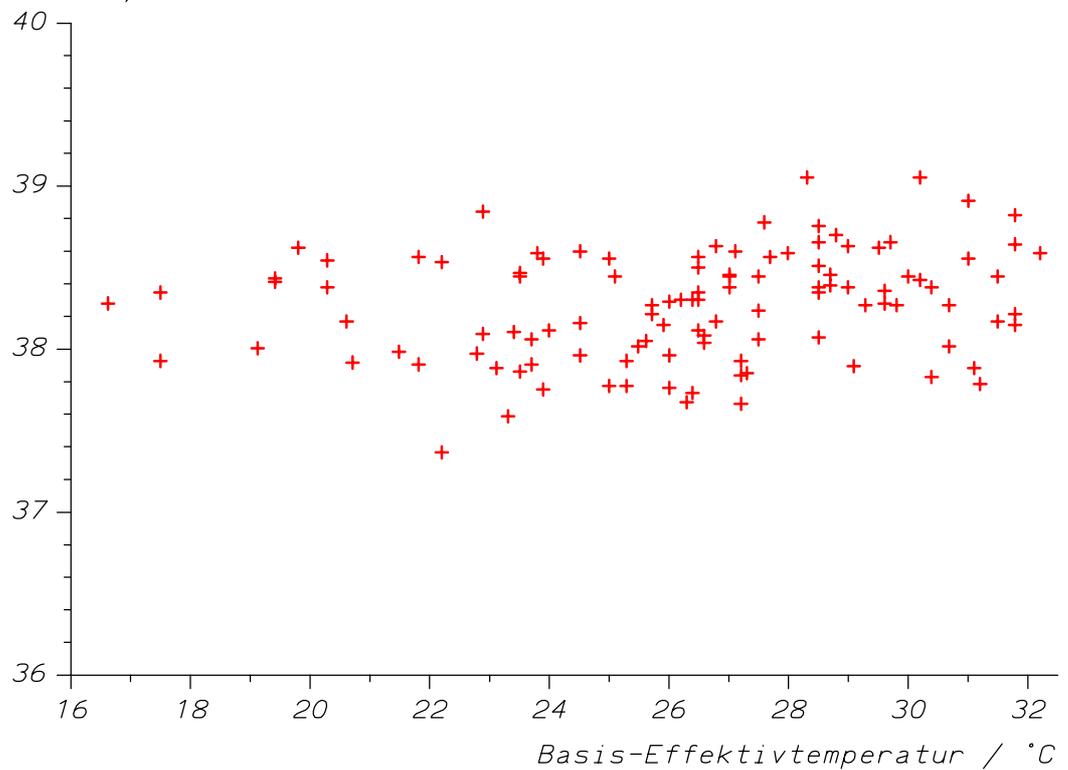


Abb. 77: Abhängigkeit des Maximums der Rektaltemperatur (jeweils über die gesamte Schicht; G0) von der Klimabelastung.

Maximalwerte der Körpertemperatur oberhalb von 38 °C wurden auch an weniger heißen Arbeitsplätzen im Steinkohlenbergbau ([177]: $t_{re\ max} = 38,6$ °C; Mittelwert der Schichtmaxima: 37,9 °C) und im Kalibergbau (THIEN [374]: $t_{re\ max} = 38,9$ °C; der Mittelwert der Schichtmaxima lag bei 38,0 °C) gefunden.

Zum Vergleich mit den Grenzwerten für Wärmespeicherung, die in ISO 7933 (1989) [443] verwendet werden, sind in Abb. 78 die Anstiege der Rektaltemperatur während der Schicht (als Differenz zwischen maximalem und minimalem Meßwert) angegeben: in ISO 7933 werden als maximale Anstiege der Körpertemperatur 0,8 °C (für das Bewertungskriterium „Alarm“) bzw. 1,0 °C (für das Bewertungskriterium „Danger“) zugelassen; die Kriterien werden in 102 bzw. 83 von 110 auswertbaren Schichten überschritten.

Anstieg der Rektal-
temperatur / °C

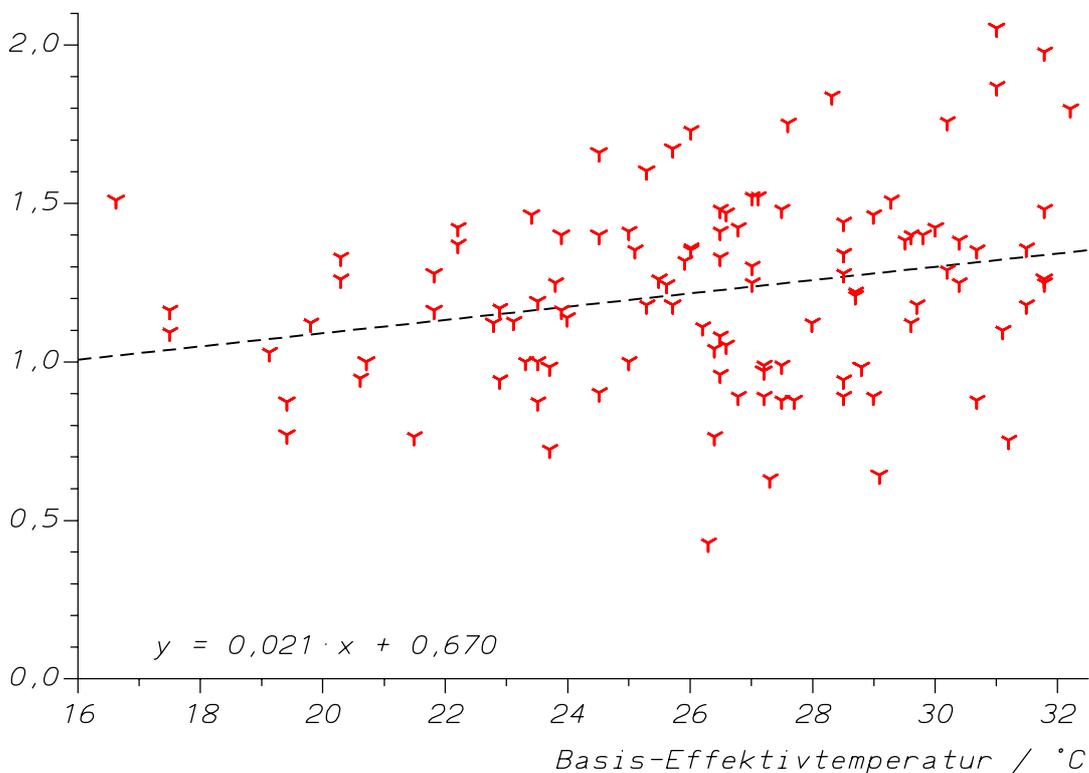


Abb. 78: Anstieg der Rektaltemperatur (Differenz zwischen Maximum und Minimum, jeweils über die gesamte Schicht; G0) als Funktion der Klimabelastung ($r = 0,25$; $p < 0,01$).

Im Jahr 1969 erschien der WHO Technical Report No. 412 [439], der von mehreren Experten unter Leitung von BELDING verfaßt worden war. Zur Festlegung von Grenzwerten der Körpertemperatur unter Klimabelastung wurde auf das Konzept der *prescriptive zone* von LIND (vgl. Kapitel 2.4.3.1, Abb. 4) zurückgegriffen: körperliche Arbeit in Hitze sollte im Bereich der *prescriptive zone* durchgeführt werden, da sich dort der menschliche Organismus als homoiotherm zeigt und die Körpertemperatur nur von der Arbeitsschwere und nicht von der klimatischen Belastung abhängt. Oberhalb der Obergrenze der *prescriptive zone* (ULPZ, vgl. Kapitel 2.4.3.1) ist der menschliche Organismus poikilotherm in dem Sinn, daß die Körpertemperatur dort auch von den äußeren Klimabe-

dingungen abhängt: wenn man diesen Bereich vermeidet, ist der im Klima arbeitende Mensch mit Sicherheit nicht gefährdet (zumindest, sofern Wasser- und Elektrolytverluste ausgeglichen werden). Die Grenztemperatur für klimatische Belastung hängt – entsprechend Abb. 4 – von der Arbeitsschwere ab: für die schwerste Arbeit von 410 W liegt sie bei etwa $BET = 27\text{ °C}$; die Körpertemperatur liegt dort bei $t_{re} = 38,0\text{ °C}$, für geringere Arbeitsschwere liegt die *ULPZ*-Grenze bei höherer Basis-Effektivtemperatur und die zulässige Körperkerntemperatur liegt niedriger. Der Wert von $t_{re} = 38,0\text{ °C}$ soll auch bei sehr schwerer Arbeit – z.B. Grubenwehreinsätzen – nicht überschritten werden.

6.1.6.3 Flüssigkeitsbilanz: Schweißverlust, Trinkmenge, Harnabgabe und Rehydratation

Während die Herzschlagfrequenz und die Körpertemperatur kaum mit zunehmender Klimabelastung ansteigen, nimmt der Schweißverlust hochsignifikant mit ansteigender Klimabelastung zu: ($r = 0,60$; $p < 0,00005$). Dieses Ergebnis kann man gut verstehen, weil die Schweißverdampfung bei den Lufttemperaturen, die in der Nähe der Hauttemperatur liegen – so daß die konvektive Kühlung in ihrer Bedeutung abnimmt –, das zunehmend wirkungsvollere Mittel zur Kühlung darstellt. Da es das Ziel der physiologischen Regelung ist, eine übermäßige Erhöhung der Körpertemperatur zu verhindern, war ein solcher Anstieg zu erwarten.

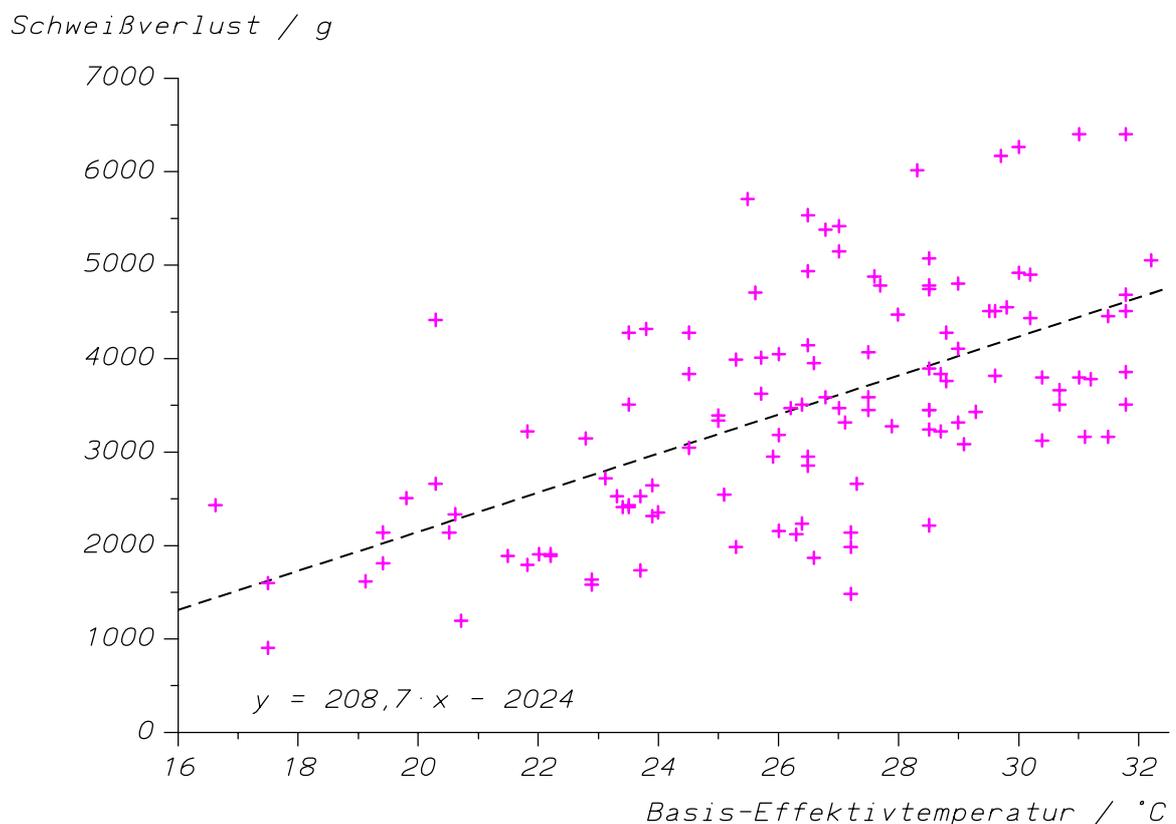


Abb. 79: Abhängigkeit des Schweißverlustes von der Klimabelastung.

Auch in Abb. 79 liegt eine ganz erhebliche Streuung der Datenpunkte vor, so z.B. bei $BET = 25\text{ °C}$ von 2000 g bis 5500 g. Diese Streuung ist durch die unterschiedlich hohe Notwendigkeit zu Schwitzen (abhängig von der Arbeitsschwere), die unterschiedliche Fähigkeit zu Schwitzen (abhängig von der individuellen Fähigkeit zu Schwitzen und von der Hitzegewöhnung) und die individuell unterschiedliche Dehydratation (abhängig von der getrunkenen Flüssigkeitsmenge und damit vom Flüssigkeitsdefizit) bedingt.

Die absoluten Schweißmengen von bis zu über 6000 g stellen eine erhebliche Belastung dar: Wenn nicht während der Schicht entsprechende Mengen an Flüssigkeit nachgetrunken werden, erreicht das Flüssigkeitsdefizit die Größenordnung des zirkulierenden Blutvolumens, so daß extravasale Flüssigkeit zusätzlich in Anspruch genommen werden muß, um ein ausreichendes zirkulierendes Volumen in physiologischer Viskosität aufrechtzuerhalten.

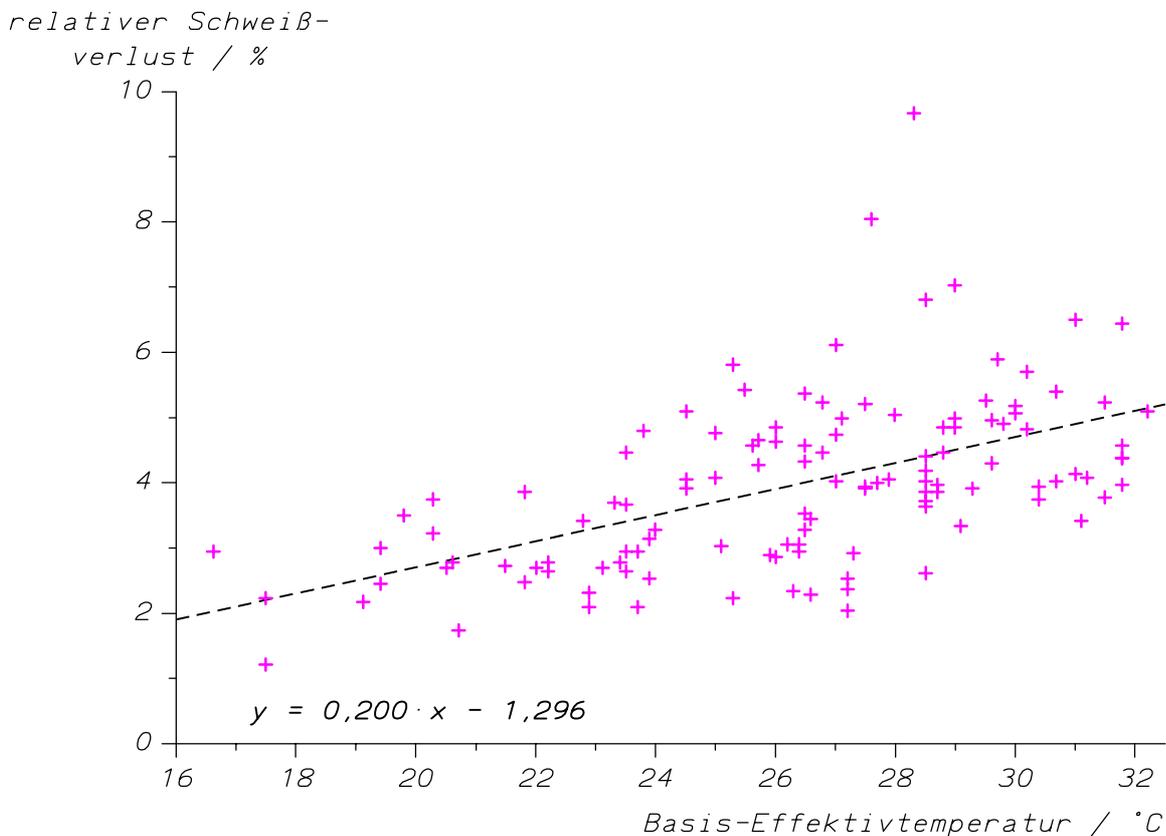


Abb. 80: Abhängigkeit des relativen Schweißverlustes – bezogen auf die Körpermasse – von der Klimabelastung.

Die relativen Schweißverluste (Abb. 80) – bezogen auf die Körpermasse – erreichen bei hoher Klimabelastung im Mittel 5 % und betragen in einem Fall 9,4 % der Körpermasse!

Entsprechend dem steigenden Schweißverlust steigt auch die Flüssigkeitsmenge an, die von den Bergleuten während der Schicht getrunken wird: Während die Schweißmenge im Mittel um 208 g bei einer Erhöhung der BET um 1 °C ansteigt, folgt die Trinkmenge allerdings mit nur 97 g pro 1 °C um weniger als die Hälfte (Abb. 81).

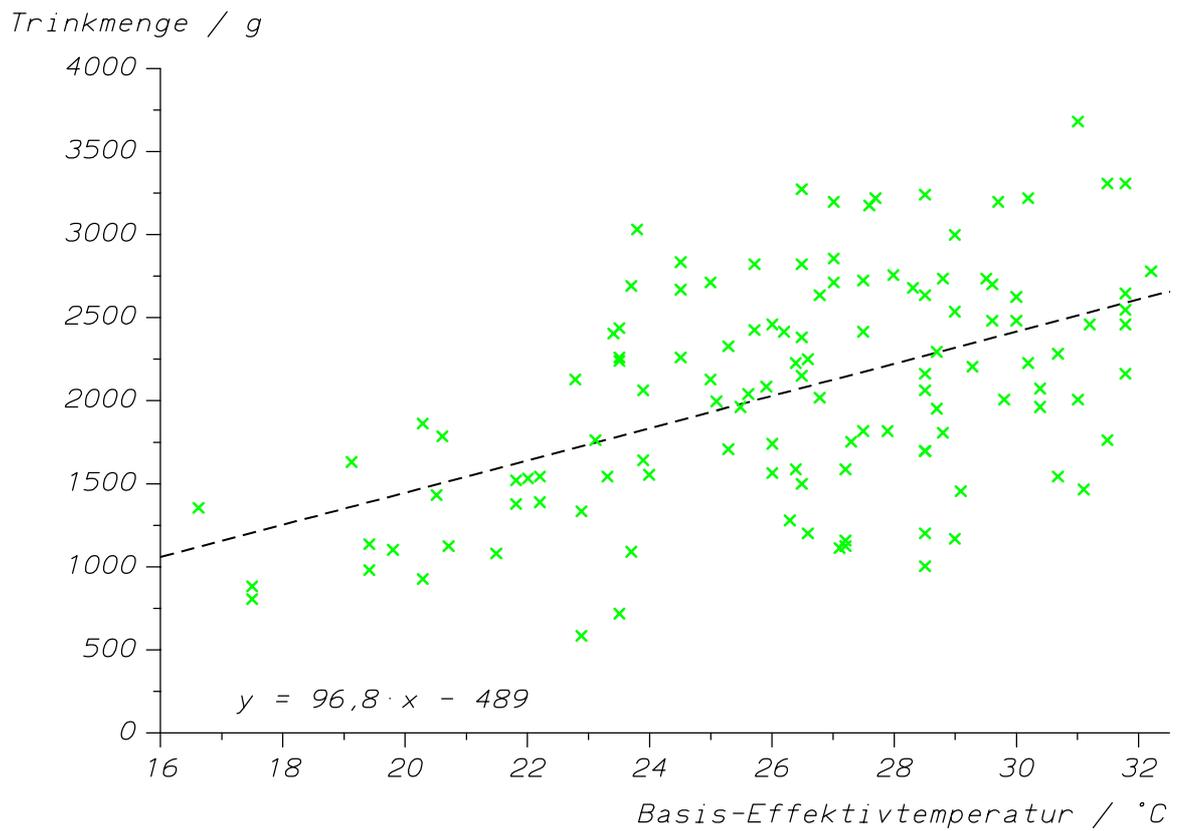


Abb. 81: Abhängigkeit der Trinkmenge von der Klimabelastung.

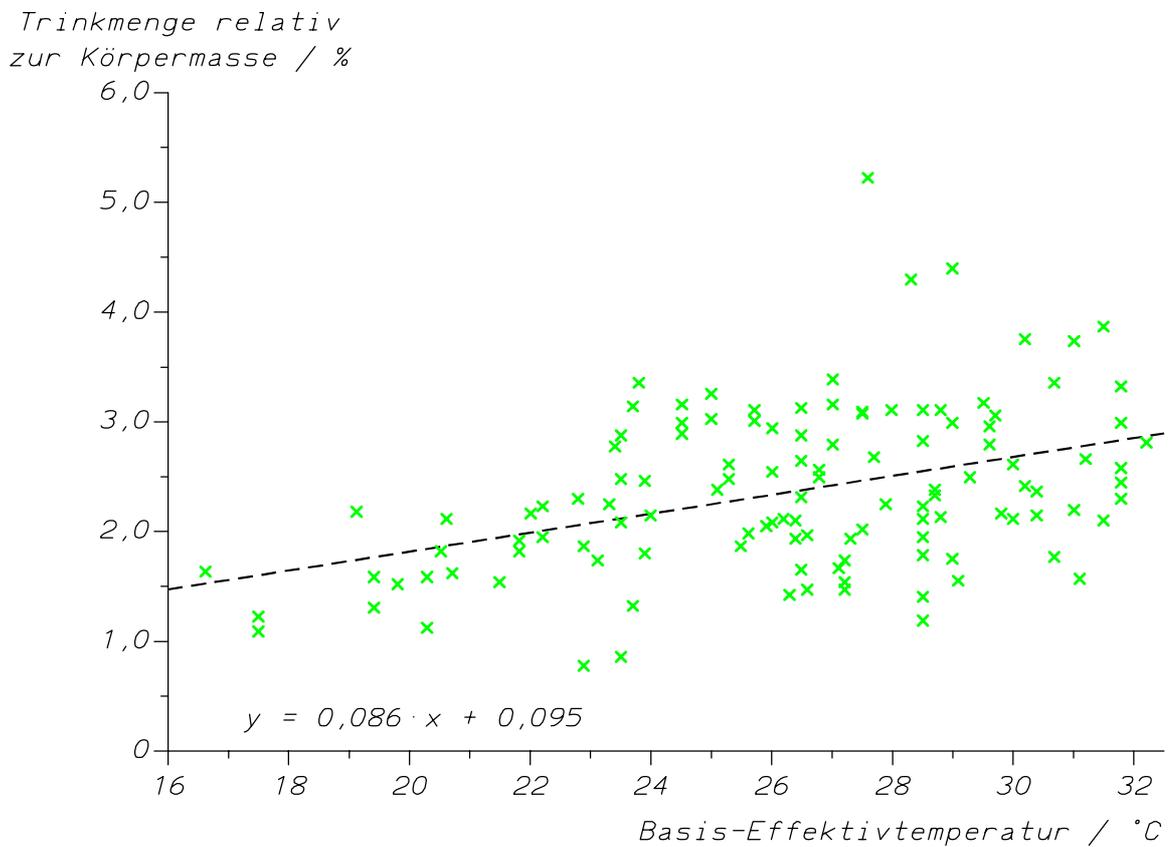


Abb. 82: Abhängigkeit der relativen Trinkmenge – bezogen auf die Körpermasse – von der Klimabelastung.

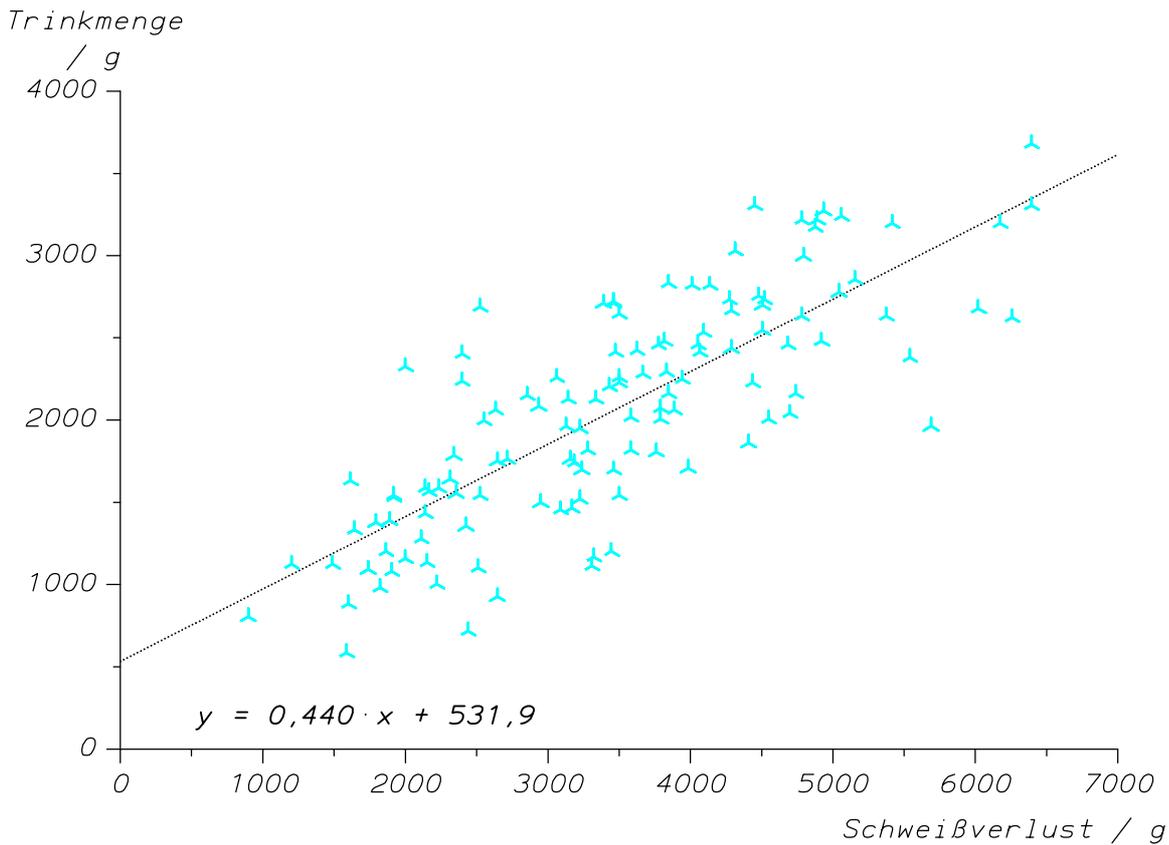


Abb. 83: Abhängigkeit der Trinkmenge vom Schweißverlust.

Zu bedenken ist allerdings, daß zum einen die Flüssigkeitsmengen zusätzlich zur restlichen Ausrüstung getragen werden müssen, und daß gegen Ende der Schicht die Trinkflüssigkeit warm geworden ist und nicht mehr sehr durststillend wirkt. Außerdem sind beträchtliche Mengen an Flüssigkeit zu trinken, was nur möglich ist, wenn die Teeflaschen immer in Reichweite des Bergmanns sind und sehr oft kleine Mengen getrunken werden. Beim Bewegen in beengten räumlichen Verhältnissen ist es unangenehm, wenn der Magen voll ist, zumal nur maximal 1 - 1,2 Liter Trinkflüssigkeit pro Stunde vom Magen-Darm-Trakt resorbiert werden können.

Bezieht man die Trinkmenge auf die Körpermasse, so werden bei hoher Klimabelastung im Mittel 3 % der Körpermasse an Flüssigkeit während einer Schicht aufgenommen (Abb. 82).

Trägt man die Trinkmenge als Funktion der Schweißmenge auf (Abb. 83), so sieht man, daß die Trinkmenge mit dem Flüssigkeitsverlust offensichtlich ansteigt; im Mittel werden jedoch nur 44 % der Flüssigkeitsverluste ersetzt.

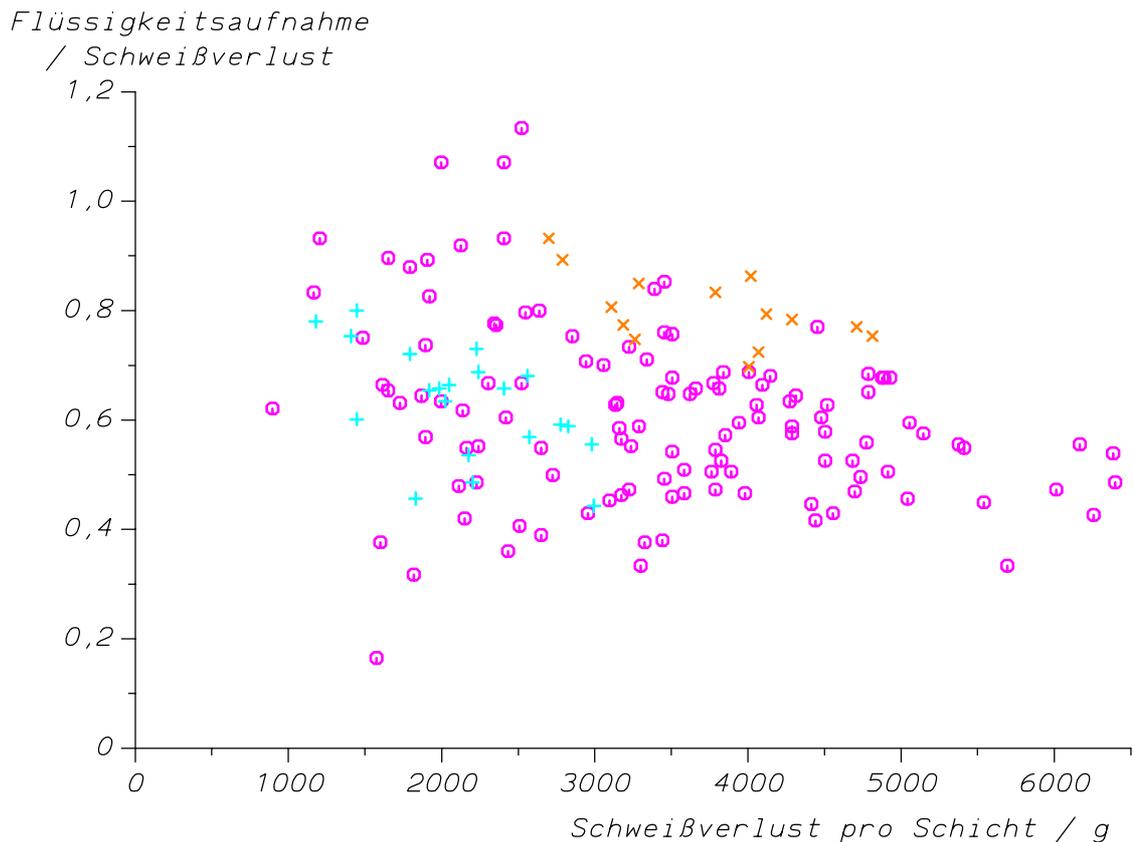


Abb. 84: Ersatz der durch Schwitzen verlorenen Flüssigkeit während der Schicht: Verhältnis von Rehydratation zu Schweißverlust.

o: Daten aus dieser Studie: 123 Schichten

x: Daten von SCHULZE TEMMING HANHOFF (1968) [341]: Laborversuche; jeweils Mittelwerte von sechs Probanden.

+: Daten von TEMMING & ROHMERT (1972) [373]: Feldversuche im Steinkohlenbergbau.

Betrachtet man das Verhältnis von Rehydratation (hier sind die Wasseranteile in der Nahrung – nach Tabellen von Geigy – mit in die Bilanz einberechnet worden) zu Schweißverlust (Abb. 84), so sieht man, daß im Bereich bis etwa $BET = 27^\circ\text{C}$ eine durchaus hohe relative Rehydratation auftritt – sogar über 100 %; offenbar haben hier Bergleute gewohnheitsmäßig ihre Teeflasche geleert. Oberhalb von $BET = 30^\circ\text{C}$ finden sich relative Rehydratationen zwischen 40 und 70 %. Die von uns erhobenen Daten stimmen gut mit den Daten von TEMMING & ROHMERT bei geringerer Klimabelastung überein; in Laboruntersuchungen von SCHULZE TEMMING HANHOFF ist die Rehydratation im Mittel deutlich höher: vermutlich spielen hier die leichtere Verfügbarkeit von Getränken im Laborversuch, sowie das Fehlen von Arbeit, auf die sich die Bergleute konzentrieren und die sie fertigstellen mußten, eine Rolle.

Abb. 85 zeigt die Dehydratation in Bezug auf die Körpermasse; bei hoher Klimabelastung beträgt die mittlere Dehydratation 2 % der Körpermasse; in Kapitel 2.4.3.2 wurde erläutert, wie sich eine solche Dehydratation auf Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit der Bergleute auswirken kann. Eine Dehydratation von 5 %, wie sie in Abb. 85 maximal auftritt, ist indiskutabel hoch.

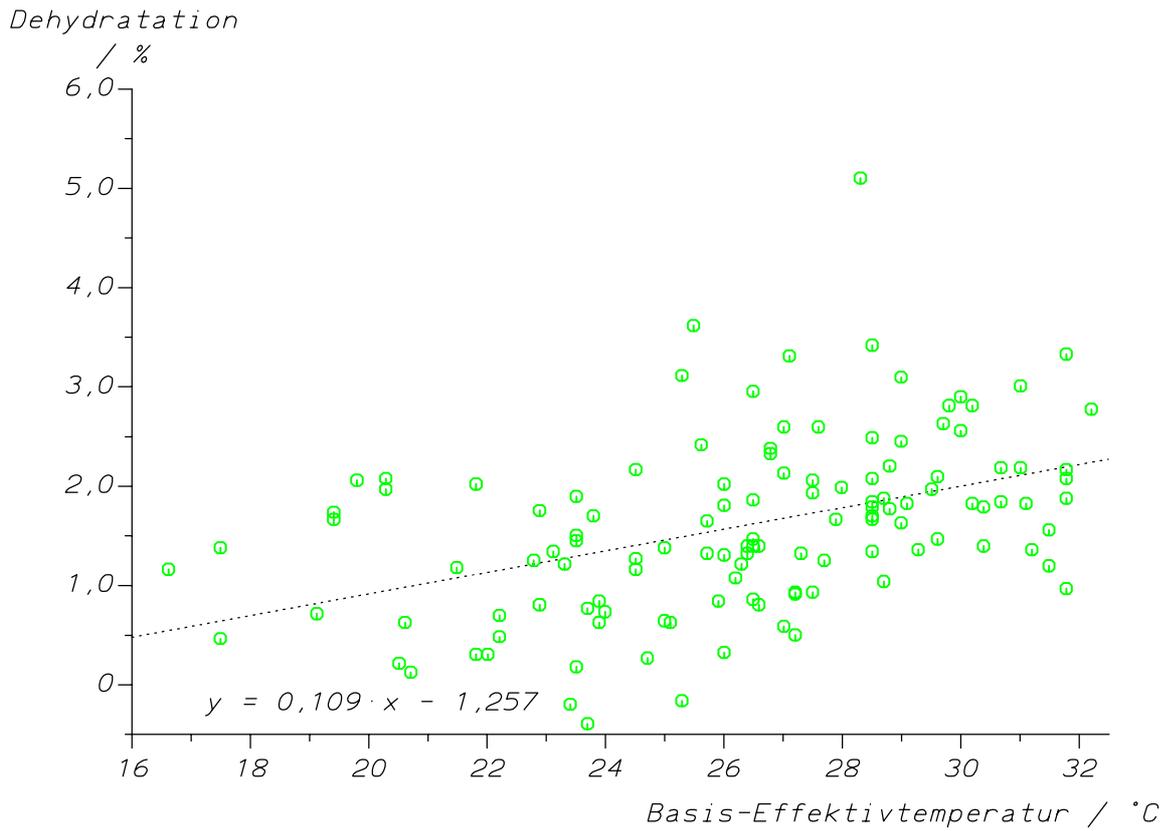


Abb. 85: Spezifische Dehydratation: Dehydratation pro Körpermasse in Abhängigkeit von der Klimabelastung.

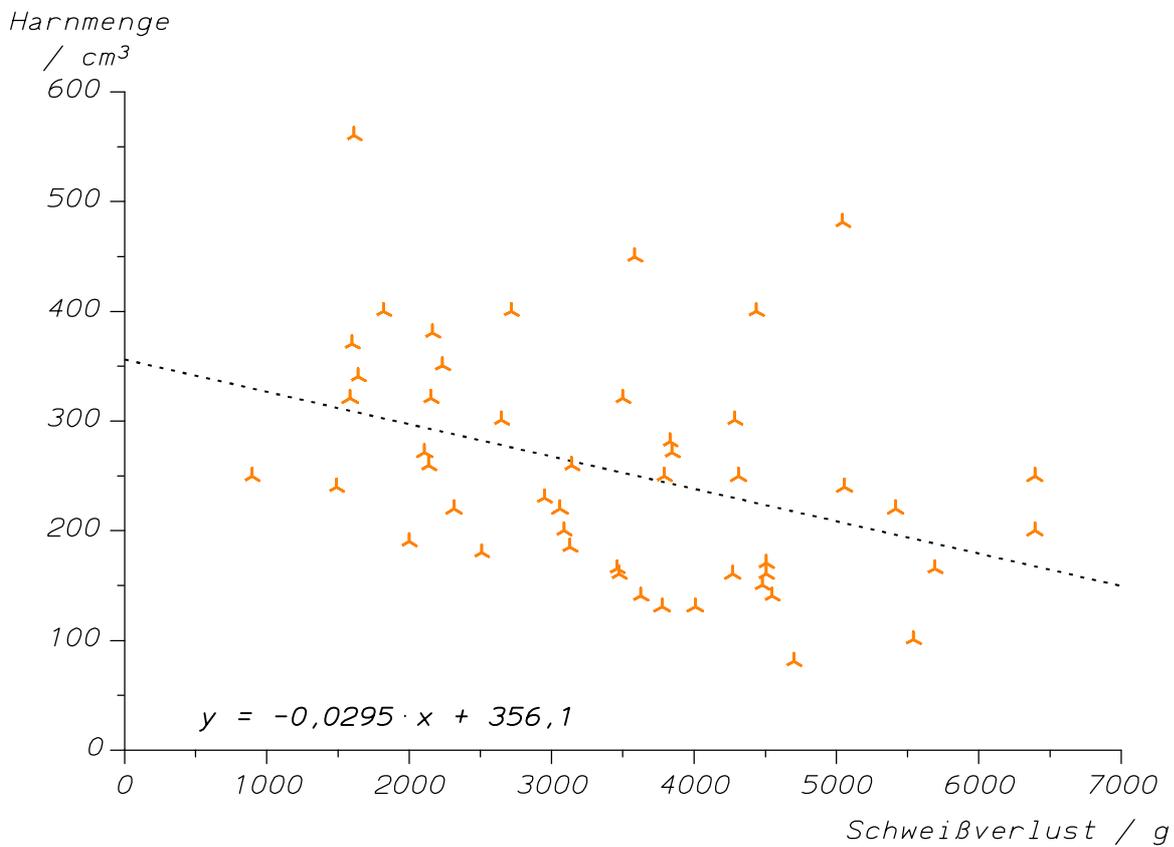


Abb. 86: Harnmenge in Abhängigkeit vom Schweißverlust für 48 Schichten, in denen eine Harnabgabe protokolliert wurde ($r = 0,38$; $p < 0,01$).

Unter Tage wurde auch die Harnmenge bestimmt; es ist nicht verwunderlich, daß bei den hohen Schweißmengen – trotz entsprechend höherer Trinkmengen – mit zunehmender klimatischer Belastung und Dehydratation auch die ausgeschiedenen Harnmengen signifikant abnahmen (Abb. 86).

6.1.7 Abschätzung der „thermischen Pulse“

Bekanntlich steigt die Herzschlagfrequenz mit ansteigender Körpertemperatur an, weil vermehrt Blut in die Peripherie des Körpers gepumpt wird, damit die Kühlung, die dort konvektiv (bei Lufttemperaturen unterhalb der Hauttemperatur) und/oder evaporativ (durch Schweißverdampfung) stattfindet, zur Kühlung des Körperkerns genutzt werden kann (vergleiche z.B. ROWELL [315]). In den Darstellungen, wo Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur untereinander aufgetragen sind, ist dies bei Schichten mit stark variierender Arbeitsschwere gut zu sehen (z.B. in Abb. 87, Abb. 90 oder Abb. 118); auch in Laborversuchen, wo – bei gleicher Körperarbeit – die Herzschlagfrequenz mit zunehmender Körpertemperatur stark ansteigt (z.B. in Abb. 8 und Tabelle 4).

Diejenigen zusätzlichen Herzschläge, die auf den Anstieg der Körpertemperatur zurückzuführen sind, werden *thermische Pulse* (HSF_{th}) genannt – analog zu den *Arbeitspulsen* (HSF_A), die durch physische Arbeit bedingt sind. Für den Anstieg der Herzschlagfrequenz werden in der Literatur Werte zwischen 16 min^{-1} und 60 min^{-1} pro Grad Anstieg der Körpertemperatur genannt (VOGT [389]).

Während die Bestimmung dieses Anstiegs im Klimalabor gut möglich ist (siehe z.B. Tabelle 4), ist die Abschätzung im Feldversuch schwierig, insbesondere, wenn man nicht in den Arbeitsablauf eingreifen will. VOGT ET AL. [388] schlugen vor, die Herzschlagfrequenz nach Ruhepausen von mindestens 5 Minuten zu messen; die dann vorhandene Erhöhung der „Ruhefrequenz“ soll dann die thermischen Pulse repräsentieren. – Dieses Vorgehen ist grundsätzlich nicht nur im Laborversuch, sondern auch im Feldversuch durchführbar, wenn Arbeitspausen hinreichender Länge klar festgestellt werden können. Die thermischen Pulse können auf diese Art allerdings nur für die genannten Zeitpunkte bestimmt werden und müssen dazwischen linear interpoliert werden (siehe beispielsweise das Beispiel bei MAIRIAUX & MALCHAIRE [238], Fig. 4.2, S. 64; die Herzschlagfrequenz sinkt dort nach der 4. und der 5. Pausenminute kontinuierlich weiter ab, so daß – in dem dort gewählten Beispiel – die Wahl des Zeitpunkts das Ergebnis recht willkürlich beeinflußt).

6.1.7.1 Einzelschichten

Da bei den hier vorgestellten Felduntersuchungen die Körperinnentemperatur – ebenso wie die Herzschlagfrequenz – während der gesamten Arbeitsschicht kontinuierlich erfaßt wurde, wird hier ein anderes Vorgehen zur Abschätzung des Anteils thermischer

Pulse vorgeschlagen. Das Vogt'sche Verfahren beruht darauf, daß die Einzelkomponenten der Herzschlagfrequenz unterschiedliche Zeitkonstanten haben: die „Arbeitspulse“ gehen nach dem Ende dynamischer Körperarbeit (je nach körperlicher Leistungsfähigkeit) recht schnell zurück, während die *thermischen Pulse* von der Höhe der Körpertemperatur (und damit auch von deren Zeitkonstante, zwischen 10 und 20 Minuten) abhängen. Um unabhängig vom Zeitverlauf der Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur eine Abschätzung zu erhalten, soll auf das Zeitverhalten dieser beiden Größen während der gesamten Schicht zurückgegriffen werden.

Es wird zur Abschätzung der „thermischen Pulse“ die Herzschlagfrequenz über der Rektaltemperatur aufgetragen: in dieser Darstellung läßt sich betrachten, in welcher Bandbreite Herzschlagfrequenzen für eine ausgewählte Körpertemperatur auftreten. In Abb. 88 ist dies für die Zeitverläufe von Herzschlagfrequenz und Rektaltemperatur während einer Arbeitsschicht (die jeweils beide im oberen Teil von Abb. 87 dargestellt werden) durchgeführt worden. Man erkennt, daß die Herzschlagfrequenz jeweils in einer Erhöhung von 50 bis 60 min^{-1} bei den unterschiedlichen Körpertemperaturen variiert, wobei die niedrigste Herzschlagfrequenz offenbar von der Körpertemperatur abhängt und mit steigender Körpertemperatur ebenfalls ansteigt: dieser Anstieg stellt die *thermischen Pulse* HSF_{th} dar. Die Ober- und die Untergrenze der Herzschlagfrequenz steigen in Abb. 88 mit etwa gleicher Steigung an, d.h. die Arbeitspulse $HSF_{A_{korrr}}$ – als Anstieg über die jeweilige „Ruhe-Herzschlagfrequenz“, die die *thermischen Pulse* darstellen – bei der betreffenden Körpertemperatur dieses Bergmanns sind unabhängig von seiner Körpertemperatur. Die Steigung beträgt für hohe Körpertemperaturen $67 \text{ min}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, liegt also höher als die Steigungen in Tabelle 4, die in Laborversuchen bei konstanter Arbeitsleistung im thermoregulatorischen Gleichgewicht ermittelt wurden.

Zur Abschätzung der *thermischen Pulse* wird nun vorgeschlagen, die graphische Darstellung der Herzschlagfrequenz über der Körpertemperatur zunächst mit einer Konturlinie zu versehen (in blau), und die untere Konturlinie für die weitere Auswertung mit einer konvexen Bezugslinie anzunähern (in schwarz). Der Abstand dieser Linie zu der unteren Konturlinie soll die Schwankungsbreite der Herzschlagfrequenz während der Arbeitspausen (z.B. in Abb. 87 im oberen Teil) berücksichtigen, die man z.B. aus der Schwankung der Herzschlagfrequenz während der Fahrung im Personenzug abschätzen kann. Da nicht davon ausgegangen werden kann, daß bei allen Körpertemperaturen einmal eine Ruhepause eingelegt wurde (z.B. in Abb. 88 bei $37,42^{\circ}\text{C}$ und bei $37,60^{\circ}\text{C}$ ist dies sicherlich nicht der Fall), wird die Konturlinie konvex angenähert, d.h. monoton steigend.

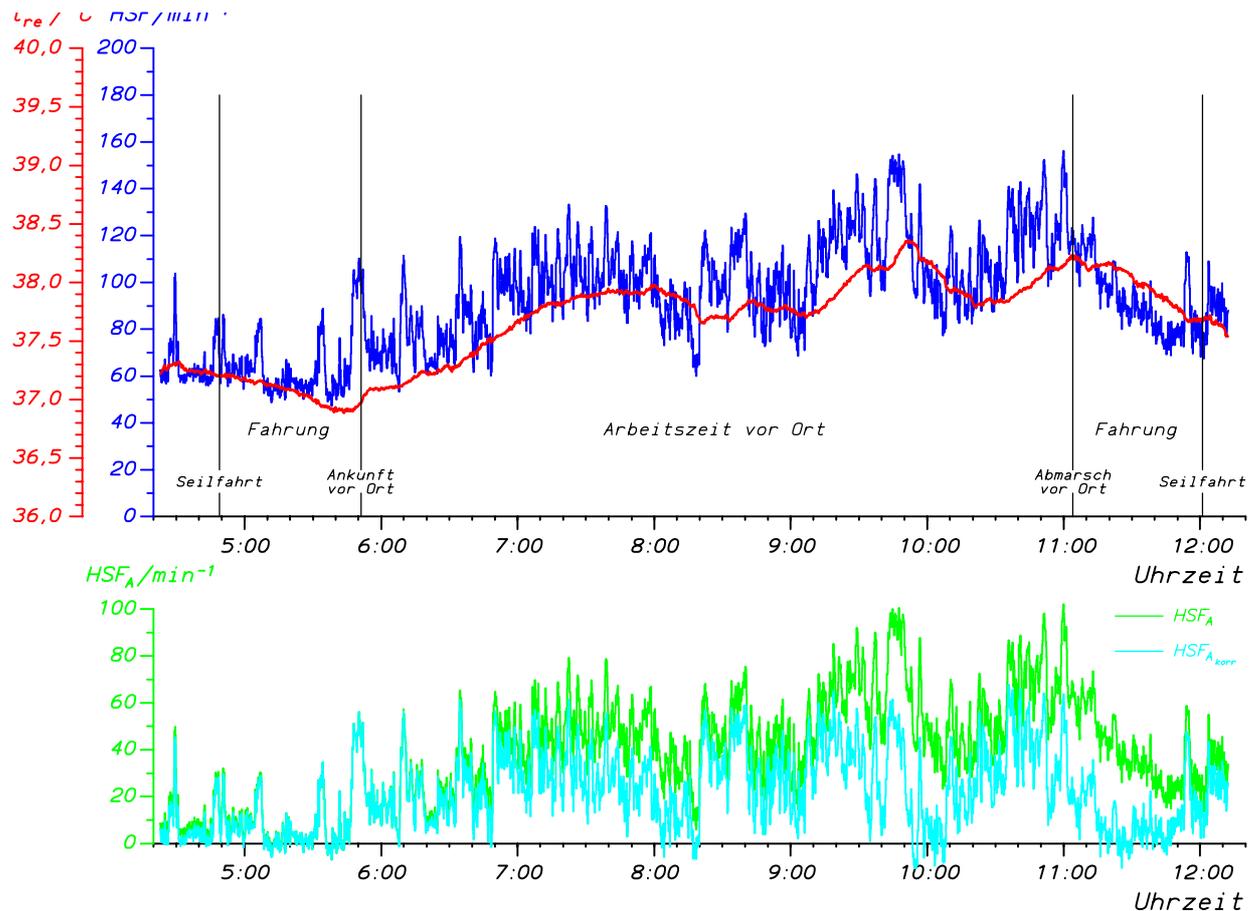


Abb. 87: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während einer Schicht; zusätzlich angegeben sind die Arbeitspulse HSF_A sowie die entsprechend Abb. 88 um die thermischen Anteile korrigierten Arbeitspulse $HSF_{A_{korr}}$.

Diese Bezugslinie – oder *thermische Kennlinie* – wird nun verwendet, um den Anteil thermischer Pulse für jeden Wert der Körperinnentemperatur innerhalb des – nach Plausibilitätskriterien eingeschätzten – Gültigkeitsbereichs der Bezugslinie festzulegen, der durch die senkrechten Markierungen angezeigt wird; außerhalb dieses Bereichs werden die Werte der Linie am Rand verwendet. Der niedrigste Wert der thermischen Kennlinie wird nun verwendet, um einen Kurvenverlauf der Arbeitspulse zu errechnen (grün im unteren Teil von Abb. 87); die thermischen Pulse werden abgezogen, indem für jede Körpertemperatur der entsprechende Wert der Herzschlagfrequenz, den die Bezugslinie in Abb. 88 angibt, als Bezugswert abgezogen wird (hellblau im unteren Teil von Abb. 87). Die Kurve der *korrigierten Arbeits-Herzschlagfrequenz* $HSF_{A_{korr}}$ zeigt Arbeitsunterbrechungen um kurz nach 8 Uhr und um 10 Uhr herum recht gut auf, ebenso während eines großen Teils der Zufahrt auf dem Rückweg (etwa von 11:15 bis 11:48 Uhr); nicht völlig korrekt dargestellt werden Arbeitsunterbrechungen von 6:24 bis 6:26 (die Pause dauert vielleicht nicht lange genug, daß sich die Herzschlagfrequenz entsprechend absenkt) und 7:07-7:09 Uhr; eine Arbeitsunterbrechung von 7:56 bis 8:03 Uhr zeigt zumindest gegen Ende einen Wert von null während eine weitere Arbeitsunterbrechung von 8:40-8:45 Uhr einen Wert um 5 min^{-1} ausweist, d.h. etwas zu hoch bleibt. Auf dem

Rückweg zum Schacht – bei der Fahrt im Personenzug – wird die Herzschlagfrequenz bis 11:48 Uhr recht gut als null dargestellt, driftet dann bis 12:00 Uhr aber etwas hoch: hier spiegeln sich möglicherweise Wasser und Elektrolytverluste wieder, die ebenfalls zu einer erhöhten Herzschlagfrequenz führen können.

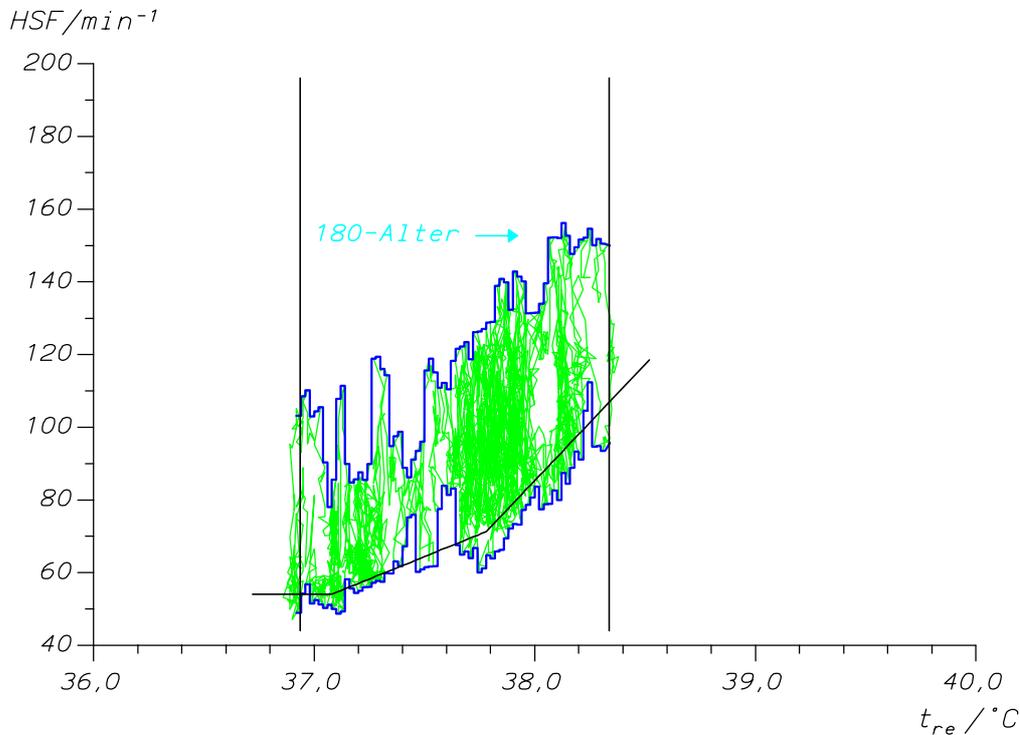


Abb. 88: Auswertediagramm für thermische Pulse: Die Herzschlagfrequenz ist über der Körpertemperatur für eine komplette Arbeitsschicht dargestellt; zusätzlich sind Konturlinien und eine Bezugslinie zur Errechnung der thermischen Pulse eingezeichnet.

Für die Zeit vor Ort O0 und für die gesamte Schicht G0 wurde der Anteil der thermischen Pulse in Abb. 89 jeweils in Histogrammform dargestellt: für die Arbeitszeit vor Ort reduzieren sich die mittleren Arbeitspulse von $48,7 \text{ min}^{-1}$ auf $28,8 \text{ min}^{-1}$, d.h. um den thermischen Anteil der Herzschlagfrequenz von $19,9 \text{ min}^{-1}$ bzw. um 41 %; für die gesamte Schichtzeit G0 findet eine Reduktion der Arbeitsherzschlagfrequenz von $42,1 \text{ min}^{-1}$ auf $23,8 \text{ min}^{-1}$ statt; der thermische Anteil der Herzschlagfrequenz beträgt hier $18,3 \text{ min}^{-1}$ bzw. 43 %. Hieraus folgt, daß eine Abschätzung des Energieumsatzes ausschließlich aus der Herzschlagfrequenz (z.B. ISO 8996 [444], KAMPMANN ET AL. [171]) bei den vorhandenen hohen Körpertemperaturen eine erhebliche Fehlweisung in sich tragen kann, sofern nicht direkte Messungen des Energieumsatzes für bestimmte Zeitabschnitte durchgeführt werden (KAMPMANN ET AL. [176]).

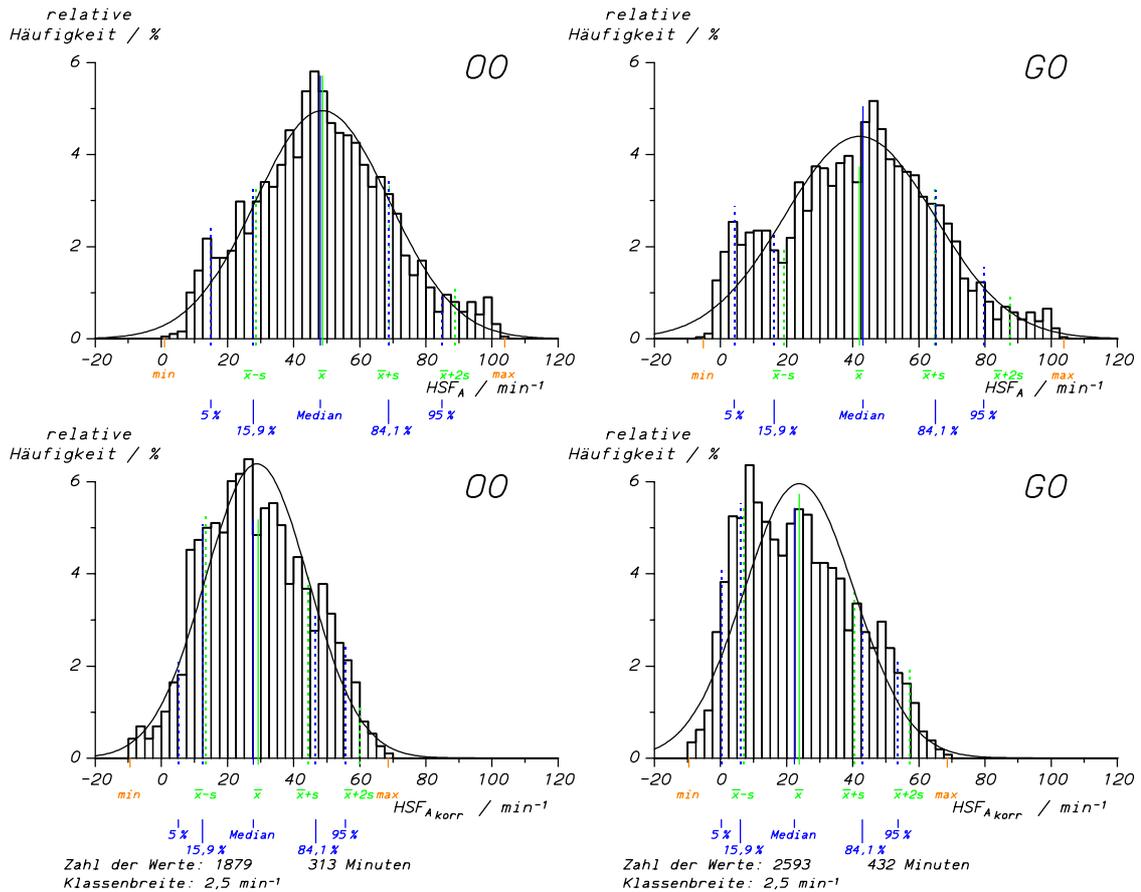


Abb. 89: Verteilungen der Arbeitspulse HSF_A und der – um die thermischen Pulse entsprechend Abb. 88 – korrigierten Arbeitspulse $HSF_{A_{korr}}$ sowohl für die Zeit vor Ort 00 als auch für die gesamte Schicht G0.

In Abb. 90 bis Abb. 92 ist für eine Schicht mit sehr schwerer Körperarbeit eine solche Analyse der thermischen Pulse nochmals dargestellt. Die Herzschlagfrequenz übersteigt während 27 % der Arbeitszeit vor Ort die Grenze “180 - Alter“ und während 7 % die Grenze “200 - Alter“; während der gesamten Schichtzeit werden diese Grenzen immerhin noch während 18 % bzw. 5 % überschritten.

Abb. 91 kann man entnehmen, daß die Herzschlagfrequenz des Bergmanns die Grenze “200 - Alter“ nicht recht übersteigt: bei Körpertemperaturen oberhalb von $38,2\text{ }^\circ\text{C}$ steigt zwar die Untergrenze der Herzschlagfrequenz mit zunehmender Körpertemperatur weiter an, die Obergrenze bleibt jedoch konstant, so daß die zur Verfügung stehende Spanne von Arbeitspulsen abnimmt. Die in Abb. 91 erstellte thermische Kennlinie hat im rechten Teil (oberhalb von $37,8\text{ }^\circ\text{C}$) eine Steigung von $46,5\text{ min}^{-1}/^\circ\text{C}$, was gut im Bereich der Streuung der Ergebnisse aus Klimakammerversuchen (Tabelle 4) liegt. Während der Arbeitsunterbrechungen liegt $HSF_{A_{korr}}$ in guter Näherung um null (z.B. um 7:12; 7:50; 9:25 und 9:50 Uhr). Abb. 92 gibt die Verteilungen von HSF_A und $HSF_{A_{korr}}$ wieder: für die Zeit vor Ort reduzieren sich die mittleren Arbeitspulse von $HSF_A = 50,1\text{ min}^{-1}$ auf $HSF_{A_{korr}} = 25,4\text{ min}^{-1}$; d.h. die thermischen Pulse betragen $HSF_{th} = 24,7\text{ min}^{-1}$

oder 49 % der Arbeitspulse. Für die gesamte Schichtzeit stellen die thermischen Pulse immerhin noch 44 % der Arbeitspulsfrequenz von $39,4 \text{ min}^{-1}$ dar.

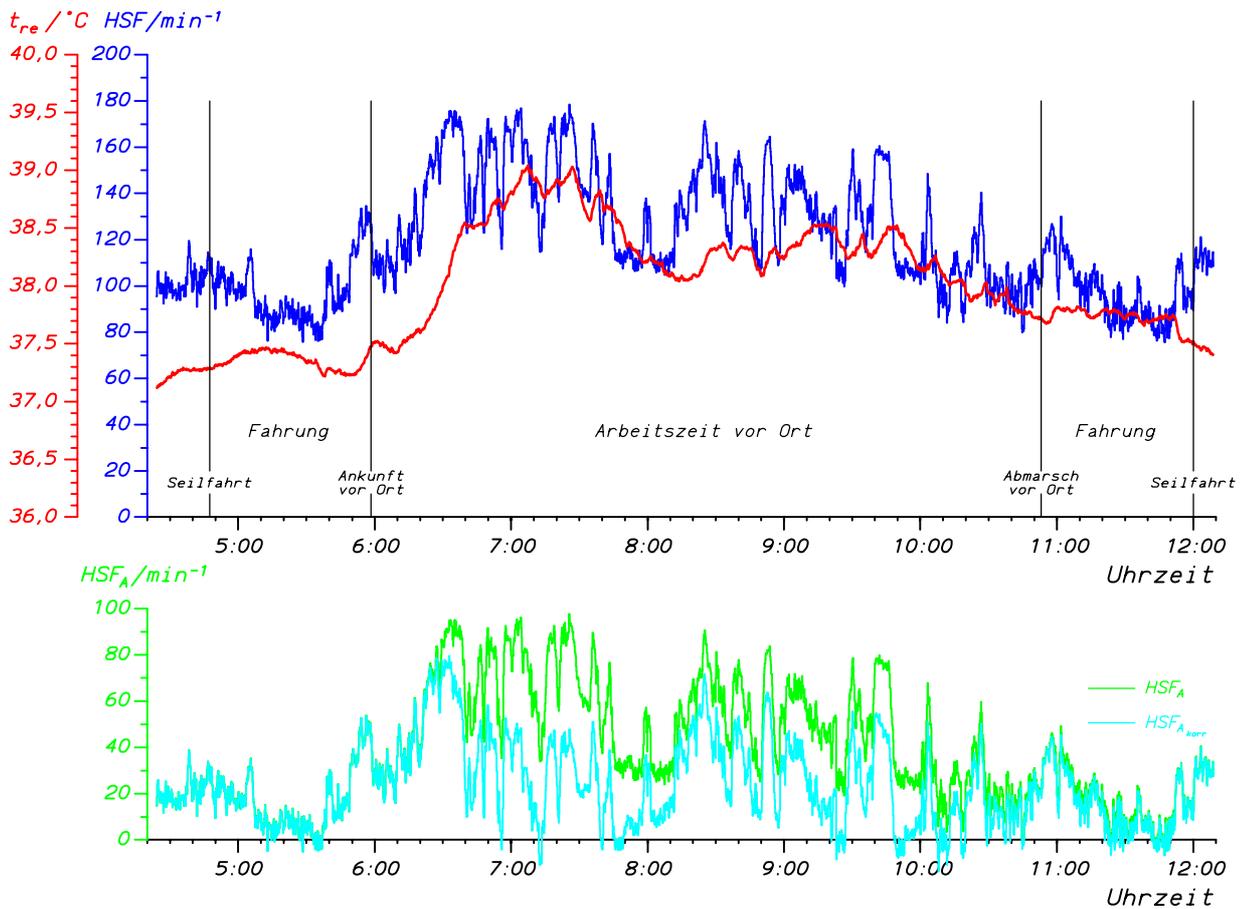


Abb. 90: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während einer Schicht; zusätzlich angegeben sind die Arbeitspulse HSF_A sowie die entsprechend Abb. 91 um die thermischen Anteile korrigierten Arbeitspulse $\text{HSF}_{A\text{korr}}$.

Ein Problem der Anwendung des hier vorgeschlagenen Verfahrens liegt für unsere Untersuchung darin, daß die Bergleute auch bei Arbeitsunterbrechungen oft stehen bleiben und dann weiterhin statische Haltearbeit leisten, so daß sich die Arbeitsunterbrechungen im Verlauf der Herzschlagfrequenz vielfach nicht ganz klar abzeichnen und dementsprechend die Herzschlagfrequenz während der Arbeitsunterbrechung dann auch keine richtige Ruheherzschlagfrequenz darstellt.

Ein weiteres Problem bei dieser Bewertung der thermischen Pulse stellt die Frage dar, wie weit bei allen auftretenden Körpertemperaturen auch Arbeitsunterbrechungen auftreten; bei hohen Körpertemperaturen ist die Annahme sicher gerechtfertigt, daß bei der hohen Beanspruchung auch Ruhepausen eingelegt werden, so daß diese Korrekturen vermutlich gut erfaßt werden können. Dagegen ist es bei niedrigen Körpertemperaturen denkbar, daß – im Hinblick auf die hier vorgeschlagene Auswertemethode – nicht genug Arbeitsunterbrechungen eingelegt werden: so könnte in Abb. 88 – wo z.B. bei $t_{re} = 37,42 \text{ }^\circ\text{C}$ und bei $t_{re} = 37,60 \text{ }^\circ\text{C}$ ein solches Problem offenbar besteht – im gesamten

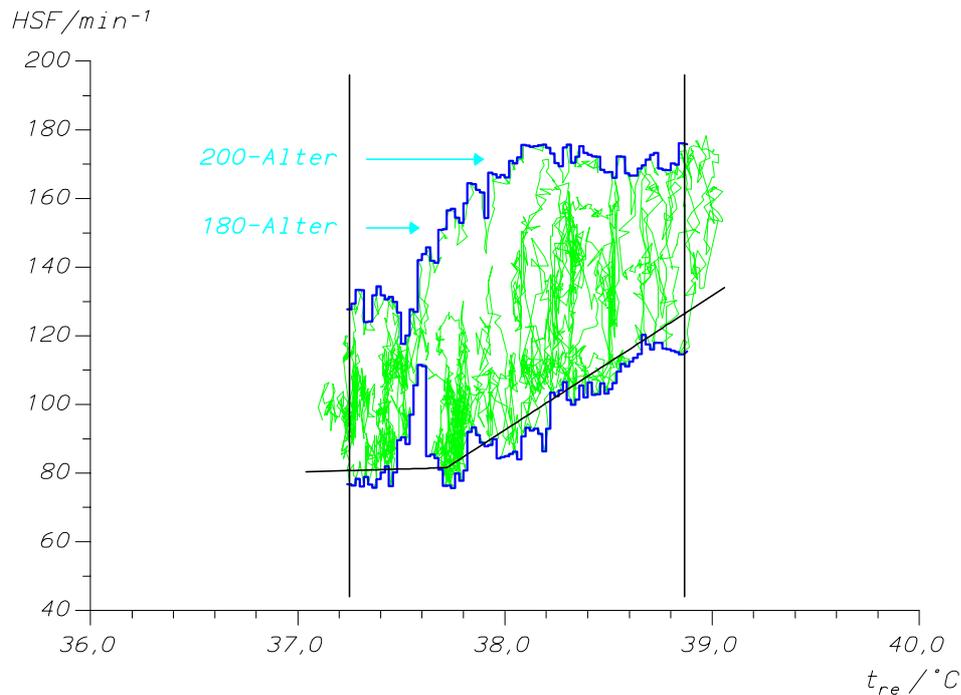


Abb. 91: Auswertediagramm für thermische Pulse: Herzschlagfrequenz über Körpertemperatur für eine komplette Arbeitsschicht mit eingezeichneten Konturlinien und Bezugslinie zur Errechnung der thermischen Pulse.

Bereich zwischen $t_{re} = 37,1$ $^{\circ}\text{C}$ und $t_{re} = 37,8$ $^{\circ}\text{C}$ (d.h. in demjenigen Bereich, in dem die Bezugslinie abknickt) die Bezugslinie zu hoch liegen: hier kann man als Argument für das vorgeschlagene Verfahren anführen, daß in diesem Bereich die Korrekturen bezüglich der thermischen Pulse deutlich niedriger liegen als bei den höheren Körpertemperaturen und somit auf die Berechnung der mittleren thermischen Pulse keinen so großen Einfluß haben. Um solche Effekte in den linearen Bereichen der Bezugslinie gering zu halten, wurde die Verwendung einer konvexen Bezugslinie vorgeschlagen.

Ein Vorteil des hier vorgeschlagenen Verfahrens ist es, daß die thermischen Pulse für jede Körpertemperatur, bei der einmal eine Ruhepause eingelegt wurde, an anderen Stellen im Verlauf der Arbeitsschicht gut berechnet werden können, wenn dort die gleiche Körpertemperatur nochmals auftritt.

Wie weit die Bezugslinie zur Errechnung der thermischen Anteile der Herzschlagfrequenz einen Tagesgang hat und beispielsweise zusätzlich vom Akklimatisationszustand der Bergleute sowie kurzfristig von Dehydratation bzw. Elektrolytverlusten abhängt, kann anhand des vorliegenden Datenmaterials nicht hinreichend genau abgeschätzt werden. Im Hinblick auf Wasser- und Elektrolytverluste zeigt sich jedenfalls, daß sich die Bezugslinien, die sich für die erste bzw. zweite Schichthälfte ergeben, im Rahmen der Genauigkeit der Ermittlung in vielen Fällen entsprechen.

Zur Klärung dieser Frage wären Laborversuche mit definierten Arbeitspausen geeignet. In der folgenden Auswertung (Kapitel 6.1.7.2) wird jede Schicht mit Hilfe ihrer eigenen thermischen Bezugslinie auf den Anteil der thermischen Pulse hin ausgewertet.

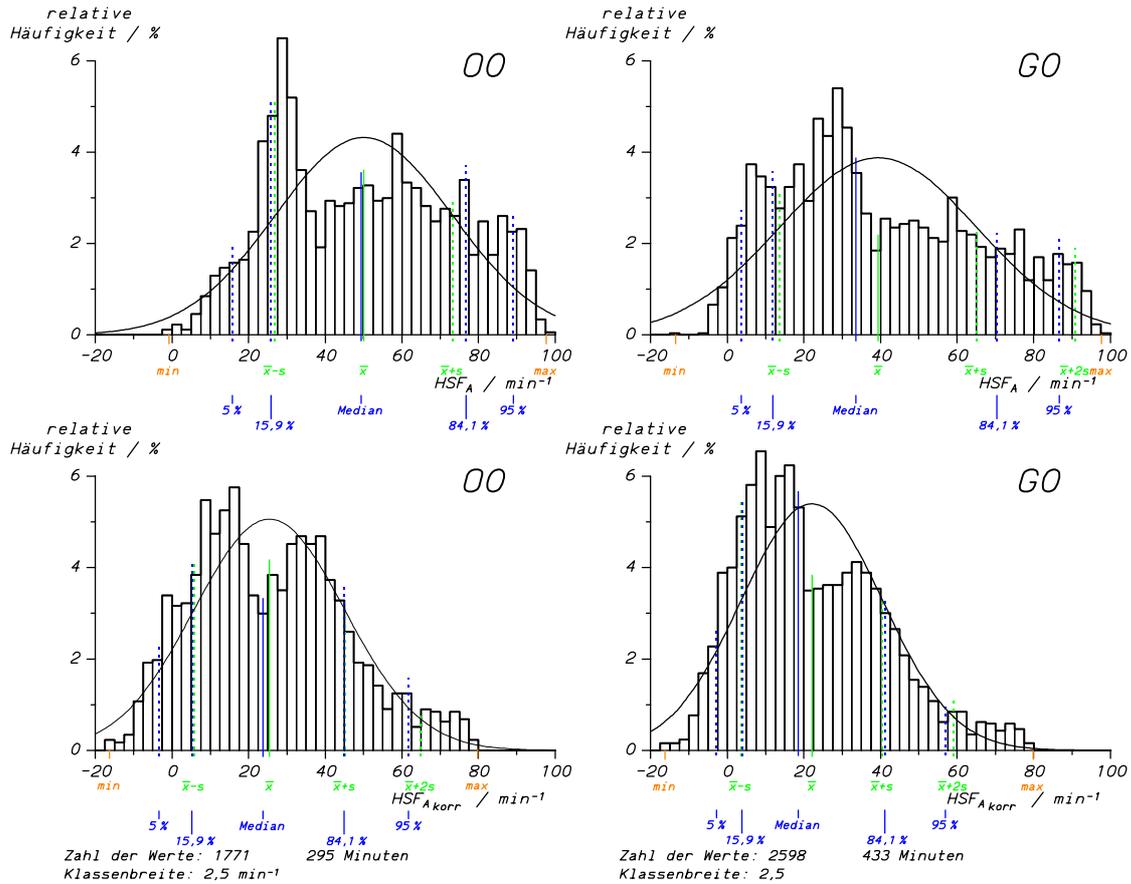


Abb. 92: Verteilungen der Arbeitspulse HSF_A und der – um die thermischen Pulse entsprechend Abb. 91 – korrigierten Arbeitspulse $HSF_{A\text{korr}}$ sowohl für die Zeit vor Ort OO als auch für die gesamte Schicht GO.

6.1.7.2 Gesamtheit der untersuchten Schichten an heißen Betriebspunkten

Da die *thermischen Pulse* einen erheblichen Anteil der Arbeitspulse ausmachen können – wie in 6.1.7.1 gezeigt –, ist es für die Bewertung der Herz-Kreislauf-Beanspruchung von Interesse, inwieweit dieser Anteil der thermischen Pulse von den Belastungs- und Beanspruchungsparametern abhängt.

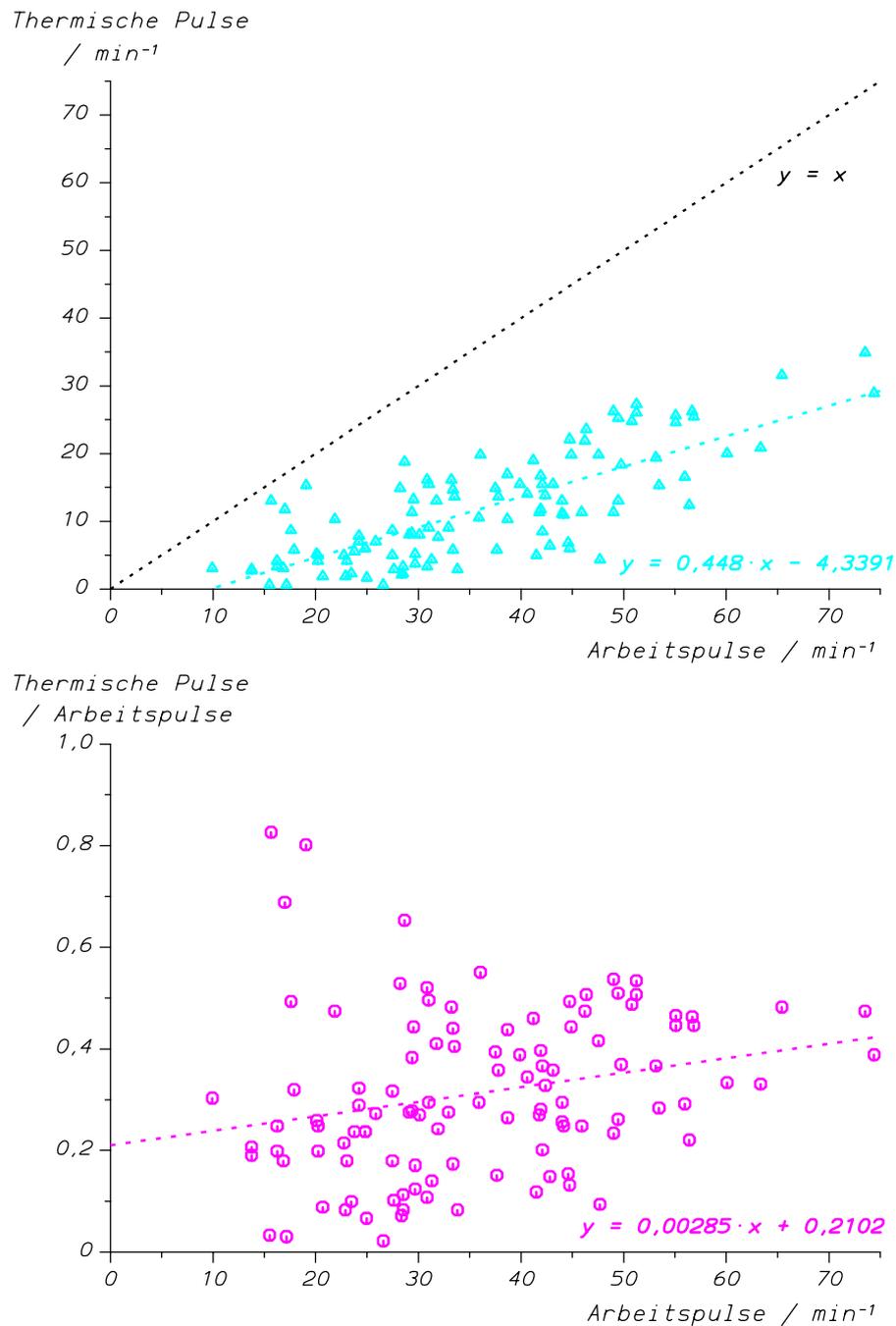


Abb. 93: Anteil der thermischen Pulse an den Arbeitspulsen.

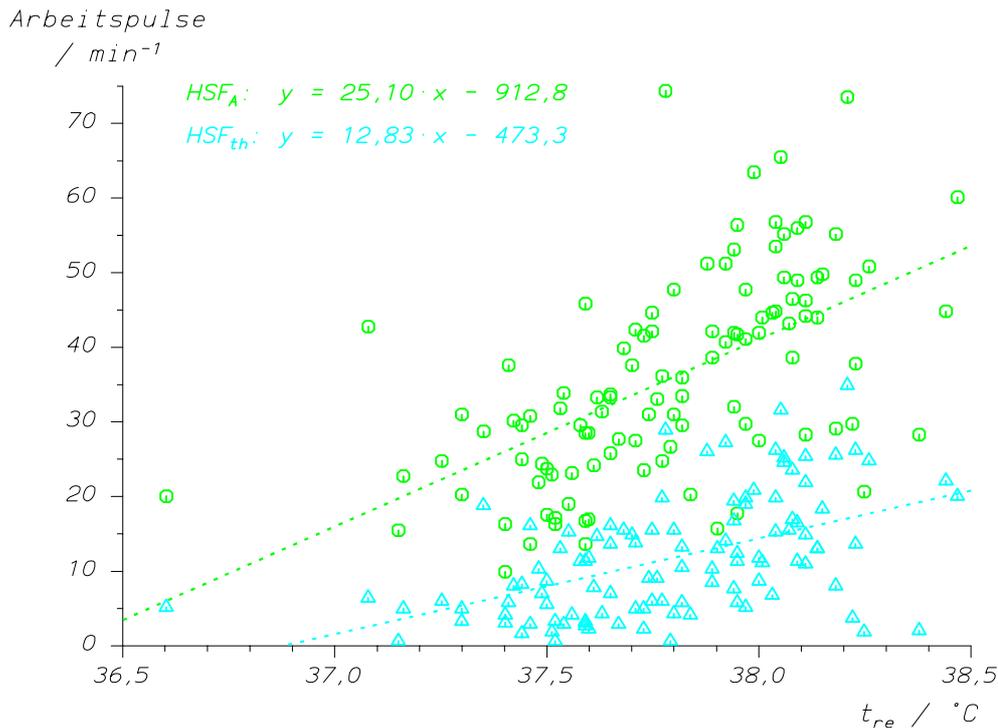


Abb. 94: Zunahme der Arbeitspulse und der thermischen Pulse mit ansteigender mittlerer Körpertemperatur während der Zeit vor Ort.

Für 110 Schichten, für die für die Zeit vor Ort die thermischen Pulse HSF_{th} berechnet werden konnten, ergibt sich ein Mittelwert von $HSF_{th} = (11,7 \pm 7,9) \text{ min}^{-1}$ (Mittelwert \pm Standardabweichung). Die Arbeitspulse HSF_A – wie in 6.1.7.1 bestimmt – liegen bei $(35,1 \pm 12,8) \text{ min}^{-1}$, so daß die thermischen Pulse im Durchschnitt etwa ein Drittel der Arbeitspulse betragen. Wenn man die Arbeitspulse aus der Bezugs-Herzfrequenz HSF_0 als $HSF_A = HSF - HSF_0$ berechnet, so ergibt sich mit $(35,8 \pm 13,7) \text{ min}^{-1}$ ein sehr ähnlicher Wert; im folgenden wird – wegen der leichteren Berechnungsart und auch, weil eine Bestimmung ohne Kenntnis des Verlaufs der Körpertemperatur möglich ist – auf diese Berechnungsart der Arbeitspulse zurückgegriffen.

Betrachtet man die Abhängigkeit der mittleren thermischen Pulse von Belastungs- und Beanspruchungsparametern, so fällt zunächst auf, daß diese Größe nicht von der Basis-Effektivtemperatur abhängt ($r = 0,03$; $p > 0,7$) – ebensowenig, wie der Mittelwert der Herzschlagfrequenz in Kapitel 6.1.6.1. Dagegen hängt HSF_{th} hochsignifikant vom Mittelwert der Arbeitspulse HSF_A ab: ($r = 0,77$; $p < 0,00005$; Std.-Abw. = $5,1 \text{ min}^{-1}$; Abb. 93 oben), für den Anteil der thermischen Pulse an den Arbeitspulsen ergibt sich ebenfalls ein signifikanter Anstieg ($r = 0,24$; $p < 0,02$ Std.-Abw. = $0,16$; Abb. 93 unten). Einen sehr hohen Anteil der Arbeitspulse können die thermischen Pulse bei geringen Belastungen durch Körperarbeit (d.h. bei niedrigen Arbeitspulsen) darstellen, wo die periphere Durchblutung einen weit größeren Anteil der Blutförderung des Herzens beanspruchen kann als die Versorgung der Muskeln mit Blut (vgl Kapitel 2.2.1.1; ROWELL [316]).

Mit der Körpertemperatur steigen sowohl die Arbeitspulse ($r = 0,58$; $p < 0,00005$; Std.-Abw. $11,2 \text{ min}^{-1}$; Abb. 94) als auch die thermischen Pulse hoch signifikant an ($r = 0,51$; $p < 0,00005$; Std.-Abw. = $6,8 \text{ min}^{-1}$; Abb. 94). Der Anstieg der thermischen Pulse über der Rektaltemperatur ist deutlich niedriger als in Abb. 8; dies liegt unter anderem an folgenden Gegebenheiten, die von den Umständen in Laboruntersuchungen abweichen:

- die Arbeitsschwere in den einzelnen Schichten ist unterschiedlich hoch.
- die Daten stammen von 38 Bergleuten mit unterschiedlicher körperlicher Leistungsfähigkeit, die unterschiedliche Tätigkeiten verrichten, und unterschiedliche Möglichkeiten – in Abhängigkeit von den Arbeitsaufgaben – und/oder Fähigkeiten zu einer Selbstregulation der Arbeitsschwere haben.
- der Tagesgang der Bergleute ist den Mittelwerten der Rektaltemperatur überlagert (der Punkt bei $t_{re} = 36,6 \text{ °C}$ stammt z.B. aus einer Nachtschicht; vgl. auch Kapitel 6.3.2): hierdurch werden die Datenpunkte – je nach Tageszeit – parallel zur t_{re} -Achse versetzt.
- statische Haltearbeit führt bei gleichem Energieumsatz zu einer höheren Herzschlagfrequenz als dynamische Muskelarbeit: bei unterschiedlichen Anteilen statischer Haltearbeit in den einzelnen Schichten – die durch die unterschiedlichen Arbeitsaufgaben bedingt ist – werden die Arbeitspulse für gegebene Körpertemperaturen entsprechend stärker streuen, als im Laborversuch mit ganz überwiegend dynamischer Arbeit großer Muskelgruppen.
- die Bergleute senken ihre Arbeitsintensität bei zunehmender Körpertemperatur (vgl. Kapitel 6.1.7.4)

Wenn man die Arbeitsschwere aus der Herzschlagfrequenz abschätzen will, dürfen die thermischen Anteile nicht in die Betrachtung einbezogen werden; entsprechend Abb. 93 ergibt sich eine deutliche Verringerung der zur Auswertung zu verwendenden korrigierten Arbeitspulse $HSF_{A_{kor}}$ um die thermischen Pulse HSF_{th} .

Inwieweit die oben hergeleitete Beziehung zwischen HSF_A und t_{re} auch für andere Arbeitsbedingungen – anderes Klima, andere Arbeitsschwere, andere Bekleidung – verwendet werden kann, um thermische Pulse abzuschätzen, bleibt offen: der Unterschied zwischen den Arbeitspulsen und den korrigierten Arbeitspulsen wird umso größer sein, je niedriger der Brutto-Energieumsatz ist, weil die Muskeln dann nur einen geringen Anteil an der Blutfördermenge zu ihrer Versorgung benötigen.

6.1.7.3 Berechnung des Energieumsatzes

Zur Ermittlung des Energieumsatzes, der – insbesondere unter den erschwerten Bedingungen des Wärmeaustauschs unter Hitzearbeit – eine wichtige Größe innerhalb der Wärmebilanzgleichung darstellt, gibt es verschiedene Verfahren. Neben den direkten Messungen unter Laborbedingungen – in speziellen Meßkammern (z.B. DAUNCEY ET AL. 1978 [59]) und dem eleganten indirekten Verfahren mit doppelt markiertem Wasser⁵⁸ (z.B. SCHOELLER ET AL. 1982 [335]), das sich über längere Untersuchungszeiträume anwenden läßt, werden in Felduntersuchungen meist andere Methoden eingesetzt.

Eine Übersicht über verschiedene Methoden zur Abschätzung des Energieumsatzes (von der indirekten Messung durch die Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs mit einer Gasuhr über die Berechnung aus den Energieumsätzen für Einzelelemente der Arbeit, die aus Tabellen entnommen werden bis hin zur Abschätzung aus Tabellen für Berufe oder für dominante Tätigkeiten) findet sich bei HETTINGER ET AL. 1989 [140] und in ISO 8996 [444].

Im Fall, daß dynamische Arbeit großer Muskelgruppen den Energieumsatz bestimmt, finden HETTINGER (1970) [137] und NÜNNINGHOFF ET AL. 1989 [281] für das Fahrradergometer, daß für einen Anstieg der Herzschlagfrequenz um $1,0 \text{ min}^{-1}$ der Energieumsatz um $7,3 \text{ W}$ anstiegen kann. Ein Wert von $7,2 \text{ W/min}^{-1}$ wird auch in ISO 8996 [444] für grobe Abschätzungen angegeben.

Zur Auswertung unserer Daten werden die eigenen Messungen des Energieumsatzes unter Tage für „typische Tätigkeiten“ (Kapitel 6.3.6.2) herangezogen, die statische Haltearbeit – so weit sie bei den „typischen Tätigkeiten“ auftritt – einschließen. Da die klimatische Belastung in der hier vorgestellten Untersuchung im Mittel bei $BET = 26 \text{ °C}$ – und damit um 6 °C höher als in [176] liegt, wurde für denselben Datensatz eine lineare Regression berechnet, die nur die Arbeitspulse HSF_A und die Körpermasse KM als unabhängige Variablen betrachtet, damit der Einfluß von BET nicht außerhalb des Datenbereichs linear extrapoliert wird:

$$AEU / W = 6,6 \cdot HSF_A / \text{min}^{-1} + 3,9 \cdot (KM - 77,2) / \text{kg} + 30,4 \quad (5)$$

($R = 0,97$; Std.Fehler = 62 W)

⁵⁸ Das Verfahren beruht darauf, daß Wasser, das mit zwei nicht-radioaktiven Isotopen markiert ist: $^2\text{H}^{18}\text{O}$, im Körper dissoziiert und sich die dissoziierten Bestandteile gleichmäßig in den Flüssigkeits-Kompartments des Körpers (Blutplasma, inter- und intrazelluläres Volumen) verteilen. Während der Sauerstoff den Körper innerhalb des Stoffwechsels als CO_2 und als H_2O verlassen kann, besteht für den Wasserstoff nur die zweite Möglichkeit. Das Ausmaß, in dem ^{18}O aus den Körperflüssigkeiten schneller entweicht als ^2H ist ein Maß für den Energieumsatz. Da eine Bewertung der Abnahme von ^{18}O und ^2H erst nach einem Ausgleich der Diffusion zwischen den Flüssigkeits-Kompartments sinnvoll ist, ist eine Nutzung dieser Methode nur über einen Zeitraum von mehreren Tagen sinnvoll: z.B. bei Ernährungsumstellungen (JONES ET AL. [161]) oder bei Expeditionen.

d.h. eine Erhöhung des Energieumsatzes um $(6,6 \pm 0,6)$ W bewirkt einen Anstieg der Herzschlagfrequenz von $1,0 \text{ min}^{-1}$. Der Achsenabschnitt weist auf statische Haltearbeit hin, die auch vorhanden ist, wenn keine dynamische Muskelarbeit geleistet wird; dies ist plausibel, weil die Bezugs-Herzschlagfrequenz HSF_0 nicht im Liegen ermittelt wird, sondern den niedrigsten Wert während der Schicht darstellt; die obenstehende Gleichung wird für die weitere Auswertung verwendet; der Koeffizient der Arbeitspulse unterscheidet sich – im Rahmen der vorhandenen Datenstreuung – nicht von HETTINGERS Wert.

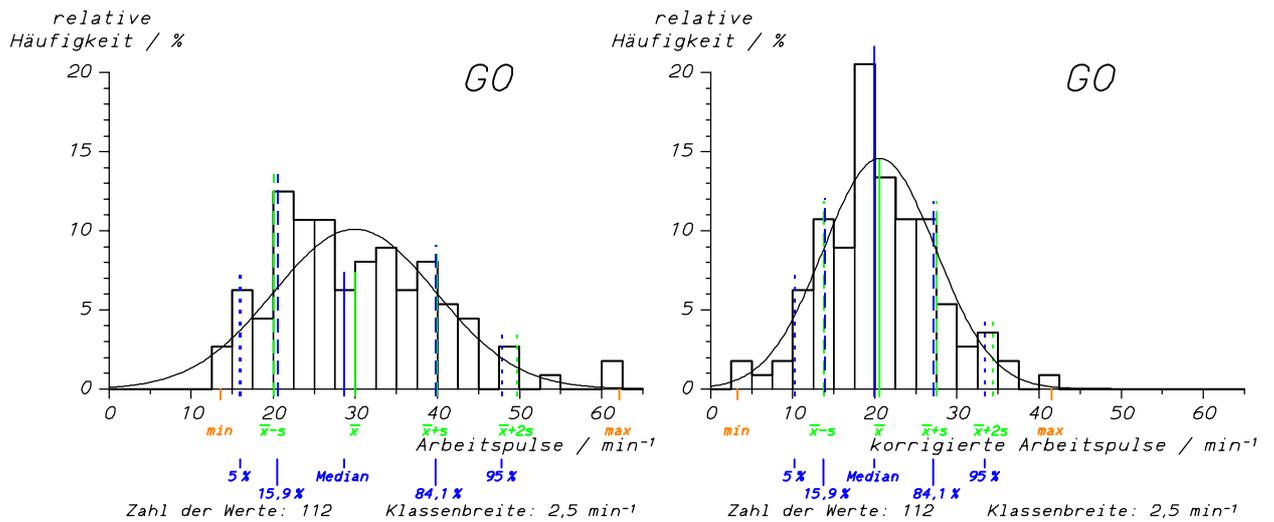


Abb. 95: Verteilung der mittleren Arbeitspulse HSF_A und der mittleren korrigierten Arbeitspulse $HSF_{A_{korr}}$ für die gesamte Schichtdauer (Seilfahrt-Seilfahrt) für alle auswertbaren Schichten.

Entsprechend Abb. 95 betragen die mittleren Arbeitspulse für die gesamte Schichtdauer G0: $HSF_A = (29,9 \pm 9,9) \text{ min}^{-1}$; die mittleren korrigierten Arbeitspulse betragen $HSF_{A_{korr}} = (20,6 \pm 6,8) \text{ min}^{-1}$. Mit der obenstehenden Gleichung ergeben sich die Werte

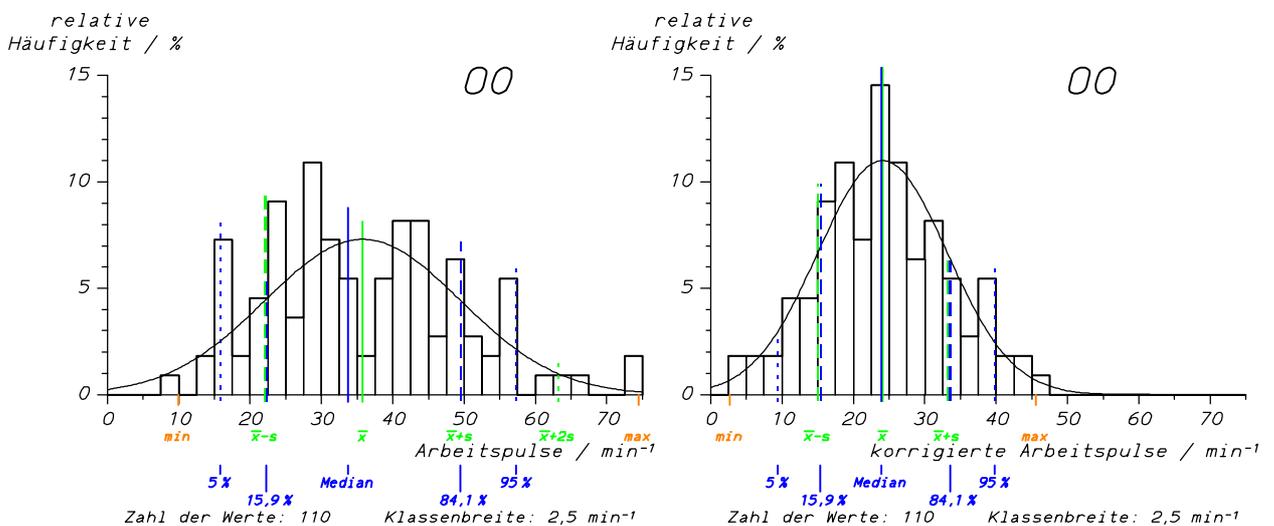


Abb. 96: Verteilung der mittleren Arbeitspulse HSF_A und der mittleren korrigierten Arbeitspulse $HSF_{A_{korr}}$ für die Zeit vor Ort für alle auswertbaren Schichten.

aus den unkorrigierten Arbeitspulsen als $AEU = (265 \pm 84) \text{ W}$; die korrigierten Arbeitspulse ergeben einen Wert von $AEU = (199 \pm 64) \text{ W}$, liegen also um 25 % niedriger.

Für die Zeit vor Ort OO ergeben sich die Arbeitspulse $HSF_A = (35,8 \pm 13,7) \text{ min}^{-1}$ und die korrigierten Arbeitspulse zu $HSF_{A_{\text{kor}}}} = (24,1 \pm 9,1) \text{ min}^{-1}$ (Abb. 96); dies führt zu unkorrigierten Werten für den Arbeitsenergieumsatz von $AEU = (305 \pm 108) \text{ W}$ bzw. $AEU = (223 \pm 77) \text{ W}$ für den korrigierten Arbeitsenergieumsatz. Für OO lagen die Werte ohne Korrektur also um 27 % zu hoch.

Da der Anteil thermischer Pulse in unserer Studie nicht von der klimatischen Belastung abhängt, sondern nur von der Höhe der Herzschlagfrequenz oder der Körpertemperatur, d.h. von der Arbeitsschwere (Kapitel 6.1.7.2), liegt die Vermutung nahe, daß ohne eine Korrektur der thermischen Pulse der Energieumsatz zu hoch abgeschätzt wird. Dies trifft auf Untersuchungen zu, bei denen zur Festlegung einer Kennlinie für die einzelnen Probanden Herzschlagfrequenz und Energieumsatz z.B. in Körperruhe und bei einer definierten dynamischen Arbeit gemessen oder abgeschätzt wurden, wie etwa im Bergbau in der Studie von HARBER ET AL. 1984 [122] und in der sehr umfangreichen Untersuchung von VAN RENSBURG 1992 [310], die nach VAN RENSBURG an kühlen Arbeitsplätzen, für die keine Akklimatisation erforderlich war, durchgeführt wurde ($t_w < 27,5 \text{ °C}$ [sic!]), so daß für die Auswertung angenommen wurde, daß die Herzschlagfrequenz nur von der Arbeitsschwere und nicht vom Umgebungsklima abhängt.

Die Messung der Körpertemperatur erhält – wenn man sich nicht auf punktuelle Korrekturen nach VOGT ET AL. [388] beschränken will – eine erhöhte Bedeutung zur Ermittlung der *thermischen Pulse*, die für die Abschätzung des Energieumsatzes in Betracht gezogen werden sollten. Da die Bedeutung der Körperkerntemperatur für die Beurteilung des thermoregulatorischen Zustands außer Frage steht, sollte sie – trotz der beträchtlichen psychologischen Schwierigkeiten bei der Messung der Rektaltemperatur – in künftigen Studien im Fall schwerer Körperarbeit oder hoher klimatischer Belastung erhoben werden.

6.1.7.4 Die Einschätzung der Arbeitsschwere aus Protokollen

Nachdem sich die Messung von Energieumsätzen für „typische Tätigkeiten“ (anders als in [176]) an den Arbeitsplätzen der Studie nicht als sinnvoll durchführbar erwiesen hatte (schwere Arbeitsbedingungen; beengte räumliche Verhältnisse etwa am Streb-Strecken-Übergang oder im Kohlenstall, Herauszögern der Messung bis zum Rückweg, etc.) wurde im Nachhinein eine Einstufung der Arbeitsschwere anhand der Arbeitsablaufprotokolle als *Experteneinstufung* durchgeführt.

Nach einem ersten Durchsichten der Schichten wurde eine Einteilung der Arbeitsschwere in vier Stufen vorgenommen:

1. leicht
2. mittelschwer
3. schwer
4. sehr schwer

Die Stufen wurden unter Berücksichtigung folgender Gesichtspunkte zugeordnet:

- Auflistung der zeitlichen Anteile der Arbeitsunterbrechungen und Tätigkeiten der beobachteten Zeit vor Ort in Minuten und Prozentanteilen,
- Durchlesen der Arbeitsablaufprotokolle,
- Vergleich der Schichten untereinander;
- die Einstufung der Arbeitsschwere erfolgte ohne Berücksichtigung der gemessenen Herzschlagfrequenz, Körpertemperatur oder der Klimawerte.

Probleme bei der Einstufung traten auf, wenn sehr schwere (oder leichte) Einzeltätigkeiten nur kurz ausgeführt wurden.

Die eingestufteten Arbeitsschweren verteilen sich ganz überwiegend auf die Stufen "2" und "3", wie Tabelle 17 ausweist. Arbeitspulse und Körpertemperatur nehmen mit zunehmender Arbeitsschwere zu ($p < 0,00005$ bzw. $p < 0,002$). In Abb. 97 sind die Daten der Arbeitspulse und der thermischen Pulse – die ebenfalls hochsignifikant mit der ein-

Tabelle 17: Klimabelastung, mittlere Arbeitspulse und Körpertemperatur für die Zeit vor Ort für die vier Stufen der Arbeitsschwere (jeweils Mittelwert \pm Standardabweichung).

eingestufte Arbeitsschwere	Anzahl der Einstufungen	BET / °C	HSF _A / min ⁻¹	t _{re} / °C
1	4	24,9 \pm 4,9	22,7 \pm 1,8	37,52 \pm 0,18
2	46	27,1 \pm 3,3	30,6 \pm 12,2	37,72 \pm 0,31
3	58	25,6 \pm 3,6	40,1 \pm 13,1	37,86 \pm 0,31
4	2	27,1 \pm 0,8	56,5 \pm 9,6	38,07 \pm 0,11

gestuften Arbeitsschwere zunehmen –, für alle Schichten dargestellt.

Für die Klimabelastung ergibt sich kein ganz klarer Zusammenhang, da das Klima ja zu den Belastungsgrößen zählt und z.B. bei geringer Klimabelastung auch Arbeiten mit geringerer Arbeitsschwere – etwa Fahr- und Steuertätigkeiten – anfallen.

Zur Frage der Selbsteinteilung der Arbeitsschwere wurden die wenigen Einstufungen der Stufen "1" und "4" ausgeschlossen: bei diesen Tätigkeiten besteht vermutlich nur

eine geringe Möglichkeit zur Einflußnahme durch die Bergleute: ein Haspelfahrer, der seine Tätigkeit überwiegend sitzend ausübt, wird im warmen Klimabereich seine Arbeitsintensität nicht willkürlich erhöhen, und bei "sehr schwerer" Arbeit liegen vermutlich meist äußere Gründe vor – z.B. die Dringlichkeit einer Reparatur – die gerade zu dieser hohen Arbeitsintensität geführt haben und somit den Bergmann also hinderten, sein Arbeitstempo zu verringern. Es soll also anhand der eingeschätzten Stufen "2" und "3" geklärt werden, ob die Arbeitsschwere zu hohen Klimabelastungen hin abnimmt.

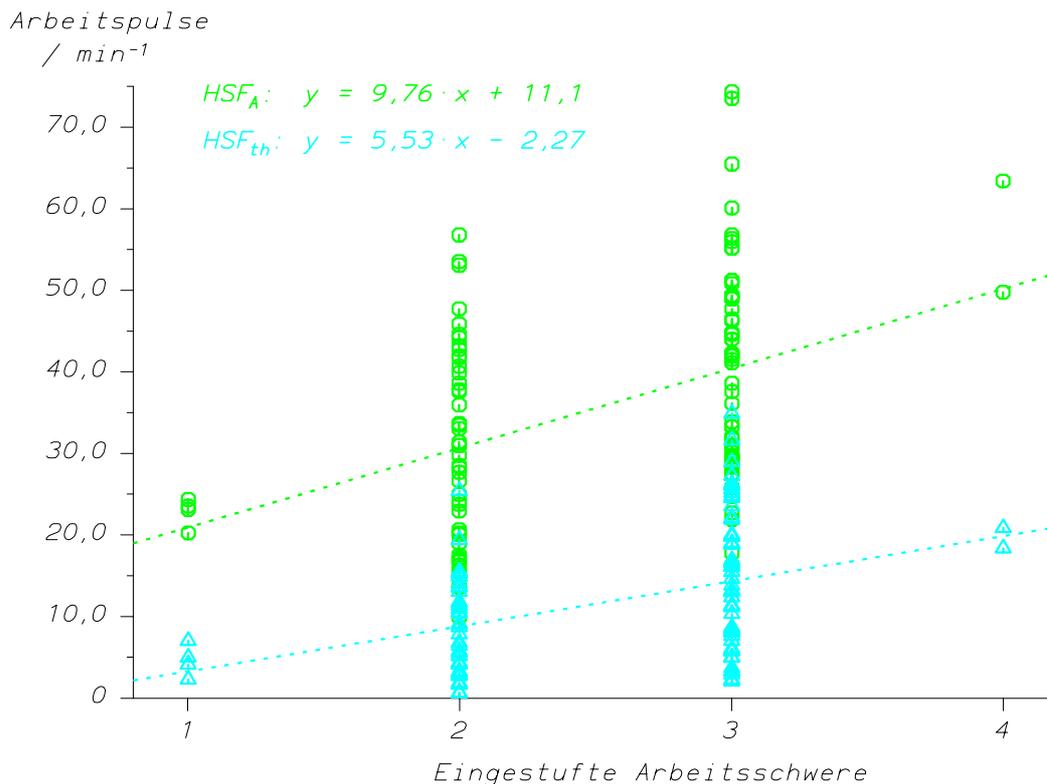


Abb. 97: Mittlere Arbeitspulse und thermische Pulse für die Zeit vor Ort als Funktion der eingestuften Arbeitsschwere ($HSF_A: r = 0,43; p < 0,00005$; $HSF_{th}: r = 0,42; p < 0,00005$).

Wenn man nur Klimabedingungen mit $BET \geq 25 \text{ °C}$ betrachtet⁵⁹, also heiße Arbeitsplätze entsprechend der Definition in [432], ergibt sich die Arbeitsschwere für die verbleibenden 79 Datenpunkte zu:

$$\text{Arbeitsschwere} = -0,059 \cdot BET + 4,15 \quad (r = 0,24 \text{ und } p < 0,05) \quad (6)$$

⁵⁹ Wie man den Herzschlagfrequenzen in Abb. 73 entnehmen kann, findet sich bei Klimabelastungen unterhalb von $BET = 21 \text{ °C}$ in unserer Untersuchung vorwiegend „schwere Arbeit“; dies liegt offenbar daran, daß für die niedrigen Klimabelastungen nicht ausreichend häufig leichtere Tätigkeiten erfaßt wurden - dies war auch nicht das Ziel der vorgestellten Untersuchung. Wenn man alle erfaßten Datenpunkte berücksichtigt, fällt daher der Zusammenhang zwischen Klimabelastung und Arbeitsschwere noch deutlicher aus: $p < 0,005$.

Dies läßt sich so deuten, daß die Bergleute – falls möglich – bei der höheren Klimabelastung ihre Arbeitsschwere reduzieren; das Ergebnis stützt die Hypothese der Selbsteinteilung der Arbeitsschwere unter klimatischer Belastung (vgl. auch Kapitel 6.3.6.2).

Analysiert man die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Herzschlagfrequenz für klimabelastete Arbeitsplätze ($BET \geq 25 \text{ °C}$) und betrachtet nur die Arbeitszeit vor Ort – weil ja gerade in diesem Abschnitt der Schicht eine Selbsteinteilung der Arbeitsschwere stattfinden wird –, so findet man für eine lineare Regression einen leichten Anstieg der mittleren Herzschlagfrequenz mit der Klimabelastung:

$$HSF / \text{min}^{-1} = 3,01 \cdot BET / \text{°C} + 25,1 \quad (r = 0,41; p < 0,0005) \quad (7)$$

Dieser mittlere Anstieg ist aber offenbar (vergleiche auch Abb. 73) weniger darauf zurückzuführen, daß die höchsten registrierten Herzschlagfrequenzen mit zunehmender Klimabelastung ansteigen, als darauf, daß bei den hohen Klimabelastungen niedrigere Herzschlagfrequenzen seltener auftreten (siehe alle eingezeichneten Meßdaten in Abb. 98).

Betrachtet man neben der Klimabelastung auch den Einfluß der Arbeitsschwere in den Stufen "2" und "3" auf die mittlere Herzschlagfrequenz, so haben beide Größen jeweils einen signifikanten Einfluß ($p < 0,005$):

$$HSF / \text{min}^{-1} = 3,71 \cdot BET / \text{°C} + 11,8 \cdot b - 0,22 \quad (R = 0,56; p < 0,00005) \quad (8)$$

wo b als Hilfsvariable den Wert "0" für die Arbeitsschwere "2" und den Wert "1" im Fall einer Arbeitsschwere "3" hat. Die Herzschlagfrequenz unterscheidet sich also für beide eingeschätzten Arbeitsschweren im Mittel um 12 min^{-1} , was für einen Mittelwert über mehrere Stunden durchaus von Bedeutung ist, insbesondere, da die Herzschlagfrequenz ja im Bereich bzw. oberhalb der Dauerleistungsgrenze liegt und teilweise die Präkollaps-grenze erreicht (vgl. Abb. 128).

Die Frage, ob die Arbeitsschwere bei zunehmender Klimabelastung einen stärkeren Einfluß auf die Herzschlagfrequenz hat, kann man untersuchen, indem man einen Wechselwirkungsterm $BET \cdot b$ in eine multilineare Regression einbringt:

$$HSF / \text{min}^{-1} = 2,57 \cdot BET / \text{°C} - 54,0 \cdot b + 2,32 \cdot BET \cdot b / \text{°C} + 32,5 \quad (9) \\ (R = 0,58; p < 0,00005)$$

In dieser Regression ergibt sich, daß bei der höheren Arbeitsschwere die Herzschlagfrequenz stärker mit der Klimabelastung ansteigt, als bei der niedrigeren Arbeitsschwere. Ganz offensichtlich sind oberhalb von etwa $BET = 27 \text{ °C}$ die Herzschlagfrequenzen für die Schichten mit der höheren Arbeitsschwere höher als für die Schichten mit niedriger Arbeitsschwere (rot markierte Datenpunkte in Abb. 98); die Ausgleichsgeraden entsprechend Gleichung (9) sind für beide Stufen der Arbeitsschwere in Abb. 98 eingezeichnet. Der Anstieg der Herzschlagfrequenz als Funktion der Klimabelastung für die

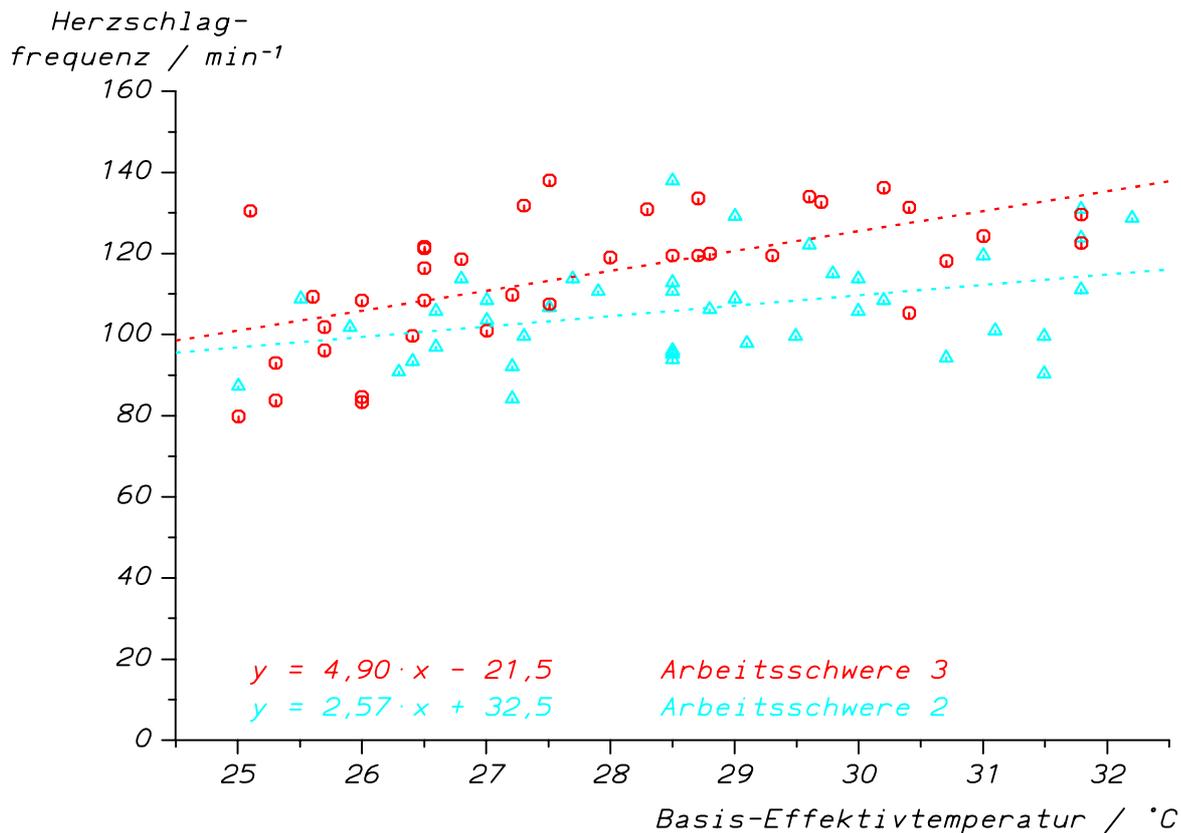


Abb. 98: Mittlere Herzschlagfrequenz während der Zeit vor Ort 00 bei klimatischen Belastungen $BET \geq 25$ °C für die Schichten, deren Arbeitsschwere mit "2" oder "3" eingestuft wurden.

jeweiligen Stufen der Arbeitsschwere weist darauf hin, daß die Klimabelastung bereits oberhalb der *prescriptive zone* liegt (vgl. beispielsweise mit KUHLEMEIER ET AL. [208]).

Da die ausgeübten Tätigkeiten in den abwetterseitigen Bereichen der untersuchten Betriebspunkte sich nicht grundsätzlich unterschieden, weisen

- die Abnahme des Anteils der schweren Arbeit zu höheren Klimabelastungen hin (Tabelle 17, Abb. 98: zunächst wird eine Verringerung der Arbeitsschwere bereits innerhalb der gleichen Einstufung einen weiteren Anstieg der Herzschlagfrequenz verringern oder auch verhindern, bis dann – bei noch weitergehender Verringerung der Arbeitsintensität – auch die Experteneinstufung von "schwer" nach "mittelschwer" wechselt)

ebenso wie die Beobachtung, daß

- die maximal beobachteten mittleren Herzschlagfrequenzen mit zunehmender Klimabelastung nicht ansteigen, deutlich auf eine Selbstregulation der Arbeitsschwere durch die Bergleute hin.

In Anbetracht der Höhe der mittleren Herzschlagfrequenzen während der Zeit vor Ort (vgl. Abb. 128) sollten die Bergleute in diesem adaptiven Verhalten bestärkt werden. Insbesondere sollte Bergleuten, die noch nicht – oder längere Zeit nicht mehr – unter schwerer Klimabelastung gearbeitet haben, Gelegenheit gegeben werden, sich am Ver-

halten der hitzeerfahrenen Bergleute zu orientieren, auf Anzeichen von Gesundheitsstörungen im Klima zu achten und ohne Leistungsdruck sowohl ihre physiologische Klimaadaptation als auch ihre Möglichkeit zur Verhaltensregulation zu entwickeln. Dies entspricht den Vorgaben der Klima-Bergverordnung [432], die in § 8 (1) für hitze-ungewohnte Bergleute bei einer klimatischen Belastung von $BET \geq 29 \text{ °C}$ außerhalb des Salzbergbaus [bzw. $t_a > 37 \text{ °C}$ im Salzbergbau] eine Einarbeitungszeit von 2 Wochen ohne Arbeiten im Leistungslohn vorsieht.

6.1.8 Empfehlungen aus der Studie zur Beanspruchung von Bergleuten an heißen Betriebspunkten im Steinkohlenbergbau

- Die Bergleute sollten informiert werden, daß in vielen Fällen bei der Hitzearbeit zu wenig getrunken wird, und daß ein Ausgleich der durch Schwitzen verlorenen Flüssigkeit für die Arbeit der Bergleute Vorteile hat.
- Die Trinkmengen zum erforderlichen Flüssigkeitsersatz lassen sich schon vor Beginn der Hitzearbeit durch ausreichendes „vorbeugendes Trinken“ („preventive drinking“) angemessen anpassen.
- Es sollte in Betracht gezogen werden, Trinkflüssigkeit vor Ort auszugeben, um den Bergleuten zum einen zu ersparen, eine zusätzliche Masse von mehreren Kilogramm Trinkflüssigkeit während der Fahrung zu transportieren, und zum anderen für unerwartete Erhöhungen der Klimabelastung (z.B. Ausfall eines Wetterkühlers) oder der Arbeitsschwere (Reparaturarbeiten) entsprechende Mengen an Trinkflüssigkeit zur Verfügung zu stellen.
- Da es den Bergleuten offenbar möglich ist, ihre Arbeitsintensität entsprechend ihrem Beanspruchungsempfinden einzuteilen, sollte diese Möglichkeit auch praktisch genutzt werden: Z.B. sollten keine Arbeiten noch kurz vor dem Aufbruch zum Schacht unter Zeitdruck erledigt werden. Neulinge an Hitzearbeitsplätzen sowie Unakklimatisierte sollten angehalten werden, sich am Verhalten (Arbeitstempo, Trinkverhalten) der erfahrenen Bergleute zu orientieren.

6.2 Studie zu Dehydratation und Rehydratation

Die in Abb. 80 erhobenen Daten legten die Frage nahe, ob bei den hohen Schweißverlusten die Flüssigkeitsbilanz bis zum nächsten Tag wieder vollständig ausgeglichen werden kann, oder ob über eine Arbeitswoche eine fortschreitende Dehydratation auftreten würde. Für alle Untersuchungen, die nur zwei Tage auseinander lagen (meist wurden die Untersuchungen dienstags und donnerstags durchgeführt) wurden dazu die Ausgangsgewichte vor der Schicht verglichen: es zeigte sich eine Tendenz zu einer Gewichtsabnahme am zweiten Untersuchungstag.

Um abzuklären, ob sich während der Woche ein Flüssigkeitsdefizit aufbauen kann, das dann am Wochenende wieder abgebaut werden müßte, wurde eine Meßserie geplant, bei der die Körpermasse von Bergleuten, die an heißen Betriebspunkten arbeiteten, vor und nach der Schicht bestimmt wurde; zusätzlich wurden die Trinkmengen (mitgenommene und getrunkene Flüssigkeitsmenge) abgefragt und ob die Bergleute zwischen den Wägungen Harn gelassen hatten. Mit der Untersuchung wurde begonnen, als zwei Betriebspunkte mit stark klimabelasteten Arbeitsplätzen auf einer Schachtanlage gleichzeitig liefen und umfaßte zwei vollständige Wochen einschließlich des vorausgehenden Freitags und des nachfolgenden Montags. Da einige Bergleute auch am Wochenende arbeiteten, wurde der Samstag – für diejenigen Bergleute, die ihre Schicht bereits am Freitag begonnen hatten – mit in die Untersuchung eingeschlossen.

Die abgefragten Angaben über Trinkmengen und Harnabgabe enthalten – dem Schätzvermögen und Kooperation der Bergleute entsprechend – eine gewisse Unschärfe; da aber wegen der sehr unterschiedlichen Seilfahrtzeiten der Bergleute während 23 Stunden am Tag die Anwesenheit von Untersuchern für die Messungen in der Kaue er-

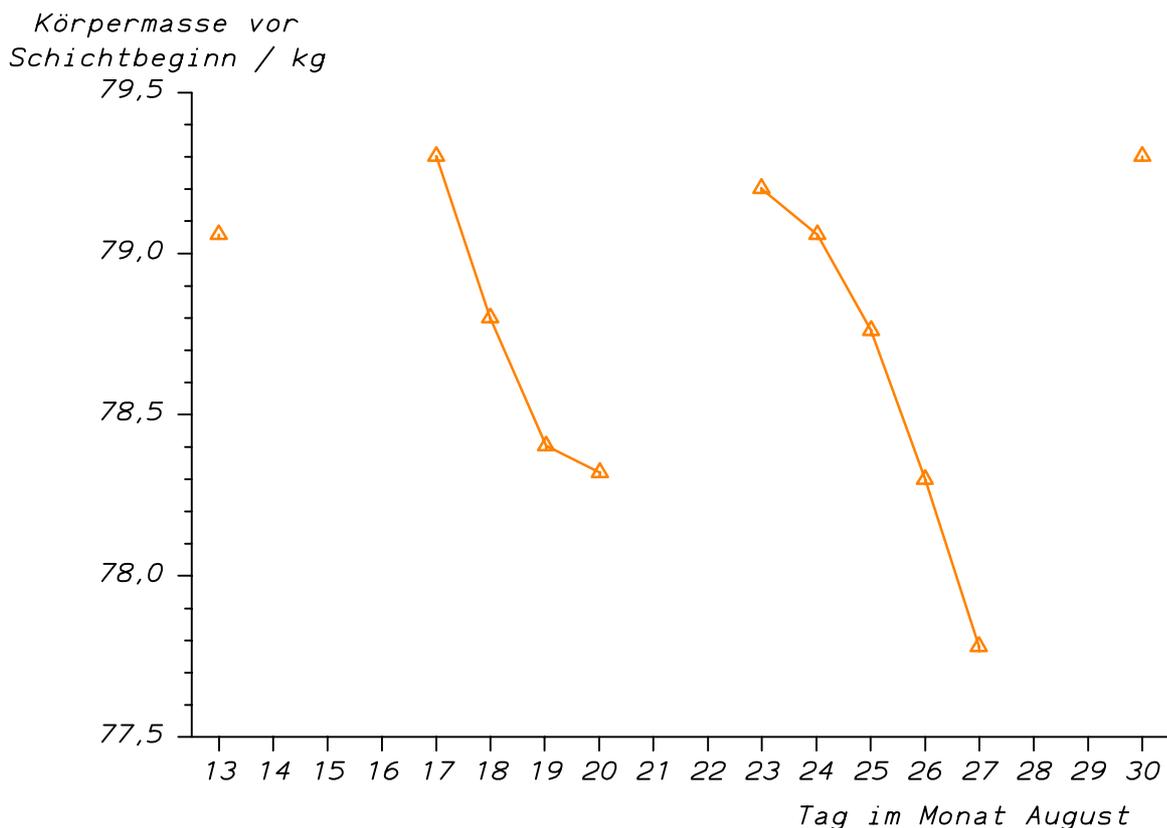


Abb. 99: Werte der Körpermasse eines Bergmanns (tätig am Streb-Streckenübergang; BET = 30 °C) vor Schichtbeginn während des Untersuchungszeitraums (die Werte an benachbarten Tagen sind verbunden).

forderlich waren, wurde bei nur drei voll für diese Studie verfügbaren Untersuchern diese Ungenauigkeit in Kauf genommen; die Erfassung einer möglichen fortschreitenden Dehydratation war die zentrale Fragestellung dieser Untersuchung. – Genaue Messungen der Flüssigkeitsbilanz liegen in [189] vor; eine Wägung der Flüssigkeitsmengen

hätte am Schacht (d.h. vor der Seilfahrt und nach der Seilfahrt vor dem Betreten der Schwarzkaue) vorgenommen werden müssen, wozu in jeder Schicht ein weiterer Untersucher erforderlich gewesen wäre. Eine entsprechende Kooperation der Bergleute (keine Abgabe von Trinkflüssigkeit an andere Bergleute, kein Wegschütten des Tees unter Tage etc.) hätte auch in diesem Fall vorausgesetzt werden müssen.

Abb. 99 zeigt offenbar eine fortschreitende Dehydratation während der Untersuchungszeit, die jeweils am Wochenende wieder ausgeglichen wird. – Ein ähnliches Muster zeigen aber nur drei von den 21 Bergleuten, die mit mehr als 10 Schichten innerhalb des Untersuchungszeitraums vertreten waren. Im Mittel ergibt sich keine Abnahme der Körpermasse während der Woche; dagegen treten in Einzelfällen neben der berichteten fortschreitenden Dehydratation während der Woche auch sehr unterschiedliche Muster bei einzelnen Bergleuten auf: von einer fast monotonen Gewichtsabnahme bis hin zu einer fast monotonen Gewichtszunahme im Untersuchungszeitraum.

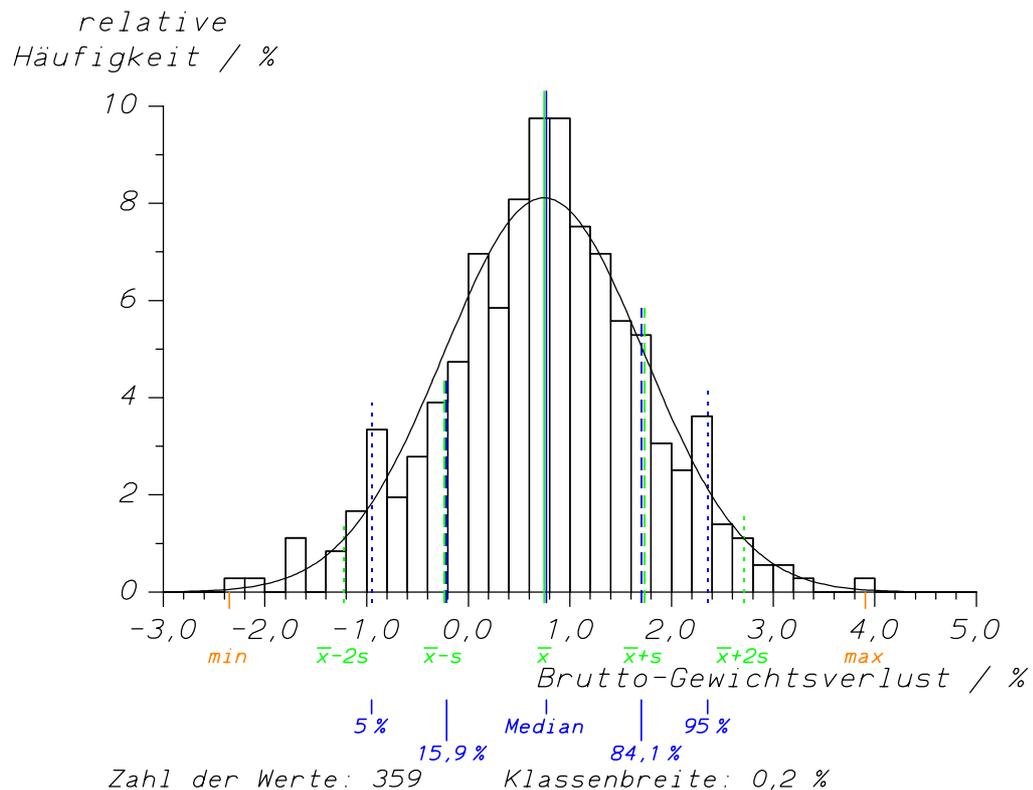


Abb. 100: Verteilung der Brutto-Gewichtsverluste zwischen den Wägungen.

Die Brutto-Gewichtsverluste zwischen den Wägungen liegen in Abb.100 mit $(0,74 \pm 0,98)$ % deutlich niedriger als in Abb. 72 mit $(1,35 \pm 0,83)$ %; möglicherweise ist die mittlere klimatische Belastung niedriger als in [189] oder die Bergleute geben nicht alle Getränke an, die sie vor dem Betreten der Weißkaue getrunken haben.

Bei den Wägungen wurde die mitgenommene Trinkmenge erfragt und nach der Ausfahrt die getrunkene Menge aus der Trinkflasche sowie zusätzlich konsumierte Getränk-

ke. Der Schweißverlust wurde dann aus dem gemessenen Bruttoverlust an Körpermasse und der erfragten Trinkmenge berechnet.

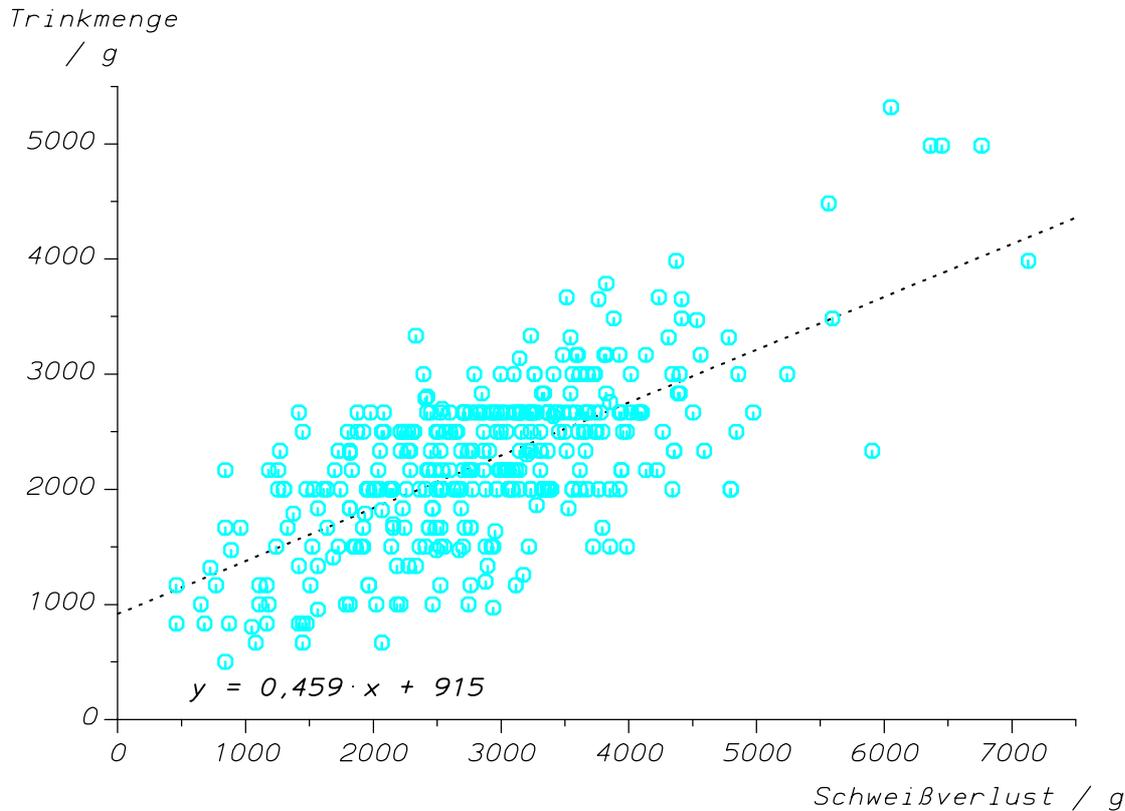


Abb. 101: Abhängigkeit der Trinkmenge vom Schweißverlust.

Abb. 101 zeigt die Abhängigkeit der Trinkmenge vom Schweißverlust – eine „Quante- lung“ in 360 g-Stufen (Getränkedosen) ist zwischen 2000 g und 3000 g Trinkmenge deutlich zu erkennen. Die Steigung entspricht gut der Steigung in [189] (Abb. 83: $y = 0,440 \cdot x + 532$), insgesamt ist die Ausgleichsgerade um 383 g im Achsenabschnitt ver- schoben. Dies führt in Abb. 102 zu einer höheren Rehydratation: der Mittelwert liegt bei $(0,84 \pm 0,31)$ und für Schweißverluste oberhalb von 2000 g bei $(0,75 \pm 0,19)$, d.h. deutlich höher als in Abb. 84 – dies ist wohl durch Nachtrinken vor dem Betreten der Weißkaue bedingt: diese Vermutung liegt nahe, weil einige Bergleute erst geraume Zeit nach der Seilfahrt in die Kaue kommen. Vermutlich ist so die Euhydratation für niedrige Schweißverluste zu erklären, die weitaus höher liegt und öfter auftritt als in Abb. 84. Obwohl nicht geklärt werden kann, inwieweit die Höhe der aktuellen Klimabelastung der hier vorgestellten Untersuchung mit der Belastung in [189] vergleichbar ist, ist hier die Dehydratation, mit der der Heimweg angetreten wird, deutlich verringert.

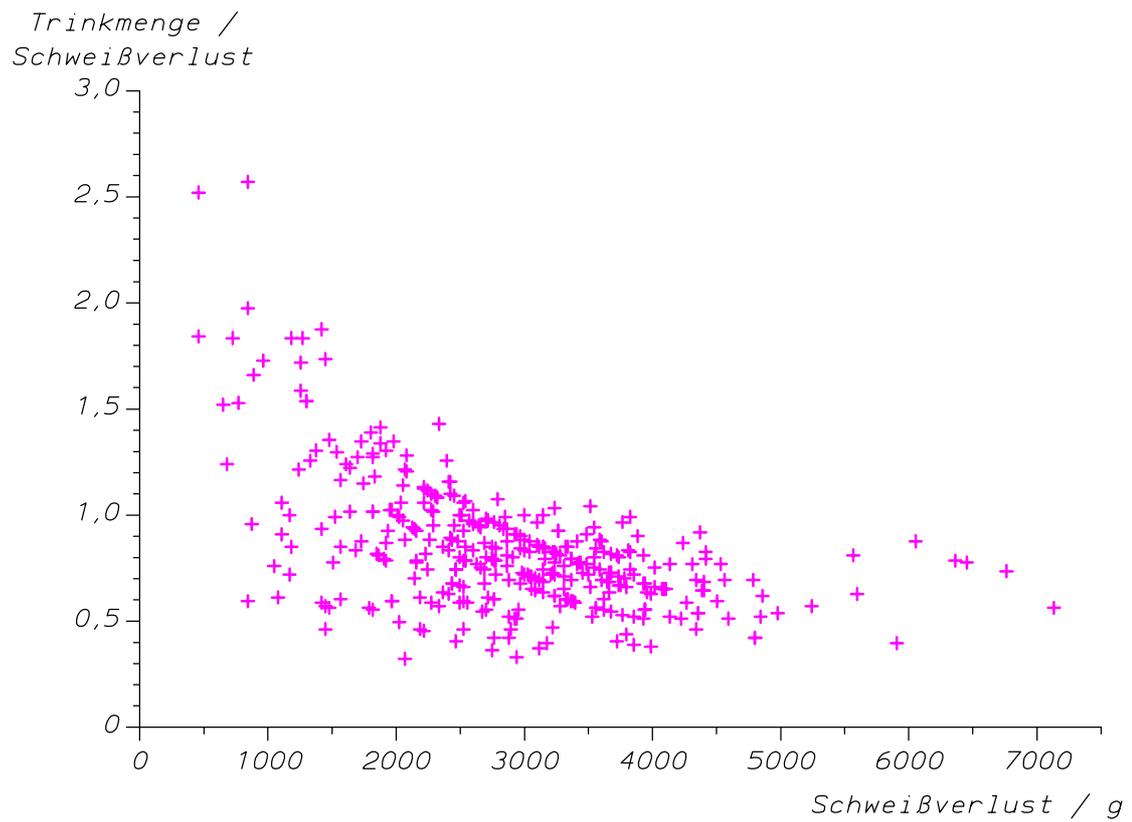


Abb. 102: Verhältnis von Trinkmenge (erfragte Daten) zu Schweißverlust in Abhängigkeit vom Schweißverlust.

6.3 Weitere Einflußgrößen der Belastung am Arbeitsplatz unter Tage

In diesem Abschnitt werden Einzelbeobachtungen und Fallstudien angeführt, die eher hinweisende Erkenntnisse oder ergänzende Betrachtungen der bergmännischen Arbeit liefern als ausgearbeitete systematische Darstellungen, die aber trotzdem von Interesse für das Verständnis der Thermoregulation und der Arbeitssituation im Bergbau sind.

6.3.1 Akklimatisation

Ein Bergmann wurde an drei Tagen untersucht, nachdem eine längere Unterbrechung der Arbeit vorgelegen hatte: es ergab sich, daß er zehn Arbeitstage hintereinander – ohne Ruhetag – arbeitete, und am ersten, achten und zehnten Tag an der Untersuchung teilnahm.

An allen Tagen waren etwas unterschiedliche Seilfahrtszeiten, die im Diagramm markiert sind. (Der Bergmann hatte am ersten Tag die Rektaltemperatur-Sonde verloren und – nachdem er dies bemerkt hatte – wieder eingesetzt.) Die Klimadaten der einzelnen Schichten wurden – für die Zeit vor Ort – zeitlich über die unterschiedlichen Aufenthaltsorte des Bergmanns gemittelt:

- 1. Tag: $t_a = 29,8$; $RH = 64\%$; $BET = 24,0\text{ °C}$
- 8. Tag: $t_a = 29,0$; $RH = 64\%$; $BET = 21,8\text{ °C}$ und
- 10. Tag: $t_a = 31,3$; $RH = 88\%$; $BET = 27,2\text{ °C}$.

Für entsprechend kürzere Anteile der Schicht war der Bergmann wegen seines Aufenthalts in unterschiedlichen Bereichen auch deutlich höheren Klimabelastungen ausgesetzt – Expositionszeiten bei Akklimatisierungsversuchen im Klima dauern oft deutlich weniger als eine Stunde (vgl. [294] oder auch Kapitel 4.3).

Eine Absenkung der Rektaltemperatur um etwa $0,3\text{ °C}$ und auch der Herzschlagfrequenz um etwa $15\text{ bis }20\text{ min}^{-1}$ ist deutlich zu Schichtbeginn während der Fahrt im Personenzug zu sehen, wo sich etwa unterschiedliche Arbeit an dem betreffenden Tag noch nicht ausgewirkt haben kann. Eine Absenkung der Körpertemperatur als Folge der Akklimatisation wird von mehreren Autoren beobachtet (AOYAGI ET AL. [11] und [12]: $0,2\text{ °C}$, SHIDO ET AL. [352]: $0,19\text{...}0,24\text{ °C}$; ARMSTRONG & KENNEY [14]: $\approx 0,3\text{ °C}$; GARDEN ET AL. [98]: $\approx 0,3\text{ °C}$; HÖFLER ET AL. [144]: $0,9\text{ °C}$).

Diese Temperaturdifferenz von etwa $t_{re} = 0,3\text{ °C}$ steht dem Bergmann nach seiner Akklimatisation als Reserve bis zum Erreichen von Grenzwerten der Körpertemperatur zusätzlich zur Verfügung.

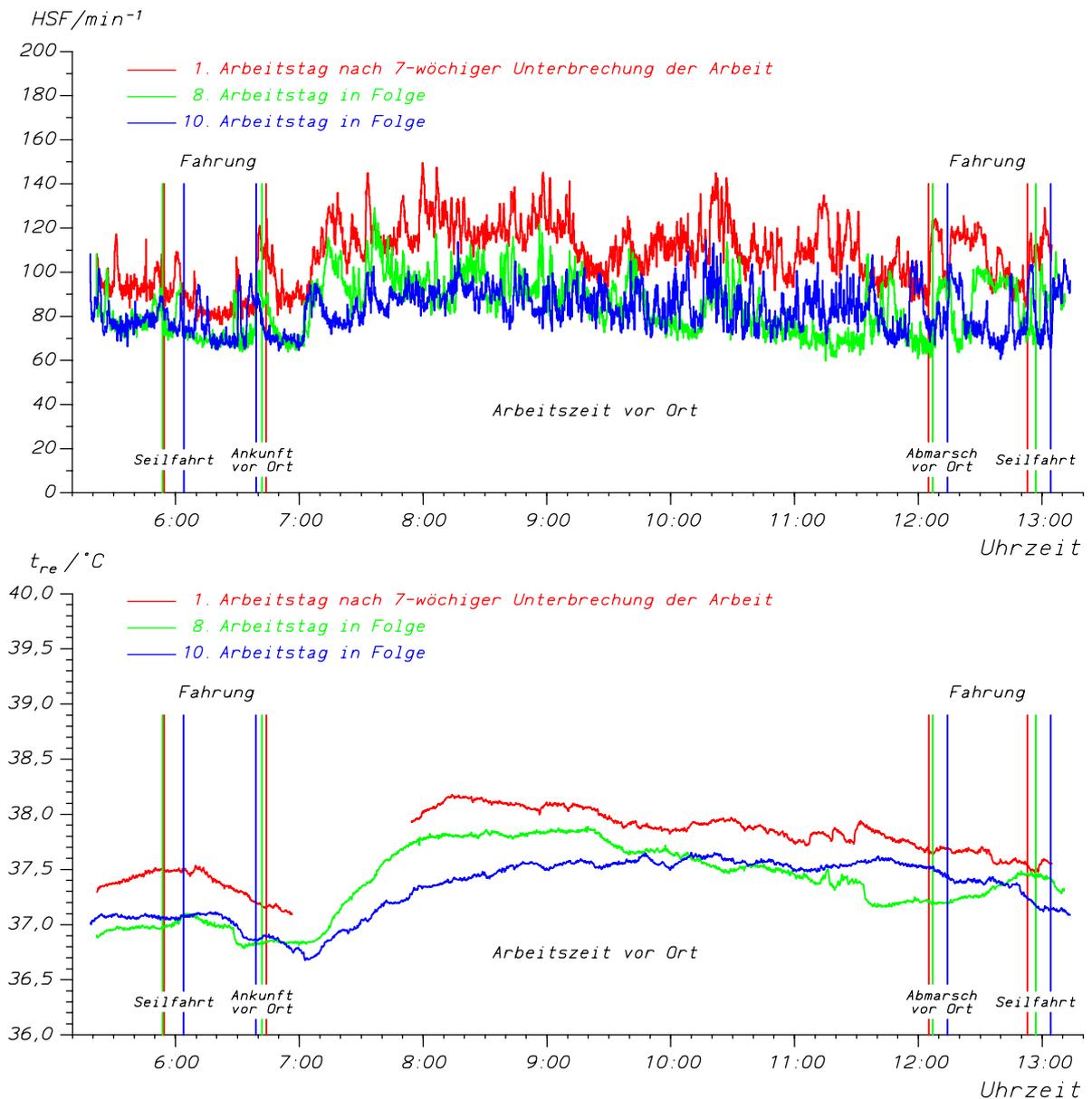


Abb. 103: Eingewöhnung eines Bergmanns an die Arbeit im Klima nach 7-wöchiger Unterbrechung der Arbeit: Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur.

6.3.2 Circadianrhythmik

In den meisten Laboruntersuchungen werden Versuche zur jeweils gleichen Tageszeit durchgeführt, um Einflüsse des Tagesganges der physiologischen Funktionen auszuschließen, die andernfalls zu einer „Uneinheitlichkeit“ der Ergebnisse führen können. Es zeigen nicht nur die Körpertemperatur (z.B. SCALES ET AL. [327], REILLY ET AL. [307] oder STEPHENSON ET AL. [360]), sondern auch Schwellwerte für Vasodilatation und Schweißrate (STEPHENSON ET AL. [360]), die selbstgewählte Arbeitsleistung auf einem Fahrradergometer und die Greifkraft (REILLY ET AL. [307]) einen deutlichen Tagesgang.

TEJMAR & NEUFANG [372] beobachteten 1976 bei Grubenwehrrübungen, daß die Herzschlagfrequenz – in einer fünfminütigen Pause nach 50 Zügen am Schlaghammer – einen deutlichen Tagesgang besitzt: zwischen 9:00 und 10:00 Uhr war der Anstieg der Herzschlagfrequenz signifikant geringer als in den Mittagsstunden.

Da die Schichten der Bergleute zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten begannen, lag es nahe, in den Datensätzen nachzusehen, ob der Tagesgang der Körperfunktionen – trotz der überlagerten Belastungen Klima und physische Arbeit – eine Auswirkung auf die Beanspruchung hat.

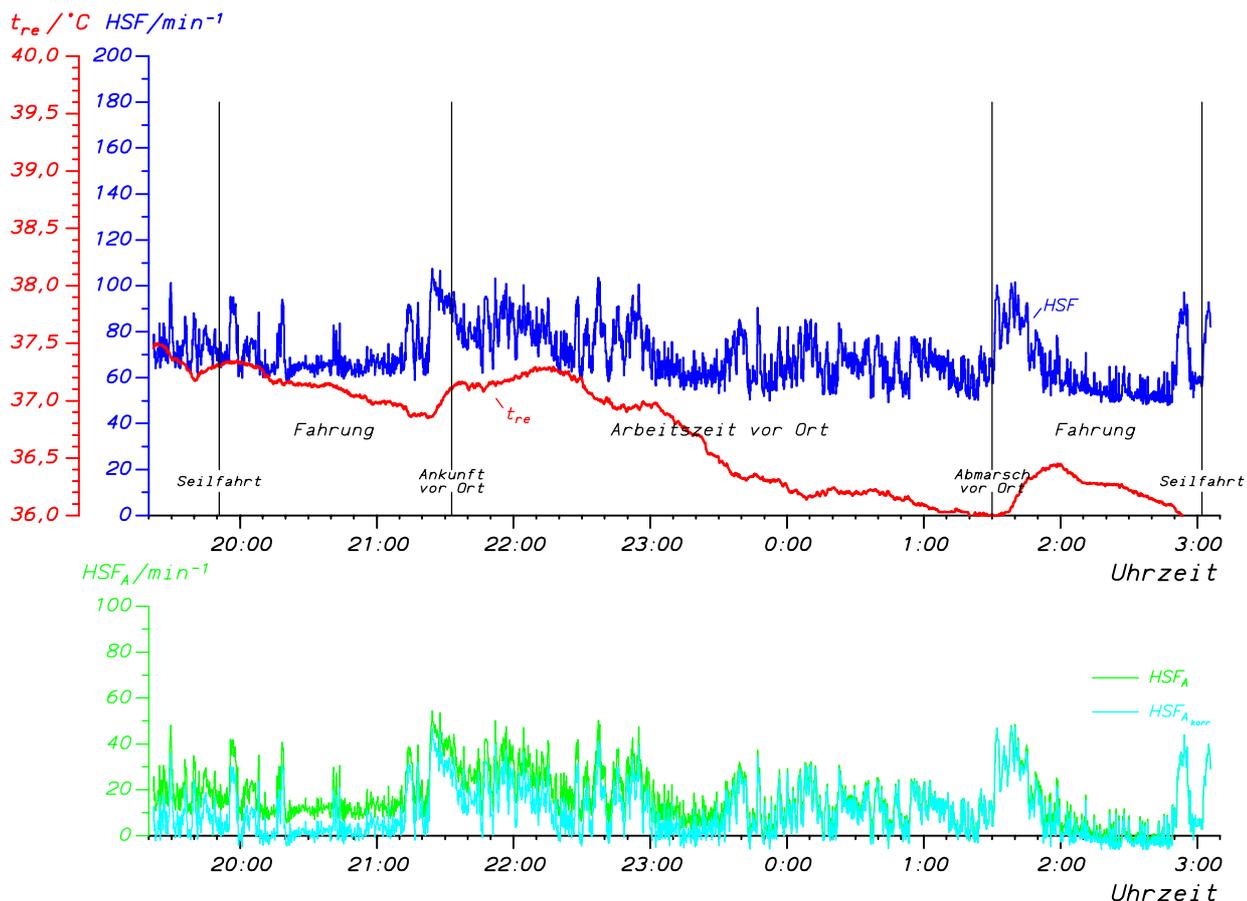


Abb. 104: Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur eines Bergmanns mit ausgeprägtem Tagesgang während einer Nachtschicht (4. Nachtschicht in Folge).

Als Beispiel sind in Abb. 104 für einen Bergmann Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur während der Nachtschicht: bei leichter Klimabelastung ($t_a = 28,8 \text{ °C}$) und leichter Körperarbeit (Bohrarbeiten im Streb) angegeben, so daß sich der Tagesgang gut ausbilden kann; dieser Bergmann besitzt eine stark ausgeprägte Abhängigkeit der Körpertemperatur von der Tageszeit⁶⁰. Der Bergmann legte seine täglichen Aktivitäten vor

⁶⁰ Von diesem Bergmann wurden zwei Nachtschichten mit ähnlichem Verlauf aufgezeichnet; die Meßausrüstung wurde aufgrund dieser Schichten nachkalibriert: es lag kein Fehler der Meßausrüstung vor. Da die Körpertemperatur zum Zeitpunkt der Ausfahrt unterhalb des Meßbereichs der Meßausrüstung lag, wurde diese Schicht nicht in Abb. 105 aufgenommen.

die Schicht, so daß er seine Circadianrhythmik nicht umstellte. – Abb. 118 zeigt bei Gleisbauarbeiten während der Nachtschicht ebenfalls einen leichten Abfall der Körpertemperatur bei sehr schwerer Körperarbeit.

Man könnte zunächst annehmen, daß die „thermische Korrektur“ der Arbeitspulse in Abb. 104 nur ansatzweise richtig sein kann, da die Bezugslinie sich während der Schicht deutlich verändert. Tatsächlich ist aber z.B. im vorderen Teil dieser Schicht – während der Fahrung – die Korrektur der Arbeitspulse recht gut.

In Abb. 105 oben ist für alle untersuchten Schichten die Rektaltemperatur zum Zeitpunkt der Seilfahrt eingetragen. Da viele Bergleute nur ein oder zwei Datenpunkte zu diesem Diagramm beigesteuert haben (108 auswertbare Schichten von 38 Bergleuten sind in dieser Auswertung enthalten), ist die Streuung der Punkte sehr hoch (die Standardabweichung beträgt für das obere Teildiagramm $0,30\text{ °C}$) – trotzdem ist ein Anstieg zu sehen, der hochsignifikant ist ($r = 0,45$; $p < 0,00005$). Eine Sinuskurve, die durch die Datenpunkte gelegt wird, zeigt ein Maximum bei 18:30 Uhr; die mittlere Kurve besitzt eine Amplitude von $0,25\text{ °C}$. –

In Laborexperimenten unter Ruhebedingungen (z.B. SCALES ET AL. 1988 [327]) beträgt die Amplitude bis $0,5\text{ °C}$, das Maximum liegt vergleichbar (bei SCALES ET AL.: $17:22 \pm 0:28$ Uhr). Hierzu ist anzumerken, daß bei der hier vorgestellten Untersuchung außerhalb der Meßzeit keine kontrollierten Bedingungen vorgeschrieben werden konnten oder sollten, so daß z.B. vor Beginn der späten Schichten Tagesaktivitäten wie Arbeit im häuslichen Bereich, Einkaufen oder Sport liegen konnten, wodurch die Synchronisation mit der verschobenen Arbeitszeit verhindert sein und somit die Amplitude des Tagesganges verringert sowie die Phasenlage verändert sein können.

Die Herzschlagfrequenz – sowohl die Bezugshäufigkeit HSF_0 als auch beispielsweise das 95. Perzentil – zeigt keinen signifikanten Zusammenhang mit dem Schichtbeginn.

Wenn die Temperaturdifferenz zwischen Ausfahrt und Anfahrt betrachtet wird, ergibt sich eine mittlere Absenkung der Körpertemperatur um $-0,050\text{ °C}$; in linearer Näherung besteht ein hochsignifikanter Abfall dieser Differenz mit dem Schichtbeginn ($r = 0,45$; $p < 0,00005$), obwohl keine hohe Varianzaufklärung stattfindet.

Vergleicht man die Körpertemperaturen zwischen der Ankunft am Arbeitsplatz unter Tage und dem Abmarsch vom Arbeitsplatz, so erhält man einen Anstieg um $0,33\text{ °C}$; der lineare Zusammenhang dieser Temperaturdifferenz mit dem Schichtbeginn zeigt eine deutlich schwächere Varianzaufklärung ($r = 0,27$; $p < 0,005$). Der Rückweg – mit der meist länger andauernden Fahrt im Personenzug – trägt offenbar dazu bei, die Körpertemperatur wieder auf einen niedrigen Wert zurückkehren zu lassen: diese Situation erfüllt die Forderung, die Erholungszeiten nach körperlicher Arbeit oder Hitzearbeit nicht zu einem unangemessen hohen Anteil in die Freizeit zu verlagern.

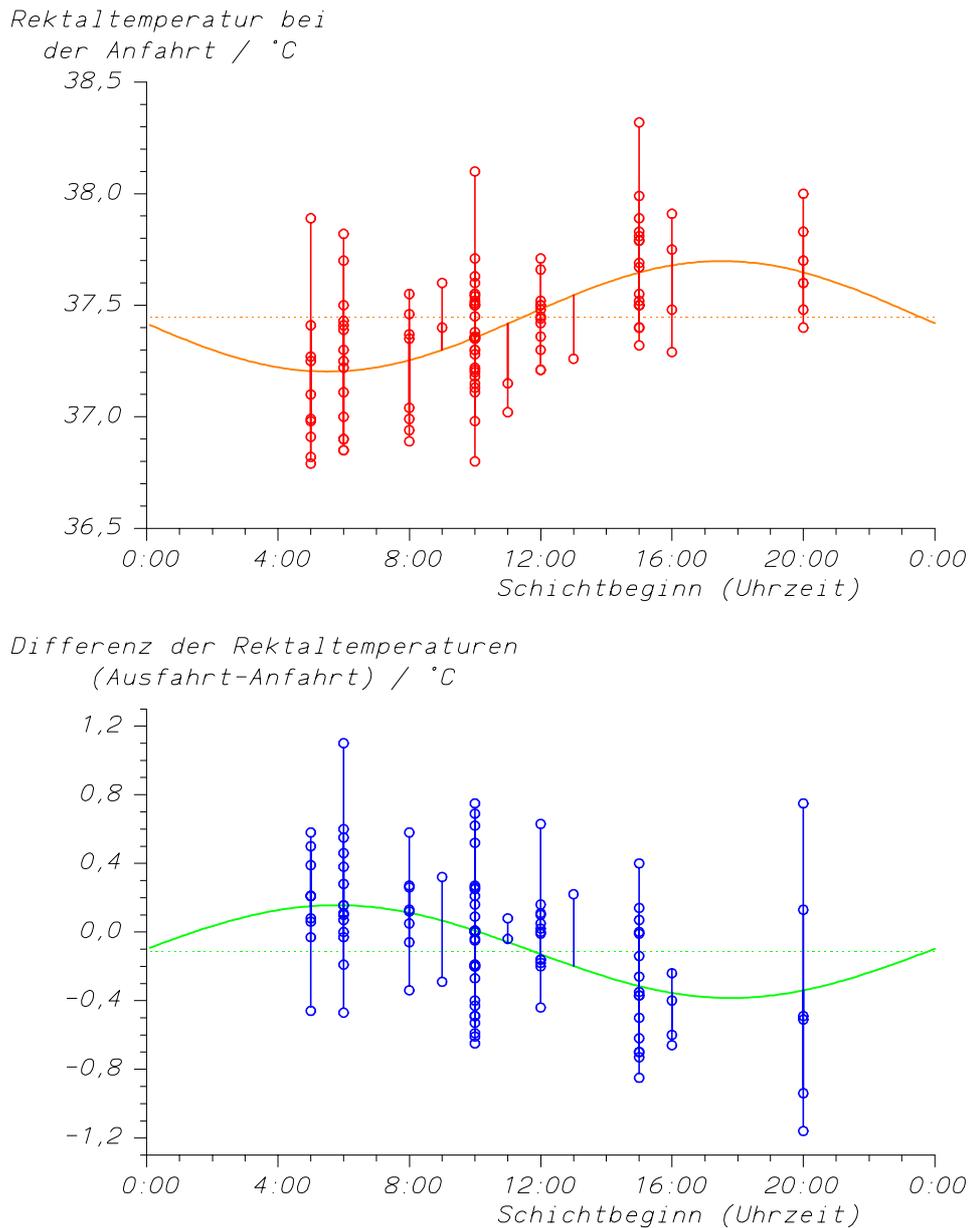


Abb. 105: Tagesgang der Ausgangs-Rektaltemperaturen zum Zeitpunkt der Seilfahrt mit eingezeichneter Sinus-Ausgleichsfunktion, sowie die Differenz der Rektaltemperaturen bei Ausfahrt und Anfahrt: auch hier ist ein deutlicher Tagesgang zu sehen.

Für die Differenz der Körpertemperaturen im unteren Teil der Abb. 105 würde sich aus der Ausgleichsfunktion im oberen Teil von Abb. 105 (d.h. unter der Annahme eines durch Klima und Körperarbeit ungestörten Tagesgangs der Körpertemperatur) eine Sinusfunktion mit einem Maximum bei 8:01 Uhr mit einer Amplitude von 0,38 °C ergeben. Durch den Fit einer Sinusfunktion für die beobachteten Differenzen der Körpertemperatur ergibt sich eine Ausgleichskurve mit einem Maximum bei 5:47 Uhr und einer Amplitude von 0,27 °C (unterer Teil von Abb. 105): während die Phasenlage dieser Abschätzung bei der gegebenen Datenverteilung (hohe Streuung der Einzeldaten; kein Schichtbeginn zwischen 20:00 Uhr und 5:00 Uhr, so daß die Phasenlage in diesem Zeitraum nicht durch Daten gestützt wird) einigermaßen mit der Berechnung übereinstimmt, ist die Amplitude offenbar durch andere Einflüsse abgeschwächt.

WATERHOUSE ET AL. erhielten 1999 [395] bei Untersuchungen zur Desynchronisation von Helligkeit (24 Stunden) und Schlaf-Wach-Rhythmus (27 Stunden) für 9 Probanden eine Amplitude der Körpertemperatur von 0,22 °C, die den obigen Ergebnissen entspricht. REILLY & GARRETT fanden 1998 [308] in Laborversuchen mit sieben Probanden einen Tagesgang der Rektaltemperatur mit einer Amplitude von 0,5 °C und einem Maximum um 16:40 Uhr. Im Mittel hatten die Probanden um 17:30 Uhr eine um 0,6 °C höhere Rektaltemperatur als morgens um 8:30 Uhr. Diese Erhöhung der Körpertemperatur blieb auch während einer Arbeitsphase auf einem Fahrradergometer in komfortablem Klima erhalten; die Zeitdauer bis zur subjektiven Erschöpfung der Probanden änderte sich jedoch nicht signifikant.

Als Schlußfolgerung bleibt, daß die Bergleute bei der meist wöchentlich rückwärts rotierenden Schichtarbeit ihre Circadianrhythmik dem Arbeitsrhythmus kaum anpassen, und daß diese Tagesrhythmik der Beanspruchung der Beanspruchung während der Schicht überlagert ist (Abb. 105). Inwieweit es für eine mögliche Gefährdung durch hohe Körpertemperaturen günstig ist, die Arbeit im Klima mit niedriger Körpertemperatur zu beginnen, ist unklar: die Frage, ob die Grenzen der Wärmespeicherung im Körper, d.h. die Grenzwerte der Körpertemperatur unter Arbeitsbelastung – ebenfalls einen Tagesgang haben, kann aus der vorliegenden wissenschaftlichen Literatur nicht geklärt werden. Da die Arbeit während der Nachtschicht im Bergwerk zum einen oft mehr auf Wartungstätigkeiten als auf Produktion ausgerichtet ist und zum anderen die Belegung der Betriebspunkte mit Bergleuten meist niedriger ist, sind auch die Anforderungen während der Nachtschichten anders ausgeprägt als tagsüber.

6.3.3 Mentale Belastung bei Fahr- und Steuertätigkeiten

Während einer Untersuchungsschicht ergab sich die Möglichkeit, bei einem Bergmann die Beanspruchung beim Fahren eines Seitenkippladers – Fahr und Steuertätigkeiten – zu untersuchen und mit der Beanspruchung in Kapitel 0 zu vergleichen. Die Bedingungen für einen Vergleich waren günstig, da der Bergmann den Seitenkipplader während etwa 1 ½ Stunden bediente und auch während der Arbeitsunterbrechungen auf dem Lader sitzen blieb, so daß Einzelverrichtungen wie Auf- und Absteigen, Beiseiteräumen von Material oder andere Nebentätigkeiten nicht auftragen. In Abb. 106 ist der Verlauf von Herzschlagfrequenz und Rektaltemperatur während der gesamten Schicht dargestellt; im unteren Teil der Abbildung ist der Zeitabschnitt, in dem der Lader gefahren wird, gespreizt dargestellt.

Die leichte Abnahme der Herzschlagfrequenz mit der Körpertemperatur während des Gang HSF mit TR während der Fahr- und Steuertätigkeit ist deutlich zu sehen (oberes Teildiagramm 12:20 - 13:20 Uhr). Die Unterbrechungen der Steuertätigkeit bei 12:30, 12.45 und 13:03 Uhr sind deutlich zu erkennen. Sie sind vielleicht nach dem Vogt'schen

Kriterium (vgl. Kapitel 6.1.7) nicht ausreichend lang genug – allerdings liegt auch keine dynamische Muskelarbeit großer Muskelgruppen vor, die über den Ausgleich der Maschinenbewegungen beim Fahren hinausgeht; Die Absenkung der Herzschlagfrequenz während der Arbeitsunterbrechungen weist aber auf Beanspruchungsanstiege während der Fahr- und Steuertätigkeit von 15 bis 20 min^{-1} hin. Dies ist höher als die mittlere Erhöhung der Herzschlagfrequenz bei den Laboruntersuchungen der Sehschärfe in Kapitel 0, wobei allerdings zu bedenken ist, daß während der Fahr- und Steuertätigkeit auch die Maschinenbewegungen auf dem unebenen Boden für den Oberkörper ausgeglichen werden.

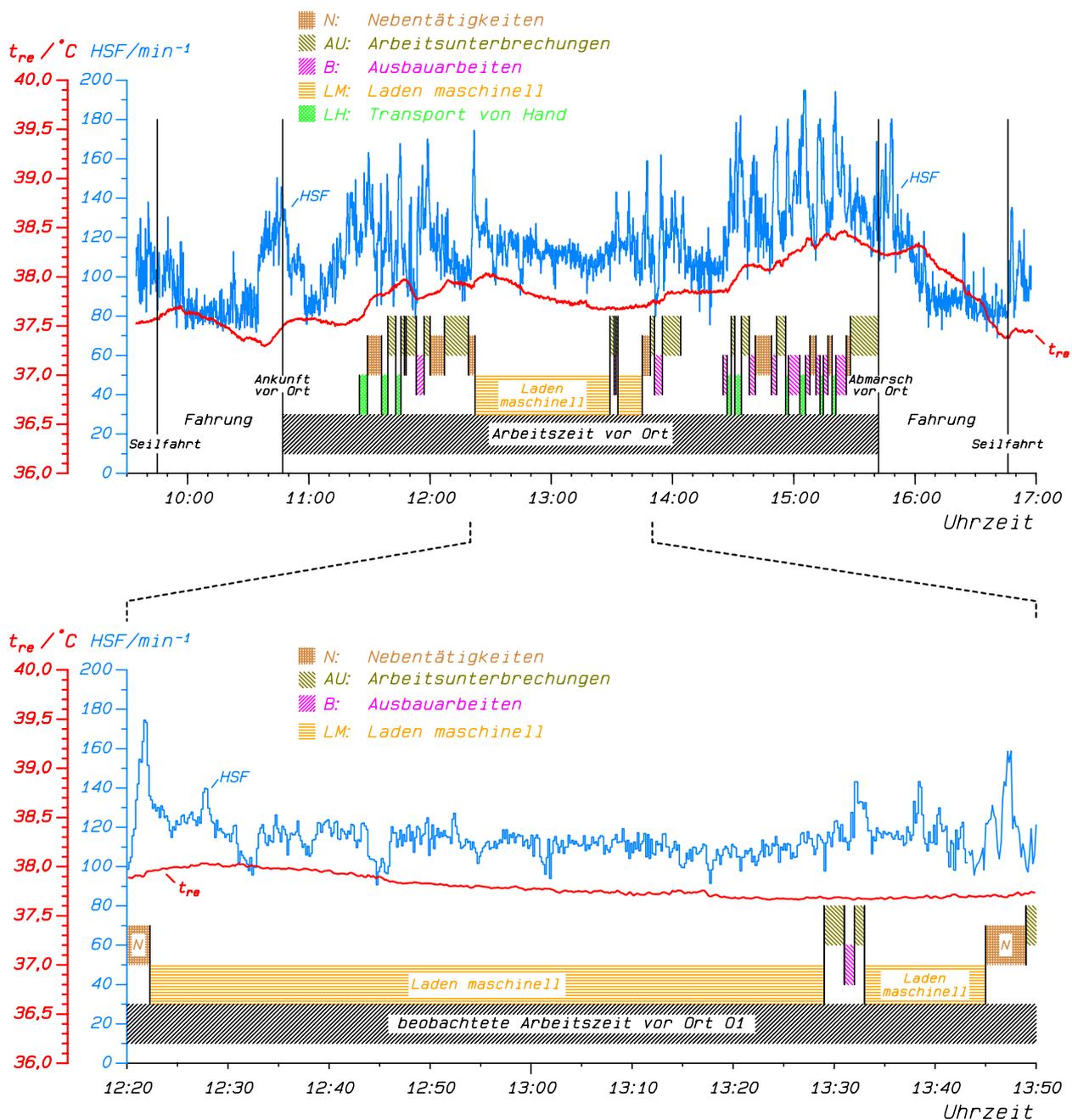


Abb. 106: Einfluß von Fahr- und Steuertätigkeit auf die Herzschlagfrequenz.

6.3.4 Körperhaltungen in Arbeitsräumen unterschiedlicher Fahrhöhe

In einer Studie zur Beanspruchung von Bergleuten beim Herrichten und Ausrauben von Schildstreben (KAMPMANN ET AL. [177]) wurden Körperstellungen und -haltungen der untersuchten Bergleute ermittelt. Abb. 107 sind die Ergebnisse aller Einschätzungen innerhalb der gesamten Untersuchung – für 21 Bergleute in 144 Schichten – dargestellt. Erstaunlich ist der hohe Anteil des Knien mit etwa $\frac{1}{4}$ aller Einschätzungen.

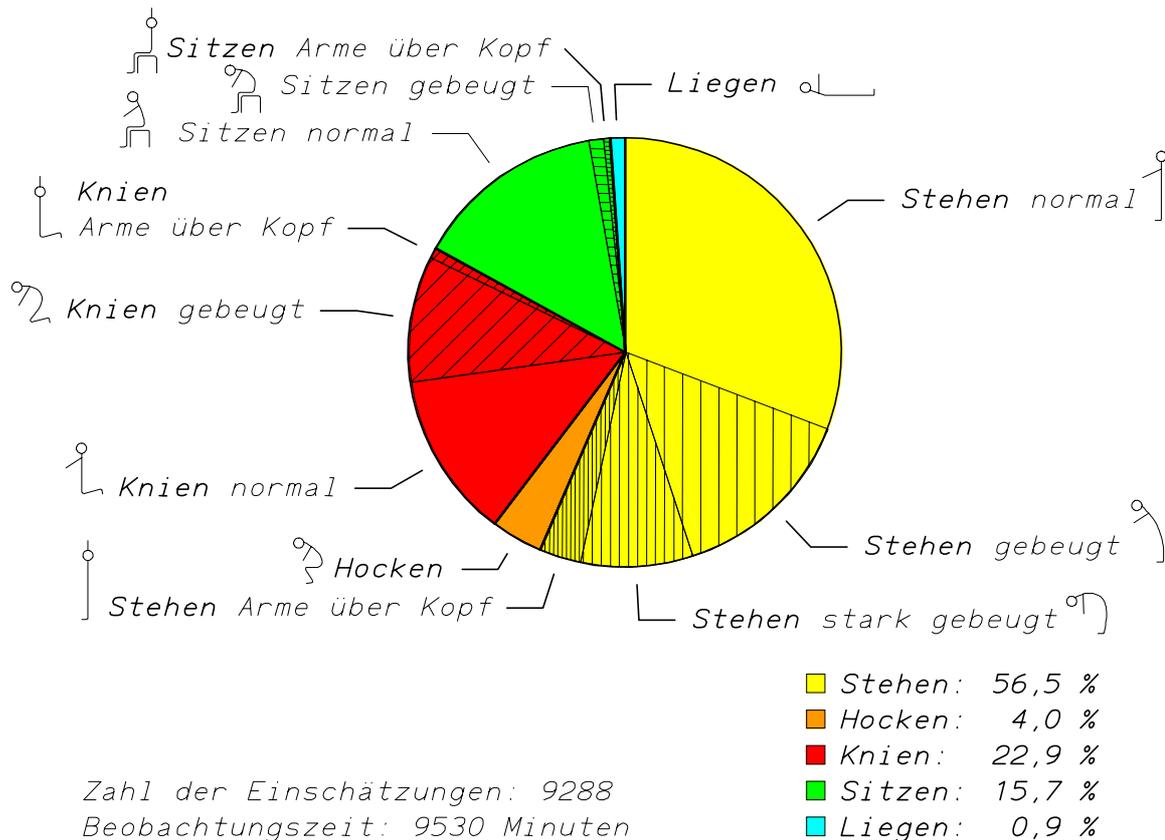


Abb. 107: Körperstellungen beim Herrichten und Ausrauben von Schildstreben.

Wenn die Fahrhöhe (die Höhe, die zur Fortbewegung oder zum Aufenthalt zur Verfügung steht) in den Streben niedriger ist als die Körpergröße der Bergleute, müssen die Bergleute Zwangshaltungen einnehmen. Aus unserer Untersuchung läßt sich aufzeigen, wie sich die Körperstellungen mit abnehmender Fahrhöhe in den Streben verändern, d.h., in welche Körperhaltung die Bergleute ausweichen, wenn sie nicht mehr stehen können – dies kann als ein Beispiel für den Zusammenhang zwischen Belastungsgröße und Beanspruchungsgrößen angesehen werden. Hierzu wurden die Zeitanteile der Einschätzungen der Körperhaltungen für die verschiedenen Betriebspunkte getrennt ausgewertet; pro Betriebspunkt wurden jeweils mehr als 400 Einschätzungen durchgeführt (Abb. 108). Mit abnehmender Fahrhöhe nimmt der Anteil des Stehens von über 90 % auf unter 30 % ab; entsprechend steigen die Anteile der anderen Körperstel-

lungen an: der Anteil des Kniens steigt bis auf 50 % der eingeschätzten Zeit, un zwischen 5 % und 10 % der eingeschätzten Zeit arbeiten die Bergleute im Hocken. An dem Betriebspunkt in der Herrichtung mit 1,15 m Fahrhöhe wurde eine neuentwickelte Dreh- und Schwenkvorrichtung eingesetzt (RAUSS 1982 [306]), die es dem Bergmann, die diese Maschine steuerte, erlaubte, sich vorwiegend im Bereich der Steuereinheit der Maschine aufzuhalten, so daß die mühsame Fortbewegung im Streb – die nach dem benutzten Klassierungsscheme als "Stehen, stark gebeugt" eingeschätzt wird, weitgehend vermieden werden konnte.

Zeitanteil / %

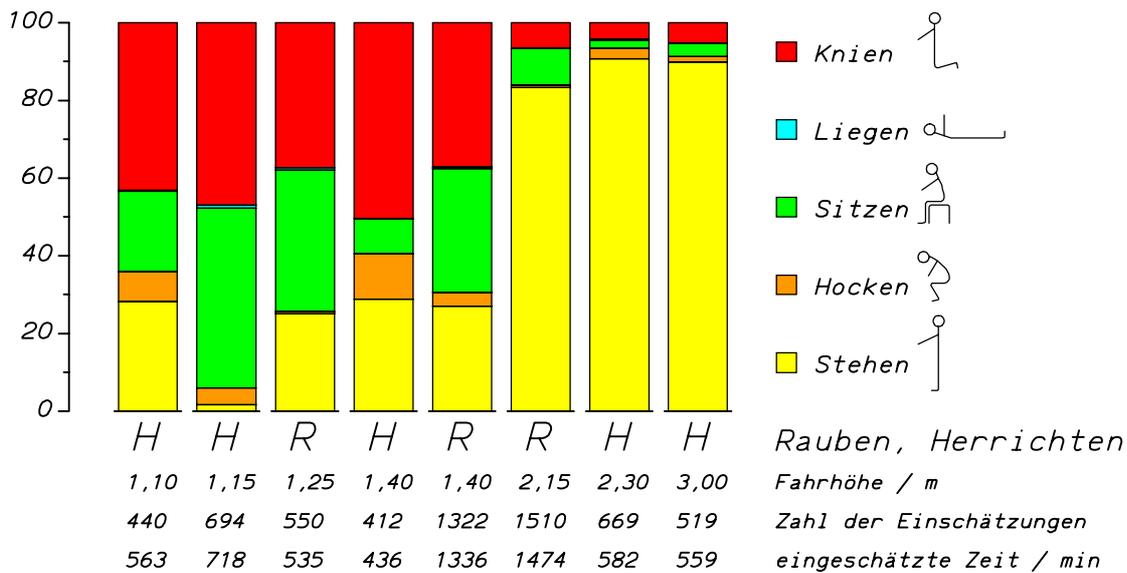


Abb. 108: Körperstellungen beim Herrichten und Ausrauben von Schildstreben unterschiedlicher Fahrhöhe.

Zeitanteil / %

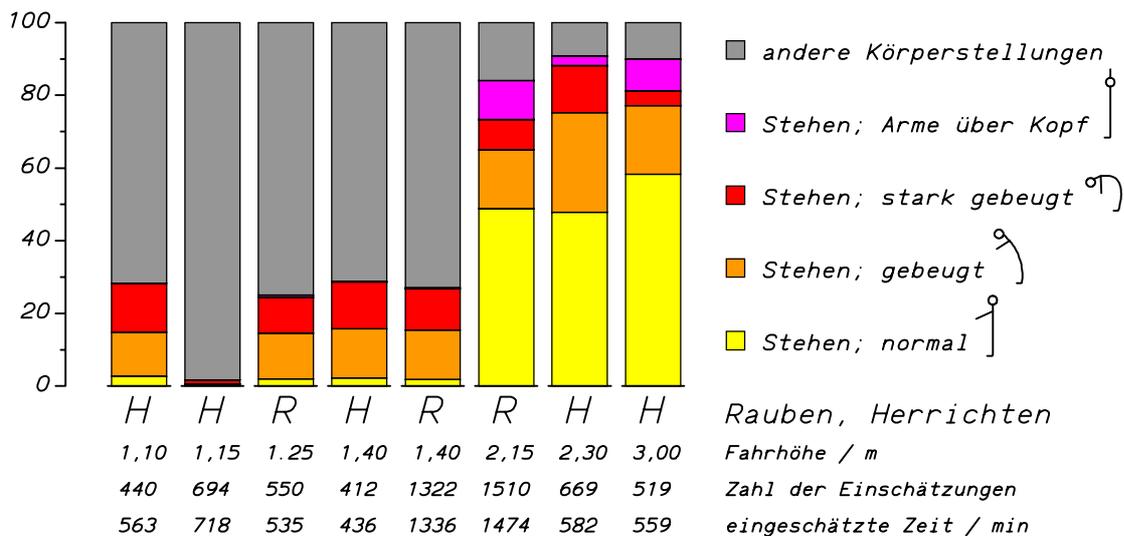


Abb. 109: Aufgliederung der Körperstellung "Stehen" in unterschiedliche Körperhaltungen.

In Abb. 109 ist die Körperstellung "Stehen" in die verschiedenen eingeschätzten Körperhaltungen aufgegliedert. Die Körperhaltung "Stehen, normal" tritt nicht mehr auf, wenn die Fahrhöhe kleiner ist als die Körpergröße; die Körperhaltungen "Stehen, gebeugt" und "Stehen, stark gebeugt" treten dann jeweils noch in etwa 12 % der eingeschätzten Zeit auf – in diese Kategorien der Körperhaltungen fällt auch das gebückte Gehen im Streb. Da auch in Streben mit großer Fahrhöhe unter den Schilden gearbeitet werden muß (z.B. An- und Abschagen von Zughüben, Anschluß von Hydraulikleitungen), werden "Stehen, gebeugt" und "Stehen, stark gebeugt" auch dort eingeschätzt; zudem wurden bis zu 10 % der Zeit als „Stehen, Arme über Kopf“ eingestuft.

6.3.5 Beispiel für ein zusätzliches Problem bei der Arbeit im Klima: Hitzeorthostase⁶¹

Grundlage für diese Fallstudie zum Problem der Hitzeorthostase war folgende Beobachtung: im Jahr 1994 hatte ein Bergmann mehrfach seine Arbeit im warmen Klima abgebrochen. Auch im Nachgang wurden bei ihm keine Befunde festgestellt, die einen Einsatz im warmen Klima in Frage gestellt hätten. Zum Ausschluß eines orthostatischen Syndroms wurde bei den medizinischen Eignungsuntersuchungen [438] ein Schellong-Test⁶² durchgeführt; es ergaben sich Normbefunde. Auch bei der Anamnese des Alltags und bei der Arbeit im Bergbau außerhalb von klimatisch belasteten Arbeitsplätzen traten keine orthostatischen Beschwerden auf. Bei ergometrischer Belastung fanden sich in der Belastungs- und in der Erholungsphase jeweils regelrechte Verhältnisse von EKG, Herzschlagfrequenz und Blutdruck; während der Ergometrie trat keine Befindlichkeitsstörung auf. Die Leistungsfähigkeit des Bergmanns entsprach der Vorgabe für eine W_{150} .

Daher wurde dieser Bergmann – mit seinem Einverständnis – in einer Klimakammer in der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Essen während einer kontrollierten Klimabelastung untersucht [164]. Da der Bergmann als Schlosser während der Schicht größere Strecken zu Fuß zu seinen wechselnden Einsatzorten zurücklegen mußte, schien

⁶¹ Teile dieses Kapitels wurden als Poster auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin 1997 vorgestellt (KALKOWSKY ET AL. [164]).

⁶² Kreislauffunktionsprüfung nach Schellong: Herzschlagfrequenz und Blutdruck werden mehrfach im Liegen in einminütigem Abstand gemessen. Nach dem Aufrichten der untersuchten Person werden beide Größen nach einer Minute über drei Minuten im Minutenabstand überwacht. Als normale Reaktion verändert sich der systolische Blutdruck nicht mehr als 5 bis 15 mmHg; der diastolische Blutdruck bleibt gleich oder steigt etwas an; die Herzschlagfrequenz steigt um 10 bis 40 min^{-1} . Ein stärkeres Sinken des systolischen Blutdrucks bei einem Ansteigen des diastolischen Blutdrucks wird als *hypertone Reaktion*, ein stärkeres Sinken des systolischen Blutdrucks bei stärkerem Absinken des diastolischen Blutdrucks wird als *hypodyne Reaktion* bezeichnet.

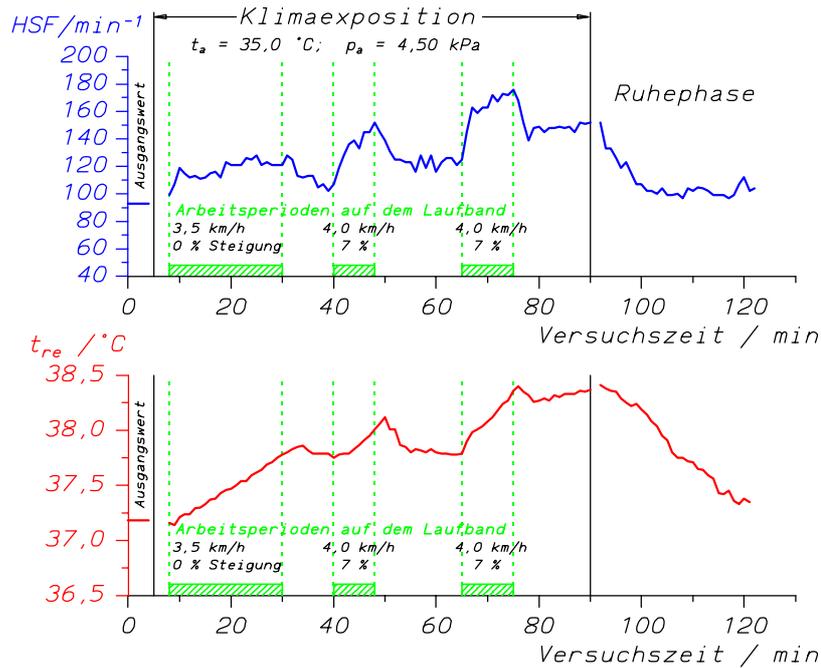
Körperarbeit auf einem Laufbandergometer eine geeignete Körperarbeit während der Klimabelastung zu sein. Lufttemperatur (35 °C) und Luftfeuchtigkeit (80 % rel. Feuchte) entsprachen den Werten an seinem Arbeitsplatz im Bergwerk, an dem Tag, als er zum letzten Mal eine Schicht abgebrochen hatte. – Methodisch gehört diese Untersuchung eigentlich in Kapitel 4, wurde aber wegen des Bezugs zum Bergbau hier dargestellt.

Abbildung Abb. 110 (oben) zeigt den Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur (rektal) des Bergmanns während der Untersuchung in der Klimakammer; gleichzeitig wurden zum Vergleich die Werte eines trainierten Grubenwehrmitglieds erhoben (Abb. 110 unten). Als Bekleidung wurde Arbeitskleidung gewählt (Unterwäsche, Hemd, lange Hose).

Eine Arbeitsphase über etwa 20 Minuten zu Beginn der Untersuchung sollte dem Weg des Bergmanns zu seinem Arbeitsplatz entsprechen. Beim Anhalten des Laufbandes wurde dem Bergmann umgehend schwindelig und Brechreiz trat auf; der Blutdruck, der sofort gemessen wurde, lag systolisch unter 100 mmHg. Es wurde eine Pause von etwa 10 Minuten Dauer sitzend im Klima eingelegt. Danach fühlte sich der Bergmann in der Lage, einen weiteren Arbeitsversuch auf dem Laufbandergometer anzugehen. Um das Gehen in geneigten Grubenbauen zu simulieren, wurde das Laufband auf 7 % Steigung gestellt. Während des Gehens traten keine Befindlichkeitsstörungen auf (Blutdruck 145/80 mmHg). Nach dem Ende der Laufbandarbeit hatte der Bergmann sofort wieder Schwindelgefühle und setzte sich; der Blutdruck fiel im Sitzen zunächst auf 95/60 mmHg ab und stieg dann im weiteren Verlauf der Pause (57. Minute Versuchszeit) wieder bis auf 145/80 mmHg an. Während eines dritten Arbeitsversuchs verschwanden die Befindlichkeitsstörungen während der Arbeit wieder; nach Arbeitsabbruch traten wieder Schwindel und Übelkeit auf; eine halbe Minute nach Arbeitsende fiel der Blutdruck auf 100/60 mmHg im Sitzen ab und erhöhte sich nach kurzer Zeit wieder auf 140/80 mmHg. Es wurde eine „Butterpause“ im Sitzen angeschlossen. In der 88. Minute fühlte sich der Bergmann schlecht: Schwindelgefühl, Engegefühl und Übelkeit traten auf; der Aufenthalt in der Klimakammer wurde abgebrochen.

Der Proband legte eine Ruhepause im Normalklima ein. Da die Symptome anhielten, tauchte der Proband ab der 98. Versuchsminute beide Hände in einen Eimer mit Leitungswasser ein, damit die Körpertemperatur schneller gesenkt wurde. Ab der 114. Versuchsminute fühlte sich der Proband wieder besser und die Untersuchung wurde in der 121. Minute beendet. Der untersuchte Bergmann hatte während der 85-minütigen Klimaexposition 1400 g Schweiß verloren, Proband B 2000 g.

Klimakammer: Proband A



Klimakammer: Proband B

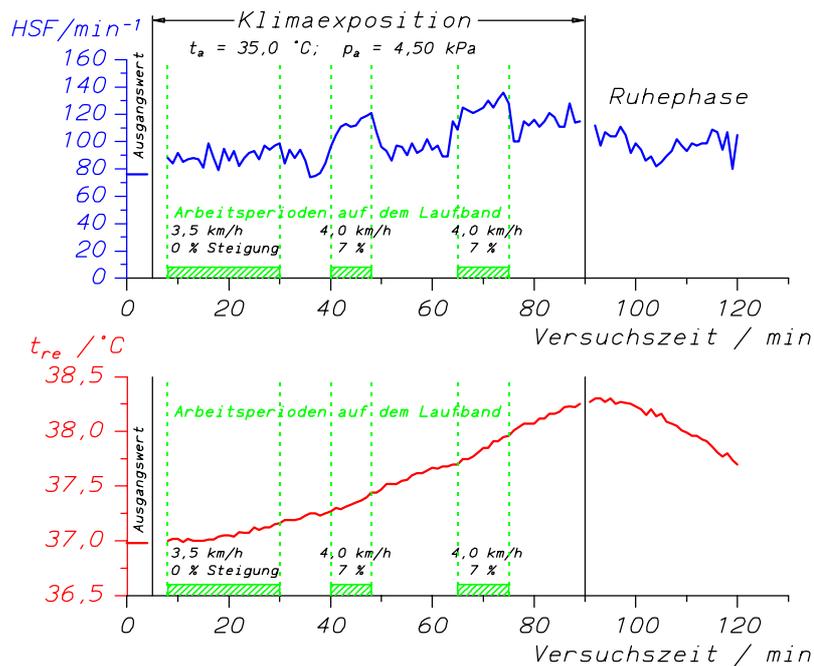


Abb. 110: Verläufe von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur zweier Probanden in einer Klimakammer.

Oben: Bergmann (Alter 29 Jahre, Körpermasse 75 kg, Körpergröße 1,69 m) während der Untersuchung in der Klimakammer (Lufttemperatur 35 °C; 80 % rel. Feuchte). Der Bergmann trug Arbeitskleidung: Unterwäsche, Hemd, lange Hose und Sicherheitsschuhe. Schweißabgabe insgesamt: 1400 g.

Unten: trainiertes Grubenwehrmitglied (Alter 45 Jahre, Körpermasse 96 kg, Körpergröße 1,87 m); gleiche Bekleidung wie oben; Schweißabgabe insgesamt: 2000 g.

Während sich in der Herzschlagfrequenz die Arbeitsperioden auf dem Laufbandergometer abzeichnen, kann man im Verlauf der Rektaltemperatur erkennen, daß während der Arbeitspausen das warme Blut aus den Beinmuskeln bei fehlender Muskelpumpe offenbar wegen des niedrigen Blutdrucks nicht mehr im Körper umverteilt werden kann. Während der darauffolgenden Arbeitspause gelingt dies wieder: die Rektaltemperatur erhöht sich mit größerer Anstiegsgeschwindigkeit als während der ersten Arbeitsphase. Dieses Verhalten tritt auch zu Beginn der dritten Arbeitsphase auf. – Im Vergleich dazu steigt bei dem anderen Probanden die Körpertemperatur während der gesamten Klimaexposition – auch in den Arbeitspausen – monoton weiter an.

Als Schlußfolgerung konnte das Verhalten des Kreislaufs des untersuchten Bergmanns als Vorstadium eines Hitzekollaps eingestuft werden (z.B. [299]). Es wurde eine Einsatz- und Beschäftigungsbeschränkung für Arbeit in Betrieben oberhalb einer Effektivtemperatur von 29 °C ausgesprochen und die Empfehlung gegeben, sich in Pausen – wann immer möglich – zu setzen. – Die Einhaltung der Einsatz- und Beschäftigungsbeschränkung wird betrieblich nachgehalten. – Danach traten bei dem untersuchten Bergmann in seiner früheren Tätigkeit als Schlosser keine Befindlichkeitsstörungen der geschilderten Art mehr auf.

SHVARTZ ET AL. [353] untersuchten 1975 drei Gruppen von Probanden an Kipptischen: in einer Gruppe, die körperlich unter Hitzebelastung ($t_a = 33,9$ °C; $t_w = 32,2$ °C; 4 Stunden Exposition) arbeitete, war die Verbesserung am höchsten, leichte Körperarbeit bei 21 °C führte zu leichten Verbesserungen der orthostatischen Reaktion, und Körperruhe im Klima bewirkte weder Akklimatisation noch eine Verbesserung der orthostatischen Reaktion. KEREN ET AL. zeigten 1980 [193], daß hitzetolerante und hitzeintolerante Personen auf 20-minütiges Stehen und auf einem Kipptisch nach 20 Minuten vergleichbare Reaktionen zeigten; nach dreistündiger Arbeit (30 W externe Arbeit) bei 40 °C und $RH = 40$ % zeigten die hitzeintoleranten Personen jedoch früher eine orthostatische Reaktion. Die Autoren folgern, daß ein Orthostase-Test mindestens über 20 Minuten durchgeführt werden sollte.

Bei den zu erwartenden steigenden klimatischen Belastungen im Bergbau sind zuverlässige Indikatoren für prospektive Aussagen zur Hitzetoleranz dringend erforderlich. Im vorgestellten Fall waren die Vorsorgeuntersuchungen im Normklima ohne pathologischen Befund; nur die Untersuchung im Klima konnte eine Abklärung der Hitze-tauglichkeit erbringen. Untersuchungen dieser Art können beispielsweise innerhalb der Deutschen Steinkohle AG in der Klimakammer der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Herne durchgeführt werden.

6.3.6 Selbsteinteilung der Leistung (self-pacing)

Die Selbsteinteilung der Leistung entsprechend dem Beanspruchungsempfinden (Kapitel 2.2.2) wird nicht nur als Hypothese zur Erklärung der Ergebnisse an heißen Arbeitsplätzen (Kapitel 6.1.6.1 und 6.1.6.2) verwendet, sondern kann – außer durch den Rückgang der Arbeitsschwere bei zunehmender Klimabelastung, der in Kapitel 6.1.7.4 direkt aufgezeigt wurde – durch eine Reihe von Einzelbeobachtungen weiter belegt werden, um die oben vertretene These zu stützen. Einige Beobachtungen und Beispiele aus bisherigen Untersuchungen sollen zu diesem Thema im folgenden vorgestellt werden.

6.3.6.1 Einfluß der Körperhaltung auf die Beanspruchung

In [176] wurden Bergleute beim Ausrauben von Schildstreben unterschiedlicher Mächtigkeit untersucht; der Einfluß, den die Abmessungen des Arbeitsraumes auf die Körperstellung haben, ist in Kapitel 6.3.4 dargestellt. Es ergibt sich nun die Frage, wie weit sich die zum Teil recht beschwerlichen Körperhaltungen wie „Stehen stark gebeugt“ auf die Beanspruchung der Bergleute auswirken. Für diese Frage wurde die Herzschlagfrequenz von vier Bergleuten in Streben unterschiedlicher Mächtigkeit betrachtet (KAMP-MANN ET AL. [178]): für 24 Schichten in einer Fahrhöhe unter 1,40 m (Anteile der Körperstellungen: Stehen: 29,6 %; Hocken: 1,2 %; Knien: 32 %; Sitzen 31,1 % und Liegen: 0,3 % bei 1342 Einschätzungen insgesamt) und für 15 Schichten in einer Fahrhöhe von 1,80 m (Anteile der Körperstellungen: Stehen: 83,4 %; Hocken: 0,6 %; Knien: 6,0 %; Sitzen 7,0 % und Liegen: 0 % bei 1126 Einschätzungen insgesamt).

Abb. 111 zeigt die Histogramme der Herzschlagfrequenz für beide Arbeitssituationen. Erstaunlicherweise unterscheiden sich die Werte der Herzschlagfrequenzen mit $(95,5 \pm 15,6) \text{ min}^{-1}$ in niedriger Mächtigkeit und $(96,3 \pm 14,7) \text{ min}^{-1}$ in hoher Mächtigkeit um weniger als einen Herzschlag pro Minute. Die Form der Histogramme unterscheidet sich jedoch deutlich: bei niedriger Mächtigkeit treten wegen der ungünstigen Körperhaltung – insbesondere auch während der Fortbewegung – höhere Herzschlagfrequenzen auf, die durch entsprechende Pausen kompensiert werden. Die Verteilung ist rechtschief; im Mittel jedoch bleibt die Beanspruchung der Bergleute fast genau gleich.

Da das Ausrauben der Streben in den untersuchten Fällen ohne größeren Zeitdruck stattfand (anders als beispielsweise in der Kohleproduktion), waren offensichtlich Zeitreserven für eine Regulation des Arbeitstempos vorhanden.

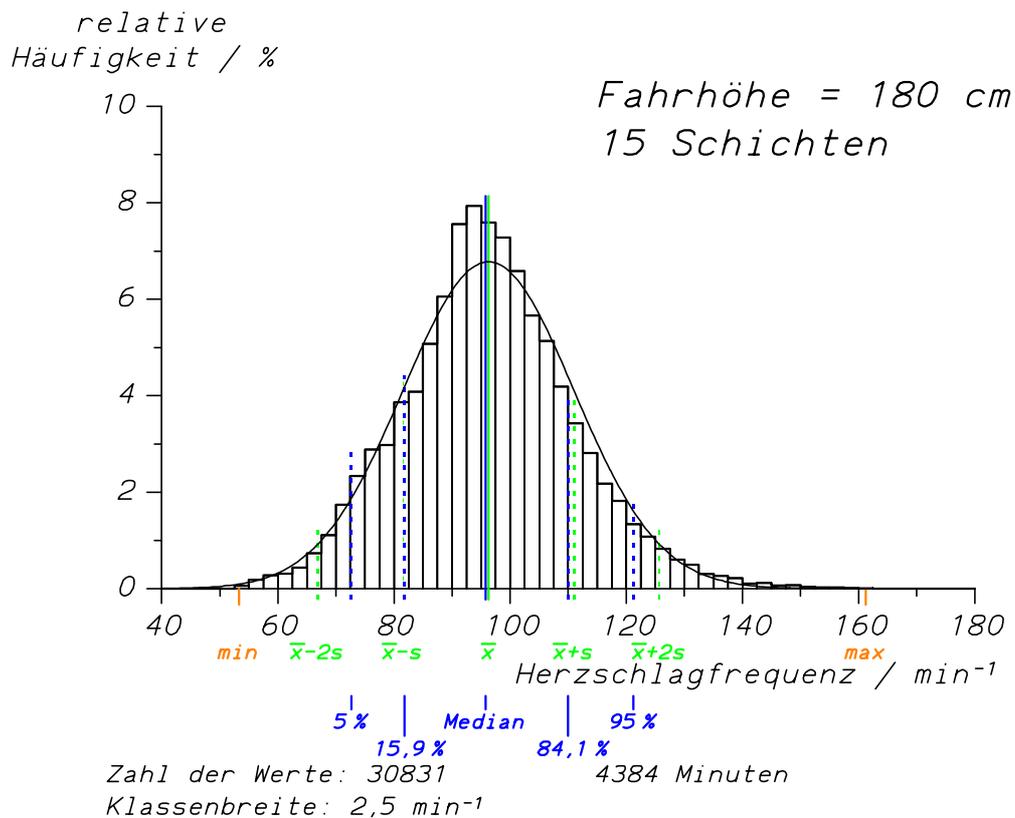
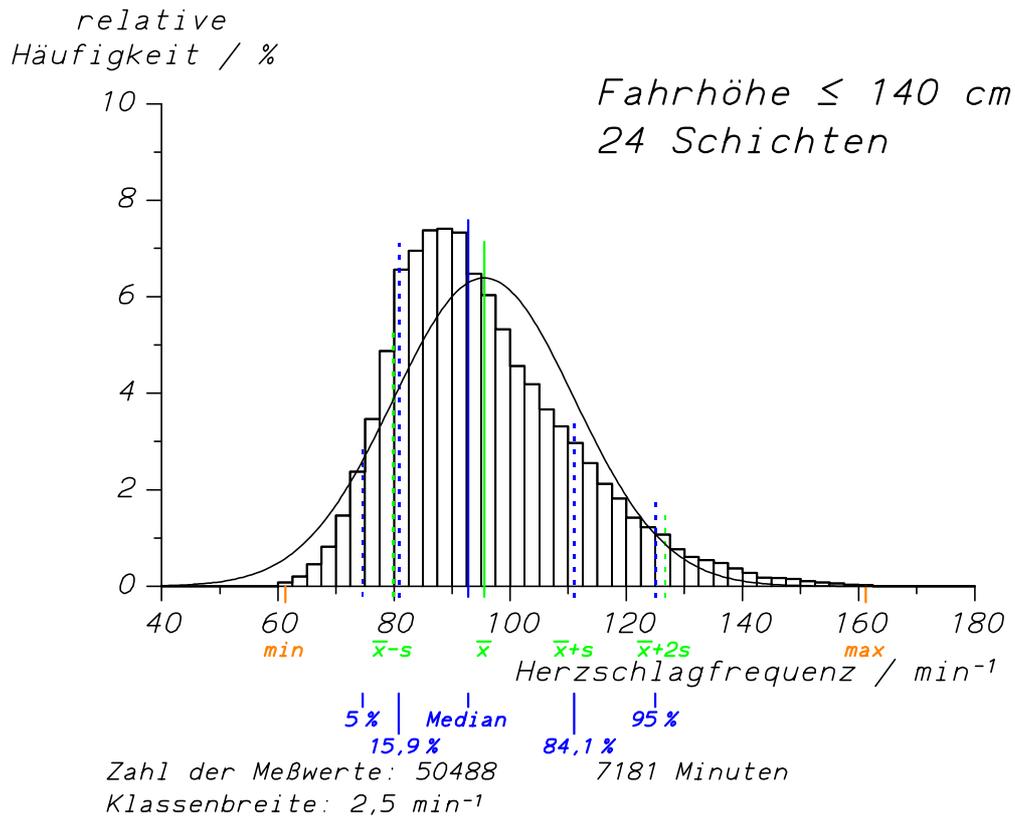


Abb. 111: Verteilung der Herzschlagfrequenz für vier Bergleute beim Ausrauben von Schildstreben in Streben unterschiedlicher Mächtigkeit (KAMPMANN ET AL. 1992 [178]).

6.3.6.2 Energieumsätze bei „typischen Tätigkeiten“⁶³

In der Untersuchung zur Beanspruchung von Bergleuten beim Herrichten und Ausrauben von Schildstreben [176] wurden für 12 Bergleute 80 Messungen des Energieumsatzes für „typische Tätigkeiten“ (nach Einschätzung der Bergleute) ausgewertet (Abb. 112). Die Einzelmessungen der Arbeitsenergieumsätze streuen von 53 bis 544 W; nach DIN 33 403 T3 entspricht dies Einstufungen von „sehr leichter Arbeit“ bis „schwerste Arbeit“.

Da die Daten bezüglich Alter und Broca-Index inhomogen waren, wurde für die Bergleute, die jünger als 30 Jahre waren, eine multilineare Regression für den Arbeitsenergieumsatz (AEU) für auf den Mittelwert zentrierte Variablen (außer für die Herzschlagfrequenz) berechnet [176]; es ergab sich folgendes Modell (72 Meßwerte; nur Koeffizienten mit $p < 0,1$. Die Rektaltemperatur t_{re} hatte keinen Einfluß auf die Bestimmung von AEU : $p > 0,95$):

$$AEU / W = 6,36 \cdot (HSF - HSF_0) / \text{min}^{-1} + 3,26 \cdot (KM - 77,2) / \text{kg} - 5,29 \cdot (BET - 20,5) / ^\circ\text{C} + 37,4 \quad (10)$$

wo KM die Körpermasse und HSF_0 die Bezugs-Herzschlagfrequenz ist.

Es zeigte sich – trotz unterschiedlicher Tätigkeiten und zwölf verschiedener Bergleute, deren Daten in die Auswertung eingingen – ein Einfluß der Basis-Effektivtemperatur auf den Arbeitsenergieumsatz: eine Anpassung der Arbeitsschwere an die klimatische Belastung war also auch bereits unterhalb von $BET = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ zu beobachten.

Tabelle 18: Multilineare Regression für den Arbeitsenergieumsatz bei „typischen Tätigkeiten“. ($R = 0,97$ für Regression mit unterdrücktem Nullpunkt; mittlerer quadratischer Standardfehler: 60,6 W).

Variable	Koeffizient	Standardfehler	p
$HSF - HSF_0$	6,36	0,59	< 0,005
$KM - 77,2$	3,26	0,99	< 0,005
$BET - 20,5$	- 5,29	2,61	0,05
Achsenabschnitt	37,4	19,5	0,06

⁶³ [176] Kampmann, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI: *Energieumsatzmessungen an Bergleuten beim Herrichten und Ausrauben von Streben mit Schildausbau*. Glückauf-Forschungshefte 52, 271-277 (1991).

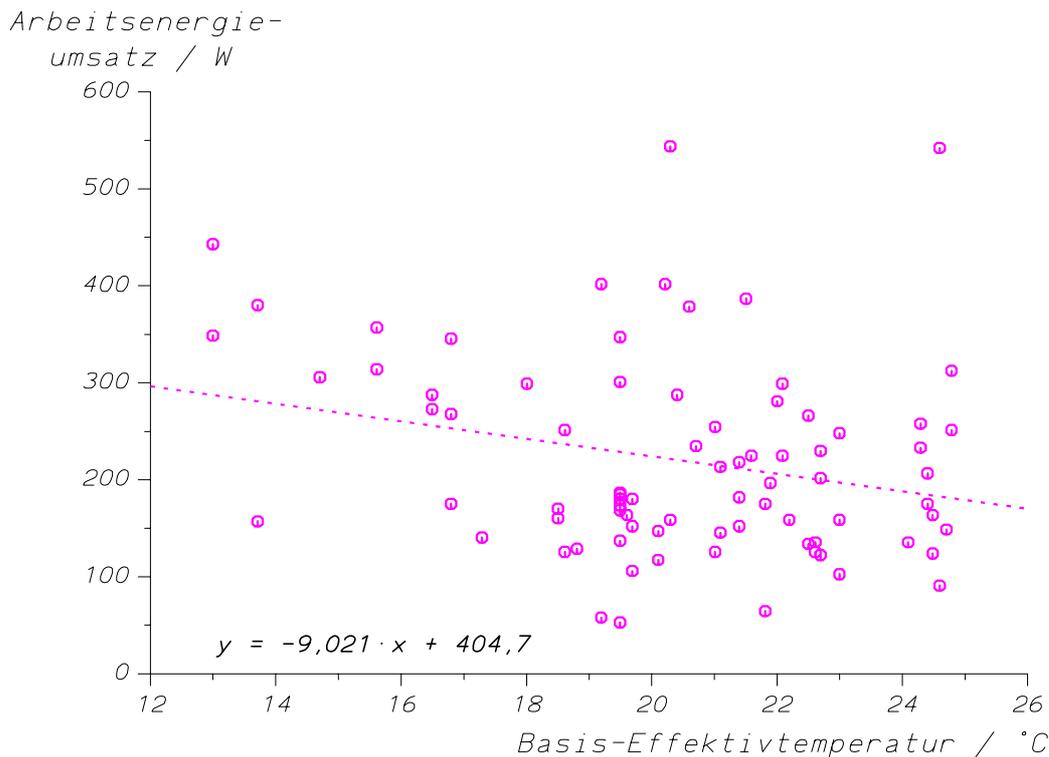


Abb. 112: Abnahme des Arbeitsenergieumsatzes mit zunehmender Basis-Effektivtemperatur für „typische Tätigkeiten“ beim Herrichten und Ausrauben von Schildstreben im Bergbau [176] mit eingezeichneter linearer Regression.

6.3.6.3 Fußwege bei der Fahrung

Innerhalb einer umfangreicheren Auswertung zur Beanspruchung des Bergmanns bei der Fahrung [179] wurden unter anderem alle Abschnitte der Fußwege mit einer Dauer über 5 Minuten ausgewertet, die in den Schichten in [175] erfaßt worden waren.

Unter Laborbedingungen steigt der Energieumsatz – und damit auch die Herzschlagfrequenz – zunächst linear mit zunehmender Gehgeschwindigkeit an; in Abb. 113 ergibt sich dagegen kein klarer Zusammenhang. Für neun Bergleute, die wir jeweils an mehreren Betriebspunkten untersucht haben, ergeben sich für den Zusammenhang zwischen Gehgeschwindigkeit und Herzschlagfrequenz Korrelationskoeffizienten von 0,04 bis 0,74.

Wenn alle Abschnitte der Fußfahrung gemeinsam ausgewertet werden, streuen die Werte der Herzschlagfrequenz schon deshalb sehr stark, weil die Bergleute während der Fahrung meist in Gruppen zusammenbleiben und – je nach ihrer körperlichen Leistungsfähigkeit – bei gleicher Gehgeschwindigkeit unterschiedlich stark beansprucht werden; weiterhin sind auch Bodenbeschaffenheit und Neigung des Weges unterschiedlich und beeinflussen so die Beanspruchungsreaktion der Bergleute. Für alle Fahrungsabschnitte in Abb. 113 werden durch die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwi-

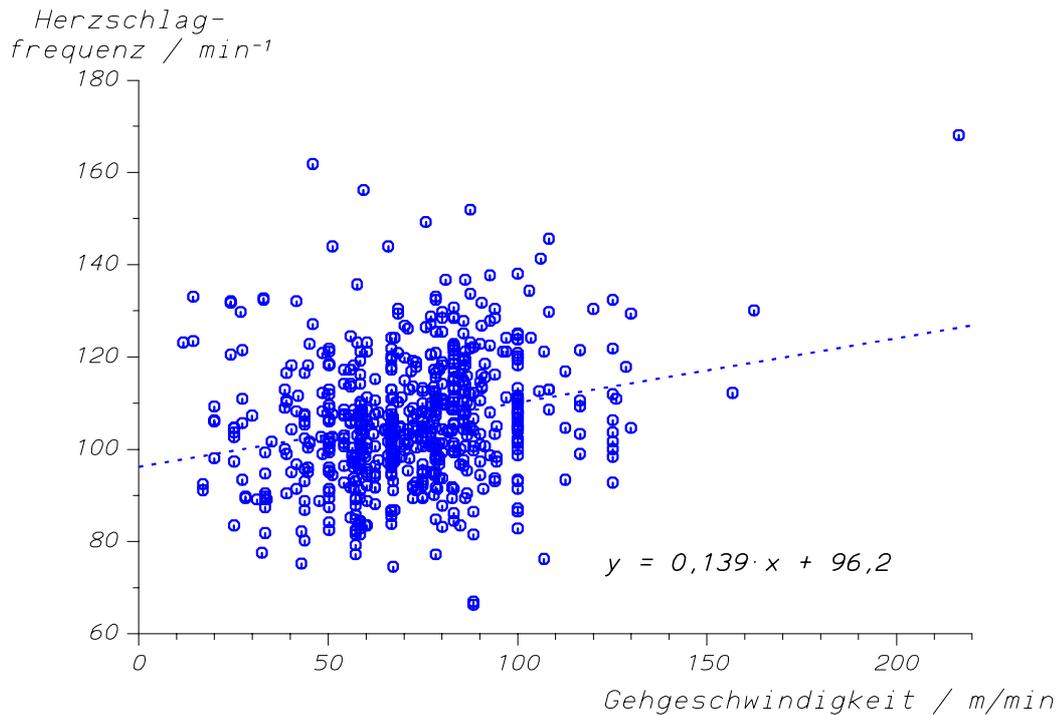


Abb. 113: Die Abhängigkeit der Herzschlagfrequenz von der Gehgeschwindigkeit für 642 Abschnitte der Fußfahung in [175] von mehr als 5 Minuten Dauer.

schen Herzschlagfrequenz und Gehgeschwindigkeit nur 6 % der Summe der Residuenquadrate erklärt – durch die hohe Anzahl der Meßwerte ist ein linearer Zusammenhang aber auf einem hohen Signifikanzniveau ($p < 0,00005$) gesichert. – Die drei Wegabschnitte mit der höchsten Gehgeschwindigkeit wurden im Laufschrift zurückgelegt, um noch den Personenzug für den Rückweg zu erreichen.

Aus Tafeln für den Energieumsatz (SPITZER ET AL. 1982 [358]) ist bekannt, daß der Arbeitsenergieumsatz beim Gehen für kleine Geschwindigkeiten zunächst linear mit der Geschwindigkeit ansteigt und danach stärker zunimmt. Bei einer Gehgeschwindigkeit von $v = 33$ m/min ergibt sich beispielsweise ein Arbeitsenergieumsatz von 127 W, der bei einer Geschwindigkeit von $v = 133$ m/min auf 720 W ansteigt.

In Kapitel 6.1.7.3 entspricht ein Anstieg der Herzschlagfrequenz um $1,0 \text{ min}^{-1}$ einer Erhöhung des Arbeitsenergieumsatzes von 6,6 W; dieser Wert entspricht gut den Ergebnissen von NÜNNINGHOFF ET AL. [281] für überwiegend dynamische Körperarbeit bei Einsatz großer Muskelgruppen bzw. auch ISO 8996 [444]. – Eine Erhöhung der Gehgeschwindigkeit von $v = 33$ m/min auf $v = 133$ m/min, die nach SPITZER ET AL. einer Zunahme des Energieumsatzes um 593 W entspricht, würde nun eine Erhöhung der Herzschlagfrequenz um $89,8 \text{ min}^{-1}$ zur Folge haben. Tatsächlich wird aber – im Mittel – nur eine Erhöhung der Herzschlagfrequenz um $13,9 \text{ min}^{-1}$ in Abb. 113 beobachtet.

Dies weist darauf hin, daß die Bergleute nur dann schnell gehen, wenn die Verhältnisse (Bodenbeschaffenheit, Abwärtsneigung des Weges) dies ohne große Erhöhung der Beanspruchung erlauben.

6.3.6.4 Einteilung von Arbeit und Pausen im Klima

Während in der Schicht in Abb. 66 der untersuchte Bergmann ein eher gleichförmiges Arbeitstempo einhielt, soll hier ein Beispiel für eine andere Arbeit gegeben werden: ein Bergmann arbeitete am Streb-Strecken-Übergang im „Kohlenstall“, wo er die Kohle aus einem Bereich von einigen Quadratmetern Grundfläche entfernte und dort einen Ausbau einbrachte. Die Arbeit war durch kurze Abschnitte schwerer Arbeit: Lösen der Kohle mit dem Preßlufthammer, Wegschaufeln der Kohle, Tragen und Setzen von Ausbaumaterial und durch kurze Pausen zwischen den einzelnen Tätigkeiten gekennzeichnet (Abb. 114). Die Körpertemperatur schwankt – bei jeweils kurzen Arbeitsunterbrechungen – während etwa zwei Stunden bei einer Höhe von 38,3 °C um weniger als 0,1 °C und fällt danach wegen einiger längerer ablaufbedingter Arbeitsunterbrechungen leicht ab. Da der Bergmann sein Arbeitstempo weitgehend selbst bestimmen konnte, zeigt diese Aufzeichnung der Körpertemperatur, wie gut dieser Bergmann sein Arbeitszeit-Pausen-Verhältnis einstellen konnte, um seine Körpertemperatur konstant zu halten.

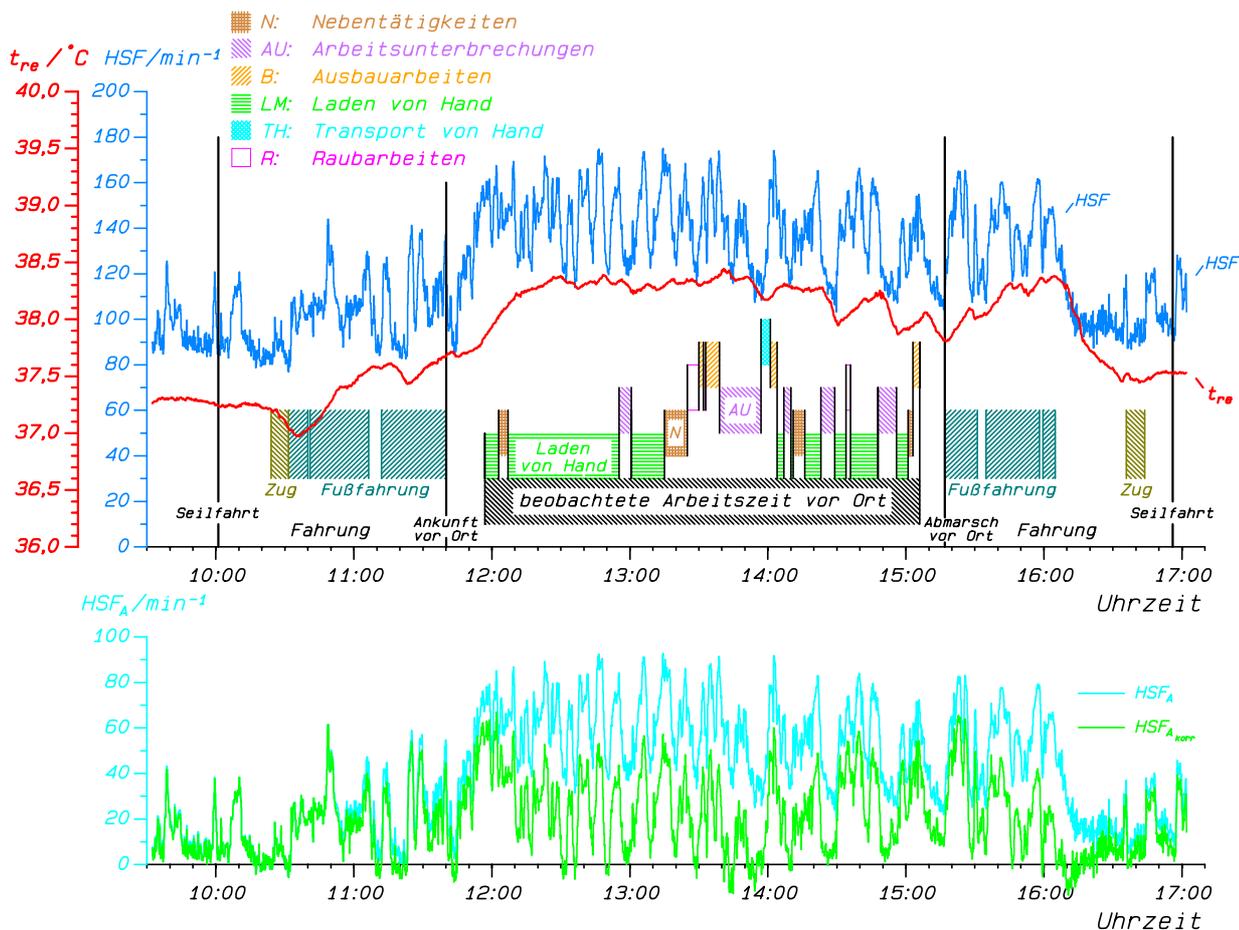


Abb. 114: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur sowie der Arbeitspulse und der um die thermischen Anteile korrigierten Arbeitspulse während einer Schicht für einen Bergmann im Kohlenstall.

6.3.6.5 Probleme von Mittelwertbildungen: Beispiel „Atmen von Heißluft“

Wenn die Beanspruchung nicht in der Nähe der Leistungsgrenzen liegt, kann die Reaktion auf eine zusätzliche Belastungskomponente unterschiedlich ausfallen. Als Beispiel soll hierzu das Ergebnis einer unveröffentlichten Untersuchung in der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Essen vorgestellt werden, bei der der Einfluß heißer Einatemluft auf die Beanspruchungsreaktion untersucht wurde.

Um Bergleute daran zu gewöhnen, daß die CO-Filter selbstretter in Gegenwart von Kohlenmonoxid in der Einatemluft sich durch die katalytische Verbrennung von CO zu CO₂ stark erhitzen können (was ein Zeichen für die gute Funktion des Filterselbstretters darstellt und nicht einen Hinweis auf eine Fehlfunktion – hier waren im Ausland mehrere tragische Unglücksfälle vorgekommen), sollte bei der turnusmäßigen Einweisung der Bergleute in den Gebrauch des CO-Filter selbstretters ein Übungsteil eingeschaltet werden, bei dem Einatemluft aus einem Heißluftgerät eingeatmet wurde; die Luft war am Mundstück des Filterselbstretters noch etwa 80 °C heiß.

Ein Zeitabschnitt während der Unterweisung wurde als Ruhephase für die Untersuchung bestimmt. Die erste Arbeitsphase begann – mit aufgesetztem Übungs-Filter selbstretter – mit dem Marsch zum Übungsraum. Am Tag der Untersuchung herrschte dort eine Temperatur von 3 °C (Anfang Januar).

Dort wurden 20 Durchgänge mit folgendem Ablauf durchgeführt:

- i) ebenerdig Gehen, 5 Stufen hoch (ca. 1,20 m Höhe), 4 m Gehen in der Ebene, 5 Stufen herunter
- ii) und wieder zum Ausgangspunkt zurück, in folgender Weise:
eine Schräge über 5 m heraufgehen (ca. 1,20 m Höhe), 4 m Gehen in der Ebene, 5 Stufen herunter.

Dann folgte ein kurzer Marsch zu dem Raum mit dem Heißluftgerät. Die Vorgabe für die Bergleute war, die Arbeitsschwere – es wurde in diesem Übungsabschnitt ein Step-Test ausgeführt – zu reduzieren, wenn die Atemluft zu heiß würde: dies entspricht den Anweisungen für eine Flucht im Ernstfall, wo auch die Gehgeschwindigkeit entsprechend der Temperatur der Atemluft reduziert werden soll.

Nach der Auswertung der Ergebnisse für 10 Bergleute stellte sich heraus, daß die Herzschlagfrequenz – ausgehend von der Unterweisung mit $(72,9 \pm 11,7) \text{ min}^{-1}$ (Mittelwert \pm Standardabweichung) sich im ersten Übungsabschnitt auf $(100,5 \pm 11,1) \text{ min}^{-1}$ einstellte und während des zweiten Übungsabschnittes auf $(101,5 \pm 16,1) \text{ min}^{-1}$ anstieg (Abb. 115). Bei genauerem Hinsehen – veranlaßt auch durch die deutlich erhöhte Standardabweichung im zweiten Übungsabschnitt – stellte sich heraus, daß die mittlere Reaktion sich in der Weise zusammensetzte, daß vier der Bergleute ihre Arbeitsschwere so

einstellten, daß die Herzschlagfrequenz abnahm, während sich bei sechs Bergleuten die Herzschlagfrequenz erhöhte (Abb. 116).

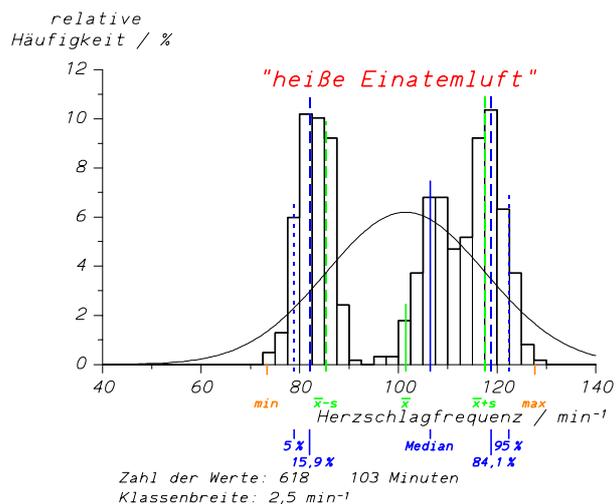
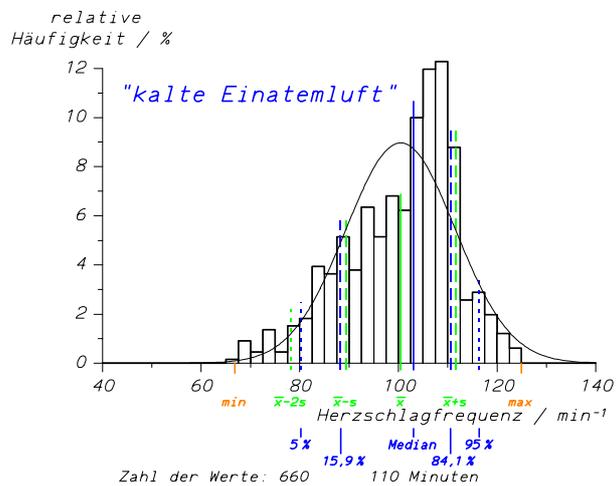
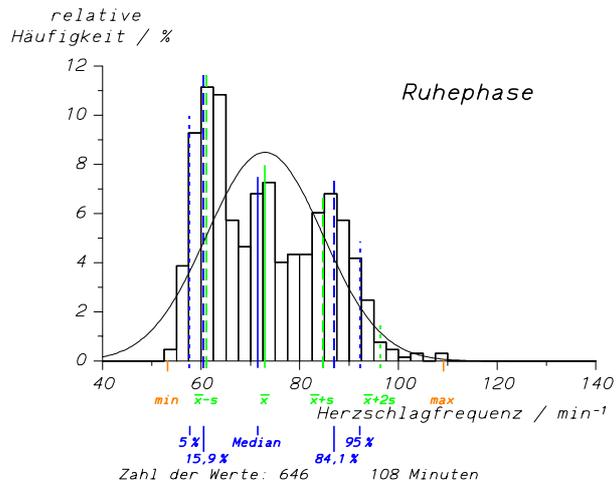


Abb. 115: Verteilung der Herzschlagfrequenz für 10 Probanden für die Ruhephase und die zwei Arbeitsphasen.

Offenbar bestand hier für die Bergleute die Möglichkeit, entweder eine höhere Arbeitsschwere trotz der heißen Einatemluft durchzuhalten, wobei die hohe Temperatur der

Einatemluft insbesondere bei hohem Atemminutenvolumen beschwerlich ist, oder aber, eine gut erträgliche Temperatur der Einatemluft einzustellen.

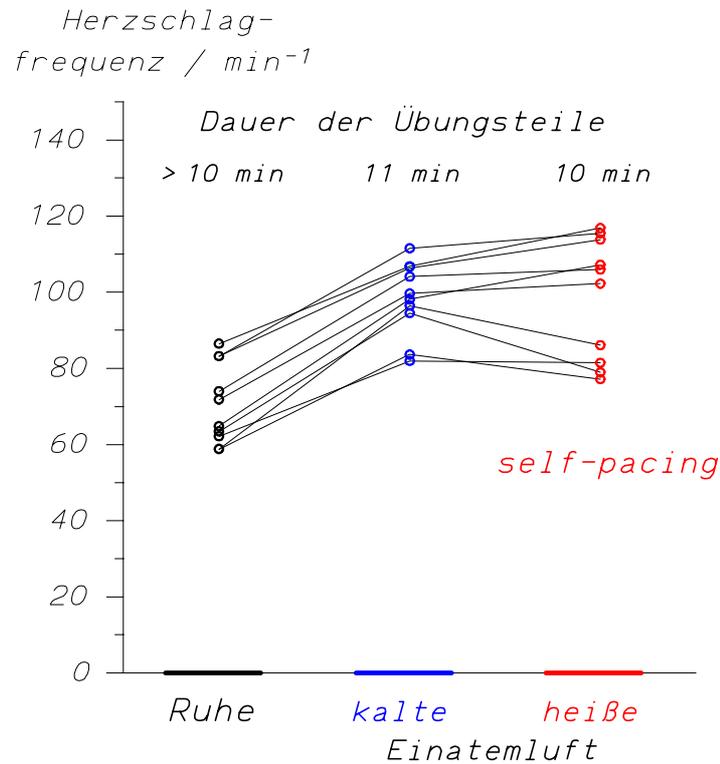


Abb. 116: Mittlere Herzschlagfrequenz während der Übungsabschnitte für 10 Probanden.

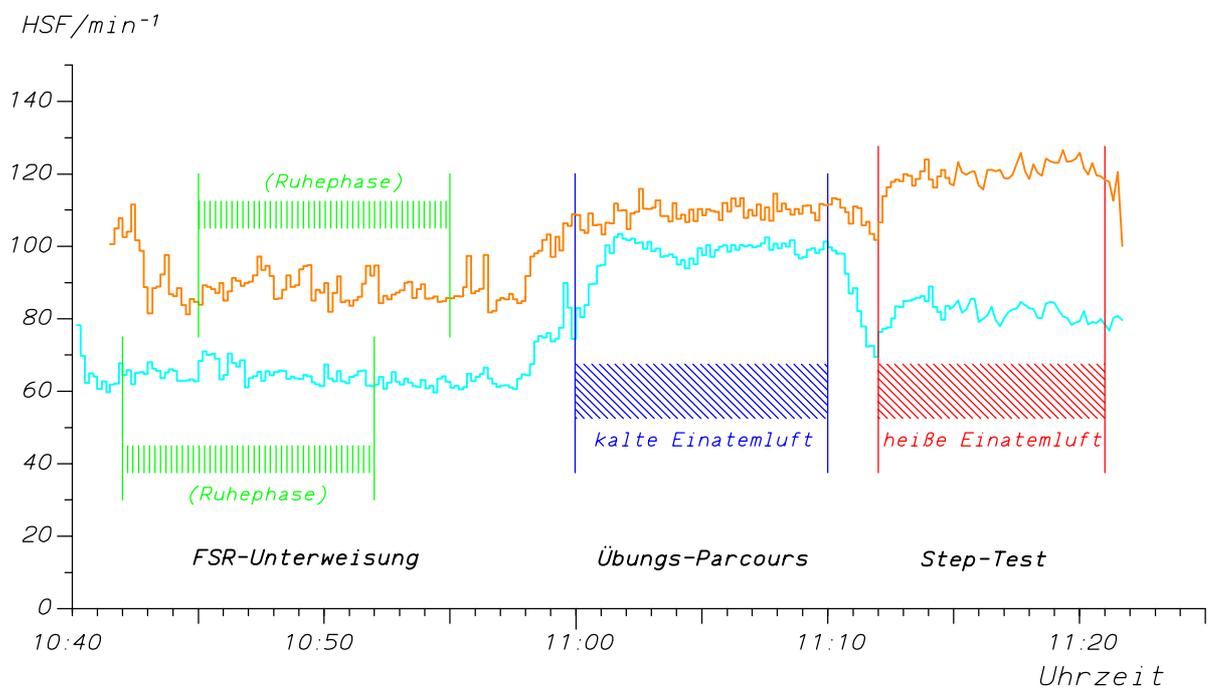


Abb. 117: Verlauf der Herzschlagfrequenz zweier Probanden während einer Übungsabfolge; während des Step-Tests sollte die Arbeitsfrequenz entsprechend dem Beanspruchungsempfinden eingestellt werden.

In Abb. 117 ist der Verlauf der Herzschlagfrequenz für zwei Probanden während des Übungsablaufs dargestellt: ein Proband erhöht seine Herzschlagfrequenz während des

Übungsteils mit der heißen Einatemluft, der andere Proband senkt seine Herzschlagfrequenz deutlich.

Diese Auswertung ist ein Beispiel dafür, daß unterschiedliche Mechanismen bei Einzelpersonen durch eine Mittelwertbildung überdeckt werden können. (In ähnlicher Weise kann ein Schwellenwertverhalten, das bei verschiedenen Probanden unterschiedlich ausgeprägt ist (wie etwa bei der Schweißproduktion in Abb. 15), überdeckt werden).

Es scheint, daß die Probanden einzelne Empfindungen vorrangig als Vorgabe für ihre Arbeitsintensität benutzen können, sofern sie nicht in die Nähe der Ausführbarkeitsgrenzen einer Aufgabe gelangen (in diesem Fall die unerträglich hohe Temperatur der Einatemluft, die – wegen des hohen Atemminutenvolumens – zu Schmerzempfindungen an den Schleimhäuten führen kann, wenn die Auf- und Abstiegsfrequenz beim Step-Test beibehalten wird; die Alternative ist eine Verringerung der Auf- und Abstiegsfrequenz – und damit des Atemminutenvolumens –, so daß die Temperatur der Schleimhäute nicht zu sehr ansteigt). – Ob die Probanden eine höhere Temperatur der Schleimhäute bei Einhaltung des Tempos in Kauf nehmen oder eine eher niedrige Temperatur durch eine Verringerung der Arbeitsintensität während des Übungsteils mit heißer Einatemluft wählen: in beiden Fällen zeigt die recht gleichbleibende Höhe der Herzschlagfrequenz während beider Übungsteile, daß die gewählte Beanspruchung recht gut konstant gehalten werden kann.

6.4 Vergleich der Beanspruchung an modifizierten Arbeitsplätzen („vorher-nachher“)

Es wurden innerhalb von Projekten zur ergonomischen Verbesserung von Arbeitsplätzen im Bergbau mehrere Untersuchungen durchgeführt, um die Beanspruchung vor und nach der Veränderung zu vergleichen (z.B. [181] und [187]). Ein solcher Vergleich ist sinnvoll, um festzustellen, ob für die einzelnen Arbeiter eine Verringerung der Beanspruchung resultiert, oder ob möglicherweise die Verbesserung von Einzelverrichtungen durch erhöhte Mechanisierung durch einen erhöhten Arbeitstakt wieder zunichte gemacht wird. Als Beispiel sollen hier die Untersuchungen bei Gleisumbauarbeiten im konventionellen Verfahren und bei Einsatz eines Gleisumbauzuges vorgestellt werden [301].

Um die hohen physischen Belastungen beim Gleisbau unter Tage zu verringern, wurde mit Unterstützung der Europäischen Gemeinschaft (EGKS 7250/13/064) ein Gleisumbau/ -vorbauzug entwickelt und im untertägigen praktischen Einsatz erprobt. Er hat zum Ziel, ergonomisch ungünstige Arbeitsbelastungen weitgehend zu minimieren. Wesentlicher Bestandteil des Forschungsprojekts war daher die Untersuchung der physiologischen Beanspruchung der Mitarbeiter bei Gleisumbauarbeiten sowohl beim herkömmlichen Verfahren als auch beim Einsatz des Gleisumbauzuges [301].

Hierzu wurde das konventionelle Verfahren bei einem Bautrupps von vier Bergleuten über jeweils drei Schichten untersucht (insgesamt 4665 Minuten Untersuchungszeit); bei Einsatz des Gleisumbauzuges wurden vier Bergleute über je vier Schichten untersucht (insgesamt 6916 Minuten Untersuchungszeit). Es wurden jeweils Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur (rektal) ganzschichtig aufgezeichnet (vgl. Abb. 118 und Abb. 119); über Arbeitsablaufprotokolle konnten Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur sowie Körperhaltungen und statische sowie dynamische Arbeitsanteile dann den jeweiligen Arbeitsabschnitten zugeordnet werden, so daß ein Vergleich der unterschiedlichen Arbeitsmethoden nach mehreren Kriterien möglich wurde (vgl. z.B. [171], [181]).

Obwohl in den beiden Teilen der Untersuchung verschiedene Bergleute arbeiteten und auch die Bedingungen der zu erneuernden Gleise nicht vollständig gleich waren (Tiefe des Schotterbetts, Schichtbeginn usw.), zeigte sich eine ganz erhebliche Verringerung der physischen Belastung. Dies gilt insbesondere für das Auskoffern des Schotterbetts von Hand (wo beim Auskoffern des Schotterbetts von Hand in Abb. 118 im herkömmlichen Arbeitsverfahren Herzschlagfrequenzen über 170 min^{-1} und Körpertemperaturen von 39°C beobachtet wurden), die Demontage der Schienen und die Montage der neuen Schienenrecks, wobei diese Tätigkeiten von der neu entwickelten Maschine übernommen werden, bzw. die Montage der Schienenrecks auf einem ebenfalls neu entwickelten Montagetisch stattfand. Die Beanspruchung der Mitarbeiter nimmt für einige Teiltätigkeiten sehr stark ab. Im folgenden werden einige Ergebnisse dargestellt:

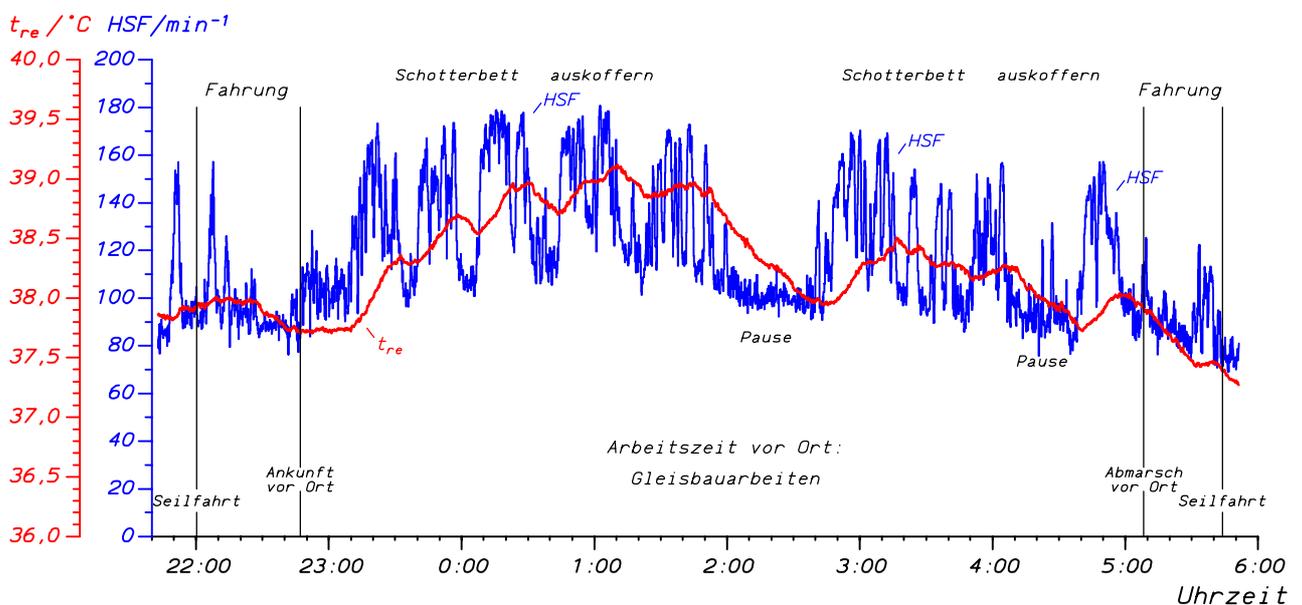


Abb. 118: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur eines Bergmanns beim Auskoffern des Schotterbetts der alten Gleise (Auflockern und von Hand wegladen; Klimabelastung: $t_a = 24,2^\circ\text{C}$; $BET = 18,1^\circ\text{C}$).

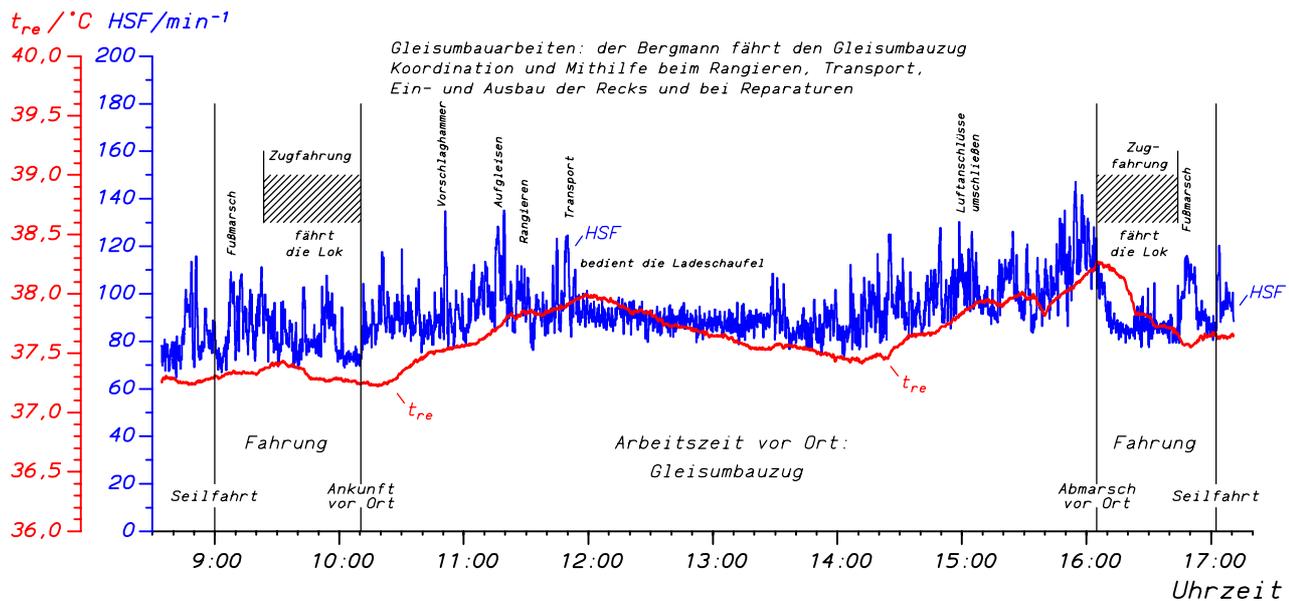


Abb. 119: Verlauf von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur eines Bergmanns, der den Gleisumbauzug fährt; in der Zeit von 12:00 bis 13:30 Uhr wird das Schotterbett – entsprechend der in Abb. 118 dargestellten Schicht – ausgekoffert (Klimabelastung: $t_a = 27,0 \text{ °C}$; $BET = 17,6 \text{ °C}$).

Obwohl mit Hilfe des Gleisumbauzugs wesentlich mehr Schienenrecks pro Schicht gewechselt wurden als bislang, lag für die gesamte Zeit vor Ort die mittlere Herzschlagfrequenz der Bergleute bei $(94,7 \pm 16,1) \text{ min}^{-1}$ gegenüber $(113,4 \pm 24,7) \text{ min}^{-1}$ beim konventionellen Gleisumbau (Verteilungen der Herzschlagfrequenz in Abb. 120); die Körpertemperatur lag bei Einsatz des Gleisvorbauzugs während der Zeit vor Ort bei $(37,45 \pm 0,26) \text{ °C}$ statt bei $(38,00 \pm 0,55) \text{ °C}$. Der Anteil schwerer dynamischer Arbeit im Bereich „Arme mit Oberkörpermuskulatur“ ging von 40,4 % der Beobachtungszeit auf 7,5 % zurück (Abb. 121); der Zeitanteil der Körperhaltung „Stehen stark gebeugt“ verringerte sich bei Einsatz der Maschine von 15,7 % auf 6,4 % der Beobachtungszeit (Abb. 122).

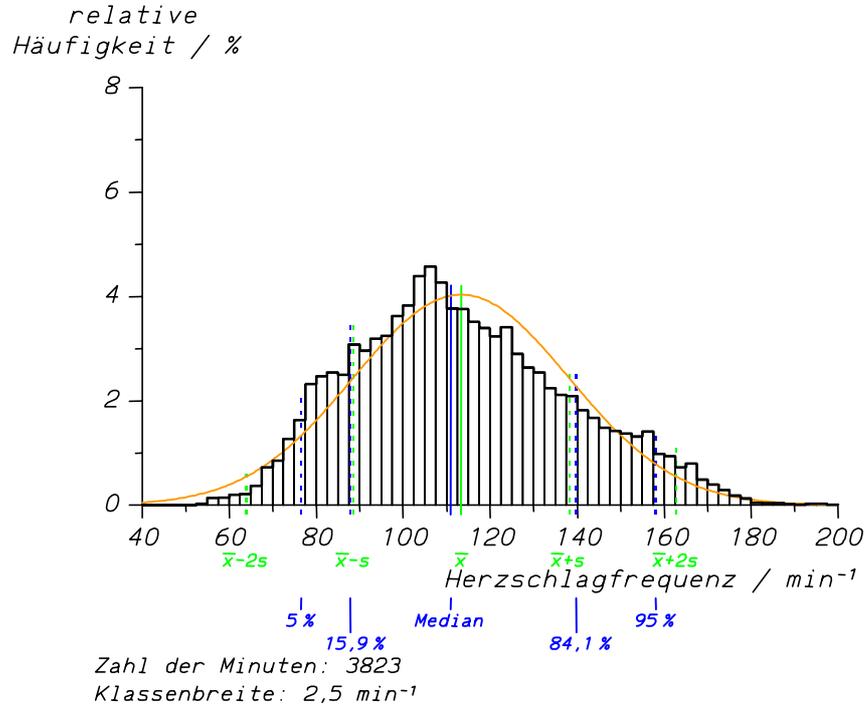
Die Schotterbetten waren bei beiden Arbeitsverfahren nicht gut vergleichbar: im konventionellen Verfahren mußte mehr Schotter ausgetauscht werden; da aber während des Auskofferns mit der Maschine die Beanspruchung der Bergleute recht niedrig liegt, hätte sich dieser Zeitabschnitt beim mechanisierten Verfahren andernfalls nur länger ausgedehnt und die mittlere Herzschlagfrequenz wäre noch niedriger gewesen.

Abb. 118 ist ein Beispiel dafür, daß auch ohne klimatische Belastung bei schwerer Körperarbeit hohe Körpertemperaturen auftreten; dem Verlauf der Körpertemperatur während der Nachtschicht ist ein leichter Temperaturabfall – bedingt durch den Tagesgang (vgl. beispielsweise auch Abb. 104)– überlagert.

Die Untersuchung zeigt, daß mit geeignetem technischen Aufwand eine bedeutende Verringerung der physischen Beanspruchung beim Gleisumbau auch unter den schwierigen Bedingungen des Steinkohlenbergbaus – wie etwa den beengten räumlichen Ver-

hältnissen – möglich ist. Aus arbeitsphysiologischer Sicht ist der Einsatz einer solchen Maschine zum Vorbau und Umbau von Gleisen sehr zu befürworten.

Konventioneller Gleisumbau - Zeit vor Ort



Gleisumbauzug - Zeit vor Ort

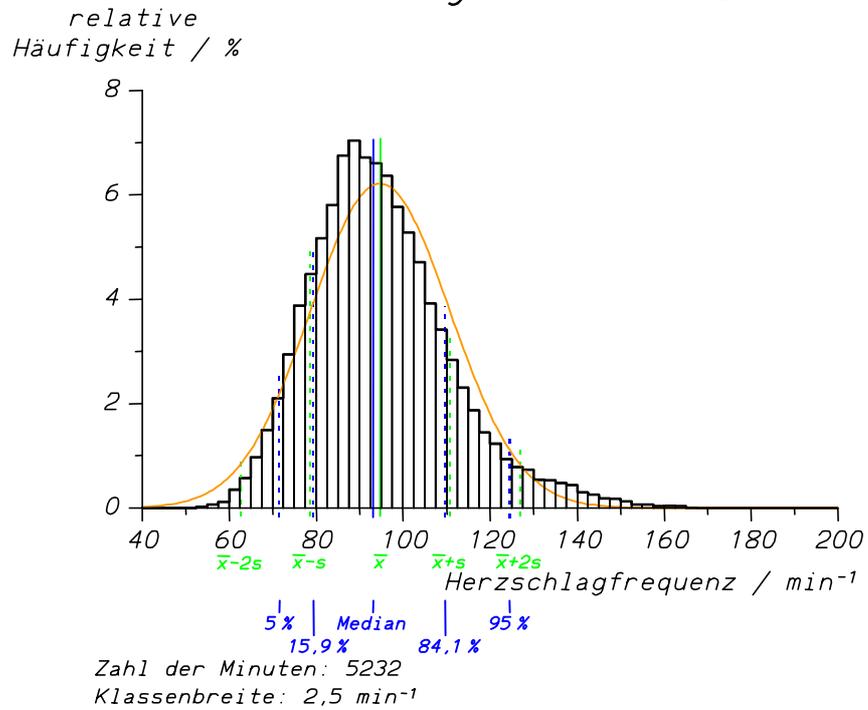


Abb. 120: Verteilungen der Herzschlagfrequenz für beide Arbeitsverfahren während der Zeit vor Ort ($113,4 \pm 24,7$) min⁻¹ bzw. ($94,7 \pm 16,1$) min⁻¹ (mit eingezeichneter empirischer Normalverteilung und statistischen Kennwerten).

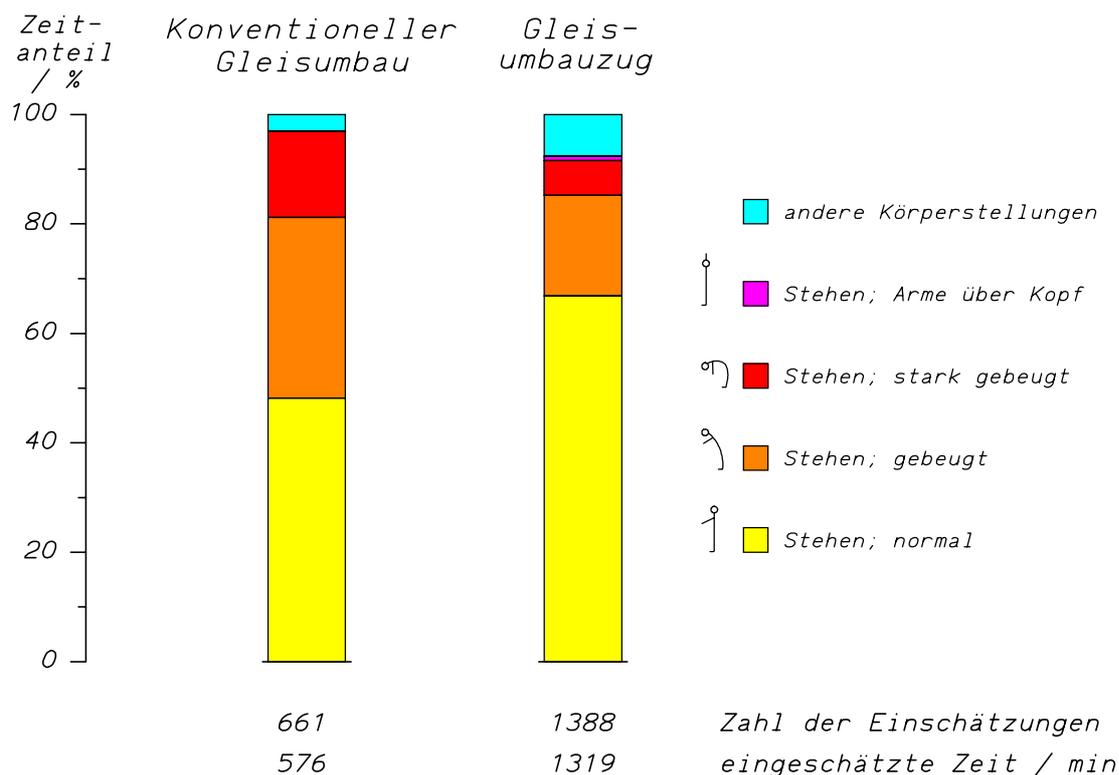


Abb. 121: Vergleich der Körperhaltungen bei konventionellem Gleisumbau und bei Einsatz des Gleisumbauzuges.

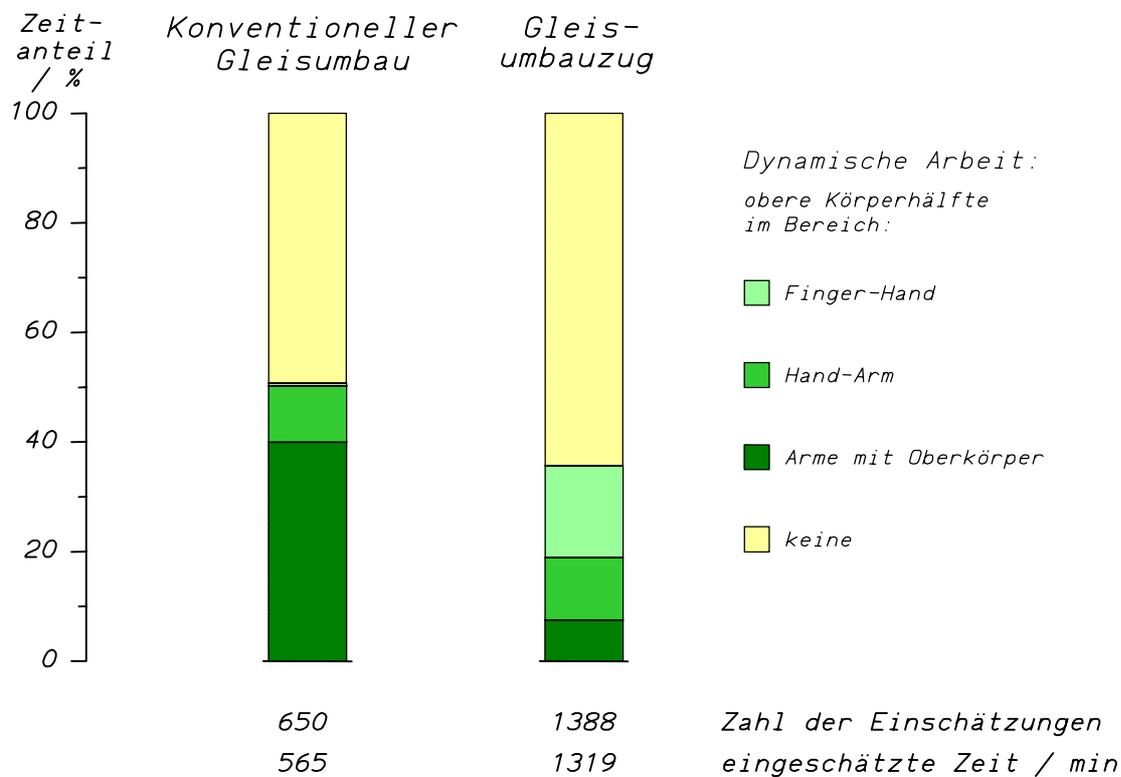


Abb. 122: Vergleich der Anteile dynamischer Körperarbeit (obere Körperhälfte) bei konventionellem Gleisumbau und bei Einsatz des Gleisumbauzuges.

7 Abschätzung des Risikos von Hitzearbeit

Zur Abschätzung des Risikos, durch Hitzeeinwirkung einen Gesundheitsschaden zu erleiden, sind nur wenige epidemiologische Erhebungen auf größerer Basis durchgeführt worden; in der wissenschaftlichen Literatur sind meist Einzelfälle in kleinen Kollektiven – in der Industrie oder bei militärischer Ausbildung – beschrieben worden. Einige Untersuchungen auf breiterer Grundlage werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

Inwieweit die Annahme einer schichtspezifischen Risikobereitschaft (*larrikin response*, die z.B. nach ALBRECHT ET AL. 1998 [6] zu einer erhöhten Prävalenz etwa der koronaren Herzerkrankungen bei Bergleuten in australischen Kohlenruben führt) möglicherweise auch einen Teil des Risikos für Gesundheitsstörungen unter Klimabelastung erklärt, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten zu analysieren.

7.1 Akute Auswirkungen: Erkrankungen unter Hitzebelastung

SCHMIDT veröffentlichte 1901 [332] einen umfangreichen Bericht über seine Erfahrungen als Schiffsarzt: Auf Hamburger Schiffen gab es in den Jahren 1898 - 1900 zwischen 1,4 % und 2 % Fälle von Hitzeerschöpfung oder Hitzschlag⁶⁴; von diesen Erkrankungen endeten im Jahr 1899 7 % und im Jahr 1900 3 % tödlich⁶⁵. „Dass Heizer zuweilen infolge der Hitze geistig verwirrt werden, Wutanfälle und Selbstmordideen bekommen (ein Verlangen, über Bord zu springen), ist bekannt. Man sollte den häufigen Selbstmord der Heizer (gerade der Heizer, nicht der Trimmer) nicht allein auf Konto des schlechten, moralisch minderwertigen Menschenmaterials setzen; es wäre dann doch ein sonderbarer Zufall, dass diese Selbstmordversuche gerade zur Zeit extrem hoher Temperaturen stattfinden. ...“⁶⁶

⁶⁴ bezogen auf die gesamte Besatzung, wobei SCHMIDT richtig feststellt, daß die Zahl der Erkrankungen eigentlich auf das Heizer- und Maschinenpersonal bezogen werden müßte, um die Verhältnisse richtig darzustellen.

⁶⁵ Zur Prophylaxe schlägt er vor, daß bei Neukonstruktionen von Schiffen (bei Schiffen, die sich schon in Betrieb befinden, wird sich nicht viel ändern lassen) die Größe der Kesselräume der Zahl und Größe der vorhandenen Kessel angepaßt ist, daß die Kessel und Herdtüren durch Schutzvorrichtungen die Wärmeleitung und Wärmestrahlung auf ein Minimum begrenzen und daß - neben der natürlichen Ventilation - eine künstliche Ventilation für den Fall vorgesehen wird, daß die natürliche Ventilation versagt; hierzu soll die Luft im Kesselraum nicht nur ventiliert werden, sondern es soll frische Luft von außen hereingeschafft werden. Es soll die Lufttemperatur im Arbeitsraum auf einen zahlenmäßig festgelegten Wert begrenzt werden können. Des weiteren sollen Trink- und Wohnhygiene an Bord verbessert werden.

⁶⁶ SCHWARZ (1928) [343]: *Hygiene des Heizpersonals auf Schiffen* führt die Abnahme der Erkrankungszahlen, der Wärmestauungen und der Selbstmorde der Feuerleute auf in Hamburg angekommenen Seeschiffen zum einen auf prophylaktische Maßnahmen (1. sorgfältige ärztliche Untersuchung vor der Anmusterung, 2. Erzielung möglichst günstiger Bedingungen im Arbeitsraum, 3. hygienisch einwandfreie Unterkunft, Baderäume usw., 4. hygienische Le-

WYNDHAM veröffentlichte 1962 [418] Statistiken, die die Inzidenz von Hitzschlägen für akklimatisierte eingeborene Bergleute in südafrikanischen Goldbergwerken während eines Zeitraums von drei Jahren in Abhängigkeit von der Feuchttemperatur am Arbeitsplatz angeben – getrennt für Fälle von Hitzschlag mit nicht-tödlichem und tödlichem Ausgang. Diese Datenerhebung wurde von WYNDHAM 1965 [422] auf fünf Jahre erweitert und um eine Analyse über die verursachenden Faktoren für Hitzschläge erweitert. Nach Angaben von KIELBLOCK (1987 [199]) ging die Mortalität durch Hitzschläge im südafrikanischen Goldbergbau von $93/10^5$ Arbeiter pro Jahr im Jahr 1930 einerseits durch Ausschluß hitzeuntauglicher Bergleute und andererseits eine Akklimatisation der Anfänger unter Aufsicht teilweise über Tage, teilweise aber auch unter Tage auf $1,2/10^5$ Arbeiter pro Jahr zwischen 1980 und 1984 zurück. – Auf die von WYNDHAM vorgelegten Daten stützen sich fast alle Risikoabschätzungen für Hitzearbeit, die in den vergangenen Jahren vorgelegt wurden, wie z.B. WENZEL ET AL. 1989 [412] oder die Risikoabschätzung, die ISO 7933 (1989) – im Hinblick auf die Erhöhung der Körpertemperatur – zugrunde liegt.

LIND zeigte jedoch schon 1970 [225], daß die Risikoabschätzungen aus dem südafrikanischen Goldbergbau die Verhältnisse im europäischen Kohlenbergbau nicht richtig beschreiben: von 1955 bis 1965 wurde im europäischen Kohlenbergbau kein Fall von Hitzschlag registriert, während – unter Anwendung der WYNDHAMSchen Daten – zumindest ein tödlicher Hitzschlag und vier bis fünf Hitzschläge mit nicht-tödlichem Ausgang pro Jahr zu erwarten gewesen wären. Da zur damaligen Zeit in Südafrika die eingeborenen Bergleute jeweils nur ein Jahr im Bergbau arbeiteten, während im europäischen Bergbau die Fluktuation damals – nach LIND – 20 % pro Jahr betrug, hängt die Abschätzung des Risikos für einen Hitzschlag davon ab, ob man annimmt, daß das Risiko für einen Bergmann, einen Hitzschlag zu erleiden, während seiner gesamten Arbeitszeit im Bergwerk gleich hoch ist, oder ob das Risiko nur einmal – z.B. zu Beginn der Arbeit unter Tage – besteht: LIND errechnete für die betrachteten Jahre zwischen 1955 und 1965, daß zwischen 11 und 40 Hitzschläge in Europa zu erwarten gewesen wären, während tatsächlich kein einziger Hitzschlag beobachtet wurde.

LIND diskutiert eine Reihe von möglichen Ursachen für das geringere Hitzschlagrisiko im europäischen Bergbau: er hält ethnische physiologische Unterschiede als Ursache für das unterschiedliche Risiko der zwei Gruppen von Bergleuten in Südafrika und Europa nicht für maßgebend, weiterhin auch nicht unterschiedliche Grade an Akklimatisation (in Südafrika treten 70 % der Hitzschläge während der ersten zwei Arbeitswochen auf, wo noch keine volle Akklimatisation ausgebildet ist, andererseits verlieren Bergleute in Europa nach ihrem Jahresurlaub ihre Akklimatisation und müssen sich dann neu akkli-

bensführung und 5. Fürsorgeeinrichtungen), zum anderen auf das Vordringen der Ölfeuerung auf Dampf- und Motorschiffen zurück, wodurch die Anzahl der Heizer und Trimmer auf Seeschiffen relativ viel geringer ist als früher.

matisieren). Zum Nachteil der europäischen Bergleute sollte sich das im Mittel höhere Alter auswirken, das im allgemeinen als nachteilig für die Beanspruchung unter Hitzebelastung angesehen wurde (vgl. aber auch Kapitel 2.3.2.7). Eine ungeklärte Frage ist nach LIND, ob europäische (*caucasian*) Probanden unter Klimabelastung in wasserdampfgesättigter Atmosphäre ebenfalls eine so rechtsschiefe Verteilung aufweisen, wie die eingeborenen Bergleute (Bantu) in WYNDHAMS Untersuchungen: entsprechend Kapitel 5.4 ist dies zumindest für das relativ homogene Kollektiv der Grubenwehr offenbar nicht der Fall: dieses Ergebnis hat Auswirkungen für die Abschätzungen der Wahrscheinlichkeit, bei vorgegebenem Mittelwert der Körpertemperatur in einem Kollektiv einen vorgegebenen oberen Grenzwert zu erreichen. – LIND kommt zu dem Schluß, daß andere als physiologische Gegebenheiten den Unterschied zwischen beiden exponierten Gruppen verursachen: WYNDHAM stellte fest, daß in vielen Fällen offensichtlich eine unzureichende Aufsicht über die Bergleute dazu führte, daß die Bergleute – im Hinblick auf das jeweils vorhandene Klima – zu schwer arbeiteten. In Europa sind sich – wie LIND festhält – sowohl die Arbeitgeber als auch die Gewerkschaften bewußt, welche Probleme mit der Arbeit unter schwerer Hitzebelastung verbunden sind; ohne eine Erfassung der Arbeitsschwere bleibt eine Vorhersage des Risikos von Hitzschlägen auf diejenigen Arbeits- und Klimabedingungen beschränkt, unter denen die Risiken ermittelt wurden.

Außerhalb des Bergbaus untersuchten DINMAN ET AL. (1974 [61]) 48 Arbeiter in Aluminiumschmelzen und fanden während 1 580 Stunden untersuchter Arbeitszeit – bei im Mittel $WBGT = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – keine signifikanten Erhöhungen von Herzschlagfrequenz oder Körpertemperatur (über circadiane Anstiege hinaus, vgl. auch Kapitel 6.3.2) bei einer mittleren Dehydratation von 0,27 %. Insgesamt wurden im Jahr 1972 in den untersuchten Aluminiumschmelzen während der heißen Jahreszeit (Mai bis September) für alle Arbeiter in der Elektrolysehalle an den Schmelzöfen (*potroom workers*) – die den höchsten Klimabelastungen ausgesetzt sind –, 14 hitzebedingte Gesundheitsstörungen (plus 7 Gesundheitsstörungen, deren Verursachung durch Hitzebelastung fraglich war) erfaßt, was einem Risiko von 6,2 Zwischenfällen auf 10^6 Arbeitsstunden entsprach. Alle Fälle traten in den heißen Sommermonaten auf und waren nicht schwerwiegend (kein Fall von Hitzschlag), so daß die Arbeitsschicht beendet werden konnte (falls die Gesundheitsstörung nicht gegen Ende der Schicht auftrat) und keine Arbeitstage durch Krankenschreibung ausfielen. – Bezogen auf das ganze Jahr und alle Beschäftigten in den untersuchten Aluminiumschmelzen wird eine Rate für hitzebedingte Gesundheitsstörungen unterhalb von 1 auf 10^6 Arbeitsstunden angegeben.

JENSEN gab (1983 [157]) für das Jahr 1979 in einer Erhebung für 26 Staaten der U.S.A. Raten für Entschädigungen bei hitzebedingten Gesundheitsstörungen (*heat illness compensation case rates*) für größere Industriezweige an, wobei der Bergbau nach Landwirtschaft (9,16 Fälle pro 100 000 Beschäftigten) und Bauindustrie (*construction*; 6,36 Fälle pro 100 000 Beschäftigten) mit 5,01 Fällen pro 100 000 Beschäftigten auf dem dritten Rang lag – JENSEN vermutete hauptsächlich Fälle von Hitzschlag und Hitzeerschöpfung, nicht

aber Hitzekrämpfe, als Ursache für die Entschädigungen. – Zum Vergleich hat der Bergbau bei kältebedingten Gesundheitsstörungen die höchste Rate von Entschädigungen (*cold injury compensation case rate*): 10,01 Fälle pro 100 000 Beschäftigten, gefolgt von der Bauwirtschaft mit 4,84 Fällen pro 100 000 Beschäftigten und dem Transportwesen (*transport*) mit 4,62 Fällen pro 100 000 Beschäftigten; von diesen Fällen sind mehr als dreiviertel Erfrierungen (*frostbite*) an Fingern, Händen, Zehen, Füßen, Ohren und Nase.

Die Schwierigkeiten der Diagnose von hitzebedingten Gesundheitsstörungen wird von DINMAN & HORVATH ([62], 1984) für 343 Zwischenfälle in der Aluminium-Industrie diskutiert (244 770 Personenjahre unter Risiko während eines Zeitraums von 10 Jahren). Die Autoren geben Schemata für die Diagnose von Hitzekollaps, Hitzeerschöpfung und Hitzekrämpfen an. Beide Gutachter erkennen 29 Zwischenfälle übereinstimmend als klimabedingt an und jeweils zusätzlich 64 bzw. 12 Fälle im Dissens; je nach den angelegten Diagnosekriterien (strenge Kriterien: Übereinstimmung beider Gutachter / positive Bewertung als klimabedingter Zwischenfall durch mindestens einen der beiden Gutachter / Anerkennung aller gemeldeten Fälle) verändert sich das Risiko für eine Gesundheitsstörung durch Klimaeinwirkung zwischen 0,12/1000 Personenjahre und 1,4/1000 Personenjahre. – Die geringe diagnostizierte Anzahl von Hitzekollapsen führen die Autoren auf die Art der Arbeit in den Aluminiumschmelzen zurück, bei der die Hitzebelastung intervallweise auftritt und so den Arbeitern eine Selbsteinteilung der Arbeitsschwere (*self-pacing*) ermöglicht.

7.2 Daten aus dem Deutschen Steinkohlenbergbau

Die Arbeit in klimatisch belasteten Arbeitsbereichen wird im Steinkohlenbergbau durch die Klima-Bergverordnung [432] geregelt, in der oberhalb einer Lufttemperatur t_a von 28 °C bzw. oberhalb einer Basis-Effektivtemperatur (BET) nach YAGLOU [428] von 25 °C ein Arbeitsplatz als klimatisch belastet eingestuft wird. Die Arbeitszeit im warmen Klima ist dann – je nach den Klimabedingungen – verkürzt. Nach § 13 Abs. 1 Nr. 4 Buchstabe a der Klima-Bergverordnung hat der Unternehmer über die „Art und Anzahl ihm bekannt gewordener Fälle von Gesundheitsstörungen, die nach ärztlichem Urteil auf eine Beschäftigung bei einer Trockentemperatur von mehr als 28 °C oder einer Effektivtemperatur von mehr als 25 °C zurückzuführen sind“ Aufzeichnungen zu führen.

Eine Aufteilung klimabedingter Gesundheitsstörungen von 553 bekanntgegebenen Fällen innerhalb des Zeitraums von 1984 bis 1989 gibt MARTH [245] im Jahr 1990: 84 % dieser Meldungen fallen in die Kategorie: „Kopfschmerz, Übelkeit, Schwäche, Atemnot, Erbrechen, Schweißausbruch“ und 15 % in die Kategorie: „Hitzekollaps, Hitzeerschöpfung, Hitzeohnmacht, Hitzschlag“; in diesem Zeitraum sind keine andauernden Schädigungen durch Klimaeinwirkung beobachtet worden. MARTH schlägt – aufgrund von Inkon-

sistenzen der Daten – vor, die Dokumentation bekanntgewordener Fälle von Gesundheitsstörungen durch Klimaeinwirkungen kritisch zu überprüfen und alle Fälle vollständig zu erfassen: nur so kann der Kenntnisstand der Arbeitsmedizin verbessert werden und nur so können neue Ansätze für wirkungsvolle betriebliche Vorsorgemaßnahmen gefunden und Aussagen darüber erhalten werden, ob die in der Klima-Bergverordnung festgelegten Temperatur- oder Klimawerte sowie die vorgeschriebenen Schutzmaßnahmen ausreichend sind.

Inzwischen wurde ein erweiterter und verbesserter Erfassungsbogen erarbeitet, der vom Sanitäter („Heildiener“) ausgefüllt wird und ihm sowohl Entscheidungshilfe für zu treffende Maßnahmen gibt, als auch seine Beobachtungen übersichtlich für den weiterbehandelnden Arzt oder Notarzt dokumentiert. Dieser Bogen wurde der wissenschaftlichen Öffentlichkeit vorgestellt (LENAERTS-LANGANKE ET AL. 1996 [219]), nach einer Erprobungsphase nochmals verbessert und wird nun in der neuen Fassung auf den Bergwerken der DSK eingesetzt.

Im Bergbau ist eine Diagnosestellung noch schwieriger als in anderen Industriezweigen: bis ein betroffener Bergmann sich in der Verbandsstube oder bei dem Arbeitsmediziner melden kann, vergeht ein Zeitraum, der deutlich mehr als eine Stunde betragen kann (vgl. z.B. in Abb. 114 eine Fahrungszeit von mehr als 90 Minuten); der Bergmann verbringt diese Zeit zum Teil im Personenzug in kühlen Wettern und wird in dieser Zeit – etwa auf dem Rückweg unter Tage oder nach der Ausfahrt – sinnvollerweise auch trinken, so daß sich sein Zustand möglicherweise deutlich verbessert hat und die Umstände, seine Befindlichkeit sowie entsprechende Symptome zum Zeitpunkt des Schichtabbruchs danach nur noch erfragt werden können. – Da die Körpertemperatur im Mittel der Untersuchungen beispielsweise zum Zeitpunkt der Ausfahrt unter dem Wert bei der Anfahrt liegt (Abb. 105 unten), wird ein deutlich erhöhter Wert der Körpertemperatur zum Zeitpunkt der Ausfahrt auf eine vorliegende Infektion oder eine ausgeprägte Störung der Thermoregulation hinweisen; bei einem Wert der Körpertemperatur im Normbereich kann man dagegen über die Körpertemperatur zum Zeitpunkt des Schichtabbruchs nichts aussagen.

Abschätzung des Risikos von mutmaßlichen Klimazwischenfällen

Die Daten einer Schachtanlage im mittleren Ruhrgebiet mit einer Reihe von heißen Betriebspunkten wurden für das Jahr 1995 analysiert (KALKOWSKY ET AL., 1997 [164]): insgesamt wurden 20 mutmaßliche Klimazwischenfälle an die Behörde gemeldet. Hiervon entfielen 16 Zwischenfälle auf Ruhrkohle-Betriebsangehörige (bei insgesamt 470 550 Schichten) und 4 auf Betriebsangehörige anderer Unternehmen (bei insgesamt 115 453 Schichten), was jeweils zu einem Risiko von etwa 1:29 000 für die verfahrenen Schichten führt. Für die Bergarbeiter der Ruhrkohle Bergbau AG liegen verwertbare Aufzeichnungen der Klimadaten vor (Tabelle 19 zeigt die Schichten nach Klimastufen aufgeteilt): hier wurden auf 322 157 Schichten an klimatisch belasteten Betriebspunkten (von insgesamt 423 237 verfahrenen Schichten) 15 mutmaßliche Klimazwischenfälle registriert,

was einem mittleren Risiko von 1:21 000 für die an heißen Betriebspunkten geleisteten Schichten entspricht, oder einem Zwischenfall auf etwa 127 Arbeitsjahre.

Tabelle 19: Verteilung der im Jahr 1995 verfahrenen Schichten der Bergarbeiter eines Bergwerks im mittleren Ruhrgebiet⁶⁷ auf die Klimastufen entsprechend der Klima-Bergverordnung [432].

Klimastufe	Definition	Schichten im Jahr 1995 (Bergarbeiter)
1	$t_a \leq 28 \text{ °C}$ oder $BET \leq 25 \text{ °C}$	101 080
2	$28 \text{ °C} < t_a$ oder $25 \text{ °C} < BET \leq 28 \text{ °C}$	308 008
3	$28 \text{ °C} < BET \leq 29 \text{ °C}$	11 624
4	$29 \text{ °C} < BET \leq 30 \text{ °C}$	2 435
5	$30 \text{ °C} < BET \leq 31 \text{ °C}$	90
6	$31 \text{ °C} < BET \leq 32 \text{ °C}$	0
Σ 1-6	alle Schichten	423 237

Als Grund für den Schichtabbruch wurde von den Bergleuten in den meisten Fällen Übelkeit, Schwindelgefühl oder Brechneigung, in jeweils drei Fällen Kreislaufschwäche ("Schwarzsehen vor den Augen"), Atemnot und Erschöpfung, in zwei Fällen Kopfschmerzen und in einem Fall Krämpfe in den Oberschenkeln angegeben (Mehrfachnennungen). – In der weitaus überwiegenden Mehrzahl der Fälle läßt sich zum Zeitpunkt der Vorstellung beim Arzt keine objektivierbare Gesundheitsstörung mehr feststellen.

Bei diesen 20 vermutlich durch Klimaeinwirkung verursachten Schichtabbrüchen im Jahr 1995 handelte es sich jeweils um verschiedene Bergleute; von denjenigen mutmaßlichen Klimazwischenfällen, wo eine Einordnung in Klimastufen möglich war, lag kein Fall in Klimastufe 5, jeweils ein Fall lag in Stufe 3 und 4, der Rest lag unterhalb Klimastufe 3 (Tabelle 19). Physiologische Untersuchungen weisen auf eine Anpassung der Arbeitsintensität der Bergleute an die Klimabelastung hin (Kapitel 2.4.2 und 6.3.6.2, ebenfalls KAMPMANN ET AL. 1997 [186] sowie KAMPMANN & KALKOWSKY 1999 [189]), so daß die Ursache für einen Schichtabbruch möglicherweise nicht vorrangig an den Klimabe-

⁶⁷ KALKOWSKY, B., B. KAMPMANN, G. BRESSER, C. PIEKARSKI: *Hitzeorthostase - ein wesentliches Indiz für Hitzeunverträglichkeit?* [164] als Poster auf der Jahrestagung der DGAUM 1997ausgestellt.

dingungen am Arbeitsplatz lag, sondern auch an mangelnder Hitzegegönung oder mangelnder Erfahrung bei der Selbsteinteilung der Arbeitsschwere, sowie ungewohnten Arbeitsbedingungen wie Ausfall eines Kühlaggregats oder unvorhergesehenen Reparaturarbeiten, die – bei erhöhter Arbeitsschwere – zu ungewohnt hohen Beanspruchungsreaktionen führen können.

In der gesamten Ruhrkohle Bergbau AG (jetzt Deutsche Steinkohle AG) wurden in den letzten Jahren folgende Zahlen von geleisteten Schichten und mutmaßlichen Klimazwischenfällen registriert:

Tabelle 20: Verfahrene Schichten, Schichten in klimatisch belasteten Bereichen (Klimastufe 2 bis 6, siehe Tabelle 19) und mutmaßliche Klimazwischenfälle in der Ruhrkohle Bergbau AG / Deutsche Steinkohle AG (Regionalbereich Ruhr) (Die Zahl der Schichten bezieht sich auf die Bergarbeiter der Ruhrkohle Bergbau AG; die mutmaßlichen Klimazwischenfälle beinhalten auch Angestellte der Ruhrkohle Bergbau AG sowie Mitarbeiter anderer Firmen; das errechnete Risiko ergibt sich daher um etwa 20 bis 30 % zu hoch).

Jahr	verfahrene Schichten / 10 ⁶	Schichten im Klima / 10 ⁶	Anteil der Schichten im Klima / %	Mutmaßliche Klimazwischenfälle	Risiko eines mutmaßlichen Klimazwischenfalls pro 10 ⁶ Schichten
1992	9,46	4,47	47	174	38,9
1993	8,17	3,88	47	189	48,7
1994	7,41	3,65	49	86	23,6
1995	7,23	3,77	52	124	32,9
1996	7,06	3,53	50	115	32,5
1997	6,67	3,53	53	68	19,3
1998	5,69	2,67	47	103	38,6
1999	5,10	2,53	50	32	12,6

Es läßt sich von 1995 bis 1998 eine Häufung der Ausfahrten in der zweiten Jahreshälfte feststellen; ein Anstieg während der zweiten Hälfte der Sommerferien und danach ist nicht deutlich ausgeprägt (Abb. 123). – Zur Bewertung der Verteilung der Klima-Ausfahrten innerhalb der erfaßten Jahre sind weitere Analysen notwendig.

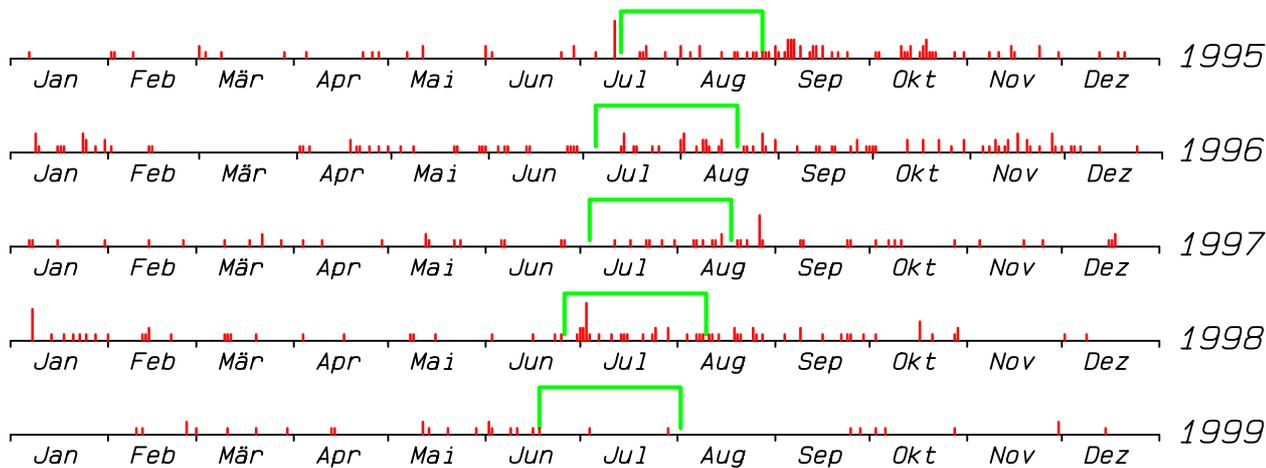


Abb. 123: Verteilung der Ausfahrten innerhalb der Jahre 1995 bis 1999, soweit das Datum der Ausfahrt ausfindig gemacht werden konnte (90 % der gemeldeten Klima-Ausfahrer). Mehrere Ausfahrten an einem Tag werden durch längere Markierungen dargestellt; die Lage der Sommer-Schulferien ist markiert.

Da von 1992 bis 1999 kein mutmaßlicher Klimazwischenfall mit bleibenden Gesundheitsschäden gemeldet wurde, bietet sich ein Vergleich mit den Daten aus der Aluminiumerzeugung von DINMAN ET AL. ([61], siehe S. 203) für die Arbeiter in den Elektrolysehallen an, wo ebenfalls keine schwerwiegenden Gesundheitsstörungen auftraten; dort ergab sich ein Risiko für eine hitzebedingte Gesundheitsstörung von $0,8/10^6$ Schichten und bei DINMAN & HORVATH ([62] siehe S. 204) je nach Schärfe der Diagnose ein Risiko von etwa $0,6/10^6$ bis $7/10^6$ Schichten. Das Risiko im Steinkohlenbergbau liegt höher (Tabelle 20), was auch zu erwarten war, da die Bergleute den hitzebelasteten Arbeitsplatz – wegen langer Wege im abwitterbelasteten Bereich – oft nicht für kurzfristige Erholungspausen verlassen können (vgl. z.B. Abb. 65).

8 Verbesserung von Klimasummenmaßen am Beispiel von ISO 7933 (1989)

Wenn man die letzte Klimavollerhebung im deutschen Steinkohlenbergbau (Voss [392]) aus dem Jahr 1986 zugrundelegt, ergibt sich für die wärmsten Meßpunkte in allen Abbaubetriebspunkten eine Verteilung von Lufttemperatur und -feuchte entsprechend Abb. 124; eingezeichnet sind die Grenzlinien für die Basis-Effektivtemperatur nach der Klima-Bergverordnung [432] unter der Annahme einer mittleren Windgeschwindigkeit von $v_a = 1,7 \text{ m/s}$, die in unserer Studie beim Herrichten und Ausrauben von Streben [175] erhoben wurde; in der Untersuchung an heißen Betriebspunkten in Kapitel 6 ergab sich eine mittlere Windgeschwindigkeit von $v_a = 1,8 \text{ m/s}$ (Tabelle 14).

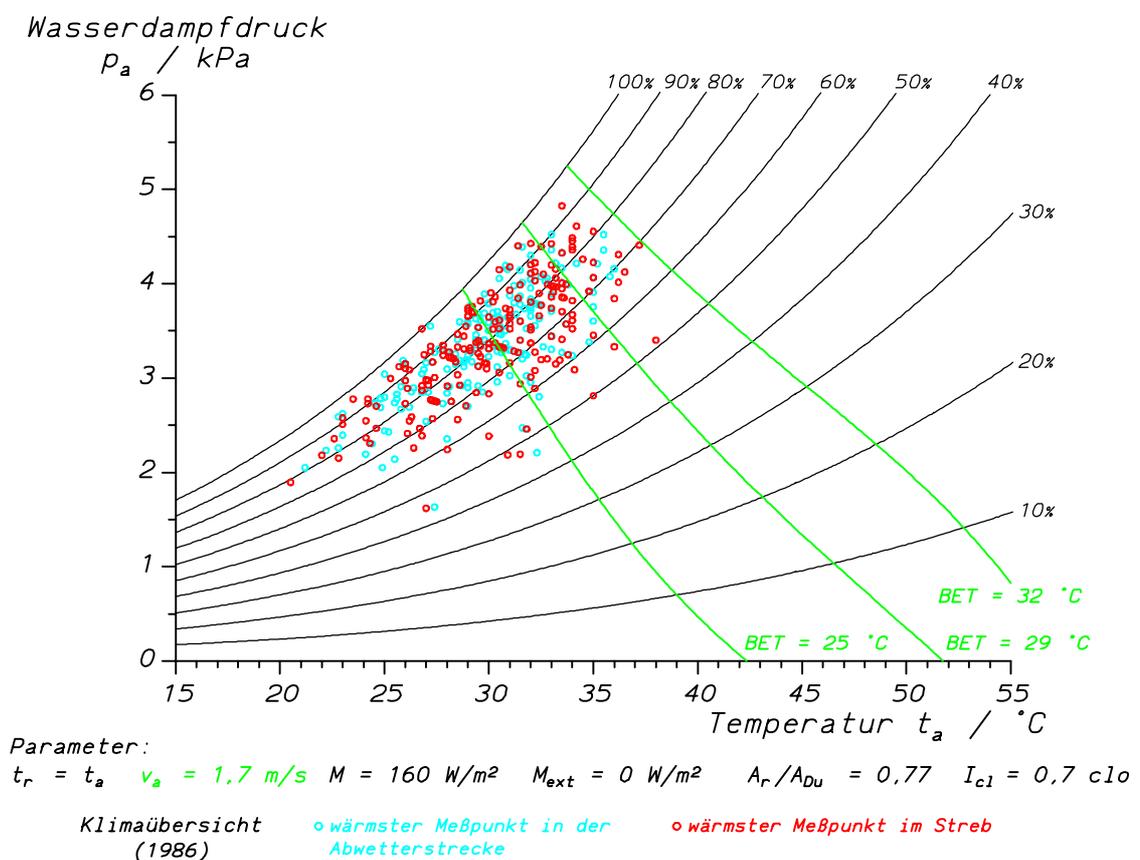


Abb. 124: Expositionsgrenzen entsprechend der Basis-Effektivtemperatur (gemäß KlimaBergV [432]).

Da – gemäß den ISO-Normen – bei der Beurteilung von Hitzebelastung zunächst ISO 7234 angewendet werden soll, sind in Abb. 125 zu den Klimadaten der wärmsten Meßpunkte in den Abbaubetrieben die Expositionsgrenzen entsprechend dem WBGT-Index (ISO 7243) für verschiedene Arbeitsschweren eingezeichnet, wobei die natürliche Feuchttemperatur – die zur Berechnung des WBGT-Index erforderlich ist – entsprechend MALCHAIRE [239] berechnet wurde. Wie leicht zu erkennen ist, wird nach ISO 7243 – je nach Arbeitsschwere – die Arbeit an bis zu dreiviertel aller Abbaubetriebspunkte (bezüglich des wärmsten Meßpunktes) untersagt, und auch sehr leichte Arbeit ist entsprechend dieser Norm an fast 20 % der Abbaubetriebspunkte nicht zulässig.

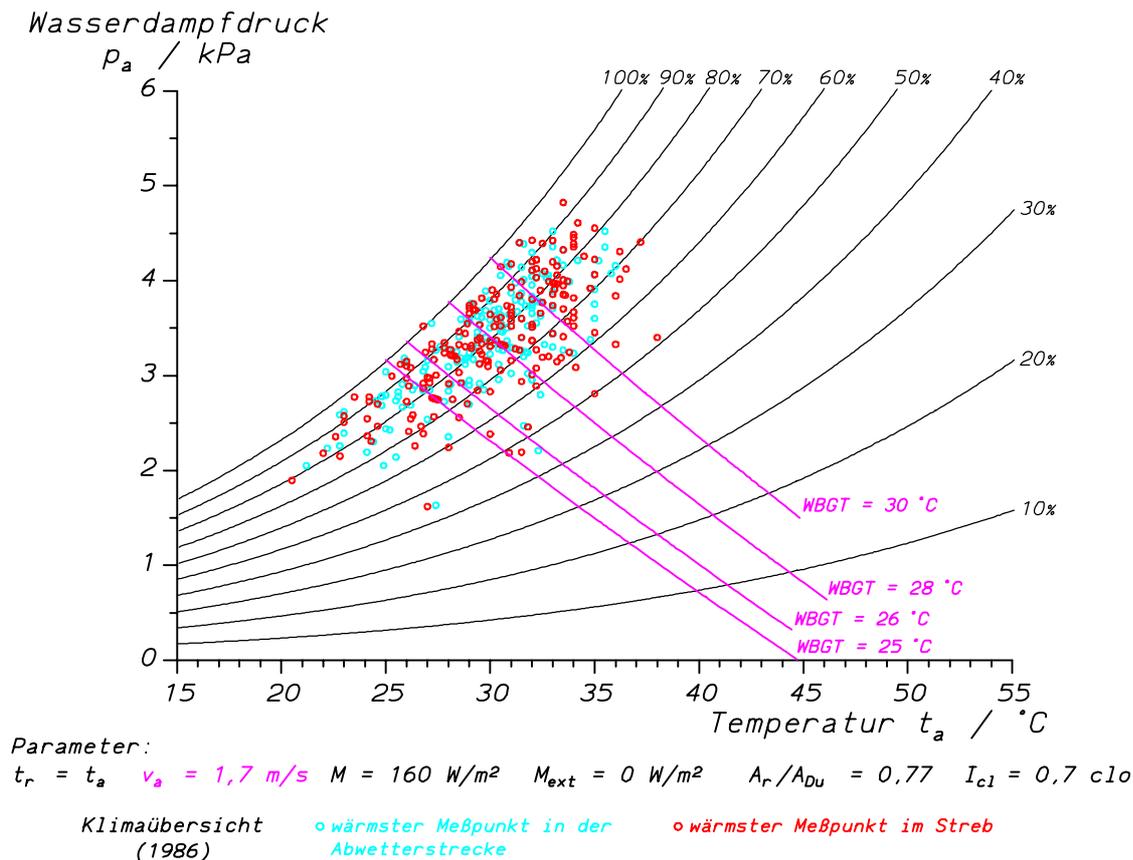


Abb. 125: Expositionsgrenzen entsprechend WBGT (ISO 7243)⁶⁸.

Bei einem Verbot der Hitzearbeit nach ISO 7243 soll die Norm ISO 7933 (1989) zur Beurteilung herangezogen werden; so sind in Abb. 126 die entsprechenden Grenzlinien für die Bewertungskategorien „Alarm“ und „Gefahr“ sowohl für nichtakklimatisierte als auch für akklimatisierte Personen eingetragen worden, wobei eine mittlere Arbeitsschwere entsprechend unserer Untersuchung beim Herrichten und Ausrauben von Streben [175] für die Berechnung der Grenzlinien angenommen wurde.

ISO 7933 bewertet mehr als die Hälfte der Abbaubetriebspunkte mit der Beurteilung „Gefahr, auch für hitzeakklimatisierte Personen“ – wenn diese Einstufung einen Sinn haben soll, dann müßten bei mehreren Millionen Schichten im Jahr, in denen an klimabelasteten Betriebspunkten gearbeitet wird (vgl. Tabelle 20), bleibende Gesundheitsschäden durch Hitzeeinwirkung erwartet werden; dies war in dem Zeitraum, für den in Tabelle 20 Zahlen erhoben werden konnten, glücklicherweise jedoch nicht der Fall.

⁶⁸ ISO 7243 geht von einer Wärmeisolation der Bekleidung von $I_{cl} = 0,6$ clo aus, während die Bekleidung der Bergleute vor Ort (Unterhemd und lange Hose) von uns mit $I_{cl} = 0,7$ clo eingeschätzt wurde.

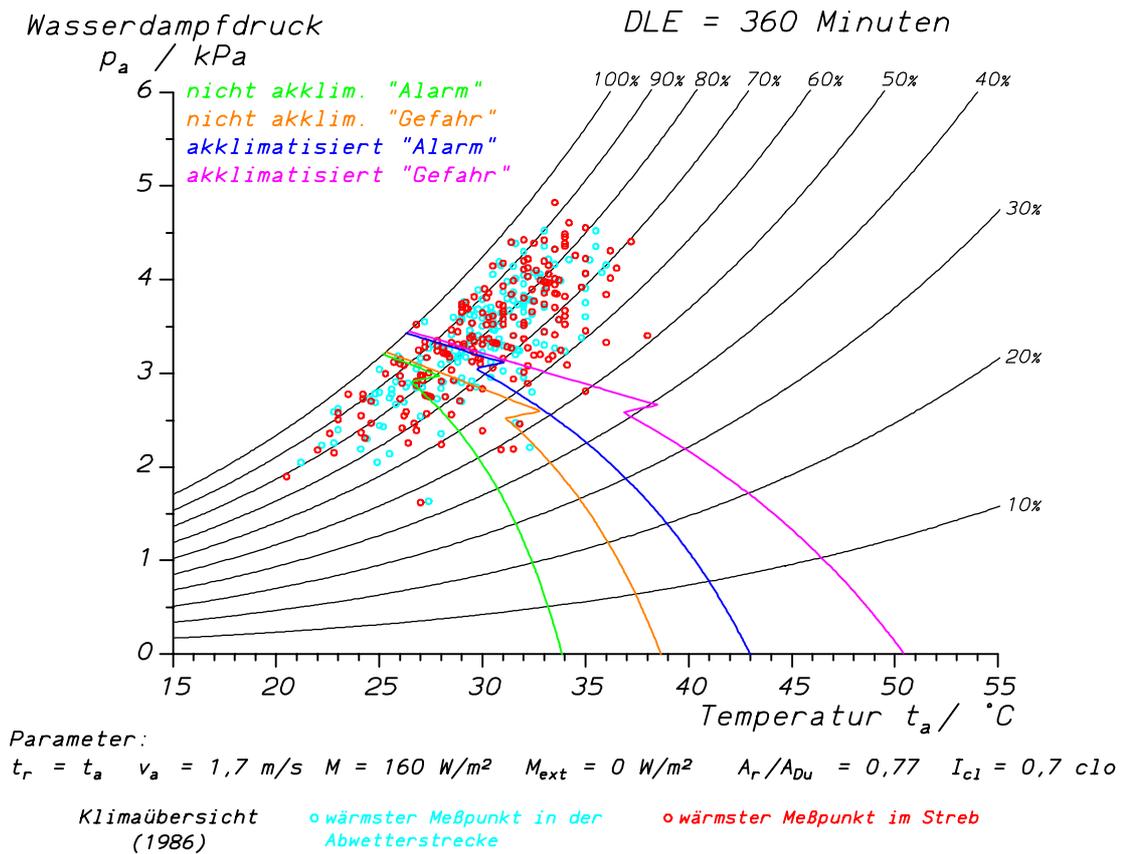


Abb. 126: Expositionsgrenzen gemäß dem Index „Erforderliche Schweißrate“ (ISO 7933; 1989) für die unterschiedlichen Bewertungskategorien (KAMPMANN 1994 [173]).

Zusammen mit einer Reihe anderer Autoren wurden die Widersprüche und Unzulänglichkeiten innerhalb des in ISO 7933 verwendeten Wärmebilanzmodells der *erforderlichen Schweißrate* SW_{req} , die zu dieser übervorsichtigen Fehlbeurteilung der Klimabelastung geführt haben, aufgezeigt (z.B. KAMPMANN und PIEKARSKI [182], [183] und [190]) und in das Normungsgremium eingebracht. Die der Norm ISO 7933 zugeordnete CEN-Norm DIN EN 12 515 wurde daraufhin mit Warnvermerken für die Anwendung der Norm in feucht-warmen Klimabereichen, bei hoher Windgeschwindigkeit, bei hoher Belastung durch mit Wärmestrahlung und im Fall schweißdurchtränkter Bekleidung versehen, und im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms BIOMED 2 wurde eine internationale Arbeitsgruppe gegründet, die die vorgetragenen Kritikpunkte aufarbeiten sollte.

Aus den Arbeiten des Autors gingen Daten der Klimakammeruntersuchungen zur besseren Bestimmung der Hauttemperatur aus den Belastungsgrößen [249], Daten zur Rehydratation in Feldversuchen (entsprechend Abb. 84) und zur Verteilung der Körpertemperatur bei hitzeexponierten Personen (Abb. 64; „Std4“) in das neu erarbeitete Modell der Wärmebilanz ein.

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe wurden 1999 auf einem Abschlußsymposium in Barcelona der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zur Diskussion vorgestellt [240]; sie bilden die Grundlage für die anstehende Überarbeitung der ISO 7933. Da an dem Wärmebilanzmodell grundlegende Veränderungen vorgenommen wurden, wurde eine neue Bezeichnung gewählt: *Predicted Heat Strain-Index (PHS)*. Im Rahmen dieses Symposiums wurde ein Vergleich der Klimabewertung des neuen Klimaindex mit ISO 7933 (1989) erarbeitet (KAMPMANN ET AL. 1999 [188]). Abb. 127 zeigt die Bewertung der Klimaexposition durch den neuen Index *PHS*: Entsprechend den eingezeichneten Bewertungskriterien wird jetzt nur noch für einige extrem feucht-warme Arbeitsplätze die Arbeit untersagt. Diese Bewertung entspricht den Erfahrungen im deutschen Steinkohlenbergbau (Tabelle 20) sehr viel besser als die Bewertung durch ISO 7933 (1989).

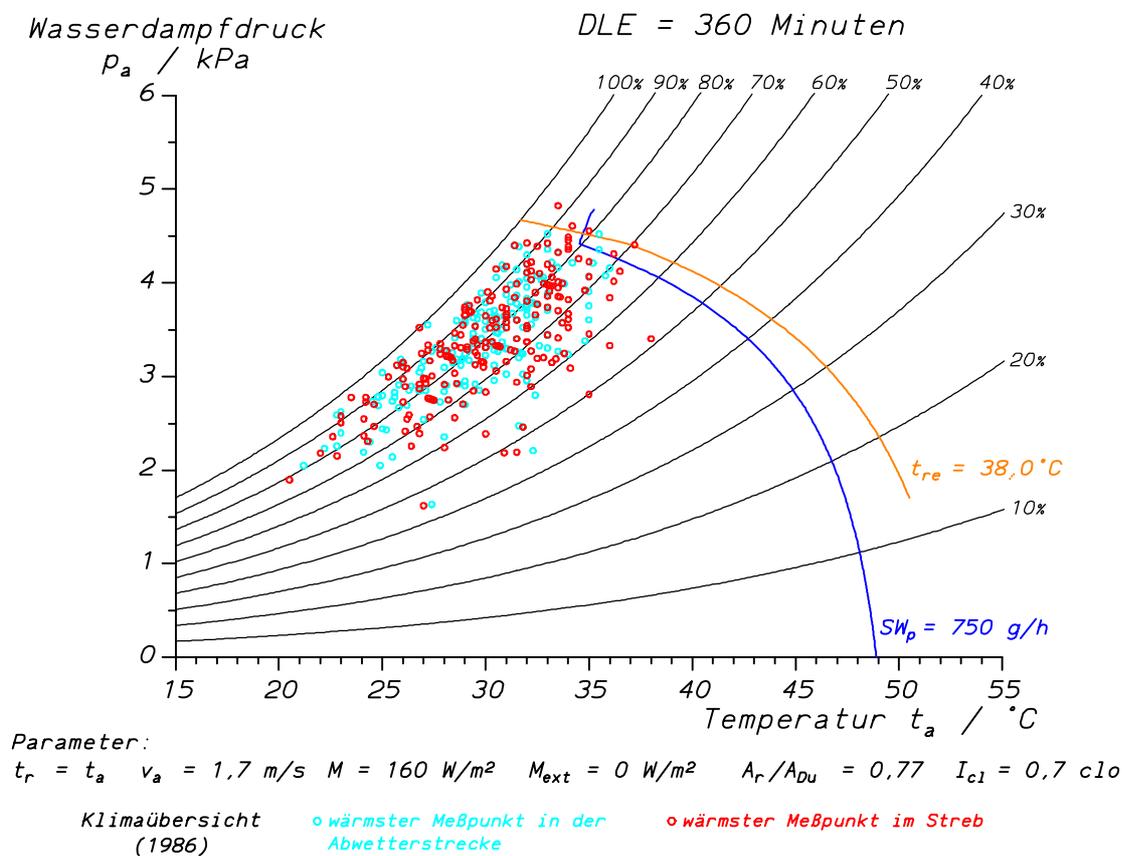


Abb. 127: Expositionsgrenzen für den neu entwickelten Index „Predicted Heat Strain“ (PHS), der demnächst in ISO 7933 das bisherige Modell der Wärmebilanz ersetzen wird.

9 Diskussion der Ergebnisse und Schlußfolgerungen für die Praxis

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der hier vorgelegten Arbeit unter verschiedenen Gesichtspunkten diskutiert werden.

9.1 Zur Organisation der Arbeit in Hitze

Die Organisation von Arbeit an hitzebelasteten Arbeitsplätzen läßt sich – je nachdem wie schwer die Hitzebelastung ausfällt – systematisch in mehreren Schritten verbessern:

- zunächst muß versucht werden, die Klimabelastung so gering wie möglich zu halten; ein strategischer Ansatz zur Problembeschreibung und –lösung in drei Stufen wurde beispielsweise von MALCHAIRE ET AL. 1999 [241] vorgeschlagen. Vorrangig sollte das Klima am Arbeitsplatz durch technische Maßnahmen in den Bereich des thermischen Komforts gebracht werden – falls dies nicht möglich ist, sind auch persönliche Kühlausrüstungen einsetzbar (Kapitel 2.3.2.5).
- die für die Durchführung der Arbeit erforderliche Arbeitsschwere stellt unter Klimabelastung wegen der erzeugten metabolischen Wärme ein qualitativ schwierigeres Problem dar, als unter neutralen Klimabedingungen⁶⁹. Die Arbeitsschwere kann durch Mechanisierung entsprechend verringert werden. Die Fähigkeit zur Selbsteinteilung der Arbeitsschwere (*self-pacing*) der Arbeitnehmer im Klima ist zu fördern.
- falls eine Verringerung der Arbeitsschwere auf hinreichend niedrige Werte – die ein thermoregulatorisches Gleichgewicht ermöglichen – nicht durchführbar ist, muß die Arbeitszeit im Klima begrenzt werden (*DLE* - Duration Limited Exposure); Beispiele hierfür sind die Tabelle für Grubenwehreinsätze unter erschwerten klimatischen Bedingungen im *Plan für das Grubenrettungswesen* [437], oder die in ISO 7243 [440] vorgeschlagenen Pausen im Klima.
- Durchführung einer arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung (z.B. nach BG 30 [433] oder nach dem *Plan für die Durchführung der ärztlichen Untersuchungen im Steinkohlenbergbau* [438]): zur Sicherstellung von Mindestwerten für körperliche Leistungsfähigkeit und Ausschluß von Gründen die gegen einen Einsatz im Klima sprechen. Im Zweifelsfall sollten Arbeitsversuche unter Aufsicht bzw. mit Registrierung der physiologischen Meßgrößen (Herzschlagfrequenz, Körpertemperatur, Schweißverlust) sowie der Abfrage des Beanspruchungsempfindens stattfinden (vgl. z.B. Kapitel 6.3.5)

⁶⁹ dieser Tatsache trägt ISO 7243 dadurch Rechnung, daß für verschiedene Arbeitsschweren unterschiedliche Grenzwerte des WBGT-Index angegeben werden.

- Vermeidung von übermäßiger Dehydratation während der Arbeitszeit im Klima durch Sorge für ausreichendes Trinken während der Hitzearbeit; ausreichende Verfügbarkeit von Getränken in der Nähe des Arbeitsplatzes (vgl. Kapitel 2.3.2.4)
- Schulung der hitzeexponierten Personen, auf Anzeichen von Hitzeerkrankungen bei sich und ihren Arbeitskollegen zu achten sowie die Anleitung zu Maßnahmen erster Hilfe; ein Beispiel für ein Merkblatt findet sich im Anhang A.5.
- bei extremer Hitzebelastung: falls keine Sichtverbindung besteht und eine Verbindung mit der Einsatzüberwachung durch Telefon oder per Funk nicht möglich ist empfiehlt sich die Abmeldung vor Betreten des hitzebelasteten Arbeitsbereichs und Rückmeldung nach Durchführung der Arbeit, so daß bei bei Zeitüberschreitung Rettungsmaßnahmen eingeleitet werden können. Unter solchen Bedingungen dürfen die Klimabereiche nicht von einzelnen Personen betreten werden, so daß auch im Fall einer plötzlich auftretenden Gesundheitsstörung noch von einer nicht betroffenen Person Hilfe gerufen werden kann (*buddy-system*).
- Je nach Art der Hitzebelastung müssen Kühlmöglichkeiten für Notfälle vorgehalten werden; es empfiehlt sich evaporative Kühlung bei verstärkter Ventilation. Hinweise an die Arbeiter im Klima sind z.B. im Merkblatt (Anhang A.5) ausgeführt. Das Eintauchen der Hände in Wasser von 20 °C kann eine Abkühlungsleistung von ca. 150 W bewirken (z.B. House 1994 [152]), wobei kaum technischer Aufwand hierzu notwendig ist; in Körperruhe kann so eine deutliche Abkühlung des Körpers erreicht werden. – Das Prinzip entspricht der Anwendung von Wadenwickeln bei erhöhter Körpertemperatur: der Einfluß der hohen Körperinnentemperatur auf die periphere Durchblutung überwiegt gegenüber dem lokalen Kältereiz auf der Hautoberfläche (der zu einer geringeren peripheren Durchblutung führen würde), so daß insgesamt eine große Wärmeabgabe möglich ist. – Im Fall von Hitzschlag hat sich für stationäre Versorgung bei den Pilgern nach Mekka der Einsatz der *Makkah body cooling unit* (KHOGALI 1983 [195]) und ebenfalls vergleichbare Einrichtungen im südafrikanischen Goldbergbau⁷⁰ bewährt.

9.2 Regelung der Arbeit an hitzebelasteten Arbeitsplätzen in Deutschland

In Deutschland sind die Anforderungen an Lüftung und Raumtemperaturen an Arbeitsplätzen durch die *Arbeitsstättenverordnung* vom Oktober 1979 in § 5 und § 6 geregelt; Hitzearbeitsplätze sind jedoch entsprechend der *Arbeitsstätten-Richtlinie* ASR 6/1,3 vom April 1976 Abs. 2.4 ausgenommen. Ein Vorschlag zur Beurteilung des Klimas im

⁷⁰ ALLIN 1992, persönliche Mitteilung.

Hitzebereich findet sich in DIN 33 403 T3 (1988) [450]; diese Norm gilt nicht für Arbeiten im Freien, nicht für untertägige Betriebe, die der Bergaufsicht unterliegen – hier gilt die Klima-Bergverordnung [432] – und auch nicht für einzelne Tage im Jahr, an denen die Außentemperatur über 32 °C ansteigt, so daß hierdurch ein Überschreiten der Grenzen der Erträglichkeit hervorgerufen werden kann. Der Berufsgenossenschaftliche Grundsatz 30 *Hitzearbeiten* (1998 [433]) gibt *Anhaltspunkte für gezielte arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen, um Erkrankungen, die durch Hitzeexposition an Arbeitsplätzen entstehen können, zu verhindern, oder frühzeitig zu erkennen*; Untersuchungszahlen für das Jahr 1997 sind in Anhang A.4, Tabelle 23 angegeben. Die Kriterien für die Anwendung des Berufsgenossenschaftlichen Grundsatzes 30: ständige, kurzzeitige oder gelegentliche Exposition; Dauer der Exposition, Klimabelastung (als *Normal-Effektivtemperatur* bestimmt, vgl. Kapitel 2.5) und Arbeitsschwere sind in der Berufsgenossenschaftlichen Information *BGI 504-30*⁷¹ [430] aufgeführt. – Eine anderweitige Regelung hat die Berufsgenossenschaft Feinmechanik und Elektrotechnik für das Befahren von Dampfkesselanlagen unter Hitzeeinwirkung eingeführt, wobei der WBGT-Index (vgl. Kapitel 2.5) als Bewertungsmaßstab herangezogen wird [431]. – Der Bergbau besitzt mit der Klima-Bergverordnung [432] eine eigenständige Regelung der Arbeit an klimatisch belasteten Arbeitsplätzen, die zur Bewertung der Klimabelastung im Steinkohlenbergbau die *Basis-Effektivtemperatur* nach YAGLOU [428] verwendet. Die arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen im Steinkohlenbergbau sind im *Plan für die ärztlichen Untersuchungen im Steinkohlenbergbau* [438] geregelt; hiervon sind zur Zeit etwa 40 000 Bergleute unter Tage betroffen.

9.3 Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen

Die Ergebnisse der Anwendung des Berufsgenossenschaftlichen Grundsatzes 30 *Hitzearbeiten* [433] sind für das Jahr 1997 in Anhang A.4 angegeben: in etwa 82 % aller Erstuntersuchungen und 77 % aller Nachuntersuchungen bestanden keine Bedenken gegen den Arbeitseinsatz in Hitze. Es sind Nachuntersuchungsfristen von 60 Monaten bei Personen bis zu 50 Jahren und von 24 Monaten bei Personen über 50 Jahren vorgegeben.

Im Steinkohlenbergbau sind spezielle arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen nach dem *Plan für die ärztlichen Untersuchungen im Steinkohlenbergbau* [438] vorgesehen, wobei Einschränkungen des Einsatzes von Bergleuten für zwei Klimabereiche:

a: oberhalb von $BET = 29\text{ °C}$ und

b: oberhalb von $BET = 25\text{ °C}$ oder $t_a = 28\text{ °C}$

⁷¹ *Auswahlkriterien für die spezielle arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 30 „Hitzearbeiten“.* (Vormals ZH 1/600.30)

ausgesprochen werden können. Die Untersuchungsergebnisse der gesamten Untertage-Belegschaft eines Bergwerks im Ruhrbergbau (3085 Bergleute) wurden nach Inkrafttreten der Klima-Bergverordnung [432] im Jahr 1983 in den Jahren 1984 und 1985 zusammengestellt (VAUTRIN, KAMPMANN & MORFELD 1987 [384]), und die Ergebnisse sollen im folgenden vorgestellt werden. Für den Klimabereich *a* wurden 100 Personen und für den Bereich *b* wurden 178 Personen eingeschränkt; der Bereich *a* kommt auf der betrachteten Schachanlage kaum vor, so daß diese Beschäftigungsbeschränkungen auch kaum eine Auswirkung auf den Arbeitseinsatz der Bergleute haben. Bei 271 der 278 klimaeingeschränkten Bergleute führten acht der im *Plan für die Durchführung der ärztlichen Untersuchungen im Steinkohlenbergbau* genannten Gesundheitsstörungen zur Einschränkung bei Arbeit unter Klimabelastung: Hypertonus, pathologisches EKG, pathologische Ergometrie, Broca-Index ≥ 130 %, Lebererkrankung, Alkohol-Abusus, Diabetes mellitus und chronische Bronchitis. Für den Klimabereich *a* ergaben sich pro Person im Mittel 1,35 diagnostizierte Gesundheitsstörungen, für den Bereich *b* – mit der weitergehenden Einschränkung – wurden im Mittel 1,78 Gesundheitsstörungen diagnostiziert; 63 % (Klimabereich *a*, 100 Fälle) bzw. 42 % (Klimabereich *b*, 178 Fälle) der Einschränkungen wurden aufgrund einer einzigen Gesundheitsstörung ausgesprochen. Mit dem Alter nehmen die Einschränkungen für beide Klimabereiche weitgehend monoton zu; in den Altersklassen über 45 Jahren liegt die relative Häufigkeit von Klimaeinschränkungen bei etwa 20 %.

9.4 Vergleich der Beanspruchung bei Übungen der Gasschutzwehr und Grubenwehr sowie in Felduntersuchungen mit den Vorgaben für Beanspruchungsgrößen

Es gibt von verschiedenen Autoren unterschiedliche Vorschläge für Grenzwerte der physiologischen Größen, die bei der Arbeit oder bei Untersuchungen nicht überschritten werden sollen (z.B. geben WENZEL & PIEKARSKI [410] eine Übersicht für Grenzwerte der Rektaltemperatur). Im folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchungen in Kapitel 5 und 6 für die Herzschlagfrequenzen nach den arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen sowie den Vorschlägen der WHO (Tech. Rep. 412 [439]) für Grenzwerte der Herzschlagfrequenz und der Rektaltemperatur beurteilt werden.

Zur Zeit der Untersuchung der Gasschutzwehr (Kapitel 5.3 [413]) wurde eine ergometrische Bestimmung der *W 150* – d.h. eine Bestimmung der körperlichen Leistungsfähigkeit bei einer Herzschlagfrequenz von 150 min^{-1} – durchgeführt; nur 3 von 44 Gasschutzwehrmitgliedern überschritten diesen Wert der Herzschlagfrequenz während einer Standardübung der Gasschutzwehr nicht (Abb. 60); somit lag für mehr als 90 % der untersuchten Gasschutzwehrmitglieder die Herz-Kreislauf-Belastung während der Übung höher als während der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung. Da während

der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung sichergestellt werden soll, daß untersuchten Personen den Anforderungen bei Übungen und Einsätzen gewachsen sind, wäre eine Ergometrie mit maximaler Belastung – auch der Wert “200-Alter” wird nur von 4 von 44 Übungsteilnehmern nicht überschritten – sinnvoll.

Bei einer Standardübung der Grubenwehr (BRESSER & KAMPMANN [36]) wird der Wert “200-Alter” – der bei der Ergometrie während der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung erreicht werden soll – von einer ganzen Reihe der 52 Übungsteilnehmer nicht überschritten; 11 Übungsteilnehmer überschreiten diese Herzschlagfrequenz allerdings z.B. während mehr als 25 % der Übungszeit; erst die Grenze “220-Alter” wird nur noch von einem Grubenwehrmitglied für mehr als 10 % der Übungszeit überschritten: hier ist die vorgeschriebene *maximale Ergometrie* sicherlich zu Recht gefordert.

Während der Felduntersuchungen in Kapitel 6.1 liegt das 95. Perzentil der Herzschlagfrequenz in der Zeit vor Ort bei 36 von 121 Schichten oberhalb von 150 min^{-1} ; bis zu dieser Herzschlagfrequenz wird bei einer Erstuntersuchung für Tätigkeiten im klimabelasteten Bereich ergometriert. Auch hier wäre eine höhere Beanspruchung während der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung angebracht, um die Funktionsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems während der beruflichen Tätigkeit (vgl. z.B. die Beanspruchung in Abb. 68) sicherzustellen.

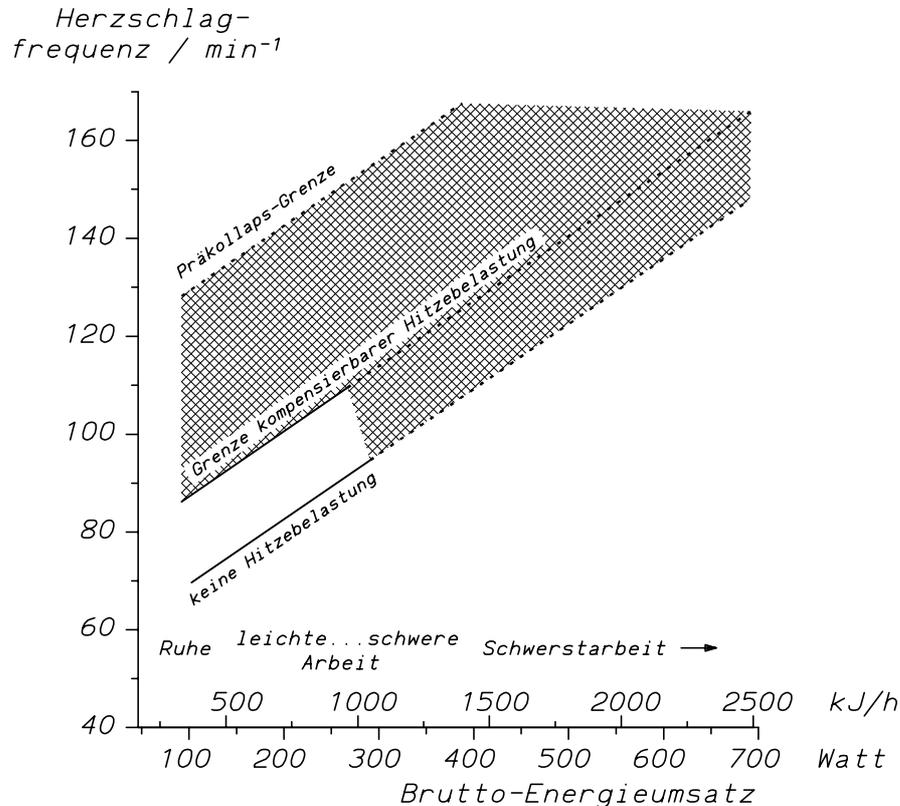


Abb. 128: Grenzwerte der Herzschlagfrequenz in Abhängigkeit vom Energieumsatz entsprechend: WHO Technical Report Series 412 (1969) [439].

Für die Herzschlagfrequenz gibt der *WHO Technical Report 412* [439] Grenzwerte an, die von der Arbeitsschwere abhängen (Abb. 128); der Maximalwert, bei dem noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht errichtet werden kann, beträgt 110 min^{-1} . Dieser Wert wird allerdings in fast allen untersuchten Schichten kurzfristig überschritten; in 57 von 121 auswertbaren Schichten liegt der Mittelwert der Herzschlagfrequenz während der gesamten Zeit vor Ort – d.h. über mehrere Stunden – höher als dieser Grenzwert.

Für Rektaltemperaturen gibt der *WHO Technical Report 412* einen Grenzwert von $38,0 \text{ °C}$ an, der sich aus der Obergrenze der *prescriptive zone* nach LIND [224] – vgl. Abb. 4 – für schwere Arbeit herleiten läßt. – Bei den Felduntersuchungen an heißen Betriebspunkten [189] wurde in 84 von 112 auswertbaren Schichten eine maximale Rektaltemperatur von $t_{re_{max}} > 38,0 \text{ °C}$ gemessen; in 31 von 110 hierfür auswertbaren Schichten lag die Rektaltemperatur während der gesamten Zeit vor Ort im Mittel oberhalb von $38,0 \text{ °C}$.

Wie Abb. 61 entnommen werden kann, wurde eine Standardübung der Grubenwehr, die sich seit vielen Jahren im Übungsprogramm der Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Essen bewährt hatte, von keinem der 52 teilnehmenden Grubenwehrmitglieder mit einer Rektaltemperatur unterhalb von $38,0 \text{ °C}$ durchgeführt werden.

Die Grenzwerte der WHO in [439] werden also sowohl für die Herzschlagfrequenz als auch für die Körpertemperatur bei den Grubenwehrübungen und in Feldversuchen weit überschritten; der Grund für diese Fehleinschätzung der Höhe der Beanspruchung bei Grubenwehrübungen und in Feldversuchen durch die Expertengruppe um BELDING, die diesen Bericht [439] verfaßt hat, liegt offenbar darin, daß keine Meßdaten aus Felduntersuchungen vorlagen und sich die Experten somit durch theoretische Betrachtungen – wie z.B. das Einhalten der *prescriptive zone* – helfen mußten.

9.5 Ergebnisse aus den Felduntersuchungen

Während die Empfehlungen von WHO [439] und ISO 7243 [440] (vgl. Kapitel 2.4.3.1) darauf abzielen, die Arbeit unter Hitzebelastung im homiothermen Bereich (*prescriptive zone*) – und damit ganz auf der „sicheren Seite“ – zu halten, stellt sich in der Arbeitspraxis des Bergbaus heraus, daß die Bergleute zum großen Teil bei deutlich höheren Beanspruchungen arbeiten: so werden hohe mittlere Körpertemperaturen auch bei niedriger Klimabelastung beobachtet (vgl. Abb. 75).

In Laborversuchen werden meist Probanden eingesetzt, die weder Körperarbeit noch Hitzearbeit gewohnt sind. Da im Regelfall die Arbeitsschwere vorgegeben ist, um Versuchsserien systematisch durchführen zu können, ist große Vorsicht im Hinblick auf eine Überlastung der Probanden angeraten.

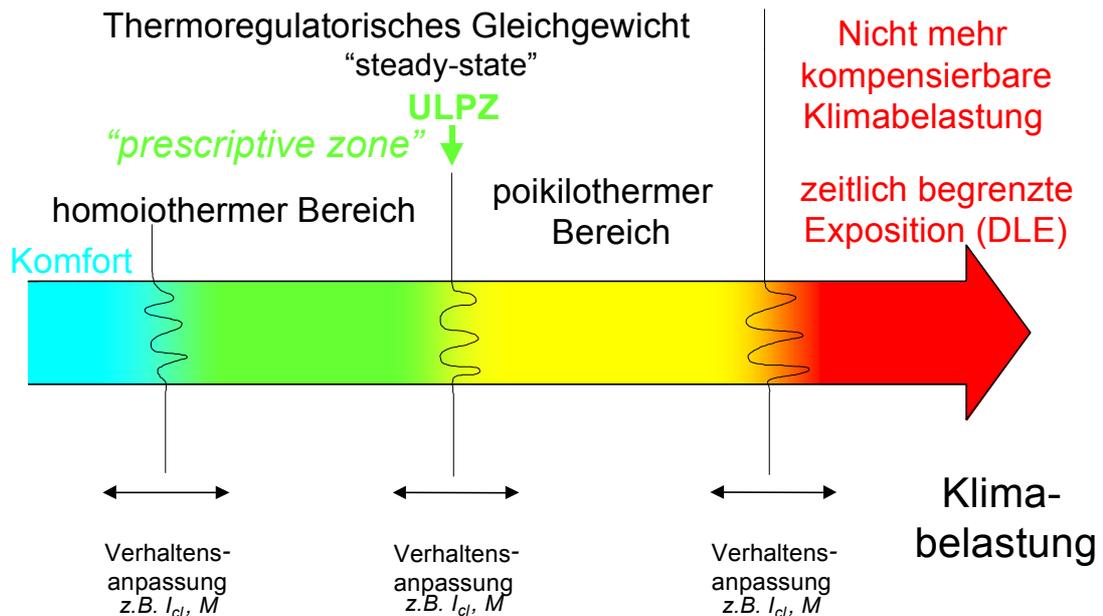


Abb. 129: Schematische Einteilung der thermoregulatorischen Bereiche bei Hitzebelastung.

Da im Bergbau kein Arbeitstakt – etwa durch ein Fließband – vorgegeben ist, können die Bergleute – insbesondere auch bei weitgehend mechanisierten Arbeitsvorgängen – die Möglichkeit der Verhaltensregulation (*self-pacing*, Kapitel 2.4.2) nutzen, um die Obergrenze des homiothermen Bereichs (ULPZ) dynamisch in den ursprünglich poikilothermen Bereich hinein zu verschieben. Diese Bereiche sind schematisch in Abb. 129 dargestellt: die rechte Grenze des homiothermen Bereichs (mittlere Markierung) wird dynamisch auf einen höheren Arbeitspunkt – im gelb markierten Bereich – „geregelt“. Die Lage der Grenzen der verschiedenen Bereiche in Abb. 129 hängt von verschiedenen Einflußgrößen ab: beispielsweise von der Bekleidungsisolations, der Arbeitsschwere und dem Akklimatisationsgrad.

Für den Bereich der nicht mehr kompensierbaren Hitzebelastung, in dem beispielsweise die Grubenwehr Einsätze durchführen muß, sind Einsatz Tabellen mit Zeitvorgaben ausgearbeitet [34]. Eine Selbsteinteilung der Arbeitsschwere (*self-pacing*) ist für ganze Grubenwehrtrupps (etwa als Abstimmung der Geschwindigkeit des Vorgehens) sowohl bei Übungen als auch bei Einsätzen gefordert und zu fördern.

9.6 Verbesserung des Gesundheitsschutzes an hitzebelasteten Arbeitsplätzen im Bergbau

Wegen der hohen Beanspruchungen an hitzebelasteten Arbeitsplätzen sind auch früher schon Hinweise und Ratschläge an die Bergleute ausgegeben worden. So stellte der ARBEITSKREIS FÜR FRAGEN DES WERKSÄRZTLICHEN DIENSTES IM BERGBAU 1959 [13] Unterrichtsmaterial für die Unterrichtung von Knappen, Hauern und Aufsichtspersonen zur Verfügung, das folgende Ratschläge enthielt:

- S. 3: 1. In der ersten Woche Vorsicht mit körperlicher Belastung. Die Arbeitsleistung darf nur langsam gesteigert werden.
 2. Arbeiter an heißen Betriebspunkten möglichst wenig austauschen, da die Anpassung rasch wieder verloren geht.
- S. 5: Der Bergmann trinkt während der Arbeit im allgemeinen zu wenig. Genaue Untersuchungen haben ergeben, daß er ca. 40 bis 50 % weniger Flüssigkeit aufnimmt, als er ausscheidet.
- S. 5: Der beste Regulator der Getränkemenge ist der Durst. Der Arbeiter soll also soviel trinken, daß sein Durst gestillt wird.

Zusammenfassung:

3. Anpassung an die Hitze ist möglich und erfolgt in zwei Stufen.
 Die erste Stufe der Anpassung dauert ungefähr eine Woche. In dieser Zeit soll der Körper wasser- und salzarm werden.
 Deshalb: W ä h r e n d der ersten Woche
 - auch außerhalb der Schicht -
 w e n i g t r i n k e n .
 Die Arbeitsleistung darf nur langsam gesteigert werden.
 Die zweite Stufe dauert einige Monate. Während dieser Zeit soll der Körper lernen, die Schweißbildung zu steigern.
 Deshalb: N a c h der ersten Woche
 r e i c h l i c h t r i n k e n .
 Die erreichte Anpassung geht schon nach einigen Tagen wieder zurück.
 Deshalb: Arbeiter an heißen Betriebspunkten möglichst wenig austauschen.

In diesen Hinweisen sind einige Erkenntnisse enthalten, die auch heute noch zutreffen: die langsame Steigerung der Arbeitsleistung im Klima; die auftretende Dehydratation von 40 bis 50 % und die Akklimatisationsvorteile (höhere Schweißraten, möglichst lange Verweildauer der akklimatisierten Bergleute an den heißen Betriebspunkten), während die Konzepte der gezielten Dehydratation und „Entsalzung“ der Bergleute in der ersten Arbeitswoche im Klima sowie das Vertrauen, daß der Durst der beste Regulator für die Getränkeaufnahme ist, heute nicht mehr geteilt werden.

Ein Merkblatt, das den aktuellen Stand der Anzeichen für Gesundheitsstörungen durch Hitzeeinwirkung und Hinweise für Erste Hilfe bei Gesundheitsstörungen enthält und das in deutscher und türkischer Sprache heute an Bergleute ausgegeben wird, die in Hitzebetrieben arbeiten, ist in Anhang A.5 in der deutschen Sprachfassung abgedruckt.

Die arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung für Hitzearbeit im Bergbau nach [438] schreibt für die Untersuchung vor dem Ersteinsatz in klimatisch belasteten Bereichen eine ergometrische Untersuchung *W 150* vor. Mit einer solchen Untersuchung erfaßt man zunächst grundsätzlich nur die testspezifische Leistungsfähigkeit der untersuchten Person (zur Problematik siehe beispielsweise ULMER 1999 [383] oder die Diskussion in WERNER ET AL. [413]); bei den in Hitzebereichen vorgefundenen hohen Herz-Kreislauf-Belastungen (Kapitel 6) ist es aber sinnvoll, die Funktionsfähigkeit des Herz-Kreislauf-

Systems bis zu hohen Beanspruchungen hin sicherzustellen. Wünschenswert wäre eine Bewertung der erwarteten Arbeitsschwere in hitzebelasteten Arbeitsbereichen, um die zu erwartende Herz-Kreislauf-Beanspruchung für die Belastung bei der Untersuchung in Rechnung stellen zu können.

Bei den hohen Flüssigkeitsverlusten (vgl. Abb. 101) an extrem heißen Arbeitsplätzen wäre es zur Förderung des Nachtrinkens während der Arbeit sinnvoll, Getränke vor Ort auszugeben, um den Bergleuten das Mitnehmen größerer Getränkemengen zu ersparen und trotzdem ausreichendes Trinken – auch im Fall unerwartet hohen Flüssigkeitsbedarfs z.B. durch unerwartete schwere Reparaturarbeiten oder bei Ausfall einer Kühlmachine – zu ermöglichen.

Bis 1998 wurde die Klimabergverordnung tariflich so umgesetzt, daß alle Bergleute an klimatisch belasteten Betriebspunkten ($t_a > 28\text{ °C}$ oder $BET > 25\text{ °C}$) eine Schichtdauer (Seilfahrt-Seilfahrt) von 7 Stunden hatten (vgl. die Schichtverläufe z.B. in Abb. 66 und Abb. 68). Nachdem die Fahrungszeiten teilweise erheblich über einer halben Stunde Dauer lagen, wurde ab 1998 die zulässige Arbeitszeit vor Ort von bis zu 6 Stunden an klimatisch belasteten Arbeitsplätzen durch eine Schichtlänge von 8 Stunden voll genutzt; die Bergleute erhalten für diese Mehrarbeit eine Stunde Arbeitszeit angerechnet, so daß sie nach 7 Schichten im Klima eine Freischicht – bis zu einer maximalen Anzahl von 15 zusätzlichen Klima-Freischichten im Jahr – erhalten⁷².

Im Hinblick auf eine physiologische Hitzeadaptation ist diese hohe Anzahl von Freischichten und Urlaubstagen problematisch, da die Akklimatisation bereits nach einer mehrtägigen Pause (etwa ein Feiertag am Donnerstag, eine Freischicht als „Brückentag“ und das folgende Wochenende) deutlich zurückgehen kann⁷³.

Das Wissen um ein Verhalten, das den Arbeitsbedingungen im Klima angepaßt ist: eine angemessene Einteilung der Arbeit, ausreichendes Trinken sowie das Achten auf Anzeichen von Gesundheitsstörungen bei sich und anderen bleibt jedoch länger erhalten und erhält so auch für die Aufnahme in den Inhalt der Unterweisungen, die im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung durchgeführt werden, eine größere Bedeutung.

⁷² Insgesamt erhalten die Bergleute an Urlaub und Freischichten zur Zeit (Tarifvertrag Stand 21. August 1999) maximal 73 Tage Urlaub und Freischicht:

30 Tage Urlaub

3 Freischichten für unter Tage Arbeitende

21 Freischichten (Reduktion der Wochenarbeitszeit, Lohnerhöhung)

4 Freischichten maximal, wenn mindestens 64 Nachtschichten verfahren wurden

15 Freischichten maximal bei Arbeit in klimabelasteten Arbeitsbereichen

(pro 7 Schichten in klimatisch belasteten Bereichen eine Freischicht).

⁷³ Z.B. zeigte Wenzel 1959 [400], daß Herzschlagfrequenz, Körpertemperatur und Hauttemperatur bereits nach einem Wochenende ohne Klimaexposition deutlich ansteigen, während die Schweißrate vermindert ist; vgl. auch Kapitel 2.3.2.3.

10 Zusammenfassung

Die klimatischen Bedingungen der Umgebung sind sowohl für die Spezies Mensch – etwa siedlungsgeographisch – als auch für das Individuum von großer Bedeutung. Diese Abhängigkeit vom Umgebungsklima wird heutzutage meist nur noch in Extremsituationen, z.B. bei Hitzewellen im Sommer, im Urlaub oder an heißen Arbeitsplätzen wahrgenommen, wo klimatische Belastungen auftreten, die weitaus höher sein können als in der natürlichen Umgebung des Menschen; durch Fertigungsprozesse bedingte Klimabedingungen – von beispielsweise – 30 °C in Lagerhäusern für Tiefkühlkost bis hin zu Temperaturen oberhalb 100 °C in Einbrennkammern für lackierte Teile in der Automobilfabrikation, die im Störfall kurzfristig betreten werden müssen – stellen eine Herausforderung sowohl für die Arbeitssicherheit als auch für die Gesundheit von Arbeitnehmern dar.

Die Arbeitsphysiologie stützte sich in ihren Anfängen mehr auf Einzelfallschilderungen („hinweisende Erkenntnisse“) als auf systematische Untersuchungen, in deren Rahmen allerdings die Mechanismen der autonomen Thermoregulation objektiviert werden konnten: die Veränderung der peripheren Durchblutung und die Produktion (und Verdampfung) von Schweiß bei Hitzebelastung, sowie das Muskelzittern in der Kälte. Als weiterer wichtiger Mechanismus kam die Verhaltensregulation (Aufsuchen von Schatten, Verschiebung der körperlich anstrengenden Arbeit in die kühlen Zeiten des Arbeitstages, „Siesta“) ebenfalls in das Blickfeld der Arbeitsphysiologen. – Bei zunehmender Hitzebelastung wird zunächst die mentale, dann auch die körperliche Leistungsfähigkeit von Probanden reduziert; bei weiterer Steigerung der Hitzebelastung treten Gesundheitsstörungen auf, die durch die Hitzeeinwirkung bedingt sind. Nach einer Gewöhnung an heißes Klima, die eine physiologische Umstellung (Akklimation) und das Einüben von Verhaltensanpassung beinhaltet, kann eine deutliche Verringerung von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur beobachtet werden.

Erstes Ziel der hier vorgelegten Arbeit war es daher, die Beanspruchung (das Verhalten der wichtigen physiologischen Größen Herzschlagfrequenz, Körperkerntemperatur, Hauttemperatur sowie der Schweißrate) durch Hitzeeinwirkung systematisch in Klimakammern zu untersuchen, wo die Belastungsgrößen: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Wärmestrahlung sowie die Arbeitsschwere und die Wärmeisolation der Bekleidung genau vorgegeben werden können. Die Beanspruchungsreaktion von Probanden ist bezüglich der Belastungsparameter nichtlinear und wurde in dieser Arbeit für eine Reihe von Probanden unter standardisierter Belastung ($I_{cl} = 0,1$ clo; Gehen in der Ebene $v = 4$ km/h) beschrieben. Weiterhin wurde der Einfluß der Akklimation sowie der Einfluß der Windgeschwindigkeit ($v_a = 0,3$ m/s bzw. $v_a = 2,0$ m/s) auf die Beanspruchung dargestellt. Aus der systematischen Beschreibung der Beanspruchungsgrößen ließ sich ein Verfahren zur Ermittlung des Wirkungsgrades der Schweißverdampfung im feucht-warmen Klimabereich entwickeln, der für die analytische Berechnung der Wärmebilanz in Klimasummenmaßen wie ISO 7933 von

großer Bedeutung ist. – Eine weitere Untersuchung, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, zeigt den Einfluß mentaler Belastung auf die Herzschlagfrequenz, die für eine Beurteilung von Grenzwerten der Beanspruchung von Wichtigkeit sein kann.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde die hohe Beanspruchung bei Übungen der Rettungsdienste im Bereich des Bergbaus, Gasschutzwehr (Kokereien) und Grubenwehr (Bergwerke) untersucht, wobei die Frage der Gewöhnung an die Übungssituation und das Ausmaß der interindividuellen Beanspruchungsunterschiede im Vordergrund der Auswertungen standen. Da uns im Bergbau mit der Grubenwehr ein Kollektiv zur Verfügung stand, das höhere Anforderungen an die körperliche Leistungsfähigkeit während der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung zu erfüllen hat als die Gasschutzwehr, konnte gezeigt werden, daß sich für diese Übungsteilnehmer eine deutlich niedrigere Beanspruchung bei einer Standardübung der Gasschutzwehr ergab als für die Mitglieder der Gasschutzwehr: hieraus folgte, daß nicht die untersuchte Übung an sich zu belastend war, sondern daß durch hinreichendes Training oder durch entsprechende Zulassungskriterien im Hinblick auf die körperliche Leistungsfähigkeit deutlich niedrigere Beanspruchungen während der Übungen auftreten würden, so daß größere Reserven der Beanspruchung im Hinblick auf Einsätze verfügbar wären.

Im dritten Teil der Arbeit ging es um Messungen der Beanspruchungsgrößen in 125 Schichten an heißen Arbeitsplätzen im Steinkohlenbergbau. Es zeigte sich, daß die Bergleute ihre Arbeitsschwere ihrem Beanspruchungsempfinden anpassen: Herzschlagfrequenz und Körperinnentemperatur zeigten keinen Anstieg mit der Klimabelastung, wohl aber Schweißrate und Trinkmenge. Diese Selbsteinteilung der Arbeitsintensität (*self-pacing*) ist in hochmechanisierten Arbeitsbereichen möglich, weil entsprechende Reservezeiten (etwa arbeitsablaufbedingte Wartezeiten) zur Verfügung stehen, um den Arbeitsenergieumsatz für Einzeltätigkeiten senken zu können, ohne hohe Einbußen an Produktivität während der gesamten Arbeitsschicht in Kauf nehmen zu müssen. Bei hohen klimatischen Belastungen sollte diese Fähigkeit der Bergleute zur Selbsteinteilung der Arbeitsintensität gefördert werden. Die Dehydratation der Bergleute steigt bei zunehmender Klimabelastung im Mittel auf 2 % der Körpermasse an, weil die Bergleute nur etwa 50 % der im Schweiß verlorenen Flüssigkeitsmenge durch Nachtrinken ersetzen; es sollten daher Getränke vor Ort verfügbar gemacht werden, damit die Bergleute nicht die erforderlichen Getränkemengen (es wurden Schweißverluste bis 6000 g gemessen) zusätzlich zu ihrer Ausrüstung auf dem Weg zum Arbeitsplatz tragen müssen.

Erstmals wurde an heißen Arbeitsplätzen in der Industrie die Körperinnentemperatur kontinuierlich gemessen; so war es möglich, in Fortführung der Arbeiten von VOGT ET AL. die thermischen Anteile der Herzschlagfrequenz während des Schichtverlaufs durch ein neu entwickeltes Verfahren kontinuierlich zu ermitteln und bei der Abschätzung des Arbeitsenergieumsatzes durch die Herzschlagfrequenz zu berücksichtigen.

Aus verschiedenen Studien zur Belastung von Bergleuten wird eine Reihe von hinweisenden Erkenntnissen zur Auswirkung der Akklimatisation und circadianer Rhyth-

mik sowie zur Hitzeorthostase – als Vorform des Hitzekollaps – vorgestellt. Eine Reihe von Beobachtungen stützt die Hypothese der Fähigkeit zur Selbsteinteilung der Arbeitsschwere auch in Arbeitsbereichen, die nicht klimatisch belastet sind.

Als Beispiel für die Bewertungsmöglichkeiten der Arbeitsphysiologie wurde die Beanspruchung an ergonomisch verbesserten Arbeitsplätzen („vorher“ – „nachher“) am Beispiel eines Gleisumbauzuges vorgestellt: durch entsprechenden technischen Aufwand läßt sich die Produktivität bei der Gleiserneuerung deutlich erhöhen, wobei die Beanspruchung der Bergleute nicht nur im Mittel sondern insbesondere auch für die Beanspruchungsspitzen erheblich gesenkt werden konnte.

Da für die meisten Betriebspunkte im Kohlenabbau die Arbeit durch die Norm ISO 7933 (1989) untersagt wird („Gefahr, auch für hitzeakklimatisierte Personen“), wurden die verfügbaren Daten für Schichtabbrüche wegen Gesundheitsstörungen, die mutmaßlich durch Hitzeeinwirkung bedingt waren und die im Klima geleisteten Schichten in den Jahren 1992 bis 1999 betrachtet. Das Ergebnis wurde – neben anderen Ergebnissen aus den Klimakammeruntersuchungen, den Untersuchungen der Grubenwehr und den Ergebnissen aus den Felduntersuchungen (Rehydratation der Bergleute) in eine Überarbeitung der Norm ISO 7933 im Rahmen einer internationalen Arbeitsgruppe (Förderung durch das Projekt BIOMED 2) eingebracht. Die Bewertung der klimatischen Belastung durch den neuentwickelten Klima-Index *Predicted Heat Strain* (PHS), der die Wärmebilanzberechnung in ISO 7933 (1989) ersetzen wird, entspricht den Ergebnissen der Felduntersuchungen an heißen Arbeitsplätzen wesentlich besser.

Die Werte von Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur, die in Feldversuchen an heißen Betriebspunkten gefunden wurden, liegen weitaus höher, als es beispielsweise die Empfehlungen der WHO zulassen, ohne daß eine erhebliche Anzahl von Gesundheitsstörungen beobachtet wird. Hierfür wird als Erklärung vorgeschlagen, daß die Bergleute ihre Arbeitsschwere über ihr Beanspruchungsempfinden regeln und so den homiothermen Bereich – in dem das Klima noch keine Auswirkung auf Herzschlagfrequenz und Körpertemperatur hat – dynamisch, durch die Absenkung der Arbeitsschwere, ausdehnen. Die Verhaltensregulation erhält so eine große Bedeutung und sollte daher den Bergleuten an heißen Arbeitsplätzen ermöglicht und empfohlen werden.

Diese Zusammenstellung will dem Ziel näherkommen, eine Gesamtbetrachtung der Auseinandersetzung des arbeitenden Menschen mit seinem Umgebungsklima wissenschaftlich zu erläutern und Hinweise zu geben, welche physiologischen und technischen Strategien verfolgt werden können, um den Gesundheitsschutz und die Sicherheit am Arbeitsplatz in gleichem Maße fortzuentwickeln, wie dies für die Entwicklung neuer Technologien angestrebt wird. Nur so kann es gelingen, die in vielen Leitbildern der heutigen Industrie angestrebte Gleichwertigkeit von wirtschaftlichem Erfolg und angemessenem Gesundheitsschutz zu erreichen.

11 Literatur

- [1] ACSM (American College of Sports Medicine) Position Stand (CONVERTINO, V. A., L. E. ARMSTRONG, E. F. COYLE, G. W. MACK, M. N. SAWKA, L. C. SENAY JR, W. SHERMAN): *Exercise and Fluid Replacement*. Med. Sci. Sports Exerc. 28.1, i-vii (1996).
- [2] ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists): 1996 *TLVs and BEIs. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents. Biological Exposure Indices*, 1996, S. 89-95.
- [3] ADAM, J. M.: *Military Problems of Air-Transport and Tropical Service*. In: DAVIES, C. N., P. R. DAVIES, F. H. TYRER (Hrsg.): *The Effects of Abnormal Physical Conditions at Work*. E.& S. Livingstone Ltd., Edinburgh 1967, S. 74-80.
- [4] ADOLPH E. F.: *Physiology of Man in the Desert*. Interscience Publishers, New York 1947, 357 S.
- [5] ALBER-WALLERSTRÖM, B., I. HOLMÉR: *Efficiency of sweat evaporation in unacclimatized man working in a hot humid environment*. Eur. J. Appl. Physiol. 54, 480-487 (1985).
- [6] ALBRECHT, G., SONIA FREEMAN, N. HIGGINBOTHAM: *Complexity and Human Health: The Case for a Transdisciplinary Paradigm*. Cult. Med. Psychiatr. 22, 55-92 (1998).
- [7] AL-KHAWASHKI, M. I., M. K. Y. MUSTAFA, M. KHOGALI, H. EL-SAYED: *Clinical Presentation of 172 Heat Stroke Cases seen at Mina and Arafat - September, 1982*. In: KHOGALI, M., J. R. S. HALES (Hrsg.): *Heat Stroke and Temperature Regulation*. Academic Press, Sydney 1983, S. 99-108.
- [8] ALLAN, J. R., C. G. WILSON: *Influence of acclimatization on sweat sodium concentration*. J. Appl. Physiol. 30.5, 708-712 (1971).
- [9] ALLISON, T. G., W. E. REGER: *Thermoregulatory, cardiovascular, and psychophysical response to alcohol in men in 40 °C water*. J. Appl. Physiol. 72.6, 2099-2107 (1992).
- [10] ANDERSON, C. A., B. J. BUSHMAN, R. W. GROOM: *Hot Years and Serious and Deadly Assault: Empirical Tests of the Heat Hypothesis*. Journal of Personality and Social Psychology 73.6, 1213-1223 (1997).
- [11] AOYAGI, Y., T. M. McLELLAN, R. J. SHEPHARD: *Effects of training and acclimation on heat tolerance in exercising men wearing protective clothing*. Eur. J. Appl. Physiol. 68, 234-245 (1994).
- [12] AOYAGI, Y., T. M. McLELLAN, R. J. SHEPHARD: *Interactions of Physical Training and Heat Acclimation*. Sports Med. 23.3, 173-210 (1997).
- [13] ARBEITSKREIS FÜR FRAGEN DES WERKSÄRZTLICHEN DIENSTES IM BERGBAU. Arbeitsgruppe 5. Arbeitsphysiologie und Arbeitspsychologie: *Arbeit bei hohen Temperaturen. – Bestimmt für die Unterrichtung von Knappen, Hauern und Aufsichtspersonen. Ärztliche Hinweise für den Betrieb*. 3. Folge, a-i (1959).

- [14] ARMSTRONG, C. G.; W. L. KENNEY: Effect of Age and acclimation on responses to passive heat exposure. *J. Appl. Physiol.* 75, 2162-2167 (1993).
- [15] ARMSTRONG, L. E., R. W. HUBBARD, ELAINE L. CHRISTENSEN, JANE P. DE LUCA: *Evaluation of a temperate-environment test of heat tolerance in prior heatstroke patients and controls.* *Eur. J. Appl. Physiol.* 60, 202-208 (1990).
- [16] ARMSTRONG L. E., C. M. MARESH: *The Induction and Decay of Heat Acclimatization in Trained Athletes.* *Sports Med.* 12.5, 302-312 (1991).
- [17] ARMSTRONG, L. E.: *Considerations for Replacement Beverages: Fluid-Electrolyte Balance and Heat Illness.* In: MARRIOTT, BERNARDETTE M. (Hrsg.): *Fluid Replacement and Heat Stress.* National Academy Press, 3. Aufl., Washington D. C. 1994, S. 37-48.
- [18] ASCHOFF, J.: *Temperaturregulation.* In: ASCHOFF, J., B. GÜNTHER, K. KRAMER (Hrsg.): *Energiehaushalt und Temperaturregulation.* Urban und Schwarzenberg, München 1971, S. 43-116.
- [19] ÅSTRAND, I.: *A Method for Prediction of Aerobic Work Capacity for Females and Males of Different Ages.* *Acta Physiol. Scand. Suppl.* 169 49, 45-60 (1960).
- [20] AVERKAMP, CH., TH. HETTINGER: *Vergleich der Belastung und Beanspruchung am Arbeitsplatz des Glasbläfers vor und nach Einführung einer Arbeitshilfe.* *Zbl. Arbeitsmed.* 35, 307-313 (1985).
- [21] BARON, R. A., VICTORIA M. RANSBERGER: *Ambient Temperature and the Occurrence of Collective Violence: The "Long, Hot Summer" revisited.* *Journal of Personality and Social Psychology* 36.4, 351-360 (1978).
- [22] BARTLEY, J. D.: *Heat Stroke: Is Total Prevention Possible?* *Mil. Med.* 142, 528-535 (1977).
- [23] BATES, G., C. GAZEY, K. CENA: *Factors affecting heat illness when working in conditions of thermal stress.* *J. human. Ergol.* 25.1, 13-20 (1996).
- [24] BENDIEK, H.: *Beanspruchungsreaktionen von Berufsfeuerwehrleuten bei Ergometrie und Atemschutzübung.* Dissertation Mainz (1987).
- [25] BENOIST, J.: *The Ecological Gradient of the Weight/surface Relationship among Israeli groups of Various Origin.* *J. Hum. Evol.* 4, 525-528 (1975).
- [26] BERLYNE, G. M., J. P. M. FINBERG, C. YORAN: *The effect of β -adrenoceptor blockade on body temperature and plasma renin activity in heat-exposed man.* *Br. J. Clin. Pharmacol.* 1, 307-312 (1974).
- [27] BERLYNE, G. M., R. YAGIL, S. GOODWIN, M. MORAG: *Drinking habits and urine concentration of man in southern Israel.* *Israel Journal of Medical Sciences* 12, 765-769 (1976).
- [28] BILLINGHAM, J.: *Heat exchange between man and his environment on the surface of the moon.* *J. Brit. Interplanet. Soc.* 17, 297-300 (1959-60).

- [29] BOISVERT, P., CARINE HERRMANN, V. CANDAS: *Acute effect of alcohol on thermal sensation and perceived exertion during exercise in a warm environment in man*. In: FRIM, J., M. B. DUCHARME, P. TIKUISIS (Hrsg.): *Proc. Sixth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Montebello 1994, S. 2-3.
- [30] BOROFFKA, A.: *Vorbeugung seelischer Erkrankungen bei Europäern in den Tropen. Kongreßbericht über die III. Tagung der Deutschen Tropenmedizin. Gesellschaft 1967*. Urban & Schwarzenbeck, München 1968, S. 282-298.
- [31] BOUCHAMA, A.: *Heatstroke: a new look at an ancient disease*. *Int. Care Med.* 21, 623-625 (1995).
- [32] BOULZE, D., P. MONTASTRUC, M. CABANAC: *Water Intake, Pleasure and Water Temperature in Humans*. *Physiol. Behav.* 30, 97-102 (1983).
- [33] BRADLEY, C., C. HIGENBOTTAM: *Multi-task performance in the heat: unchanged with moderate heat strain*. In: Hodgdon, J. A.; Heaney, J. H.; Buono, M. J. (Eds.): *Environmental Ergonomics VIII, 8th International Conference on Environmental Ergonomics, San Diego, California, 18-23 October 1998*. San Diego 1999, p. 61-64.
- [34] BRESSER, G., M. FUNKEMEYER: *Bestimmung der Einsatzdauer der Grubenwehr*. *Glückauf-Forschungsh.* 51, 157-163 (1990).
- [35] BRESSER, G.: *Weiterentwicklung und Einführung von Ganzkörperkühl- und Atemschutzsystemen für die Grubenwehr*. *Abschlußbericht, Hauptstelle für das Grubenrettungswesen, Essen 1994*.
- [36] BRESSER, G., B. KAMPMANN: *Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Wärmeverträglichkeit von Grubenwehrmitgliedern*. *Schlußbericht zum Untersuchungsvorhaben*. Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert; Geschäftszeichen beim Landesoberbergamt: 65.12-280-2. Überarbeitete Fassung, Herne 1997, 88 S.
- [37] BRICKNELL, M. C. M.: *Setting heat stress limits for acclimatized soldiers exercising in heat*. *J. R. Army Med. Corps* 143, 44-48 (1997).
- [38] BROWN, W. K., F. SARGENT II: *Hidromeiosis*. *Arch. Environ. Health* 11, 442-453 (1965).
- [39] BRÜCK, K.: *Zuschrift an die Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Zitiert nach: *Ärztl. Praxis* 21 Nr.75, 3841 (1969).
- [40] BUECHLEY, R. W., J. VAN BRUGGEN, L. E. TRUPPI: *Heat Island = Death Island?* *Environ. Res.* 5, 85-92 (1972).
- [41] BURKE, LOUISE M., J. A. HAWLEY: *Fluid Balance in Team Sports. Guidelines for Optimal Practices*. *Sports Med.* 24.1, 38-54 (1997).
- [42] BURTON, A. C., O. G. EDHOLM: *Man in a cold environment*. Edward Arnold, London 1955.

- [43] CALLAHAM, M.: *Heat illness*. In: ROSEN, P. ET AL. (Hrsg.): *Emergency Medicine. Concepts and clinical practice*. Vol. 1. C. V. Mosby, 2. Aufl. St. Louis 1988, S. 693-717.
- [44] CANDAS, V., J. P. LIBERT, G. BRANDENBERGER, J. C. SAGOT, C. AMOROS, J. M. KAHN: *Hydration during exercise. Effects on thermal and cardiovascular adjustments*. Eur. J. Appl. Physiol. 55, 113-122 (1986).
- [45] CARROLL, BERNADETTE, CAROL DOW, D. SNASHALL, TH. MARSHALL, P. L. CHIODINI: *Post-tropical screening: how useful is it?* Brit. med. J. 307, 541 (1993).
- [46] CARTER, BARBARA, J., MARGARETHE CAMMERMEYER: *A Phenomenology of Heat Injury: The Predominance of Confusion*. Mil. Med. 153.3, 118-126 (1988).
- [47] CASSUTO, Y., R. ISRAELI, A. GERTNER: *Accumulated effects of work under heat stress*. Final Report, 1-136 (1980).
- [48] CERVANTES, J.: *Deaths in the Chicago Heat Wave*. N. Engl. J. Med. 335, 1848 (1996).
- [49] CHEUNG, S. S., T. M. MCLELLAN: *Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress*. J. Appl. Physiol. 84.5, 1731-1739 (1998).
- [50] CHUNG, N. K., C. H. PIN: *Obesity and the Occurrence of Heat Disorders*. Mil. Med. 161.12, 739-742 (1996).
- [51] COOKE, H. M., C. H. WYNDHAM, N. B. STRYDOM, J. S. MARITZ, G. A. G. BREDELL, V. W. KLEYN, J. F. MORRISON, J. PETER, C. G. WILLIAMS: *The effects of heat in the performance of work underground*. J. Mine Ventil. Soc. S. Afr. 14, 177-189 (1961).
- [52] COOPER, J. K.: *Preventing Heat Injury: Military Versus Civilian Perspective*. Mil. Med. 162.1, 55-58 (1997).
- [53] COOPER, K. E., W. L. VEALE: *The Elderly and their Risk of Heat Illness*. In: KHOGALI, M., J. R. S. HALES (Hrsg.): *Heat Stroke and Temperature Regulation*. Academic Press, Sydney 1983, S. 189-196.
- [54] CORBIT, J. D.: *Behavioral Regulation of Body Temperature*. In: HARDY J. D., A. P. GAGGE, J. A. J. STOLWIJK (Hrsg.): *Physiological and Behavioral Temperature Regulation*. Contributions to the First International Symposium on Temperature Regulation. Ch. C. Thomas, Springfield 1970, S. 777-801.
- [55] COYLE, E. F., S. J. MONTAIN: *Benefits of fluid replacement with carbohydrate during exercise*. Med. Sci. Sports Exerc. 24.9 Suppl., S324-S330 (1992).
- [56] COYLE, E. F., S. J. MONTAIN: *Thermal and Cardiovascular Responses to Fluid Replacement During Exercise*. In: GISOLFI C. V., D. R. LAMB, E. R. NADEL (Hrsg.): *Perspectives in Exercise Science and Sports Medicine. Volume 6: Exercise, Heat, and Thermoregulation*. Brown and Benchmark, Dubuque 1993, Kap. 5, S. 179-213.

- [57] DAANEN, H. A. M., W. A. LOTENS: *Synchronization of cold induced vasodilation in the finger*. In: LOTENS, W. A., G. HAVENITH (Hrsg.): *Proc. Fifth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Soesterberg 1992, S. 106-107.
- [58] DAANEN, H.: *Central and peripheral control of finger blood flow in the cold*. Thesis, Vrije Universiteit te Amsterdam, Soesterberg 1997, 258 S.
- [59] DAUNCEY, M. J., P. R. MURGATROYD, T. J. COLE: *A human calorimeter for the direct and indirect measurement of 24 h energy expenditure*. *Brit. J. Nutr.* 39, 557-566 (1978).
- [60] DIMRI, G. P., M. S. MALHOTRA, J. SEN GUPTA, T. S. KUMAR, B. S. ARORA: *Alterations in Aerobic-Anaerobic Proportions of Metabolism During Work in Heat*. *Eur. J. Appl. Physiol.* 45, 43-50 (1980).
- [61] DINMAN, B. D., R. R. STEPHENSON, S. M. HORVATH, M. O. COLWELL: *Work in Hot Environments: I. Field Studies of Work Load, Thermal Stress and Physiologic Response*. *J. Occup. Med.* 16, 785-791 (1974).
- [62] DINMAN, B. D., S. M. HORVATH: *Heat Disorders in Industry. A Reevaluation of Diagnostic Criteria*. *J. Occup. Med.* 26.7, 489-495 (1984).
- [63] DONOHO, C. R., C. R. RYLANDER: *Physiology, Treatment and prevention of heat illness*. *Delaware Med. J.* 38, 235-237 (1966).
- [64] DOZEN Y., K. ADACHI, S. OHTHUKI, Y. ARATANI, K. NSHIZAKURA, T. SAITOH, T. MIZUTANI, K. THUCHIDA, S. KAWASHIMA, Y. NAGAI, S. YAMAGUCHI, K. HARADA, S. TAKENISHI: *Studies of the heat and moisture transfer through clothing using a sweating thermal manikin*. In: MERCER J. B. (Hrsg.): *Thermal Physiology 1989. Proceedings of the International Symposium on Thermal Physiology Tromso, Norway, 16-21 July 1989*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1989, S. 519-524.
- [65] EISSING, G.: *Climate assessment indices*. *Ergonomics* 38.1, 47-57 (1995).
- [66] EKBLUM, B., CAROL J. GREENLEAF, J. E. GREENLEAF, L. HERMANSEN: *Temperature Regulation during Exercise Dehydration in Man*. *Acta Physiol. Scand.* 79, 475-483 (1970).
- [67] ELLIS, F. P.: *Effects of a Tropical Climate on Men in Warships*. *Brit. Med. Bull.* 5, 13-19 (1947).
- [68] ELLIS, F. P.: *Tropical Fatigue*. In: FLOYD W. F., A. T. WELFORD (Hrsg.): *Symposium on Fatigue*. H.K. Lewis & Co., London 1953, S. 21-39.
- [69] ELLIS, F. P., HELEN M. FERRES, A. R. LIND, P. S. B. NEWLING: *The upper tolerable levels of warmth for acclimatized European men working in the tropics*. *J. Physiol.* 125, 55P-56P (1954).
- [70] ELLIS, F. P., F. NELSON, L. PINCUS: *Mortality during Heat Waves in New York City July, 1972 and August and September, 1973*. *Environ. Res.* 10, 1-13 (1975).

- [71] ELLIS, F. P., A. N. EXTON-SMITH, K. G. FOSTER, J. S. WEINER: *Eccrine Sweating and Mortality During Heat Waves in very Young and very Old Persons*. *Isr. J. Med. Sci.* 12, 815-817 (1976).
- [72] ELLIS, F. P.: *Heat illness. I. Epidemiology*. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* 70, 402-411 (1976).
- [73] ELLIS, F. P.: *Heat illness. II. Pathogenesis*. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* 70, 412-418 (1976).
- [74] ELLIS, F. P.: *Heat illness. III. Acclimatization*. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.* 70, 419-425 (1976).
- [75] ENANDER, A. E., ST. HYGGE: *Thermal stress and human performance*. *Scand. J. Work Environ. Health* 16 (suppl 1), 44-50 (1990).
- [76] EPSTEIN, Y., G. KEREN, J. SACK: *Thyroid functions in heat-intolerant persons [letter]*. *Ann. Intern. Med.* 92, 260-261 (1980).
- [77] EPSTEIN, Y.: *Heat intolerance: predisposing factor or residual injury?* *Med. Sci. Sports Exerc.* 22.1, 29-35 (1990).
- [78] EVANS, W. J., F. R. WINSMANN, K. B. PANDOLF, R. F. GOLDMAN: *Self-paced hard work comparing men and women*. *Ergonomics* 23.7, 613-621 (1980).
- [79] EYOLFSON, D., X. XU, G. WESEEN, P. TIKUISIS, G. GIESBRECHT: *Measurement and prediction of maximal shivering capacity in humans*. In: Hodgdon, J. A.; Heaney, J. H.; Buono, M. J. (Eds.): *Environmental Ergonomics VIII, 8th International Conference on Environmental Ergonomics, San Diego, California, 18-23 October 1998*. San Diego 1999, p. 315-317.
- [80] FALK, B.: *Effects of Thermal Stress During Rest and Exercise in the Paediatric Population*. *Sports Med.* 25.4, 221-240 (1998).
- [81] FANGER, P. O.: *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, Copenhagen 1970, 244 S.
- [82] FIEBIG, M.: *Über den Einfluss des Alkohols auf den Europäer in den Tropen*. *Archiv für Schiffs- und Tropenhyg.* 5.1, 14-26 (1901).
- [83] FIEBIG, M.: *Über den Einfluss des Alkohols auf den Europäer in den Tropen (Fortsetzung)*. *Archiv für Schiffs- und Tropenhyg.* 5.2, 59-66 (1901).
- [84] FIEBIG, M.: *Über den Einfluss des Alkohols auf den Europäer in den Tropen (Fortsetzung und Schluss)*. *Archiv für Schiffs- und Tropenhyg.* 5.3, 92-106 (1901).
- [85] FÖRSTER, G.: *Klimauntersuchungen an ausgewählten Arbeitsplätzen der Eisen- und Stahlindustrie*. In: HETTINGER, Th., B. MÜLLER, G. EISSING (Hrsg.): *Klima. Behaglichkeit - Erträglichkeit - Zumutbarkeit. Symposium 1978. Dokumentation Arbeitswissenschaft, 1980, Kap. 3, S. 124-130.*

- [86] FRANCIS, K., R. FEINSTEIN, J. BRASHER: *Heat Illness in Football Players in Alabama*. Alabama Med. 60, 10-14 (1991).
- [87] FRANK, D.: *Ein Beitrag zu geroarbeitshygienischen Fragen bei Hitzearbeitern*. Zschr. ärztl. Fortbild. 64, 1119-1123 (1970).
- [88] FRANK, D., H.-J. SCHNEIDER, A. HESSE: *Untersuchungen zum Harnsteinleiden bei Hitzearbeitern*. Dt. Gesundh. Wesen 30, 716-720 (1975).
- [89] FRANK, M., A. DE VRIES, A. ATSMON, J. LAZEBNIK, S. KOCHWA: *Epidemiological investigation of urolithiasis in Israel*. J. Urol. 81.4, 497-505 (1959).
- [90] FRANK, M., A. ATSMON, G. YELLIN, J. LAZEBNIK, A. DE VRIES: *Nephrolithiasis in Israel*. Proc. Staff Meetings Beilinson Hospital No. 10.Oct., 1-11 (1961).
- [91] FRANK, M., A. DE VRIES: *Prevention of Urolithiasis. Education to Adequate Fluid Intake in a New Town Situated in the Judean Desert Mountains*. Arch. Environ. Health 13, 625-630 (1966).
- [92] FRANZEN, E.: *Medizinische Aspekte der Arbeit in tropischen Ländern*. Z. ärztl. Fortbild. 72, 950-955 (1978).
- [93] FREUND, B. J., M. J. JOYNER, S. M. JILKA, J. KALIS, J. M. NITTOLO, J. A. TAYLOR, H. PETERS, G. FEESE, J. H. WILMORE: *Thermoregulation during prolonged exercise in heat: alterations with beta-adrenergic blockade*. J. Appl. Physiol. 63, 930-936 (1987).
- [94] FUHRMAN, F. A.: *Modification of the action of drugs by heat*. In: UNESCO (Hrsg.): *Environmental physiology and psychology in arid conditions*. Paris 1963, S. 223-237.
- [95] FUNKEMEYER, M., B. KAMPMANN, G. KNOKE, C. PIEKARSKI: *Belastung und Beanspruchung von Grubenwehrmännern bei Übungen mit Sauerstoffschutzgerät*. DMT - Hauptstelle für das Grubenrettungswesen, Essen 1993, S. 1-100.
- [96] FUNKEMEYER, M., B. KAMPMANN, C. PIEKARSKI: *Belastung und Beanspruchung der Grubenwehrmitglieder*. Glückauf 130.9, 591-596 (1994).
- [97] FURMAN, K. I.: *Effects of Heat on Drug Action in Man*. Int. J. Biometeor. 10.2, 169-174 (1966).
- [98] GARDEN, J. W., I. D. WILSON, P. J. RASCH: *Acclimatization of healthy young adult males to a hot-wet environment*. J. Appl. Physiol. 21.2, 665-669 (1966).
- [99] GEBHARDT, HJ., B. H. MÜLLER, Th. HETTINGER, P. PAUSE: *Physiologische Bewertung von Strahlungsheizungen*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb 726; Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1995, 107 S.

- [100] GEBHARDT Hj., P. MEHNERT, Barbara GRIEFAHN, B. KAMPMANN, B. H. MÜLLER: *Zur Beurteilung der Klimabelastung an Arbeitsplätzen - Weiterentwicklung des Modells der Erforderlichen Schweißrate (ISO 7933)*. In: GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Arbeitsschutz-Managementsysteme - Risiken oder Chancen? Bericht zum 45. Arbeitswissenschaftlichen Kongreß vom 10. - 12. März 1999*. GfA-Press, Dortmund 1999, S. 79-82.
- [101] GEBHARDT, Hj., B. KAMPMANN, B. H. MÜLLER, H. PETERS, C. PIEKARSKI: *Systematische Analyse aktueller Klimasummenmaße für Hitze Arbeitsplätze*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb 829; Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1999, 150 S.
- [102] GERHARDS, G. A.: *Klimauntersuchungen in der Glasindustrie*. In: HETTINGER, Th., B. MÜLLER, G. EISSING (Hrsg.): *Klima. Behaglichkeit - Erträglichkeit - Zumutbarkeit. Symposium 1978*. Dokumentation Arbeitswissenschaft, 1980, Kap. 3, S. 143-157.
- [103] GERTNER, A., R. ISRAELI, Y. CASSUTO: *Water and electrolyte balance in workers exposed to a hot environment during their work shift*. *Ergonomics* 27, 125-134 (1984).
- [104] GERTNER, A., R. ISRAELI, Y. CASSUTO: *Water and electrolyte balance in workers exposed to a hot environment during their work shift*. *Ergonomics* 27, 125-134 (1984).
- [105] GERTNER, A., R. ISRAELI, Y. CASSUTO: *Effects of work and motivation on the heart rates of chronic heat-exposed workers during their regular shift work*. *Ergonomics* 27, 135-146 (1984).
- [106] GISOLFI, C. V., JUDITH S. COHEN: *Relationships among training, heat acclimation, and heat tolerance in men and women: the controversy revisited*. *Med. Sci. Sports* 11, 56-59 (1979).
- [107] GISOLFI C. V.: *Use of Electrolytes in Fluid Replacement Solutions: What Have We Learned from Intestinal Absorption Studies?*. In: MARRIOTT BERNARDETTE M. (Hrsg.): *Fluid Replacement and Heat Stress*. National Academy Press, 3. Aufl. Washington D. C. 1994, Kap. 2, S. 11-21.
- [108] GLOVER, D. M.: *Heat cramps in industry: their treatment and prevention by means of sodium chloride*. *J. Industr. Hyg.* 13, 347-360 (1931).
- [109] GOEDECKE, M.: *Entwicklung und Erprobung von Bergbaukühlkleidung*. *Bergbau* 35, 454-458 (1984).
- [110] GOLDMAN, R. F.: *Energy expenditure of soldiers performing combat type activities*. *Ergonomics* 8.3, 321-327 (1965).
- [111] GOLDSMITH, R., R. H. FOX, I. F. G. HAMPTON: *Effects of drugs on heat acclimatization by controlled hyperthermia*. *J. Appl. Physiol.* 22, 301-304 (1967).

- [112] GORDON, N. F.: *Effect of selective and nonselective beta-adrenoceptor blockade on thermoregulation during prolonged exercise in heat.* Am. J. Cardiol. 55, 74D-78D (1985).
- [113] GORDON, N. F., P. E. KRUGER, J. P. VAN RENSBURG, A. VAN DER LINDE, A. J. KIELBLOCK, J. F. CILLIERS: *Effect of beta-adrenoceptor blockade on thermoregulation during prolonged exercise.* J. Appl. Physiol. 58, 899-906 (1985).
- [114] GREENLEAF, J. E.: *Problem: thirst, drinking behaviour, and involuntary dehydration.* Med. Sci. Sports Exerc. 24.6, 645-656 (1992).
- [115] GREENLEAF J. E., T. MORIMOTO: *Mechanisms Controlling Fluid Ingestion: Thirst and Drinking.* In: BUSKIRK E. R., S. M. PUHL (Hrsg.): *Body Fluid Balance. Exercise and Sport.* CRC Press, Boca Raton 1996, Kap. 1, S. 3-17.
- [116] HAAS, J.: *Untersuchungen über die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen in einem tropischen Klima.* Forschungsberichte des Landes NRW 1983, 1-27 (1968).
- [117] HAAS, J.: *Arbeitsmedizin und Arbeitsphysiologie in den Tropen.* Med. Klinik 63, 1001-1004 (1968).
- [118] HAAS, J.: *Untersuchungen über die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen und seine Bruttoenergieumsätze bei industriellen und traditionellen Arbeiten in einem tropischen Klima.* Z. Tropenmed. Parasit. 21, 446-458 (1970).
- [119] HALLER, E. VON: *Gesundheitsbüchlein für die Tropen. Ratschläge zur hygienischen Lebensweise und zur Verhütung von Krankheiten und gesundheitlichen Schäden in den warmen Ländern.* Georg Thieme Verlag, 6. Aufl., Stuttgart 1972, S. 1-96.
- [120] HANCOCK, P. A.: *Task Categorization and the Limits of Human Performance in Extreme Heat.* Aviat. Space Environ. Med. 53, 778-784 (1982).
- [121] HANCOCK, P. A., I. VASMATZIDIS: *Human occupational and performance limits under stress: the thermal environment as a prototypical example.* Ergonomics 41.8, 1169-1191 (1998).
- [122] HARBER, PH., J. TAMIMIE, J. EMORY: *Estimation of the Exertion Requirements of Coal Mining Work.* Chest 85, 226-231 (1984).
- [123] HARDY, J. D., E. F. DUBOIS: *Differences between men and women in their response to heat and cold.* Proc. Nat. Acad. Sci. 26, 389-398 (1940).
- [124] HARDY, J. D.: *Thermal comfort and health.* ASHRAE J. 13, 43-51 (1971).
- [125] HARRIS, J. A., F. G. BENEDICT: *A biometric study of basic metabolism in man.* Publ. No. 279. Carnegie Institution, Washington 1919.
- [126] HASSE, A.: *Leistung und klimatische Bedingungen im Bergbau.* Arbeitsphysiol. 8, 455-475 (1935).

- [127] HAUER: *Tropenhygienische Probleme im nordafrikanischen Operationsgebiet*. Dt. Ärzteblatt 71, 180-183 (1941).
- [128] HAVENITH, G., R. HEUS, W. A. LOTENS: *Resultant clothing insulation: a function of body movement, posture, wind, clothing fit and ensemble thickness*. Ergonomics 33, 67-84 (1990).
- [129] HAVENITH, G., H. VAN MIDDENDORP: *The relative influence of physical fitness, acclimatization state, anthropometric measures and gender on individual reactions to heat stress*. Eur. J. Appl. Physiol. 61, 419-427 (1990).
- [130] HAVENITH, G., R. HEUS, W. A. LOTENS: *Clothing ventilation, vapour resistance and permeability index: changes due to posture, movement and wind*. Ergonomics 33, 989-1005 (1990).
- [131] HAVENITH, G., Y. INOUE, V. LUTTIKHOLT, W. L. KENNEY: *Age predicts cardiovascular, but not thermoregulatory, responses to humid heat stress*. Eur. J. Appl. Physiol. 70, 88-96 (1995).
- [132] HAVENITH, G.: *Heat Balance when Wearing Protective Clothing*. Ann. Occup. Hyg. 43.5, 289-296 (1999).
- [133] HAVENITH, G., I. HOLMÉR, DEN E. A. HARTOG, K. C. PARSONS: *Clothing Evaporative Heat Exchange - Proposal for Improved Prediction in Standards and Models*. Ann. Occup. Hyg. 43.5, 339-346 (1999).
- [134] HEISING, M., J. WERNER: *Differential heating of trunk and extremities. Effects on thermoregulation mechanisms*. Eur. J. Appl. Physiol. 54, 79-83 (1985).
- [135] HEISING, M.: *Die thermoregulatorische Ansteuerung der lokalen Schweißrate des Menschen*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1989, 125 S.
- [136] HERGT, G.: *Die Marginalisierung der schweren körperlichen Arbeit im modernen Produktionsprozeß. Ein Essay zur geistigen Situation des Reviers*. Sozialforschungsstelle Dortmund: Beiträge aus der Forschung Band 10, Dortmund 1985, 38 S.
- [137] HETTINGER, TH.: *Angewandte Ergonomie*. Bartmann Verlag, Frechen 1970.
- [138] HETTINGER, TH., H. PETERS: *Arbeitsplatzanalysen von Hitze Arbeitsplätzen der Eisen- und Stahlindustrie*. Z. Arb.wiss. 37, 34-40 (1983).
- [139] HETTINGER, TH., B. H. MÜLLER, H. PETERS, J. PETERS, R. TIELSCH, M. ULRICH: *Hitzearbeit. Untersuchung an ausgewählten Arbeitsplätzen der Eisen- und Stahlindustrie, Band 1*, ASER, Wuppertal 1985, 229 S.
- [140] HETTINGER, TH., B. H. MÜLLER, HJ. GEBHARDT: *Ermittlung des Arbeitsenergieumsatzes bei dynamisch-muskulärer Arbeit*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz. Fa 22. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1989, 80 S.

- [141] HETTINGER, TH., B. H. MÜLLER, R. TIELSCH, D. WASCHINSKI: *Arbeitsbedingungen in der Glasindustrie*. *Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed.* 27, 359-367 (1992).
- [142] HIERNAUX, J., P. RUDAN, A. BRAMBATI: *Climate and the weight/height relationship in sub-Saharan Africa*. *Ann. Hum. Biol.* 2, 3-12 (1975).
- [143] HIRATA, K., T. NAGASAKA, M. HIRASHITA, T. TAKAHATA: *Increase in evaporative and non-evaporative heat loss from the forearm depends on venous return from the hand during exercise*. In: MERCER, J. B. (Hrsg.): *Thermal Physiology 1989. Proceedings of the International Symposium on Thermal Physiology Tromsø, Norway, 16-21 July 1989*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1989, S. 155-160.
- [144] HÖFLER, W.: *Changes in regional distribution of sweating during acclimatization to heat*. *J. Appl. Physiol.* 25, 503-506 (1968).
- [145] HÖFLER, W., J. LADIPOH, U. LAASER: *Beziehung zwischen Schweißmenge, Verdunstung und Körpertemperatur bei der Akklimatisation in künstlichem feuchtheißen Klima*. *Int. Z. Angew. Physiol.* 27, 34-42 (1969).
- [146] HOHNSBEIN, J., C. PIEKARSKI, B. KAMPMANN: *Influence of high ambient temperature and humidity on visual sensitivity*. *Ergonomics* 26, 905-911 (1983).
- [147] HOHNSBEIN, J., C. PIEKARSKI, B. KAMPMANN, TH. NOAK: *Effects of heat on visual acuity*. *Ergonomics* 27, 1239-1246 (1984).
- [148] HOHNSBEIN, J., B. KAMPMANN, C. PIEKARSKI, T. NOAK: *Zum Einfluß von Hitzebelastungen auf die Sehschärfe des Menschen*. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. 30. Arbeitswissenschaftlicher Kongreß in Düsseldorf 15./16. Mai 1984. Auszüge aus den Vorträgen S. 14.
- [149] HOLLMANN, F.: *Der Einsatz von Grubenwehren unter extremen Temperaturverhältnissen*. *Wiss. Mitteil. Drägerwerk* 22, 5-45 (1952).
- [150] HOLMÉR, I., DÉsirÉE C. E. GAVHED, S. GRAHN, H. O. NILSSON: *Effect of wind and body movements on clothing insulation - Measurement with a moveable thermal manikin*. In: LOTENS, W. A., G. HAVENITH (Hrsg.): *Proc. Fifth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Soesterberg 1992, S. 66-67.
- [151] HOLMÉR, I., H. NILSSON, G. HAVENITH, K. C. PARSONS: *Clothing Convective Heat Exchange - Proposal for Improved Prediction in Standards and Models*. *Ann. Occup. Hyg.* 43.5, 329-337 (1999).
- [152] HOUSE, J. R.: *Hand immersion as a method of reducing heat strain during rest periods*. In: FRIM, J., M. B. DUCHARME, P. TIKUISIS (Hrsg.): *Proc. Sixth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Montebello, 1994, S. 10-11.

- [153] HUBBARD, R. W., L. E. ARMSTRONG: *The heat illnesses: Biochemical, ultrastructural and fluid-electrolyte considerations*. In: PANDOLF, K. B., M. N. SAWKA, R. R. GONZALEZ (Hrsg.): *Human performance physiology and environmental medicine at terrestrial extremes*. Benchmark Press, Indianapolis 1988, S. 305-359.
- [154] HÜBNER, A. C., D. SZADOWSKI: *Tauglichkeitsbeurteilung von Atemschutzgerätträgern*. VFDB-Zeitschrift 29, 8-12 (1980 Heft 1).
- [155] HUNT, E. H.: *The regulation of body temperature in extremes of dry heat*. J. Hyg. (London) 12, 479-488 (1912).
- [156] HUTTUNEN, P.: *Effect of ethanol on heat tolerance*. In: ILMARINEN, R., A. PÄSCHE (Hrsg.): *Proc. Third Int. Conf. Environ. Ergon.*, Helsinki 1988, S. 9.
- [157] JENSEN, R. C.: *Workers' compensation claims relating to heat and cold exposure*. Profess. Safety; Sept. 1983, 19-24.
- [158] JOHNSON, K. D., W. R. THOMPSON: *Exercise-induced water intoxication and hyponatremia*. Ann. Sports Med. 3.3, 167-170 (1987).
- [159] JOHNSON, R. F., DONNA J. MERULLO: *Subjective Reports of Heat Illness*. In: MARRIOTT, BERNARDETTE M. (Hrsg.): *Nutritional Needs in Hot Environments*. National Academy Press, Washington D. C. 1993, S. 277-291.
- [160] JONES, D. S.: *Deaths in the Chicago Heat Wave*. N. Engl. J. Med. 335, 1848 (1996).
- [161] JONES, P. J. H., ANDREA L. WINTHROP, D. A. SCHOELLER, R. M. FILLER, P. R. SWYER, J. SMITH, T. HEIM: *Evaluation of doubly labeled water for measuring energy expenditure during changing nutrition*. Am. J. Clin. Nutr. 47, 799-804 (1988).
- [162] JONES, S., A. P. LIANG, E. M. KILBOURNE, MARIE R. GRIFFIN, P. A. PATRIARCA, ST. G. F. WASSILAK, R. J. MULLAN, R. F. HERRICK, H. D. DONNELL, K. CHOI, ST. B. THACKER: *Morbidity and Mortality Associated With the July 1980 Heat Wave in St. Louis and Kansas City, Mo.* JAMA 247.24, 3327-3331 (1982).
- [163] KALKOWSKY, B., B. KAMPMANN, C. PIEKARSKI: *Zur Beanspruchung von Bergleuten an klimatisch belasteten Betriebspunkten*. Dok. Verhandl. Dt. Ges. f. Arbeits- und Umweltmed. 36. Jahrestagung in Wiesbaden vom 6. bis 9. Mai 1996, 435-439 (1996).
- [164] KALKOWSKY, B., B. KAMPMANN, G. BRESSER, C. PIEKARSKI: *Hitzeorthostase - ein wesentliches Indiz für Hitzeunverträglichkeit?* In: Dokumentationsband über die 37. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. in Wiesbaden vom 12. bis 15. Mai 1997, 529-532 (1997).
- [165] KAMINSKI, G.: *Klimasituation in der Gießereiindustrie*. In: HETTINGER, Th., B. MÜLLER, G. EISSING (Hrsg.): *Klima. Behaglichkeit - Erträglichkeit - Zumutbarkeit. Symposium 1978*. Dokumentation Arbeitswissenschaft, 1980, Kap. 3, S. 100-113.

- [166] KAMPMANN, B., C. PIEKARSKI: *Datenerfassung und -verarbeitung in den Klima-Simulationslaboratorien (MIKADO) im Institut für Arbeitsphysiologie, Dortmund*. XIV. Kolloquium der Hessischen und Nordrhein-Westfälischen Lehrstühle für Arbeitsphysiologie, Arbeitswissenschaft und Arbeitsmedizin am 7. und 8. Oktober 1982 in der katholischen Akademie Schwerte. Herrn Prof. H. G. Wenzel zum 60. Geburtstag gewidmet.
- [167] KAMPMANN, B., C. PIEKARSKI, J. HOHNSBEIN: *Zur Änderung der Herzschlagfrequenz bei Wahrnehmungsaufgaben in unterschiedlich belastendem Klima*. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. 30. Arbeitswissenschaftlicher Kongreß in Düsseldorf 15./16. Mai 1984. Auszüge aus den Vorträgen S. 15.
- [168] KAMPMANN, B.: *Aktive Schnittstelle zur Steuerung der Datenabgabe zwischen PCM-Decoder und Auswerterechner*. Biomed. Technik 29, 75-76 (1984).
- [169] KAMPMANN, B., P. MORFELD: *Neue arbeitsphysiologische Untersuchungen (III. Teil) des sich anbahnenden "Systems" Materialtransport im Vortrieb und Ausbau*. Abschlußbericht des Forschungsprojekts EGKS 7247/13/045, Dortmund 1986, 139 S.
- [170] KAMPMANN, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI, H. G. WENZEL: *Zur Verwendung von Absolutwerten bzw. deren Differenzen zu den Ruhewerten als Beanspruchungsgrößen unter Hitzebelastung am Beispiel der Herzschlagfrequenz und der Körperinnentemperatur*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. 26, 309-313 (1986).
- [171] KAMPMANN, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI: *Vergleich der physiologischen Beanspruchung bei Einsatz eines modernen Arbeitsmittels und bei konventioneller Arbeitstechnik in der Herrichtung von Streben im Steinkohlenbergbau*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. 27, 433-437 (1987).
- [172] KAMPMANN, B., P. MORFELD: *Zur Bedeutung der Hauttemperatur für die Beschreibung der Wärmebilanz des hitzebelasteten arbeitenden Menschen - Klimakammeruntersuchungen und analytische Modelle*. XIX. Kolloquium der Hessischen und Nordrhein-Westfälischen Lehrstühle für Arbeitsphysiologie, Arbeitswissenschaft und Arbeitsmedizin am 17. und 18. Dezember 1987 in der katholischen Akademie Schwerte. - Emeritierungskolloquium für Herrn Prof. H. G. Wenzel.
- [173] KAMPMANN, B., P. MORFELD, W. WERNER: *Vergleich der Herz-Kreislauf-Beanspruchung von Gasschutzwehr- und Grubenwehrmitgliedern im Steinkohlenbergbau während einer Standardübung der Gasschutzwehr*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. 28, 631-633 (1988).
- [174] KAMPMANN, B., W. WERNER, P. MORFELD: *Herzschlagfrequenzen und deren altersabhängige Einstufung für Gasschutzwehrmitglieder bei einer Atemschutzübung*. In: DOKUMENTATION ARBEITSWISSENSCHAFT: GfA-Jahresdokumentation. Bericht zum 35. Arbeitswissenschaftlichen Kongreß an der Universität Stuttgart-Hohenheim. Bd. 21. Verlag O. Schmidt, Köln 1989, S. 24.

- [175] KAMPMANN, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI: *Die Beanspruchung des Bergmanns beim Herrichten und Ausrauben eines Strebes*. BMFT Projekt HdA 01 HD 024/6; Abschlußbericht, Essen 1989, 123 S.
- [176] KAMPMANN, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI: *Energieumsatzmessungen an Bergleuten beim Herrichten und Ausrauben von Streben mit Schildausbau*. Glückauf-Forschungshefte 52, 271-277 (1991).
- [177] KAMPMANN, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI: *Überblick zur Beanspruchung des Bergmanns beim Herrichten und Ausrauben eines Strebes*. Glückauf-Forschungshefte 53, 79-86 (1992).
- [178] KAMPMANN, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI: *Einzelauswertungen zur Beanspruchung des Bergmanns beim Herrichten und Ausrauben eines Strebes*. Glückauf-Forschungshefte 53, 180-184 (1992).
- [179] KAMPMANN, B., P. MORFELD, C. PIEKARSKI: *Beanspruchung des Bergmanns bei der Fahrung*. Glückauf-Forschungshefte 54.4, 185-192 (1993).
- [180] KAMPMANN, B.: *Klimabelastung im Bergbau: Zur Bewertung von klimatisch belasteter Arbeit im Bergbau durch die Norm ISO 7933*. In: ARBEITSGEMEINSCHAFT DES SAARLANDES ZUR ERFORSCHUNG UND FÖRDERUNG DES GESUNDHEITSSCHUTZES IM BERGBAU e.V. (Hrsg.): *Krankheitsrisiko und Gesundheitsschutz im Bergbau*. Tagung vom 27.-29. April 1994 in Saarbrücken, S. 140-144.
- [181] KAMPMANN, B., H. CRAMER, H.-O. RICHTER, R. GIZA, J. PAUL, C. PIEKARSKI: *Beanspruchung von Arbeitern beim Sortieren von Rücklaufmaterial aus einem Bergwerk in einer Sortierhalle*. In: Jahresdokumentation 1995 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Bericht zum 41. Arbeitswissenschaftlichen Kongreß an der Technischen Universität Wien. Dokumentation Arbeitswissenschaft, Band 38 Verlag O. Schmidt, Köln 1995, S. 49.
- [182] KAMPMANN, B., C. PIEKARSKI: *Bewertung klimabelasteter Arbeitsplätze*. Sichere Arbeit, Heft 1/1995, 14-21.
- [183] KAMPMANN, B., C. PIEKARSKI: *Bewertung klimabelasteter Arbeitsplätze*. Sichere Arbeit, Heft 2/1995, 55.
- [184] KAMPMANN, B., G. BRESSER, C. PIEKARSKI: *Zum Einfluß des individuellen Übergewichts auf die Beanspruchung bei klimatischer Belastung*. Dok. Verhandl. Dt. Ges. f. Arbeits- und Umweltmed. 36. Jahrestagung in Wiesbaden vom 6. bis 9. Mai 1996, 157-159 (1996).
- [185] KAMPMANN, B., G. BRESSER, C. PIEKARSKI: *Die Beanspruchung von Grubenwehrmitgliedern bei einer Flammenschutzübung unter Sauerstoffschutzgerät in Abhängigkeit von körperlicher Leistungsfähigkeit und Wärmetoleranz*, Dokumentation Arbeitswissenschaft 39, 89-90 (1996).

- [186] KAMPMANN, B., B. KALKOWSKY, C. PIEKARSKI: *Coping with heat stress: physiological heat strain at hot working places in coal mines*. In: BODIL NIELSEN JOHANNSEN, RUTH NIELSEN (Eds.): *Thermal Physiology 1997. Proceedings of the International Symposium on Thermal Physiology*, Copenhagen 8.-12. July 1997, The August Krogh Institute Copenhagen 1997, p. 119-122.
- [187] KAMPMANN, B., H. PIWELLEK, M. SAALMANN, F. BORKENT, A.-P. SITTE, C. PIEKARSKI: *Verringerung der physischen Beanspruchung bei Gleisbauarbeiten durch den Einsatz eines Gleisumbauzuges*. In: Dokumentationsband über die 38. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. in Wiesbaden vom 11. bis 14. Mai 1998, (Hrsg. E. Hallier, J. Bünger), Rindt-Druck, Fulda 1998, S. 659-661.
- [188] KAMPMANN, B., J. MALCHAIRE, A. PIETTE: *Comparison between the PHS model and the ISO 7933 standard. Evaluation and Control of Warm Working Conditions*. BIOMED "HEAT STRESS" research project. Barcelona Conference June 14-15 1999, Proceedings p. 56-65.
- [189] KAMPMANN, B., B. KALKOWSKY: *Untersuchung und Bewertung von Hitzewirkungen auf Bergleute im Steinkohlenbergbau*. Technologieprogramm Bergbau, Landesoberbergamt NW, Förderkennzeichen: 65.11-688-2, Abschlußbericht Dezember 1999, 72 S.; Projektleiter: Prof. Dr. med. C. Piekarski.
- [190] KAMPMANN, B., C. PIEKARSKI: *The evaluation of workplaces subjected to heat stress: Can ISO 7933 adequately describe heat strain in industrial workplaces?* Appl. Ergonomics 31.1, 59-71 (2000).
- [191] KELLERMANN, A. L., K. H. TODD: *Killing Heat*. N. Engl. J. Med. 335.2, 126-127 (1996).
- [192] KENNEY, W. L.: *Effects of selective α -adrenergic blockade on control of human skin blood flow during exercise*. In: MILTON. A. S. (Hrsg.): *Temperature Regulation. Recent Physiological and Pharmacological Advances*. Birkhäuser Verlag, Basel 1994, S. 151-157.
- [193] KEREN, G., Y. EPSTEIN, A. OHRI, A. MAGAZANIK: *Orthostatic responses in heat tolerant and intolerant subjects compared by three different methods*. Aviat. Space Environ. Med. 51.11, 1205-1208 (1980).
- [194] KEREN, G., Y. EPSTEIN, A. MAGAZANIK: *Temporary heat intolerance in a heatstroke patient*. Aviat. Space Environ. Med. 52, 116-117 (1981).
- [195] KHOGALI, M.: *The Makkah Body Cooling Unit*. In: KHOGALI, M., J. R. S. HALES (Hrsg.): *Heat Stroke and Temperature Regulation*. Academic Press, Sydney 1983, Kap. 12, S. 139-148.

- [196] KHOGALI, M.: *Heat stroke: An overview, with particular reference to the Makkah pilgrimage*. In: HALES, J. R. S., D. A. B. RICHARDS (Hrsg.): *Heat Stress: Physical Exertion and Environment*. Excerpta Medica, Amsterdam 1987, S. 21-36.
- [197] KHOGALI, M., M. I. AL KHAWASHKI: *Heat Stroke During the Makkah Pilgrimage (Hajj)*. Saudi Med. J. 2, 85-93 (1981).
- [198] KIELBLOCK, A. J.: *A critical review of parameters of heat tolerance with specific reference to indices of heat stress*. In: HALES, J. R. S., D. A. B. RICHARDS (Hrsg.): *Heat Stress: Physical Exertion and Environment*. Excerpta Medica, Amsterdam 1987, S. 469-478.
- [199] KIELBLOCK, A. J.: *Strategies for the prevention of heat disorders with particular reference to the efficacy of body cooling procedures*. In: HALES, J. R. S., D. A. B. RICHARDS (Hrsg.): *Heat Stress: Physical Exertion and Environment*. Excerpta Medica, Amsterdam 1987, S. 489-497.
- [200] KING, B. A., M. E. BARRY: *The physiological adaptations to heat-stress with a classification of heat illness and a description of the features of heat exhaustion*. S. Afr. Med. J. 36, 451-455 (1962).
- [201] KLEIBER, M.: *Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier "The Fire of Life". Ein Lehrbuch der Tierenergetik*. Verlag P. Parey, Hamburg 1967, S. 153: Soziale Temperaturregulierung.
- [202] KLEINHANS, G.: *Die Hitzekrankheit in den Armeen der Vergangenheit aus wehrmedizinischer Sicht*. Wehrdienst und Gesundheit 14, 523-537 (1980).
- [203] KLUGER, M. J., D. H. RINGLER, M. R. ANVER: *Fever and Survival*. Science 188, 166-168 (1975).
- [204] KNOCHEL, J. P.: *Environmental heat illness. An eclectic review*. Arch. Intern. Med. 133.5, 841-864 (1974).
- [205] KOLKA, MARGARET A.: *Temperature Regulation in Women*. Med. Exerc. Nutrit. Health 1, 201-207 (1992).
- [206] KOLKA MARGARET A.: *Heat acclimation*. In: MACLEOD D. A. D., R. J. MAUGHAN, C. WILLIAMS, C. R. MADELEY, J. C. M. SHARP, R. W. NUTTON (Hrsg.): *Intermittent High Intensity Exercise: Preparation, stresses and damage limitation*. E. & F.N. Spon, London 1993, S. 391-401.
- [207] KRISTAL-BONEH, E., J. G. GLUSMAN, R. SHITRIT, C. CHAEMOVITZ, Y. CASSUTO: *Physical Performance and Heat Tolerance After Chronic Water Loading and Heat Acclimation*. Aviat. Space Environ. Med. 66, 733-738 (1995).
- [208] KUHLEMEIER, K. V., J. M. MILLER, F. N. DUKES-DOBOS, R. JENSEN: *Determinants of the prescriptive zone of industrial workers*. J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exerc. Physiol. 43.2, 347-351 (1977).

- [209] LAAMANEN, H., HARRIET MEINANDER, I. HOLMÉR: *Foul Weather Clothing Studied with a Sweating and a Moving Manikin*. In: SHAPIRO, Y., D. S. MORAN, Y. EPSTEIN (Hrsg.): *Environmental Ergonomics. Recent Progress and New Frontiers*. Freund Publishing House, London 1996, S. 434-440.
- [210] LAASER, U.: *Physiologische Reaktionen während eines fünfwöchigen Daueraufenthaltes in einem künstlichen feuchtheißen Klima*. *Int. Z. Angew. Physiol.* 25, 279-302 (1968).
- [211] LADELL, W. S. S.: *Heat Cramps*. *The Lancet*, 836-839 (1949).
- [212] LATIF, M.: *El Niño / Southern Oscillation*. *Phys. Bl.* 54.6, 525-528 (1998).
- [213] LAVENNE, F.: *Die Belastung des Bergmannes - insbesondere bei Arbeit unter hoher Temperatur*. *Gewerkschaftl. Rundschau* 20, 434-443 (1967).
- [214] LEACH, CAROLYN S., J. I. LEONARD, P. C. RAMBAUT, P. C. JOHNSON: *Evaporative water loss in man in a gravity-free environment*. *J. Appl. Physiol.: Respir. Environ. Exercise Physiol.* 45, 430-436 (1978).
- [215] LEE, D. H. K.: *Seventy-five Years of Searching for a Heat Index*. *Environ. Res.* 22, 331-356 (1980).
- [216] LEHMANN, G., A. SZAKÁLL: *Die Bedeutung des Flüssigkeits- und Chlorersatzes für die Leistungsfähigkeit des Hitzearbeiters*. *Arbeitsphysiol.* 9, 630-652 (1937).
- [217] LEHMANN, H.: *Frömmigkeitsgeschichtliche Auswirkungen der "Kleinen Eiszeit"*. In: SCHIEDER, W. (Hrsg.): *Volksreligiosität in der modernen Sozialgeschichte. Geschichte und Gesellschaft. Zeitschrift für Historische Sozialwissenschaft. Heft 11*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1990, S. 31-50.
- [218] LEITHEAD, C. S., J. GUTHRIE, S. DE LA PLACE, B. MAEGRAITH: *Incidence, Aetiology, and Prevention of Heat Illness on Ships in the Persian Gulf*. *Lancet* 2, 109-114 (1958).
- [219] LENAERTS-LANGANKE, H., B. KAMPMANN, R. DERWALL, C. PIEKARSKI, P. MORFELD: *Verbesserung der Betreuung von Bergleuten mit Gesundheitsstörungen durch Klimaeinwirkungen*. *Dok. Verhandl. Dt. Ges. f. Arbeits- und Umweltmed.* 36. Jahrestagung in Wiesbaden vom 6. bis 9. Mai 1996, 453-456 (1996).
- [220] LENAERTS-LANGANKE, H.: *Bergleute, Berufe im Bergbau unter Tage*. In: KONIETZKO, J., H. DUPUIS (Hrsg.): *Handbuch der Arbeitsmedizin. Arbeitsphysiologie, Arbeitspathologie, Prävention*. 18. Erg. Lfg. 3/97. Ecomed, Landsberg a.L. 1997, Kap. IV-9.2.2, S. 1-39.
- [221] LICHTENBERG, G. C.: *Neue Erfindungen und physikalische Merkwuerdigkeiten*. In: G. C. LICHTENBERG (Hrsg.): *Goettinger Taschen Calender vom Jahr 1778*, Dietrich, Göttingen 1778, S. 57f.

- [222] LIND, A. R., R. F. HELLON, J. S. WEINER, R. M. JONES: *Tolerance of men to work in hot, saturated environments with reference to mines rescue operations*. Brit. J. Ind. Med. 12, 296-303 (1955).
- [223] LIND, A. R., J. S. WEINER, R. F. HELLON, R. M. JONES, D. C. FRAZER: *Reactions of Mines-Rescue Personnel to work in hot environments*. National Coal Board. Med. Res. Memo. No. 1, 1-68 (1957).
- [224] LIND, A. R.: *A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work*. J. Appl. Physiol. 18, 51-56 (1963).
- [225] LIND, A. R.: *The Lack of Heatstroke in European Miners Working in Hot Climates*. Am. Ind. Hyg. Ass. J. 31, 460-465 (1970).
- [226] LINDHOLM, H., RAIJA ILMARINEN, A. VIILANEN, A. LAKKONEN, T. LINDHOLM, R. KEMPPAINEN: *The heat tolerance after an acute heat illness - A follow up study among military conscripts*. In: LOTENS, W. A., G. HAVENITH (Hrsg.): *Proc. Fifth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Soesterberg 1992, S. 16-17.
- [227] LINSEL, E.: *Das Grubenklima*. Glückauf 87, 677-688 (1951).
- [228] LLOYD, E. L.: *ABC of Sports Medicine. Temperature and Performance - I: Cold*. Br. Med. J. 309, 531-534 (1994).
- [229] LOMAX, P.: *Drug-Induced Changes in the Thermoregulatory System*. In: KHOGALI, M., J. R. S. HALES (Hrsg.): *Heat Stroke and Temperature Regulation*. Academic Press, Sydney 1983, S. 197-211.
- [230] LOMAX, P.: *Implications of drugs for heat and exercise tolerance*. In: HALES, J. R. S., D. A. B. RICHARDS (Hrsg.): *Heat Stress: Physical Exertion and Environment*. Excerpta Medica, Amsterdam 1987, S. 399-418.
- [231] LOUHEVAARA, V., T. TUOMI, J. SMOLANDER, O. KORHONEN, A. TOSSAVAINEN, J. JAAKKOLA: *Belastung und Beanspruchung bei industriellen Tätigkeiten unter Atemschutz*. Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed. 20.2, 25-31 (1985).
- [232] LÜRIG, H. J., P. THIEN: *Untersuchung der Beanspruchung des Menschen durch Arbeit und Klima im Salzbergbau*. Forschungsbericht HA 83-005. TU Clausthal, Institut für Bergbau 1983, 142 (1983).
- [233] MACK, G. W., L. M. SHANNON, E. R. NADEL: *Influence of beta-adrenergic blockade on the control of sweating in humans*. J. Appl. Physiol. 61, 1701-1705 (1986).
- [234] MACKINNON, M.: *European children in the tropical highlands*. Lancet 199, 944-951 (1920).
- [235] MACKWORTH, N. H.: *Effects of heat on wireless telegraphy operators hearing and recording morse messages*. Brit. J. Ind. Med. 3, 143-156 (1946).

- [236] MAES, M., F. DE MEYER, P. THOMPSON, D. PEETERS, P. COSYNS: *Synchronized annual rhythms in violent suicide rate, ambient temperature and the light-dark span*. Acta Psychiatr. Scand. 90, 391-396 (1994).
- [237] MAIRIAUX, P., J. MALCHAIRE: *Workers self-pacing in hot conditions: A case study*. Appl. Ergon. 16.2, 85-90 (1985).
- [238] MAIRIAUX, P., J. MALCHAIRE: *Le travail en ambiance chaude. Principes, méthodes, mise en œuvre*. Masson, Paris 1990, 172 S.
- [239] MALCHAIRE, J. B.: *Evaluation of natural wet bulb and wet globe thermometers*. Ann. Occup. Hyg. 19, 251-258 (1976).
- [240] MALCHAIRE, J., B. KAMPMANN, H.J. GEBHARDT, P. MEHNERT, G. ALFANO: *The predicted heat strain index: Modifications brought to the required sweat rate index. Evaluation and control of warm working conditions*. BIOMED "HEAT STRESS" research project. Barcelona Conference June 14-15 1999, Proceedings p. 39-44.
- [241] MALCHAIRE, J., H. J. GEBHARDT, A. PIETTE: *Strategy for Evaluation and Prevention of Risk Due to Work in Thermal Environments*. Ann. Occup. Hyg. 43.5, 367-376 (1999).
- [242] MANZ, F., I. MANZ, T. LENNERT: *Zur Geschichte der ärztlichen Stillempfehlungen in Deutschland*. Monatsschr. Kinderheilkd. 145, 572-587 (1997).
- [243] MARSCHAK, M., L. KLAUS: *Untersuchungen über die Wärmeregulation. I. Mitteilung. Über die Wirkung der Wasser- und Kochsalzaufnahme auf den Kochsalzgehalt im menschlichen Schweiß und Blut bei hoher Umgebungstemperatur*. Arch. Hyg. Bakteriol. 101, 297-307 (1929).
- [244] MARSCHAK, M., O. DUDELSKY: *Untersuchungen über die Wärmeregulation. II. Mitteilung. Über die Wirkung hoher Umgebungstemperaturen auf den physikalischen Zustand des Blutes und auf die Wärmeregulation bei Menschen in Verbindung mit Wasser- und Kochsalzaufnahme*. Arch. Hyg. Bakteriol. 101, 325-337 (1929).
- [245] MARTH, W.: *Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkung*. Glückauf 126, 706-710 (1990).
- [246] MARTINEZ, BEVERLY F., J. L. ANNEST, E. M. KILBOURNE, MARILYN L. KIRK, K.-J. LUI, SUZANNE M. SMITH: *Geographic Distribution of Heat-Related Deaths Among Elderly Persons. Use of County-Level Dot Maps for Injury Surveillance and Epidemiologic Research*. JAMA 262.16, 2246-2250 (1989).
- [247] MCARDLE, B., W. DUNHAM, H. E. HOLLING, W. S. S. LADELL, J. W. SCOTT, M. L. THOMSON, J. S. WEINER: *The prediction of physiological effects of warm and hot environments*. Med. Res. Council; Royal Naval Personnel Res. Comm. Report No. 47/391. London 1947.

- [248] MEHNERT, P., B. GRIEFAHN, P. BRÖDE: *Zum Einfluß individueller Parameter bei der Beurteilung der physiologischen Beanspruchung an Hitze Arbeitsplätzen durch die „erforderliche Schweißrate“ (ISO 7933)*. Dokumentationsband über die 38. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin, Rindt-Druck, Fulda 1998, S. 271-274.
- [249] MEHNERT, P., J. MALCHAIRE, A. PIETTE, B. KAMPMANN: Prediction of the skin temperature. In: Evaluation and Control of Warm Working Conditions. BIOMED "HEAT STRESS" research project. Barcelona Conference June 14-15 1999, Proceedings p. 37-38.
- [250] MEINANDER, HARRIET: *Determination of clothing comfort properties with the sweating thermal manikin*. In: LOTENS, W. A., G. HAVENITH (Hrsg.): *Proc. Fifth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Soesterberg 1992, S. 40-41.
- [251] MEINANDER, HARRIET: *Loggers' protective clothing studied with the sweating thermal manikin and during wear tests*. In: FRIM, J., M. B. DUCHARME, P. TIKUISIS (Hrsg.): *Proc. Sixth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Montebello 1994, S. 194-195.
- [252] MILLARD-STAFFORD, MINDY: *Fluid Replacement During Exercise in the Heat*. Sports Med. 13.4, 223-233 (1992).
- [253] MILLER, D. A.: *Scientific and military aspects of heat stress, acclimatization, and heat illness: literature review and introduction of laboratory experiment*. Naval Med. Res. Inst. April 1982, 1-7 (1982).
- [254] MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, MITTELSTAND UND TECHNOLOGIE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: *Bericht über die Tätigkeit der Bergbehörden des Landes Nordrhein-Westfalen im Jahre 1990*. Düsseldorf 1991.
- [255] MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, MITTELSTAND, TECHNOLOGIE UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: *Bericht über die Tätigkeit der Bergbehörden des Landes Nordrhein-Westfalen im Jahre 1997*. Düsseldorf 1998.
- [256] MISAQI, F.: *Heat stress in mining*. MSHA SM6 1977 34p. Zit. nach: SANDERS, M. S., J. M. PEAY: *Heat Stress*. Human Factors in Mining, Inf. Circular 9182, 109-115 (1988).
- [257] MITTLEMAN, KAREN, ANNGENE ANTHONY, DAWN PROVENZALE: *Influence of angiotensin blockade during exercise in the heat in normotensive males and females*. In: LOTENS, W. A., G. HAVENITH (Hrsg.): *Proc. Fifth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Soesterberg 1992, S. 110-111.
- [258] MOHR, W.: *Beobachtungen bei Rückkehrern aus tropischen Ländern*. Med. Klinik 63, 981-985 (1968).
- [259] MONTAIN, S. J., M. N. SAWKA, W. A. LATZKA, C. R. VALERI: *Thermal and Cardiovascular Strain from Hypohydration: Influence of Exercise Intensity*. Int. J. Sports Med. 19.2, 87-91 (1998).

- [260] MORFELD, P., C. PIEKARSKI: Epidemiologische Erkenntnisse zur kanzerogenen Wirkung von Steinkohlengrubenstäuben. Silikosebericht Nordrhein-Westfalen, Band 20, MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND MITTELSTAND, TECHNOLOGIE UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.), Düsseldorf 1998 S. 281-324.
- [261] MORFELD, P., K. LAMPERT, H. ZIEGLER, C. STEGMAIER, G. DHOM, C. PIEKARSKI: *Interpreting estimates of coalminer's cancer risk - fundamental methodological problems*. In: *Proceedings 6th International Symposium: Epidemiology and occupational risks, Graz/Tobelbad 22.-24. 4. 1998*, ALLGEMEINE UNFALLVERSICHERUNGSANSTALT (Hrsg.), Wien 1999, S. 116-122.
- [262] MORIMOTO, T., S. NAKAI, T. ITOH: *Death from heat stroke in Japan: 1968-1994*. In: NIELSEN JOHANNSEN, BODIL, RUTH NIELSEN (Hrsg.): *Proceedings of The International Symposium on Thermal Physiology. Copenhagen 8-12 July 1997*. The August Krogh Institute, Copenhagen 1997, S. 153-156.
- [263] MOSS, K. N.: *Some Effects of High Air-Temperatures upon the Miner*. (Sixth Report to the Committee on "The Control of Atmospheric Conditions in Hot and Deep Mines"). *Trans. Inst. Min. Eng.* 66, 284-314 (1923-1924).
- [264] MOSS, K. N.: *Some Effects of High Air-Temperature and Muscular Exertion upon Colliers*. *Royal Soc. Proc. B* 95, 181-200 (1923-1924).
- [265] MÜLLER, B., TH. HETTINGER: *Interpretations- und Bewertungsverfahren arbeitswissenschaftlich-ergonomischer Felddaten*. *Z. Arb.wiss.* 35, 82-86 (1981).
- [266] MÜLLER, B. H., HJ. GEBHARDT: *Berechnungsmodelle zur rechnergestützten Ermittlung aktueller Klimasummenmaße für wärmebelastete Arbeitsplätze*. *Z. Arb.wiss.* 53.2, 107-113 (1999).
- [267] MÜLLER, E. A., H. FRANZ: *Energieverbrauchsmessungen bei beruflicher Arbeit mit einer verbesserten Respirations-Gasuhr*. *Arbeitsphysiol.* 14, 499-504 (1952).
- [268] MÜLLER, E. A., H. G. WENZEL: *Eine neue Methode zur Herstellung ungleicher Luft- und Strahlungstemperaturen in einer Klimakammer für physiologische Untersuchungen*. *Internat. Z. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol.* 16, 373-388 (1957).
- [269] MÜLLER, O. : *Über die Blutverteilung im menschlichen Körper unter dem Einfluß thermischer Reize*. *Arch. klin. Med.* 82, 547-585 (1905).
- [270] MURPHY, R. J.: *Heat illness*. *J. Sports Med.* 1, 26-29 (1973).
- [271] MURPHY, R. J.: *Heat illness in the athlete*. *Am. J. Sports Med.* 12, 258-261 (1984).
- [272] NEUMANN, T. W.: *A Biocultural Approach to Salt Taboos: The Case of the Southeastern United States*. *Current Anthropol.* 18.2, 289-308 (1977).
- [273] NEWMAN, R. W., ELLA H. MUNRO: *The Relation of Climate and Body Size in U. S. Males*. *Am. J. Phys. Anthropol.* 13.1, 1-17 (1955).

- [274] NEWMAN, R. W.: *Why man is such a sweaty and thirsty naked animal: A speculative review*. Human Biol. 42, 12-27 (1970).
- [275] NIELSEN, M.: *Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit*. Skand. Arch. Physiol. 79, 193-230 (1938).
- [276] NILSSON, H., DÉsirÉE C. E. GAVHED, I. HOLMÉR: *Effect of step rate on clothing insulation - Measurement with a moveable thermal manikin*. In: LOTENS, W. A., G. HAVENITH (Hrsg.): *Proc. Fifth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Soesterberg 1992, S. 174-175.
- [277] NIOSH: *Occupational exposure to hot environment. Criteria for a recommended standard*. Ed.: US. Department of Health, Education and Welfare. 1972, 90 S.
- [278] NOAKES, T. D., N. GOODWIN, B. L. RAYNER, T. BRANKEN, R. K. N. TAYLOR: *Water intoxication: a possible complication during endurance exercise*. Med. Sci. Sports Exerc. 17.3, 370-375 (1985).
- [279] NOAKES, T. D.: *Hydration and rehydration in exercise and sports*. In: ARNAUD, M. J. (Hrsg.): *Hydration throughout life*. John Libbey Eurotext, Montrouge 1998, S. 95-103.
- [280] NUNNELEY, SARAH A.: *Physiological responses of women to thermal stress: a review*. Med. Sci. Sports 10, 250-255 (1978).
- [281] NÜNNINGHOFF, U., U. NESPER-KLUMPP, TH. HETTINGER: *Die Pulsfrequenz bei dynamisch-muskulärer Arbeit unter Einsatz verschieden großer Muskelmassen*. Z. Arb.wiss. 43, 90-95 (1989).
- [282] PALENCIANO, L., V. GONZALEZ, L. A. SANTULLANO, B. RODRIGUEZ, M. A. MONTOLIU: *Cardiac frequency in miners recorded during four to five work shifts*. Eur. J. Appl. Physiol. 73, 369-375 (1996).
- [283] PANDOLF, K. B., R. L. BURSE, R. F. GOLDMAN: *Role of Physical Fitness in Heat Acclimatization, Decay and Reinduction*. Ergonomics 20, 399-408 (1977).
- [284] PANDOLF, K. B., M. N. SAWKA, Y. SHAPIRO: *Factors Which Alter Human Physiological Responses During Exercise-Heat Acclimation*. In: SAMUELOFF, S., M. K. YOUSEF (Hrsg.): *Adaptive Physiology to Stressful Environments*. CRC Press, Boca Raton Florida 1987, Kap. 12, S. 91-102.
- [285] PANDOLF, K. B.: *Heat tolerance and aging*. Experimental Aging Research 20, 275-284 (1994).
- [286] PARSONS, K. C.: *Human thermal environments*. Taylor & Francis, London 1993, 359 S.
- [287] PARSONS, K. C., G. HAVENITH, I. HOLMÉR, H. NILSSON, J. MALCHAIRE: *The Effects of Wind and Human Movement on the Heat and Vapour Transfer Properties of Clothing*. Ann. Occup. Hyg. 43.5, 347-352 (1999).

- [288] PICHAN, G., R. K. GAUTTAM, P. S. TOMAR, A. C. BAJAJ: *Effect of primary hypohydration on physical work capacity*. Int. J. Biometeorol. 32, 176-180 (1988).
- [289] PIEKARSKI, C., B. KAMPMANN: *Zur Messung der Hauttemperatur mit Thermistorfühlern*. Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed. 17, 268-271 (1982).
- [290] PIEKARSKI, C., B. KAMPMANN: *Erfassung von physiologischen Meßwerten im Rahmen von Arbeitsversuchen in Klimasimulation*. Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed. 17, 237-241 (1982).
- [291] 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.
- [292] PIEKARSKI, C., B. KAMPMANN, H.G. WENZEL: *Einfluß verschiedener Windgeschwindigkeiten bei unterschiedlich erhöhten Umgebungstemperaturen und Wasserdampfdrücken auf die Beanspruchung des arbeitenden Menschen*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. 23, 317-322 (1983).
- [293] PIEKARSKI, C., B. KAMPMANN: *Zum Einfluß der Hitzeakklimatisation auf die thermische Beanspruchung des Menschen*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. 24, 187-191 (1984).
- [294] PIEKARSKI, C.: *Zur arbeitsmedizinischen Bewertung der Beanspruchung des arbeitenden Menschen unter Hitzebelastung*. Bellmann Verlag, Dortmund 1985.
- [295] PIEKARSKI, C., B. KAMPMANN: *Zum Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die thermische Beanspruchung des arbeitenden Menschen*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. 25, 81-86 (1985).
- [296] PIEKARSKI, C., P. MORFELD, B. KAMPMANN, RAIJA ILMARINEN, H. G. WENZEL: *Heat-stress Reactions of the Growing Child*. In: RUTENFRANZ, J., R. MOCELLIN, F. KLIMT (Hrsg.): *Children and Exercise. XII. International Series on Sport Sciences*. Champaign, Illinois 1986, S. 403-412.
- [297] PIEKARSKI, C., B. KAMPMANN, P. MORFELD: *Arbeitsmedizinische Aspekte klimatisch belastender Arbeit im Bergbau*. Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed. 21, 291-295 (1986).
- [298] PIEKARSKI, C., R. DERWALL, B. KAMPMANN: *Gesundheitsgefahren durch Hitzeinwirkung*. Arbeit und Sicherheit 46.7, 6 (1993).
- [299] PIEKARSKI, C., R. DERWALL, B. KAMPMANN: *Gesundheitsgefahren in warmen Wetter*. Glückauf 130.7, 438-441 (1994).
- [300] PIN, N. T., N. Y. LING, L. H. SIANG: *Dehydration from outdoor work and urinary stones in a tropical environment*. Occup. Med. 42, 30-32 (1992).

- [301] PIWELLEK, H.: *Verringerung der körperlichen Belastung beim Vorbau von Gleisen und Rohrleitungen*. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben der Ruhrkohle AG. Forschungsbericht EGKS 7250/13/064, Ruhrkohle Bergbau AG, Herne 1997.
- [302] POWER, G. P.: *Practical aspects of prevention and control of heat casualties*. Med. Bull. U.S. Army, Europe 24, 222-226 (1967).
- [303] RAMSEY, J., C. BURFORD, M. BESHIR, R. JENSEN: *Influence of Thermal Environment on Safety Behavior*. Ergonomics 25.6, 528 (1982).
- [304] RAMSEY, J. D., F. N. DUKES-DOBOS, C. H. LEE: *Thermal environment of an underground mine and its effect upon miners*. Ann. Am. Conf. Gov. Ind. Hyg. 14, 209-223 (1986).
- [305] RAMSEY, J. D.: *Task performance in heat. A review*. Ergonomics 38.1, 154-165 (1995).
- [306] RAUSS, B.: *Vortriebssystem "Messerschild". Weitere Erfahrungen auf dem Bergwerk Heinrich Robert/Königsborn*. Bergbau 33, 405-412 (1982).
- [307] REILLY, T., J. WATERHOUSE, G. ATKINSON: *Aging, rhythms of physical performance, and adjustment to changes in the sleep-activity cycle*. Occup. Environ. Med. 54, 812-816 (1997).
- [308] REILLY, T., R. GARRETT: *Investigation of diurnal variation in sustained exercise performance*. Ergonomics 41.8, 1085-1094 (1998).
- [309] RENBOURN, E. T.: *Physiological Problems of the Soldier in Tropical Warfare*. J. Roy. Army Med. Corps 105, 172-182 (1959).
- [310] RENSBURG, J. P. VAN: *Physical Demands Associated with Underground Work Tasks*. In: HEMP, R. (Hrsg.): *Fifth International Mine Ventilation Congress. Technical Papers*. Johannesburg 1992, S. 37-47.
- [311] RIEKE, B.: G 35: *„Arbeitsaufenthalt im Ausland unter besonderen klimatischen und gesundheitlichen Belastungen“*. In: HOFMANN, F. (Hrsg.): *Infektiologie*. 31. Erg. Lfg. 11/99. Ecomed, Landsberg a. L. 1999, Kap. II-13.3, S. 1-5.
- [312] ROHMERT, W.: *Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept*. Z. Arb.wiss. 38, 193-200 (1984).
- [313] ROMET, T. T., J. FRIM: *Physiological responses to fire fighting activities*. Eur. J. Appl. Physiol. 56, 633-638 (1987).
- [314] ROST, R.; H. LIESEN, A. MADER, H. HECK, H. PHILIPPI, P. SCHÜRCH, W. HOLLMANN: *Die Fahrradergometrie in der Praxis*. Firmenschrift Bayer Pharma, Leverkusen 1977.
- [315] ROWELL, L. B.: *Cardiovascular adjustments to thermal stress*. In: SHEPHERD, J. T., F. M. ABBOUD (Hrsg.): *Handbook of Physiology. Sect. 2: The Cardiovascular System. Vol 3: Peripheral Circulation and Organ Blood Flow*. AMERICAN PHYSIOLOGICAL SOCIETY Waverly Press, Bethesda 1983, S. 967-1023.

- [316] ROWELL, L. B.: *Human circulation regulation during physical stress*. Oxford University Press, Oxford 1986, 416 S.
- [317] RUDLOFF, W., H. JUNGSMANN: *Wärmebelastung des Tropenreisenden*. Umschau, 524-529 (1968).
- [318] RUHRKOHLE BERGBAU AG: *Klimatisierung unter Tage. Entwicklungen, Erfolge, Perspektiven*. Firmenschrift, Dez. 1997.
- [319] RUSSELL, M. A. H., M. J. JARVIS, G. DEVITT, C. FEYERABEND: *Nicotine intake by snuff users*. Brit. Med. J. 283, 814-817 (1981).
- [320] RUTENFRANZ, J., H. G. WENZEL, R. SINGER, R. MOCELLIN, W. HAWEL: *Einfluß hoher Umgebungstemperaturen auf die Leistung und einige physiologische Größen bei einer Tracking - und einer optischen Vigilanz-Aufgabe*. Forschungsberichte des Landes NRW Nr. 2200, 1-36 (1971).
- [321] RUTENFRANZ, J.: *Ergometrische Methoden zur Bestimmung der körperlichen Leistungsfähigkeit*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. (Arbeitsmedizinischen Kolloquium) 24, 37-52 (1984).
- [322] SAINI, J., P. BOISVERT, K. SPIEGEL, V. CANDAS, G. BRANDENBERGER: *Influence of alcohol on the hydromineral hormone responses to exercise in a warm environment*. Eur. J. Appl. Physiol. 72, 32-36 (1995).
- [323] SAWKA, M. N., K. B. PANDOLF, BARBARA A. AVELLINI, Y. SHAPIRO: *Does Heat Acclimation Lower the Rate of Metabolism Elicited by Muscular Exercise?* Aviat. Space Environ. Med. 54, 27-31 (1983).
- [324] SAWKA, M. N., C. B. WENGER: *Physiological responses to acute exercise-heat stress*. In: PANDOLF, K. B., M. N. SAWKA, R. R. GONZALEZ (Hrsg.): *Human performance physiology and environmental medicine at terrestrial extremes*. Benchmark Press, Indianapolis 1988, Kap. 3, S. 97-151.
- [325] SAWKA, M. N.: *Body fluid responses and hypohydration during exercise-heat stress*. In: PANDOLF, K. B., M. N. SAWKA, R. R. GONZALEZ (Hrsg.): *Human performance physiology and environmental medicine at terrestrial extremes*. Benchmark Press, Indianapolis 1988, Kap. 6, S. 227.
- [326] SAWKA, M. N., S. J. MONTAIN, W. A. LATZKA: *Body Fluid Balance During Exercise-Heat Exposure*. In: BUSKIRK, E. R., S. M. PUHL (Hrsg.): *Body Fluid Balance. Exercise and Sport*. CRC Press, Boca Raton 1996, Kap. 7, S. 139-157.
- [327] SCALES, W. E., A. J. VANDER, M. B. BROWN, M. J. KLUGER: *Human circadian rhythms in temperature, trace metals, and blood variables*. J. Appl. Physiol. 65.4, 1840-1846 (1988).

- [328] SCHICKELE, ELIZABETH: *Environment and fatal heat stroke. An analysis of 157 cases occurring in the army in the U.S. during World War II.* Mil. Surgeon 100, 235-256 (1947).
- [329] SCHLOTTE, W.: *Statistik der Wetterkühlanlagen im deutschen Steinkohlenbergbau.* Glückauf 130, 518-520 (1994).
- [330] SCHMAHL, F. W., L. VON KARSA; B. METZLER, M. P. KORN: *Special Aspects of Accident Prevention in Moslem Workers in the Ramadan Period.* In: 23rd International Congress on Occupational Health, Book of Abstracts, p. 28, Montreal 1990.
- [331] SCHMAHL, F. W., U. BREHME, D. BRAUN: *Spezifische Unfall- und Erkrankungsgefährdungen bei moslemischen Arbeitnehmern in Deutschland. Viktor von Weizsäckers Konzept „Soziale Krankheit und soziale Gesundung“ in neuer Perspektive.* In: SCHMAHL, F. W., U. BREHME, H. HANKE, H. KRUEGER, A. W. RETTENMEIER (Hrsg.): *Gefährdungen des Menschen in der heutigen Arbeitswelt. Beispiele aus Ländern mit unterschiedlicher industrieller Entwicklung und kultureller Tradition.* Erich Schmidt Verlag, Tübingen 1997, S. 179-192.
- [332] SCHMIDT, P.: *Über Hitzschlag an Bord von Dampfern der Handelsflotte, seine Ursachen und seine Abwehr.* Archiv für Schiffs- und Tropenhygiene 5, 207-233 (1901).
- [333] SCHMIDT, P.: *Über Hitzschlag an Bord von Dampfern der Handelsflotte, seine Ursachen und seine Abwehr (Fortsetzung und Schluss).* Archiv für Schiffs- und Tropenhygiene 5, 245-271 (1901).
- [334] SCHNAUBER, H.: *Vergleichende Betrachtung der Belastung und Beanspruchung an Arbeitsplätzen der Eisen- und Stahlindustrie. 2. Bericht.* Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1-137 (1986).
- [335] SCHOELLER, D. A., E. VAN SANTEN: *Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method.* J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol. 53,4, 955-959 (1982).
- [336] SCHOLANDER, P. F.: *Evolution of climatic adaptation in homeotherms.* Evolution 9, 15-26 (1955).
- [337] SCHREIDER, E.: *Geographical Distribution of the Body-Weight/Body-Surface Ratio.* Nature 165, 286 (1950).
- [338] SCHREIDER, E.: *Ecological Rules and Body-Heat Regulation in Man.* Nature 179, 915-916 (1957).
- [339] SCHREIDER, E.: *Physiological anthropology and climatic variations.* In: UNESCO (Hrsg.): *Environmental physiology and psychology in arid conditions.* Paris 1963, S. 37-73.
- [340] SCHREIDER, E.: *Morphological Variations and Climatic Differences.* J. Hum. Evol. 4, 529-539 (1975).

- [341] SCHULZE TEMMING HANHOFF, J.: *Klimatische und physiologische Grundlagen und Untersuchungen über die Grenze zumutbarer Klimabedingungen bei körperlicher Arbeit im Steinkohlenbergbau*. Dissertation TH Aachen, 1-245 (1968).
- [342] SCHWARZ, H. G.: *Beitrag zur Grippeepidemie 1957 im Ruhrgebiet*. Arch. Hyg. Bakteriol. 143, 38-64 (1959).
- [343] SCHWARZ, L.: *Hygiene des Heizpersonals auf Schiffen*. Beihefte Zbl. Gewerbehyg. Unfallverhütung 11, 15-35 (1928).
- [344] SCOTT, A. R., T. BENNETT, I. A. MACDONALD: *Diabetes mellitus and thermoregulation*. Can. J. Physiol. Pharmacol. 65, 1365-1376 (1987).
- [345] SCOTT, J.: *Heat-related illnesses. When are they a true emergency?* Postgrad. Med. 85.8, 154-156;161-164 (1989).
- [346] SELIGER, V., Z. BARTUNEK: *Mean values of various indices of physical fitness in the investigation of Czechoslovak population aged 12 - 55 years*. Prag, CSTV 1976.
- [347] SEMENZA, J. C., CAROL H. RUBIN, K. H. FALTER, J. D. SELANIKIO, DANA FLANDERS, HOLLY L. HOWE, J. L. WILHELM: *Heat-Related Deaths During the July 1995 Heat Wave in Chicago*. N. Engl. J. Med. 335, 84-90 (1996).
- [348] SEMENZA, J. C.: *Deaths in the Chicago Heat Wave*. N. Engl. J. Med. 335, 1848-1849 (1996).
- [349] SHAPIRO, Y., A. MAGAZANIK, R. UDASSIN, G. BEN BARUCH, E. SHVARTZ, Y. SHOENFELD: *Heat intolerance in former heatstroke patients*. Ann. Intern. Med. 90.6, 913-916 (1979).
- [350] SHAPIRO, Y., K. B. PANDOLF, B. A. AVELLINI, N. A. PIMENTAL, R. F. GOLDMAN: *Heat balance and transfer in men and women exercising in hot-dry and hot-wet conditions*. Ergonomics 24.5, 375-386 (1981).
- [351] SHI, X., C. V. GISOLFI: *Fluid and Carbohydrate Replacement During Intermittent Exercise*. Sports Med. 25.3, 157-172 (1998).
- [352] SHIDO, O., N. SUGIMOTO, M. TANABE, S. SAKURADA: *Core temperature and sweating onset in humans acclimated to heat given at a fixed daily time*. Am. J. Physiol. 276, R1095-R1101 (1999).
- [353] SHVARTZ, E., N. B. STRYDOM, H. KOTZE: *Orthostatism and heat acclimation*. J. Appl. Physiol. 39.4, 590-595 (1975).
- [354] SIEBER, W.: *Die Bedeutung der Mechanisierung von Gewinnung, Ausbau und Versatz für die körperliche Belastung des Bergmannes im Steinkohlenbergbau*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen 1260, 1-133 (1963).
- [355] SMILES, K. A., S. ROBINSON: *Sodium ion conservation during acclimatization of men to work in the heat*. J. Appl. Physiol. 31.1, 63-69 (1971).

- [356] SOHAR E., R. ADAR: *Sodium requirements in Israel under conditions of work in hot climate*. In: UNESCO (Hrsg.): *Indian Symposium on Environmental Physiology and Psychology in Arid Conditions*. Lucknow 7-12 December 1962. Lucknow 1962, S. 55-62.
- [357] SONNENSCHNEIN, O., C. PIEKARSKI, B. KAMPMANN: *Entwicklung eines Steuerstandes für vielseitige Überwachungsaufgaben bei Arbeitsversuchen in Klimakammern*. Zbl. Arbeitsmed. 32, 337-340 (1982).
- [358] SPITZER, H., Th. HETTINGER, G. KAMINSKY: *Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit*. In: Beuth Verlag, Berlin 6. Aufl. 1982, 160 S.
- [359] SQUIRE, DEBORAH L.: *Heat Illness. Fluid and Electrolyte issues for Pediatric and Adolescent Athletes*. Sports Med. 37.5, 1085-1109 (1990).
- [360] STEPHENSON, LOU A., C. B. WENGER, B. HELEN O'DONOVAN, E. R. NADEL: *Circadian rhythm in sweating and cutaneous blood flow*. Am. J. Physiol. 246, R321-R324 (1984).
- [361] STEPHENSON, LOU A., MARGARET A. KOLKA: *Thermoregulation in Woman*. Exerc. Sport Sci. Rev. 21, 231-262 (1993).
- [362] STOKLOSSA, J., G. BRESSER: *Entwicklung und Erprobung von Grubenwehrausrüstungen und -verfahren für klimatisch schwierige Einsätze unter besonderer Berücksichtigung der sicherheitlichen und betrieblichen Belange im Steinkohlenbergbau*. Abschlußbericht, Hauptstelle für das Grubenrettungswesen in Essen, August 1989.
- [363] STOLWIJK, J. A. J., J. D. HARDY: *Control of body temperature*. In: LEE D. H. K. (Hrsg.): *Handbook of Physiology*. Bd. 9. American Physiological Society; Bethesda, Maryland 1977, Kap. 4, S. 45-68.
- [364] STRYDOM, N. B., C. H. WYNDHAM: *A Practical Method for Acclimatizing Labourers to Heat*. Proceedings Int. Kongr. für Arbeitsmedizin Wien, 541-544 (1966).
- [365] STRYDOM, N. B., C. H. WYNDHAM, C. G. WILLIAMS, J. F. MORRISON, G. A. G. BREDELL, M. J. VON RAHDEN, J. PETER: *Energy requirements of acclimatized subjects in humid heat*. Fed. Proc. 25, 1366-1371 (1966).
- [366] STRYDOM, N. B., C. H. WYNDHAM, C. G. WILLIAMS, J. F. MORRISON, G. A. G. BREDELL, A. J. S. BENADE, M. VON RAHDEN: *Acclimatization to humid heat and the role of physical conditioning*. J. Appl. Physiol. 21, 636-642 (1966).
- [367] STRYDOM, N. B., L. D. HOLDSWORTH: *The Effects of Different Levels of Water Deficit on Physiological Responses During Heat Stress*. Int. Z. angew. Physiol. einsch. Arbeitsphysiol. 26, 95-102 (1968).
- [368] STRYDOM, N. B.: *Age as a causal factor in heat stroke*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 72, 112-114 (1971).

- [369] SZLYK, PATRICIA, INGRID V. SILS, R. P. FRANCESCONI, R. W. HUBBARD, L. E. ARMSTRONG: *Effects of Water Temperature and Flavoring on Voluntary Dehydration in Men*. *Physiol. Behav.* 45, 639-647 (1989).
- [370] SZLYK, PATRICIA C., INGRID V. SILS, R. P. FRANCESCONI, R. W. HUBBARD: *Patterns of Human Drinking: Effects of Exercise, Water Temperature, and Food Consumption*. *Aviat. Space Environ. Med.* 61, 43-48 (1990).
- [371] TALBOTT, J. H.: *Heat Cramps*. *Medicine* 14.3, 323-376 (1935).
- [372] TEJMAR, J., B. NEUFANG: *Tagesschwankungen der Pulsreaktion auf Schwerarbeit unter erhöhter Außentemperatur während einer Rettungsübung in verschiedenen Schutzanzügen*. (Vorläufige Mitteilung). In: HILDEBRANDT, G. (Hrsg.): *Biologische Rhythmen und Arbeit. Bausteine zur Chronobiologie und Chronohygiene der Arbeitsgestaltung*. Springer-Verlag, Wien 1976, S. 55-58.
- [373] TEMMING, J., W. ROHMERT: *Untersuchung über die körperliche Belastung der Bergleute beim Transportieren und Hantieren schwerer Lasten an unterschiedlich mechanisierten Arbeitsplätzen im Steinkohlenbergbau*. In: *Schriftenreihe Arbeitsmed. Sozialmed. Arbeitshyg.* Band 148, A. W. Gentner Verlag Stuttgart 1972, 143 S.
- [374] THIEN, K.-P.: *Untersuchung zur Beanspruchung von Bergleuten unter trocken-heißen Klimabedingungen*. Dissertation Technische Universität Clausthal, 1981.
- [375] TIELSCH, R.: *Belastung und Beanspruchung in der Glasindustrie aus der Sicht der Betroffenen*. In: HETTINGER, Th., Ch. AVERKAMP, B. H. MÜLLER (Hrsg.): *Belastung und Beanspruchung an Arbeitsplätzen der Glasindustrie*. Symposium an der Bergischen Universität Wuppertal, 1984, S. 83-108.
- [376] TORII, M.: *Maximal sweating rates in humans*. *J. Human Ergol.* 24, 137-152 (1995).
- [377] TSCHIRNER K.: *Arbeitsmedizin. Eine Einführung*, Bardtenschlager Verlag, München 1985.
- [378] UEDA, G.: *Cold-induced vasomotor oscillation in rabbit's ear and the effector mechanisms*. In: SZELÉNYI, Z., M. SZÉKELY (Hrsg.): *Contributions to Thermal Physiology*. Satellite Symposium of the 28th International Congress of Physiological Sciences, Pécs, Hungary 1980. Pergamon Press 1981, S. 379-381.
- [379] ULMER, H.-V.: *Konzept einer programmierten Leistungseinteilung beim Menschen unter Einschluß der Leistungsrückmeldung*. *Verh. Dt. Ges. f. Arbeitsmed.* 26, 343-349 (1976).
- [380] ULMER, H.-V., K. WIESBERG: *Einteilung des Leistungseinsatzes bei vorgegebenen Anstrengungsgraden (BORG-Skala)*. *Z. Arb.wiss.* 32, 77-80 (1978).
- [381] ULMER, H.-V.: *Energiezufuhr und Leistung*. In: ROHMERT, W., J. RUTENFRANZ: *Arbeitsphysiologie*. Georg Thieme Verlag, 3. Auflage, Stuttgart 1983, S. 143-147.

- [382] ULMER, H.-V.: *Kritische Überlegungen zur Ergometrie bei betriebsärztlichen Vorsorgeuntersuchungen*. Zbl. Arbeitsmed. 35, 370-374 (1985).
- [383] ULMER, H.-V.: *Zur "sogenannten" körperlichen Leistungsfähigkeit und deren Bedeutung für die Betriebsärztliche Praxis*. Z. Arb.wiss. 53.2, 80-82 (1999).
- [384] VAUTRIN, H. J., B. KAMPMANN, P. MORFELD: *Ergebnisse von Vorsorgeuntersuchungen zum Schutz der Gesundheit vor Klimaeinwirkungen im Steinkohlenbergbau*. Verh. dt. Ges. f. Arb. Med. 27, 633-636 (1987).
- [385] VERNON, H. M., T. BEDFORD: *The Relation of Atmospheric Conditions to the Working Capacity and the Accident Rate of Coal Workers*. Med. Res. Council; Industr. Fatigue Res. Board. 39, 1-32 (1927).
- [386] VLIERT, E. VAN DE, S. H. SCHWARTZ, S. E. HUISMANS, G. HOFSTEDE, S. DAAN: *Temperature, cultural masculinity, and domestic political violence. A cross-national study*. J. Cross-cult. Psychol. 30.3, 291-314 (1999).
- [387] VOGELSANG, H.-C., H.-V. ULMER: *Zur Notwendigkeit einer ausreichenden körperlichen Leistungsfähigkeit bei Atemschutzgeräteträgern der Feuerwehren*. Zbl. Arbeitsmed. 36, 197-203 (1986).
- [388] VOGT, J. J., R. FOEHR, J. KIRSCH, F. GOLLE, M.-T. MEYER-SCHWERTZ: *Estimation des charges de travail et des charges de chaleur en situation réelle de travail: principes et applications d'une nouvelle méthodologie*. Le Travail Humaine 33, 125-140 (1970).
- [389] VOGT, J.-J., R. FOEHR, L. SEYWERT: *Die Bewertung der motorischen und thermischen Belastung durch fortlaufende Messung der Pulsfrequenz am Arbeitsplatz*. Z. Arb.wiss. 30, 165-170 (1976).
- [390] VOGT, J. J., J. P. LIBERT, V. CANDAS, F. DAULL, P. MAIRIAUX: *Heart rate and spontaneous work-rest cycles during exposure to heat*. Ergonomics 26, 1173-1185 (1983).
- [391] VOSS, J.: *Grubenklima*. Glückauf-Betriebsbücher Band 27; Glückauf-Verlag, Essen 1981.
- [392] VOß, J., G. SCHNITTERS: *Ergebnisse von Klimamessungen der deutschen Steinkohlenbergwerke im Sommer 1986*. Glückauf 123, 1342-1352 (1987).
- [393] VRIES A. de, M. FRANK, O. SPERLING, U. A. LIBERMAN, A. ATSMON: *Nephrolithiasis in a Subtropical Climate*. Proc. 9th Int. Congr. Life Ass. Med. Tel-Aviv 1967. Karger, Basel 1968, S. 132-142.
- [394] WARMUTH, S. E.: *Ermittlung von Art und Größe der Einflußfaktoren, durch die die Qualität in einem abgegrenztem Montagebereich der BMW 5er-Reihe beeinflusst wird*. Diplomarbeit, Fachhochschule Würzburg/Schweinfurt 1991, S. 1-67.

- [395] WATERHOUSE, J., D. WEINERT, D. MINORS, G. ATKINSON, T. REILLY, S. FOLKART, D. OWENS, I. MACDONALD, N. SYTNIK, P. TUCKER: *The effect of activity on the waking temperature rhythm in humans*. Chronobiol. Int. 16.3, 343-357 (1999).
- [396] WEINER, J. S., G. O. HORNE: *A Classification of Heat Illness. A Memorandum Prepared for the Climatic Physiology Committee of the Medical Research Council*. Brit. Med. J. 1, 1533-1535 (1958).
- [397] WENDTNER, C.-M., S. ABDEL-RAHMAN, R. D. ISSELS: *Regionale und Ganzkörperhyperthermie*. DMW 124.46, 1398-1399 (1999).
- [398] WENGER, C. B.: *Heat of evaporation of sweat: thermodynamic considerations*. J. Appl. Physiol. 32.4, 456-459 (1972).
- [399] WENGER, C. B.: *Human Heat Acclimatization*. In: PANDOLF, K. B., M. N. SAWKA, R. R. GONZALEZ (Hrsg.): *Human Performance Physiology and Environmental Medicine at Terrestrial Extremes*. Benchmark Press, Indianapolis 1988, Kap. 4, S. 153-197.
- [400] WENZEL, H. G.: *Über Änderungen der körperlichen Leistungsfähigkeit nach langfristigem Aufenthalt im Hitzeclima*. Zbl. Arb.-Wiss. soz. Betriebspraxis 13, 160-165 (1959).
- [401] WENZEL, H. G.: *Pulse Rate and Thermal Balance of Man During and After Work in Heat as Criteria of Heat Stress*. Bull. Wld. Hlth. Org. 38, 657-664 (1968).
- [402] WENZEL, H. G.: *Über die Beziehungen zwischen Körperkerntemperatur und Pulsfrequenz des Menschen bei körperlicher Arbeit unter warmen Klimabedingungen*. Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol. 26, 43-94 (1968).
- [403] WENZEL, H. G., F. STRATMANN: *Technische Erfahrungen über Bau und Betrieb einer Klimakammer für arbeitsphysiologische Untersuchungen am Menschen*. Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol. 25, 235-278 (1968).
- [404] WENZEL, H. G.: *Indoor climatic conditions: Physiological aspects, evaluation and optimum levels*. In: ILO (Hrsg.): *Ergonomics and physical environmental factors. Proc. Sympos. Rome Sept. 1968*. International Labor Office, Geneva 1968, S. 287-322.
- [405] WENZEL, H. G.: *Muscular Work in Heat. Combined Effects on Various Physiological Responses*. Arch. Sci. Physiol. 27, A225-A238 (1973).
- [406] WENZEL, H. G.: *Physiologically Equivalent Combinations of Elevated Environmental Temperature and Air Humidity*. Int. Mine Ventil. Congr., Johannesburg 1975, Proc., 255-259 (1976).
- [407] WENZEL, H. G., RAIJA ILMARINEN: *Effects of environmental heat on performance and some physiological responses of a man during a psychomotor task*. J. Human Ergol. 6, 139-152 (1977).

- [408] WENZEL, H. G.: *Heat stress upon undressed man due to different combinations of elevated environmental temperature, air humidity, and metabolic heat production: a critical comparison of heat stress indices*. J. Human Ergol. 7, 185-206 (1978).
- [409] WENZEL, H. G., C. PIEKARSKI, B. KAMPMANN, P. ANDORF, P. SCHULZ: *Klimasimulation industrieller Arbeitsplätze im Laboratorium*. Verh. Dt. Ges. f. Arb. Med. 20, 577-579 (1980).
- [410] WENZEL, H. G., C. PIEKARSKI: *Klima und Arbeit*. Bayerisches Staatsministerium für Arbeit, Sozialordnung (Hrsg.), München 1980.
- [411] WENZEL, H. G., A. FORSTHOFF, E. HALLIER: *Reduktion der Hitzetoleranz durch Übergewicht*, Verhandl. Dt. Ges. f. Arbeitsmed. 28, 197-200 (1988).
- [412] WENZEL, H. G., C. MEHNERT, P. SCHWARZENAU: *Evaluation of tolerance limits for humans under heat stress and the problems involved*. Scand. J. Work Environ. Health 15, 7-14 (1989).
- [413] WERNER, W., B. KAMPMANN, P. MORFELD: *Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems während einer Atemschutzübung*. brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung 42, 508-513 (1988).
- [414] WHITE, M. D., C. E. JOHNSTON, M.-P. WU, G. K. BRISTOW, G. G. GIESBRECHT: *Orthostatic intolerance during 63° head-up tilt following hot bath immersion is longer after ethanol ingestion*. In: FRIM, J., M. B. DUCHARME, P. TIKUISIS (Hrsg.): *Proc. Sixth Int. Conf. Environ. Ergon.*, Montebello 1994, S. 4-5.
- [415] DE WITT, C. B.: *Postural mechanisms in the behavioral thermoregulation of a desert lizard, dipsosaurus dorsalis*. J. Physiol. (Paris) 63, 242-245 (1971).
- [416] WYNDHAM, C. H., G. E. JACOBS: *Loss of Acclimatization After Six Days of Work in Cool Conditions on the Surface of a Mine*. J. Appl. Physiol. 11, 197-198 (1957).
- [417] WYNDHAM, C. H., N. B. STRYDOM, H. M. COOKE, J. S. MARITZ: *Studies on the effect of heat on the performance of work in mines*. Transvaal and Orange Free State, Chamber of Mines, A. P. L. Reports No. 2, No. 3, (1959).
- [418] WYNDHAM, C. H.: *Tolerable Limits of Air Conditions for Men at Work in Hot Mines*. Ergonomics 5, 115-122 (1962).
- [419] WYNDHAM, C. H., N. B. STRYDOM, J. F. MORRISON, C. G. WILLIAMS, A. G. BREDELL, M. J. E. VON RAHDEN, L. D. HOLDSWORTH, C. H. VAN GRAAN, A. J. VAN RENSBURG, A. MUNRO: *Heat reactions of Caucasians and Bantu in South Africa*. J. Appl. Physiol. 19, 598-606 (1964).
- [420] WYNDHAM, C. H.: *A Survey of the Causal Factors in Heat Stroke and of their Prevention in the Gold Mining Industry*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 66, 125-155 (1965).

- [421] WYNDHAM, C. H., J. F. MORRISON, C. G. WILLIAMS, A. HEYNS, E. MARGO, A. N. BROWN, J. ASTRUP: *The Relationship between Energy Expenditure and Performance Index in the Task of Shovelling Sand*. Ergonomics 9.5, 371-378 (1966).
- [422] WYNDHAM, C. H.: *A Survey of the Causal Factors in Heat Stroke and of their Prevention in the Gold Mining Industry. Author's Reply*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 67, 49 (1967).
- [423] WYNDHAM, C. H., N. B. STRYDOM, C. G. WILLIAMS, A. HEYNS: *An examination of certain individual factors affecting the heat tolerance of mine workers*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 68, 79-91 (1967).
- [424] WYNDHAM, C. H., N. B. STRYDOM: *Acclimatizing Men to Heat in Climatic Rooms on Mines*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 70, 60-64 (1969).
- [425] WYNDHAM, C. H., N. B. STRYDOM: *The danger of an inadequate water intake during marathon running*. S. Afr. Med. J. 43, 893-896 (1969).
- [426] WYNDHAM, C. H.: *The effects of heat stress upon human productivity*. Arch. Sci. Physiol. 27, A491-A497 (1973).
- [427] WYNDHAM, C. H., A. J. HEYNS: *The probability of heat stroke developing at different levels of heat stress*. Arch. Sci. Physiol. 27, S. A545-A562 (1973).
- [428] YAGLOU, C. P.: *Temperature, humidity, and air movement in industries: the effective temperature index*. J. Industr. Hyg. 9, 297-309 (1927).
- [429] YAGLOU, C. P., D. MINARD: *Control of Heat Casualties at Military Training Centers*. A.M.A. Arch. Industr. Health 16, 302-316 (1957).

Vorschriften, Verordnungen:

- [430] *Auswahlkriterien für die spezielle arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G30 – Hitzearbeiten.* BGI 504-30 HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BERUFGENOSSENSCHAFTEN (Hrsg.), Carl Heymanns Verlag, Köln 1998, 8 S. (Vormals: ZH1/600.30)
- [431] *Befahren von Dampfkesselanlagen unter Hitzeeinwirkung. BG-Regeln für Sicherheit und Gesundheit.* BERUFGENOSSENSCHAFT DER FEINMECHANIK UND ELEKTROTECHNIK (Hrsg.), Fassung 10/97, Ausgabe: Januar 1999.
- [432] *Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - Klima-BergV) vom 9. Juni 1983.* Verlag Glückauf, Essen 1983.
- [433] *Berufsgenossenschaftlicher Grundsatz G 30: Hitzearbeiten.* In: HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BERUFGENOSSENSCHAFTEN (Hrsg.): *Berufsgenossenschaftliche Grundsätze für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen.* Gentner-Verlag, 2. Aufl., Stuttgart 1998, S. 379-385.
- [434] *Berufsgenossenschaftlicher Grundsatz G 35: Arbeitsaufenthalt im Ausland unter besonderen klimatischen und gesundheitlichen Belastungen; Fassung 03/1998.* In: HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BERUFGENOSSENSCHAFTEN (Hrsg.): *Berufsgenossenschaftliche Grundsätze für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen.* Gentner-Verlag, 2. Aufl., Stuttgart 1998, S. 431-443.
- [435] *ICD 10: Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme.* 10. Revision; Deutsches Institut für medizinische Dokumentation und Information (Hrsg.), Band I: Systematisches Verzeichnis. Urban & Schwarzenberg, München 1994.
- [436] *Plan für das Grubenrettungswesen,* HAUPTSTELLE FÜR DAS GRUBENRETTUNGSWESSEN ESSEN, Verlag Bellmann, Dortmund 1965; Ziffer 4.5: *Einsatz der Grubenwehr unter erschwerten Bedingungen.*
- [437] *Plan für das Grubenrettungswesen,* HAUPTSTELLE FÜR DAS GRUBENRETTUNGSWESSEN HERNE, Herne 1997, 45 S.
- [438] *Plan für die Durchführung der ärztlichen Untersuchungen im Steinkohlenbergbau,* Verlag Glückauf, Essen, 1996.
- [439] WHO: *Health Factors Involved in Working under Conditions of Heat Stress.* World Health Organization. Technical Report Series 412, 1-32 (1969).

Normen:

- [440] ISO 7243: *Hot environments – Estimation of heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)*. Genf 1989, 9 S.
- [441] ISO 7726: *Thermal environments – Instruments and methods for measuring physical quantities*. Genf 1985, 39 S.
- [442] ISO 7730: *Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. Genf 1994, 27 S.
DIN EN 27 730: *Gemäßigtes Umgebungsklima. Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit*. Beuth Verlag, Berlin 1994, 22 S.
- [443] ISO 7933: *Hot environments – Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate*. Genf 1989, 19 S.
- [444] ISO 8996: *Ergonomics – Determination of metabolic heat production*. Genf 1990, 17 S.
- [445] ISO 9886: *Evaluation of thermal strain by physiological measurements*. Genf 1992, 15 S.
- [446] ISO 9920: *Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble*. Genf 1995, 54 S.
- [447] ISO 11 399: *Ergonomics of the thermal environment – Principles and application of International Standards*. Genf 1995, 19 S.
- [448] EN 12 515 D: *Warmes Umgebungsklima – Analytische Bestimmung und Beurteilung der Wärmebelastung durch Berechnung der erforderlichen Schweißrate (ISO 7933:1989 modifiziert)*. Brüssel 1997, 33 S.
- [449] DIN 23 320: *Flammenschutzkleidung für den Bergbau*. (5 Teile), Berlin 1988.
- [450] DIN 33 403: *Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung*.
Teil 1: *Grundlagen zur Klimaermittlung*. Berlin 1984, 7 S.
Teil 2: *Einfluß des Klimas auf den Wärmehaushalt des Menschen*, Berlin 1984, 4 S.
Teil 3: *Beurteilung des Klimas im Erträglichkeitsbereich*. Berlin 1988, 12 S.

Anhang

A.1 Dreidimensionale Darstellung von Beanspruchungsgrößen für verschiedene Versuchsserien

Um eine anschaulichere Vorstellung davon zu geben, wie die Beanspruchungsgrößen nichtlinear von den Belastungsgrößen abhängen, werden im folgenden die Ergebnisse für einige Versuchsserien mit unterschiedlicher Windgeschwindigkeit in einer Parallelprojektion dreidimensional dargestellt: es wurde jeweils die Beanspruchungsgröße über dem psychrometrischen Diagramm aufgetragen und sowohl die Ausgleichsfläche als auch die Datenpunkte in die Projektion eingezeichnet. Die Äquivalenzlinien Abb. 16 - Abb. 19 der Beanspruchungsgrößen wären in Abb. A - 2 - Abb. A - 5 Höhenlinien. Eine Projektion von Linien gleicher Beanspruchung auf die linke Seitenfläche der Darstellung bei Abb. A - 2 - Abb. A - 5 würde dort Abbildungen der Beanspruchung entsprechend Abb. 12 - Abb. 15 zur Folge haben.

In Abbildung A - 1 ist zunächst das psychrometrische Diagramm in der gewählten Parallelprojektion dargestellt; in den folgenden Abbildungen dann jeweils für denselben akklimatisierten Probanden Herzschlagfrequenz, Rektaltemperatur, mittlere Hauttemperatur und Schweißrate sowohl für eine Windgeschwindigkeit von 0,3 m/s (Abb. A - 2 bis A - 5) als auch für $v_a = 2,0$ m/s (Abb. A - 6 bis A - 9).

Die Darstellungen zeigen für niedrige Luftfeuchtigkeit einen linearen Anstieg der Beanspruchungsgröße mit der Lufttemperatur. Für Wasserdampfdrucke oberhalb von etwa $p_a = 30$ hPa hat der Wasserdampfdruck einen zunächst leicht und später erheblich zunehmenden Einfluß auf die Beanspruchungsgrößen, der auch mit zunehmender Lufttemperatur auch noch stärker zunimmt: hier liegt eine deutliche nichtlineare Abhängigkeit der Beanspruchungsgrößen von beiden Belastungsgrößen vor.

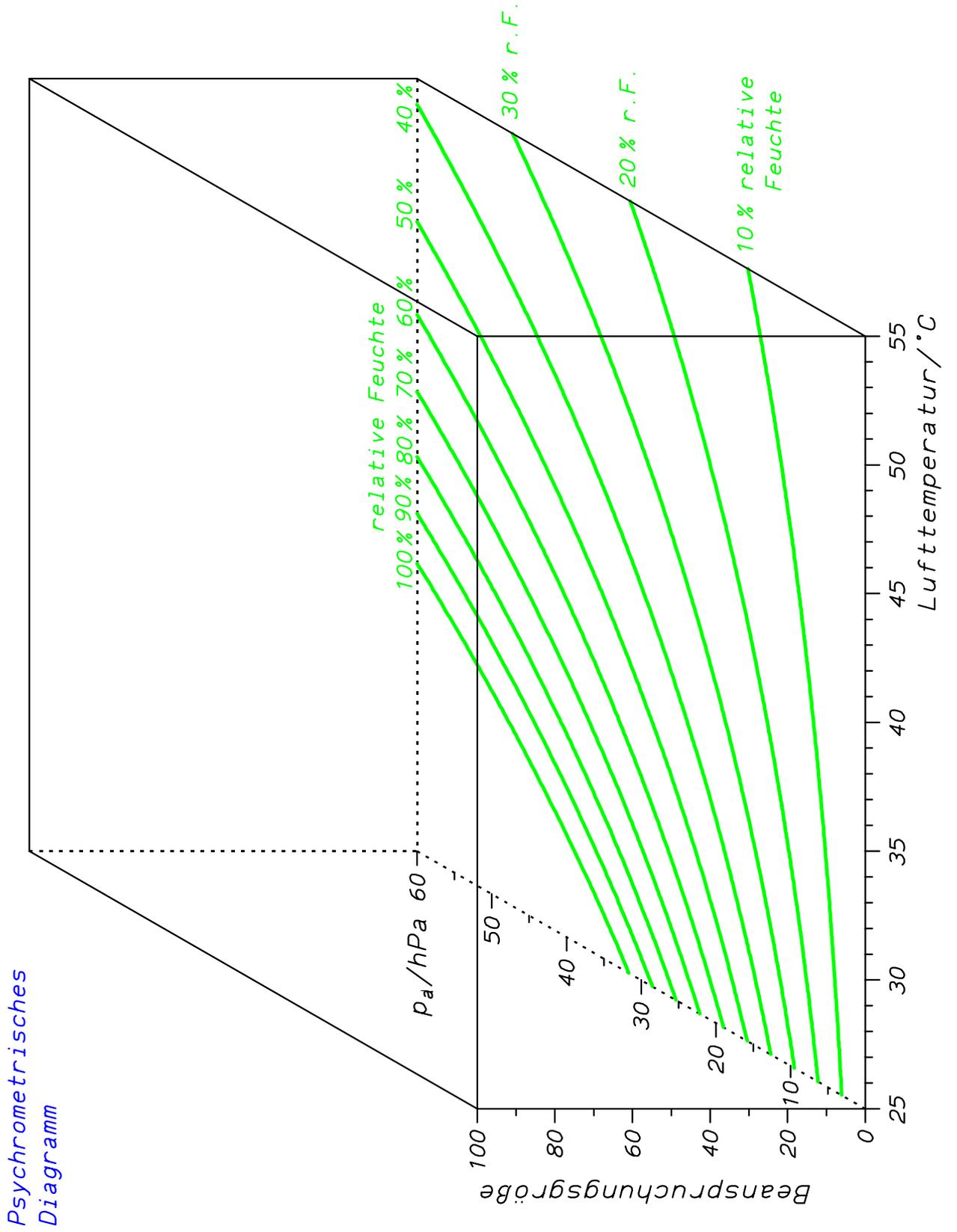


Abb. A - 1: Psychrometrisches Diagramm in Parallelprojektion.

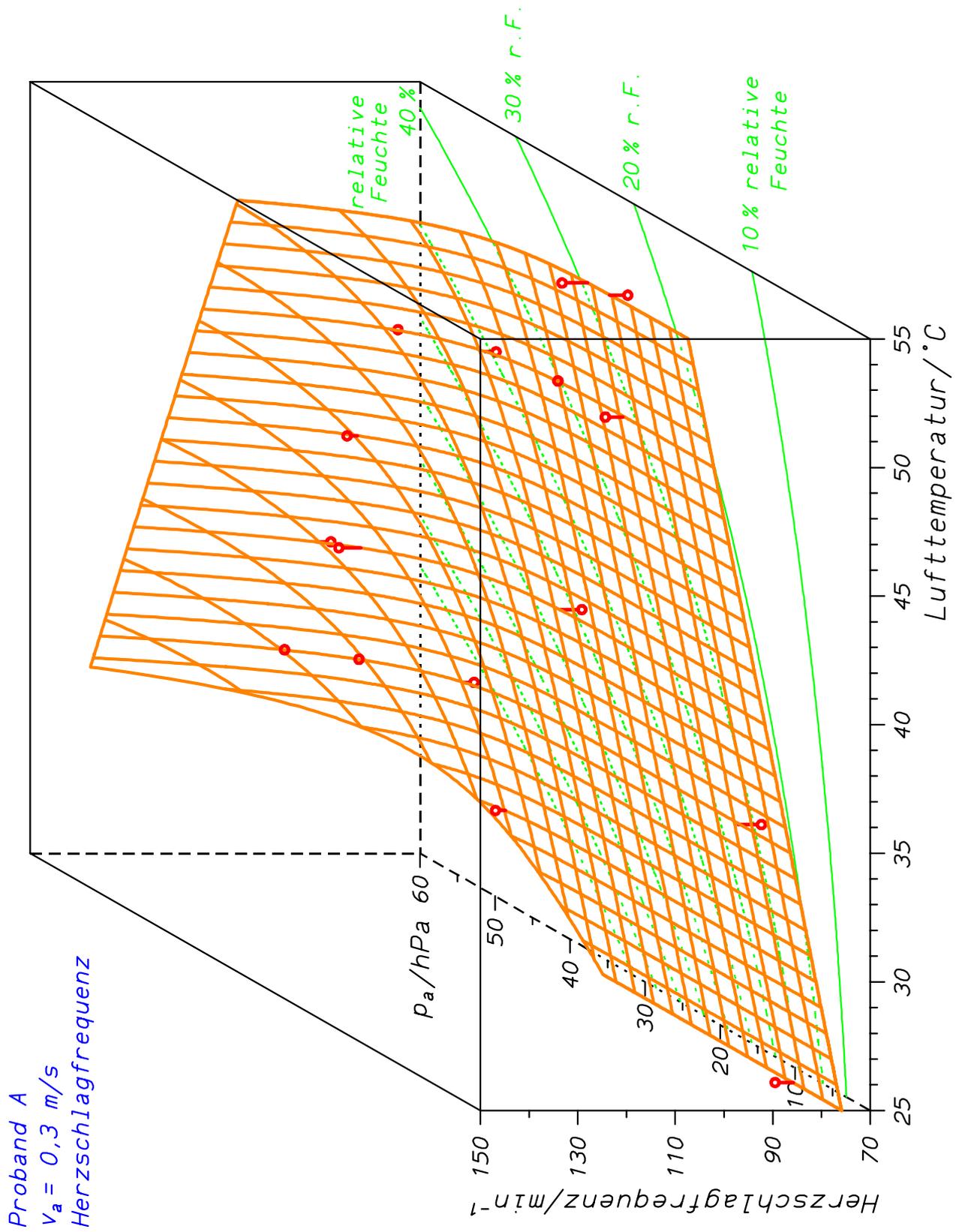


Abb. A - 2: Herzschlagfrequenz eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 0,3 \text{ m/s}$).

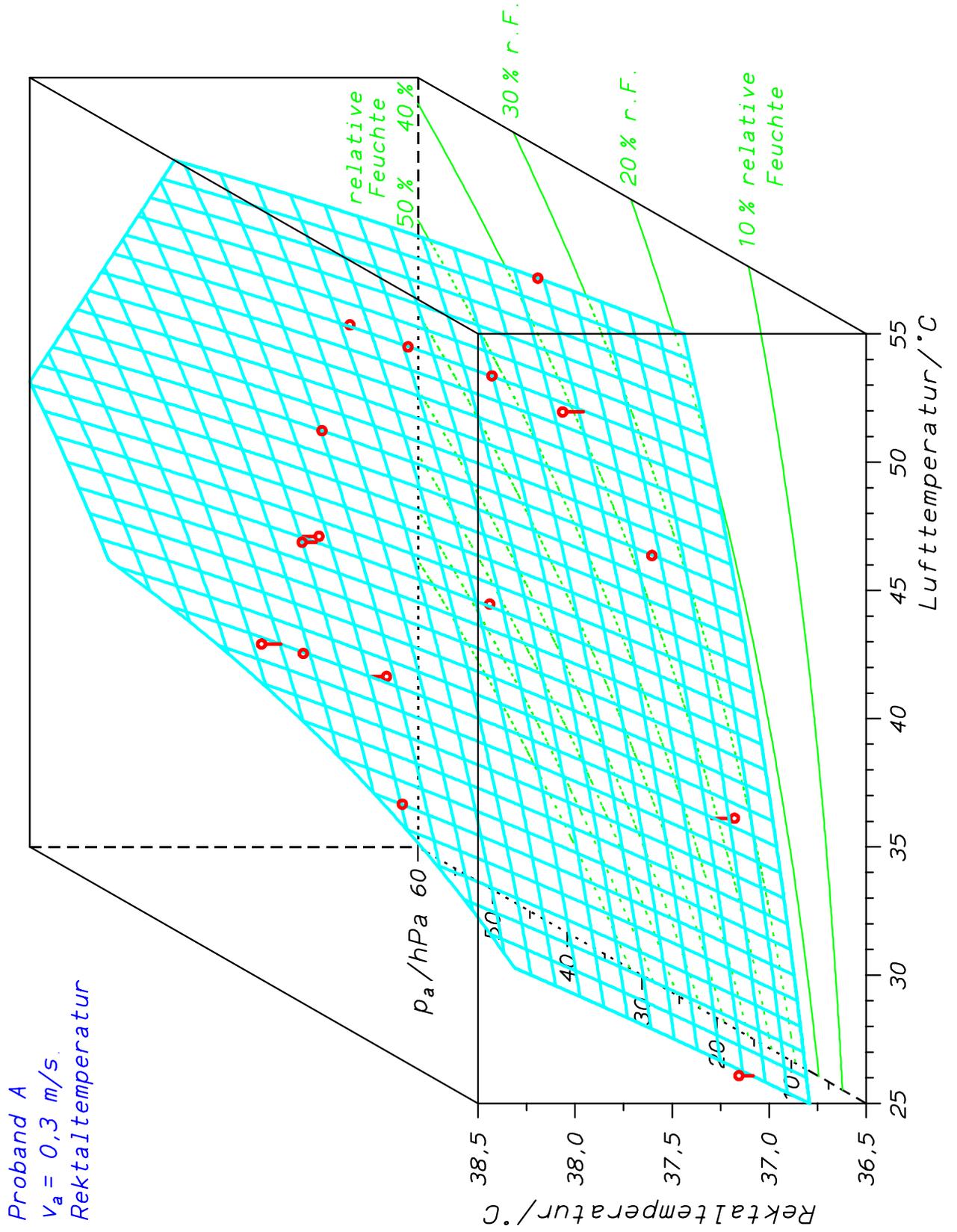


Abb. A - 3: Rektaltemperatur eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 0,3 \text{ m/s}$).

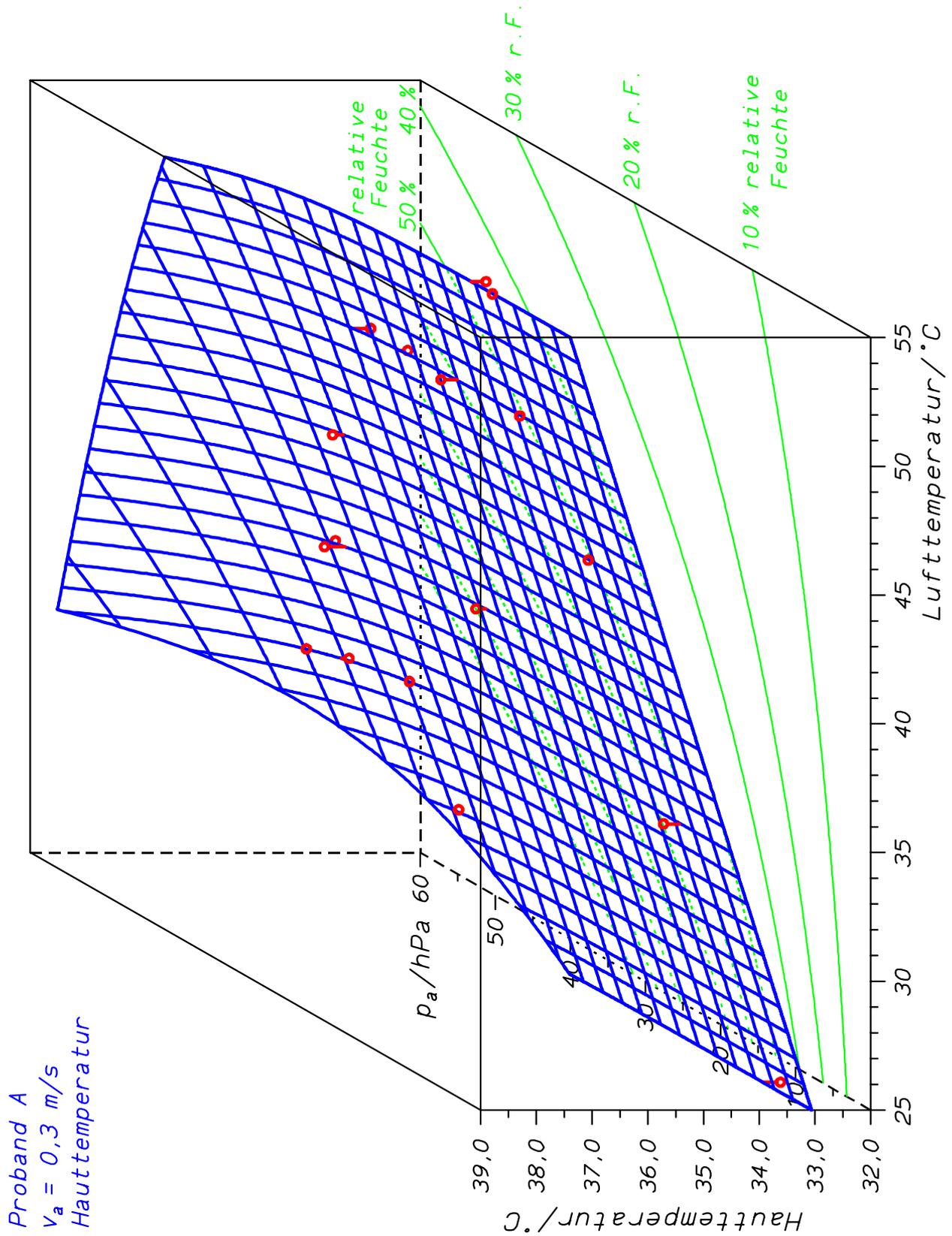


Abb. A - 4: Mittlere Hauttemperatur eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 0,3 \text{ m/s}$).

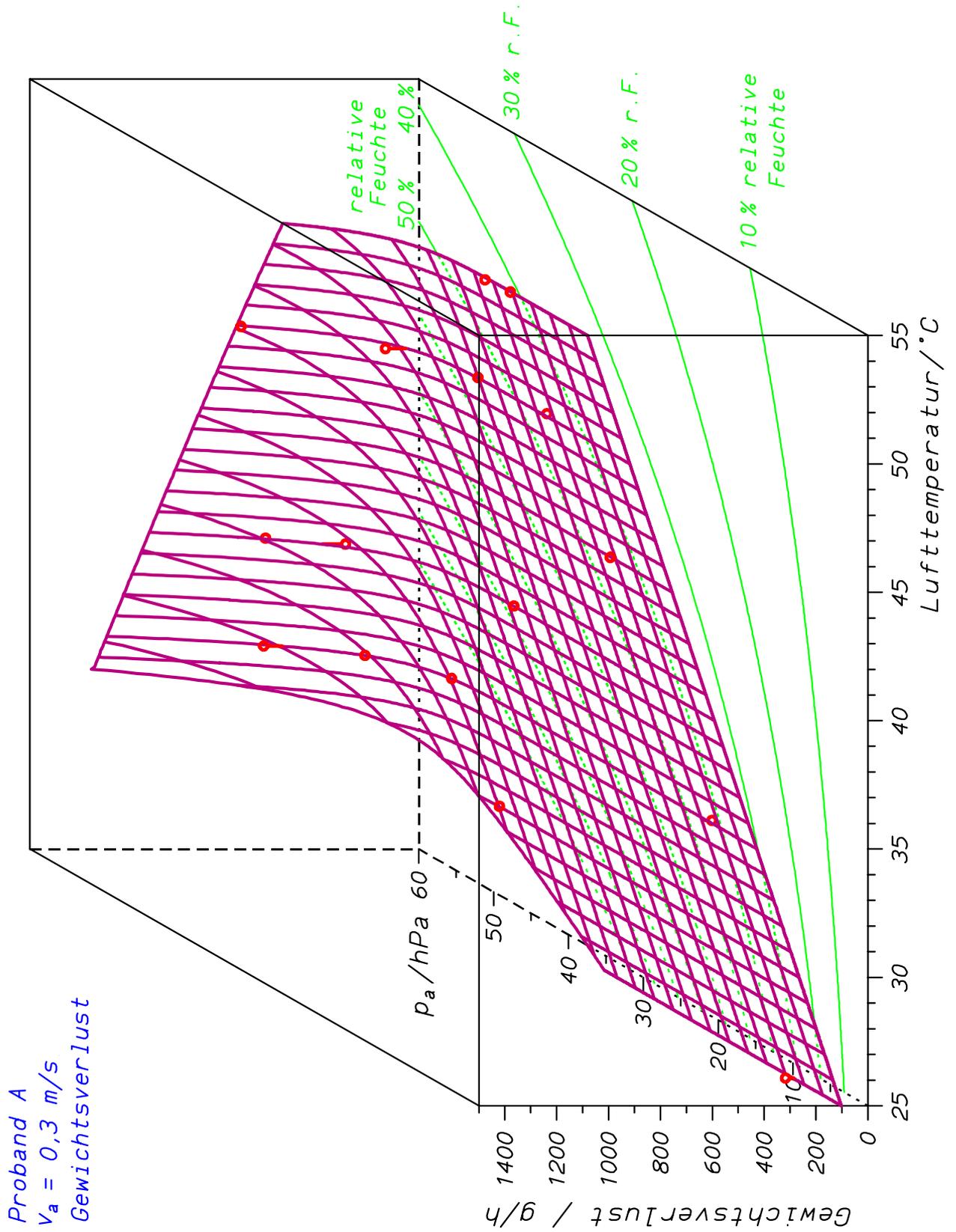


Abb. A-5: Schweißrate (in g/h) eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 0,3 \text{ m/s}$) (als Gewichtsverlust bestimmt).

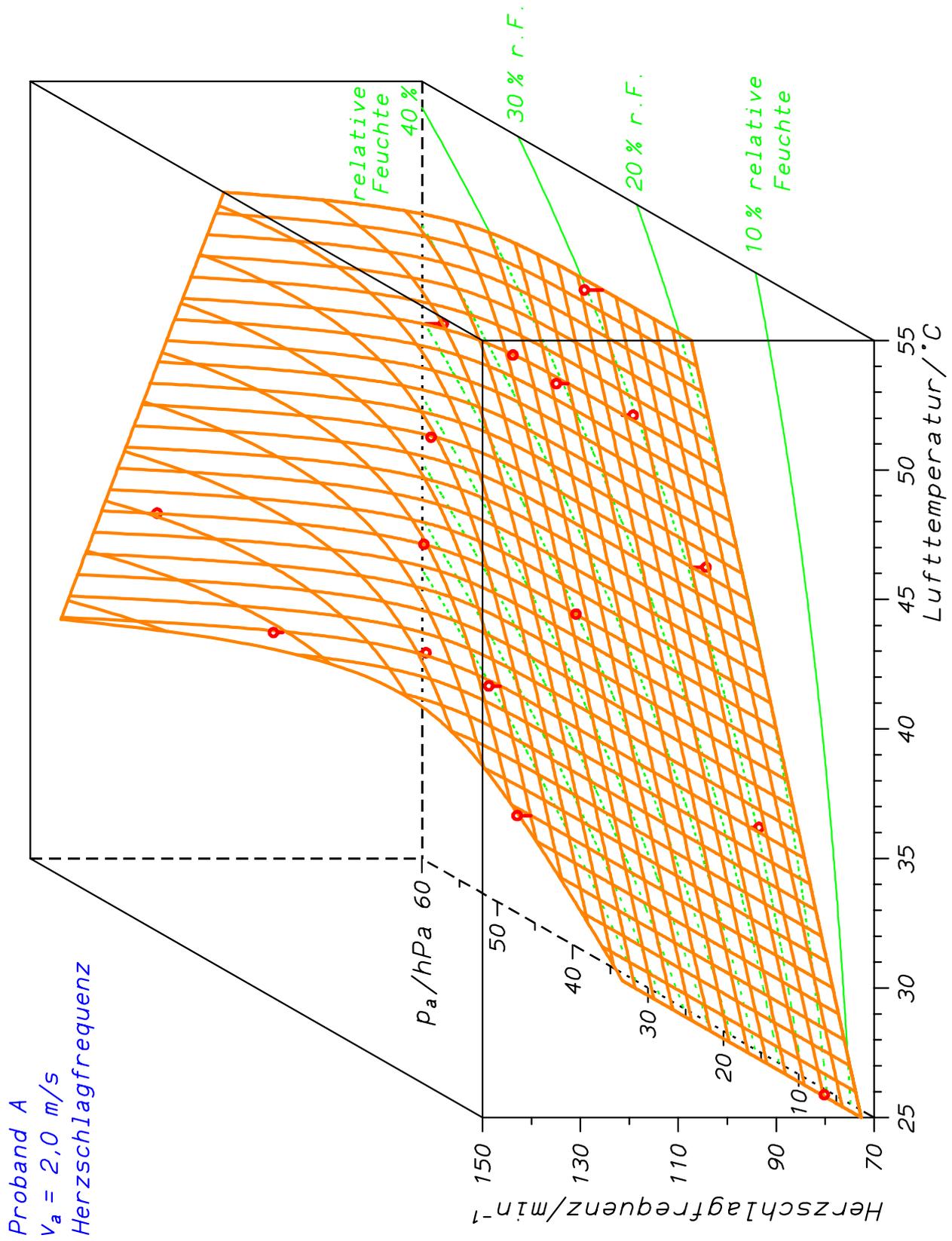


Abb. A - 6: Herzschlagfrequenz eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

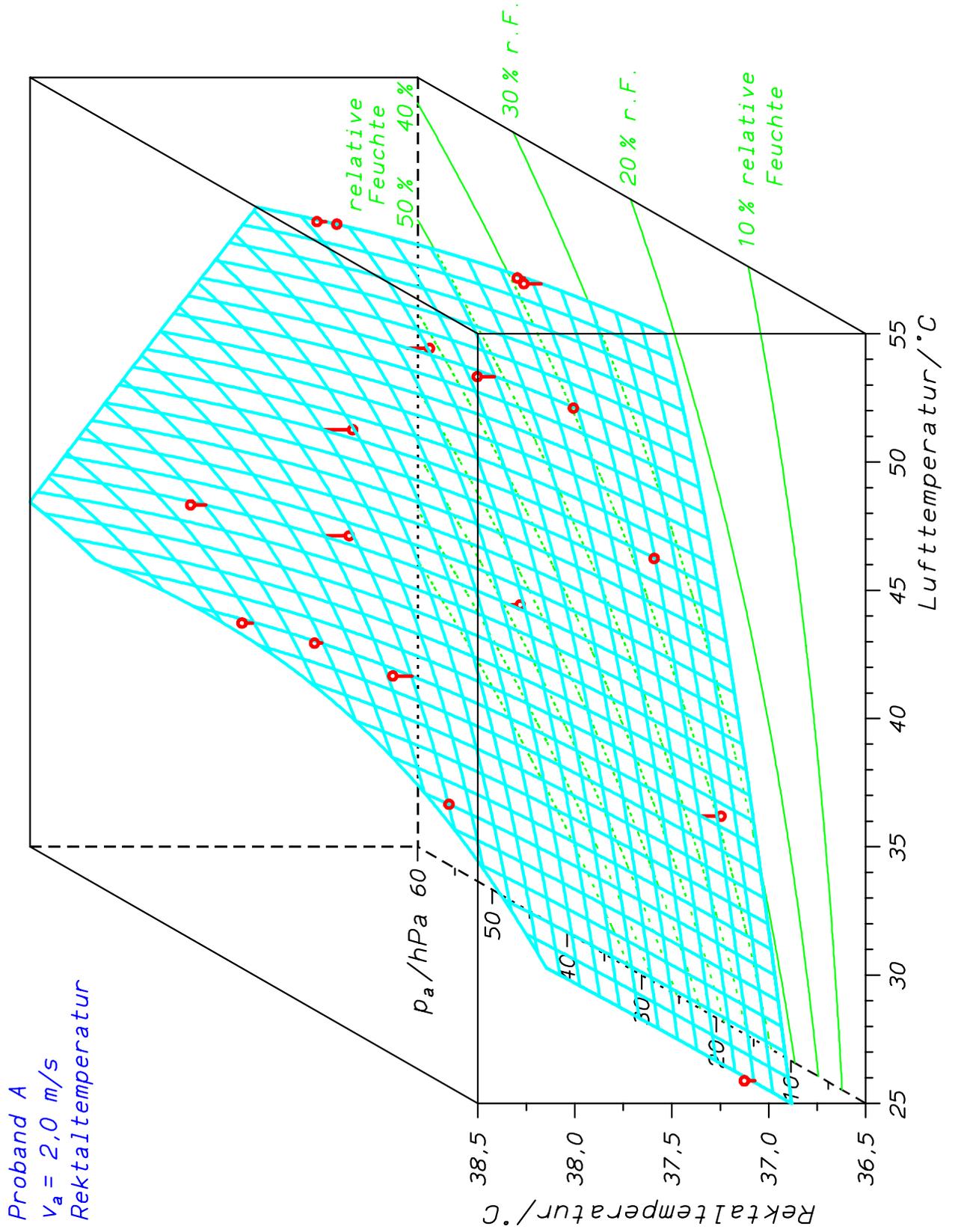


Abb. A - 7: Rektaltemperatur eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

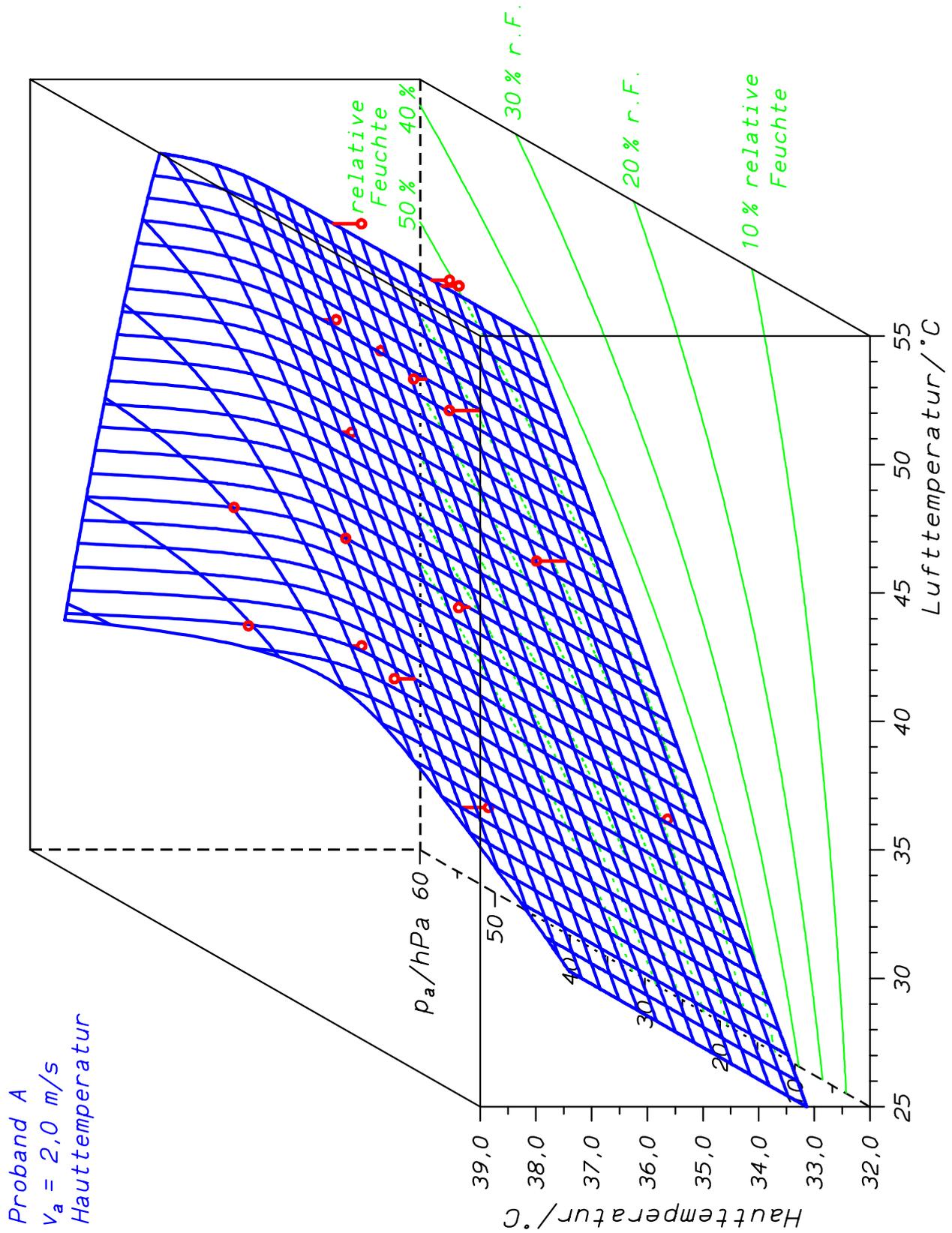


Abb. A - 8: Mittlere Hauttemperatur eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

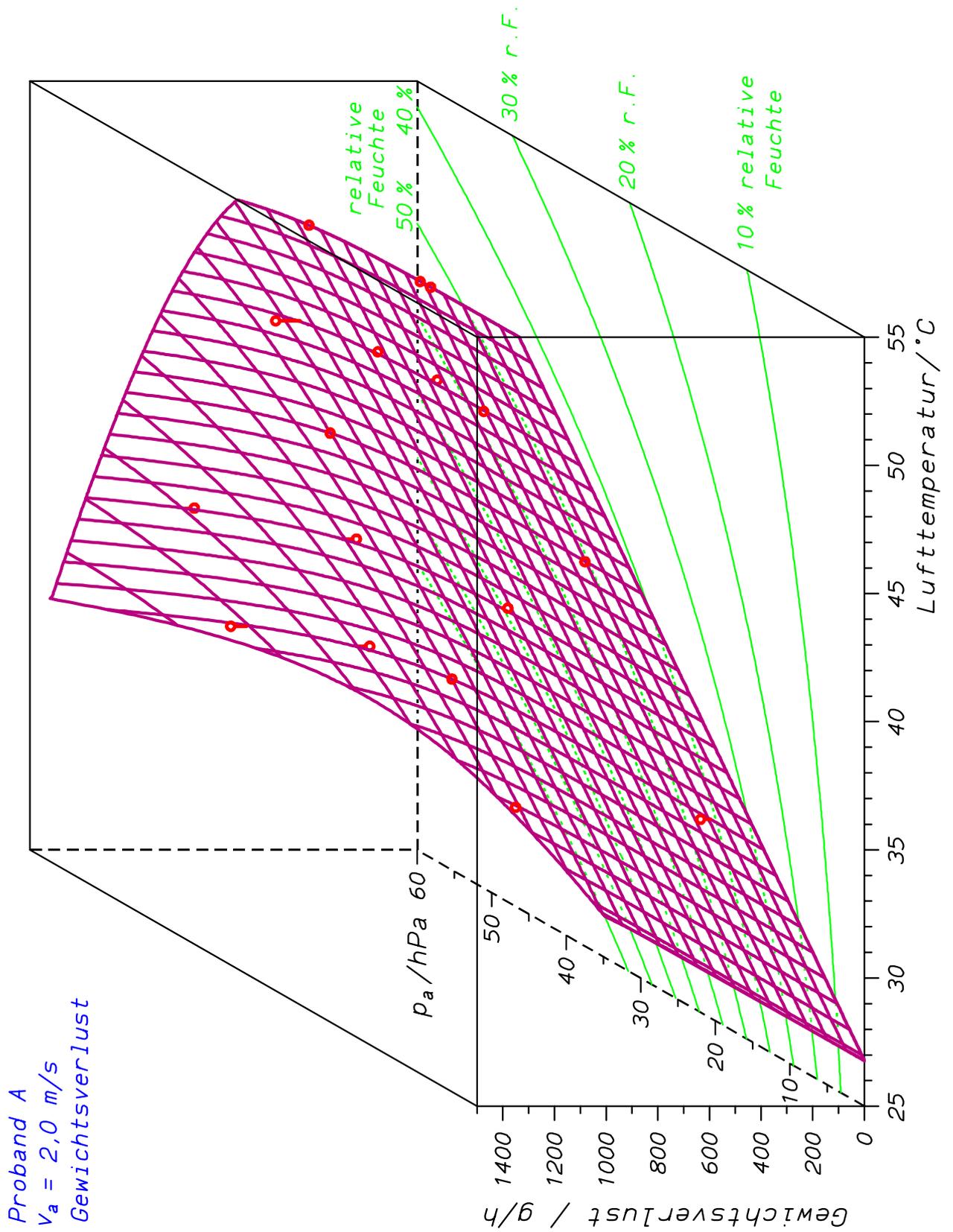


Abb. A - 9: Schweißrate (in g/h) eines akklimatisierten Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$) (als Gewichtsverlust bestimmt).

A.2 Mittlere Äquivalenzlinien für nicht akklimatisierte Probanden

Diese Auswertung faßt die Daten für vier nicht akklimatisierte Probanden (A, B, E und F in Tabelle 3) zusammen; Temperatur und Wasserdampfdruck der Meßwerte sind für die einzelnen Probanden mit unterschiedlichen Symbolen im psychrometrischen Diagramm markiert.

Tabelle 21: Mittlerer quadratischer Fehler der Abweichung der Datenpunkte vom Ausgleichssystem für vier Probanden.

		Bewertung für einzelne Probanden				mittleres Ausgleichssystem	
		A	B	E	F	Datenpunkte	A, B, E und F
Proband nicht akklimatisiert $v_a = 0,3 \text{ m/s}$	HSF / min^{-1}	4,6	3,0	5,8	2,9	91	6,2
	$t_{re} / ^\circ\text{C}$	0,084	0,081	0,15	0,13	95	0,17
	$t_{sk} / ^\circ\text{C}$	0,23	0,26	0,27	0,53	95	0,40
	$SW / \text{g/h}$	34	32	25	23	87	53

Die Streuung der Datenpunkte gegenüber den mittleren Ausgleichskurven ist für die Herzschlagfrequenz, die Rektaltemperatur und die Hauttemperatur vergleichbar den in Tabelle 5 angegebenen Werten für die Probanden A, B, C und D; für die Schweißrate liegt die Streuung deutlich niedriger. Die Zahl der Datenpunkte in den Versuchsserien mit den nicht akklimatisierten Probanden war um etwa 50 % größer als in den Serien mit akklimatisierten Probanden.

Die Abbildungen Abb. A - 10 bis Abb. A - 14 geben die Äquivalenzlinien der physiologischen Größen im psychrometrischen Diagramm an und erlauben eine rasche Abschätzung der Beanspruchung für vorgegebene Belastungswerte. Die Differenzen zu den Äquivalenzlinien in Abb. 21 - Abb. 25 sind in Kapitel 4.5 in Abb. 27 - Abb. 31 angegeben und kommentiert: die Differenzäquivalenzlinien geben an, um welchen Betrag die jeweilige Beanspruchungsgröße sich an einem Ort im psychrometrischen Diagramm nach der Akklimatisation geändert hat. Der Vergleich der Äquivalenzlinien, z.B in Abb. 21 und in Abb. A - 10, ergibt etwa für die Lage der Linie von " $HSF = 105 \text{ min}^{-1}$ ", daß im trocken-heißen Klimabereich diese Linie für nicht akklimatisierte Probanden bei $43,0 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt, während akklimatisierte Probanden diese Herzschlagfrequenz erst bei $52,8 \text{ }^\circ\text{C}$ erreichen.

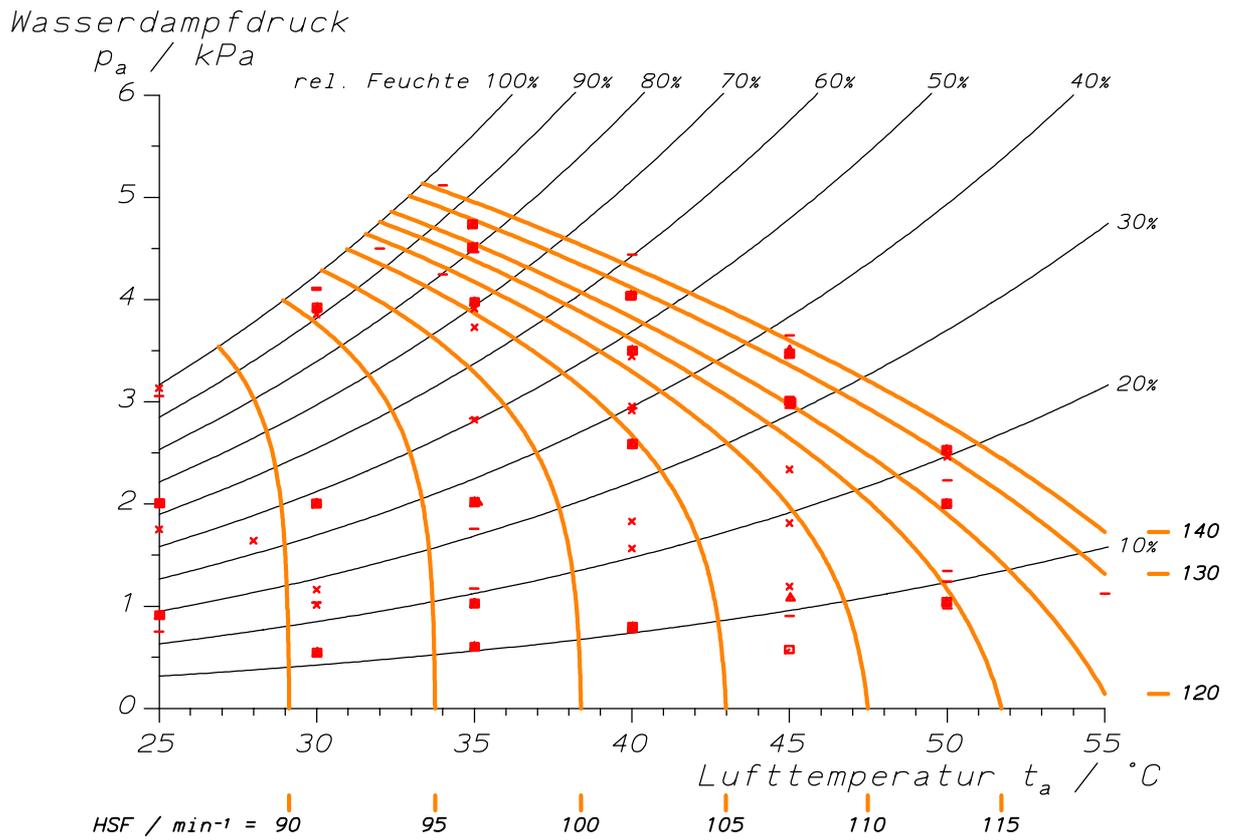


Abb. A - 10: Äquivalenzlinien der Herzschlagfrequenz für vier nicht akklimatisierte Probanden.

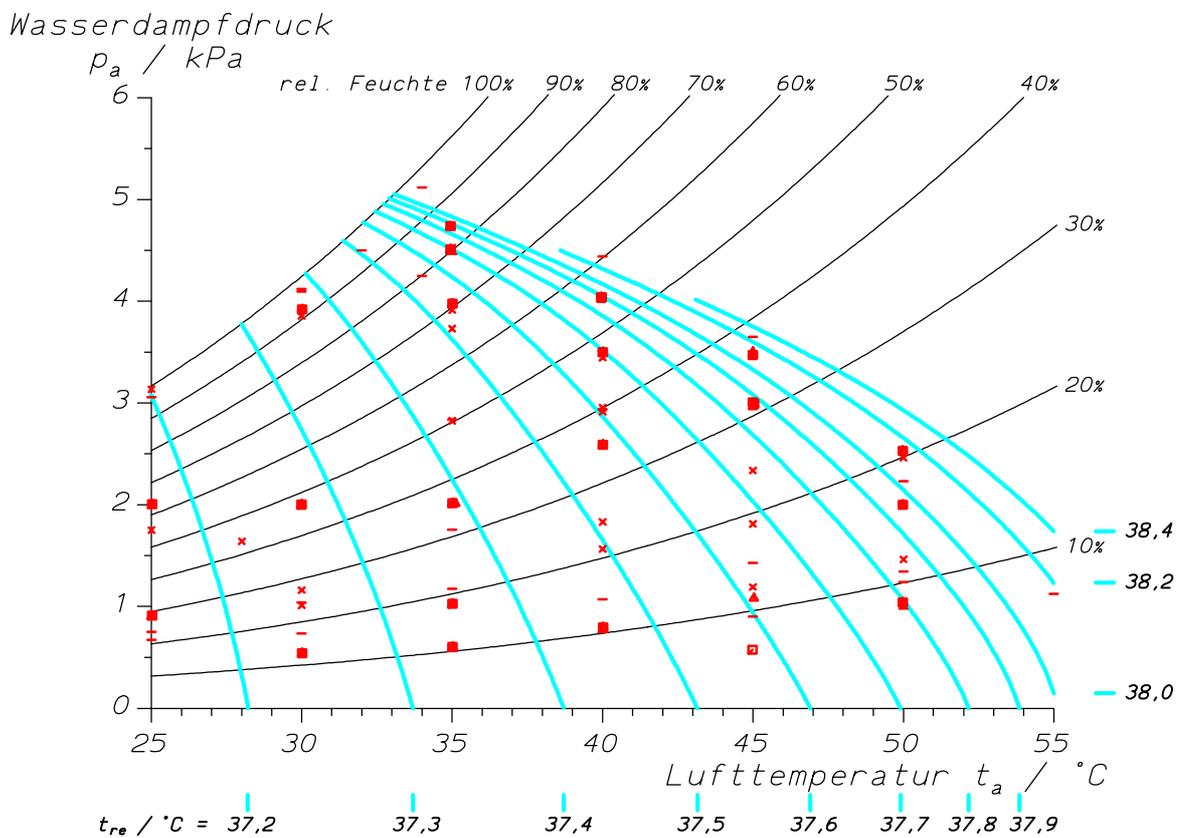


Abb. A - 11: Äquivalenzlinien der Rektaltemperatur für vier nicht akklimatisierte Probanden.

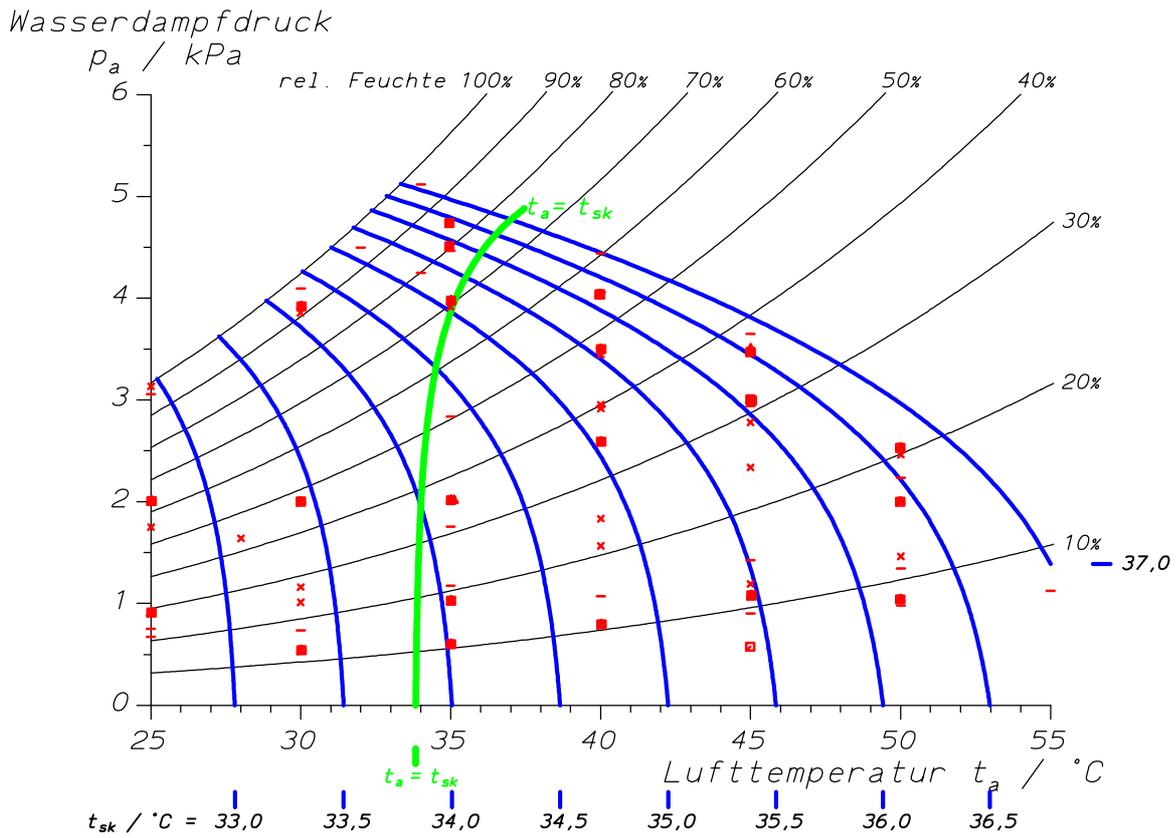


Abb. A - 12: Äquivalenzlinien der Hauttemperatur für vier nicht akklimatisierte Probanden.

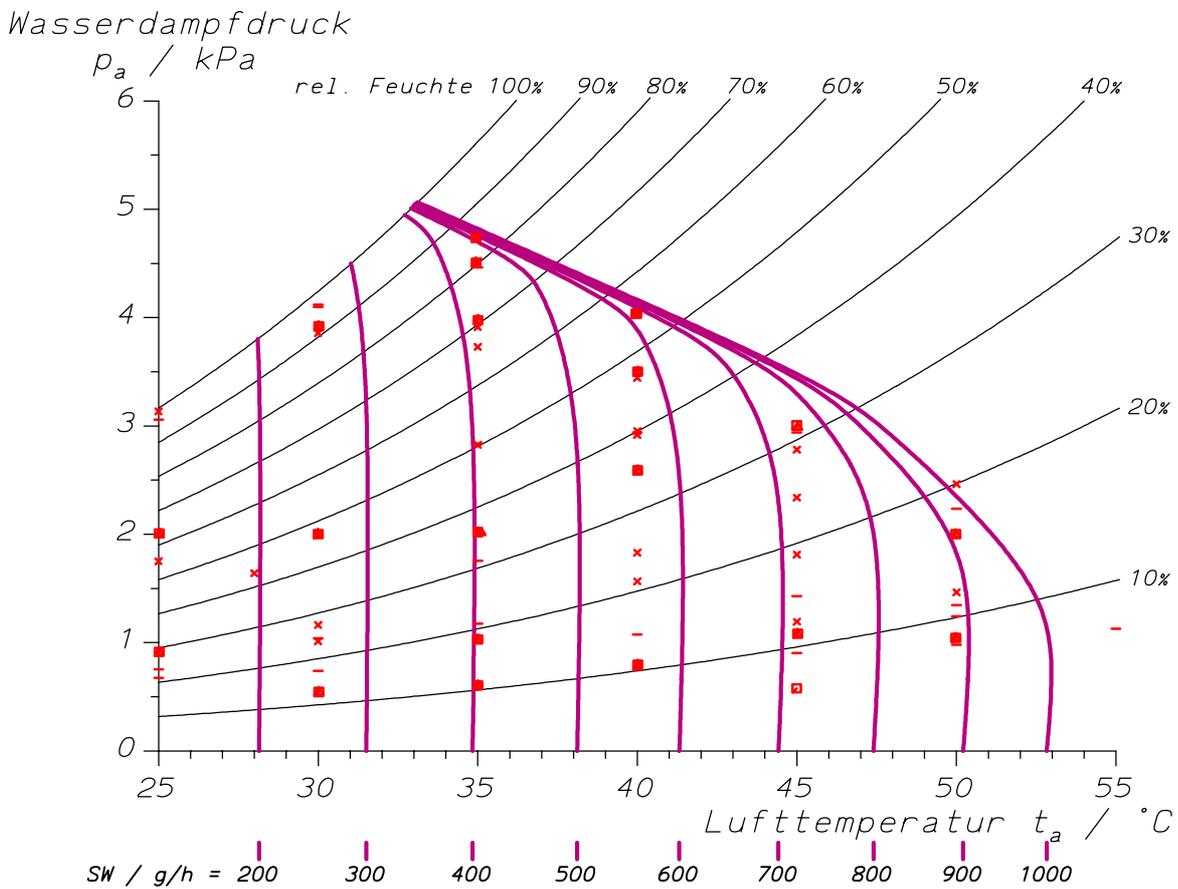


Abb. A - 13: Äquivalenzlinien der Schweißrate für vier nicht akklimatisierte Probanden.

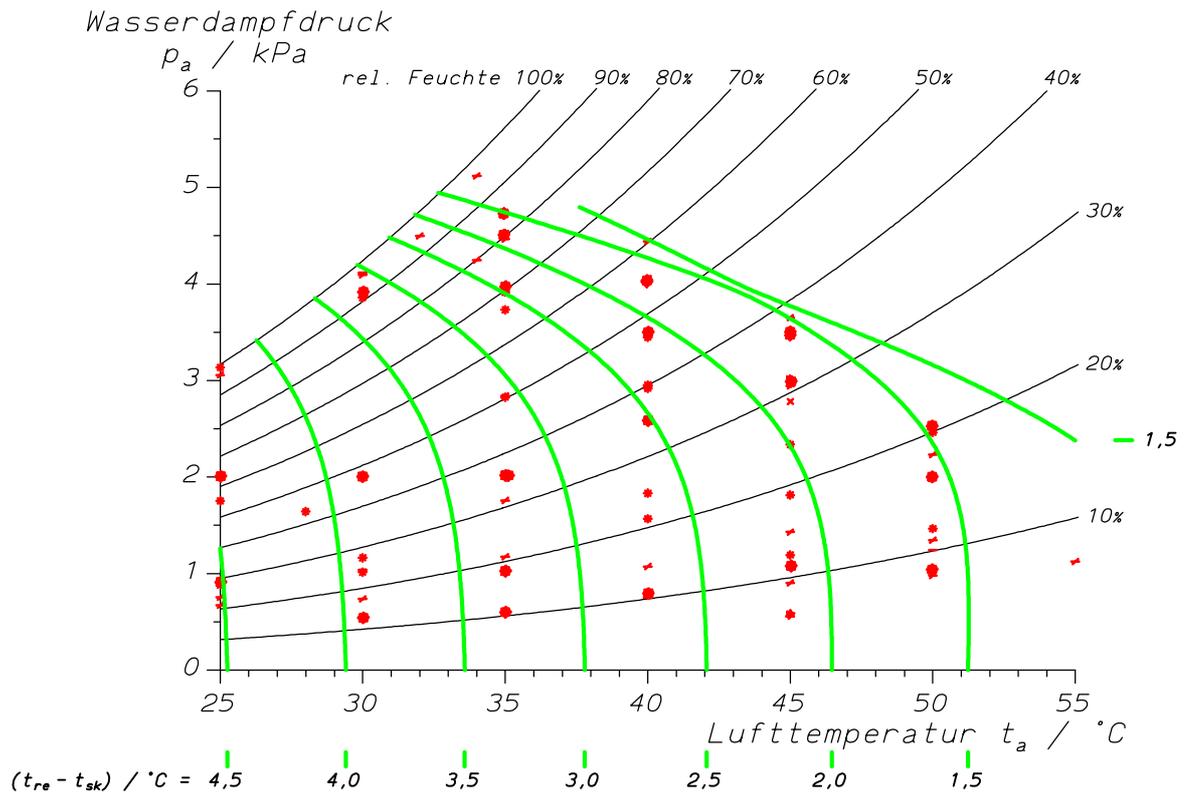


Abb. A - 14: Äquivalenzlinien der Differenz " $t_{re} - t_{sk}$ " für vier nicht akklimatisierte Probanden.

Die Differenz $t_{re} - t_{sk}$ stellt den mittleren Temperaturgradienten zwischen dem Körperinneren und der Körperoberfläche dar.

A.3 Mittlere Äquivalenzlinien bei erhöhter Windgeschwindigkeit

Diese Auswertung faßt die Daten von vier akklimatisierten Probanden (A, B, C und D in Tabelle 3) bei einer Windgeschwindigkeit von $v_a = 2,0$ m/s zusammen; Temperatur und Wasserdampfdruck der Meßwerte sind für die einzelnen Probanden mit unterschiedlichen Symbolen im psychrometrischen Diagramm markiert.

Tabelle 22: Mittlerer quadratischer Fehler der Abweichung der Datenpunkte vom Ausgleichssystem für vier Probanden.

		Bewertung für einzelne Probanden				mittleres Ausgleichssystem	
		A	B	C	D	Datenpunkte	A, B, C und D
Proband akklimatisiert $v_a = 2,0$ m/s	HSF / min^{-1}	2,1	5,5	5,2	3,8	81	7,5
	$t_{re} / ^\circ\text{C}$	0,079	0,080	0,12	0,074	81	0,15
	$t_{sk} / ^\circ\text{C}$	0,31	0,40	0,37	0,23	74	0,44
	SW / g/h	37	30	27	43	78	68

Die Streuung der Datenpunkte gegenüber den mittleren Ausgleichskurven ist für die physiologischen Größen vergleichbar den in Tabelle 5 angegebenen Werten. Die Zahl der Datenpunkte in den Versuchsserien bei einer Windgeschwindigkeit von $v_a = 2,0$ m/s war um etwa 20 % größer als in den Serien mit akklimatisierten Probanden.

Die Abbildungen Abb. A - 15 bis Abb. A - 19 geben die Äquivalenzlinien der physiologischen Größen im psychrometrischen Diagramm an und erlauben eine rasche Abschätzung der Beanspruchung für vorgegebene Belastungswerte. Die Differenzen zu den Äquivalenzlinien für $v_a = 0,3$ m/s sind in Kapitel 4.5, Abb. 32 - Abb. 36 angegeben und kommentiert: die Differenzäquivalenzlinien geben an, um welchen Betrag die jeweilige Beanspruchungsgröße sich an einem Ort im psychrometrischen Diagramm bei einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit ändert. Der direkte Vergleich der Äquivalenzlinien (z.B. in Abb. 21 und in Abb. A - 15) ist dadurch erschwert, daß Abb. 21 für die Probanden A, B, E und F errechnet wurde, während Abb. A - 15 für die Probanden A, B, C und D bestimmt wurde – die Äquivalenzlinienschar für die vier Probanden A, B, C und D für $v_a = 0,3$ m/s ist aus Platzgründen nicht eigens dargestellt worden – für die Berechnung der Differenzäquivalenzlinien in Kapitel 4.5 wurden aber jeweils die Daten der Probanden A, B, C und D verwendet.

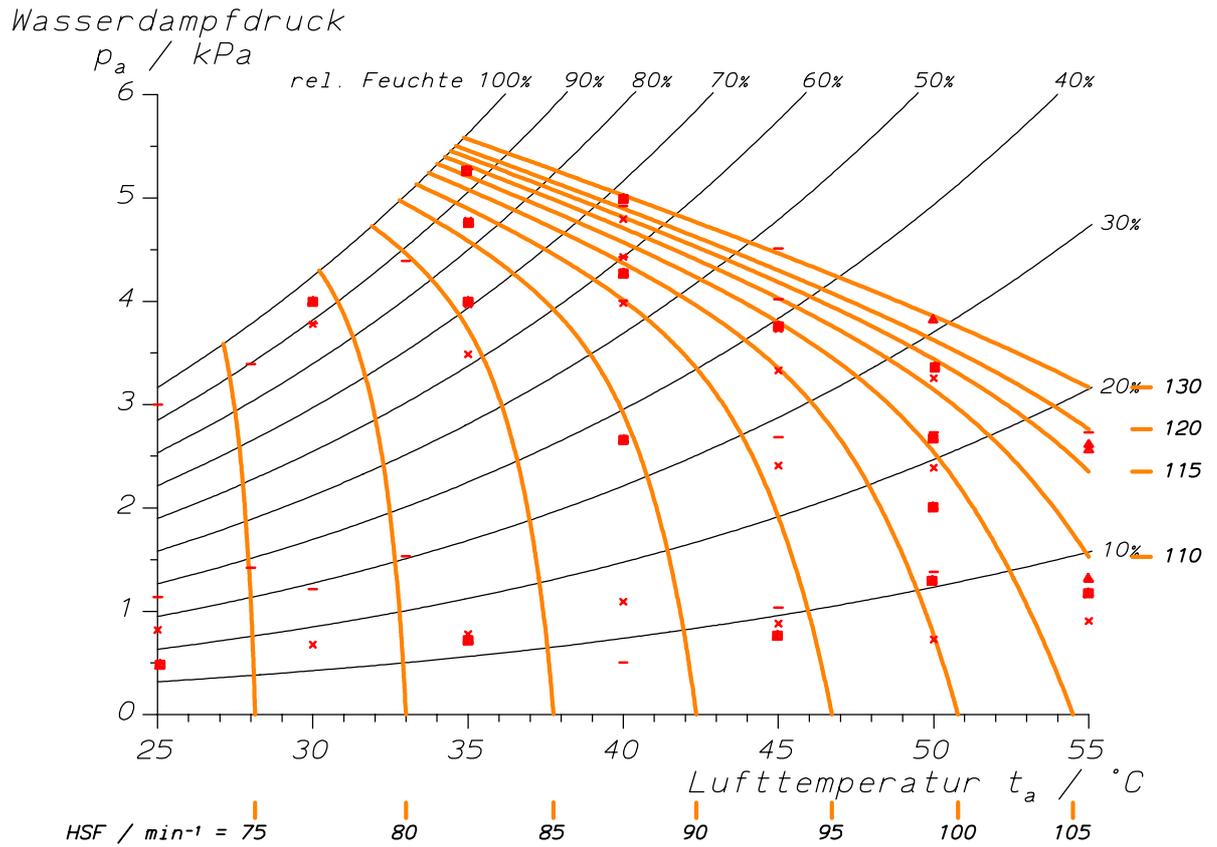


Abb. A - 15: Äquivalenzlinien der Herzschlagfrequenz für vier Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

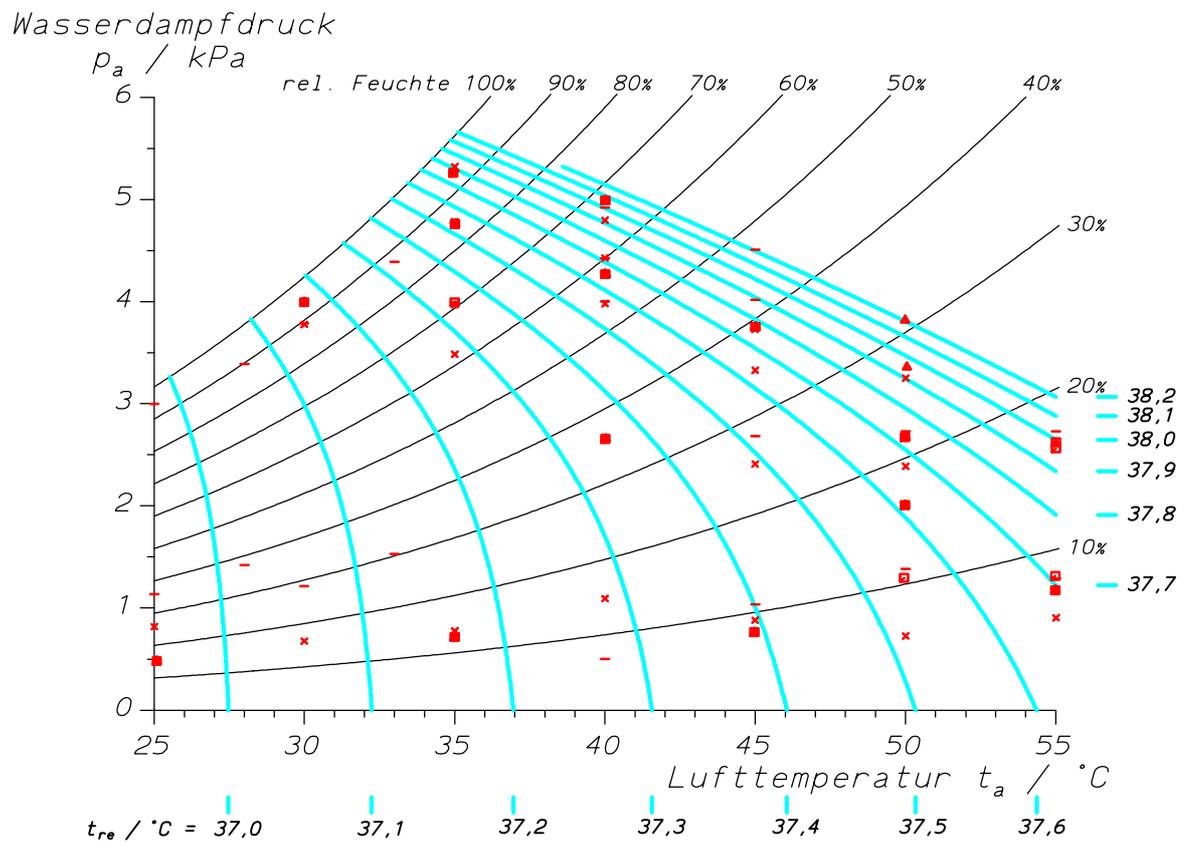


Abb. A - 16: Äquivalenzlinien der Rektaltemperatur für vier Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

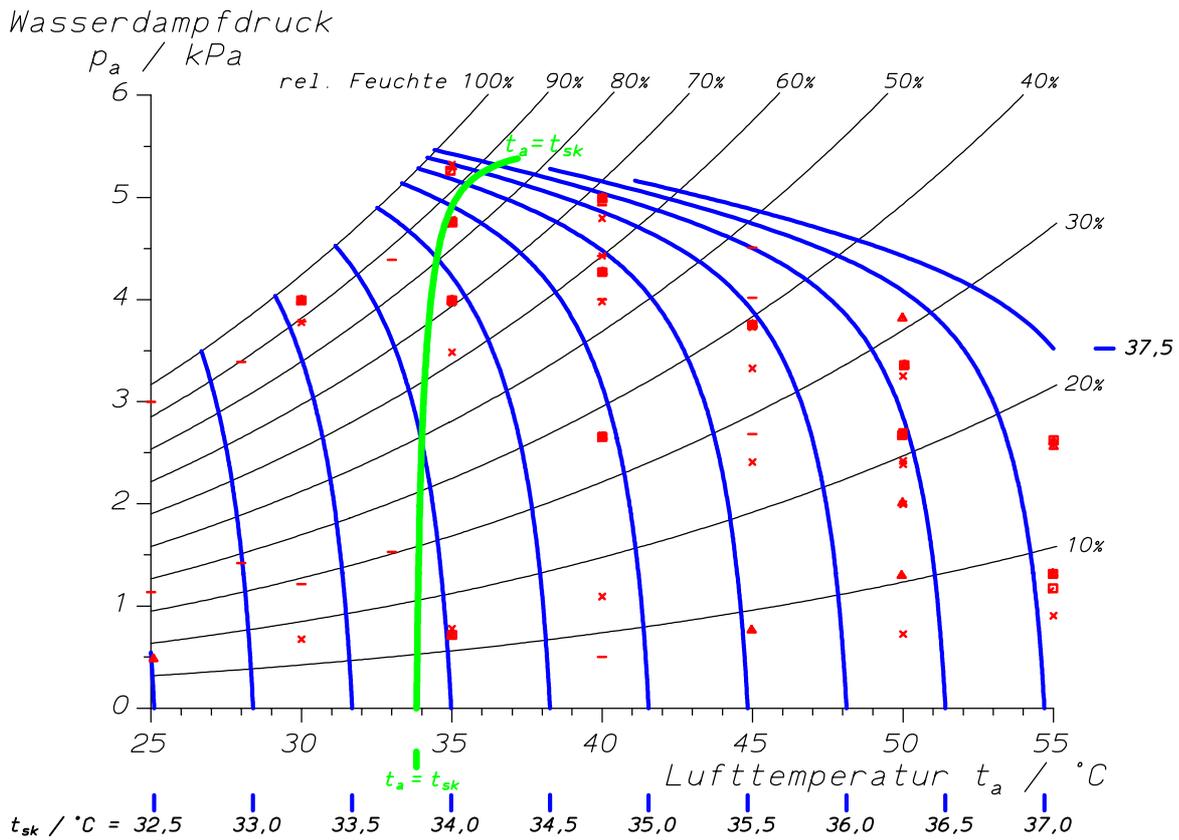


Abb. A - 17: Äquivalenzlinien der Hauttemperatur für vier Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

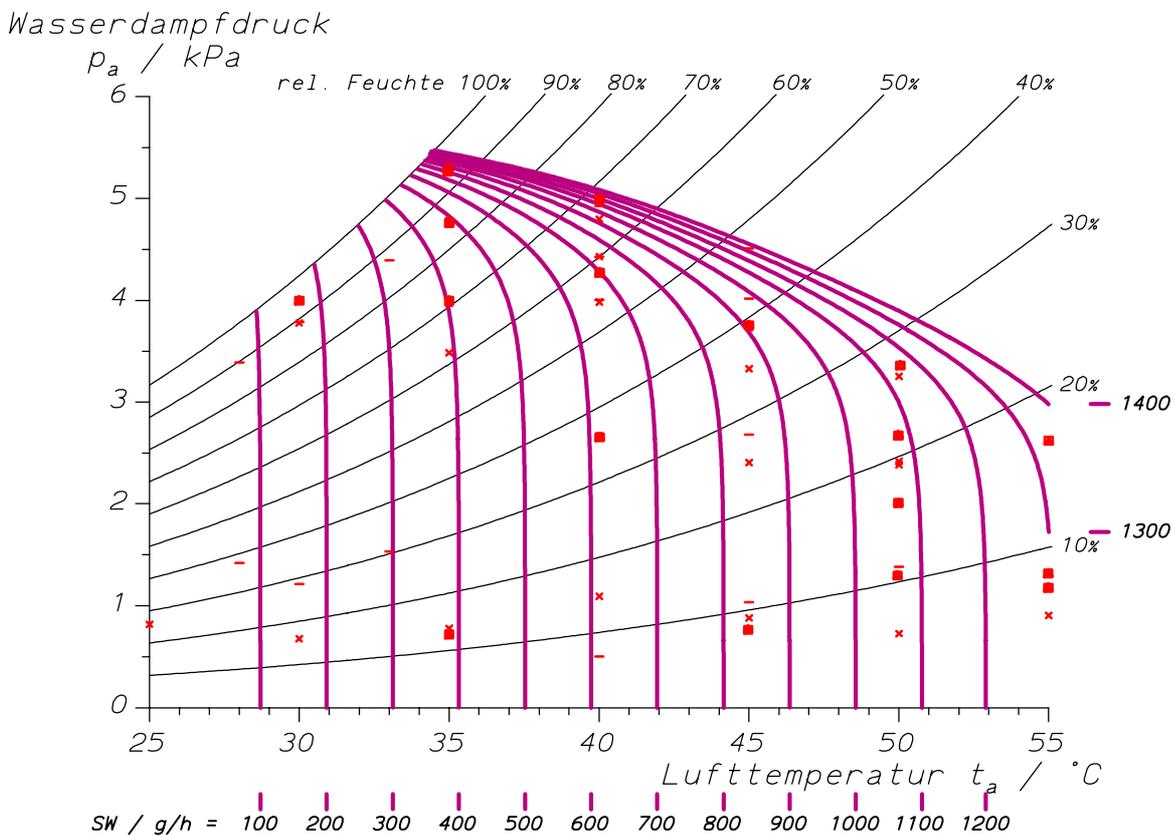


Abb. A - 18: Äquivalenzlinien der Schweißrate für vier Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

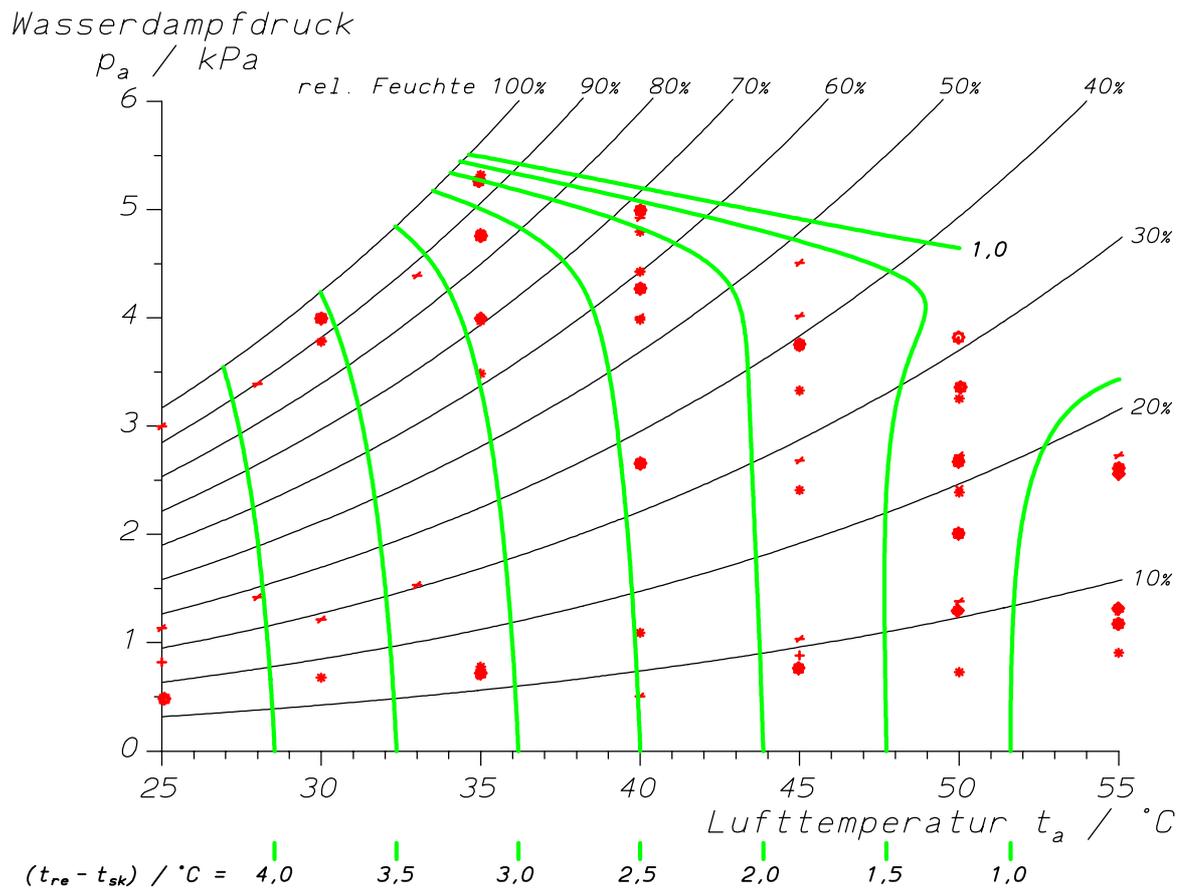


Abb. A - 19: Äquivalenzlinien der Differenz " $t_{re} - t_{sk}$ " für vier Probanden ($v_a = 2,0 \text{ m/s}$).

Die Differenz $t_{re} - t_{sk}$ stellt den mittleren Temperaturgradienten zwischen dem Körperinneren und der Körperoberfläche dar.

A.4 Untersuchungszahlen für die berufsgenossenschaftlichen Grundsätze BG 30 und BG 35

Die für die einzelnen Untersuchungen ermächtigten Ärzte melden die Untersuchungszahlen über die zuständigen Landesverbände an den Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG). Für das Jahr 1997 sind die Zahlen für den berufsgenossenschaftlichen Grundsatz 30 „*Hitzearbeiten*“ in Tabelle 23 angegeben; Tabelle 24 enthält die entsprechenden Zahlen für den berufsgenossenschaftlichen Grundsatz 35 „*Arbeitsaufenthalt im Ausland unter besonderen klimatischen und gesundheitlichen Belastungen*“.

Tabelle 23: Untersuchungszahlen für den BG 30 im Jahr 1997.

BG 30	Untersuchungen insgesamt	davon: Erstuntersuchungen	davon: Nachuntersuchungen
Durchgeführte Untersuchungen	41292	6319	34973
Ergebnis:			
Keine Bedenken	32380	5209	27171
Keine Bedenken unter bestimmten Voraussetzungen	6482	825	5657
Befristete Bedenken	1639	146	1493
Dauernde Bedenken	791	139	652

Tabelle 24: Untersuchungszahlen für den BG 35 im Jahr 1997.

BG 35	Untersuchungen insgesamt	davon: Erstuntersuchungen	davon: Nachuntersuchungen
Durchgeführte Untersuchungen	36109	13849	22260
Ergebnis:			
Keine Bedenken	32731	12739	19992
Keine Bedenken unter bestimmten Voraussetzungen	3025	959	2066
Befristete Bedenken	239	101	138
Dauernde Bedenken	114	50	64

A.5 Klima-Merkblatt für Steinkohlenbergleute

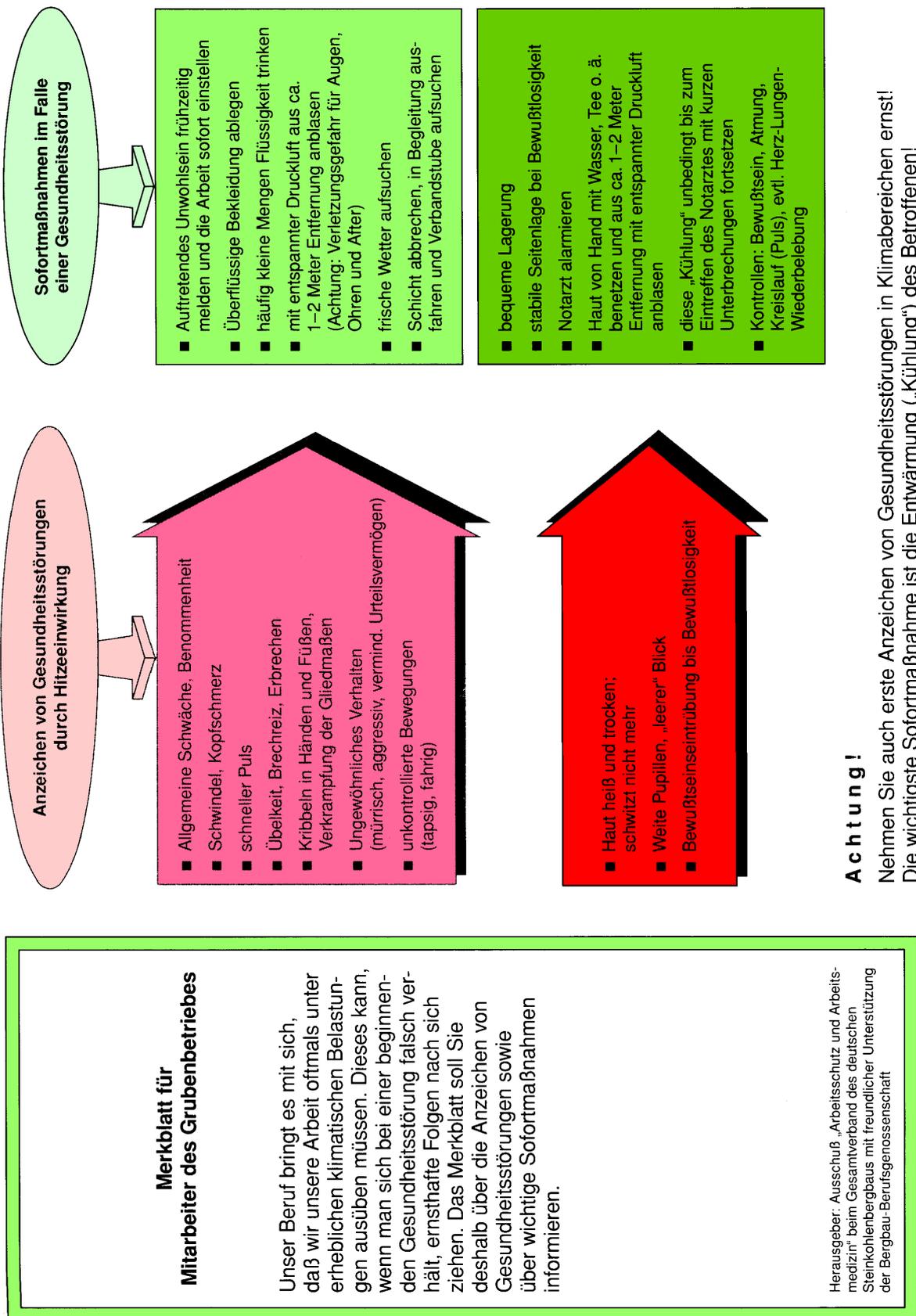


Abb. A - 20: Klima-Merkblatt des Ausschusses „Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin“ beim Gesamtverband des deutschen Steinkohlenbergbaus in türkischer und deutscher Sprache, o.J.; deutschsprachige Seite.