

DIN EN ISO 7933

ICS 13.180

Einsprüche bis 2018-06-06
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 7933:2004-12

Entwurf

**Ergonomie der thermischen Umgebung –
Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung mit dem
Modell der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (ISO/DIS 7933:2018);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 7933:2018**

Ergonomics of the thermal environment –
Analytical determination and interpretation of heat stress using the predicted heat strain
model (ISO/DIS 7933:2018);
German and English version prEN ISO 7933:2018

Ergonomie des ambiances thermiques –
Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de
l'astreinte thermique prévisible (ISO/DIS 7933:2018);
Version allemande et anglaise prEN ISO 7933:2018

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-04-06 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an naerg@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 80 Seiten

DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 7933:2018) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 159 „Ergonomics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 122 „Ergonomie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 023-00-05 GA „Gemeinschaftsarbeitsausschuss NAErg/NAM: Ergonomie der physikalischen Umgebung, ErgPhysU“ im DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 7243	siehe DIN EN ISO 7243
ISO 7726	siehe DIN EN ISO 7726
ISO 8996	siehe DIN EN ISO 8966
ISO 9886	siehe DIN EN ISO 9886
ISO 9920	siehe DIN EN ISO 9920
ISO 12894	siehe DIN EN ISO 12894
ISO 13731	siehe DIN EN ISO 13731
ISO 13732-1	siehe DIN EN ISO 13732-1
ISO 15265	siehe DIN EN ISO 15265

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 7933:2004-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Inhalt an die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse angepasst;
- b) redaktionelle Anpassungen an die derzeit geltenden Gestaltungsregeln.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 7243, *Ergonomie der thermischen Umgebung — Ermittlung der Wärmebelastung durch den WBGT-Index (wet bulb globe temperature)*

DIN EN ISO 7726, *Umgebungsklima — Instrumente zur Messung physikalischer Größen*

DIN EN ISO 8966, *Ergonomie der thermischen Umgebung — Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes*

DIN EN ISO 9886, *Ergonomie — Ermittlung der thermischen Beanspruchung durch physiologische Messungen*

DIN EN ISO 9920, *Ergonomie der thermischen Umgebung — Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination*

DIN EN ISO 12894, *Ergonomie des Umgebungsklimas — Medizinische Überwachung von Personen, die einer extrem heißen oder kalten Umgebung ausgesetzt sind*

DIN EN ISO 13731, *Ergonomie des Umgebungsklimas — Begriffe und Symbole*

DIN EN ISO 13732-1, *Ergonomie der thermischen Umgebung — Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen — Teil 1: Heiße Oberflächen*

DIN EN ISO 15265, *Ergonomie der thermischen Umgebung — Strategie zur Risikobeurteilung zur Abwendung von Stress oder Unbehagen unter thermischen Arbeitsbedingungen*

— Leerseite —

Ergonomie der thermischen Umgebung — Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung mit dem Modell der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (ISO/DIS 7933:2018)

Ergonomie des ambiances thermiques — Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible (ISO/DIS 7933:2018)

Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of heat stress using the predicted heat strain model (ISO/DIS 7933:2018)

ICS:

Deskriptoren:

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: parallele Umfrage
Dokumentsprache: D

STD Version 2.9d

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Symbole	8
4 Kurzbeschreibung des Modells der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (PHS-Modell)	11
5 Hauptschritte der Berechnung	12
5.1 Wärmebilanzgleichung	12
5.1.1 Energieumsatz, M	12
5.1.2 Wirksame mechanische Leistung, W	12
5.1.3 Konvektiver Wärmefluss bei der Atmung, C_{res}	12
5.1.4 Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung, E_{res}	13
5.1.5 Konduktiver Wärmefluss, K	13
5.1.6 Konvektiver Wärmefluss, C	13
5.1.7 Strahlungswärmefluss, R	13
5.1.8 Wärmefluss durch Verdunstung, E	13
5.1.9 Wärmespeicherung(srate) zur Erhöhung der Körperkerntemperatur in Verbindung mit dem Energieumsatz, dS_{eq}	14
5.1.10 Wärmespeicherung, S	14
5.2 Berechnung des erforderlichen Wärmeflusses durch Verdunstung, des erforderlichen Hautbenetzungsgrades und der erforderlichen Schweißrate	14
6 Bewertung der erforderlichen Schweißrate	15
6.1 Grundlage des Bewertungsverfahrens	15
6.1.1 Belastungskriterien	15
6.1.2 Beanspruchungskriterien	15
6.1.3 Bezugsgrößen	15
6.2 Analyse der Arbeitssituation	15
6.3 Bestimmung der maximal zulässigen Expositionsdauer, D_{lim}	16
Anhang A (normativ) Erforderliche Daten für die Berechnung der Wärmebilanz	17
A.1 Gültigkeitsbereich	17
A.2 Bestimmung des konvektiven Wärmeflusses bei der Atmung, C_{res}	17
A.3 Bestimmung des Wärmeflusses durch Verdunstung bei der Atmung, E_{res}	17
A.4 Bestimmung der mittleren Hauttemperatur im stabilen Zustand	18
A.5 Bestimmung des Istwertes der Hauttemperatur	18
A.6 Bestimmung der Wärmespeicherung des Körpers in Verbindung mit dem Energieumsatz, dS_{eq}	18
A.7 Bestimmung der statischen Isolationseigenschaften der Kleidung	19
A.8 Bestimmung der dynamischen Isolationseigenschaften der Kleidung	19
A.9 Bestimmung des Wärmeaustausches durch Konvektion und Strahlung	20
A.10 Bestimmung des maximalen Wärmeflusses durch Verdunstung an der Hautoberfläche, E_{max}	21

A.11	Bestimmung der vorhergesagten Schweißrate S_{wp} und des vorhergesagten Wärmeflusses durch Verdunstung, E_p	21
A.12	Bestimmung der rektalen Temperatur	23
Anhang B (informativ) Kriterien für die Bestimmung der zulässigen Expositionsdauer in einem warmen Arbeitsklima		
B.1	Einleitung	24
B.2	Akklimatisierte und nicht akklimatisierte Personen	24
B.3	Maximaler Hautbenetzungsgrad, w_{max}	24
B.4	Maximale Schweißrate, Sw_{max}	24
B.5	Maximale Austrocknung und maximaler Wasserverlust	25
B.6	Maximalwert der Körperkerntemperatur	25
Anhang C (informativ) Energieumsatz		
Anhang D (informativ) Thermische Bekleidungseigenschaften		
D.1	Allgemeines	28
D.2	Wärmeisolation der Bekleidung	28
D.3	Reflexion der Wärmestrahlung	29
D.4	Durchlässigkeit gegenüber Wasserdampf	29
Anhang E (informativ) Computerprogramm zur Berechnung des Modells der vorhergesagten Wärmebeanspruchung		
E.1	Allgemeines	30
E.2	Programm	32
Anhang F (normativ) Beispiele für die Berechnung des vorhergesagten Wärmebeanspruchungsmodells		
Literaturhinweise		
		40

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 7933:2018) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 159 „Ergonomics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 122 „Ergonomie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 7933:2004 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 7933:2018 wurde von CEN als prEN ISO 7933:2018 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Internationale Normen werden in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet.

Die Hauptaufgabe der Technischen Komitees besteht in dem Erarbeiten von Internationalen Normen. Die von den Technischen Komitees angenommenen Norm-Entwürfe werden den Mitgliedsorganisationen zur Umfrage zur Verfügung gestellt. Für eine Veröffentlichung als Internationale Norm wird eine Zustimmung von mindestens 75 % der Mitgliedsländer, die abgestimmt haben, benötigt.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 159, *Ergonomics*, Unterkomitee SC 5, *Ergonomics of the physical environment* erarbeitet.

Diese dritte Ausgabe ersetzt die zweite Ausgabe (ISO 7933:2004), die technisch überarbeitet wurde.

Einleitung

In dieser Reihe von Internationalen Normen werden Verfahren zur Bestimmung von Arbeitsbedingungen in Abhängigkeit von der thermischen Umgebung beschrieben. In ISO 15265 [1] wird die Bewertungsstrategie zur Vorbeugung von Unbehagen und Gesundheitsprophylaxe unter bestimmten thermischen Arbeitsbedingungen beschrieben, während in ISO 16595/WP [2] spezifische Verfahren für warme Arbeitsumgebungen empfohlen werden. In diesen Normen für warme Umgebungen wird vorgeschlagen, ein Screening-Verfahren auf der Grundlage des in ISO 7243 [3] beschriebenen WBGT-Wärmebelastungs-Index (en: wet bulb globe temperature, WBGT) zur Feststellung des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins von Wärmebelastung zu verwenden sowie ein ausführlicheres Verfahren, das in dieser vorliegenden Internationalen Norm präsentiert wird, um die Belastung genauer zu bestimmen, die zulässige Arbeitsdauer unter diesen Bedingungen zu bestimmen und die Schutzmaßnahmen zu optimieren. Dieses Verfahren, das auf einer Analyse des Wärmeaustauschs zwischen einer Person und ihrer Umgebung basiert, ist bestimmt für die Verwendung zum Zweck einer umfangreichen Analyse von Arbeitsbedingungen in warmen Umgebungen.

Diese Internationale Norm normt das Verfahren, das Fachleute auf dem Gebiet der Berufsgesundheit anwenden sollten, um ein bestimmtes Problem anzugehen und stufenweise die Informationen zu sammeln, die erforderlich sind, um das Problem zu begrenzen oder zu vermeiden.

Diese dritte Ausgabe der Norm beruht auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Zukünftige Verbesserungen im Hinblick auf die Berechnung der einzelnen Komponenten der Wärmebilanzgleichung oder deren Bewertung werden dennoch in Zukunft berücksichtigt, sobald diese verfügbar sind.

In der gegenwärtigen Form lässt sich dieses Bewertungsverfahren nicht auf Fälle anwenden, bei denen besondere Schutzkleidung getragen wird (reflektierende Kleidung, Kleidung mit Aktivkühlung und Belüftung, undurchlässige Kleidung, Kleidung mit persönlicher Schutzausrüstung). Es ist ebenfalls nicht anwendbar bei sich verändernden Umgebungsbedingungen, Energieumsatz und/oder Kleidung und ermöglicht es daher, die Entwicklung von Körperkerntemperatur und Wasserverlust unter Bedingungen vorherzusagen, unter denen diese Parameter konstant bleiben. Weiterhin sind Fachleute auf dem Gebiet der Berufsgesundheit dafür verantwortlich, unter Berücksichtigung der besonderen Merkmale, die von denen einer „Normalperson“ abweichen können, das Risiko zu bewerten, dem eine bestimmte Person ausgesetzt ist. In ISO 9886 [4] wird beschrieben, wie physiologische Parameter angewendet werden müssen, um das physiologische Verhalten einer bestimmten Person zu beobachten; in ISO 12894 [5] wird beschrieben, wie eine medizinische Überwachung organisiert sein muss.

1 Anwendungsbereich

Das Hauptziel dieser Internationalen Norm ist die Beschreibung eines mathematischen Modells (Modell der vorhergesagten Wärmebeanspruchung) zur analytischen Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung (im Hinblick auf Wasserverlust und Körperkerntemperatur) einer Person in einer warmen Umgebung und zur Bestimmung der „maximal zulässigen Expositionsdauer“, bei der die physiologische Beanspruchung für 95 % der ihr ausgesetzten Bevölkerung annehmbar ist (die maximal ertragbare Körperkerntemperatur und der maximal ertragbare Wasserverlust werden bei 95 % der betroffenen Personen nicht überschritten).

Die verschiedenen Bedingungen, die in diesem Vorhersagemodell und besonders bei der Wärmebilanz verwendet werden, zeigen den Einfluss der unterschiedlichen physikalischen Parameter der Umgebung auf die Wärmebelastung der Person. Auf diese Weise ermöglicht es diese Internationale Norm zu bestimmen, welche Parameter oder welche Gruppen von Parametern verändert werden können und in welchem Ausmaß dies erfolgen kann, um das Risiko einer physiologischen Überbeanspruchung zu reduzieren.

Diese Internationale Norm ist nicht in der Lage, die physiologische Reaktion einzelner Personen vorherzusagen, sondern berücksichtigt nur „Normalpersonen“, die sich in einem guten gesundheitlichen Zustand befinden und in der Lage sind, ihre Arbeit durchzuführen. Sie ist daher für den Gebrauch durch Personen bestimmt, die im Bereich der Ergonomie, der Industriehygiene usw. ausgebildet sind. Empfehlungen dazu, wie und wann dieses Modell anzuwenden ist, finden sich in ISO 15265, *Ergonomics of the thermal environment — Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions*.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 7726, *Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities*

ISO 8996, *Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate*

ISO 9886, *Ergonomics — Evaluation of thermal strain by physiological measurements*

ISO 9920, *Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble*

ISO 13731, *Ergonomics of the thermal environment — Vocabulary and symbols*

ISO 13732-1, *Ergonomics of the thermal environment — Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces — Part 1: Hot surfaces*

ISO 15265, *Ergonomics of the thermal environment — Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions*

ISO 16595/WP, *Ergonomics of the thermal environment: Working practices in hot environments*

3 Symbole

Für die Anwendung dieses Dokuments stimmen die Symbole und Abkürzungen, in Tabelle 1 als „Symbole“ mit deren Einheiten bezeichnet, mit ISO 13731 überein.

Für die Darstellung des Indexes der vorhergesagten Wärmebeanspruchung werden jedoch zusätzliche Symbole verwendet. Tabelle 2 enthält eine vollständige Liste der in dieser Internationalen Norm verwendeten Symbole.

Tabelle 1 — Symbole und Einheiten in Übereinstimmung mit ISO 13731

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Anteil der Körpermasse bei Hauttemperatur	—
α_i	Wichtung von Hauttemperatur — Körperkerntemperatur zum Zeitpunkt t_i	—
α_{i-1}	Wichtung von Hauttemperatur — Körperkerntemperatur zum Zeitpunkt t_{i-1}	—
ε	Hautemissionsgrad	—
ε_{cl}	Emissionskoeffizient von Kleidung (Reflexionskoeffizient)	—
θ	Winkel zwischen Lauf- und Windrichtung	°
A_{Du}	Körperoberfläche nach DuBois	m ²
A_p	Anteil der Körperoberfläche, der mit der reflektierenden Kleidung bedeckt ist	—
A_r	wirksame Strahlungsfläche eines Körpers	m ²
C	konvektiver Wärmefluss (konvektive Wärmeübertragung)	W·m ⁻²
c_e	latente Verdampfungswärme von Wasser	J·kg ⁻¹
$C_{orr,im}$	Korrekturwert für den statischen Feuchtigkeitspermeabilitätsindex	—
$C_{orr,la,st}$	Korrekturwert für die thermische Isolation der statischen Grenzsicht	—
$C_{orr,lcl,st}$	Korrekturwert für die thermische Isolation der statischen Kleidung	—
$C_{orr,ltot,st}$	Korrekturwert für die gesamte thermische Isolation der statischen Kleidung	—
c_p	spezifische Wärme von trockener Luft bei konstantem Druck	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
$c_{p,b}$	spezifische Körperwärme	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
C_{res}	konvektiver Wärmefluss bei der Atmung	W·m ⁻²
D_{lim}	zulässige Expositionsdauer	min
$D_{lim,tcr}$	zulässige Expositionsdauer für die Wärmespeicherung	min
$D_{lim,loss}$	zulässige Expositionsdauer für den Wasserverlust, 95 % der arbeitenden Bevölkerung	min
D_{max}	maximaler Wasserverlust	g
$D_{max,95}$	maximaler Wasserverlust zum Schutz von 95 % der arbeitenden Bevölkerung	g
dS_i	Wärmespeicherungsrate des Körpers zum Zeitpunkt i	W·m ⁻²

Symbol	Bezeichnung	Einheit
dS_{eq}	Wärmespeicherungsrate aufgrund von Erhöhung der Körperkerntemperatur in Verbindung mit dem Energieumsatz	$W \cdot m^{-2}$
E	Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$W \cdot m^{-2}$
E_{max}	maximaler Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$W \cdot m^{-2}$
E_p	vorhergesagter Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$W \cdot m^{-2}$
E_{req}	erforderlicher Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$W \cdot m^{-2}$
E_{res}	Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung	$W \cdot m^{-2}$
f_{cl}	Bekleidungsflächenfaktor	—
$F_{cl,R}$	Reduktionsfaktor für den Wärmeaustausch durch Strahlung auf Grund des Tragens von reflektierender Bekleidung	—
F_r	Reflexionskoeffizienten für verschiedene Spezialmaterialien	—
H_b	Körpergröße	m
$h_{c,dyn}$	Koeffizient für den dynamischen konvektiven Wärmeübergang	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_r	Wärmeaustauschkoeffizient durch Strahlung (Strahlungswärmeübergangskoeffizient)	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$I_{a,dyn}$	thermische Isolation der dynamischen Grenzschicht	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$I_{a,st}$	thermische Isolation der statischen Grenzschicht	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$I_{cl,dyn}$	dynamische thermische Bekleidungsisolation	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$I_{cl,st}$	statische thermische Bekleidungsisolation	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$i_{m,dyn}$	Permeabilitätsindex der dynamischen Feuchtigkeit	—
$i_{m,st}$	Permeabilitätsindex der statischen Feuchtigkeit	—
$incr$	Zeitspanne vom Zeitpunkt t_{i-1} bis t_i	min
$i_{T,dyn}$	gesamte dynamische thermische Bekleidungsisolation	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$i_{T,st}$	gesamte statische thermische Bekleidungsisolation	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
K	konduktiver Wärmefluss (Wärmeübertragung durch Wärmeleitung)	$W \cdot m^{-2}$
k_{sw}	Zeitkonstante der Erhöhung der Schweißrate	min
k_{tcreq}	Zeitkonstante der Änderung der Körperkerntemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz	min
k_{tsk}	Zeitkonstante der Änderung der Hauttemperatur	min
M	Energieumsatz (körpereigene Energieerzeugung)	$W \cdot m^{-2}$
p_a	Wasserdampfpartialdruck bei Lufttemperatur	kPa
$p_{sk,s}$	Wasserdampf-sättigungsdruck bei Hauttemperatur	kPa

Symbol	Bezeichnung	Einheit
R	Strahlungswärmefluss (Wärmeübertragung durch Strahlung)	$W \cdot m^{-2}$
$R_{e,T,dyn}$	dynamischer Gesamt-Verdunstungswiderstand	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$
r_{req}	erforderliche Effektivität der Schweißverdunstung	—
S	Wärmespeicherung(srate) des Körpers	$W \cdot m^{-2}$
S_{eq}	Wärmespeicherung des Körpers zur Erhöhung der Körperkerntemperatur in Verbindung mit dem Energieumsatz	$W \cdot m^{-2}$
Sw_{max}	maximale Schweißrate	$W \cdot m^{-2}$
Sw_p	vorhergesagte Schweißrate	$W \cdot m^{-2}$
$Sw_{p,i}$	vorhergesagte Schweißrate zum Zeitpunkt t_i	$W \cdot m^{-2}$
$Sw_{p,i-1}$	vorhergesagte Schweißrate zum Zeitpunkt t_{i-1}	$W \cdot m^{-2}$
Sw_{req}	erforderliche Schweißrate	$W \cdot m^{-2}$
t	Zeit	min
t_a	Lufttemperatur	$^{\circ}C$
t_{cl}	Oberflächentemperatur der Bekleidung	$^{\circ}C$
t_{cr}	Körperkerntemperatur	$^{\circ}C$
$t_{cr,eq}$	Körperkerntemperatur im stabilen Zustand in Abhängigkeit vom Energieumsatz	$^{\circ}C$
$t_{cr,eq i}$	Körperkerntemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz zum Zeitpunkt t_i	$^{\circ}C$
$t_{cr,eq i-1}$	Körperkerntemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz zum Zeitpunkt t_{i-1}	$^{\circ}C$
$t_{cr,eq,m}$	Wert der Körperkerntemperatur im stabilen Zustand in Abhängigkeit vom Energieumsatz	$^{\circ}C$
$t_{cr,i}$	Körperkerntemperatur zum Zeitpunkt t_i	$^{\circ}C$
$t_{cr,i-1}$	Körperkerntemperatur zum Zeitpunkt t_{i-1}	$^{\circ}C$
t_{ex}	Temperatur der ausgeatmeten Luft	$^{\circ}C$
t_r	mittlere Strahlungstemperatur	$^{\circ}C$
t_{re}	rektale Temperatur	$^{\circ}C$
$t_{cr,max}$	maximal zulässige Körperkerntemperatur	$^{\circ}C$
$t_{re,i}$	rektale Temperatur zum Zeitpunkt t_i	$^{\circ}C$
$t_{re,i-1}$	rektale Temperatur zum Zeitpunkt t_{i-1}	$^{\circ}C$
t_{sk}	Hauttemperatur	$^{\circ}C$
$t_{sk,eq}$	mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand	$^{\circ}C$
$t_{sk,eq,cl}$	mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand bei bekleideten Personen	$^{\circ}C$

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$t_{sk,eq,nu}$	mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand bei unbedeckten Personen	°C
$t_{sk,i}$	mittlere Hauttemperatur zum Zeitpunkt t_i	°C
$t_{sk,i-1}$	mittlere Hauttemperatur zum Zeitpunkt t_{i-1}	°C
V_{ex}	Volumenstrom der ausgeatmeten Luft	L·min ⁻¹
v_a	Luftgeschwindigkeit	m·s ⁻¹
v_{ar}	relative Luftgeschwindigkeit	m·s ⁻¹
v_w	Schrittgeschwindigkeit	m·s ⁻¹
w	Hautbenetzungsgrad	—
W	wirksame mechanische Leistung	W·m ⁻²
W_a	Feuchtegehalt der eingeatmeten Luft	kg _{Wasser} / kg _{Luft}
W_b	Körpermasse	kg
W_{ex}	Feuchtegehalt der ausgeatmeten Luft	kg _{Wasser} / kg _{Luft}
w_{max}	maximaler Hautbenetzungsgrad	—
w_p	vorhergesagter Hautbenetzungsgrad	—
w_{req}	erforderlicher Hautbenetzungsgrad	—

4 Kurzbeschreibung des Modells der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (PHS-Modell)

Das PHS-Modell basiert auf der Wärmebilanz des Körpers, für deren Ermittlung die Werte der folgenden Parameter erforderlich sind, die nach ISO 7726 bestimmt oder gemessen werden:

a) die Parameter der thermischen Umgebung:

- Lufttemperatur t_a ;
- mittlere Strahlungstemperatur t_r ;
- Wasserdampfpartialdruck p_a ; und
- Luftgeschwindigkeit v_a ;

b) die durchschnittlichen Werte der Personen, die dieser Arbeitssituation ausgesetzt sind, bezüglich:

- Energieumsatz M bestimmt nach ISO 8996; und
- Bekleidungsmerkmale in Bezug auf Wärme, bestimmt nach ISO 9920.

Abschnitt 5 beschreibt die Grundlagen der Berechnung der verschiedenen Wärmeaustauschvorgänge, die in der Wärmebilanzgleichung auftreten, sowie die des Wasserverlustes, der erforderlich ist, um das thermische Gleichgewicht des Körpers aufrechtzuerhalten. Die mathematischen Gleichungen für diese Berechnungen sind in Anhang A angegeben.

Abschnitt 6 beschreibt das Verfahren zur Bewertung der Ergebnisse aus Abschnitt 5, das zur Bestimmung der vorhergesagten Schweißrate, der vorhergesagten Körperkerntemperatur und der zulässigen Expositionsdauer führt. Die Bestimmung der zulässigen Expositionsdauer beruht auf zwei Beanspruchungskriterien: dem maximalen Anstieg der Körperkerntemperatur und dem maximalen Wasserverlust des Körpers, in Anhang B angegeben.

Die Genauigkeit, mit der die vorhergesagte Schweißrate und die Expositionszeiten abgeschätzt werden, hängt von dem verwendeten Modell (d. h. von den Gleichungen in Anhang A) und den eingesetzten Maximalwerten ab. Ferner ist diese abhängig von der Genauigkeit, mit der die physikalischen Parameter abgeschätzt und gemessen und der Energieumsatz und die Wärmeisolation der Kleidung abgeschätzt werden.

5 Hauptschritte der Berechnung

5.1 Wärmebilanzgleichung

Die Wärmebilanz des menschlichen Körpers darf wie folgt dargestellt werden:

$$M - W = C_{\text{res}} + E_{\text{res}} + K + C + R + E + S \quad (1)$$

Diese Gleichung besagt, dass die innere Wärmeproduktion des Körpers, die dem Energieumsatz M abzüglich der wirksamen mechanischen Leistung W entspricht, durch den Wärmeaustausch im Atmungstrakt durch Konvektion C_{res} und Verdunstung E_{res} sowie durch den Wärmeaustausch über die Haut durch Wärmeleitung K , Konvektion C , R und Verdunstung E ausgeglichen wird.

Falls die Bilanz nicht ausgeglichen ist, wird Energie im Körper gespeichert S .

Die verschiedenen Komponenten der Gleichung (1) werden unter 5.1.1 bis 5.1.10 nacheinander im Hinblick auf die Grundlagen der Berechnung vorgestellt (die detaillierten Gleichungen sind in Anhang A angegeben).

5.1.1 Energieumsatz, M

Die Abschätzung oder Messung des Energieumsatzes wird in ISO 8996 beschrieben. Anhang C enthält Hinweise zur Bestimmung des Energieumsatzes.

5.1.2 Wirksame mechanische Leistung, W

In den meisten in industrieller Umgebung vorkommenden Situationen ist die effektive mechanische Leistung gering und kann vernachlässigt werden.

5.1.3 Konvektiver Wärmefluss bei der Atmung, C_{res}

Der konvektive Wärmefluss bei der Atmung darf prinzipiell durch folgende Gleichung angegeben werden:

$$C_{\text{res}} = 0,000\,02c_p \times V_{\text{ex}} \times \left(\frac{t_{\text{ex}} - t_{\text{a}}}{A_{\text{Du}}} \right) \quad (2)$$

5.1.4 Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung, E_{res}

Der Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung kann prinzipiell durch folgende Gleichung angegeben werden:

$$E_{res} = 0,000\,02\,c_e \times V_{ex} \times \left(\frac{W_{ex} - W_a}{A_{Du}} \right) \quad (3)$$

5.1.5 Konduktiver Wärmefluss, K

Ein konduktiver Wärmefluss tritt an Körperoberflächen auf, die in Kontakt mit festen Gegenständen stehen. Er ist in der Regel gering, wird nicht unmittelbar berücksichtigt und quantitativ den Wärmeverlusten durch Konvektion und Strahlung angeglichen, die auftreten würden, wenn diese Oberflächen nicht in Kontakt mit einem festen Gegenstand stehen würden.

ISO 13732-1 [6] behandelt spezifisch die Risiken von Schmerzen und Verbrennungen, die beim Kontakt von Körperteilen mit heißen Oberflächen auftreten.

5.1.6 Konvektiver Wärmefluss, C

Der konvektive Wärmefluss an der unbedeckten Haut darf durch folgende Gleichung angegeben werden:

$$C = h_{c,dyn} \times (t_{sk} - t_a) \quad (4)$$

Bei bedeckten Personen tritt der konvektive Wärmefluss an der Oberfläche der Kleidung auf und kann durch folgende Gleichung angegeben werden:

$$C = h_{c,dyn} \times f_{cl} \times (t_{cl} - t_a) \quad (5)$$

Anhang D liefert einige Hinweise zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften der Kleidung.

5.1.7 Strahlungswärmefluss, R

Der Strahlungswärmefluss darf durch folgende Gleichung angegeben werden:

$$R = h_r \times f_{cl} \times (t_{cl} - t_a) \quad (6)$$

Dabei sind durch den Strahlungswärmeübergangskoeffizienten h_r , die Merkmale der Kleidung (z. B. Emissionsgrad und das Vorhandensein von reflektierender Kleidung) und die wirksame Strahlungsfläche des Körpers bezogen auf die Haltung (z. B. stehende, sitzende, hockende Person) berücksichtigt.

5.1.8 Wärmefluss durch Verdunstung, E

Der maximale Wärmefluss durch Verdunstung E_{max} ist derjenige, der im theoretischen Fall einer vollständig benetzten Haut erzielt werden kann. Unter diesen Bedingungen gilt:

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - p_a}{R_{e,T,dyn}} \quad (7)$$

Dabei berücksichtigt der dynamische Gesamt-Verdunstungswiderstand der Kleidung $R_{e,T,dyn}$, die Bekleidungsmerkmale sowie die Bewegungen der Person und die Luftbewegungen.

Die tatsächliche Verdunstungsrate E ist abhängig vom Anteil w der schweißbenetzten Hautoberfläche und wird wie folgt angegeben:

$$E = w \times E_{\max} \quad (8)$$

5.1.9 Wärmespeicherung(srate) zur Erhöhung der Körperkerntemperatur in Verbindung mit dem Energieumsatz, dS_{eq}

Selbst in einer neutralen Umgebung strebt die Körperkerntemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz einem stabilen Wert $t_{\text{cr,eq}}$ entgegen.

Die Körperkerntemperatur erreicht diese Gleichgewichtstemperatur exponentiell mit der Zeit. Die mit diesem Anstieg vom Zeitpunkt t_{i-1} bis t_i verbundene Wärmespeicherung(srate) dS_{eq} trägt nicht zum Beginn der Schweißbildung bei und sollte daher anhand der Wärmebilanzgleichung ermittelt werden.

5.1.10 Wärmespeicherung, S

Die Wärmespeicherung des Körpers ergibt sich als algebraische Summe der zuvor definierten Wärmeflüsse.

5.2 Berechnung des erforderlichen Wärmeflusses durch Verdunstung, des erforderlichen Hautbenetzungsgrades und der erforderlichen Schweißrate

Unter Berücksichtigung der für den konduktiven Wärmefluss aufgestellten Hypothesen kann die allgemeine Wärmebilanzgleichung (1) wie folgt geschrieben werden:

$$E + S = M - W - C_{\text{res}} - E_{\text{res}} - C - R \quad (9)$$

Der erforderliche Wärmefluss durch Verdunstung E_{req} ist der Wärmefluss durch Verdunstung, der für die Aufrechterhaltung des thermischen Gleichgewichts des Körpers erforderlich und damit für die Wärmespeicherungsrate des Körpers gleich null ist. Dieser ist gegeben durch:

$$E_{\text{req}} = M - W - C_{\text{res}} - E_{\text{res}} - C - R - dS_{\text{eq}} \quad (10)$$

Der erforderliche Hautbenetzungsgrad w_{req} entspricht dem Verhältnis aus dem erforderlichen Wärmefluss durch Verdunstung und dem maximalen Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche:

Die Berechnung der erforderlichen Schweißrate erfolgt nachfolgend anhand des erforderlichen Wärmeflusses durch Verdunstung unter Berücksichtigung der Effektivität der Schweißverdunstung r_{req} :

$$w_{\text{req}} = \frac{E_{\text{req}}}{E_{\max}} \quad (11)$$

Die erforderliche Schweißrate ist dann gegeben als:

$$S_{\text{wreq}} = \frac{E_{\text{req}}}{r_{\text{req}}} \quad (12)$$

ANMERKUNG Die Schweißrate in $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ stellt die Wärmemenge dar, die bei der Schweißrate, angegeben in $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ abgegeben wird. $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ entspricht einer Schweißrate von $1,47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ oder $2,67 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ für eine „Normalperson“ ($1,8 \text{ m}^2$ Körperoberfläche).

6 Bewertung der erforderlichen Schweißrate

6.1 Grundlage des Bewertungsverfahrens

Die Bewertung der mit dem empfohlenen analytischen Verfahren errechneten Werte beruht auf zwei Belastungskriterien (siehe 6.1.1):

- dem maximalen Hautbenetzungsgrad $w_{\max}$; und
- der maximalen Schweißrate: $Sw_{\max}$,

und auf zwei Beanspruchungskriterien (siehe 6.1.2):

- der maximalen Körperkerntemperatur: $t_{\text{cr}, \max}$; und
- dem maximalen Wasserverlust: $D_{\max}$.

6.1.1 Belastungskriterien

Die erforderliche Schweißrate Sw_{req} kann nicht größer sein als die maximale Schweißrate $Sw_{\max}$, die von der Person erreicht werden kann. Der erforderliche Hautbenetzungsgrad w_{req} kann nicht größer sein als der maximale Hautbenetzungsgrad $w_{\max}$, der von der Person erreicht werden kann. Diese beiden Maximalwerte hängen vom Akklimatisierungszustand der Person ab.

6.1.2 Beanspruchungskriterien

Befindet sich die Wärmebilanz nicht im Gleichgewicht, so sollte der Anstieg der Körperkerntemperatur durch einen Maximalwert $t_{\text{cr}, \max}$ in der Weise begrenzt werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines pathologischen Effekts stark eingeschränkt ist. Schließlich sollte, wie immer auch die Wärmebilanz aussieht, der Wasserverlust auf einen Wert $D_{\max}$ beschränkt bleiben, der der Aufrechterhaltung des hydro-mineralischen Gleichgewichts im Körper entspricht.

6.1.3 Bezugsgrößen

Anhang B enthält Bezugsgrößen für die Belastungskriterien ($w_{\max}$ und $Sw_{\max}$) sowie für die Beanspruchungskriterien ($t_{\text{cr}, \max}$ und $D_{\max}$). Es sind jeweils Werte für akklimatisierte und nicht akklimatisierte Personen angegeben.

6.2 Analyse der Arbeitssituation

Der Wärmeaustausch wird zum Zeitpunkt t_i aus den Werten des Körperzustands errechnet, die zum Zeitpunkt t_{i-1} der vorherigen Messung vorherrschten, und zwar in Abhängigkeit der in dem Zeitabschnitt vorherrschenden klimatischen, metabolischen und bekleidungstechnischen Bedingungen.

Die Berechnungsschritte sind:

- der erforderliche Wärmefluss durch Verdunstung E_{req} , der erforderliche Hautbenetzungsgrad w_{req} und die erforderliche Schweißrate Sw_{req} werden zuerst berechnet;
- aus ihnen sind der vorhergesagte Wärmefluss durch Verdunstung E_p , der vorhergesagte Hautbenetzungsgrad w_p und die vorhergesagte Schweißrate Sw_p unter Berücksichtigung der Belastungskriterien ($E_{\max}$, $w_{\max}$ und $Sw_{\max}$) und der exponentiellen Reaktion des Schweißsystems zu berechnen;

- die Wärmespeicherungsrate wird aus der Differenz des erforderlichen und des vorhergesagten Wärmeflusses durch Verdunstung bestimmt;
- diese Speicherwärme trägt zur Erhöhung oder Verringerung der Haut- und Körpertemperatur bei;
- Körper- und Körperkerntemperatur werden bestimmt; und
- aus diesen Werten wird der Wärmeaustausch im folgenden Zeitabschnitt berechnet.

Die Entwicklung von Sw_p und t_{cr} wird auf diese Weise iterativ berechnet.

Auf dem derzeitigen Stand der Norm werden durch dieses Verfahren ausschließlich konstante Arbeitsbedingungen berücksichtigt.

6.3 Bestimmung der maximal zulässigen Expositionsdauer, D_{lim}

Die maximal zulässige Expositionsdauer D_{lim} ist erreicht, wenn entweder die Körperkerntemperatur oder der gesamte Wasserverlust die entsprechenden Maximalwerte erreicht.

In Arbeitssituationen, in denen entweder:

- der maximale Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche E_{max} negativ ist, was zur Kondensation von Wasserdampf an der Hautoberfläche führt; oder
- die geschätzte zulässige Expositionsdauer weniger als 30 min beträgt,

müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden und eine direkte und individuelle physiologische Beobachtung der Arbeiter ist insbesondere erforderlich. Die Bedingungen für die Durchführung dieser Beobachtung sowie die anzuwendenden Messverfahren sind in ISO 9886 beschrieben.

Anhang E enthält ein in Quick Basic geschriebenes Computerprogramm, das die Berechnung und Bewertung jeder beliebigen Bedingung ermöglicht, bei der Energieumsatz, die thermischen Eigenschaften der Kleidung und die klimatischen Parameter bekannt sind.

Anhang F enthält einige Daten (eingegebene Daten und Ergebnisse), die zur Validierung jedes Computerprogramms, das auf der Grundlage des in Anhang A dargestellten Modells entwickelt wurde, anzuwenden sind.

Anhang A (normativ)

Erforderliche Daten für die Berechnung der Wärmebilanz

A.1 Gültigkeitsbereich

Die Zahlenwerte und die Gleichungen, die in diesem Anhang angegeben sind, entsprechen dem derzeitigen Stand des Wissens. Einige werden bei neueren Erkenntnissen zu verändern sein.

Die in diesem Anhang beschriebenen Algorithmen wurden mit Hilfe einer Datenbank validiert, die 747 Laborversuche und 366 Feldversuche von acht europäischen Forschungseinrichtungen enthält. Tabelle A.1 gibt die Bereiche der Bedingungen an, für die das Modell der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (PHS) als validiert betrachtet werden kann. Liegen ein oder mehrere Parameter außerhalb dieses Bereichs, sollten das vorliegende Modell mit Bedacht angewendet und die zu untersuchenden Personen genau beobachtet werden.

Tabelle A.1 — Bereiche, für die das PHS-Modell gilt

Parameter	Einheiten	Mindestwert	Höchstwert
t_a	°C	15	50
p_a	kPa	0	4,5
$t_r - t_a$	°C	0	60
v_a	ms ⁻¹	0	3
M	W·m ⁻²	56	250
$I_{cl,st}$	clo (Wärmeisolierung durch die Kleidung)	0,1	1,0

Der während dieser Validierungsstudie verwendete Zeitabschnitt war gleich 1 min.

A.2 Bestimmung des konvektiven Wärmeflusses bei der Atmung, C_{res}

Der konvektive Wärmefluss bei der Atmung lässt sich durch folgende empirische Gleichung abschätzen:

$$C_{res} = 0,001\,52\,M(28,56 - 0,885\,t_a + 0,641\,p_a) \quad (A.1)$$

A.3 Bestimmung des Wärmeflusses durch Verdunstung bei der Atmung, E_{res}

Der Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung lässt sich durch folgende empirische Gleichung abschätzen:

$$E_{res} = 0,001\,27\,M(59,34 + 0,53\,t_a - 11,63\,p_a) \quad (A.2)$$

A.4 Bestimmung der mittleren Hauttemperatur im stabilen Zustand

Unter den klimatischen Bedingungen, für die diese Internationale Norm gilt, kann die mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand in Abhängigkeit von Parametern der Arbeitssituation mit Hilfe der folgenden empirischen Gleichungen abgeschätzt werden.

- Für unbedeckte Personen ($I_{cl,st} \leq 0,2$):

$$t_{sk,eq,nu} = 7,19 + 0,064 t_a + 0,061 t_r - 0,348 v_a + 0,198 p_a + 0,616 t_{re} \quad (A.3)$$

- Für bedeckte Personen ($I_{cl,st} \geq 0,6$):

$$t_{sk,eq,cl} = 12,17 + 0,02 t_a + 0,04 t_r - 0,253 v_a + 0,194 p_a + 0,005 35 M + 0,513 t_{re} \quad (A.4)$$

Bei Werten für $I_{cl,st}$ zwischen 0,2 und 0,6 wird die mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand mit Hilfe der folgenden Gleichung zwischen diesen beiden Werten extrapoliert:

$$t_{sk,eq} = t_{sk,eq,nu} + 2,5 \times (t_{sk,eq,cl} - t_{sk,eq,nu}) \times (I_{cl,st} - 0,2) \quad (A.5)$$

A.5 Bestimmung des Istwertes der Hauttemperatur

Die Hauttemperatur $t_{sk,i}$ zum Zeitpunkt t_i kann abgeschätzt werden anhand:

- der Hauttemperatur $t_{sk,i-1}$ zum Zeitpunkt t_{i-1} eine Minute früher; und
- der Hauttemperatur im stabilen Zustand $t_{sk,eq}$, die mit Hilfe von Gleichung (A.5) aus den Bedingungen vorhergesagt wurde, die während der letzten Minute herrschten.

Beträgt die Zeitkonstante für das Ansprechverhalten der Hauttemperatur 3 min, wird folgende Gleichung verwendet:

$$t_{sk,i} = k_{tsk} \times t_{sk,i-1} + (1 - k_{tsk}) \times t_{sk,eq} \quad (A.6)$$

$$\text{Dabei ist } k_{tsk} = \exp(-1/3) \quad (A.7)$$

A.6 Bestimmung der Wärmespeicherung des Körpers in Verbindung mit dem Energieumsatz, dS_{eq}

In einer neutralen Umgebung erhöht sich bei körperlicher Betätigung mit der Zeit die Körperkern-temperatur, und zwar in Abhängigkeit vom Energieumsatz in Bezug auf das maximale Sauerstoff-aufnahmevermögen der jeweiligen Person.

Für eine Durchschnittsperson kann angenommen werden, dass sich diese Gleichgewichts-Körperkern-temperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz nach folgender Gleichung erhöht:

$$t_{cr,eq} = 0,003 6 \cdot (M - 55) + 36,8 \quad (A.8)$$

Die Körperkerntemperatur erreicht diese Gleichgewichts-Körperkerntemperatur nach einem System erster Ordnung mit einer Zeitkonstanten von 10 min:

$$t_{cr,eq,i} = k_{tcr} \times t_{cr,eq,i-1} + (1 - k_{tcr}) \times t_{cr,eq} \quad (A.9)$$

Dabei ist

$$k_{tcr} = \exp(-1/10) \quad (A.10)$$

Die Wärmespeicherung(srate), die mit diesem Anstieg verbunden ist, beträgt:

$$dS_{eq} = c_{p,b} \times W_b / (A_{Du} \times 60) \times (t_{cr,eq,i} - t_{cr,eq,i-1}) \times (1 - \alpha_{i-1}) \quad (A.11)$$

A.7 Bestimmung der statischen Isolationseigenschaften der Kleidung

Bei einer unbedeckten Person kann bei statischen Bedingungen ohne Luftbewegung oder Bewegungen der Person selbst der fühlbare Wärmeaustausch ($C + R$) wie folgt abgeschätzt werden:

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_a}{I_{tot,st}} \quad (A.12)$$

Bei einer bedeckten Person kann der Gesamtwert der statischen Bekleidungsisolation $I_{tot,st}$ wie folgt abgeschätzt werden:

$$I_{tot,st} = I_{cl,st} + \frac{I_{a,st}}{f_{cl}} \quad (A.13)$$

wobei

- $I_{a,st}$, mit $0,111 \text{ m}^2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ angenommen werden kann;
- der Bekleidungsflächenfaktor f_{cl} gegeben ist als:

$$f_{cl} = 1 + 1,97 \cdot I_{cl,st} \quad (A.14)$$

A.8 Bestimmung der dynamischen Isolationseigenschaften der Kleidung

Durch die Tätigkeit und die Belüftung ändern sich die Isolationseigenschaften der Kleidung und der umgebenden Luftschicht. Da sowohl Wind als auch Bewegung die Wärmedämmung verringern, muss diese korrigiert werden. Der Korrekturwert $C_{orr,tot}$ kann wie folgt abgeschätzt werden:

- Für eine unbedeckte Person ($I_{cl,st} = 0$):

$$C_{orr,tot,st} = C_{orr,la,st} = e^{[(0,047v_{ar}-0,472)v_{ar}+(0,117V_w-0,342)V_w]} \quad (A.15)$$

- Für eine bedeckte Person ($I_{cl,st} > 0,6 \text{ clo}$):

$$C_{orr,tot,st} = C_{orr,cl,st} = e^{[0,043+(0,066v_{ar}-0,398)v_{ar}+(0,094V_w-0,378)V_w]} \quad (A.16)$$

Dabei ist die relative Luftgeschwindigkeit v_{ar} begrenzt auf 3 m s^{-1} und die Schrittgeschwindigkeit v_w ist begrenzt auf $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

Falls die Schrittgeschwindigkeit unbestimmt ist oder sich die Person nicht fortbewegt, kann der Wert für v_w berechnet werden als:

$$v_w = 0,005 \, 2v(M - 58) \text{ mit } v_w \leq 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{A.17})$$

Dabei wird M in W m^{-2} ausgedrückt.

Bei Werten für I_{cl} zwischen 0 und 0,6 clo wird der Korrekturwert mit Hilfe der folgenden Gleichung durch Interpolation zwischen diesen beiden Werten ermittelt:

$$C_{orr,Itot,st} = [(0,6 - I_{cl,st}) \times C_{orr,Ia,st} + I_{cl,st} \times C_{orr,Icl,st}] / 0,6 \quad (\text{A.18})$$

In jedem Fall ist der Korrekturwert auf 1 begrenzt.

Schließlich ergibt sich:

$$I_{a,dyn} = C_{orr,Ia,st} \times I_{a,st} \quad (\text{A.19})$$

$$I_{T,dyn} = C_{orr,Itot,st} \times I_{T,st} \quad (\text{A.20})$$

$$I_{cl,dyn} = I_{T,dyn} - \frac{I_{a,dyn}}{f_{cl}} \quad (\text{A.21})$$

A.9 Bestimmung des Wärmeaustausches durch Konvektion und Strahlung

Der Austausch von trockener Wärme kann mit Hilfe der folgenden Gleichungen abgeschätzt werden:

$$C + R = f_{cl} \times [h_{c,dyn} \times (t_{cl} - t_a) + h_r \times (t_{cl} - t_r)] \quad (\text{A.22})$$

die den Wärmeaustausch zwischen der Kleidung und der Umgebung beschreibt, und

$$C + R = \left(\frac{t_{sk} - t_{cl}}{I_{cl,dyn}} \right) \quad (\text{A.23})$$

die den Wärmeaustausch zwischen der Haut und der Kleidungsoberfläche beschreibt.

Der Koeffizient für den dynamischen konvektiven Wärmeübergang $h_{c,dyn}$ kann abgeschätzt werden als höchster Wert von:

$$2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} \quad (\text{A.24})$$

$$3,5 + 5,2 v_{ar} \quad (\text{A.25})$$

$$8,7 v_{ar}^{0,6} \quad (\text{A.26})$$

Der Wärmeaustauschkoeffizient durch Strahlung, h_r , kann anhand folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$h_r = \varepsilon \times \sigma \times \frac{A_r}{A_{Du}} \times \frac{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4}{t_{cl} - t_r} \quad (\text{A.27})$$

Dabei ist

σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, die gleich $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ist; und

ε der Emissionsgrad der Haut, der gleich 0,97 ist.