

|                      |   |  |
|----------------------|---|--|
|                      | <p style="text-align: center;"><b>Umgebungsklima</b><br/>Instrumente zur Messung physikalischer Größen<br/>(ISO 7726:1998) Deutsche Fassung EN ISO 7726:2001</p>  | <p style="text-align: center;"><b>DIN</b><br/><b>EN ISO 7726</b></p> |
| <p>ICS 13.040.20</p> | <p style="text-align: right;">Ersatz für<br/>DIN EN 27726:1993-12</p> <p>Ergonomics of the thermal environment –<br/>Instruments for measuring physical quantities (ISO 7726:1998);<br/>German version EN ISO 7726:2001</p> <p>Ergonomie des ambiances thermiques –<br/>Appareils de mesure des grandeurs physiques (ISO 7726:1998);<br/>Version allemande EN ISO 7726:2001</p> <p style="text-align: center;"><b>Die Europäische Norm EN ISO 7726:2001 hat den Status einer Deutschen Norm.</b></p> <p style="text-align: right;">Fortsetzung 60 Seiten EN</p> <p style="text-align: center;">Normenausschuss Ergonomie (FNErg) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.</p> |  |

– Leerseite –

Deutsche Fassung

Umgebungsklima  
Instrumente zur Messung physikalischer Größen  
(ISO 7726:1998)

Ergonomics of the thermal environment - Instruments for  
measuring physical quantities (ISO 7726:1998)

Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de  
mesure des grandeurs physiques (ISO 7726:1998)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 10. Mai 2001 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, der Tschechischen Republik und dem Vereinigten Königreich.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

# Inhalt

|   | Seite |
|---|-------|
| <b>Vorwort</b> .....  | 4     |
| <b>Einleitung</b> .....   | 5     |
| <b>1 Anwendungsbereich</b> .....  | 5     |
| <b>2 Normative Verweisungen</b> .....   | 5     |
| <b>3 Allgemeines</b> .....  | 6     |
| 3.1 Behaglichkeits- und Belastungsbedingungen .....   | 6     |
| 3.2 Physikalische Größen zur Beschreibung des Umgebungsklimas (Klimagrößen) .....   | 6     |
| 3.2.1 Einführung .....  | 6     |
| 3.2.2 Klimagrundgrößen .....  | 6     |
| 3.2.3 Abgeleitete Klimagrößen .....   | 7     |
| <b>4 Messinstrumente</b> .....  | 7     |
| 4.1 Messgrößen .....  | 7     |
| 4.2 Eigenschaften von Messinstrumenten .....  | 9     |
| 4.2.1 Eigenschaften von Instrumenten zur Messung von Grundgrößen .....  | 9     |
| 4.2.2 Eigenschaften integrierender Messinstrumente .....  | 10    |
| <b>5 Angaben zu Messverfahren</b> .....   | 10    |
| 5.1 Allgemeines .....   | 10    |
| 5.2 Angaben zu Schwankungen der physikalischen Größen in der räumlichen Umgebung des Messobjekts .....                          | 10    |
| 5.3 Angaben zu zeitlichen Schwankungen der physikalischen Größen .....  | 10    |
| <b>Anhang A (informativ) Messung der Lufttemperatur</b> .....   | 17    |
| <b>A.1 Einleitung</b> .....   | 17    |
| <b>A.2 Grundsätze für die Temperaturmessung</b> .....   | 17    |
| <b>A.3 Anwendungshinweise für Messung mit einem Thermometer</b> .....   | 17    |
| A.3.1 Minderung des Strahlungseinflusses .....  | 17    |
| A.3.2 Thermische Trägheit des Messwertaufnehmers .....  | 18    |
| <b>A.4 Arten von Temperaturmesswertaufnehmern</b> .....   | 19    |
| <b>Anhang B (informativ) Messung der mittleren Strahlungstemperatur</b> .....   | 20    |
| <b>B.1 Einleitung</b> .....   | 20    |
| <b>B.2 Messung der mittleren Strahlungstemperatur mittels geschwärzter Hohlkugel</b> .....                                      | 20    |
| B.2.1 Beschreibung des Kugel-Thermometers .....   | 20    |
| B.2.2 Grundsätze für die Messung .....  | 20    |
| B.2.3 Besondere Hinweise bei Anwendung eines Kugel-Thermometers .....   | 24    |
| <b>B.3 Andere Messverfahren</b> .....   | 25    |
| B.3.1 Zweikugelradiometer .....   | 25    |
| B.3.2 Konstantlufttemperatur-Messwertaufnehmer .....  | 26    |
| <b>B.4 Verfahren zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur</b> .....  | 26    |
| B.4.1 Berechnung aus der Temperatur der umgebenden Flächen .....  | 26    |
| B.4.2 Berechnung auf der Grundlage der Flächenstrahlungstemperatur .....  | 27    |
| <b>B.5 Andere Größen zur Beschreibung des Wärmestrahlungsaustausches</b> .....  | 28    |
| B.5.1 Allgemeines .....   | 28    |
| B.5.2 Absolute Bestrahlungsstärke .....   | 28    |
| B.5.3 Effektive Bestrahlungsstärke .....  | 28    |
| <b>Anhang C (informativ) Messung der Flächenstrahlungstemperatur</b> .....  | 34    |
| <b>C.1 Einleitung</b> .....   | 34    |
| <b>C.2 Messung der Flächenstrahlungstemperatur</b> .....  | 34    |
| C.2.1 Aus einer reflektierenden und einer absorbierenden Scheibe bestehender erwärmter Messwertaufnehmer .....                  | 34    |
| C.2.2 Konstantlufttemperaturscheibe .....   | 35    |
| <b>C.3 Verfahren zur Messung der Flächenstrahlungstemperatur und der Asymmetrie unter Einsatz des Effektivradiometers</b> ..... | 35    |
| C.3.1 Beschreibung des Effektivradiometers .....  | 35    |
| C.3.2 Messung .....   | 35    |
| <b>C.4 Verfahren zur Berechnung der Flächenstrahlungstemperatur</b> .....   | 37    |

|   |    |
|---|----|
| <b>Anhang D (informativ) Messung der absoluten Luftfeuchte</b> .....  | 41 |
| <b>D.1 Einleitung</b> .....   | 41 |
| <b>D.2 Thermohygrometrische Eigenschaften feuchter Luft</b> .....   | 41 |
| D.2.1 Allgemeines .....   | 41 |
| D.2.2 Absolute Luftfeuchte .....  | 41 |
| D.2.3 Relative Luftfeuchte .....  | 42 |
| D.2.4 Direkte Bestimmung der thermohygrometrischen Eigenschaften feuchter Luft mit Hilfe eines psychometrischen Diagramms .....               | 43 |
| <b>D.3 Bauarten von Hygrometern</b> .....   | 44 |
| D.3.1 Taupunkthygrometer – Funktionsprinzip .....   | 44 |
| D.3.2 Leitfähigkeitshygrometer .....  | 44 |
| D.3.3 Absorptionshygrometer (Haarhygrometer) – Funktionsprinzip .....   | 44 |
| D.3.4 Psychrometer – Funktionsprinzip .....   | 44 |
| <b>D.4 Messung der absoluten Luftfeuchte mittels Psychrometrie</b> .....  | 44 |
| D.4.1 Beschreibung und Grundsätze des Verfahrens .....  | 44 |
| D.4.2 Direkte Bestimmung der absoluten Luftfeuchte mit Hilfe eines Psychrometer-Diagramms .....   | 46 |
| D.4.3 Anwendungshinweise .....  | 47 |
| <b>D.5 Messung der Feuchte mittels Lithiumchloridhygrometer</b> .....   | 48 |
| D.5.1 Beschreibung und Grundsätze des Verfahrens .....  | 48 |
| D.5.2 Anwendungshinweise .....  | 51 |
| <b>Anhang E (informativ) Messung der Luftgeschwindigkeit</b> .....  | 52 |
| <b>E.1 Einleitung</b> .....   | 52 |
| <b>E.2 Genauigkeit von Luftgeschwindigkeitsmessungen</b> .....  | 52 |
| <b>E.3 Anemometerarten</b> .....  | 52 |
| <b>E.4 Heißkugelanemometer</b> .....  | 53 |
| E.4.1 Allgemeines .....   | 53 |
| E.4.2 Beschreibung und Messprinzip .....  | 53 |
| E.4.3 Anwendungshinweise .....  | 54 |
| <b>Anhang F (informativ) Messung der Oberflächentemperatur</b> .....  | 56 |
| <b>F.1 Einleitung</b> .....   | 56 |
| <b>F.2 Kontaktthermometer</b> .....   | 56 |
| <b>F.3 Infrarot-Radiometer</b> .....  | 56 |
| <b>Anhang G (informativ) Messung der operativen Raumtemperatur</b> .....  | 58 |
| <b>G.1 Einleitung</b> .....   | 58 |
| <b>G.2 Direkte Messung der operativen Raumtemperatur</b> .....  | 58 |
| <b>G.3 Berechnung der operativen Raumtemperatur auf der Grundlage der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur</b> .....         | 59 |
| <b>Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen</b> ..... | 60 |
| <b>Literaturhinweise</b> .....  | 60 |

## **Vorwort**

Der Text der Internationalen Norm vom Technischen Komitee ISO/TC 159 „Ergonomics“ der International Organization for Standardization (ISO) wurde als Europäische Norm durch das Technische Komitee CEN/TC 122 „Ergonomie“ übernommen, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm ersetzt EN 27726:1993.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Januar 2002, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Januar 2002 zurückgezogen werden.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen:

Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, die Tschechische Republik und das Vereinigte Königreich.

## **Anerkennungsnotiz**

Der Text der Internationalen Norm ISO 7726:1998 wurde von CEN als Europäische Norm ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

ANMERKUNG Die normativen Verweisungen auf Internationale Normen sind im Anhang ZA (normativ) aufgeführt.

## Einleitung

Diese Norm ist Teil einer Reihe Internationaler Normen zur Untersuchung des Umgebungsklimas.

Diese Internationalen Normen haben folgende Zielsetzung:

- Erarbeiten von Begriffsfestlegungen, die die Messverfahren, Prüfung und Auswertung betreffen; dabei sollen auch bestehende oder in Arbeit befindliche Normen berücksichtigt werden;
- Festlegen von Verfahren zur Messung physikalischer Messgrößen, die das Umgebungsklima bestimmen;
- Festlegen eines oder mehrerer Auswertungsverfahren;
- Festlegen empfohlener Werte oder von Höchstwerten für Expositionszeiten in gemäßigttem und extremem (extrem warmem oder kaltem) Umgebungsklima;
- Beschreiben von Verfahren zur Messung der Wirksamkeit von Einrichtungen oder Verfahren zum individuellen oder kollektiven Schutz gegen Wärme und Kälte.

Es dürfen Messgeräte mit einer in dieser Norm festgelegten oder höheren Genauigkeit verwendet werden.

Die Beschreibung oder Nennung bestimmter Geräte in den Anhängen stellt lediglich eine Empfehlung dar, da ihre Eigenschaften vom Messprinzip, ihrem Aufbau und ihrer Anwendung abhängen. Ein Vergleich der Qualität der marktüblichen Messgeräte muss der Anwender selbst durchführen, ebenso die Prüfung auf Übereinstimmung der Geräte mit den Festlegungen dieser Norm.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt Mindestanforderungen an Instrumente zur Messung physikalischer Größen zur Beschreibung des Umgebungsklimas sowie Verfahren zur Messung dieser physikalischen Größen des Umgebungsklimas fest.

Zweck der Norm ist es hingegen nicht, einen einheitlichen Index für die Behaglichkeit oder die thermische Belastung anzugeben, sondern lediglich Verfahren zu normen, mit denen die Daten zur Bestimmung solcher Indizes erfasst werden können. In anderen Internationalen Normen werden die Verfahren detailliert beschrieben, die auf den mit dieser Norm ermittelten Daten basieren.

Diese Internationale Norm dient als Referenzquelle

- a) bei der Erarbeitung von Festlegungen für Hersteller und Benutzer von Instrumenten zur Messung von Klimagrößen;
- b) für vertragliche Vereinbarungen über die Messung von Klimagrößen.

Die Norm gilt für die Untersuchung der Auswirkung warmer, gemäßigter, angenehmer oder kalter Umgebungsklimata auf den Menschen.

## 2 Normative Verweisungen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

ISO 7730:1994, *Gemäßigtes Umgebungsklima – Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit.*

### 3 Allgemeines

#### 3.1 Behaglichkeits- und Belastungsbedingungen

Die Anforderungen und Prüfverfahren in dieser Norm werden nach dem Grad des zu untersuchenden, durch das Umgebungsklima verursachten thermischen Empfindens in zwei Klassen unterteilt.

Die Anforderungen und Verfahren der Klasse C gelten für Messungen in gemäßigtem Umgebungsklima, in dem annähernd Behaglichkeitsbedingungen vorherrschen (Behaglichkeitsbereich).

Die Anforderungen und Verfahren der Klasse S gelten für Messungen in Umgebungsklimata mit erhöhter oder sogar extremer thermischer Belastung (Warm- und Hitzebereich).

Die Anforderungen und Verfahren für beide Klassen wurden unter Berücksichtigung der praktischen Umstände bei Messungen vor Ort und des Leistungsvermögens der heute handelsüblichen Messinstrumente festgelegt.

#### 3.2 Physikalische Größen zur Beschreibung des Umgebungsklimas (Klimagrößen)

##### 3.2.1 Einführung

Die Bestimmung einheitlicher Indizes für die Behaglichkeit oder die thermische Belastung setzt die Kenntnis der Klimagrößen voraus. Die Größen lassen sich nach dem Grad der Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen in zwei Gruppen unterteilen.

##### 3.2.2 Klimagrundgrößen

Jede Klimagrundgröße beschreibt einen Aspekt des Umgebungsklimas und ist unabhängig von den anderen. Die Größen werden häufig zur Festlegung des Index für die Behaglichkeit oder die thermische Belastung auf der Basis einer vereinfachten Erstellung der Wärmebilanz für einen Menschen in einem gegebenen Umgebungsklima herangezogen.

Folgende Größen werden unterschieden:

- a) Lufttemperatur in Kelvin ( $T_a$ ) oder Grad Celsius ( $t_a$ );
- b) mittlere Strahlungstemperatur in Kelvin ( $\bar{T}_r$ ) oder Grad Celsius ( $\bar{t}_r$ ) (Flächenstrahlungstemperatur in Kelvin ( $T_{pr}$ ) oder Grad Celsius ( $t_{pr}$ ); Flächen-Bestrahlungsstärke in Watt je Quadratmeter);
- c) absolute Luftfeuchte, ausgedrückt als Partialdruck des Wasserdampfes ( $p_a$ ) in Kilopascal;
- d) Luftgeschwindigkeit ( $v_a$ ), in Meter je Sekunde;
- e) Oberflächentemperatur in Kelvin ( $T_s$ ) oder Grad Celsius ( $t_s$ ).

Die Beziehungen zwischen diesen Größen und die verschiedenen Wärmegewinne und -verluste in Bezug auf den menschlichen Körper zeigt Tabelle 1, die darüber hinaus vier weitere Größen angibt, welche in dieser Internationalen Norm ansonsten nicht angewandt werden, da sie normalerweise nicht gemessen, sondern anhand von Tabellenwerten geschätzt werden.

**ANMERKUNG** Das Modell der mittleren Strahlungstemperatur ermöglicht die Untersuchung des Austausches von Strahlungen zwischen Mensch und Umgebung. Es basiert auf der Annahme, dass die Wirkungen einer realen Umgebung, die im Allgemeinen heterogen ist, auf den Menschen und diejenigen einer gedachten, als homogen betrachteten Umgebung identisch sind. Gilt diese Annahme nicht, besonders bei asymmetrischer Strahlung, sollten der Strahlungsaustausch mit thermisch unterschiedlichen Bereichen und deren Auswirkungen auf den Menschen mit Hilfe des Ansatzes der Flächenstrahlungstemperatur ebenfalls untersucht werden.



### 1.1.3 Abgeleitete Klimagrößen

Die abgeleiteten Klimagrößen dienen zur Beschreibung einer bestimmten Gruppe von Faktoren, die entsprechend den Eigenschaften der verwendeten Messwertaufnehmer gewichtet sind. Sie werden häufig zur Festlegung eines Index für die Behaglichkeit oder die thermische Belastung auf empirischer Grundlage herangezogen, ohne dass dabei ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung der verschiedenen Formen des Wärmeaustausches zwischen dem menschlichen Körper und dem Umgebungsklima, dem thermischen Gleichgewicht und der physiologischen Beanspruchung zum Einsatz kommt. Einige dieser abgeleiteten Größen sind in gesonderten Normen beschrieben, in denen auch Anforderungen an die Messung angegeben sind.

## 4 Messinstrumente

### 4.1 Messgrößen

**4.1.1** Die Lufttemperatur ist die Temperatur der den Menschen umgebenden Luft (siehe Anhang A).

**4.1.2** Die mittlere Strahlungstemperatur ist die gleichmäßige Temperatur eines gedachten Hüllraumes, in dem die strahlungsbedingte Wärmeübertragung vom menschlichen Körper weg ebenso groß ist wie die in dem realen, inhomogenen Hüllraum.

Die mittlere Strahlungstemperatur kann mit Instrumenten gemessen werden, die die im Allgemeinen heterogene Strahlung der Wände eines realen Hüllraumes zu einem Mittelwert integrieren (siehe Anhang B).

Das Kugel-Thermometer ist ein Instrument, das eingesetzt wird, um einen Näherungswert für die mittlere Strahlungstemperatur zu bestimmen. Grundlage bilden dabei die zeitgleich ermittelten Werte für die Kugeltemperatur,  $t_g$ , sowie die der Temperatur und Geschwindigkeit der die Kugel umgebenden Luft.

Die Messgenauigkeit bei der Anwendung dieses Instruments hängt stark von der untersuchten Umgebung und der Genauigkeit bei der Messung der Kugeltemperatur sowie der Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit ab. Weicht die ermittelte Messgenauigkeit von den in dieser Norm angegebenen Grenzwerten ab, so ist dies anzugeben.

Die mittlere Strahlungstemperatur wird in Bezug auf den menschlichen Körper definiert. Die Kugelform des Kugel-Thermometers stelle eine sinnvolle Näherung an die Umrise einer sitzenden Person dar. Allerdings kommt ein Messwertaufnehmer in Form eines Ellipsoids den Umrissen des menschlichen Körpers sowohl in aufrechter als auch in sitzender Stellung näher.

Die mittlere Strahlungstemperatur kann auch aus den gemessenen Temperaturwerten der umgebenden Wände, deren Größe und ihrer Lage in Bezug auf den Menschen (Berechnung geometrischer Winkelfaktoren) errechnet werden (siehe Anhang B).

Die mittlere Strahlungstemperatur kann auch aus den Werten der Flächenstrahlungstemperatur abgeschätzt werden. Hierzu werden die Werte der sechs Raumrichtungen gemäß den Projektionsflächen einer Person gewichtet. In ähnlicher Weise kann sie durch Messung der Bestrahlungsstärke der verschiedenen Raumrichtungen abgeschätzt werden.

Es dürfen auch andere Messeinrichtungen oder Berechnungsverfahren angewendet werden, die eine Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur mit der in dieser Norm festgelegten Genauigkeit erlauben.

**4.1.3** Die Flächenstrahlungstemperatur ist die gleichmäßige Temperatur eines Hüllraumes, in dem die Bestrahlungsstärke auf einer Seite eines kleinen ebenen Elements gleich derjenigen in der tatsächlichen, heterogenen Umgebung ist.

Als Instrument zur Messung dieser Größe wird häufig das so genannte Effektivradiometer angewandt (siehe Anhang C). Es ermöglicht die Bestimmung der Flächenstrahlungstemperatur aus der Effektivstrahlung, die zwischen Umgebung und ebenem Element ausgetauscht wird, und der Oberflächentemperatur des Radiometers.

Ein Radiometer mit einem Messwertaufnehmer mit je einer (polierten) reflektierenden und absorbierenden Scheibe (schwarz angestrichen) darf ebenfalls angewendet werden.

Die Flächenstrahlungstemperatur kann auch aus den Oberflächentemperaturen der Umgebung und den Winkelfaktoren der Oberflächen und dem ebenen Element errechnet werden (siehe Anhang C).

## EN ISO 7726:2001 (D)

Die Strahlungstemperaturasymmetrie ist der Unterschied zwischen den Werten der Flächenstrahlungstemperatur von zwei gegenüberliegenden Seiten eines kleinen ebenen Elements (siehe Definition der Flächenstrahlungstemperatur).

Das Konzept der Strahlungstemperaturasymmetrie wird angewendet, wenn die mittlere Strahlungstemperatur die Strahlungsverhältnisse in der Umgebung nicht hinreichend beschreibt, z. B. wenn es sich um Strahlung aus entgegengesetzten Teilen eines Raumes mit deutlichen Temperaturunterschieden handelt.

Das asymmetrische Strahlungsfeld wird über seine Lage relativ zu der des ebenen Elementes beschrieben, das als Bezug dient. Die Lage dieses Elementes muss daher genau durch Angabe seiner Lage zu der Senkrechten beschrieben werden.

Die Strahlungstemperaturasymmetrie wird aus den in entgegengesetzten Richtungen gemessenen Werten der Flächenstrahlungstemperatur bestimmt oder berechnet.

Es dürfen auch andere Messeinrichtungen oder Verfahren angewendet werden, die eine Messung oder Berechnung der Strahlungstemperaturasymmetrie bzw. der Flächenstrahlungstemperatur mit der in dieser Norm festgelegten Genauigkeit erlauben.

**4.1.4** Die absolute Luftfeuchte macht eine Aussage über den tatsächlichen Wasserdampfgehalt der Luft. Demgegenüber beschreiben Größen wie die relative Luftfeuchte oder der Sättigungsgrad die Wasserdampfmenge in der Luft bezogen auf die maximale mögliche Wasserdampfmenge, die die Luft bei gegebener Temperatur und gegebenem Druck aufnehmen kann.

Für den Wärmeaustausch zwischen dem Menschen und der Umgebung über die Verdunstung ist die absolute Luftfeuchte zu berücksichtigen. Dieser Zusammenhang wird häufig über den Partialdruck des Wasserdampfes ausgedrückt.

Der Partialdruck des Wasserdampfes in einer Mischung aus feuchter Luft ist der Druck des Wasserdampfes in dieser Mischung, den dieser ausüben würde, wenn er allein bei gleicher Temperatur das Volumen der feuchten Luft einnähme.

Die absolute Luftfeuchte kann direkt (mit Taupunktinstrumenten, Elektrolytinstrumenten) oder indirekt durch gleichzeitige Messung mehrerer Größen (relative Luftfeuchte und Lufttemperatur; psychrometrische Feuchttemperatur und Lufttemperatur) bestimmt werden (siehe Anhang D).

Das Psychrometer ist ein häufig zur Messung der Luftfeuchte verwendetes Gerät. Mit ihm lässt sich die absolute Luftfeuchte aus den für die Lufttemperatur ( $t_a$ ) und die Psychrometerfeuchttemperatur ( $t_w$ ) gemessenen Werten bestimmen. Die Messgenauigkeit dürfte nur bei hoher Gerätegüte und bei strenger Einhaltung der beim Gebrauch notwendigen Vorkehrungen der in dieser Norm geforderten entsprechen.

Es dürfen auch andere Messeinrichtungen angewendet werden, die eine Bestimmung der absoluten Luftfeuchte mit der in dieser Norm festgelegten Genauigkeit erlauben.

**4.1.5** Die Luftgeschwindigkeit ist eine Größe, die durch ihre Stärke und Richtung definiert ist. Die im Zusammenhang mit dem Umgebungsklima zu betrachtende Größe ist die Geschwindigkeit der Luft, d. h. die Stärke des Geschwindigkeitsvektors des Luftzugs am betrachteten Messpunkt (siehe Anhang C).

Die Luftgeschwindigkeit,  $v_a$ , verändert sich über der Zeit an jedem Punkt eines Raumes und es empfiehlt sich, auch die Geschwindigkeitsveränderungen aufzuzeichnen. Ein Luftzug kann über seine mittlere Geschwindigkeit,  $v_a$ , definiert als die durchschnittliche Geschwindigkeit über ein Zeitintervall (Messperiode), und über die Standardabweichung der Geschwindigkeit, SD, beschrieben werden. Diese bestimmt sich aus folgender Gleichung:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_{a_i} - v_a)^2}$$

Dabei ist

$v_{a_i}$  die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt „i“ der Messperiode.

Der Turbulenzgrad, TU, des Luftzuges ist definiert als der Quotient aus der Standardabweichung und der mittleren Geschwindigkeit und wird in der Regel in Prozent angegeben.

$$TU = \frac{SD}{v_a} \times 100$$

**4.1.6** Die Oberflächentemperatur ist die Temperatur einer gegebenen Oberfläche. Sie wird benötigt, um den Strahlungsaustausch zwischen dem menschlichen Körper und der Umgebung, beschrieben über die mittlere Strahlungstemperatur und/oder der Flächenstrahlungstemperatur, zu bewerten. Sie wird auch verwendet, um die Auswirkungen eines direkten Kontaktes zwischen dem menschlichen Körper und einer Oberfläche zu bewerten. Die Oberflächentemperatur kann nach dem Verfahren in Anhang F gemessen werden; zu unterscheiden sind hier:

- das Kontaktthermometer, bei dem der Messwertaufnehmer in direktem Kontakt mit der Oberfläche steht. Der Messwertaufnehmer kann dabei den Wärmefluss an dem zu messenden Punkt ändern und so das Ergebnis beeinflussen;
- der Infrarot-Messwertaufnehmer; dabei wird der Wärmestrahlungsfluss an der Oberfläche gemessen und in eine Temperaturangabe umgesetzt. Dies kann jedoch vom Emissionsvermögen der Oberfläche beeinflusst werden.

## 4.2 Eigenschaften von Messinstrumenten

### 4.2.1 Eigenschaften von Instrumenten zur Messung von Grundgrößen

Messbereiche, Messgenauigkeit und 90-%-Einstellzeiten von Messwertaufnehmern zur Messung der jeweiligen Grundgrößen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Diese Eigenschaften sind als Mindestanforderungen anzusehen. Je nach Bedarf und Fertigungsmöglichkeiten lassen sich höhere Anforderungen aufstellen. So können bei sehr genauen Messungen der thermischen Belastung für gewisse Größen Instrumente mit einem Messbereich der Klasse S und der Genauigkeit der Klasse C erforderlich sein.

Im Sinne dieser Norm ist die Zeitkonstante eines Messwertaufnehmers diejenige Zeit, die bei einer stufenförmigen Änderung einer Klimagröße eine Messgröße am Ausgang des Messwertaufnehmers bis zum Erreichen von 63 % ihres stationären Endwertes (ohne Überschwingen) benötigt. Aus der Zeitkonstante kann die Einstellzeit errechnet werden, die in der Praxis diejenige Zeit ist, nach der der gemessene Wert (z. B. Temperatur des Thermometers) als genügend nah am genauen Wert der zu messenden Größe (z. B. Lufttemperatur) anzusehen ist. Eine 90-%-Einstellzeit wird nach der 2,3fachen Zeitkonstante erreicht. Es muss mit der Messung mindestens so lange gewartet werden, bis die Einstellzeit verstrichen ist.

Da Zeitkonstante und Einstellzeit eines Messwertaufnehmers nicht allein vom Messwertaufnehmer (Masse, Fläche, Vorhandensein einer Schutzhülle) abhängen, sondern auch von der Umgebung und damit von den Umständen einer bestimmten Messung (Luftgeschwindigkeit, Strahlung usw.), müssen die Bedingungen angegeben werden, unter denen die Werte ermittelt wurden. Die Normbedingungen für das Umgebungsklima sind in Tabelle 3 (Klassen C und S) festgelegt. Sie sind als Grundlage für die Messungen heranzuziehen, sofern dies nicht den bei der Messung bestimmter Größen zu beachtenden Prinzipien widerspricht.

Darüber hinaus hängt die Genauigkeit bei der Messung von Lufttemperatur, mittlerer Strahlungstemperatur, Strahlungstemperatursymmetrie, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte noch von anderen Einflussgrößen ab. Folglich ist die in Tabelle 2 festgelegte Genauigkeit unter den in der Tabelle festgelegten Umweltbedingungen zu erreichen.

#### **4.2.2 Eigenschaften integrierender Messinstrumente**

Bei Messinstrumenten, die mehrere veränderliche Größen gleichzeitig messen, müssen der zeitliche Abstand der einzelnen Messungen, die Einstellzeit und Genauigkeit mindestens denjenigen für die einzelnen veränderlichen Größen entsprechen.

### **5 Angaben zu Messverfahren**

#### **5.1 Allgemeines**

Die Verfahren zur Messung der physikalischen Größen einer Umgebung müssen berücksichtigen, dass diese sowohl räumlich wie zeitlich schwanken.

Das Umgebungsklima kann sich in horizontaler Richtung verändern und es muss berücksichtigt werden, wie lange eine Person an verschiedenen Orten arbeitet. Das Umgebungsklima kann auch in vertikaler Richtung veränderlich sein, wie dies in 5.2 behandelt wird.

#### **5.2 Angaben zu Schwankungen der physikalischen Größen in der räumlichen Umgebung des Messobjekts**

Ein Umgebungsklima kann unter bioklimatischen Gesichtspunkten als homogen angesehen werden, wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt Lufttemperatur, Strahlung, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte um das Messobjekt herum als praktisch gleich anzusehen sind, d. h., wenn die Abweichung jeder der Größen, bezogen auf ihren ortsbezogenen Mittelwert, berechnet aus den Einzelwerten der Messorte, nicht größer ist als das X-fache der erforderlichen Messgenauigkeit, wie sie in Tabelle 2 angegeben ist. Der Wert X ist dabei aus Tabelle 4 abzulesen. Diese Forderung lässt sich für Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte häufig einhalten, seltener jedoch für die Strahlung.

Bei zu heterogenem Umgebungsklima sind die Klimagrößen an verschiedenen Punkten am oder in der Nähe des Messobjektes zu messen und die Teilergebnisse zur Ermittlung der bei der Untersuchung der Behaglichkeitsbedingungen bzw. der Belastungsbedingungen betrachteten Größen heranzuziehen. Bereits vorliegende Analysen der thermischen Belastung an bestimmten oder vergleichbaren Arbeitsplätzen können wichtige Hinweise bezüglich der Gleichmäßigkeit der Verteilung bestimmter Größen geben. Üblicherweise wird bei Innenräumen oder Arbeitsplätzen, die nur unzureichend abgegrenzt sind, nur ein begrenzter Bereich betrachtet, in dem die Behaglichkeits- oder Belastungsbedingungen einzuhalten sind. In Streitfällen bei der Datenauswertung sind die Ergebnisse der Messungen, die unter der Prämisse eines heterogenen Umgebungsklimas durchgeführt wurden, zum Vergleich heranzuziehen.

In Tabelle 5 sind Höhen der Punkte genannt, an denen die Klimagrundgrößen zu messen sind. Ebenfalls angegeben sind die Wichtungsfaktoren zur Bestimmung der Mittelwerte dieser Größen in Abhängigkeit von der Art des Umgebungsklimas (homogen/heterogen) und der Verfahrensklasse (C oder S).

Die Wahl der Messpunkthöhen für die abgeleiteten Größen sollte sich dabei an den Angaben in Tabelle 5 orientieren. Flächen- und mittlere Strahlungstemperatur sowie die absolute Feuchte werden in der Regel nur in der mittleren Höhe gemessen. Jedoch ist hierbei die Norm zu beachten, in der die Indizes für thermische Belastung oder Behaglichkeit definiert sind und die Vorrang vor dieser Internationalen Norm hat.

Die Messwertaufnehmer sind in Höhe der Körperteile anzuordnen (siehe Tabelle 5), mit denen die körperliche Tätigkeit üblicherweise ausgeübt wird. Ist eine Unterbrechung der Tätigkeit der untersuchten Person nicht möglich, so sind die Messwertaufnehmer so anzuordnen, dass der sich ergebende Wärmeaustausch mehr oder weniger demjenigen zwischen Person und Umgebung entspricht. (Diese Besonderheit der Messung ist im Prüfbericht zu vermerken.)

#### **5.3 Angaben zu zeitlichen Schwankungen der physikalischen Größen**

Die Klimagrößen im Bereich der untersuchten Person können zeitlichen Schwankungen unterworfen sein, und zwar aus folgenden Gründen:

- a) bei einer bestimmten Tätigkeit können die Klimagrößen aufgrund äußerer Einflüsse schwanken, wie sie bei einer Tätigkeit in der Industrie vom Fertigungsprozess herrühren;

- b) die Klimagrößen können auch dadurch schwanken, dass sich eine Person von einem Umgebungsklima in ein anderes bewegt (z. B. Wechsel des Aufenthalts von einem warmen Klima an einer Maschine zu einem gemäßigten in einem Ruhebereich).

Ein Umgebungsklima gilt bezogen auf das Messobjekt als „stationär“, wenn die angewendeten physikalischen Größen zur Beschreibung der thermischen Belastung der Person praktisch unabhängig von der Zeit sind, d. h., wenn die zeitlichen Schwankungen dieser Größen bezogen auf deren Mittelwert nicht größer ist als das X-fache der erforderlichen Messgenauigkeit, wie sie in Tabelle 2 angegeben ist. Der Wert X ist dabei aus Tabelle 4 abzulesen.

Es sollte in diesem Zusammenhang beachtet werden, dass auch die anderen zur Beschreibung der Wärmebelastung dienenden Größen (Stoffwechselrate, energetischer Wirkungsgrad, Isolationswert der Kleidung) zeitlich schwanken können.

Kann ein Umgebungsklima bezogen auf das Messobjekt nicht als „stationär“ betrachtet werden, sollten die wesentlichen zeitlichen Schwankungen der Klimagrößen notiert werden. Diese Information wird in anderen Normen dieser Reihe benötigt, um einen allgemeinen Behaglichkeitsindex oder thermischen Belastungsindex zu bestimmen. Die Messdauer und die Auswertung der Daten sind abhängig von dem eingesetzten Index für die thermische Behaglichkeit bzw. für die thermische Belastung. Diese Information ist in der entsprechenden Norm zu finden.

**Tabelle 1 – Wichtigste unabhängige Größen für die Untersuchung des thermischen Gleichgewichts zwischen dem Menschen und dem Umgebungsklima**

|  | Größen                       |  |                                   |   |  |  |                              | $W$            |
|--|------------------------------|--|-----------------------------------|---|--|--|------------------------------|----------------|
|  | $t_a$<br>Luft-<br>temperatur | $\bar{t}_r$<br>Mittlere<br>Strahlungs-<br>temperatur | $v_a$<br>Luft-<br>geschwindigkeit | $p_a$<br>Absolute Luft-<br>feuchte<br>(Partialdruck des<br>Wasserdampfes) | $I_{cl}$<br>Isolationswert der<br>Bekleidung | $R_{cl}$<br>Widerstand der<br>Kleidung gegen<br>Wasserdampf-<br>durchtritt | $M$<br>Stoffwechsel-<br>rate |                |
| In die Wärmebilanz eingehende Faktoren   |                              |  |                                   |   |  |  |                              | Externe Arbeit |
| Wärmeproduktion des Körpers, $M - W$   |                              |  |                                   |   |  |  | X                            | X              |
| Wärmeübertragung durch Strahlung, $R$  |                              | X  |                                   |   | X  |  |                              |                |
| Konvektive Wärmeübertragung, $C^a$   | X                            |  | X                                 |   | X  |  |                              |                |
| Wärmeverlust durch Verdunstung:<br>– über die Haut, $E$<br>– durch Atmung, $E_{res}$ |                              |  | X                                 | X   |  | X  |                              |                |
| Konvektion durch Atmung, $C_{res}$   | X                            |  |                                   |   |  |  | X                            | X              |

<sup>a</sup> Wärmeübertragung durch Konvektion wird auch durch Körperbewegung beeinflusst. Die resultierende Luftgeschwindigkeit auf der Hautoberfläche wird als relative Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$  bezeichnet. Die Wärmeübertragung durch direkten Kontakt (Oberflächentemperatur) hat lediglich einen begrenzten Einfluss auf die Wärmebilanz.

Tabelle 2 – Eigenschaften von Messinstrumenten

| Klimagröße                    | Formelzeichen | Klasse C<br>(Behaglichkeitsbedingungen) |  |  | Klasse S<br>(Thermische Belastung) |  |  | Bemerkungen  |
|-------------------------------|---------------|---|--|--|------------------------------------|--|--|--|
|                               |               | Messbereich                             | Fehlergrenzen  | Einstellzeit (90 %)  | Messbereich                        | Fehlergrenzen  | Einstellzeit (90 %)  |  |
| Lufttemperatur                | $t_a$         | 10 °C bis 40 °C                         | Mindestwert: $\pm 0,5$ °C<br>Idealwert: $\pm 0,2$ °C<br>Diese Werte müssen mindestens für eine Differenz $ t_r - t_a $ von 10 °C eingehalten werden.   | So kurz wie möglich.<br>Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. | -40 °C bis +120 °C                 | Mindestwerte:<br>-40 bis 0 °C: $\pm (0,5 + 0,01  t_a )$ °C<br>> 0 °C bis 50 °C: $\pm 0,5$ °C<br>> 50 °C bis 120 °C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_a - 50)]$ °C<br><br>Idealwert = $\frac{\text{Mindestwert}}{2}$<br><br>Diese Werte müssen mindestens für eine Abweichung $ t_r - t_a $ von 20 °C eingehalten werden.  | So kurz wie möglich.<br>Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. | Der Temperaturmesswert-aufnehmer muss wirksam vor Strahlung von warmen oder kalten Wänden geschützt werden. Der Mittelwert über 1 min sollte angegeben werden.   |
| Mittlere Strahlungstemperatur | $t_r$         | 10 °C bis 40 °C                         | Mindestwert: $\pm 2$ °C<br>Idealwert: $\pm 0,2$ °C<br>In bestimmten Fällen sind mit den handelsüblichen Instrumenten diese Werte nur mit großen Schwierigkeiten oder sogar überhaupt nicht einzuhalten; im letzteren Fall ist die erreichte Messgenauigkeit anzugeben. | So kurz wie möglich.<br>Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. | -40 °C bis +150 °C                 | Mindestwerte:<br>-40 °C bis 0 °C: $\pm (5 + 0,02  t_a )$ °C<br>> 0 °C bis 50 °C: $\pm 5$ °C<br>> 50 °C bis 150 °C: $\pm [5 + 0,08 (t_r - 50)]$ °C<br><br>Idealwerte:<br>-40 °C bis 0 °C: $\pm (0,5 + 0,01  t_r )$ °C<br>> 0 °C bis 50 °C: $\pm 5$ °C<br>> 50 °C bis 150 °C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_r - 50)]$ °C | So kurz wie möglich.<br>Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. | Bei Messung mit einer schwarzen Kugel kann je nach Umgebungsklima und der Fehlergrenzen für $t_a$ , $t_a$ und $t_g$ die Messungengenauigkeit $\pm 5$ °C (Klasse C) bzw. $\pm 20$ °C (Klasse S) betragen. |

Tabelle 2 – Eigenschaften von Messinstrumenten (fortgesetzt)

| Klimagröße                  | Formelzeichen | Klasse C<br>(Behaglichkeitsbedingungen) |   |   | Klasse S<br>(Thermische Belastung) |  |   | Bemerkungen  |
|-----------------------------|---------------|---|---|---|------------------------------------|--|---|--|
|                             |               | Messbereich                             | Fehlergrenzen   | Einstellzeit (90 %)   | Messbereich                        | Fehlergrenzen  | Einstellzeit (90 %)   |  |
| Flächenstrahlungstemperatur | $t_{pr}$      | 0 °C bis 50 °C                          | Mindestwert: $\pm 0,5$ °C<br>Idealwert: $\pm 0,2$ °C<br>Diese Werte müssen mindestens für eine Differenz $ t_{pr} - t_a  < 10$ °C eingehalten werden.   | So kurz wie möglich. Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. | 0 °C bis 200 °C                    | Mindestwert:<br>– 60 bis 0 °C: $\pm (1 + 0,1  t_{pr} )$ °C<br>0 °C bis 50 °C: $\pm 1$ °C<br>50 °C bis 200 °C: $\pm [1+0,1 (t_{pr} - 50)]$ °C<br><b>Idealwert = <math>\frac{\text{Mindestwert}}{2}</math></b><br><br>Diese Werte müssen mindestens für eine Abweichung $ t_{pr} - t_a  < 20$ °C eingehalten werden. | So kurz wie möglich. Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden.   |  |
| Luftgeschwindigkeit         | $v_a$         | 0,05 m/s bis 1 m/s                      | Mindestwert:<br>$\pm (0,05 + 0,05 v_a)$ m/s<br>Idealwert:<br>$\pm (0,02 + 0,07 v_a)$ m/s<br>Diese Werte sind unabhängig von der Strömungsrichtung für einen Raumwinkel ( $\cdot$ ) = $3\pi$ sr einzuhalten. | Mindestwert:<br>0,5 s<br>Idealwert: 0,2 s                                   | 0,2 m/s bis 20 m/s                 | Mindestwert:<br>$\pm (0,1 + 0,05 v_a)$ m/s<br>Idealwert:<br>$\pm (0,05 + 0,05 v_a)$ m/s<br>Diese Werte sind unabhängig von der Strömungsrichtung für einen Raumwinkel von ( $\cdot$ ) = $3\pi$ sr einzuhalten.   | So kurz wie möglich. Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden.<br>Zur Messung des Turbulenzgrades ist eine möglichst geringe Einstellzeit erforderlich | Außer bei einer gerichteten Luftströmung muss der Messwertafnehmer unabhängig von der Strömungsrichtung die Effektivgeschwindigkeit messen. Der Mittelwert und die Standardabweichung über ein Messintervall von 3 min sollten angegeben werden. |



Tabelle 2 – Eigenschaften von Messinstrumenten (fortgesetzt)

| Klimagröße   | Formelzeichen | Klasse C<br>(Behaglichkeitsbedingungen)     |  |   | Klasse S<br>(Thermische Belastung)  |  |   | Bemerkungen |
|--|---------------|---|--|---|---|--|---|-------------|
|  |               | Messbereich                                 | Fehlergrenzen  | Einstellzeit (90 %)   | Messbereich   | Fehlergrenzen  | Einstellzeit (90 %)   |             |
| Absolute Luftfeuchte, ausgedrückt als Partialdruck des Wasserdampfes | $p_a$         | 0,5 kPa bis 3,0 kPa                         | $\pm 0,15$ kPa Dieser Wert muss bei einer Differenz von $ t_r - t_a $ von mindestens 10 °C eingehalten werden. | So kurz wie möglich. Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. | 0,5 kPa bis 6,0 kPa   | $\pm 0,15$ kPa. Dieser Wert muss bei einer Differenz von $ t_r - t_a $ von mindestens 20 °C eingehalten werden.  | So kurz wie möglich. Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. |             |
| Oberflächentemperatur  | $t_s$         | 0 °C bis 50 °C                              | Mindestwert: $\pm 1$ °C<br>Idealwert: $\pm 0,5$ °C   | So kurz wie möglich. Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. | - 40 °C bis + 120 °C  | Mindestwert:<br>< - 10 °C: $\pm [1 + 0,05 (-t_s - 10)]$<br>- 10 °C bis 50 °C: $\pm 1$ °C<br>> 50 °C: $\pm [1 + 0,05 (t_s - 50)]$<br>Idealwert = $\frac{\text{Mindestwert}}{2}$ | So kurz wie möglich. Muss als Kennwert für das Instrument angegeben werden. |             |
| Gerichtete Strahlung   | $r_d$         | - 35/m <sup>2</sup> bis 35 W/m <sup>2</sup> | $\pm 5$ W/m <sup>2</sup>   | Mindestwert: 1,0 s<br>Idealwert: 0,5 s                                      | - 300 W/m <sup>2</sup> bis + 100 W/m <sup>2</sup><br>100 W/m <sup>2</sup> bis 1000 W/m <sup>2</sup> bis 1000 W/m <sup>2</sup> bis 2500 W/m <sup>2</sup> | $\pm 5$ W/m <sup>2</sup><br><br>$\pm 10$ W/m <sup>2</sup><br><br>$\pm 15$ W/m <sup>2</sup>   | Mindestwert: 1,0 s<br>Idealwert: 0,5 s                                      |             |

ANMERKUNG An einigen Arbeitsplätzen in heißen Umgebungsklimata (Stahl-, Kohle-, Glasindustrie) kann es erforderlich sein, dass die Flächenstrahlungstemperatur und/oder die Oberflächentemperatur außerhalb des hier angegebenen Messbereiches liegt. Die Hersteller von Messinstrumenten sollten die Messgenauigkeit auch in diesen erweiterten Bereichen angeben.

**Tabelle 3 – Standardklimabedingungen zur Bestimmung der Zeitkonstanten der Messwertaufnehmer**

| Standardklimagröße \ Messung der Einstellzeit der Messwertaufnehmer | $t_a$   | $\bar{t}_r$ | $p_a$      | $v_a$   |
|---|---------|-------------|------------|---|
| Lufttemperatur  |         | $= t_a$     | irgendeine | < 0,15 m/s                                    |
| Mittlere Strahlungstemperatur                                       |         | $\bar{t}_r$ | irgendeine | < 0,15 m/s                                    |
| Absolute Luftfeuchte  | = 20 °C | $= t_a$     |            | Ist entsprechend dem Messverfahren vorzugeben |
| Luftgeschwindigkeit   | = 20 °C | $= t_a$     | irgendeine |   |
| Flächenstrahlungstemperatur   | = 20 °C | $= t_a$     | irgendeine | < 0,15 m/s                                    |
| Oberflächentemperatur   | = 20 °C | $= t_a$     | irgendeine | < 0,15 m/s                                    |

**Tabelle 4 – Kriterien für eine homogene und stabile Umgebung**

| Messgröße                      | Klasse C<br>(Behaglichkeitsbedingungen)<br>Faktor X | Klasse S<br>(thermische Belastung)<br>Faktor X |
|--------------------------------|---|--|
| Lufttemperatur                 | 3   | 4  |
| Mittlere Strahlungstemperatur  | 2   | 2  |
| Strahlungstemperaturasymmetrie | 2   | 3  |
| Mittlere Luftgeschwindigkeit   | 2   | 3  |
| Wasserdampfdruck               | 2   | 3  |

ANMERKUNG Die Abweichung zwischen jeder Messgröße und ihrem Mittelwert muss geringer sein als der Wert, der sich durch Multiplikation der erforderlichen Messgenauigkeit (entsprechend Tabelle 2) und dem entsprechenden Faktor X dieser Tabelle ergibt.

**Tabelle 5 – Anordnung der Messwertaufnehmer bei Messung der Klimagrößen**

| Anordnung der Messwertaufnehmer | Gewichtungsfaktoren von Messungen zur Berechnung der Mittelwerte |          |                            |          | Empfohlene Höhe (Anhaltswerte) |         |
|---------------------------------|--|----------|----------------------------|----------|--------------------------------|---------|
|                                 | Homogenes Umgebungsklima   |          | Heterogenes Umgebungsklima |          | Sitzend                        | Stehend |
|                                 | Klasse C   | Klasse S | Klasse C                   | Klasse S |                                |         |
| Kopfhöhe                        |  |          | 1                          | 1        | 1,1 m                          | 1,7 m   |
| Unterleibshöhe                  | 1  | 1        | 1                          | 2        | 0,6 m                          | 1,1 m   |
| Knöchelhöhe                     |  |          | 1                          | 1        | 0,1 m                          | 0,1 m   |

## **Anhang A** (informativ)

### **Messung der Lufttemperatur**

#### **A.1 Einleitung**

Bei der Untersuchung der Wärmeübertragung zwischen Mensch und Umgebung durch Konvektion ist die Lufttemperatur in Betracht zu ziehen. Die Messung dieser Größe erscheint zwar häufig als einfach, kann aber zu beträchtlichen Fehlern führen, wenn nicht gewisse Maßnahmen ergriffen werden.

#### **A.2 Grundsätze für die Temperaturmessung**

Eine Temperatur wird über die Messung physikalischer Größen, wie Länge von festen Körpern, Volumen von Flüssigkeiten, elektrischer Widerstand, elektromotorische Kraft, die stetige Funktionen sind, erfasst.

Unabhängig von der gemessenen Größe kann ein Messwertaufnehmer nur die Temperatur messen, die er selbst hat; diese Temperatur kann aber von der zu messenden Temperatur des Fluids (z. B. Luft) abweichen.

#### **A.3 Anwendungshinweise für Messung mit einem Thermometer**

##### **A.3.1 Minderung des Strahlungseinflusses**

Es ist darauf zu achten, dass das Thermometer nicht der Strahlung benachbarter Wärmequellen ausgesetzt wird, da die dann gemessene Temperatur nicht die wirkliche, sondern eine zwischen der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur liegende Temperatur darstellt.

Folgende Maßnahmen mindern den Strahlungseinfluss auf das Thermometer:

- a) Reduzierung des Emissionsgrades des Messwertaufnehmers, durch Anwendung eines polierten Messwertaufnehmers, wenn dieser aus Metall ist, oder durch Aufbringen eines reflektierenden Farbanstrichs, wenn der Messwertaufnehmer aus einem Isolierstoff besteht.
- b) Minderung der Differenz zwischen den Temperaturen von Messwertaufnehmer und umgebenden Wänden. Da sich die Temperatur der Wände des umschließenden Raums nicht ändern lässt, werden ein oder mehrere reflektierende Schirme zwischen Messwertaufnehmer und Wänden angeordnet. Auf diese Weise ist der Messwertaufnehmer von einer Wand umgeben, die mit zunehmender Anzahl von Schirmen allmählich die Temperatur des Messwertaufnehmers annimmt. Dieses Verfahren zum Abschirmen des Messwertaufnehmers hat sich als wirksam erwiesen und lässt sich einfach durchführen.

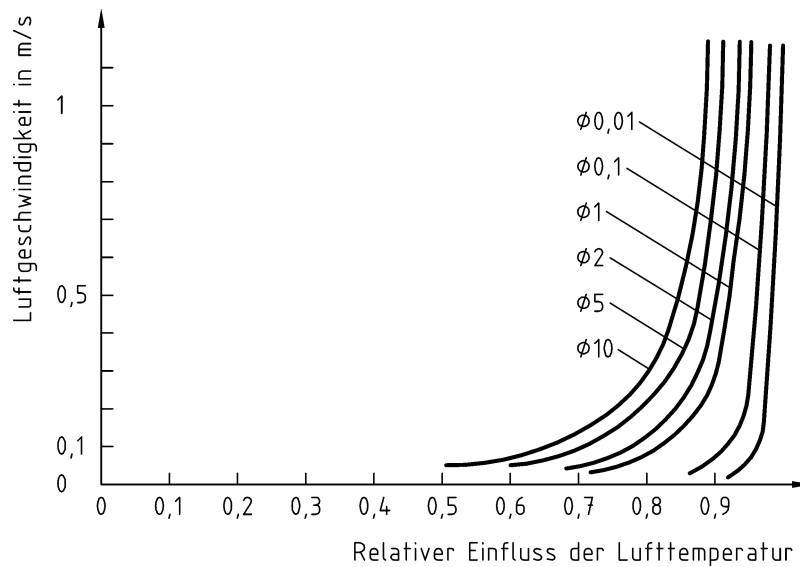
Die Schirme lassen sich aus dünnem, reflektierenden (0,1 mm oder 0,2 mm) Metallfolien (z. B. Aluminium-Folien) herstellen. Werden die Schirme nicht zwangsbelüftet, ist der Abstand zwischen dem Messwertaufnehmer und dem am nächsten angeordneten Schirm so zu wählen, dass die Luftzirkulation durch natürlich Konvektion nicht behindert wird.

- c) Erhöhung des Wärmeübertragungskoeffizienten durch Konvektion, durch Erhöhung der Geschwindigkeit der den Messwertaufnehmer umgebenden Luft über eine Zwangsbelüftung (mittels mechanischem oder elektrischem Ventilator) und durch Verringerung der Größe des Messwertnehmers (Thermistor, Thermoelement).

Bild A.1 zeigt den Zusammenhang zwischen der Luftgeschwindigkeit, der Größe des Messwertaufnehmers und dem relativen Einfluss der Luft- und der Strahlungstemperatur bei einem ungeschützten Lufttemperatur-Messwertaufnehmer. Die gemessene Temperatur kann dabei ausgedrückt werden als  $X \cdot t_a + (1 - X) \cdot t_r$ , wobei X der relative Einfluss der Lufttemperatur ist. Das Bild A.1 zeigt einen signifikanten Einfluss sowohl der Größe des Messwertaufnehmers (Durchmesser) als auch der Luftgeschwindigkeit. Das Bild basiert auf Wärmeaustauschberechnungen einer Kugel (Anhang B). Dabei wird angenommen, dass das Emissionsvermögen des Messwertaufnehmers 0,95 beträgt.

BEISPIEL Beträgt der Durchmesser des Messwertaufnehmers 1 mm und die Luftgeschwindigkeit 0,15 m/s, so ergibt sich für die Temperatur des Messwertaufnehmers  
 $= 0,85 t_a + 0,15 t_r$ .

Das Bild dient dabei lediglich der Information und sollte nicht zur Korrektur einer Messung genutzt werden.



**Bild A.1 – Der relative Einfluss der Lufttemperatur auf die Messwertaufnehmertemperatur bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten und Durchmessern der Messwertaufnehmer (Bei größeren Durchmessern siehe Bild B.1)**

Bei gewissen Messeinrichtungen werden die vorgenannten Maßnahmen zur Verminderung der Beeinflussung des Thermometers durch Strahlung gleichzeitig angewendet, wodurch die Messfehler gering bleiben.

### A.3.2 Thermische Trägheit des Messwertaufnehmers

Wird ein Thermometer einem bestimmten Umgebungsklima ausgesetzt, so zeigt es die Temperatur nicht sofort an. Es benötigt einige Zeit zum Erreichen des Beharrungszustandes.

Eine Messung sollte erst nach einer Zeit durchgeführt werden, die dem des 1,5fachen der Einstellzeit (90 %) der Sonde entspricht.

Ein Thermometer spricht desto schneller an,

- je kleiner und leichter der Messwertnehmer und je geringer die spezifische Wärmekapazität ist;
- je besser der Wärmeaustausch mit der Umgebung ist. Unter diesem Gesichtspunkt verbessert die Erhöhung des konvektiven Wärmeübertragungskoeffizienten am Messwertnehmer, was im Vergleich zu den vorgegebenen Bedingungen bereits ein Vorteil ist, die Einstellzeit des Thermometers im Übergangsbereich.

#### A.4 Arten von Temperaturmesswertaufnehmern

- a) Ausdehnungsthermometer:
  - 1) Flüssigkeitsausdehnungsthermometer (Quecksilber);
  - 2) Stabausdehnungsthermometer.
- b) Elektrische Thermometer:
  - 1) Widerstandsthermometer:
    - Platinwiderstandsthermometer;
    - Thermistor.
  - 2) Thermometer, das auf dem Prinzip der Erzeugung einer elektromotorischen Kraft (Thermoelement) basiert.
- c) Thermomanometer (Prinzip: Änderung des Druckes einer Flüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur).

## Anhang B (informativ)

### Messung der mittleren Strahlungstemperatur

#### B.1 Einleitung

Der Betrag an Wärmestrahlung, der vom menschlichen Körper abgegeben oder aufgenommen wird, ist die algebraische Summe aller Strahlungsflüsse, die von den der Strahlung ausgesetzten Teilen der Körpers mit den verschiedenen in der Umgebung befindlichen Wärmequellen ausgetauscht wird. Jeder dieser Strahlungsflüsse lässt sich aus den Maßen, den thermischen Eigenschaften (Oberflächentemperatur, Emissionskoeffizient) und der Anordnung der Strahlungsquelle und des ihr ausgesetzten Körpers oder Bekleidungssteils ermitteln. Dieses Verfahren verkompliziert sich jedoch und wird zeitaufwändiger in der Durchführung, sobald die Anzahl der Strahlungsquellen zunimmt oder die Quellen kompliziertere Formen haben.

Zweck dieses Anhangs ist es,

- ein Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur aus der Kugeltemperatur und der Temperatur sowie Geschwindigkeit der die Kugel umgebenden Luft zu beschreiben;
- weitere Verfahren zur Messung der mittleren Strahlungstemperatur kurz zu beschreiben;
- Grundsätze für die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur mittels Winkelfaktoren darzulegen.

Das Kugel-Thermometer wird in diesem Anhang als Instrument zur Messung einer Klimagröße, der mittleren Strahlungstemperatur, verwendet.

#### B.2 Messung der mittleren Strahlungstemperatur mittels geschwärzter Hohlkugel

##### B.2.1 Beschreibung des Kugel-Thermometers

Das Kugel-Thermometer besteht aus einer geschwärzten Kugel, in deren Mittelpunkt sich ein Thermometer (z. B. Quecksilberthermometer, Thermoelement, Widerstandsthermometer) befindet.

Die Kugel kann theoretisch jeden beliebigen Durchmesser haben; da nach den zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur verwendeten Formeln diese vom Kugeldurchmesser abhängen, wird allgemein ein Durchmesser von 0,15 m zur Verwendung mit diesen Formeln empfohlen.

Es ist zu beachten, dass der Einfluss von Lufttemperatur und -geschwindigkeit umso größer ist, je kleiner der Kugeldurchmesser ist, wodurch sich die Genauigkeit der Messung verringert.

Um die Absorption der von den Wänden des umgebenden Raumes ausgehenden Strahlung durch die Kugeloberfläche sicherzustellen, muss diese geschwärzt sein, entweder elektrochemisch oder mittels eines mattschwarzen Farbanstrichs.

##### B.2.2 Grundsätze für die Messung

Die Kugel wird in dem Raum angeordnet, in dem die mittlere Strahlungstemperatur  $\bar{T}_r$  gemessen werden soll. Unter der Wirkung des Wärmeaustausches durch Strahlung von den Wärmequellen im Raum und des Wärmeaustausches durch Konvektion erreicht die Kugel ein thermisches Gleichgewicht.

Mit Hilfe der Kugeltemperatur im thermischen Gleichgewicht lässt sich  $\bar{T}_r$  bestimmen.

Mit dem Thermometer im Innern der Kugel kann deren mittlere Temperatur gemessen werden. Denn die Temperatur an der Innenfläche der Kugel und die Lufttemperatur direkt außerhalb der Kugel sind praktisch gleich der mittleren Außentemperatur der Kugel.

ANMERKUNG Im Folgenden werden die Begriffe „Kugeltemperatur“ und „Temperatur des Messwertnehmers in der Kugel“ als gleichbedeutend behandelt.

Das thermische Gleichgewicht zwischen Kugel und Umgebung wird durch die Gleichung

$$q_r + q_c = 0 \quad (1)$$

beschrieben.

Dabei ist

$q_r$  Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen den Wänden und der Kugel, in Watt je Quadratmeter;

$q_c$  Wärmeaustausch durch Konvektion zwischen der Kugel und der umgebenden Luft, in Watt je Quadratmeter.

Der durch die mittlere Strahlungstemperatur gekennzeichnete Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen den Wänden und der Kugel wird wie folgt beschrieben:

$$q_r = \varepsilon_g \sigma (\bar{T}_r^4 - T_g^4) \quad (2)$$

Dabei ist

$\varepsilon_g$  Emissionsgrad der geschwärzten Kugel;

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} / (\text{m}^2 \text{K}^4)$ ];

$\bar{T}_r$  mittlere Strahlungstemperatur, in Kelvin;

$T_g$  Kugeltemperatur, in Kelvin.

Der Wärmeaustausch durch Konvektion zwischen der Kugel und der umgebenden Luft wird wie folgt beschrieben:

$$q_c = h_{cg} (T_a - T_g) \quad (3)$$

Dabei ist

$h_{cg}$  Koeffizient für den Wärmeaustausch durch Konvektion im Bereich der Kugel, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin.

Bei natürlicher Konvektion ist

$$h_{cg} = 1,4 \left( \frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}$$

bei erzwungener Konvektion ist

$$h_{cg} = 6,3 \frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}}$$

Dabei ist

$D$  Kugeldurchmesser, in Meter;

$v_a$  Luftgeschwindigkeit im Bereich der Kugel, in Meter je Sekunde.

Bei einem Umgebungsklima Typ C ist derjenige Koeffizient des Wärmeaustausches durch Konvektion zu wählen, der den höchsten Wert ergibt. Bei einem Umgebungsklima Typ S kann entweder in gleicher Weise verfahren werden, oder es ist der Koeffizient für erzwungene Konvektion direkt heranzuziehen.

## EN ISO 7726:2001 (D)

Die Wärmebilanz der geschwärzten Kugel lässt sich im Gleichgewicht wie folgt ausdrücken:

$$\varepsilon_g \sigma (\bar{T}_r^4 - T_g^4) + h_{cg} (T_a - T_g) = 0 \quad (4)$$

Die mittlere Strahlungstemperatur ergibt sich zu

$$\bar{T}_t = 4 \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma} (T_g - T_a)} \quad (5)$$

Bei natürlicher Konvektion ergibt sich  $\bar{t}_r$  zu

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \times 10^8}{\varepsilon_g} \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (6)$$

Daraus folgt für eine Normkugel mit  $D = 0,15$  m und  $\varepsilon_g = 0,95$  (mattschwarz gestrichen):

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 0,4 \times 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (7)$$

Bei erzwungener Konvektion ergibt sich  $\bar{t}_r$  zu:

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times v_a^{0,6}}{\varepsilon_g \times D^{0,4}} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (8)$$

und für die Normkugel zu:

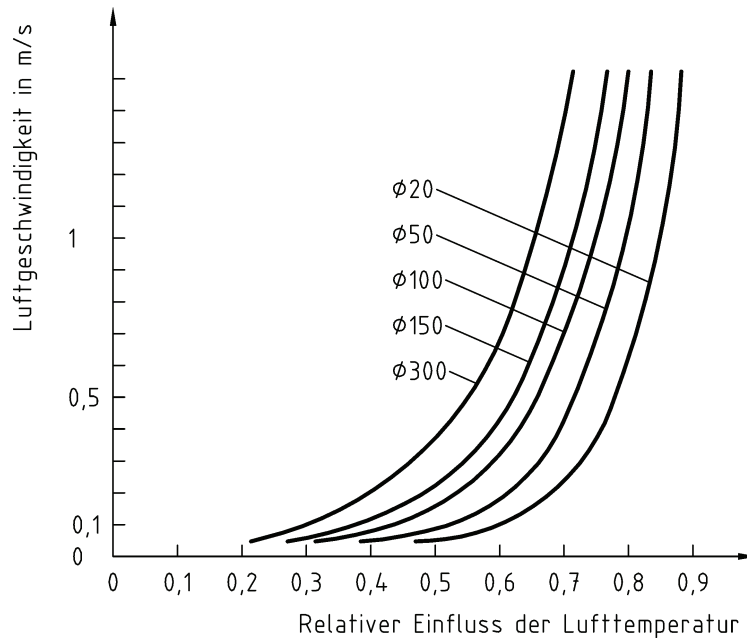
$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \times v_a^{0,6} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (9)$$

In der Praxis dürfte diese Gleichung am häufigsten zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur angewendet werden. Sie gilt jedoch nur für eine Normkugel bei erzwungener Konvektion.

Bild B.1 zeigt den relativen Einfluss der Luft- und mittleren Strahlungstemperatur auf die Kugeltemperatur.

BEISPIEL Bei einem Kugeldurchmesser von 100 mm und einer Luftgeschwindigkeit von 0,35 m/s ergibt sich die Kugeltemperatur aus  $t_g = 0,6 t_a + 0,4 \bar{t}_r$ .





**Bild B.1 – Der relative Einfluss von Lufttemperatur,  $t_a$ , und mittlerer Strahlungstemperatur,  $\bar{t}_r$ , auf die Kugeltemperatur bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten und Durchmessern der Kugel**

BEISPIELE Folgende Ergebnisse wurden in einem Umgebungsklima mit einer Normkugel ermittelt:

$$t_g = 55 \text{ °C}$$

$$t_a = 30 \text{ °C}$$

$$v_a = 0,3 \text{ m/s}$$

Der Koeffizient für den Wärmeaustausch im Bereich der Kugel errechnet sich folgendermaßen:

– bei natürlicher Konvektion ist:

$$h_{cg} = 1,4 \left( \frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,4 \left( \frac{55 - 30}{0,15} \right)^{0,25} = 5 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$$

– bei erzwungener Konvektion ist:

$$h_{cg} = 6,3 \left( \frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}} \right) = 6,3 \times \frac{(0,3)^{0,6}}{(0,15)^{0,4}} = 6,5 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$$

Demnach ist der Koeffizient für den Wärmeaustausch bei erzwungener Konvektion anzuwenden.

Die mittlere Strahlungstemperatur ergibt sich nach Gleichung (9) zu:

$$\bar{t}_r = \left[ (55 + 237)^4 + 2,5 \times 10^8 \times v_a^{0,6} (55 - 30) \right]^{1/4} - 237$$

$$\bar{t}_r = 74,7 \text{ °C}$$

Wird die Messung mittels Kugel mit den Parametern

$$D = 0,1 \text{ m}$$

$$\varepsilon_g = 0,95$$

durchgeführt, ist die für die geschwärzte Kugel ermittelte Temperatur 53,2 °C.

## EN ISO 7726:2001 (D)

Dann ergibt sich nach Gleichung (8) die mittlere Strahlungstemperatur zu:

$$\bar{t}_r = \left[ (53,2 + 237)^4 + \frac{1,1(0,3^{0,6})}{0,95(0,10^{0,4})} (53,2 - 30)^4 \right]^{1/4} - 237 = 74,7 \text{ °C}$$

Somit wird ein Wert für die mittlere Strahlungstemperatur des untersuchten Umgebungsklimas erhalten.

### B.2.3 Besondere Hinweise bei Anwendung eines Kugel-Thermometers

**B.2.3.1** Da die von den Wänden eines Raumes ausgehende Strahlung einer der Hauptfaktoren der thermischen Belastung in einer bestimmten Umgebung ist, kann die fehlerhafte Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur zu erheblichen Fehlern bei der Einschätzung dieser Belastung führen. Die in B.2.3.2 bis B.2.3.6 angegebenen Maßnahmen sollten berücksichtigt werden:

**B.2.3.2** Bei heterogener Strahlung sind drei geschwärzte Kugeln zu verwenden. Bei heterogener Strahlung ist die nur an einem einzigen Punkt durchgeführte Messung der Kugeltemperatur für die auf das Messobjekt einwirkende Gesamtstrahlung nicht repräsentativ. Aus diesem Grund müssen geschwärzte Kugeln in den in dieser Norm festgelegten Höhen/Punkten angeordnet werden, und zwar so, dass die von jeder Kugel empfangene Strahlung derjenigen Strahlung möglichst nahe kommt, die von dem entsprechenden Körperteil empfangen wird. Die mittlere Strahlungstemperatur ist dann gleich dem Mittel der Messwerte an festgelegten Punkten, das entsprechend den in dieser Norm definierten Faktoren gewichtet wurde.

**BEISPIEL** Aus den mit drei in Kopf-, Unterleibs- und Knöchelhöhe angeordneten Kugeln gemessenen Temperaturen errechnen sich folgende drei Werte für die mittlere Strahlungstemperatur:

$$\bar{t}_{r1} = 25 \text{ °C}$$

$$\bar{t}_{r2} = 50 \text{ °C}$$

$$\bar{t}_{r3} = 40 \text{ °C}$$

Das Umgebungsklima ist hinsichtlich Strahlung und thermischer Belastung heterogen. Mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren nach Tabelle 4 wird die mittlere Strahlungstemperatur wie folgt errechnet:

$$\bar{t}_r = \frac{1 \times 25 + 2 \times 50 + 1 \times 40}{4} = 41 \text{ °C}$$

Wenn nun die Messung mit nur einer Kugel in Höhe des Unterleibs durchgeführt worden wäre, hätte der Messfehler etwa in der Größenordnung von 9 °C gelegen.

**B.2.3.3** Die Einstellzeit eines Kugel-Thermometers beträgt je nach den physikalischen Eigenschaften der Kugel und der Art des Umgebungsklimas 20 min bis 30 min.

Durch mehrfaches Ablesen der Temperatur lässt sich leicht feststellen, wann sich das thermische Gleichgewicht eingestellt hat.

Wegen seiner großen Trägheit kann das Kugel-Thermometer nicht zur Bestimmung der Strahlungstemperatur in einem Umgebungsklima eingesetzt werden, das sich schnell ändert.

**B.2.3.4** Die Genauigkeit der Messung der mittleren Strahlungstemperatur mittels geschwärzter Kugel kann entsprechend den Werten für die anderen Klimagrößen beträchtlichen Schwankungen unterworfen sein.

Im Einzelfall sollte überprüft werden, ob die erreichte Genauigkeit sich innerhalb des in dieser Norm festgelegten Rahmens bewegt; wenn nicht, ist die ermittelte Genauigkeit anzugeben.

**B.2.3.5** Wegen der Unterschiede in der äußeren Gestalt von Mensch und Kugel kann die Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur mittels Kugel-Thermometer nur näherungsweise erfolgen. Besonders die von einer Decke oder dem Boden kommende Strahlung wird von der Kugel, im Vergleich zu der Strahlung, die ein stehender oder sitzender Mensch empfängt, überbewertet.

Ein Ellipsoid mit den Projektionsflächenfaktoren nach Tabelle B.1 ähnelt in seiner Form den Umrissen eines Menschen mehr. In Tabelle B.1 werden diese Faktoren für einen Menschen, ein Ellipsoid und eine Kugel gegenübergestellt. Der Projektionsflächenfaktor wird schätzungsweise aus dem Verhältnis  $A_{pr}/A_r$  ermittelt, wobei

$A_{pr}$  die in einer Richtung projizierte Fläche und  $A_r$  die gesamte Strahlungsfläche ist. Der Faktor stellt die Beziehung zu den Umrissen eines Menschen oder eines Messwertnehmers her und macht eine Aussage über die relative Bedeutung der Strahlung aus unterschiedlichen Richtungen.

Die Neigung der Ellipsoidachse hängt von der Stellung, die die Person einnimmt, ab. Sie ist senkrecht für eine stehende, um 30° geneigt für eine sitzende und waagrecht für eine liegende Person.

**B.2.3.6** Bei Einsatz des Kugel-Thermometers für kurzwellige Strahlung (z. B. Sonnenstrahlung) muss die Kugel mit einem (z. B. mittelgrauen) Farbanstrich versehen sein, der annähernd das gleiche Absorptionsvermögen für kurzwellige Strahlung hat wie die Außenfläche einer bekleideten Person (außer bei der Messung der Feuchtkugeltemperatur, wo das Absorptionsvermögen bei der Gewichtung der verschiedenen Größen berücksichtigt wird). Der Emissionsgrad des Farbstrichs für langwellige Strahlung sollte etwa 0,95 sein. Alternativ kann die geschwärzte Kugel angewendet und die mittlere Strahlungstemperatur unter Berücksichtigung des Absorptionsvermögens der getragenen Kleidung errechnet werden.

**Tabelle B.1 – Projektionsflächenfaktoren**

|                 |           | Nach oben/nach unten | Nach links/nach rechts | Nach vorn/nach hinten |
|-----------------|-----------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Stehende Person | Mensch    | 0,08                 | 0,23                   | 0,35                  |
|                 | Ellipsoid | 0,08                 | 0,28                   | 0,28                  |
|                 | Kugel     | 0,25                 | 0,25                   | 0,25                  |
| Sitzende Person | Mensch    | 0,18                 | 0,22                   | 0,30                  |
|                 | Ellipsoid | 0,18                 | 0,22                   | 0,28                  |
|                 | Kugel     | 0,25                 | 0,25                   | 0,25                  |

### B.3 Andere Messverfahren

#### B.3.1 Zweikugelradiometer

Dieses Verfahren arbeitet mit zwei Kugeln mit unterschiedlichen Emissionsgraden (die eine geschwärzt, die andere poliert). Wenn diese Kugeln auf die gleiche Temperatur erwärmt werden, kommt es für beide zum gleichen Wärmeverlust durch Konvektion. Da der Emissionsgrad der geschwärzten Kugel höher als derjenige der polierten Kugel ist, kommt es zu einem Unterschied in der Wärmezufuhr zu den beiden Kugeln, der als Maß für die Strahlung dient.

Zur Schätzung der mittleren Strahlungstemperatur müssen der Emissionsgrad und die Temperatur der Messwertaufnehmer bekannt sein.

Die mittlere Strahlungstemperatur ist mit folgender Gleichung zu berechnen:

$$\bar{T}_r^4 = T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma(\epsilon_b - \epsilon_p)} \quad (10)$$

Dabei ist

$\bar{T}_r$  die mittlere Strahlungstemperatur, in Kelvin;

$T_s$  die Temperatur der Messwertaufnehmer, in Kelvin;

$P_p$  die Wärmezufuhr zur polierten Kugel, in Watt je Quadratmeter;

$P_b$  die Wärmezufuhr zur geschwärzten Kugel, in Watt je Quadratmeter;

$\epsilon_p$  der Emissionsgrad der polierten Kugel;

$\epsilon_b$  der Emissionsgrad der geschwärzten Kugel;

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} / (\text{m}^2 \text{K}^4)$ ].

## EN ISO 7726:2001 (D)

Anstelle einer Kugel kann auch ein ellipsoidförmiger Messwertaufnehmer angewendet werden, der den Umrissen der menschlichen Gestalt näher kommt.

### B.3.2 Konstantlufttemperatur-Messwertaufnehmer

Bei diesem Verfahren wird ein Messwertaufnehmer (Kugel, Ellipsoid) auf der Temperatur der umgebenden Luft gehalten. Dadurch findet ein Wärmeverlust durch Konvektion nicht statt, und die erforderliche Zufuhr von Wärme (oder Kühlung) zum Messwertaufnehmer ist gleich dem Verlust (oder Zuwachs) an Strahlungswärme.

Die mittlere Strahlungstemperatur ist mit folgender Gleichung zu berechnen:

$$\bar{T}_r^4 = T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma \varepsilon_s} \quad (11)$$

Dabei ist

$\bar{T}_r$  die mittlere Strahlungstemperatur, in Kelvin;

$T_s$  die Temperatur des Messwertaufnehmers, in Kelvin;

$P_s$  die Wärmezufuhr zur polierten Kugel, in Watt je Quadratmeter;

$\varepsilon_s$  der Emissionsgrad des Messwertaufnehmers;

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} / (\text{m}^2 \text{K}^4)$ ].

## B.4 Verfahren zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur

### B.4.1 Berechnung aus der Temperatur der umgebenden Flächen

Die mittlere Strahlungstemperatur kann berechnet werden aus:

- der Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen;
- dem Winkelfaktor einer Person in Bezug auf die umgebenden Flächen, die von der Form, Größe und der Anordnung der Flächen zur Person abhängt.

Da die meisten Baustoffe einen hohen Emissionsgrad ( $\varepsilon$ ) haben, kann die Reflexion vernachlässigt, d. h. davon ausgegangen werden, dass die Oberflächen des Raumes schwarz sind.

Die folgende Gleichung (12) wird verwendet:

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \quad (12)$$

Dabei ist

$\bar{T}_r$  die mittlere Strahlungstemperatur, in Kelvin;

$T_N$  die Oberflächentemperatur der Fläche N, in Kelvin;

$F_{p-N}$  der Winkelfaktor zwischen einer Person und der Fläche N.

Da die Summe der Winkelfaktoren gleich 1 ist, ist der vierte Exponent der mittleren Strahlungstemperatur gleich dem Mittelwert der Temperaturen der umgebenden Flächen (in der 4. Potenz), die entsprechend der Größe der Winkelfaktoren gewichtet werden.

Die Winkelfaktoren ( $F_{p-N}$ ) können für rechteckige Flächen entsprechend Bildern B.2 bis B.5 abgeschätzt werden. Die Winkelfaktoren können auch mittels der in Bild B.6 angegebenen Gleichung berechnet werden. Dabei gilt für die Bilder B.2 bis B.5:  $AC$  identisch  $alc$  und  $BC$  identisch  $b/c$ . In den Bildern B.2 bis B.5 wird jeweils ein bestimmter Abstand zwischen Oberfläche und betrachteter Person angenommen. Bei Fußböden oder anderen Oberflächen, bei denen der Abstand zu der Person gering ist, werden die Winkelfaktoren in den Bildern B.2 bis B.5 unterschätzt. Für typische Innenraumbedingungen sind die Auswirkungen auf die mittlere Strahlungstemperatur in der Regel jedoch geringer als 1 K.

Bei nur geringen Unterschieden in der Temperatur der Flächen des umgebenden Raumes kann Gleichung (12) vereinfacht werden zu:

$$\bar{T}_r = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_N F_{p-N} \quad (13)$$

Die mittlere Strahlungstemperatur wird hier als der Mittelwert der Temperaturen der umgebenden Flächen, gewichtet nach der Größe der entsprechenden Winkelfaktoren, errechnet. Gleichung (13) führt immer zu einer etwas niedrigeren mittleren Strahlungstemperatur als Gleichung (12); der Unterschied ist oft jedoch nur gering. So ist zum Beispiel, wenn die eine Hälfte der Flächen ( $F_{p-N} = 0,5$ ) eine Temperatur hat, die 10 K höher ist als die der anderen Hälfte, die Differenz in den nach den Gleichungen (12) und (13) ermittelten Werten für die mittlere Strahlungstemperatur lediglich 0,2 °C. Bei großen Temperaturunterschieden jedoch ergibt sich bei Anwendung von Gleichung (13) ein erheblicher Fehler. Beträgt der Temperaturunterschied im vorgenannten Beispiel 100 K, wird die mittlere Strahlungstemperatur nach Gleichung (13) um etwa 10 K zu niedrig berechnet.

#### B.4.2 Berechnung auf der Grundlage der Flächenstrahlungstemperatur

Die mittlere Strahlungstemperatur kann berechnet werden aus

- der Flächenstrahlungstemperatur  $t_{pr}$  in sechs Raumrichtungen (siehe Anhang C);
- den Projektionsflächenkoeffizienten für eine Person für die gleichen sechs Richtungen.

Die Koeffizienten für eine sitzende und eine stehende Person sind in Tabelle 5 für sechs Richtungen angegeben: nach oben (1), nach unten (2), nach links (3), nach rechts (4), nach vorn (5), nach hinten (6).

Die mittlere Strahlungstemperatur kann dann aus den sechs gemessenen Werten berechnet werden, indem diese mit den entsprechenden Faktoren aus Tabelle B.1 gewichtet addiert und das Resultat durch die Summe der Projektionsflächenfaktoren dividiert wird. Für sitzende Personen bedeutet dies z. B.:

$$\bar{t}_r = \frac{0,18(t_{pr}[\text{oben}] + t_{pr}[\text{unten}]) + 0,22(t_{pr}[\text{rechts}] + t_{pr}[\text{links}]) + 0,30(t_{pr}[\text{vorne}] + t_{pr}[\text{hinten}])}{2(0,18 + 0,22 + 0,30)}$$

Entsprechend gilt für stehende Personen:

$$\bar{t}_r = \frac{0,08(t_{pr}[\text{oben}] + t_{pr}[\text{unten}]) + 0,23(t_{pr}[\text{rechts}] + t_{pr}[\text{links}]) + 0,35(t_{pr}[\text{vorne}] + t_{pr}[\text{hinten}])}{2(0,08 + 0,23 + 0,35)}$$

Dabei ist

$\bar{t}_r$  mittlere Strahlungstemperatur;

$t_{pr}$  Flächenstrahlungstemperatur.

Ist die räumliche Orientierung der Person nicht genau bestimmbar, können die mittleren Projektionsflächenfaktoren für die rechts/links- und vorne/hinten-Orientierung eingesetzt werden.

Die Gleichungen vereinfachen sich dann wie folgt:

$$\text{Sitzend } \bar{t}_r = 0,13(t_{pr}[\text{oben}] + t_{pr}[\text{unten}]) + 0,185(t_{pr}[\text{rechts}] + t_{pr}[\text{links}]) + t_{pr}[\text{vorne}] + t_{pr}[\text{hinten}]$$

$$\text{Stehend } \bar{t}_r = 0,06(t_{pr}[\text{oben}] + t_{pr}[\text{unten}]) + 0,220(t_{pr}[\text{rechts}] + t_{pr}[\text{links}]) + t_{pr}[\text{vorne}] + t_{pr}[\text{hinten}]$$

## B.5 Andere Größen zur Beschreibung des Wärmestrahlungsaustausches

### B.5.1 Allgemeines

Einige Instrumente messen die Strahlung in Watt je Quadratmeter. Dieser Abschnitt zeigt, wie dieses Maß in die mittlere oder Flächenstrahlungstemperatur umgewandelt werden kann. Um den flächenbezogenen ebenen Strahlungsfluss bei Wärmestrahlungsquellen in der Stahl- und Glasindustrie, beim Einsatz von Gasheizungssystemen in kalten Lagerhallen und bei der Sonneneinstrahlung in Gebäude zu beschreiben, wird die gerichtete Bestrahlungsstärke (in Watt je Quadratmeter) gemessen und angegeben.

### B.5.2 Absolute Bestrahlungsstärke

Die absolute Bestrahlungsstärke ist die grundlegende physikalische Größe zur Beschreibung der Energiefreisetzung durch Strahlung.

Die ausgestrahlte Energie einer Oberfläche hängt von ihrer absoluten Temperatur ab. Die absolute Bestrahlungsstärke ist definiert als die gesamte emittierte Strahlungsenergie in einer Richtung pro Einheit Oberfläche und ergibt sich aus:

$$E_{\text{abs}} = \sigma \varepsilon_s T^4$$

Dabei ist

$\varepsilon_s$  Emissionsvermögen der Oberfläche (dimensionslos);

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} / (\text{m}^2 \text{K}^4)$ ];

$T$  Temperatur der Oberfläche, in Kelvin.

### B.5.3 Effektive Bestrahlungsstärke

Eine häufig eingesetzte Größe zur Messung und Beschreibung der Strahlungsaufnahme einer Person aus einer gegebenen Umgebung ist die effektive Bestrahlungsstärke ( $e_{\text{eff}}$ ). Sie wird in Watt pro Quadratmeter Oberfläche angegeben ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Die effektive Bestrahlungsstärke ist definiert als der Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen einer Person und den umgebenden Wänden. Die mittlere Temperatur der Körperoberfläche wird dabei mit  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , das Emissionsvermögen des menschlichen Körpers mit 0,95 angenommen.

Mit diesen Werten kann man die mittlere Strahlungstemperatur wie folgt berechnet werden:

$$\bar{t}_r = (t_b + 237) \left( 1 + 2,146 \times 10^{-3} \times E_{\text{eff}} \right)^{0,25} - 237$$

Dabei ist

$\bar{t}_r$  mittlere Strahlungstemperatur, in Grad Celsius;

$t_b$  die als Bezug angenommene mittlere Temperatur der Körperoberfläche, in Grad Celsius;

$E_{\text{eff}}$  die mittlere effektive Bestrahlungsstärke in Watt pro Quadratmeter Oberfläche, gemessen aus allen sechs Raumrichtungen.

Diese Gleichung erlaubt auch die Umrechnung der effektiven Bestrahlungsstärke bei anderen Bezugstemperaturen der Körperoberfläche.

In gleicher Weise kann die Flächenstrahlungstemperatur  $t_{\text{pr}}$  aus der in einer Richtung gemessenen effektiven Bestrahlungsstärke berechnet werden:

$$t_{\text{pr}} = (t_b + 237) \times \left( 1 + 2,146 \times 10^{-3} \times E_{\text{eff}} \right)^{0,25} - 237$$

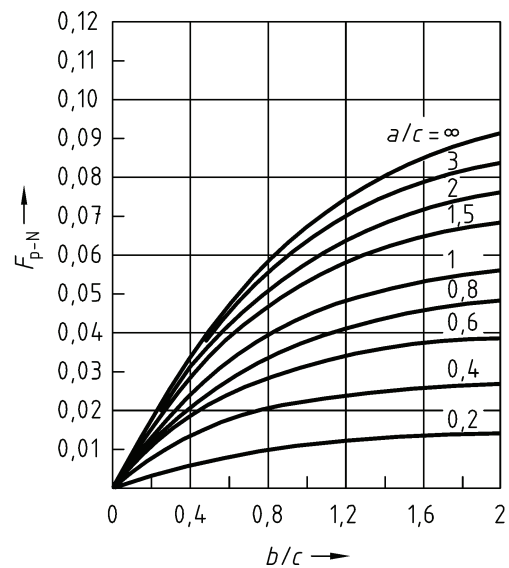
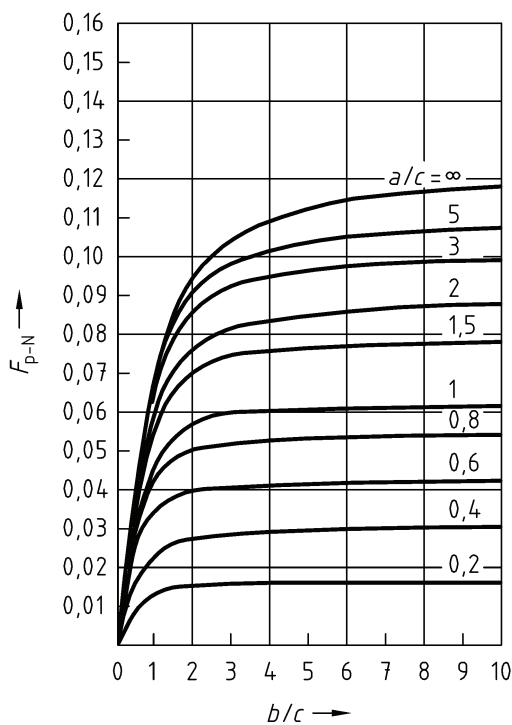
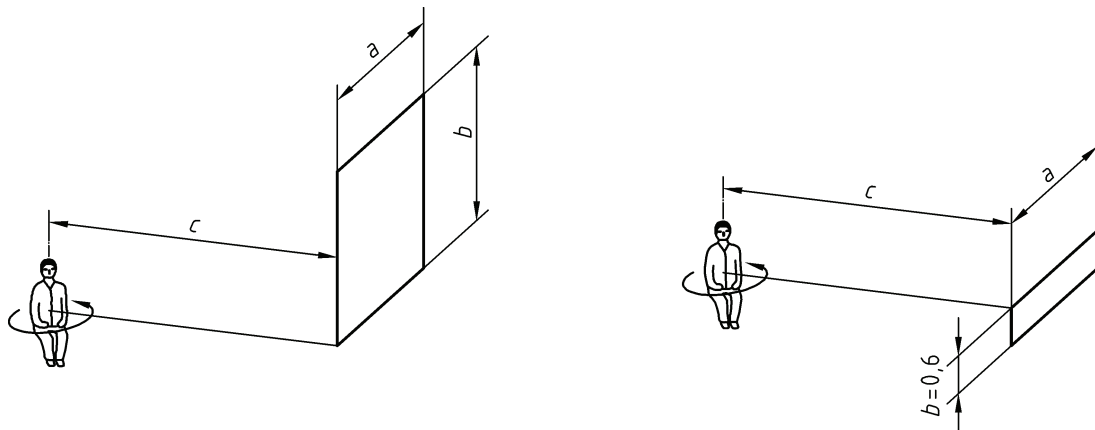
Dabei ist

$t_{pr}$  mittlere Strahlungstemperatur, in Grad Celsius;

$t_b$  die als Bezug angenommene mittlere Temperatur der Körperoberfläche, in Grad Celsius;

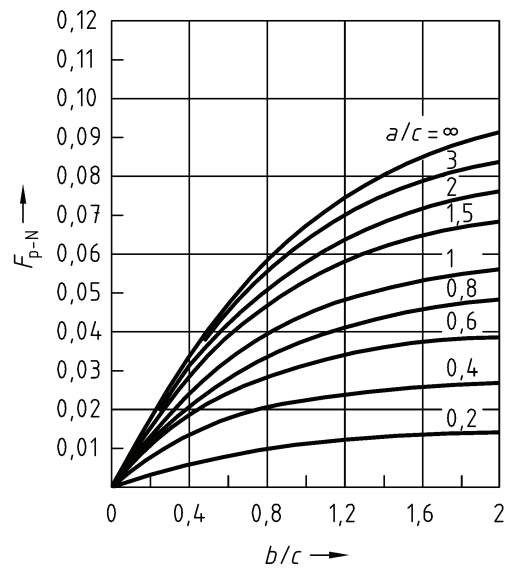
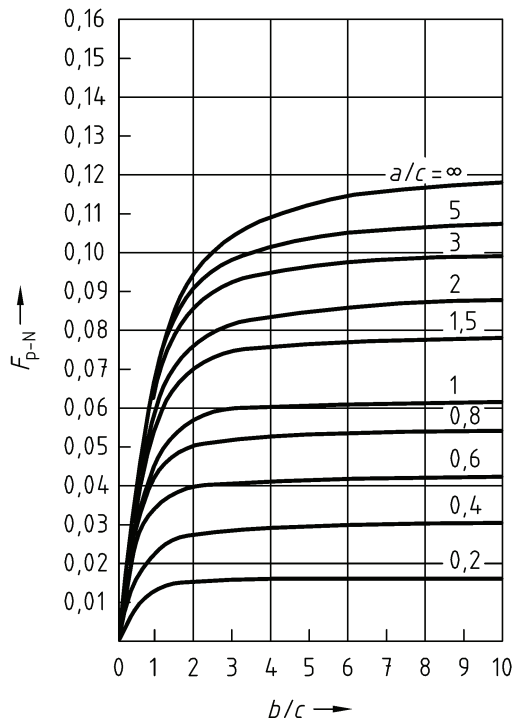
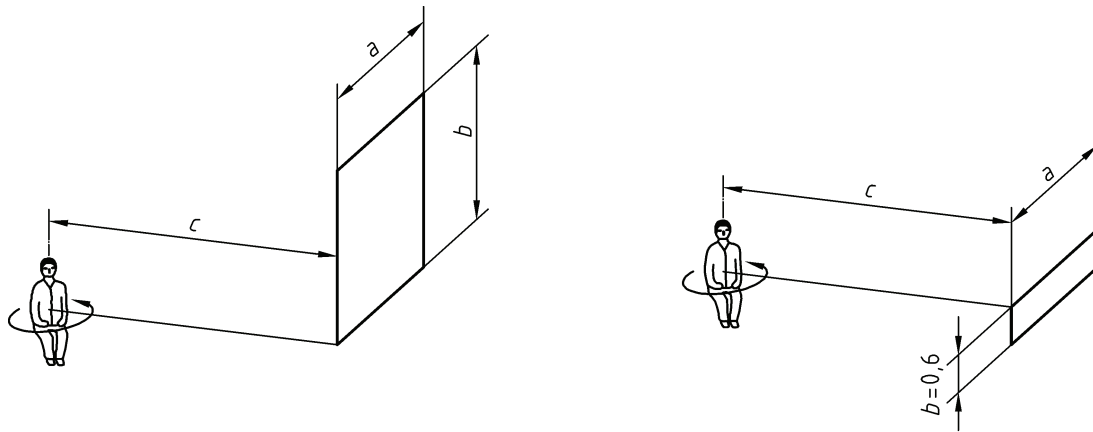
$E_{eff}$  effektive Bestrahlungsstärke in Watt pro Quadratmetern Oberfläche, gemessen in eine Richtung.

Ebenso kann, wenn die mittlere bzw. Flächenstrahlungstemperatur bekannt sind, mit den zuvor angegebenen Gleichungen die entsprechende effektive Bestrahlungsstärke berechnet werden.



**Bild B.2 – Mittelwert des Winkelfaktors zwischen einer sitzenden Person und einer senkrechten rechteckigen Fläche (oberhalb oder unterhalb ihres Mittelpunkts angeordnet), mit Drehung der Person um ihre senkrechte Achse (gilt, wenn zwar die Position, aber nicht die Blickrichtung der Person bekannt ist)**

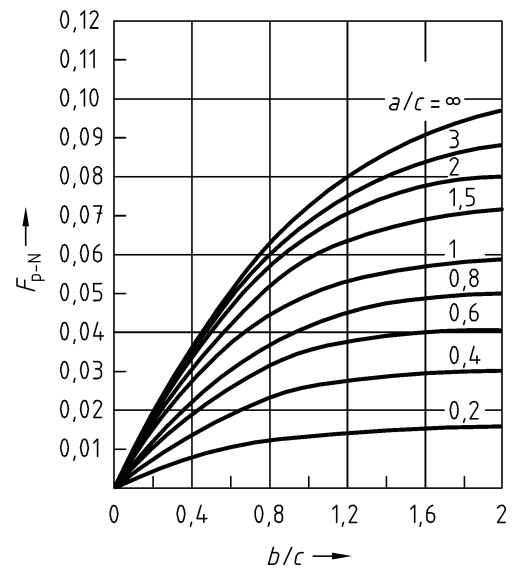
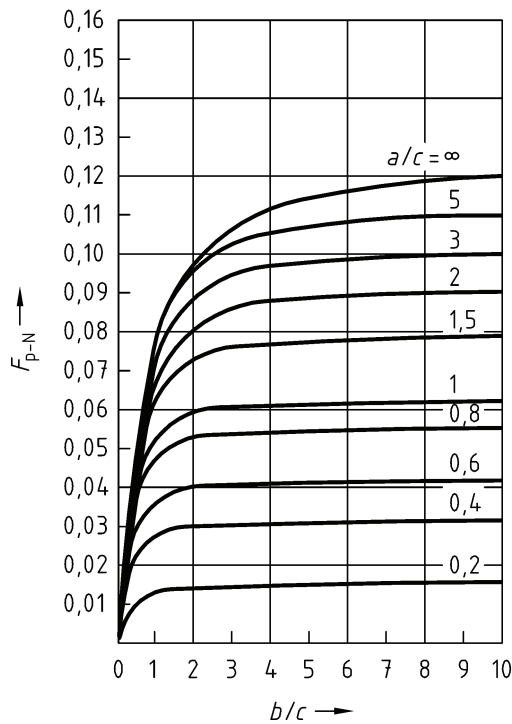
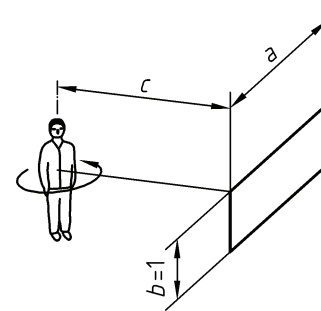
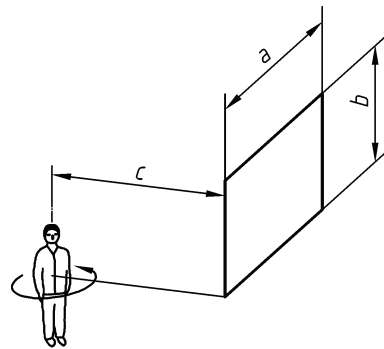
BEISPIEL  $a = 4 \text{ m}$ ;  $b = 3 \text{ m}$ ;  $c = 5 \text{ m}$ ;  $b/c = 0,6$ ;  $a/c = 0,8$ ;  
 $F_{p-a} = 0,029$



**Bild B.3 – Mittelwert des Winkelfaktors zwischen einer sitzenden Person und einer waagerechten rechteckigen Fläche (an der Decke oder am Fußboden angeordnet), mit Drehung der Person um ihre senkrechte Achse (gilt, wenn zwar die Position, aber nicht die Blickrichtung der Person bekannt ist)**

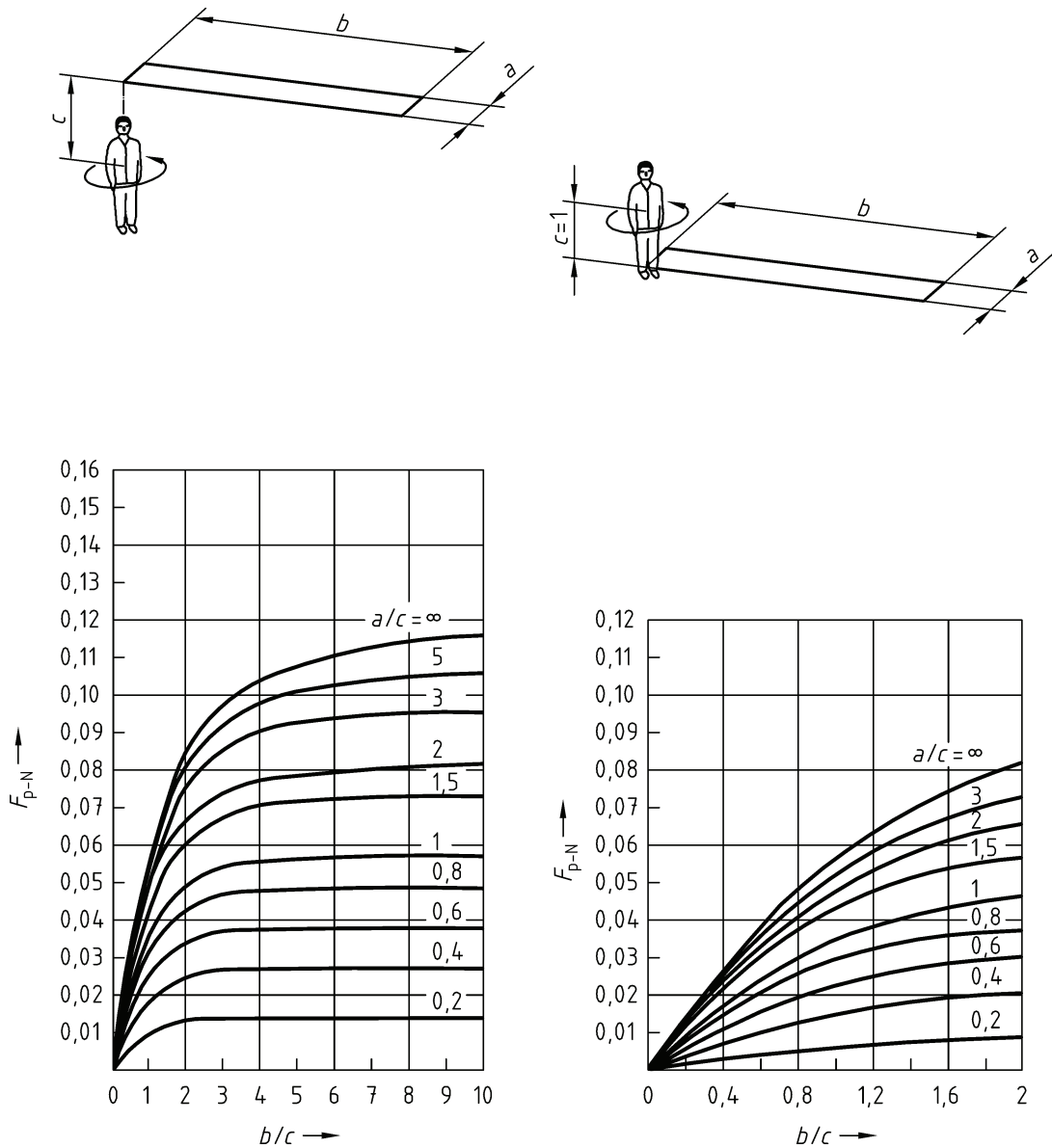
BEISPIEL  $a = 3 \text{ m}$ ;  $b = 6 \text{ m}$ ;  $c = 2 \text{ m}$ ;  $b/c = 3,0$ ;  $a/c = 1,5$   
 $F_{p-a} = 0,067$





**Bild B.4 – Mittelwert des Winkelfaktors zwischen einer stehenden Person und einer senkrechten rechteckigen Fläche (oberhalb oder unterhalb ihres Mittelpunkts angeordnet), mit Drehung der Person um ihre senkrechte Achse (gilt, wenn zwar die Position, aber nicht die Blickrichtung der Person bekannt ist)**

BEISPIEL  $a = 4,5 \text{ m}$ ;  $b = 2,0 \text{ m}$ ;  $c = 3,0 \text{ m}$ ;  $b/c = 0,67$ ;  $a/c = 1,5$   
 $F_{p-a} = 0,047$



**Bild B.5 – Mittelwert des Winkelfaktors zwischen einer stehenden Person und einer waagerechten rechteckigen Fläche (an der Decke oder am Fußboden angeordnet), mit Drehung der Person um ihre senkrechte Achse (gilt, wenn zwar die Position, aber nicht die Blickrichtung der Person bekannt ist)**

BEISPIEL  $a = 1,0 \text{ m}$ ;  $b = 15 \text{ m}$ ;  $c = 1,5 \text{ m}$ ;  $b/c = 10$ ;  $a/c = 0,67$   
 $F_{p-a} = 0,039$

$$\text{Winkelfaktor} = F_{\max} (1 - e^{-(a/c)/\tau}) (1 - e^{-(b/c)/\gamma})$$

Hierbei ist:

$$\tau = A + B (a/c)$$

$$\gamma = C + D (b/c) + E (a/c)$$

|   | $F_{\max}$ | $A$   | $B$   | $C$   | $D$   | $E$   |
|---|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sitzende Person, Bild B.2<br>senkrechte Oberflächen: Wand, Fenster    | 0,118      | 1,216 | 0,169 | 0,717 | 0,087 | 0,052 |
| Sitzende Person, Bild B.3<br>waagerechte Oberflächen: Fußboden, Decke | 0,116      | 1,396 | 0,130 | 0,951 | 0,080 | 0,055 |
| Stehende Person, Bild B.4<br>senkrechte Oberflächen: Wand, Fenster    | 0,120      | 1,242 | 0,167 | 0,616 | 0,082 | 0,051 |
| Stehende Person, Bild B.5<br>waagerechte Oberflächen: Fußboden, Decke | 0,116      | 1,595 | 0,128 | 1,226 | 0,046 | 0,044 |

**Bild B.6 – Gleichungen für Berechnungen des Winkelfaktors**

## Anhang C (informativ)

### Messung der Flächenstrahlungstemperatur

#### C.1 Einleitung

In verschiedenen Umgebungsklimata kann der Mensch einer asymmetrischen Wärmestrahlung ausgesetzt sein. Zur Beurteilung dieser Asymmetrie greift man auf den Begriff der Strahlungstemperaturasymmetrie  $\Delta t_{pr}$  zurück, die die Differenz zwischen den Flächenstrahlungstemperaturen ( $t_{pr}$ ) auf den gegenüberliegenden Seiten eines kleinen ebenen Elements ist (siehe 4.1.3).

Im Folgenden wird ein Verfahren zur Messung der Flächenstrahlungstemperatur und der Strahlungstemperaturasymmetrie mittels eines Effektivradiometers beschrieben. Es werden außerdem zwei weitere Messverfahren vorgestellt sowie ein Verfahren zur Berechnung der Flächenstrahlungstemperatur und der Strahlungstemperaturasymmetrie.

#### C.2 Messung der Flächenstrahlungstemperatur

##### C.2.1 Aus einer reflektierenden und einer absorbierenden Scheibe bestehender erwärmter Messwertaufnehmer

Die Flächenstrahlungstemperatur kann mittels eines erwärmten Messwertaufnehmers aus einer reflektierenden (vergoldeten) Scheibe und einer absorbierenden (mattschwarz angestrichenen) Scheibe gemessen werden. Die reflektierende Scheibe gibt ihre Wärme fast vollständig durch Konvektion, die schwarze Scheibe durch Konvektion und Strahlung ab. Werden beide Scheiben auf die gleiche Temperatur gebracht, so ist die Wärmezufuhrdifferenz zu den beiden Scheiben gleich der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen der absorbierenden Scheibe und der Umgebung.

Die Flächenstrahlungstemperatur ergibt sich dann aus Gleichung (14)

$$T_{pr}^4 = T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma(\epsilon_b - \epsilon_p)} \quad (14)$$

Dabei ist

$T_{pr}$  die Flächenstrahlungstemperatur, in Kelvin;

$T_s$  die Temperatur der Scheiben, in Kelvin;

$P_p$  die Wärmezufuhr zur reflektierenden Scheibe, in Watt je Quadratmeter;

$P_b$  die Wärmezufuhr zur absorbierenden Scheibe, in Watt je Quadratmeter;

$\epsilon_p$  der Emissionsgrad der reflektierenden Scheibe;

$\epsilon_b$  der Emissionsgrad der absorbierenden Scheibe;

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} / (\text{m}^2 \text{K}^4)$ ].

### C.2.2 Konstantlufttemperaturscheibe

Bei diesem Verfahren wird ein kleines Flächenelement auf der Temperatur der umgebenden Luft gehalten. Ein Wärmeverlust durch Konvektion findet nicht statt, und die erforderliche Wärme-(Kälte-)zufuhr zum Flächenelement ist gleich dem Wärmeaustausch (Kälteaustausch) durch Strahlung.

Die Flächenstrahlungstemperatur ergibt sich dann zu

$$T_{\text{pr}}^4 = T_{\text{s}}^4 + \frac{P_{\text{s}}}{\sigma \varepsilon_{\text{s}}} \quad (15)$$

Dabei ist

$T_{\text{pr}}$  die Flächenstrahlungstemperatur, in Kelvin;

$T_{\text{s}}$  die Temperatur der Scheibe, in Kelvin;

$P_{\text{s}}$  die Wärmezufuhr (-abfuhr) zur Scheibe, in Watt je Quadratmeter;

$\varepsilon_{\text{s}}$  der Emissionsgrad der Scheibe;

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ].

## C.3 Verfahren zur Messung der Flächenstrahlungstemperatur und der Asymmetrie unter Einsatz des Effektivradiometers

### C.3.1 Beschreibung des Effektivradiometers

Das Effektivradiometer besteht aus einem kleinen schwarzen Flächenelement mit einem integrierten Wärmestrommesser zwischen den beiden Seiten des Elements. Der effektive Wärmestrom zwischen den beiden Seiten des Flächenelements ist gleich dem Unterschied in der übertragenen Strahlungswärme im Bereich der beiden Seiten des Flächenelements.

Zur Verminderung des Einflusses der Luftgeschwindigkeit ist das Flächenelement im Allgemeinen von einer dünnen Kugel aus Polyethylen umgeben.

Gelegentlich ist das Radiometer auch mit einem Adapter für eine gerichtete Messung ausgerüstet.

### C.3.2 Messung

Die Effektivstrahlung ergibt sich nach Gleichung (16) zu:

$$P = \sigma (T_{\text{pr1}}^4 - T_{\text{pr2}}^4) \quad (16)$$

Dabei ist

$P$  die gemessene Effektivstrahlung in Watt je Quadratmeter;

$T_{\text{pr1}}$  die Flächenstrahlungstemperatur, Seite 1, in Kelvin;

$T_{\text{pr2}}$  die Flächenstrahlungstemperatur, Seite 2, in Kelvin;

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ].

## EN ISO 7726:2001 (D)

Die Strahlungstemperaturasymmetrie ist gleich:

$$\Delta t_{pr} = T_{pr1} - T_{pr2} \quad (17)$$

Dabei ist

$\Delta t_{pr}$  die Strahlungstemperaturasymmetrie, in Kelvin.

Diese Größe wird nicht direkt mit einem Effektivradiometer gemessen, sondern berechnet.

Gleichung (16) lässt sich auch wie folgt darstellen:

$$P = 4\sigma T_n^3 (T_{pr1} - T_{pr2}) \quad (18)$$

Beim linearen Wärmeübertragungskoeffizienten ( $4\sigma T_n^3$ ) ist  $T_n = 0,5 (T_{pr1} + T_{pr2})$  oder bei weiterer Approximation gleich der Temperatur des Effektivradiometers. Mit den meisten Effektivradiometern lässt sich  $T_n$  leicht ermitteln.

Folglich ist die Strahlungstemperaturasymmetrie gleich:

$$\Delta t_{pr} = \frac{P}{4\sigma T_n^3} \quad (19)$$

Dabei ist

$\Delta t_{pr}$  die Strahlungstemperaturasymmetrie, in Kelvin.

Der lineare Wärmeübertragungskoeffizient wird beeinflusst durch das Temperaturniveau, das durch  $T_n$  angezeigt wird. Bei einem Temperaturniveau von 20 °C ist der Koeffizient gleich 5,7 W/(m<sup>2</sup> × K) und bei einem Temperaturniveau von 50 °C ist der Koeffizient gleich 7,6 W/(m<sup>2</sup> × K).

Die folgende Gleichung hat nur dann Gültigkeit, wenn Wärmestrahlungsübertragung auf einer Seite des Effektivradiometers ( $P_1$ ) gemessen wird.

$$P_1 = \sigma T_{pr1}^4 - \epsilon_s \sigma T_n^4 \quad (20)$$

Dabei ist

$P_1$  die gemessene Strahlung auf Seite 1, in Watt je Quadratmeter;

$T_{pr1}$  die Flächenstrahlungstemperatur, Seite 1, in Kelvin;

$T_n$  die Temperatur des Effektivradiometers, in Kelvin;

$\epsilon_s$  der Emissionsgrad des Messwertaufnehmers;

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, in Watt je Quadratmeter mal Kelvin hoch vier; [ $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} / (\text{m}^2 \text{K}^4)$ ].

Bei einer schwarz gestrichenen Oberfläche liegt der geschätzte Emissionsgrad bei ungefähr 0,95.

Die Flächenstrahlungstemperatur ergibt sich dann aus:

$$T_{pr1} = \sqrt[4]{0,95 T_n^4 + \frac{P_1}{\sigma}} \quad (21)$$

Zur Bestimmung der Strahlungstemperaturasymmetrie ist es erforderlich, in die entgegengesetzte Richtung zu messen und die entsprechende Flächenstrahlungstemperatur zu berechnen.

## C.4 Verfahren zur Berechnung der Flächenstrahlungstemperatur

Die Flächenstrahlungstemperatur lässt sich aus

- der Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen und
- dem Winkelfaktor eines kleinen Flächenelements zu den umgebenden Flächen (als Funktion der Form, Größe und der relativen Position der Oberfläche zur Person)

errechnen.

Die Strahlungstemperaturasymmetrie bestimmt sich aus der Differenz zwischen der Flächenstrahlungstemperatur in zwei entgegengesetzten Richtungen.

Da die meisten Baustoffe einen hohen Emissionsgrad ( $\epsilon$ ) haben, können Reflexionen vernachlässigt werden, d. h. alle Flächen des umgebenden Raumes können als schwarz angenommen werden.

Die nachstehende Gleichung wird verwendet.

$$T_{pr}^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \quad (22)$$

Dabei ist

$T_{pr}$  die Flächenstrahlungstemperatur, in Kelvin;

$T_N$  die Oberflächentemperatur der Fläche N, in Kelvin;

$F_{p-N}$  der Winkelfaktor eines kleinen Flächenelements zur Fläche N.

Da die Summe der Winkelfaktoren gleich 1 ist, ist die Flächenstrahlungstemperatur hoch vier gleich dem Mittelwert der Temperaturen der umgebenden Flächen (in der 4. Potenz), die entsprechend der Größe der jeweiligen Winkelfaktoren gewichtet werden.

Die Winkelfaktoren ( $F_{p-N}$ ) können nach den Bildern C.1 und C.2 oder C.3 und C.4 für rechteckige Flächen geschätzt werden; im Allgemeinen ist jedoch die Ermittlung von Winkelfaktoren komplizierter.

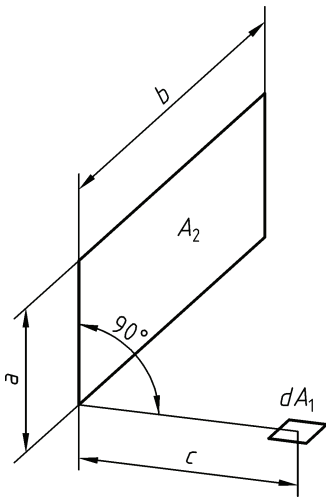
Bei nur geringen Unterschieden in der Temperatur der Flächen eines Raumes kann Gleichung (22) in folgende lineare Form gebracht werden:

$$T_{pr} = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_N F_{p-N} \quad (23)$$

Hier wird die Flächenstrahlungstemperatur als Mittelwert aus den Oberflächentemperaturen ermittelt, die entsprechend den Werten der zugehörigen Winkelfunktionen gewichtet sind.

Gleichung (23) ergibt immer eine etwas geringere Flächenstrahlungstemperatur als Gleichung (22), meistens ist der Unterschied jedoch klein. So ist z. B., wenn eine Hälfte der Flächen ( $N = 0,5$ ) eine Temperatur hat, die 10 K höher ist als die der anderen Hälfte, die Differenz in den nach den Gleichungen (22) und (23) ermittelten Werten für die Flächenstrahlungstemperatur lediglich 0,2 °C. Bei großen Temperaturunterschieden kann sich jedoch bei Verwendung von Gleichung (23) ein erheblicher Fehler ergeben. Beträgt der Temperaturunterschied in o. g. Beispiel 100 K, wird die Flächenstrahlungstemperatur nach Gleichung (23) um etwa 10 K zu niedrig berechnet.

Die Strahlungstemperaturasymmetrie wird dann als Differenz zwischen den Werten für die Flächenstrahlungstemperatur auf den beiden Seiten des kleinen Flächenelements berechnet.

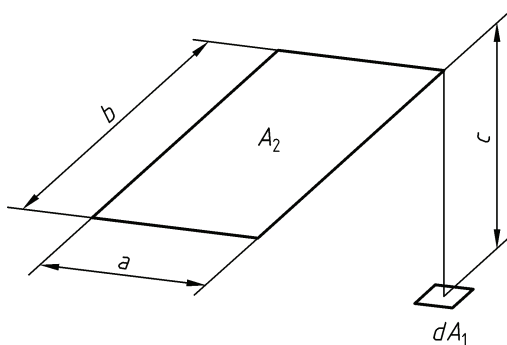


Element mit ebener Oberfläche,  $dA_1$ , und ein Rechteck senkrecht zur Ebene des Elements.

$$X = \frac{a}{b} Y = \frac{c}{b}$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left( \tan^{-1} \frac{1}{Y} - \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

**Bild C.1 – Analytische Gleichung zur Beschreibung des Winkelfaktors für ein kleines Flächenelement senkrecht zu einer rechteckigen Fläche**



Element mit ebener Oberfläche,  $dA_1$ , und ein dazu in einer parallelen Ebene liegendes Rechteck; die Mittelsenkrechte auf dem Element verläuft durch eine Ecke des Rechtecks.

$$X = \frac{a}{c} Y = \frac{b}{c}$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{1+Y^2}} \right)$$

**Bild C.2 – Analytische Gleichung zur Beschreibung des Winkelfaktors für ein kleines Flächenelement parallel zu einer rechteckigen Fläche**



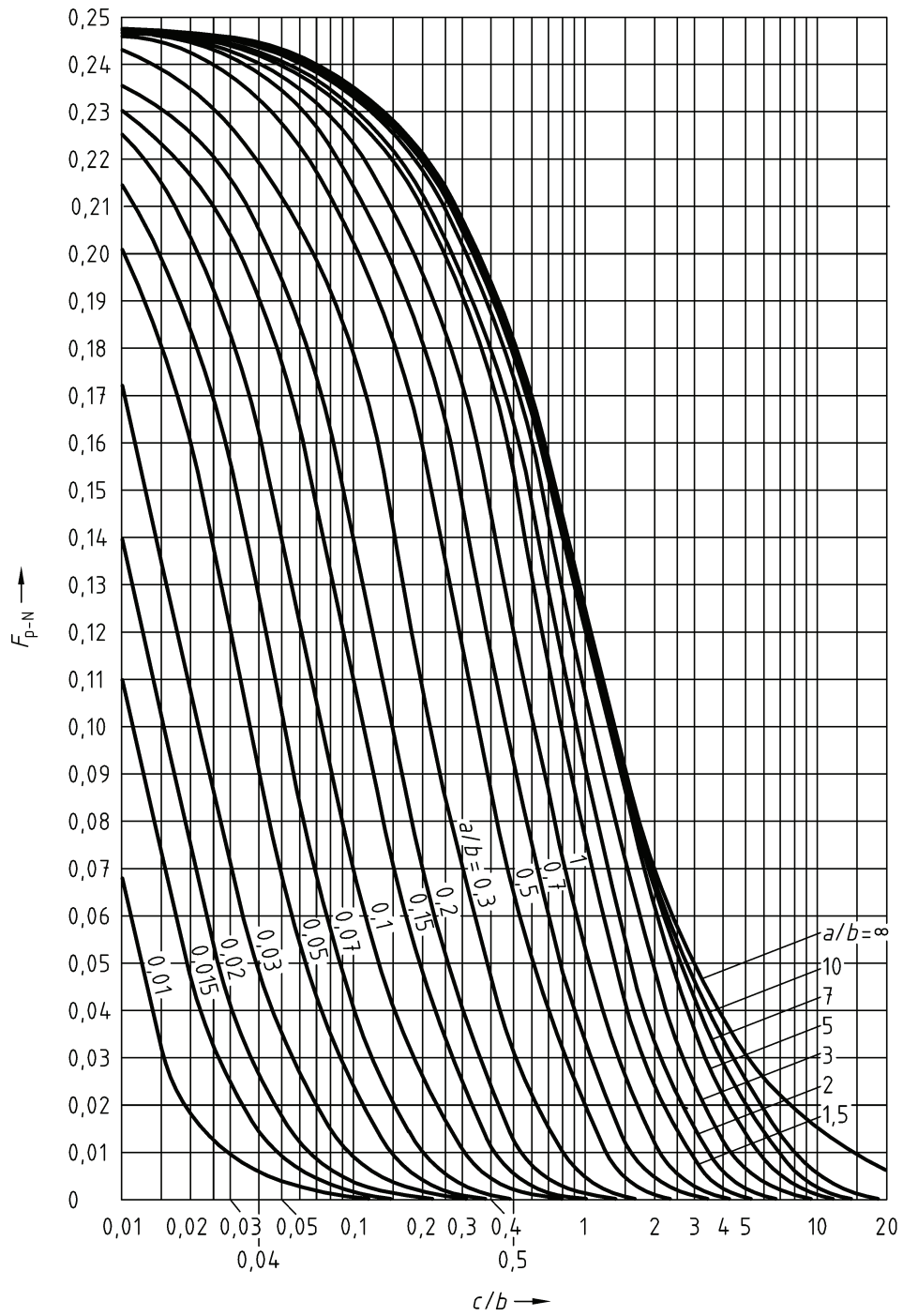
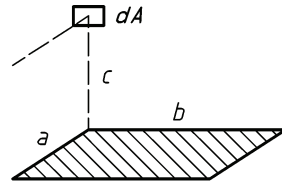


Bild C.3 – Diagramm zur Berechnung des Winkelfaktors für ein kleines Flächenelement senkrecht zu einer rechteckigen Fläche

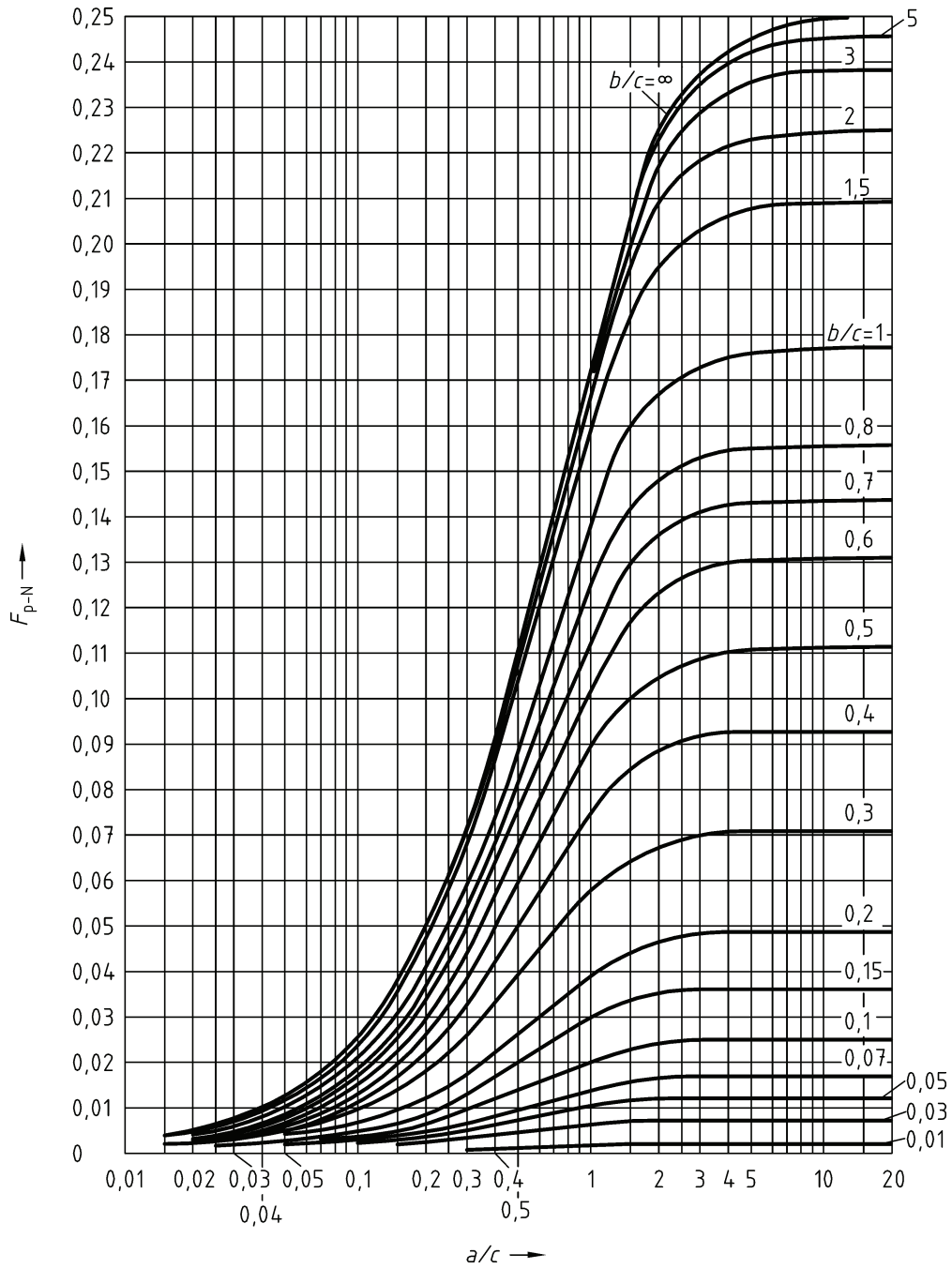
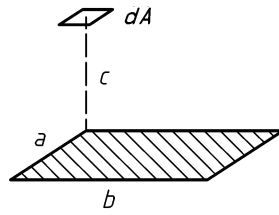


Bild C.4 – Diagramm zur Berechnung des Winkelfaktors für ein kleines Flächenelement parallel zu einer rechteckigen Fläche

## **Anhang D** (informativ)

### **Messung der absoluten Luftfeuchte**

#### **D.1 Einleitung**

Die absolute Luftfeuchte ist bei der Bestimmung der Wärmeübertragung durch Verdunstung von Bedeutung. Eine hohe Luftfeuchte hemmt die Schweißverdunstung und stellt somit eine thermische Belastung für den Menschen dar.

Dieser Anhang beschreibt die Regeln für die Anwendung der folgenden beiden Messgeräte und die dabei zu ergreifenden Maßnahmen:

- Psychrometer;
- Lithiumchloridhygrometer.

Er beschreibt außerdem die wesentlichen Eigenschaften feuchter Luft.

#### **D.2 Thermohygrometrische Eigenschaften feuchter Luft**

##### **D.2.1 Allgemeines**

Feuchte Luft ist eine Mischung mehrerer Gase, die sich in folgende Gruppen einteilen lässt:

- Gase, aus denen trockene Luft besteht (Sauerstoff, Stickstoff usw.) und
- Wasserdampf.

Bei einer bestimmten Temperatur kann Luft nur eine bestimmte Menge Wasserdampf aufnehmen. Bei weiterer Erhöhung des Wasserdampfgehalts kondensiert er. Mit steigender Lufttemperatur erhöht sich auch die Wasserdampfmenge, die die Luft aufnehmen kann.

##### **D.2.2 Absolute Luftfeuchte**

###### **D.2.2.1 Einleitung**

Die von der in der Luft vorhandenen Wasserdampfmenge abhängigen Größen dienen zur Beschreibung der absoluten Luftfeuchte des Umgebungsklimas.

Üblicherweise dienen zwei Größen zur Beschreibung der absoluten Luftfeuchte: der Feuchtegehalt und der Partialdruck des Wasserdampfs.

### D.2.2.2 Feuchtegehalt

Der Feuchtegehalt  $W_a$  für eine Probemenge feuchter Luft ist das Verhältnis der Masse an Wasserdampf in der Probe zur Masse der trockenen Luft:

$$W_a = \frac{M_v}{M_a} \quad (24)$$

Dabei ist

$W_a$  der Feuchtegehalt;

$M_v$  die Masse an Wasserdampf;

$M_a$  die Masse an trockener Luft in einer Probe feuchter Luft.

### D.2.2.3 Partialdruck

Der Partialdruck  $p_a$  des Wasserdampfs in feuchter Luft ist der Druck, den der Wasserdampf ausüben würde, wenn er das Volumen der feuchten Luft bei gleicher Temperatur einnähme.

Beide Größen ( $W_a$  und  $p_a$ ) sind über die folgende Beziehung (unter der Annahme, dass die Gase perfekt sind) miteinander verbunden:

$$W_a = 0,6220 \frac{p_a}{P - p_a} \quad (25)$$

Dabei ist

$W_a$  der Feuchtegehalt;

$p_a$  der Partialdruck des Wasserdampfs;

$P$  der atmosphärische Gesamtdruck.

Bei Sättigung wird von Feuchtegehalt bei Sättigung,  $W_{as}$ , und Sättigungsdampfdruck,  $p_{as}$ , gesprochen.

Der Sättigungsdampfdruck  $p_{as}$  verhält sich zur absoluten Temperatur  $T$  des feuchten Luftgemisches wie 1:1.

### D.2.3 Relative Luftfeuchte

Die Größen, die die Zusammensetzung der Luft in Bezug auf den maximalen Wasserdampfgehalt bei einer bestimmten Temperatur angeben, dienen zur Beschreibung der relativen Luftfeuchte des Umgebungsklimas.

Die relative Luftfeuchte  $e$  ist das Verhältnis zwischen dem Partialdruck des Wasserdampfs,  $p_a$ , in feuchter Luft und dem Sättigungsdampfdruck  $p_{as}$  bei der gleichen Temperatur und dem gleichen Gesamtdruck:

$$e = \frac{p_a}{p_{as}} \quad (26)$$

Die relative Feuchte wird oft prozentual mit folgender Beziehung ausgedrückt:

$$RH = 100e$$

Bei der Wärmeübertragung durch Verdunstung zwischen dem Menschen und der Umgebung muss besonders die absolute Luftfeuchte berücksichtigt werden.

### D.2.4 Direkte Bestimmung der thermohygrometrischen Eigenschaften feuchter Luft mit Hilfe eines psychrometrischen Diagramms

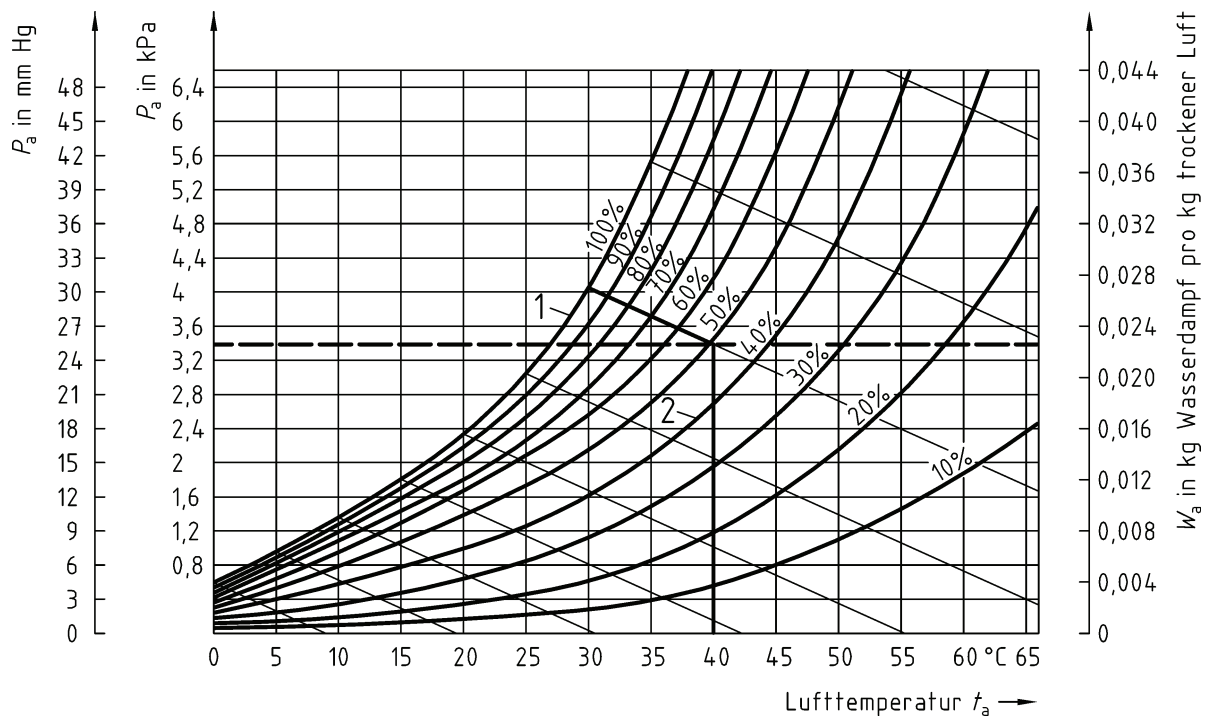
Die wesentlichen Eigenschaften feuchter Luft werden üblicherweise in einem Diagramm, dem psychrometrischen Diagramm, zusammengefasst (siehe Bild D.1). Es hat folgende Koordinaten:

- x-Achse: Lufttemperatur  $t_a$ , in Grad Celsius;
- y-Achse: Partialdruck des Wasserdampfs,  $p_a$ , in Kilopascal.

Eine bestimmte Probe feuchter Luft wird im Diagramm durch einen Punkt dargestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einer bestimmten Temperatur die absolute Luftfeuchte einen bestimmten Wert nicht überschreiten kann, der einer relativen Feuchte von 100 % entspricht und als „Sättigung“ bezeichnet wird.

Die im Diagramm dargestellten thermohygrometrischen Parameter beziehen sich auf einen atmosphärischen Druck von 101,3 kPa. Messungen der Luftfeuchte bei anderen Drücken erfordern entsprechend unterschiedliche Diagramme.

BEISPIEL Atmosphärischer Druck: 1 bar =  $10^5 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ kPa}$ .



**Bild D.1 – Psychrometrisches Diagramm**

Als Beispiel sei eine Probe feuchter Luft gewählt, die einem Schnittpunkt der dicken Linien im Diagramm entspricht und folgende thermohygrometrischen Eigenschaften hat:

- Lufttemperatur:  $T_a = 40 \text{ °C}$ ;
- Partialdruck des Wasserdampfs:  $p_a = 3,6 \text{ kPa}$ ;
- Sättigungsdampfdruck:  $p_{as} = 7,4 \text{ kPa}$ ;
- relative Feuchte:  $e = 0,49$  oder  $\text{RH} = 49 \%$  bzw.  $e = \frac{p_a}{p_{as}} = \frac{3,6}{7,4} = 0,49$ .

## D.3 Bauarten von Hygrometern

### D.3.1 Taupunkthygrometer — Funktionsprinzip

Kondensation von in der Luft enthaltenen Wasserdampf an einem Spiegel, der auf den Taupunkt des Wasserdampf-Luftgemisches abgekühlt wird.

### D.3.2 Leitfähigkeitshygrometer

#### D.3.2.1 Lithiumchloridhygrometer (zur Messung der absoluten Luftfeuchte) – Funktionsprinzip

Bestimmung der absoluten Luftfeuchte durch Messung der Temperaturänderung als Folge einer Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Messwertaufnehmers (siehe D.5).

#### D.3.2.2 Kapazitives Hygrometer (zur Messung der relativen Luftfeuchte) – Funktionsprinzip

Bestimmung der relativen Feuchte durch Messung der Änderung der elektrischen Kapazität des Messwertaufnehmers.

### D.3.3 Absorptionshygrometer (Haarhygrometer) – Funktionsprinzip

Verformung oder Dehnung bestimmter organischer Materialien als Folge der Oberflächenspannung von Wasser in den Poren dieser Materialien.

Dieser Hygrometertyp sollte häufig kalibriert werden.

### D.3.4 Psychrometer – Funktionsprinzip

Kühlung eines Feuchtthermometers durch Verdunstung in einem Luftstrom (siehe D.4).

Die gebräuchlichsten Gleichungen zur Umrechnung von Feuchtigkeitskenngrößen sind in Tabelle D.1 zusammengefasst.

## D.4 Messung der absoluten Luftfeuchte mittels Psychrometrie

### D.4.1 Beschreibung und Grundsätze des Verfahrens

Ein Psychrometer besteht aus zwei Thermometern und einer Einrichtung zu deren Belüftung mit einer Mindest-Luftgeschwindigkeit (siehe Bild D.2). Unter Thermometer wird jede Art von Messwertaufnehmer zur Temperaturmessung wie Quecksilberthermometer, Thermoelement, Widerstandsthermometer usw. verstanden.

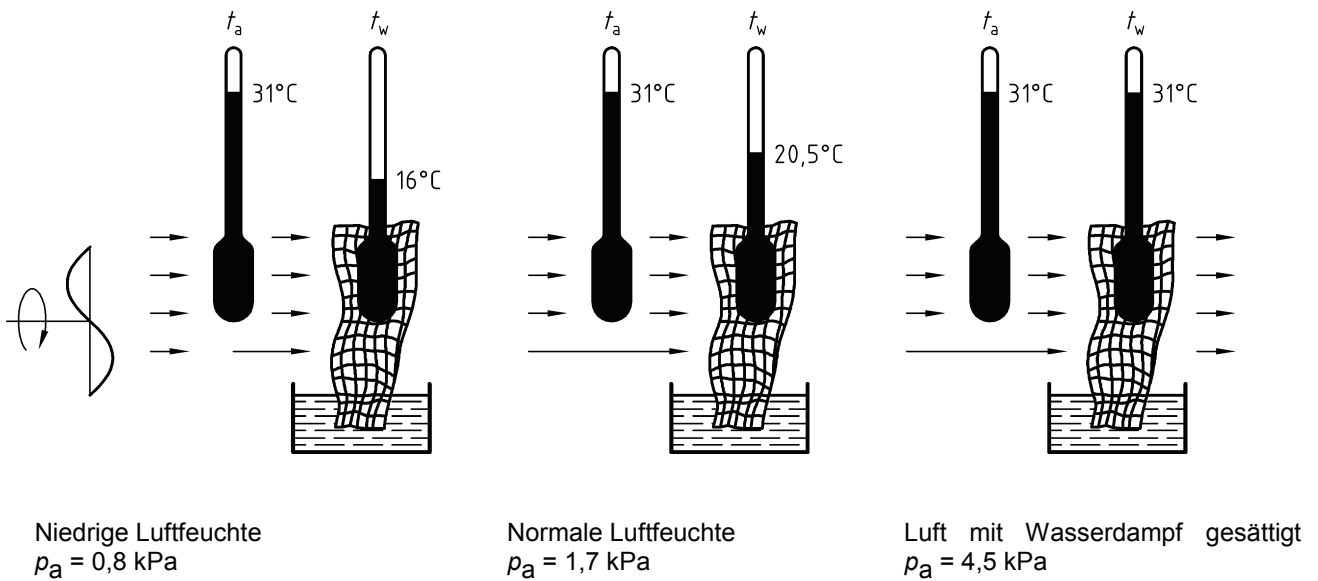
Das erste Thermometer ist ein gewöhnliches Thermometer, das die Lufttemperatur  $t_a$ , die Trockentemperatur, anzeigt, während das zweite Thermometer zur Anzeige der Feuchttemperatur dient.

Das letztgenannte Thermometer ist mit einem feuchten Strumpf überzogen, der im Allgemeinen aus engmaschigem Baumwollgewebe besteht, und dessen unteres Ende in einen Behälter mit Wasser getaucht ist. Durch Kapillarwirkung steigt das Wasser aus dem Behälter zum Thermometer und verdunstet dann mit einer Geschwindigkeit, die von der Luftfeuchte abhängt. Dabei kommt es zu einer Abkühlung, die desto stärker ist, je trockener die Luft ist (die Abkühlung wird jedoch durch die Wärmeübertragung durch Konvektion begrenzt). Die vom Thermometer, das durch den feuchten Strumpf umgeben ist, angezeigte Temperatur wird als (psychrometrische) Feuchttemperatur  $t_w$  bezeichnet.

Die gemessene trockene und feuchte Temperatur wird zur Bestimmung der absoluten Luftfeuchte angewendet.

Tabelle D.1 – Gleichungen zur Umrechnung von Feuchtigkeitskenngrößen

| Parameter   | Gleichung   | Nr.  | Einheit |
|---|---|------|---------|
| $p_{as}$  | $= 0,611 \times \exp\left(\frac{17,27 t_a}{t_a + 237,3}\right)$                               | *(1) | kPa     |
|   | $= 100 \frac{p_a}{RH}$  | (2)  | kPa     |
| $p_a$   | $- p_{as w} - 6,27 \times 10^{-4} \times (t_a - t_w)$   | *(3) | kPa     |
|   | $= 0,01 \times p_{as} \times RH$  | (4)  | kPa     |
|   | $= \frac{p}{\frac{0,6220}{W_a} + 1}$  | (5)  | kPa     |
| $t_d$   | $= 38 \times \lg\left(\frac{1000 W_a}{4,8}\right)$  | *(6) | °C      |
|   | $= 237,3 \frac{\ln\left(\frac{p_a}{0,611}\right)}{17,27 - \ln\left(\frac{p_a}{0,611}\right)}$ | *(7) | °C      |
| $W_a^{**}$  | $= 4,8 \times 10^{-3} \times 10^{\frac{t_d}{38}}$   | *(8) | kg/kg   |
|   | $= 0,6220 \frac{p_a}{p - p_a}$  | (9)  | kg/kg   |
| RH  | $= 100 \times \frac{p_a}{p_{as}}$   | (10) | %       |
| <p>* Näherungsgleichungen <math>p</math> = atmosphärischer Druck</p> <p>** Das Verhältnis von zwei Massen, <math>W_a</math>, ist eine dimensionslose Größe. Zur richtigen Bestimmung der Größenordnung der Werte wird jedoch dieser Wert durch den Zusatz „kg Wasser je kg trockener Luft“ ergänzt, um auszudrücken, dass die Probe <math>W_a</math> kg Wasser je kg trockene Luft enthält.</p> |   |      |         |



**Bild D.2 – Funktionsprinzip eines Psychrometers**

**D.4.2 Direkte Bestimmung der absoluten Luftfeuchte mit Hilfe eines Psychrometer-Diagramms**

Die absolute Luftfeuchte, die als Partialdruck des Wasserdampfs ausgedrückt wird, ist mit der thermodynamischen Feuchttemperatur durch folgende Beziehung verknüpft:

$$p_a = p_{as,w} - \Delta p(t_a - t_w) \tag{27}$$

Dabei ist

$p_a$  der Partialdruck des Wasserdampfs, der in der gleichen Einheit wie  $p_{as,w}$  und  $p$  angegeben wird;

$t_a$  die Lufttemperatur, in Grad Celsius;

$t_w$  die psychrometrische Feuchttemperatur, in Grad Celsius;

$p$  der atmosphärische Gesamtdruck, in Kilopascal;

$p_{as,w}$  der Sättigungsdampfdruck bei  $t_w$ , in Kilopascal;

$A$  der Psychrometerkoeffizient, in Grad Celsius<sup>-1</sup>.

Es wird empfohlen,  $A = 6,67 \cdot 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$  zu verwenden.

Diese Beziehung lässt sich auch als

$$p_a = A p t_a + A p t_w + p_{as,w} \tag{28}$$

oder

$$p_a = -A p t_a + f(t_w) \tag{29}$$

ausdrücken.

Daher sind in einem Psychrometer-Diagramm, unter der Annahme eines mehr oder weniger konstanten Psychrometerkoeffizienten  $A$ , die Kurven gleicher Feuchttemperatur Geraden parallel mit der Steigung  $(-A_p)$ .



Der Schnittpunkt der Feuchttemperaturgeraden  $t_w$  mit der Senkrechten für die Lufttemperatur  $t_a$  entspricht der untersuchten feuchten Luft und ist dann direkt an der y-Achse abzulesen.

BEISPIEL Es werden die Parameter des vorhergehenden Beispiels angewendet.

$$p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa};$$

$$t_a = 40 \text{ °C};$$

$$t_w = 30 \text{ °C}.$$

Bei Anwendung des Diagramms gelangt man zum folgenden Wert:

$$p_a \approx 3,6 \text{ kPa}.$$

### D.4.3 Anwendungshinweise

#### D.4.3.1 Allgemeines

Die Einfachheit des Verfahrens und des Gebrauchs eines Psychrometers sollte nicht zur Unterlassung gewisser Maßnahmen führen, die bei Nichtbefolgung zu erheblichen Messfehlern führen können.

**D.4.3.2** Das Feuchtthermometer sollte ausreichend belüftet werden, im Allgemeinen mit einer Luftgeschwindigkeit von 4 m/s bis 5 m/s.

Eine Erneuerung der Luft ist entweder durch schnelle Bewegung des Feuchtthermometers per Hand (Schleuderpsychrometer) oder durch Ansaugen von Luft mittels elektromotorisch oder mechanisch angetriebener Mikroturbine oder Kleinventilator möglich. Im Allgemeinen erfordern Temperatur-Messwertaufnehmer mit kleinen Abmessungen eine geringere Mindestluftgeschwindigkeit.

Die Psychrometerfeuchttemperatur sollte nicht mit der natürlichen Feuchttemperatur verwechselt werden, die mittels eines mit einem feuchten Strumpf überzogenen, natürlich belüfteten Thermometers gemessen wird.

**D.4.3.3** Trocken- und Feuchtthermometer sollten gegen Wärmestrahlung abgeschirmt werden.

Ist die mittlere Strahlungstemperatur höher oder niedriger als die Lufttemperatur, sollte das Thermometer für die Lufttemperatur mit einer oder mehreren Abschirmungen geschützt werden.

Da die Feuchttemperatur ebenfalls von der mittleren Strahlungstemperatur abhängen kann, muss auch das Feuchtthermometer abgeschirmt sein.

**D.4.3.4** Der Strumpf um das Feuchtthermometer sollte über dessen messwertaufnehmenden Teil hinausreichen, um Fehler aufgrund von Wärmeleitung innerhalb des Thermometers auszuschließen.

Andernfalls nimmt der messwertaufnehmende Teil des durch Verdunstung gekühlten Thermometers die Feuchttemperatur an, der nicht gekühlte, unempfindliche Teil die Lufttemperatur. Dadurch kommt es zwischen den beiden Teilen zu einem Wärmeaustausch durch Wärmeleitung, was Fehler bei der Messung der Feuchttemperatur zur Folge hat.

Der feuchte Strumpf sollte das Thermometer daher weit genug abdecken, um eine ausreichende Kühlung über den messwertaufnehmenden Teil hinaus sicherzustellen.

Tabelle D.2 gibt empfohlene Strumpflängen für die verschiedenen Thermometer an.

**Tabelle D.2 – Feuchtthermometer; Länge des vom feuchten Strumpf umhüllten Teils des Thermometers**

Maße in Millimeter

| Thermometertyp         | Durchmesser | Strumpflänge          |
|------------------------|-------------|-----------------------|
| Quecksilberthermometer | alle        | 20 über dem Reservoir |
| Thermoelement          | 1,2         | 60                    |
|                        | 0,45        | 30                    |
|                        | 0,12        | 10                    |

**D.4.3.5** Zum Befeuchten des Strumpfs sollte destilliertes Wasser verwendet werden, da der Wasserdampfdruck von Salzlösungen geringer ist als der von reinem Wasser.

**D.4.3.6** Der Strumpf des Feuchtthermometers sollte so beschaffen sein, dass das Wasser leicht durch Kapillarwirkung zirkulieren kann, insbesondere bei niedriger absoluter Luftfeuchte.

In diesem Fall erfordert die verstärkte Verdunstung von Wasser am Thermometer einen verstärkten Nachfluss an Wasser aus dem Behälter. Verunreinigte Strümpfe sind zu ersetzen.

**D.4.3.7** Der Barometerdruck muss, wenn er von 101,3 kPa merklich (2 %) abweicht, gemessen werden.

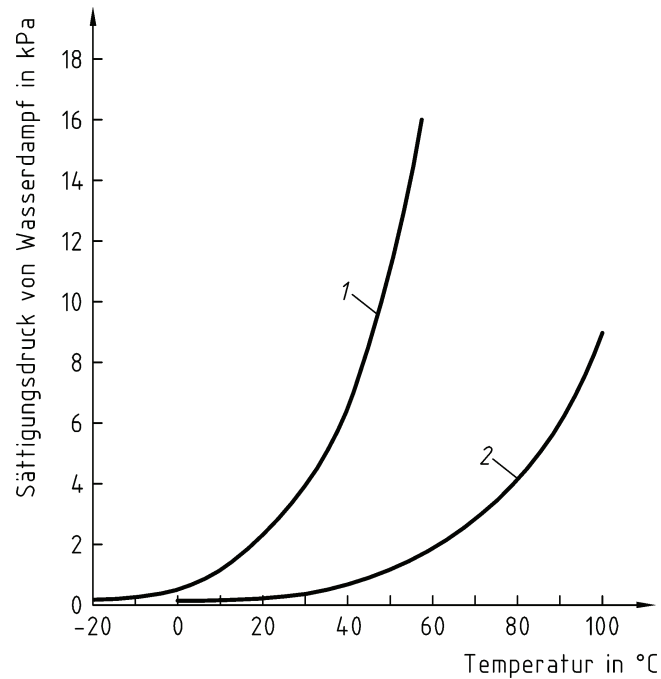
Da die Verdunstung vom atmosphärischen Druck (variabel insbesondere als Funktion der Höhe über NN) abhängt, müssen Barometerdruck-Diagramme angewendet werden.

## **D.5 Messung der Feuchte mittels Lithiumchloridhygrometer**

### **D.5.1 Beschreibung und Grundsätze des Verfahrens**

Die Messung der Feuchte mittels Lithiumchloridhygrometer basiert auf den beiden folgenden Erscheinungen:

- a) Der Sättigungsdruck über gesättigten hygroskopischen Salzlösungen, insbesondere Lithiumchloridlösungen, ist kleiner als derjenige über Wasser gleicher Temperatur (siehe Bild D.3).
- b) Die elektrische Leitfähigkeit von Lithiumchloridlösung ist erheblich höher als die des Salzes in fester Form.

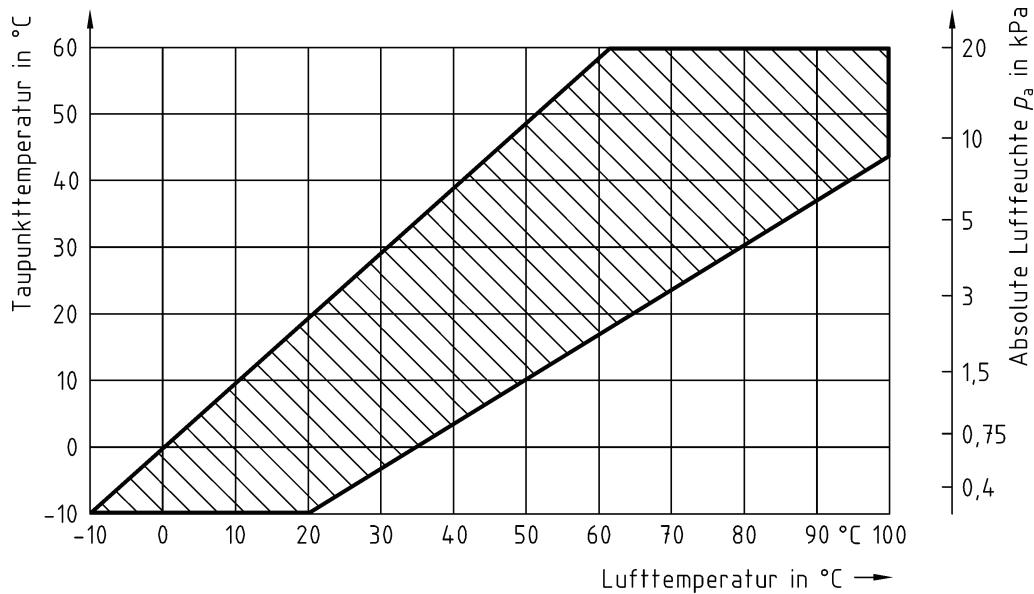


**Bild D.3 – Sättigungsdruck von Wasserdampf über Wasser und über einer Standard-Lithiumchloridlösung in Abhängigkeit von der Temperatur**

Die unter a) beschriebene Erscheinung hat zur Folge, dass der Taupunkt über einer gesättigten Lithiumchloridlösung, wie der Dampfdruck, in weiten Bereichen über der Umgebungstemperatur liegt und deshalb durch Erwärmen der Lösung erreicht werden kann.

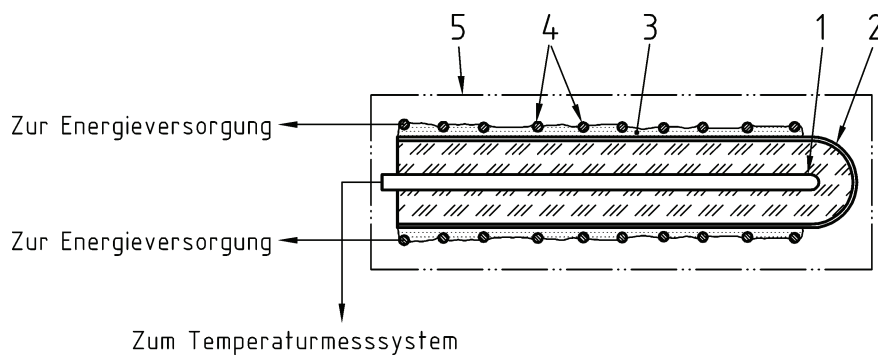
Die unter b) beschriebene Erscheinung ermöglicht eine Erwärmung und Einstellung der Erwärmungsleistung mit einfachen Mitteln.

Bild D.4 zeigt den Messbereich für die Messung der absoluten Feuchte mit Lithiumchloridhygrometern.



**Bild D.4 – Messbereich von Lithiumchloridhygrometern bei der Messung der absoluten Luftfeuchte**

Der wirksame Teil des Messwertaufnehmers (siehe Bild D.5) besteht im Allgemeinen aus einem dünnen Isolierrohr, das von mit Lithiumchloridlösung getränkter Glaswolle umhüllt ist. Zwei nebeneinander verlaufende Elektroden aus Edelmetall werden spiralförmig über die Glaswolle geführt, das Ganze wiederum ist mit einer gelochten Schutzhülle überzogen. Die beiden Elektroden sind mit einer Niedervoltwechselfspannungsquelle verbunden. Durch den Stromfluss erwärmt sich die Lithiumchloridlösung, und das vorher absorbierte Wasser verdampft. Nach dem Verdampfen kristallisiert die Lösung. Dadurch vermindert sich die elektrische Leitfähigkeit und damit auch die Stromstärke erheblich, und die Temperatur sinkt wieder.



**Legende**

- 1 Widerstandsthermometer
- 2 Glasrohr
- 3 mit Lithiumchlorid getränkte Glaswolle
- 4 Elektroden
- 5 perforierte Schutzhülle

**Bild D.5 – Prinzipskizze eines Lithiumchloridhygrometers**

Die Lithiumchloridlösung kann dann den Wasserdampf in der Luft absorbieren, wodurch sich die Leitfähigkeit der Lösung erhöht. Die Stromstärke steigt dann und führt wieder zur Verdampfung des Wassers.

Zwischen dem Wasserdampfgehalt der Luft, der Heizleistung und der Temperatur des Hygrometers stellt sich schnell ein Gleichgewicht ein. Dabei hängt die Gleichgewichtstemperatur, die mit einem Thermometer gemessen wird, ausschließlich vom Wasserdampfdruck der Luft ab, wodurch sich der Taupunkt oder die absolute Luftfeuchte direkt messen lässt. Dies ist einer der Vorteile bei der Anwendung eines Lithiumchloridhygrometers.

## **D.5.2 Anwendungshinweise**

**D.5.2.1** Die Geschwindigkeit der auf das Hygrometer auftreffenden Luft sollte je nach Art der Abschirmung des Messwertaufnehmers einen bestimmten Wert nicht überschreiten, da sonst das Hygrometer zu niedrige Werte anzeigt. In diesem Zusammenhang sind die Herstellerhinweise zu beachten.

**D.5.2.2** Nach Inbetriebnahme des Hygrometers sollte die elektrische Leistung konstant gehalten werden. Nach dem Abschalten des Geräts absorbiert das Lithiumchlorid Wasserdampf aus der Luft, was bei erneuter Inbetriebnahme zu Spannungen in den Elektroden führen kann.

**D.5.2.3** Leitfähige Verunreinigungen (z. B. Staub) auf dem aktiven Teil des Messwertaufnehmers kann zu Verzerrungen der Anzeige führen.

**D.5.2.4** Die Lithiumchloridlösung sollte regelmäßig erneuert werden, wobei auf eine vorhergehende Reinigung des Hygrometers zu achten ist.

**D.5.2.5** Das Ablesen des Hygrometers sollte erst erfolgen, nachdem der Messwertaufnehmer sein thermisches Gleichgewicht erreicht hat. Die Einstellzeit des Lithiumchloridhygrometers liegt bei 6 min.

## Anhang E (informativ)

### Messung der Luftgeschwindigkeit

#### E.1 Einleitung

Bei der Bestimmung der Wärmeübertragung durch Konvektion und Verdunstung am Aufenthaltsort einer Person sollte die Luftgeschwindigkeit Berücksichtigung finden. Im Allgemeinen ist es schwierig, die genaue Luftgeschwindigkeit in Räumen zu bestimmen, da die Luftströmung in der Regel turbulent ist, d. h. die Luftgeschwindigkeit ebenso wie die Windrichtung ändern sich häufig und zufällig. Zur Beschreibung der thermischen Umgebungsbedingungen wird die Luftgeschwindigkeit, d. h. die Höhe des Geschwindigkeitsvektors am Messpunkt betrachtet. Obwohl Studien gezeigt haben, dass Personen verschieden empfindlich auf Luftströme von vorne, hinten, oben, unten und von der Seite reagieren, kann die Anwendung der Luftgeschwindigkeit dadurch erklärt werden, dass sie ihre Richtung häufig nur in einem relativ kleinen räumlichen Winkel ändert.

Drei Eigenschaften von Instrumenten zur Messung der Luftgeschwindigkeit sind daher von Bedeutung:

- die Empfindlichkeit des Messwertaufnehmers hinsichtlich der Strömungsrichtung;
- die Empfindlichkeit des Messwertaufnehmers hinsichtlich Schwankungen der Luftgeschwindigkeit;
- die Fähigkeit des Messinstrumentes, sowohl die mittlere Luftgeschwindigkeit als auch die Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit über ein Messintervall auszuweisen.

#### E.2 Genauigkeit von Luftgeschwindigkeitsmessungen

Die folgenden Faktoren müssen für möglichst genaue Messungen der Luftgeschwindigkeit berücksichtigt werden:

- a) Kalibrierung der Messinstrumente;
- b) Einstellzeit des Messwertaufnehmers und des Instrumentes;
- c) die Messperiode.

Eine genaue Messung der mittleren Geschwindigkeit hängt von der Kalibrierung des Instrumentes ab. Die Messgenauigkeit der Standardabweichung, d. h. der Intensität der Turbulenzen, hängt von der Einstellzeit ab. Ein Gerät mit einer langen Einstellzeit wird keine schnellen Geschwindigkeitsänderungen messen können. Für Messungen eines Luftstroms mit starker Turbulenz und langsamen Geschwindigkeitsänderungen benötigt man eine längere Messzeitperiode als für Luftströme mit einer niedrigen Turbulenz und raschen Geschwindigkeitsänderungen.

#### E.3 Anemometerarten

In der Regel kann die Luftgeschwindigkeit  $v_a$

- entweder mit einer richtungsunempfindlichen Messsonde, die nur von der Höhe der Geschwindigkeit – unabhängig von deren Richtung – beeinflusst wird (Heizkugel);
- oder mittels drei richtungsempfindlichen Messwertaufnehmern, die die Komponenten der Luftgeschwindigkeit in drei zueinander senkrecht stehenden Ebenen messen können. Bezeichnet man diese Komponenten mit  $v_x$ ,  $v_y$  und  $v_z$ , dann ergibt sich die Luftgeschwindigkeit,  $v_a$ , zu:

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Dabei gilt zu beachten, dass eine genaue Messung in einer Richtung in der Praxis sehr schwierig zu realisieren ist.

Im Fall einer gerichteten Luftströmung kann auch eine einzelne richtungsempfindliche Sonde eingesetzt werden (Blatt-Anemometer, Hitzdrahtanemometer usw.).

Die Hauptströmungsrichtung der Luft kann über einen Rauchtest bestimmt werden.

Beispiele für Anemometerarten in Räumen sind:

- a) Flügelradanemometer (richtungsempfindlich);
- b) Hitzdrahtanemometer (richtungsempfindlich);
- c) Pulsdrahtanemometer (richtungsunempfindlich);
- d) Heißkugel- und Thermistoranemometer (richtungsunempfindlich);
- e) Ultraschall-Anemometer (richtungsunempfindlich);
- f) Laser-Doppler-Anemometer (richtungsunempfindlich).

## E.4 Heißkugelanemometer

### E.4.1 Allgemeines

Heißkugelanemometer sind die in der Praxis gebräuchlichste Anemometerart für Luftgeschwindigkeitsmessungen in Räumen.

### E.4.2 Beschreibung und Messprinzip

Wie alle beheizten Messwertaufnehmer zur Messung der Luftgeschwindigkeit beruht das Prinzip des Heißkugelanemometers auf der Messung der Wärmeübertragung zwischen einem erhitzten Feststoff und der Umgebungsluft. Eine der Messung vorausgehende Kalibrierung des Instruments erlaubt eine Umrechnung der Wärmeübertragung in die Luftgeschwindigkeit.

Das Anemometer besteht aus einer elektrisch auf eine die Umgebungslufttemperatur übersteigende Temperatur beheizten Kugel. Das Heizelement verliert vorrangig durch Konvektion Wärme an seine Umgebung.

Das thermische Gleichgewicht des Elements wird wie folgt ausgedrückt:

$$C_p = h_c(t_c - t_a)$$

Dabei ist

$C_p$  die vom Element aufgenommene Heizleistung;

$h_c$  der Wärmeübertragungskoeffizient durch Konvektion zwischen dem Element und der Luft; eine Funktion der Luftgeschwindigkeit;

$t_c$  die Temperatur des Elements;

$t_a$  die Lufttemperatur.

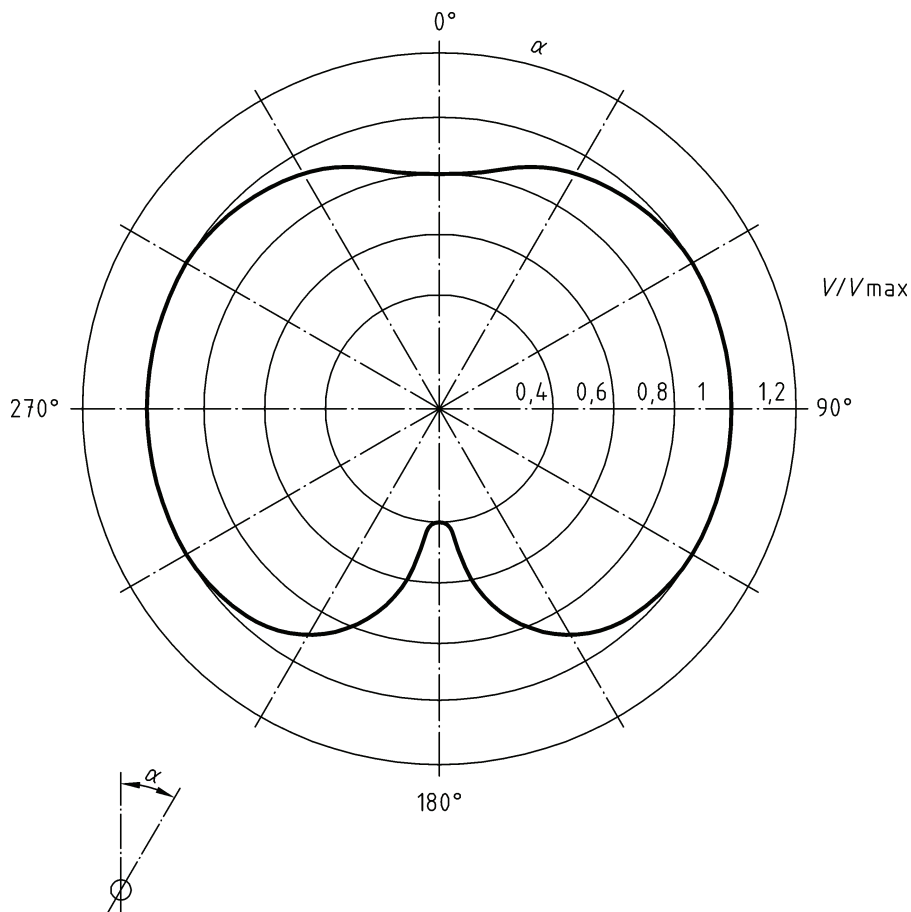
Mit Hilfe der Angaben zur Heizleistung, zur Temperatur des Elements und zur Lufttemperatur kann die Luftgeschwindigkeit berechnet werden, wenn der Wärmeübertragungskoeffizient durch Konvektion berücksichtigt wird.

Das Anemometer sollte demnach zwei Temperatur-Messwertaufnehmer haben, einen zur Messung der Temperatur des Heizelements und einen anderen zur Messung der Lufttemperatur. Vereinfachte Instrumente ohne Lufttemperatur-Messwertaufnehmer können nur bei der Lufttemperatur betrieben werden, für die sie kalibriert worden sind.

### E.4.3 Anwendungshinweise

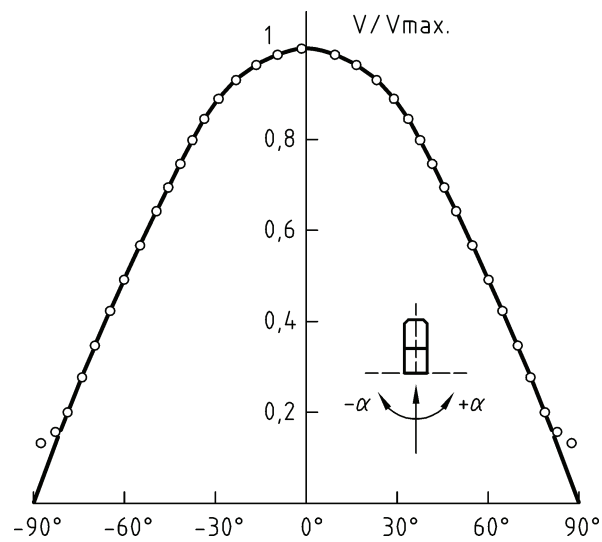
Die Haupteigenschaft eines Heißkugelanemometers ist eine reduzierte Empfindlichkeit für die Richtung des Luftstroms, mit der Ausnahme eines kleinen Winkels an der Befestigung des Messwertaufnehmers (siehe Bild E.1). Demgegenüber weist das Hitzdrahtanemometer eine hohe Richtungsempfindlichkeit auf (siehe Bild E.2).

Die bauliche Ausführung des Messwertaufnehmers sollte den Luftstrom nicht beeinträchtigen. Einrichtungen zum Schutz des Messwertaufnehmers vor Beschädigung können eventuell zusätzliche Turbulenzen im Luftstrom hervorrufen oder die Geschwindigkeitsschwankungen dämpfen.



**Bild E.1 – Heißkugelanemometer – Darstellung der Richtungscharakteristik bei Messung der Luftgeschwindigkeit**





**Bild E.2 – Hitzdrahtanemometer – Darstellung der Richtungscharakteristik bei der Messung der Luftgeschwindigkeit**

## Anhang F (informativ)

### Messung der Oberflächentemperatur

#### F.1 Einleitung

Die Oberflächentemperatur ist die Temperatur einer gegebenen Oberfläche. Diese wird benötigt, um den Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen Personen durch die mittlere Strahlungs- und/oder die Flächenstrahlungstemperatur zu beschreiben. Des Weiteren kann damit der Effekt des direkten Kontaktes zwischen einer Person und einer Oberfläche beurteilt werden.

Die Oberflächentemperatur kann mit einem Messwertaufnehmer gemessen werden, der mit der Oberfläche in Kontakt steht (Kontaktthermometer) oder mit einem Infrarot-Messwertaufnehmer. Die Anwendung eines Kontaktthermometers verändert den Wärmeaustausch zwischen der Oberfläche und der Umgebung. Dies kann bei Oberflächen mit einer geringen thermischen Leitfähigkeit problematisch sein.

Messungen mit Infrarot-Messwertaufnehmern werden durch das Emissionsvermögen der zu messenden Oberfläche beeinflusst.

Instrumente zur Messung der Oberflächentemperatur sind:

- a) Kontaktthermometer (Widerstand, Thermoelemente);
- b) Infrarot-Messwertaufnehmer.

#### F.2 Kontaktthermometer

Ein Kontaktthermometer besteht aus einem Temperaturmesswertaufnehmer, der mit der Oberfläche in Kontakt gebracht werden kann. Dabei ist wichtig, dass der Wärmeaustausch zwischen dem Messwertaufnehmer und der Oberfläche deutlich höher ist als der Wärmeaustausch zwischen dem Messwertaufnehmer und der Umgebung. Dies kann durch eine Erhöhung des Anpressdruckes, Einsatz von Wärmeleitpasten u. Ä. und eine Isolierung des Messwertaufnehmers gegenüber der Umgebung erreicht werden.

Der Kontakt zwischen Messwertaufnehmer und Oberfläche beeinflusst den Wärmeaustausch zwischen Oberfläche und Umgebung, was sich auf die gemessene Oberflächentemperatur auswirkt. (Insbesondere) Bei Oberflächen mit geringer thermischer Leitfähigkeit kann dies zu falschen Messergebnissen führen.

#### F.3 Infrarot-Radiometer

Infrarot-Radiometer (auch als berührungslose Temperaturmesswertaufnehmer bezeichnet) ermöglichen über einen großen Bereich die berührungslose Messung von Oberflächentemperaturen. Die meisten dieser Geräte arbeiten passiv und erfordern die Beleuchtung des zu messenden Objektes mit Infrarotstrahlung. Erhältlich sind Geräte für punktuelle und abtastende Messungen; mittels abtastender Messgeräte können Temperaturschwankungen über eine Fläche angezeigt werden. Bei allen passiven Strahlungsmessern wird die Strahlungsenergie des zu messenden Objekts mittels eines optischen Systems auf einen Infrarotempfänger fokussiert. Das resultierende Ausgangssignal ist proportional zur auftreffenden Strahlung und kann mit einem Messgerät oder einer Anzeigeeinheit zur Darstellung gebracht werden.

Radiometer werden normalerweise über die verwendeten Empfänger (Detektoren) klassifiziert – man unterscheidet hier thermische und photoelektrische Detektoren. Bei thermischen Detektoren wird eine Änderung der elektrischen Eigenschaften durch die strahlungsbedingte Erwärmung verursacht. Beispiele für thermische Detektoren sind Thermoelemente, Thermosäulen sowie Metall- und Halbleiterbolometer. Bei photoelektrischen Detektoren verändern sich die elektrischen Eigenschaften durch Absorption der auftreffenden Photonen an der Oberfläche. Da diese Detektoren keiner Temperaturänderung zur Aktivierung bedürfen, ist die Einstellzeit dieses Typs deutlich kürzer als bei thermischen Detektoren. Bei abtastenden Strahlungsmessgeräten werden in der Regel photoelektrische Detektoren eingesetzt.

Ein Radiometer misst naturgemäß nur die auf den Detektor auftreffende Strahlung. Diese setzt sich zusammen aus der Strahlung, die durch das Objekt ausgesendet wird, sowie der Strahlung, die an der Oberfläche des zu messenden Objektes reflektiert wird. Eine genaue Messung der Oberflächentemperatur erfordert daher einerseits die Kenntnis über das Langwellen-Emissionsvermögen des zu messenden Objektes, andererseits die Kenntnis über das Strahlungsfeld in der Objektumgebung. Eine interne oder externe Bezugstemperatur ist erforderlich, um Messungen der absoluten Oberflächentemperatur vornehmen zu können.

Die Temperaturauflösung eines Radiometers nimmt mit der Objekttemperatur ab. Wenn z. B. ein Radiometer Temperaturunterschiede geringer als  $0,3\text{ °C}$  an einem  $20\text{ °C}$  warmen Objekt erkennt, dann wird es möglicherweise nur eine Differenz von etwa  $1\text{ °C}$  an einem Objekt unterscheiden, dessen Temperatur  $-20\text{ °C}$  beträgt.

## Anhang G (informativ)

### Messung der operativen Raumtemperatur

#### G.1 Einleitung

Die operative (wirksame) Raumtemperatur ( $t_0$ ) ist definiert als die einheitliche Temperatur einer Umhüllung, in der eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht-einheitlichen Umgebung.

Die exakte Gleichung für die operative Raumtemperatur lautet:

$$t_0 = \frac{h_c \cdot t_a + \bar{h}_r \cdot \bar{t}_r}{h_c + \bar{h}_r}$$

Dabei ist

$t_a$  die Lufttemperatur;

$\bar{t}_r$  die mittlere Strahlungstemperatur;

$h_c$  der Wärmeaustauschkoeffizient durch Konvektion;

$h_r$  der Wärmeaustauschkoeffizient durch Strahlung.

Der Zusammenhang kann auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$t_0 = a \cdot t_a + (1 - a) \cdot \bar{t}_r$$

Dabei ist

$$a = h_c / (h_c + h_r) = 1 / (1 + h_r / h_c)$$

#### G.2 Direkte Messung der operativen Raumtemperatur

Eine Anforderung, die an einen Messwertaufnehmer zur direkten Messung der operativen Raumtemperatur zu stellen ist, besteht darin, dass das Verhältnis zwischen dem Wärmeaustauschkoeffizient durch Strahlung und Konvektion gleich dem einer Person ist. Unter Anwendung der in ISO 7730 angegebenen Gleichung für den konvektiven Wärmeaustauschkoeffizienten  $h_c$  ist es möglich, den Durchmesser eines Messwertaufnehmers zu bestimmen, der das gleiche Verhältnis  $h_c/h_r$  wie eine Person aufweist. Dies wird in Bild G.1 gezeigt. Der optimale Durchmesser eines Messwertaufnehmers hängt von der Luftgeschwindigkeit ab und liegt bei etwa 0,04 m bis 0,1 m. Eine Standardglobenkugel mit einem Durchmesser von 0,16 m überbewertet den Einfluss der mittleren Strahlungstemperatur.

Dabei sind für die Messung der operativen Raumtemperatur die gleichen Hinweise zu beachten, wie in B.2.3 für die Messung der mittleren Strahlungstemperatur unter Einsatz eines Kugel-Thermometers genannt. Die Form des Messwertaufnehmers (siehe B.2.3.5) ist wichtig bei nicht-einheitlichen Strahlungsverhältnissen, ebenso ist die Farbe des Messwertaufnehmers (siehe B.2.3.6) im Falle kurzweilliger Strahlung von Wichtigkeit.

### G.3 Berechnung der operativen Raumtemperatur auf der Grundlage der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur

In den meisten Fällen in der Praxis, bei denen die relative Luftgeschwindigkeit eher gering ( $< 0,2$  m/s) und die Differenz zwischen mittlerer Strahlungstemperatur und Lufttemperatur gering ist ( $< 4$  °C), kann die operative Raumtemperatur ausreichend genau durch den Mittelwert aus Luft- und mittlerer Strahlungstemperatur beschrieben werden.

Für eine höhere Genauigkeit und andere Umgebungsbedingungen kann die folgende Gleichung angewandt werden:

$$t_0 = A t_a + (1 - A) \bar{t}_r$$

wobei der Wert von  $A$  unter Verwendung der nachfolgend als Funktion der relativen Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$  (in Meter je Sekunde) angegebenen Werte bestimmt werden kann:

|          |         |             |             |
|----------|---------|-------------|-------------|
| $v_{ar}$ | $< 0,2$ | 0,2 bis 0,6 | 0,6 bis 1,0 |
| $A$      | 0,5     | 0,6         | 0,7         |

Die operative Raumtemperatur kann weiter bestimmt werden aus:

$$t_0 = \frac{t_a \sqrt{10 \cdot v_a} + \bar{t}_r}{1 + \sqrt{10 \cdot v_a}}$$

Dabei ist

$v_a$  die Luftgeschwindigkeit, in Meter je Sekunde;

$\bar{t}_r$  die mittlere Strahlungstemperatur, in Grad Celsius.

**Anhang ZA**  
(normativ)

**Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen**

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

ANMERKUNG Ist eine internationale Publikation durch gemeinsame Abweichungen modifiziert worden, gekennzeichnet durch (mod.), dann gilt die entsprechende EN/HD.

| Publikation | Jahr | Titel  | EN/HD       | Jahr |
|-------------|------|--|-------------|------|
| ISO 7730    | 1994 | Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort | EN ISO 7730 | 1995 |

**Literaturhinweise**

ISO 7243:1989, *Hot environments – Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-Index (wet bulb globe temperature)*.

ISO 7933:1989, *Hot environments – Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate*.

ISO/TR 11079:1993, *Evaluation of cold environments – Determination of required clothing insulation (IREQ)*.