

DIN EN ISO 7933



ICS 13.180

Entwurf

Einsprüche bis 2021-12-29
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 7933:2004-12;
Ersatz für
E DIN EN ISO 7933:2018-05

**Ergonomie der thermischen Umgebung –
Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch
Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung
(ISO/DIS 7933.2:2021);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 7933:2021**

Ergonomics of the thermal environment –
Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted
heat strain (ISO/DIS 7933.2:2021);
German and English version prEN ISO 7933:2021

Ergonomie des ambiances thermiques –
Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de
l'astreinte thermique prévisible (ISO/DIS 7933.2:2021);
Version allemande et anglaise prEN ISO 7933:2021

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-10-29 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 oder Am DIN-Platz, 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 74 Seiten

DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 7933:2021) 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 beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten 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 8996
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 8996, *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 —

<i>Titel de:</i>	Ergonomie der thermischen Umgebung — Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (ISO/DIS 7933.2:2021)
<i>Titel en:</i>	Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain (ISO/DIS 7933.2:2021)
<i>Titel fr:</i>	Ergonomie des ambiances thermiques — Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible (ISO/DIS 7933.2:2021)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Symbole	7
5 Kurzbeschreibung des Modells der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (PHS-Modell)	10
6 Hauptschritte der Berechnung	11
6.1 Wärmebilanzgleichung	11
6.1.1 Energieumsatz, M	11
6.1.2 Wirksame mechanische Leistung, W	11
6.1.3 Konvektiver Wärmefluss bei der Atmung, C_{res}	11
6.1.4 Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung, E_{res}	12
6.1.5 Konduktiver Wärmefluss, K	12
6.1.6 Konvektiver Wärmefluss, C	12
6.1.7 Strahlungswärmefluss, R	12
6.1.8 Wärmefluss durch Verdunstung, E	12
6.1.9 Wärmespeicherung zur Erhöhung der Körperkerntemperatur in Verbindung mit dem Energieumsatz, dS_{eq}	13
6.1.10 Wärmespeicherung, S	13
6.2 Berechnung des erforderlichen Wärmeflusses durch Verdunstung, des erforderlichen Hautbenetzungsgrades und der erforderlichen Schweißrate	13
7 Bewertung der erforderlichen Schweißrate	14
7.1 Grundlage des Bewertungsverfahrens	14
7.1.1 Belastungskriterien	14
7.1.2 Beanspruchungskriterien	14
7.1.3 Bezugsgrößen	14
7.2 Analyse der Arbeitssituation	14
7.3 Bestimmung der maximal zulässigen Expositionsdauer, D_{lim}	15
Anhang A (normativ) Erforderliche Daten für die Berechnung der Wärmebilanz	16
Anhang B (informativ) Kriterien für die Abschätzung der zulässigen Expositionsdauer in einem heißem Arbeitsklima	24
Anhang C (informativ) Energieumsatz	26
Anhang D (informativ) Thermische Bekleidungseigenschaften	27
Anhang E (informativ) Computerprogramm zur Berechnung des Modells der vorhergesagten Wärmebeanspruchung	29
Anhang F (normativ) Beispiele für die Berechnung des vorhergesagten Wärmebeanspruchungsmodells	36
Literaturhinweise	37

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 7933:2021) 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 zweiten parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 7933:2004 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 7933.2:2021 wurde von CEN als prEN ISO 7933:2021 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (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 Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

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. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

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. Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur Vorgängerausgabe sind folgende:

- Die in Abschnitt B.4 in Anhang B beschriebene maximale Schweißrate $SW_{\max}$ wird als Festwert festgelegt, das heißt sie wird nicht mehr um den Energieumsatz berichtigt.
- Da das Modell nicht umfassend für Bedingungen mit unbeständigen Umweltparametern, den Energieumsatz und/oder Kleidung validiert wurde, wurde ein Warnhinweis für Fälle hinzugefügt, in denen diese Parameter im Zeitverlauf erheblich schwanken.

Einleitung

In ISO 15265 [1] wird die Bewertungsstrategie zur Vorbeugung von Unbehagen und Gesundheitsfolgen unter jeglichen thermischen Arbeitsbedingungen beschrieben, während in ISO 16595/WP [2] spezifische Verfahren für warme Arbeitsumgebungen empfohlen werden. In diesen Normen für heiße Umgebungen wird vorgeschlagen, ein Screening-Verfahren auf der Grundlage des in ISO 7243 [3] beschriebenen WBGT-Index (en: wet bulb globe temperature) zur Feststellung des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins von Wärmebelastung zu verwenden sowie ein ausführlicheres Verfahren, das in diesem vorliegenden Dokument präsentiert wird, um die Belastung genauer abzuschätzen, 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 direkte Verwendung, wenn eine detaillierte Analyse von Arbeitsbedingungen in warmen Umgebungen gewünscht wird.

Dieses Dokument ermöglicht es, die Entwicklung einiger physiologischer Parameter (Hauttemperatur und rektale Temperatur sowie Schweißrate) im Zeitverlauf für eine Person vorherzusagen, die in einer heißen Arbeitsumgebung arbeitet. Diese Vorhersage wird in Abhängigkeit von den klimatischen Parametern, dem Energieverbrauch der Person und ihrer Kleidung getroffen. Diese Vorhersage bezieht sich auf eine durchschnittliche Person und sollte zur Bewertung des Risikos von Wärmebelastung für eine Gruppe von Personen verwendet werden; sie kann die Reaktionen einer bestimmten Person nicht vorhersagen.

Dieses Dokument basiert auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Zukünftige Verbesserungen im Hinblick auf die Berechnung der einzelnen Komponenten der Wärmebilanzgleichung oder deren Bewertung werden in Zukunft berücksichtigt, sobald diese verfügbar sind.

Fachleute auf dem Gebiet der Berufsgesundheit sind 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, um das physiologische Verhalten einer bestimmten Person zu beobachten; in ISO 12894 [5] wird beschrieben, wie eine medizinische Überwachung organisiert wird.

1 Anwendungsbereich

In diesem Dokument wird ein Modell (Modell der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (en: predicted heat strain (PHS) model)) beschrieben, das der analytischen Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung (im Hinblick auf Wasserverlust und rektale Temperatur) einer durchschnittlichen Person in einer heißen Umgebung dient sowie der Bestimmung der „maximal zulässigen Expositionsdauer“, bei der die physiologische Beanspruchung für 95 % der ihr ausgesetzten Bevölkerung annehmbar ist (die maximal ertragbare rektale Temperatur 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 durchschnittlichen Person. Auf diese Weise ermöglicht es dieses Dokument 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.

In der gegenwärtigen Form lässt sich dieses Bewertungsverfahren nicht auf Fälle anwenden, bei denen besondere Schutzkleidung getragen wird (z. B. voll reflektierende Kleidung, Kleidung mit Aktivkühlung und Belüftung, undurchlässige Overalls usw.).

Da das Modell nicht umfassend für Bedingungen mit unbeständigen Umweltparametern, den Energieumsatz und/oder Kleidung validiert wurde, muss es in Fällen, in denen diese Parameter im der Zeitverlauf erheblich schwanken, mit Vorsicht eingesetzt werden. Mit dem Modell ist es nicht möglich, zuverlässig die Zeitspanne zu bestimmen, die bei einer durchschnittlichen Person, deren rektale Temperatur auf 38 °C oder mehr angestiegen ist, erforderlich ist, bis die rektale Temperatur wieder auf 36,8 °C abgesunken ist.

Dieses Dokument sagt nicht die physiologische Reaktion einzelner Personen vorher, sondern berücksichtigt nur durchschnittliche Personen, 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, da die Ergebnisse möglicherweise der Auslegung durch Fachleute bedürfen. Empfehlungen dazu, wie und wann dieses Modell anzuwenden ist, finden sich in ISO 16595/WP.

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 datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. 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*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 13731.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

4 Symbole

Die Symbole und Abkürzungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

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_{cl}	Emissionskoeffizient von äußerer Kleidungsoberfläche in der Annahme, dass diese nicht reflektierend ist	—
$\varepsilon_{cl,r}$	Emissionskoeffizient von äußerer Kleidungsoberfläche	—
θ	Winkel zwischen Lauf- und Windrichtung	—
A	Alter	Jahre
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
$Corr, i_m$	Korrekturwert für den statischen Feuchtigkeitspermeabilitätsindex	—
$Corr, I_a$	Korrekturwert für die thermische Isolation der statischen Grenzschicht	—
$Corr, I_{cl}$	Korrekturwert für die thermische Isolation der statischen Kleidung	—
$Corr, I_T$	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

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$D_{\text{lim,loss}}$	zulässige Expositionsdauer für den Wasserverlust, 95 % der arbeitenden Bevölkerung	min
D_{max}	maximaler Wasserverlust	g
$D_{\text{max,95}}$	maximaler Wasserverlust zum Schutz von 95 % der arbeitenden Bevölkerung	g
dS_i	Wärmespeicherungsrate des Körpers zum Zeitpunkt i	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
dS_{eq}	Wärmespeicherungsrate aufgrund von Erhöhung der Körperkerntemperatur in Verbindung mit dem Energieumsatz	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
E	Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
E_{max}	maximaler Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
E_p	vorhergesagter Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
E_{req}	erforderlicher Wärmefluss durch Verdunstung an der Hautoberfläche	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
E_{res}	Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
f_{cl}	Bekleidungsflächenfaktor	—
F_r	Reflexionskoeffizienten für verschiedene Spezialmaterialien	—
H_b	Körpergröße	m
$h_{\text{c,dyn}}$	Koeffizient für den dynamischen konvektiven Wärmeübergang	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
h_r	Wärmeaustauschkoeffizient durch Strahlung (Strahlungswärmeübergangskoeffizient)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
$I_{\text{a,r}}$	resultierende thermische Isolation der Grenzschrift	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
I_a	thermische Isolation der statischen (oder grundlegenden) Grenzschrift	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
$I_{\text{cl,r}}$	resultierende thermische Bekleidungsisolation	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
I_{cl}	statische (oder grundlegende) thermische Bekleidungsisolation	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
$i_{\text{m,r}}$	Permeabilitätsindex der resultierenden Feuchtigkeit	—
i_m	Permeabilitätsindex der statischen (oder grundlegenden) Feuchtigkeit	—
incr	Zeitspanne vom Zeitpunkt t_{i-1} bis t_i	min
$I_{\text{T,r}}$	gesamte resultierende thermische Bekleidungsisolation	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
I_T	gesamte statische (oder grundlegende) thermische Bekleidungsisolation	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
K	konduktiver Wärmefluss (Wärmeübertragung durch Wärmeleitung)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
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)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

Symbol	Bezeichnung	Einheit
p_a	Wasserdampfpartialdruck bei Lufttemperatur	kPa
$p_{sk,s}$	Wasserdampfsättigungsdruck bei Hauttemperatur	kPa
R	Strahlungswärmefluss (Wärmeübertragung durch Strahlung)	$W \cdot m^{-2}$
$R_{e,T,r}$	resultierender 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	°C
t_{cl}	Oberflächentemperatur der Bekleidung	°C
t_{cr}	Körperkerntemperatur	°C
$t_{cr,eq}$	Körperkerntemperatur im stabilen Zustand in Abhängigkeit vom Energieumsatz	°C
$t_{cr,eq i}$	Körperkerntemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz zum Zeitpunkt t_i	°C
$t_{cr,eq i-1}$	Körperkerntemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz zum Zeitpunkt t_{i-1}	°C
$t_{cr,eq,m}$	Wert der Körperkerntemperatur im stabilen Zustand in Abhängigkeit vom Energieumsatz	°C
$t_{cr,i}$	Körperkerntemperatur zum Zeitpunkt t_i	°C
$t_{cr,i-1}$	Körperkerntemperatur zum Zeitpunkt t_{i-1}	°C
t_{ex}	Temperatur der ausgeatmeten Luft	°C
t_r	mittlere Strahlungstemperatur	°C
t_{re}	rektale Temperatur	°C
$t_{re,max}$	maximale rektale Temperatur	°C
$t_{re,i}$	rektale Temperatur zum Zeitpunkt t_i	°C
$t_{re,i-1}$	rektale Temperatur zum Zeitpunkt t_{i-1}	°C
t_{sk}	Hauttemperatur	°C

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$t_{sk,eq}$	mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand	°C
$t_{sk,eq,cl}$	mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand bei bekleideter Person	°C
$t_{sk,eq,nu}$	mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand bei unbekleideter Person	°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 _{water} /kg _{air}
W_b	Körpermasse	kg
W_{ex}	Feuchtegehalt der ausgeatmeten Luft	kg _{water} /kg _{air}
w_{max}	maximaler Hautbenetzungsgrad	—
w_p	vorhergesagter Hautbenetzungsgrad	—
w_{req}	erforderlicher Hautbenetzungsgrad	—

5 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 Parameter der thermischen Umgebung, die nach ISO 7726 abgeschätzt oder gemessen werden:
 - Lufttemperatur t_a ;
 - mittlere Strahlungstemperatur t_r ;
 - Wasserdampfpartialdruck p_a ; und
 - Luftgeschwindigkeit v_a .
- der Energieumsatz M , gemessen oder abgeschätzt nach ISO 8996 oder anderen Verfahren gleicher oder höherer Genauigkeit;
- die statischen Bekleidungsmerkmale in Bezug auf Wärme, gemessen oder abgeschätzt nach ISO 9920 oder anderen Verfahren gleicher oder höherer Genauigkeit.

Abschnitt 6 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 in Anhang A angegebenen mathematischen Ausdrücke müssen für diese Berechnungen verwendet werden.

Abschnitt 7 beschreibt das Verfahren zur Bewertung der Ergebnisse aus Abschnitt 6, das zur Bestimmung der vorhergesagten Schweißrate, der vorhergesagten rektalen Temperatur und der zulässigen Expositionsdauer führt. Die Bestimmung der zulässigen Expositionsdauer beruht auf zwei Beanspruchungskriterien: der maximal zulässigen rektalen Temperatur und dem maximal zulässigen 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 mathematischen Ausdrücken in Anhang A) und den eingesetzten Maximalwerten ab. Ferner ist diese abhängig von der Genauigkeit, mit der die physikalischen Parameter, der Energieumsatz und die Wärmeisolation der Kleidung abgeschätzt und gemessen werden.

6 Hauptschritte der Berechnung

6.1 Wärmebilanzgleichung

Die Wärmebilanz des menschlichen Körpers kann als Gleichung (1) dargestellt werden:

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

Diese Gleichung drückt aus, dass die innere Wärmeproduktion des Körpers, die dem Energieumsatz M abzüglich der wirksamen mechanischen Leistung W entspricht, durch den Wärmeaustausch im Atmungsstrakt durch Konvektion C_{res} und Verdunstung E_{res} sowie durch den Wärmeaustausch über die Haut durch Wärmeleitung K Konvektion C Strahlung 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 6.1.1 bis 6.1.10 nacheinander im Hinblick auf die Grundlagen der Berechnung vorgestellt (die normativen Ausdrücke für die Berechnungen sind in Anhang A angegeben).

6.1.1 Energieumsatz, M

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

6.1.2 Wirksame mechanische Leistung, W

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

6.1.3 Konvektiver Wärmefluss bei der Atmung, C_{res}

Der konvektive Wärmefluss bei der Atmung darf prinzipiell durch Gleichung (2) ausgedrückt werden:

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

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

Der Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung kann prinzipiell durch Gleichung (3) ausgedrückt werden:

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

6.1.5 Konduktiver Wärmefluss, K

Ein konduktiver Wärmefluss tritt an Körperoberflächen auf, die in Kontakt mit festen Gegenständen stehen. Er ist in der Regel gering und wird nicht berücksichtigt.

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

6.1.6 Konvektiver Wärmefluss, C

Der konvektive Wärmefluss an der unbedeckten Haut darf durch Gleichung (4) ausgedrückt werden:

$$C = h_c \times (t_{\text{sk}} - t_{\text{a}}) \quad (4)$$

Bei bedeckten Personen tritt der konvektive Wärmefluss an der Oberfläche der Kleidung auf und wird durch Gleichung (5) ausgedrückt:

$$C = h_c \times f_{\text{cl}} \times (t_{\text{cl}} - t_{\text{a}}) \quad (5)$$

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

6.1.7 Strahlungswärmefluss, R

Der Strahlungswärmefluss darf durch Gleichung (6) ausgedrückt werden:

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

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

6.1.8 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 Gleichung (7):

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

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

Die tatsächliche Verdunstungsrate E ist abhängig vom Anteil w der schweißbenetzten Hautoberfläche und wird durch Gleichung (8) angegeben:

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

6.1.9 Wärmespeicherung 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 $t_{cr,eq}$ 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 Gleichung (1) ermittelt werden.

6.1.10 Wärmespeicherung, S

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

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

Da die Wärmeleitung (K) als wichtiger Weg des Wärmeaustauschs vernachlässigt wird, kann die allgemeine Gleichung (1) wie Gleichung (9) ausgedrückt werden:

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

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 wird durch Gleichung (10) gegeben:

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

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

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

Die Berechnung der erforderlichen Schweißrate SW_{req} erfolgt anhand des erforderlichen Wärmeflusses durch Verdunstung unter Berücksichtigung der Effektivität der Schweißverdunstung r_{req} wie folgt nach Gleichung (12):

$$SW_{req} = \frac{E_{req}}{r_{req}} \quad (12)$$

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

7 Bewertung der erforderlichen Schweißrate

7.1 Grundlage des Bewertungsverfahrens

Die Bewertung der mit dem empfohlenen analytischen Verfahren errechneten Werte beruht auf:

- zwei Belastungskriterien (siehe 7.1.1):
- dem maximalen Hautbenetzungsgrad $w_{\max}$;
- der maximalen Schweißrate $SW_{\max}$;
- zwei Beanspruchungskriterien (siehe 7.1.2):
- der maximalen rektalen Temperatur $t_{\text{re, max}}$;
- dem maximalen Wasserverlust $D_{\max}$.

7.1.1 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.

7.1.2 Beanspruchungskriterien

Befindet sich die Wärmebilanz nicht im Gleichgewicht, so sollte der Anstieg der rektalen Temperatur durch einen Maximalwert $t_{\text{re, max}}$ in der Weise begrenzt werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines akuten pathologischen Effekts aufgrund von Wärmebelastung stark eingeschränkt ist. Schließlich sollte, wie immer auch die Wärmebilanz aussieht, der Wasserverlust auf einen Wert $D_{\max}$ beschränkt bleiben, bei dem der Flüssigkeits- und Elektrolythaushalt des Körpers aufrechterhalten bleibt.

7.1.3 Bezugsgrößen

Anhang B enthält Bezugsgrößen für die Belastungskriterien ($w_{\max}$ und $SW_{\max}$) sowie für die Beanspruchungskriterien ($t_{\text{re, max}}$ und $D_{\max}$). Die Werte von $w_{\max}$, $SW_{\max}$ und $D_{\max}$ hängen vom Akklimatisierungszustand der Person ab.

7.2 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, den Energieumsatz betreffenden 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 die vorhergesagte Schweißrate SW_p , der vorhergesagte Hautbenetzungsgrad w_p und der vorhergesagte Wärmefluss durch Verdunstung E_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 abgeschätzt;
- diese Speicherwärme trägt zur Erhöhung oder Verringerung der Haut- und Körperkerntemperatur bei und diese werden geschätzt; und
- aus diesen Werten wird der Wärmeaustausch in dem Zeitabschnitt berechnet.

Die Entwicklung von W_p , t_{cr} und t_{re} wird auf diese Weise iterativ berechnet.

7.3 Bestimmung der maximal zulässigen Expositionsdauer, D_{lim}

Die maximal zulässige Expositionsdauer D_{lim} ist erreicht, wenn entweder die vorhergesagte rektale Temperatur (t_{re}) oder der gesamte vorhergesagte 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 wird eine individuelle physiologische Beobachtung der Personen empfohlen. Die Bedingungen für die Durchführung dieser Beobachtung sowie die anzuwendenden Messverfahren sind in ISO 9886 beschrieben.

Anhang E enthält ein in 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 Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Veröffentlichung. Einige werden bei neueren Erkenntnissen mit großer Wahrscheinlichkeit angepasst werden.

Die in diesem Anhang beschriebenen Algorithmen wurden mit Hilfe einer Datenbank validiert, die 747 Laborversuche und 366 Feldversuche von acht europäischen Forschungseinrichtungen enthält [12]. 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, sollte dieses 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	0,5	4,5
$t_r - t_a$	°C	0	60
v_a	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0	3
M	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	56	250
$I_{cl,st}$	clo	0,1	1,0

Der während dieser Validierungsstudie verwendete Zeitabschnitt war 1 min. Das Modell wurde nicht für Zeitabschnitte von mehr als 480 min validiert.

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

Der konvektive Wärmefluss bei der Atmung kann durch Gleichung (A.1) abgeschätzt werden:

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

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

Der Wärmefluss durch Verdunstung bei der Atmung kann durch Gleichung (A.2) abgeschätzt werden:

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

A.4 Bestimmung der mittleren Hauttemperatur im stabilen Zustand

Unter den klimatischen Bedingungen, für die dieses Dokument gilt, kann die mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand in Abhängigkeit von Parametern der Arbeitssituation mit Hilfe der Gleichung (A.3) und Gleichung (A.4) abgeschätzt werden.

— Bei $I_{cl} \leq 0,2$ clo:

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

— Bei $I_{cl} \geq 0,6$ clo:

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

Bei Werten für I_{cl} zwischen 0,2 und 0,6 wird die mittlere Hauttemperatur im stabilen Zustand mit Hilfe der Gleichung (A.5) zwischen diesen beiden Werten interpoliert:

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

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, werden Gleichung (A.6) und Gleichung (A.7) verwendet:

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

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 die Körperkerntemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz. Für eine Durchschnittsperson wird die Gleichgewichts-Körperkerntemperatur zum Energieumsatz nach Gleichung (A.8) in Relation gesetzt:

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

Die Körperkerntemperatur erreicht diese Gleichgewichts-Körperkerntemperatur nach einem System erster Ordnung mit einer Zeitkonstanten von 10 min. Zum Zeitpunkt i wird sie mit Hilfe der Gleichung (A.9) und Gleichung (A.10) abgeschätzt:

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

Dabei ist:

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

Die Wärmespeicherung, die mit diesem Anstieg verbunden ist, wird durch Gleichung (A.11) dargestellt:

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

A.7 Bestimmung der statischen Isolationseigenschaften der Kleidung

Bei einer unbedeckten Person kann bei statischen Bedingungen ohne Luftbewegung ($<0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) oder Bewegungen der Person selbst der fühlbare Wärmeaustausch ($C + R$) nach Gleichung (A.12) abgeschätzt werden:

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_a}{I_T} \quad (A.12)$$

Bei einer bedeckten Person kann der Gesamtwert der statischen Bekleidungsisolation $I_{tot,st}$ nach Gleichung (A.13) abgeschätzt werden:

$$I_T = I_{cl} + \frac{I_a}{f_{cl}} \quad (A.13)$$

wobei

- I_a mit $0,111 \text{ m}^2 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ angenommen werden kann;
- der Bekleidungsflächenfaktor f_{cl} gegeben ist durch Gleichung (A.14):

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

A.8 Bestimmung der resultierenden (oder 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 Korrekturfaktor $Corr, I_T$ kann mit Gleichung (A.15) und Gleichung (A.16) abgeschätzt werden:

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

$$Corr, I_T = Corr, I_a = e^{[(0,047v_{ar}-0,472)v_{ar}+(0,117V_w-0,342)V_w]} \quad (A.15)$$

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

$$\text{Corr}, I_T = \text{Corr}, I_{cl} = e^{[0,043 + (0,066V_{ar} - 0,398)V_{ar} + (0,094V_w - 0,378)V_w]} \quad (\text{A.16})$$

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 mit Gleichung (A.17) berechnet werden:

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

Bei Werten für I_{cl} zwischen 0 und 0,6 clo wird der Korrekturwert mit Hilfe der Gleichung (A.18) bis Gleichung (A.21) durch Interpolation zwischen diesen beiden Werten abgeschätzt:

$$\text{Corr}, I_T = [(0,6 - I_{cl}) \times \text{Corr}, I_a + I_{cl} \times \text{Corr}, I_{cl}] / 0,6 \quad (\text{A.18})$$

In jedem Fall ist der Korrekturwert auf 1 begrenzt.

Schließlich werden die resultierenden (oder dynamischen) Werte der thermischen Isolation berechnet als:

$$I_{a,r} = \text{Corr}, I_a \times I_a \quad (\text{A.19})$$

$$I_{T,r} = \text{Corr}, I_T \times I_T \quad (\text{A.20})$$

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

A.9 Abschätzung des Wärmeaustausches durch Konvektion und Strahlung

Der Austausch von trockener Wärme kann mit Hilfe der Gleichung (A.22) bis Gleichung (A.26) abgeschätzt werden:

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

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

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

die den Wärmeaustausch zwischen der Haut und der Kleidungsoberfläche beschreibt.

Der Koeffizient für den konvektiven Wärmeübergang h_c kann abgeschätzt werden als höchster Wert von:

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

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

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