



This item was submitted to Loughborough's Institutional Repository (<https://dspace.lboro.ac.uk/>) by the author and is made available under the following Creative Commons Licence conditions.



**CC creative commons**  
COMMONS DEED

**Attribution-NonCommercial-NoDerivs 2.5**

**You are free:**

- to copy, distribute, display, and perform the work

**Under the following conditions:**

**BY:** **Attribution.** You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor.

**Noncommercial.** You may not use this work for commercial purposes.

**No Derivative Works.** You may not alter, transform, or build upon this work.

- For any reuse or distribution, you must make clear to others the license terms of this work.
- Any of these conditions can be waived if you get permission from the copyright holder.

**Your fair use and other rights are in no way affected by the above.**

This is a human-readable summary of the [Legal Code \(the full license\)](#).

[Disclaimer](#) 

For the full text of this licence, please go to:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/>

G. Jendritzky, D. Fiala, G. Havenith, C. Koppe, G. Laschewski, H. Staiger, B. Tinz

## **Thermische Umweltbedingungen**

### **The Thermal Environment**

#### **Zusammenfassung**

Die Bewertung und Vorhersage der thermischen Umweltbedingungen des Menschen in einer physiologisch korrekten, wirkungsvollen und praktischen Weise stellt eines der wichtigsten Fragestellungen in der Human-Biometeorologie dar. Dies ergibt sich aus der Notwendigkeit, den Wärmehaushalt des Menschen den thermischen Umweltbedingungen anzupassen, um Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Ausgehend von der Wärmebilanz des Menschen wird ein Überblick über verschiedene Bewertungsansätze gegeben bis hin zur Entwicklung des „Universellen thermischen Klimaindex UTCI“ im Rahmen der COST Action 730 (2004). Ausgewählte Anwendungen sollten die Relevanz der thermischen Bewertung im Bereich Wetter/ Klima und Gesundheit verdeutlichen.

#### **Abstract**

One of the fundamental issues in human biometeorology is the assessment and forecast of the thermal environment in a sound, effective and practical way. This is due to the need for human beings to balance their heat budget to a state very close to his/her thermal environment in order to optimise his/her comfort, performance and health. Based on the human heat budget an overview is given on different assessment approaches up to the development of the “Universal Thermal Climate Index” within COST Action 730 (2004). Selected applications from the weather/ climate and human health field should make clear the significance of a thermal assessment.

## **1 Wärmehaushalt des Menschen, Thermoregulation und Bewertung des thermischen Empfindens**

### **1.1 Die Wärmebilanz**

Abb. 1 Die Wärmebilanz des Menschen (HAVENITH, 2003, in KOPPE et al. 2004)

Wärmeproduktion im Organismus und Wärmeabgabe an die Umgebung müssen, zumindest über einen längeren Zeitraum („steady-state“), im Gleichgewicht stehen, um die Körperkerntemperatur auf konstantem Niveau (37°C) zu halten und damit optimale Funktionen der inneren Organe und des Gehirns zu gewährleisten. Die Temperatur der Körperschale, Haut und Extremitäten, kann dagegen in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen stark schwanken und ist eines der Mechanismen, sich an wechselnde Bedingungen anzupassen. Vom Komfort abweichende Bedingungen werden bewusst und führen so zu Anpassungen des Verhaltens, z. B. durch Veränderung des Isolationswertes der Kleidung, durch Erhöhung, bzw. Verminderung der Aktivität und ggf. durch das Aufsuchen von Schutz, wie klimatisierten Räumen. Wärme wird über den Stoffwechsel (Metabolismus = M) aufgrund der Aktivität des Menschen erzeugt, ein – häufig nur geringer – Anteil davon wird zur Erbringung mechanischer Arbeit (W) aufgewendet, z. B. beim Bergsteigen. Die überschüssige Wärme muss an die Umgebung abgegeben werden. Der Körper tauscht Wärme über die Haut durch Konvektion (sensibler Wärmefluss), Strahlung (kurz- und langwellig, sensibel), Verdunstung z. B. von Schweiß und Diffusion von Wasserdampf durch die Haut (latente Wärmeflüsse), und über die Atmung (latent and sensibel) aus. Ein weiterer Mechanismus ist Wärmeleitung (Kontakt mit festen Flächen), der in der Biometeorologie jedoch i.a. nicht berücksichtigt wird. Der Wärmeaustausch zwischen dem Körper des Menschen und seiner thermischen Umgebung (Abb. 1) kann in Form einer Energiebilanzgleichung beschrieben werden, der Anwendung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik:

$$M - W - [Q_H(Ta, v) + Q^*(Tmrt, v)] - [Q_L(e, v) + Q_{SW}(e, v)] - Q_{Re}(Ta, e) \pm S = 0 \quad \text{Gl. 1}$$

M    Metabolische Rate (Gesamtaktivität)

W    Mechanische Leistung (Art der Aktivität)

S    Speicherung (Änderung im Wärmeinhalt des Körpers)

Haut:

Q<sub>H</sub>   Turbulenter Fluss sensibler Wärme

Q\*    Strahlungsbilanz

Q<sub>L</sub>   Turbulenter Fluss latenter Wärme (Diffusion von Wasserdampf durch die Haut)

Q<sub>SW</sub>   Turbulenter Fluss latenter Wärme (Verdunstung von Schweiß)

Atmung:

$Q_{Re}$  Wärmefluss über Atmung (sensibel and latent)

Die meteorologischen Einflussgrößen sind Lufttemperatur  $T_a$ , Wasserdampfdruck  $e$ , Windgeschwindigkeit  $v$  und mittlere Strahlungstemperatur  $T_{mrt}$ , über die die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse auf den Menschen bezogen werden.  $T_{mrt}$  ist, bezogen auf einen Menschen in festgelegter (hier aufrechter) Körperhaltung, gegebenen Werten von Albedo und Emissionskoeffizient der Bekleidung, definiert als diejenige einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umgebung, bei der der gleiche Strahlungsverlust bzw. -gewinn auftritt, wie unter den aktuellen Umgebungsbedingungen. Zusätzlich werden die metabolische Rate (entsprechend der Aktivität und ggfs. durch Kältezittern) und die Bekleidungsisolation (Verhaltensanpassung!) benötigt. In Gl.1 sind die erforderlichen meteorologischen Variablen den relevanten Wärmeflüssen in Klammern zugeordnet, nicht jedoch die in Wechselwirkung stehenden internen (physiologischen) Variablen wie Hauttemperatur, Kerntemperatur, Schweißrate, Hautbenetzungsgrad. Zur Realisierung einer ausgeglichenen Wärmebilanz verfügt der Organismus über ein komplexes Regulationssystem, dessen zentrales steuerndes System im Hypothalamus des Gehirns lokalisiert ist.

## 1.2 Thermoregulation

Von einem mathematischen Standpunkt aus kann der Organismus des Menschen in zwei gekoppelte Thermoregulationssysteme eingeteilt werden: (1) das steuernde aktive System, das die thermophysiologischen Reaktionen wie die Verteilung des peripheren Blut- (und damit Wärme-) Flusses von unakklimatisierten Personen, die zusätzliche Wärmeproduktion durch Kältezittern und Schweißproduktion beinhaltet, und (2) das gesteuerte passive System mit den anatomischen Eigenschaften und den Wärmetransportphänomenen innerhalb des Organismus und an seiner Oberfläche (Abb. 2). Damit werden die lokalen Wärmeflüsse von den verschiedenen Oberflächensegmenten über freie und erzwungene Konvektion, langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung, kurzwelliger Strahlungsgewinn, Verdunstung von Wasser auf der Haut, sowie Wärme- und Massen-Transfer durch uneinheitliche Bekleidung erklärbar.

Abb. 2 Schematische Darstellung eines physiologischen Modells der Thermoregulation des Menschen (FIALA et al. 2001, HAVENITH, 2001). (a) das steuernde System, (b) das passive System.

### 1.3 Thermisches Empfinden

Die Wärmebilanzgleichung bestimmt die einzelnen Energieflüsse in thermophysiologisch korrekter Weise, beinhaltet jedoch keine Bewertung des thermischen Empfindens. Das thermische Empfinden ist eine subjektive Bewertung der Auswirkung der Umgebungsbedingungen in Hinsicht auf den Zustand von Komfort oder Art und Stärke von Diskomfort. Diskomfort wird bewusst und resultiert in Verhaltensanpassungen mit dem Ziel, thermischen Komfort wieder herzustellen. Aufgrund des unterschiedlichen Metabolismus (hier der Grundumsatz) kann das thermische Empfinden außerhalb des Komforts in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht variieren. Das thermische Empfinden ist ein Integral des thermischen Zustandes der einzelnen Körperabschnitte. Asymmetrische Strahlungsverteilung, Zug, warme oder kalte Böden sowie vertikale Temperaturgradienten können das thermische Empfinden zusätzlich beeinflussen.

Thermischer Komfort stellt sich nur in einem kleinen Ausschnitt des Bereiches von Umgebungsbedingungen ein, in denen die Wärmebilanz (Gl. 1) ausgeglichen werden kann. Komfort ist mit einem Minimum thermoregulatorischer Aktivität verknüpft. Fanger (1970) hat Personen, die sich ihr ganzes Leben in den Tropen aufgehalten haben, unmittelbar nach Ankunft mit dem Flugzeug in Kopenhagen in Klimakammern Komfortbedingungen aussuchen lassen. Ferner wurden Gruppen untersucht, die über Jahre bei geringer körperlicher Aktivität unter kühlen Bedingungen mindestens 8 Stunden täglich arbeiteten (Fleischverpackung) und eine Gruppe, die im Winter täglich in der See badete. Die Differenzen in den von diesen Gruppen bevorzugten Umgebungstemperaturen und physiologischen Parameter unter Komfort waren minimal. Das indiziert, dass es offenbar dem Menschen nicht möglich ist sich dahingehend zu adaptieren, wärmere oder kühlere Umgebungsbedingungen für Komfort zu bevorzugen. Daraus folgt als wesentliches Ergebnis, dass die gleichen Komfortbedingungen weltweit angewendet werden können. Dieser Befund bedeutet allerdings nicht Komfort rein statisch sehen zu dürfen. De Dear und Brager (2002) konnten z.B. zeigen, dass die bevorzugte Innentemperatur in Abhängigkeit von den erlebten Außenbedingungen der vergangenen Tage variiert, wenn die Bewohner ihre Bekleidung nur

frei wählen können. Die Bestimmung von Komfort setzt die Lösung der Wärmebilanzgleichung für gegebene Umgebungsbedingungen, gegebene metabolische Aktivität und gegebenem Isolationswert der getragenen Kleidung voraus.

Bevorzugte Umgebungsbedingungen zu bestimmen, erfordert die Kenntnis des Isolationswertes der Kleidung. Bei weltweit vergleichenden Studien muss berücksichtigt werden, dass die bevorzugte Kleidungsisolierung signifikanten Differenzen unterworfen ist, die z. B. von den Außenbedingungen abhängen und damit saisonal variieren können und auch durch den Kulturkreis beeinflusst sind (NICHOLS und HUMPHREY 1972). Unter extremeren warmen oder kalten äußeren Bedingungen wird jedoch häufiger eine Adaptation zu beobachten sein. Menschen, die z. B. gewöhnlich in warmen Klimaten leben und arbeiten, können es eher tolerieren, in heißer Umgebung tätig zu sein und dort auch länger erhöhte Leistungen erbringen, als Personen aus kälteren Klimaten. Außerhalb des Komfortbereiches tritt dabei im Warmen Adaptation bezüglich einer kontinuierlicheren und auch erhöhten Rate der Schweißsekretion ein, der Salzgehalt des Schweißes wird reduziert. Im Kalten kann durch Adaptation die thermoregulatorische Minderung in der Durchblutung der Körperschale begrenzt sein, wodurch sich zwar der Wärmeverlust an die Umgebung erhöht, jedoch die Arbeitsfähigkeit verbessert wird.

Es existieren mehrere Konzepte, thermischen Komfort und thermisches Empfinden auf der Basis der vorgefundenen Umgebungsbedingungen vorherzusagen. Das durch Untersuchungen in Klimakammern an mehr als 1500 Probanden wohl am besten validierte Schema ist das „Predicted Mean Vote (PMV)“ von FANGER (1970), das sich anders als viele Indizes über Jahrzehnte als unverändert valide erwiesen hat und auf der auf Komfortbedingungen reduzierten Variante der Wärmebilanzgleichung aufbaut. PMV reicht in der 7-stufigen ASHRAE- Skala (1997) von -3 für kalt bis +3 für heiß und wird häufig noch um die Werte  $\pm 4$  für extrem ergänzt. PMV ist in einer Vielzahl von internationalen und nationalen Richtlinien eingeführt. Allerdings wird als nachteilig angesehen, dass die Bedeutung der Zahlenwerte sich einem Laien nicht selbständig erschließt.

Ein anderes weit verbreitetes Konzept ist das einer „äquivalenten“ Temperatur. Sie ist die Lufttemperatur, die in einer Referenzumgebung herrschen müsste, um das gleiche thermische Befinden wie in der aktuellen Umgebung hervorzurufen. Der Vergleich äquivalente Temperatur zu Lufttemperatur erschließt sich häufig selbständig, besonders in Hinsicht auf

extremere Bedingungen. Sie ordnet sich wegen der individuellen Ausgangsbasis jedoch nicht unbedingt in ein einheitliches Verständnis der damit verbundenen Belastung ein. Basis der Berechnung ist in den meisten Fällen die Wärmebilanzgleichung, die für die Referenzbedingung solange iteriert wird, bis die zum Vergleich mit der aktuellen Umgebung gewählten Energieflüsse übereinstimmen. Referenzumgebung und Vergleichsgrößen können je nach Anwendungsbereich sehr unterschiedlich gewählt sein.

Neben der Verwendung nur der Lufttemperatur wurden in den letzten 150 Jahren mehr als 100 einfache thermische Indizes – zumeist Zwei-Parameter Indizes – entwickelt, um die komplexen Bedingungen des Wärmeaustausches zwischen dem menschlichen Organismus und den thermischen Umweltbedingungen vereinfachend zu beschreiben. Für warme Bedingungen bestehen solche Indizes üblicherweise aus Kombinationen von  $T_a$  und unterschiedlichen Feuchtemaße; für kalte Bedingungen werden  $T_a$  and  $v$  kombiniert. Diese einfachen Indizes haben den Nachteil nur lokal zu vergleichbaren Ergebnissen zu führen - das ist die Ursache für die Vielzahl der Indizes - aber den Vorteil, häufig ohne weitere technische Hilfsmittel wie Computer berechenbar zu sein und von der Bevölkerung und weiteren Interessengruppen (z.B. im Gesundheitswesen) leichter verstanden zu werden (Koppe et al. 2004). Darüber hinaus sind in vielen Fällen weitere Annahmen z.B. über variable Schwellen in unterschiedlichen Klimaten oder Jahreszeiten notwendig. Wegen ihrer zu einfachen Konstruktion (mit Vernachlässigung relevanter Wärmeflüsse oder anderer Einflüsse auf den Wärmehaushalt) können diese Indizes jedoch niemals die grundlegende Anforderung erfüllen, daß jeder gleiche Wert eines Index thermophysologisch immer das Gleiche bedeutet, unabhängig davon, welche Kombination der meteorologischen Variablen zu diesem Wert geführt hat. Umfassende Übersichten zu diesen Ansätzen findet man z.B: bei FANGER (1970) oder PARSONS (2003).

Zahlreiche Studien haben zeigen können, dass mit bestimmten Wassertypen Mortalitätsanstiege verknüpft sind. Der synoptische Ansatz identifiziert an einem Ort auf der Basis einer statistischen Analyse Tage mit Wassertypen, die meteorologisch homogen im Hinblick auf das gleichzeitige Verhalten von Lufttemperatur, Taupunkt, Bewölkung, Luftdruck und Wind zu den synoptischen Beobachtungsterminen sind. KALKSTEIN et al. (1996) setzen dieses Verfahren erfolgreich in Hitzewarnsystemen (Heat Health Warning System HHWS) ein. Die Klassifikation muss jedoch für jeden interessierenden Ort gesondert abgeleitet werden.

## 2 Wärmebilanzmodelle

Die mathematische Modellierung des Wärmeaustausches des Menschen mit seiner Umgebung begann vor etwa 70 Jahren (BÜTTNER 1938). In den letzten 4 Dekaden wurden dann detailliertere Modelle entwickelt, die sich spannen über Modelle für Komfort und „steady state“ (FANGER 1970), zu Modellen des Gesamtkörpers, die den thermophysiologisch geregelten Wärmeübergang vom Körperkern zur Haut und von der Haut durch die Kleidung zur Atmosphäre (2-Segment-Modelle) für den instationären Zustand, d.h. in der zeitlichen Entwicklung (GAGGE et al. 1986; BLAZEJCZYK 1994; PICKUP und DE DEAR 2000; DE DEAR und PICKUP 2000; MALCHAIRE et al. 2001) oder den „steady state“ beschreiben (STEADMAN 1984 und 1994; HÖPPE 1984 und 1999; HORIKOSHI et al. 1995 und 1997) oder für ausgewählte Körperareale ausgelegt sind, wie für den Fuß (LOTENS et al. 1989) oder für Erfrierungen im Gesicht die Wind-Chill-Temperatur (TIKUISIS und OSCZEVSKI 2002 und 2003; SHITZER 2006), (Abb. 3). Multi-Segment-Modellen der menschlichen Thermoregulation beschreiben die Wärmeflüsse für den Körper in einer Auflösung bis zu 340 Segmenten (STOLWIJK 1971; KONZ et al. 1977; WISSLER 1985; FIALA et al. 1999 und 2001; HAVENITH 2001, HUIZENGA et al. 2001; TANABE et al. 2002).

Abb. 3 PMV Predicted Mean Vote,  $PT^*$  Gefühlte Temperatur (Perceived Temperature), PET Physiological Equivalent Temperature,  $OUT\_SET^*$  Outdoor Standard Effective Temperature, AT Apparent Temperature, WCT Wind Chill Temperature,  $T_{sk}$  mittlere Hauttemperatur, SR Schweißrate,  $E_{sk}$  Wärmeabgabe über Verdunstung,  $W_{sk}$  Hautbenetzungsgrad,  $I_{cl}$  Wärmeisolation der Bekleidung,  $clo$  Bekleidungswert,  $T_a$  Lufttemperatur,  $T_{mrt}$  mittlere Strahlungstemperatur,  $v$  Windgeschwindigkeit,  $e$  Wasserdampfdruck.

Die diversen Ansätze wirken sich auf die Einsetzbarkeit der Modelle aus, z.B. in der täglichen meteorologischen Vorhersage, ggf. sogar auf dem Modellgitter der numerischen Wetterprognose. Das PMV von FANGER (1970) sowie die „Apparent Temperature“ in der Variante „OUTDOOR“ (STEADMAN 1984 und 1979) sind unter den Wärmebilanzmodellen für den Gesamtkörper die Methoden mit dem geringsten numerischen Aufwand. Die instationären 2-Segment-Modelle benötigen eine Integration von mindestens 120



Einminutenschritten, um einen als stationär (steady state) vergleichbaren Zustand zu erreichen. Ähnliches gilt auch für einige der stationären Varianten, deren Iterationsaufwand einen operationellen täglichen Einsatz begrenzt. Die Multi-Segment-Modelle werden in der Forschung und für aufwändige Begutachtungen eingesetzt.

## **2.1 Multi-Segment-Modelle**

Die Multi-Segment-Modelle (siehe Abb. 2b) simulieren dreidimensional den Wärmetransport innerhalb des Körpers und an seiner Oberfläche, wobei die anatomischen, thermischen und physiologischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Die Wärmeabgabe von Teilen der Körperoberfläche wird unter Berücksichtigung der inhomogenen Verteilung von Hauttemperatur und thermophysiologicaler Reaktion über die Oberfläche des Organismus modelliert. Multi-Segment-Modelle sind damit in der Lage, nicht nur die integralen Werte der physiologischen Variablen zu berechnen, sondern auch deren lokale Ausprägungen, z.B. der Hauttemperatur beim der Kälte exponierten Gesicht. Validierungsstudien haben gezeigt, dass die neuesten Multi-Segment-Modelle über einen weiten Bereich vorkommender thermischer Bedingungen das dynamische Verhalten der Wärmeregulation (einschließlich Schwitzen und Kältezittern) gut reproduzieren (FIALA et al. 2001, 2003; HAVENITH 2001; HUIZENGA et al. 2001). Z. B. ist das passive System des „Fiala“- Modells (FIALA et al. 1999, 2001) eine multi-segmentale, mehrschichtige Darstellung des menschlichen Körpers. Jedem der inzwischen 340 Untergliederungen werden geeignete physikalische und thermophysiologicale Eigenschaften zugeordnet. Die Daten beziehen sich bzgl. Gewicht, Fettanteil und Oberfläche auf eine Durchschnittsperson. Die physiologischen Daten ergeben den basalen Wärmeeinfall und die basale Herzleistung für einen aufrecht stehenden Erwachsenen in thermisch neutraler Umgebung von  $T_a = 30\text{ °C}$ . Unter diesen Bedingungen, bei denen keine Thermoregulation auftritt, berechnet das Modell einen basalen Benetzungsgrad der Haut mit 6 %, eine mittlere Hauttemperatur von  $34,4\text{ °C}$ , eine Kerntemperatur (Hypothalamus) von  $37,0\text{ °C}$  und eine Rektaltemperatur von  $36,9\text{ °C}$  (FIALA et al. 1999; HAVENITH 2001). Verifikations- und Validierungsarbeiten im Rahmen der COST Action 730 (2004) durch Vergleich von Daten aus unabhängigen Experimenten mit Expositionen gegenüber Kältestress, Kühle, Behaglichkeit, Wärme, Wärmebelastung sowie Aktivitäten unterschiedlicher Intensität ergaben in einem weiten Bereich gute Übereinstimmungen mit Messdaten zu physiologischen Reaktionen, mittleren und lokalen Hauttemperaturen und weiteren physiologischen Reaktionen.

Einige dieser Multi-Segment-Modelle haben sich inzwischen zu wertvollen Forschungsinstrumenten entwickelt, mit deren Hilfe ein tieferes Verständnis der Gesetzmäßigkeiten der menschlichen Thermoregulation erlangt werden konnte (FIALA et al. 2001). Gleichwohl sind noch Fragen offen, etwa bzgl. eines noch besseren Verständnisses von Adaptation und ihrer physiologischen Folgen.

## **2.2 Das Klima-Michel-Modell**

Die Komfortgleichung von FANGER (1970) beinhaltet ein vollständiges Wärmehaushaltsmodell reduziert auf die physiologischen Bedingungen für thermischen Komfort und gültig für den stationären Fall. Wegen der Beschränkung auf Komfort setzt die Komfortgleichung dabei voraus, dass der generierte Schweiß vollständig verdunstet wird und eliminiert damit insbesondere die Einflüsse der Permeabilität der Kleidung und des Gradienten zwischen Dampfdruck der atmosphärischen Umgebung und Sättigungsdampfdruck des Schweißes mit der Temperatur der Haut auf den Massefluss von Wasserdampf. Lassen sich die Umgebungsbedingungen mit Komfort nicht vereinbaren, treten Abweichungen von der ausgeglichenen Bilanz auf. Sie sind ein lineares Maß des meteorologisch bedingten Stresses für das Thermoregulationssystem. Die Abweichungen werden mit einem Faktor multipliziert, der ausschließlich von der metabolischen Rate abhängt, die Energieflüsse auf das dimensionslose PMV normiert und damit die Wirkungen der metabolischen Aktivität auf das Komfortempfinden berücksichtigt. Dieser Gesamtansatz ist die Basis für das thermische Bewertungsverfahren Klima-Michel-Modell (JENDRITZKY et al. 1979; JENDRITZKY et al. 1990) des Deutschen Wetterdienstes und der Gefühlten Temperatur  $GT$  in  $^{\circ}C$  als einer Variante äquivalenter Temperaturen (STAIGER et al. 1997), die die Anpassung der Bekleidung an die aktuellen thermischen Bedingungen berücksichtigt. Sie gelten jeweils für den aufrecht stehenden Menschen.

Das klassische PMV erreicht im Widerspruch zur gängigen Erfahrung unter belastenden warm-feuchten Bedingungen, bei denen die Einstrahlung häufig bewölkungsbedingt vermindert ist, meist deutlich geringere Werte als unter starker Einstrahlung aber geringer Luftfeuchte (heiß-trockene Bedingungen). Eine Verbesserung der physiologischen Relevanz des PMV unter warm-feuchten Bedingungen ist auf der Grundlage der Arbeit von GAGGE et al. (1986) möglich, indem die im klassischen PMV genutzte Operative Temperatur, dem mit

den Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung gewichteten Mittel aus Luft- und mittlerer Strahlungstemperatur, durch die Effektive Temperatur ersetzt wird, welche die Enthalpie schweißnasser Haut und feuchter Kleidung zusätzlich berücksichtigt. Die Effektive Temperatur ist in den ASHRAE Standards definiert als eine hypothetische Lufttemperatur in einer isothermen Umgebung bei einer relativen Feuchte von 50%, in der der Mensch den gleichen Hautbenetzungsgrad und den gleichen Wärmeaustausch an der Haut hat, wie in der aktuellen Umgebung, beschrieben durch die Operative Temperatur und den Wasserdampfdruck  $e$  der Luft. Man erhält:

$$PMV^* = PMV + dPMV \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei  $dPMV$  den Einfluss beschreibt, mit dem Variationen im Dampfdruck der Atmosphäre auf die Beanspruchung des Thermoregulationssystems wirken. Der Wert von  $dPMV$  ist abhängig von den meteorologischen Variablen Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck und mittlerer Strahlungstemperatur.  $dPMV$  wurde gültig für den stationären Fall, für einen Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate) von  $135 \text{ W m}^{-2}$  und einen Isolationswert der Kleidung von  $0.5 \text{ clo}$  (Sommerkleidung;  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ K m}^2\text{W}^{-1}$ ; „korrekter Straßenanzug“), auf der Basis des 2-Segment-Modells von GAGGE et al. (1986) über eine multiple lineare Regression in zusätzlicher Abhängigkeit von  $PMV$  parametrisiert.  $PMV^*$  bezeichnet also den über den Gagge-Ansatz korrigierten  $PMV$ -Wert.

Bei der Verwendung von Gl.2 wird für ein gegebenes  $PMV$  die Beanspruchung des Thermoregulationssystems höher, wenn der Dampfdruck steigt oder sich aus der Kombination von niedriger Windgeschwindigkeit mit einem erhöhten Dampfdruck ein verringerter latenter Wärmefluss von der Hautoberfläche ergibt. Sie wird geringer, wenn bei unveränderter operativer Temperatur der Dampfdruck sinkt.

### 2.3 Gefühlte Temperatur

Die Gefühlte Temperatur  $GT$  ist eine Variante des Klima-Michel-Modells und gehört zur Gruppe der äquivalenten Temperaturen. Sie bietet eine für den Anwender besser verständliche Darstellung der Bewertung des thermischen Empfindens als der klassische  $PMV$ -Wert (Abb. 4). Der Gefühlten Temperatur liegt, wie oben beschrieben, ein vollständiges

Wärmehaushaltsmodell des menschlichen Körpers zugrunde; das Wärme- bzw. Kälteempfinden wird über die Komfortgleichung von FANGER (1972) mit der oben beschriebenen Feuchte-Korrektur nach GAGGE et al. (1986) für den aufrecht stehenden Menschen berechnet.

#### Abb. 4 PMV und Gefühlte Temperatur GT

Die Gefühlte Temperatur GT in Grad Celsius ist die Lufttemperatur einer Standardumgebung, in der das gleiche Wärme- bzw. Kälteempfinden auftreten würde, wie in der aktuellen Umgebung. In der Standardumgebung ist die mittlere Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur, und die Windgeschwindigkeit ist auf einen leichten Zug reduziert. Die thermophysiologische Bewertung erfolgt mittels PMV\*, Gl. 3, für einen Norm-Menschen, den Klima-Michel. Dieser erbringt eine Arbeitsleistung von 172.5 W, d.h. ca. 135 W m<sup>-2</sup> gesamte metabolische Rate bezogen auf die Hautoberfläche. Dies entspricht etwa Gehen mit ca. 4 km/h in der Ebene. Da die Bewertung an Außenbedingungen ausgerichtet ist, kann der Norm-Mensch seine Kleidung zwischen sommerlich und winterlich variieren, um soweit erreichbar thermischen Komfort herzustellen. Sommerliche Kleidung, Kleidungsisolationswert 0,5 clo entspricht einer leichten langen Hose, einem kurzärmeligen Hemd und Sandalen, winterliche, Kleidungsisolationswert 1,75 clo, einem Anzug aus wollenem Material, einer Kopfbedeckung, einem Wintermantel und festen, wärmenden Schuhen.

Bei Vorliegen der mittleren Strahlungstemperatur  $T_{mrt}$  beinhaltet das Berechnungsverfahren für GT folgende Schritte:

- 1) Bestimmung des Isolationswerts der Kleidung (clo) und davon abhängig des PMV (Predicted Mean Vote) durch Iteration der Komfortgleichung nach FANGER (1972).
- 2) Unter warmen Bedingungen (Kleidungsisolation 0,5 clo erforderlich) Bestimmung einer Feuchte-Korrektur  $dPMV$  für das PMV; Effizienz der Wasserdampfdurchlässigkeit der Kleidung konstant 0.42.
- 3) Regressionsrechnung für die gefühlte Temperatur mit den unabhängigen, ggf. feuchte-korrigierten Variablen PMV und clo. Das Rechenergebnis weist eine Standardabweichung von ca. 0.5 K auf.

Das Empfinden von thermischem Komfort oder Diskomfort ist nach Tabelle 1 zu bewerten, welche die bei der jeweiligen Gefühlten Temperatur zu erwartenden thermischen Empfindungen und die dazu korrespondierenden thermophysiologischen Beanspruchungen zeigt.

Tab. 1 Gefühlte Temperatur GT und thermische Beanspruchung

## 2.4 Der Wind Chill Temperatur Index

Der Wind Chill Temperatur Index (WCT) gehört zur Gruppe der äquivalenten Temperaturen und ist eine Spezialanwendung der Wärmebilanzmodelle für kalte Bedingungen bei gleichzeitig hohen Windgeschwindigkeiten, die den Verzicht auf die Modellierung latenter Wärmeflüsse über die Haut begründen. Das Verfahren konzentriert sich auf die kurzfristige lokale Abkühlung des ungeschützten Gesichtes, um Erfrierungen zu verhindern (TIKUISIS and OSCZEWSKI 2002, 2003; SHITZER 2006). Die für die operationelle Anwendung parametrisierte Formel lautet:

$$WCT = 13.12 + 0.6215 \cdot Ta - 11.37 \cdot v^{0.16} + 0.3965 \cdot Ta \cdot v^{0.16} \quad \text{Gl. 3a}$$

WCTI und  $Ta$  in  $^{\circ}\text{C}$ ,  $v$  in  $\text{km h}^{-1}$  gemessen 10 m über Grund. WTCI ist die Lufttemperatur einer Referenzumgebung mit leichtem Windzug und Strahlungsbedingungen, die Ausstrahlung unter wolkenlosem nächtlichem Himmel entsprechen (ungünstigster Fall). Die Standardperson geht mit einer Geschwindigkeit von  $4.8 \text{ km h}^{-1}$ . WCT ist nur definiert für Lufttemperaturen unter  $+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Das Risiko wird mit der Zeit  $Ft$  (frostbite time) in Minuten beschrieben, ab der mit Erfrierungen im Gesicht zu rechnen ist:

$$Ft = ((-24.5 \cdot ((0.667 \cdot v) + 4.8)) + 2111) \cdot (-4.8 - Ta)^{-1.668} \quad \text{Gl. 3b}$$

Gl. 4b ist parametrisiert aus den Differentialgleichungen für die zeitabhängige Änderung der Hauttemperatur. Erfrierungen treten frühestens auf, wenn die Hauttemperatur unter  $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sinkt. Der WCTI wurde 2002 von den Wetterdiensten Kanadas und der USA auf eine neue, nun der Physiologie angepasste Basis umgestellt. Im Hinblick auf die Vermeidung des Missverständnisses, dass bei negativer WCT Gefrieren von Wasser oder Erfrieren von Pflanzen angenommen wird, auch wenn die Lufttemperatur in  $^{\circ}\text{C}$  noch positiv ist, wird inzwischen der Zahlenwert als (dimensionsloser) Index WCI verbreitet. Aufgrund der meteorologischen Verhältnisse hat er in Nordamerika eine weite Verbreitung. In Mitteleuropa

sind Hauterfrierungen kaum zu erwarten, so dass die Ganzkörpermodelle im Vordergrund stehen.

## **2.5 Die nahe Zukunft: Der Universelle Thermische Klimaindex UTCI**

Obwohl im Grundsatz jedes der oben angesprochenen kompletten Wärmebilanzmodelle für die Bewertung der thermischen Umgebungsbedingungen geeignet ist, wird keines als universeller Standard anerkannt, weder von den Modellierern, noch von den Anwendern. Vor einigen Jahren hat die "International Society on Biometeorology ISB" das Problem des fehlenden Standards erkannt und eine Kommission eingerichtet, um einen universellen thermischen Klimaindex "Universal Thermal Climate Index UTCI" zu entwickeln (JENDRITZKY et al. 2002). Seit 2005 konnten diese Aktivitäten durch eine auf Initiative des DWD eingerichtete COST Action 730 (Cooperation in Science and Technical Development) (2004) der Europäischen Forschungsgemeinschaft ESF deutlich verstärkt werden. Ziel ist ein internationaler Standard, der auf den wissenschaftlichen Fortschritten der letzten 4 Dekaden in der wirkungsbezogenen thermophysiologicalen Modellierung einschließlich der offenen Fragen der Akklimatisation beruht (FIALA et al. 2001; HAVENITH 2001). Die Arbeiten laufen im Rahmen von WMO-CCI (Commission on Climatology) Aktivitäten und werden voraussichtlich 2009 in einer WMO Guideline on „The Assessment of the Thermal Environment of Human Beings“ frei verfügbar gemacht. Dann kann jeder, der sich mit humanbiometeorologischen Bewertungen befasst, wie insbesondere Wetterdienste, aber auch Universitäten, Einrichtungen des öffentlichen Gesundheitswesens, Epidemiologen, Umweltagenturen, städtische Behörden, Planer etc. für seine spezifischen Zwecke ein Verfahren anwenden, das dem Stand der Wissenschaft entspricht. Die WMO Richtlinie soll zahlreiche Anwendungsbeispiele und Lösungen für den Umgang mit den unterschiedlichen meteorologischen Datengrundlagen enthalten.

Der Universelle Thermische Klima-Index UTCI (Arbeitstitel) muss folgenden Anforderungen genügen:

- 1) Thermophysiological relevant im gesamten Bereich des Wärmeaustausches
- 2) Anwendbar für Betrachtungen des Gesamtorganismus wie für lokale Abkühlungen (Erfrierungen)
- 3) Gültig in allen Klimaten, Jahreszeiten, und Skalen

4) Einsetzbar in den Kernanwendungen in der Humanbiometeorologie

Anwender aus den folgenden Bereichen werden insbesondere angesprochen:

- 1) Wetterdienste (Vorhersagen). Warnungen vor extremer thermischer Belastung, die Teil eines integrierten HHWS darstellen. Information und Beratung der Bevölkerung der Bevölkerung für Freizeitaktivitäten, Verhalten, Klimatherapie.
- 2) Öffentliches Gesundheitswesen. Zwecks Verminderung nachteiliger Gesundheitseffekte durch extreme Wetterereignisse (hier Hitzewellen und Kältewellen) sind Notfallpläne mit geeigneten Interventionsmaßnahmen zu entwickeln, die bei Warnungen aktiv werden.
- 3) Vorsorgeplanung. UTCI Bewertungen liefern die Basis für einen weiten Bereich öffentlicher und privater Vorsorgeplanung, wie Stadt- und Regionalplanung, im Tourismus, für Klimawirkungsforschung. Die langsam zunehmende Nutzbarkeit von monatlichen und saisonalen Vorhersagen wird auch für eine UTCI Anwendung interessant.
- 4) Klimawirkungsforschung im Bereich der Gesundheit. Das zunehmende Erkenntnis einer Klimaänderung und der damit zusammenhängenden Auswirkungen auf die Gesundheit erfordert ursache-wirkungsbezogene epidemiologische Untersuchungen. UTCI ist hier das geeignete Bewertungsmodell. Dies gilt auch für die Bewertung der Ergebnisse von Klimaänderungsszenarien incl. Down-Scaling im Hinblick auf die Gesundheit des Menschen.

Die Experten der WG "Thermophysiological Modellierung" der COST Action 730 haben mittlerweile festgelegt, das UTCI Verfahren auf dem Fiala Ansatz zu gründen, welches dazu in Gemeinschaftsarbeit unter zu Hilfenahme bisher nicht genutzter Daten substantiell weiterentwickelt wird. Das UTCI Verfahren muss sämtliche oben aufgelisteten Anforderungen in der Anwendung erfüllen. Aus praktischen Gründen wird das äußerst komplexe Fiala-Modell nicht explizit auf Routinebasis angewendet werden können. Deshalb wird das zukünftige UTCI Verfahren aus einem vereinfachten Modell bestehen, das an das Fiala-Modell angeeicht ist und das für alle denkbaren Kombinationen von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, mittlerer Strahlungstemperatur und Bekleidung (Eingangsgrößen wie bei GT) die für die Anwendung relevanten Informationen mit hinreichender Genauigkeit und akzeptablem Rechenzeitverhalten liefert. Dabei wird UTCI voraussichtlich (wie z.B. bei GT) die Temperatur einer Referenzumgebung sein, bei der die

gleiche thermische Belastung auftritt. Bewertet werden die physiologischen Variablen Kerntemperatur, mittlere und eine lokale (Gesicht) Hauttemperatur, Schweißrate, Kältezittern.

In einem operationellen Verfahren sind die nicht-meteorologischen Variablen metabolische Rate MET und der thermische Widerstand der Bekleidung von besonderer Bedeutung. Die UTCI Kommission hat als repräsentative Aktivität das Gehen einer Person mit 4 km/h definiert. Dies führt zu einer metabolischen Rate von 2.3 MET (135 W/m<sup>2</sup>). Bekleidung wird über einen intrinsischen Bekleidungswert im Bereich von  $I_{cl} = 0.4 - 2.6 \text{ clo}$  behandelt. Dieser Bereich sollte die typische Bekleidung für Personen abdecken, die an ihr Lokalklima adaptiert sind. Die Frage der Berücksichtigung spezifischer Eigenschaften von Bekleidung, wie z.B. Ventilation zwischen der Körperoberfläche und der Innenseite der Bekleidung, ist noch offen.

### 3 Ausgewählte Anwendungsbeispiele

Das Klima-Michel-Modell mit seiner Aussage zur Gefühlten Temperatur GT wird operationell in zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Durch den Ansatz HeRATE (Health Related Assessment of the Thermal Environment) (Koppe 2005) kann zusätzlich Akklimatisation und kurzfristige verhaltensgesteuerte Anpassung quantitativ berücksichtigt werden, d.h. die verbesserte Tolerierbarkeit einer meteorologischen Umgebung, die man nicht frei wählen kann. HeRATE modifiziert die festen GT Schwellenwerte für die unterschiedlichen Belastungsintensitäten durch die (relativen) Erfahrungen der Bevölkerung mit den thermischen Bedingungen (GT) der vergangenen Wochen (Abb 5). Neben dem relativen Teil dieses Ansatzes enthält das HeRATE-Verfahren auch noch einen absoluten Teil, welcher sicherstellen soll, dass nur die Situationen als potentiell belastend eingestuft werden, die bestimmte Minimum-Kriterien erfüllen. Der konstante, absolute Teil, der mit 2/3 gewichtet wird, berücksichtigt die Tatsache, dass der Organismus des Menschen als eines homoiothermen Lebewesens seine Körperkerntemperatur mit nur geringen Abweichungen auf einem konstanten Wert halten will. Die zeitabhängige kurzzeitige physiologische Akklimatisation sowie die hier sehr bedeutsame Verhaltensanpassung werden im relativen Teil mit einem Drittel gewichtet. Die Berücksichtigung der thermischen Vergangenheit (Vorgeschichte) wird über die Anwendung eines halbseitigen Gauß-Filters realisiert, wodurch es zu einer realistischen Phasenverschiebung zwischen zeitlicher Anpassung und aktueller Belastung kommt. Damit ist das Klima-Michel-Modell in der letzten Version in der Lage — ohne künstliche Festlegungen von Jahreszeiten oder Kalibrierung an das Klima von



bestimmten Orten – in unterschiedlichen Klimaregionen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten mit entsprechend angepassten Schwellenwerten eingesetzt zu werden. Gleichwohl ist der DWD bis heute der einzige nationale Wetterdienst, der routinemäßig ein komplettes Wärmehaushaltsmodell des Menschen für seine vielfältigen Anwendungen in der Biometeorologie einsetzt.

Abb. 5 Variable Schwellenwerte für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in Baden-Württemberg.

Zahllose epidemiologische Studien weltweit belegen eindrucksvoll die gesundheitlichen Auswirkungen extremer thermischer Bedingungen wie Hitzewellen. Abb. 6 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus der Zeitreihe von Mortalitätsdaten aus Baden-Württemberg, die den Hitzesommer 2003 beinhaltet. Während dieses Sommers sind in Europa ca. 55.000 Tote (davon ca. 35.000 allein im August) der Hitze zuzuordnen (KOSATZKY 2005). Das öffentliche Gesundheitssystem war praktisch nirgendwo vorbereitet, ebenso wenig die meisten nationalen Wetterdienste.

Abb. 6 Tägliche Mortalitätsraten MR in Baden-Württemberg 2002 bis Herbst 2003. Rote Linie: Erwartungswert auf Basis eines Gauß-Filters. Auffallend: MR Gipfel im Juni 2002 (kurze Hitzewelle), Episode im Frühjahr 2003 (im Zusammenhang mit einer Grippe-Epidemie), MR Spitzen im Juli und insbesondere August durch Hitzewellen (SCHÄR and JENDRITZKY 2004).

Bei der Betrachtung der Auswirkungen des Hitzesommers sind zahlreiche bisher ungelöste Fragen aufgetaucht:

- 1) Es existiert keine allgemein anerkannte Definition von Hitzewelle (nach dem oben dargestellten muss eine solche auf einem thermophysiologischen Ansatz beruhen).
- 2) In der Epidemiologie existiert keine einheitliche Definition des Erwartungswertes (Basislinie). Es wurde in Abb. 6 ein Filterverfahren zur Erzeugung der Zeitreihe der Basislinie benutzt, das weit besser geeignet erscheint, als einfache Monatsmittelwerte.

- 3) Es gibt im Grundsatz keine Information über die wirkliche Hitzebelastung der Bevölkerung in unterschiedlichen Stockwerken unterschiedlicher Häuser; es werden einfach die an üblicherweise nicht in den Innenstädten liegenden Wetterstationen bestimmten Belastungen auf die Bevölkerung angewandt. Dabei muss jedoch angenommen werden, dass der Effekt der städtischen Wärmeinsel (UHI) lokal die synoptische Wärmebelastung erhöht. Aber um wie viel?

Abb. 7 Die Hitzewellen 2003 in Europa: Ein singuläres Ereignis?

Basierend auf Simulationen der Klimaänderung mit HIRAM zeigt die Verteilung der Maximumtemperatur in Basel im Sommer 2003, dass dieser extreme Sommer, wenn die Modellprognose zutrifft, in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts in Mitteleuropa als Normalsommer angenommen werden muss, Abb. 7 (BENISTON 2004)! Dies ist verträglich mit der Veränderung des Jahresmittelwertes der Gefühlten Temperatur in einem zukünftigen Klima (2041 – 2050) in Mitteleuropa im Vergleich zum Kontrolllauf (1971 – 1980), berechnet mit dem Zeitscheibenexperiment von ECHAM4 in T106 Auflösung unter der Annahme des „business-as-usual“ Szenarios (unveränderter CO<sub>2</sub> Ausstoß), Abb. 8. Für Mitteleuropa muss im Hochsommer mit einer Erhöhung der Gefühlten Temperatur im Mittel um 3 – 7°C gerechnet werden. Der dringende Bedarf, sich darauf einzustellen, ist offensichtlich. Kurzzeitige (I) und langfristige (II) Anpassungen werden lebenswichtig. Adaptation ist der Schlüsselbegriff.

Abb. 8 Änderung des Jahresmittels der Gefühlten Temperatur GT in einem zukünftigen Klima (2041-2050) im Vergleich zum Klima 1971-1980 (Kontrolllauf) unter Annahme Immissionsszenario IS92a ("business-as-usual"). Zeitscheibenexperiment ECAM4/T106. Quelle: Deutsches Klimarechenzentrum).

## **I Kurzfristige Anpassung:**

Zahlreiche Menschenleben hätten gerettet werden können, wenn, wie bei den WMO/WHO/UNEP Modellprojekten Rom und Shanghai empfohlen, geeignete Hitzewarnsysteme (Heat Health Warning Systems HHWS) 2003 in Europa im Einsatz

gewesen wären. Solche Systeme basieren (a) auf der biometeorologischen Vorhersage der Überschreitung eines mit den Gesundheitsbehörden abgestimmten Schwellenwertes für thermische Belastung (Wärmebelastungsvorhersage). Die anschließenden Interventionen (b), die auf einem an die lokalen Bedingungen angepassten Notfallplan beruhen müssen, gehören in die Zuständigkeit des öffentlichen Gesundheitswesens. HHWSs müssen vorsorglich geplant werden mit kompletter Beschreibung aller Abläufe und klarer Festlegung der Schnittstelle zwischen dem nationalen Wetterdienst und dem Gesundheitsbereich (KOPPE et al. 2004; KOVATS and JENDRITZKY 2006; WMO 2004) (siehe dazu den Beitrag „Das Medizin-Meteorologische Informationsangebot....“ in diesem Heft).

Die gesamte HHWS Prozedur kann in vier mehr oder weniger unabhängige Module unterteilt werden:

1) Die Aufgabe für das öffentliche Gesundheitswesen

Das wichtigste Modul stellt ein an die lokalen Verhältnisse angepasster Notplan dar, der auf einer spezifischen Strategie zur Schadensminderung beruht. Dieser Plan wird aktiv, wann immer eine Hitzewarnung ausgegeben wird. Geltungsbereich, Interventionsmaßnahmen, verantwortliche Organe, Entscheidungsträger, Interessensgruppen etc. müssen festgelegt werden. Die bisherigen Erfahrungen mit Versuchen, Hitzewarnsysteme zu implementieren, zeigen deutlich, dass die Entwicklung von geeigneten Interventionsstrategien, die lokale administrative und infrastrukturelle Erfordernisse berücksichtigen, den schwierigste Schritt darstellen.

2) Was heißt Wärmebelastung?

Die Behinderung der Wärmeabgabe des Körpers des Menschen belastet den Organismus. Personen mit eingeschränkter Anpassungskapazität, die nicht vollständig gesund sind, können bei extremer Belastung aus unterschiedlichen Ursachen sterben; die Thermoregulation ist dabei immer betroffen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer gesundheitsbezogene Definition von thermischer Belastung, die im Sinne einer Dosis-Wirkungsbeziehung thermophysiologisch relevant ist.

3) Die Wärmebelastungsvorhersage

Die operationelle Vorhersage extremer Wärmebelastung für die nächsten Tage muss auf Routineprodukten der nationalen Wetterdienste beruhen (Abb.9; siehe dazu „Medizin-

Meteorologische Informationsangebote...“ in diesem Heft). Die Gesundheitsbehörden geben die Art der gewünschten Warninformation im Hinblick auf Wärmebelastungsintensität und Zeitabläufen vor. Akklimatisation ist zu berücksichtigen. Die Vorhersage von Mortalitätsanstiegen kann nicht als Aufgabe eines nationalen Wetterdienstes angesehen werden (WMO 2004).

Abb. 9 Beispiel einer hypothetischen Fünftages-Vorhersage der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Hitzewelle 08/08/2003 in Europa.

#### 4) Epidemiologie

Die Ergebnisse von Korrelationsuntersuchungen zwischen biometeorologischen Bewertungen und Gesundheitsdaten (Mortalität/Morbidität) können sinnvoll für Eichzwecke eingesetzt werden, z.B. um spezifische Schwellenwerte zu definieren. Häufig stellt aber die Verfügbarkeit von gesundheitsbezogenen Datenreihen, die fehlende Expertise und der Mangel an Ressourcen ein unlösbares Problem dar. Das mögliche “Fine Tuning” wäre aber auch nur für das Untersuchungsgebiet gültig. Wissenschaftlich gesehen wäre es natürlich sehr befriedigend von überall verlässliche epidemiologische Ergebnisse zur Verfügung zu haben; für die praktische Anwendung gibt es dafür aber keinen dringenden Grund mehr („Nice to have“). Wann immer eine Hitzewelle auftritt ist es ein gut organisiertes, integriertes Hitzewarnsystem wichtiger als detaillierte Perfektion. In Abb. 10 sind einige Ergebnisse von epidemiologischen Untersuchungen zusammengestellt, bei denen die thermischen Belastungen auf GT plus HeRATE basieren. Man erkennt, dass sich die Beziehungen der Mortalitätsrate in den unterschiedlichen Klimaten sehr ähnlich verhalten.

Abb. 10 Beispiele epidemiologischer Beziehungen der Mortalitätsrate zu den thermischen Bedingungen

Hitzewarnsysteme (HHWS können kurzfristig eingerichtet werden. Die zahlreichen erfolgreichen Systeme, die von Kalkstein und seinen Schülern als WMO/WHO/UNEP Modellprojekte, überwiegend aber in den USA eingerichtet hat, gelten als gute Beispiele für den Wert des Verfahrens, wenn auch die eingesetzten biometeorologische

Bewertungsverfahren nicht den oben diskutierten thermophysiologischen Anforderungen genügen.

## **II Langfristige Anpassung:**

Das Klima einer Stadt stellt als Ergebnis einer geplanten oder zufälligen Änderung der Landnutzung ein eindrucksvolles Beispiel einer anthropogenen Klimamodifikation dar. Im Hinblick auf das Thema thermische Bedingungen und Gesundheit in der Stadt muss danach die städtische Wärmeinsel UHI (Urban Heat Island) Gegenstand der Vorsorgeplanung sein. In der umfangreichen Literatur zum Stadtklima basiert die Betrachtung der UHI immer auf dem Unterschied allein der Lufttemperatur zum Umland, statt auf den Menschen bezogene Bewertungsverfahren zu nutzen.

Dabei besteht kein Zweifel daran, dass UHI für die Gesundheit des Menschen bedeutsam sein kann, weil sie nachteilige Gesundheitseffekte durch Exposition gegenüber thermischen Extrembedingungen verursacht. Die städtische Wärmeinsel addiert sich auf die Intensität einer meso-skalierten Hitzewelle, wodurch der Einfluss des Wetters auf Morbidität und Mortalität verstärkt wird. Wenn die UHI als Resultat städtischer Planung angesehen wird, muss sie folglich auch auf zukünftige Planung reagieren. Aber trotz der eindrucksvollen Zunahme stadtklimatologischen Wissens existiert immer noch eine starke Lücke zur Anwendung. Die erforderlichen Methoden unterscheiden sich nach den Zeitskalen. Auf der synoptischen Skala sind Hitzewarnsysteme HHWSs mit geeigneten, lokal angepassten Interventionsstrategien erforderlich, um nachteilige Gesundheitseffekte durch Hitzewellen abzumildern. Für die mittel- bis langfristige Entwicklung des Stadtklimas gilt es Standards für die Stadtentwicklung zu schaffen, das Wissen besser verfügbar zu machen und leichter anwendbare Werkzeuge für die klimabezogene Stadtplanung zu entwickeln. Das würde dem Stadtplaner helfen, sein grundlegendes Ziel zu erreichen: Schaffung und Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsbedingungen. Das Problem der globalen Klimaänderung macht vernünftige Stadtplanung umso dringender.

Aus Sicht der Bioklimatologie sind diejenigen atmosphärischen Felder, die die thermischen Bedingungen in der unteren Stadthindernisschicht UCL (Abb. 11), dem Lebensraum des Menschen, bestimmen, von Interesse (OKE 1987). Während die Lufttemperatur und auch die

Luftfeuchte in der Regel nur sehr geringe Unterschiede zwischen der Sonnen- und der Schattenseite aufweist, zeigt GT, im Wesentlichen durch den Einfluss der Strahlung thermophysologisch relevante Unterschiede als deutlichen Hinweis für die Planung. Bei Windstille bedeutet die Exposition gegenüber direkter Sonnenstrahlung in der Wärmebilanz etwa soviel, wie ein Anstieg der Lufttemperatur um 15 K!

Abb. 11 Meteorologische und biometeorologische Bedingungen in einem Straßenquerschnitt mit MUKLIMO2 (GT Gefühlte Temperatur,  $\Delta T_{mrt}$  Abweichung der mittleren Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur  $T_a$ )

Messungen von ALI-TOUDERT and MAYER (2006) von  $T_a$  und  $T_{mrt}$ , hier allerdings bewertet mit PET, auf der Nordseite einer O-W-orientierten Straßenschlucht über 32 Stunden bei „Strahlungswetter“ zeigen tagsüber ebenfalls den beherrschenden Einfluss der mittleren Strahlungstemperatur auf die thermische Bewertungsgröße (Abb.12) und bestätigen damit die Ergebnisse der Modellrechnungen mit MUKLIMO2.

Abb. 12  $T_a$  Lufttemperatur,  $T_{mrt}$  mittlere Strahlungstemperatur, PET Physiologisch Äquivalente Temperatur auf der Nordseite einer O-W-orientierten Straßenschlucht in Freiburg am 14. und 15. Juli 2003.

Für Zwecke der Stadtplanung scheint die Modellierung die Methode der Wahl, weil damit unterschiedliche Planungsalternativen durchgespielt werden können. Geeignete Stadtklimamodelle mit hoher Auflösung sind rechenzeitaufwendig und verlangen Kenntnisse, die ein Anwender in der Regel nicht besitzt. Für praktische Anwendungen in der Stadtplanung wurde deshalb im DWD als ein Expertensystem das Urbane Bioklima Modell UBIKLIM (GRAETZ et al. 1992; FRIEDRICH et al. 2001) entwickelt, das verfügbares Wissen aus der Stadtklimatologie in einem objektiven Verfahren verwertet. Unter Nutzung von GIS Techniken simuliert UBIKLIM die thermischen Bedingungen in der Stadthindernisschicht, die durch die Art der Landnutzung, d.h. der Siedlungsstruktur (die Planungsvariablen werden in Grenzschichtvariablen transformiert), gegeben ist. Wechselwirkungen zwischen benachbarten Strukturen und der Topographie werden empirisch ebenso berücksichtigt, wie meso- und makro-skalige Klimabedingungen. Das Beispiel in Abb. 13 zeigt, wie sich

innerhalb der Stadt Berlin die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Wärmebelastung (auf Basis GT, nicht Ta) räumlich differenziert ausprägt, worin der Einfluss der unterschiedlichen Landnutzungen zum Ausdruck kommt

Abb. 13 Häufigkeit von Wärmebelastung in Tagen pro Jahr in Berlin auf Basis von UBIKLIM Simulationen im 10 m Raster.

Neben der Notwendigkeit, durch Planungsmaßnahmen die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel UHI (eigentlich des Wärmeinselarchipels) zu verringern, müssen als bisher unterschätztes Problem auch die thermischen Belastungen in den Innenräumen vermindert werden, zumal der Mensch sich in unseren Klimabedingungen überwiegend in Innenräumen aufhält. Dazu braucht es eine intelligente Architektur, die jetzige und zukünftige Gegebenheiten des Klimas durch Kontrolle der Abschattungsmöglichkeiten, Ventilation, Materialwahl, passive Kühlung etc. berücksichtigt.

**Literatur** (weitere Literatur bei [gerd.jendritzky@meteo.uni-freiburg.de](mailto:gerd.jendritzky@meteo.uni-freiburg.de))

ALI-TOUDERT, F., H. MAYER, 2006 Thermal comfort in an east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. *Theor. Appl. Climatol.* DOI 10.1007/s00704-005-0194-4.

BENISTON, M., 2004: The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophys. Res. Letters* **31**, L02202. 1-4.

COST Action 730 on UTCI, 2004: Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for Assessing the Thermal Environment of the Human Being. MoU of COST Action 730. 17 S. [www.utci.org](http://www.utci.org)

DE DEAR, R.J., G.S. BRAGER, 2002: Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, *Energy Bldgs* **34**, 549-561.

FANGER, P.O., 1970: Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering. *Danish Technical Press*, Copenhagen.

- FIALA, D., K.J. LOMAS, M. STOHRER, 1999: A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *Journal of Applied Physiology* **87** (5), 1957-1972.
- FIALA, D., K.J. LOMAS, M. STOHRER, (2001) Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.* **45**, 143-159.
- GAGGE, A.P., A.P. FOBELETS, P.E. BERGLUND, 1986: A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.* **92**, 709-731.
- HAVENITH; G., 2001: An individual model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response, *Journal of Applied Physiology*, **90**, 1943-1954.
- HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.* **43**, 71-75:
- JENDRITZKY, G., W. SÖNNING, H.J. SWANTES, 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung ("Klima-Michel-Modell"). *Beiträge d. Akad. f. Raumforschung und Landesplanung* **28**, Hannover.
- KOPPE, C., S. KOVATS, G. JENDRITZKY, B. MENNE, 2004: Heat-waves: risks and responses. World Health Organization. *Health and Global Environmental Change, Series, No. 2*, Copenhagen, Denmark.
- KOPPE, C., 2005: Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. *Ber. d. DWD* **226**, Offenbach.
- KOVATS, S.R., G. JENDRITZKY, 2006: Heat-waves and Human Health. In: MENNE, B., K. L. EBI (eds.): *Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health*. Steinkopff, Darmstadt, 63-97.
- PARSONS, K.C. 2003: Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. *Taylor & Francis*, London, New York, 527 S.
- SCHÄR, C., G. JENDRITZKY 2004: Hot news from Summer 2003. news and views. *Nature*. Vol.**432**, 2 Dec 2004, 559-560
- WMO, 2004: Proceedings of the Meeting of Experts to Develop Guidelines on Heat/Health Warning Systems. *WCASP- No. 63, WMO-TD No. 1212*, Geneva.



### Legende der Abbildungen und der Tabelle:

- Abb. 1 Die Wärmebilanz des Menschen (HAVENITH, 2003, in KOPPE et al. 2004)
- Abb. 2a,b Schematische Darstellung eines physiologischen Modells der Thermoregulation des Menschen (FIALA et al. 2001, HAVENITH, 2001). (a) das steuernde System, (b) das passive System.
- Abb. 3 PMV Predicted Mean Vote,  $PT^*$  Gefühlte Temperatur (Perceived Temperature), PET Physiological Equivalent Temperature,  $OUT\_SET^*$  Outdoor Standard Effective Temperature, AT Apparent Temperature, WCT Wind Chill Temperature,  $T_{sk}$  mittlere Hauttemperatur, SR Schweißrate,  $E_{sk}$  Wärmeabgabe über Verdunstung,  $W_{sk}$  Hautbenetzungsgrad,  $I_{cl}$  Wärmeisolation der Bekleidung,  $clo$  Bekleidungswert,  $T_a$  Lufttemperatur,  $T_{mrt}$  mittlere Strahlungstemperatur,  $v$  Windgeschwindigkeit,  $e$  Wasserdampfdruck.
- Abb. 4 PMV und Gefühlte Temperatur GT
- Abb. 5 Variable Schwellenwerte für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in Baden-Württemberg.
- Abb. 6 Tägliche Mortalitätsraten MR in Baden-Württemberg 2002 bis Herbst 2003. Rote Linie: Erwartungswert auf Basis eines Gauß-Filters. Auffallend: MR Gipfel im Juni 2002 (kurze Hitzewelle), Episode im Frühjahr 2003 (im Zusammenhang mit einer Grippe-Epidemie), MR Spitzen im Juli und insbesondere August durch Hitzewellen (SCHÄR and JENDRITZKY 2004).
- Abb. 7 Die Hitzewellen 2003 in Europa: Ein singuläres Ereignis?
- Abb. 8 Änderung des Jahresmittels der Gefühlten Temperatur GT in einem zukünftigen Klima (2041-2050) im Vergleich zum Klima 1971-1980 (Kontrolllauf) unter

Annahme Immissionsszenario IS92a ("business-as-usual").

(Zeitscheibenexperiment ECAM4/T106. Quelle: Deutsches Klimarechenzentrum).

- Abb. 9 Beispiel einer hypothetischen Fünftages Vorhersage der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Hitzewelle 08/08/2003 in Europa.
- Abb. 10 Beispiele epidemiologischer Beziehungen der Mortalitätsrate zu den thermischen Bedingungen
- Abb. 11 Meteorologische und biometeorologische Bedingungen in einem Straßenquerschnitt mit MUKLIMO2 (GT Gefühlte Temperatur,  $\Delta T_{mrt}$  Abweichung der mittleren Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur).
- Abb. 12  $T_a$ ,  $T_{mrt}$ , PET auf der Nordseite einer O-W-orientierten Straßenschlucht in Freiburg am 14. und 15. Juli 2003.
- Abb. 13 Häufigkeit von Wärmebelastung in Tagen pro Jahr in Berlin auf Basis von UBIKLIM Simulationen im 10 m Raster.
- Tab. 1 Gefühlte Temperatur GT und thermische Beanspruchung

Prof. Dr. Gerd Jendritzky  
Meteorologisches Institut  
Universität Freiburg  
Werderring 10  
D-79085 Freiburg  
Germany  
Tel uni +49 761 203 3585  
Fax uni +49 761 203 3586  
Tel priv +49 7681 8585  
Fax priv +49 7681 475273  
[gerd.jendritzky@meteo.uni-freiburg.de](mailto:gerd.jendritzky@meteo.uni-freiburg.de)

Dr. Dusan Fiala  
FBTA, University of Karlsruhe  
Englerstr. 7  
D-76131 Karlsruhe, Germany  
P. +49 (0)721 608-2890 or -6982  
F. +49 (0)721 608-6092  
E. [dfiala@fbta.uni-karlsruhe.de](mailto:dfiala@fbta.uni-karlsruhe.de)

Prof. Dr. G. Havenith  
Dept. Human Sciences, Environmental Ergonomics Research Centre  
Loughborough University,  
LE11 3TU, UK  
phone +44 (0)1509 223031  
fax +44 (0)1509 223940  
E-mail: [G.Havenith@lboro.ac.uk](mailto:G.Havenith@lboro.ac.uk)

Dr. Christina Koppe  
Deutscher Wetterdienst  
Medizin-Meteorologie  
Stefan-Meier-Str.4  
79104 Freiburg  
Tel. 0761 28202 73  
Fax 0761 28202 77  
[christina.koppe@dwd.de](mailto:christina.koppe@dwd.de)

Dr. Gudrun Laschewski  
Deutscher Wetterdienst  
Medizin-Meteorologie  
Stefan-Meier-Str.4  
79104 Freiburg  
Tel. 0761 4539843  
Fax 0761 28202 77  
[gudrun.laschewski@dwd.de](mailto:gudrun.laschewski@dwd.de)

Henning Staiger  
Tel. 07682 6471  
Henning.Staiger@gmx.de

Dr. Birger Tinz  
Deutscher Wetterdienst  
Bernhard-Nocht-Str.  
Hamburg  
040 6690 1800  
[birger.tinz@dwd.de](mailto:birger.tinz@dwd.de)

## Abbildungen und Tabelle Thermische Umweltbedingungen

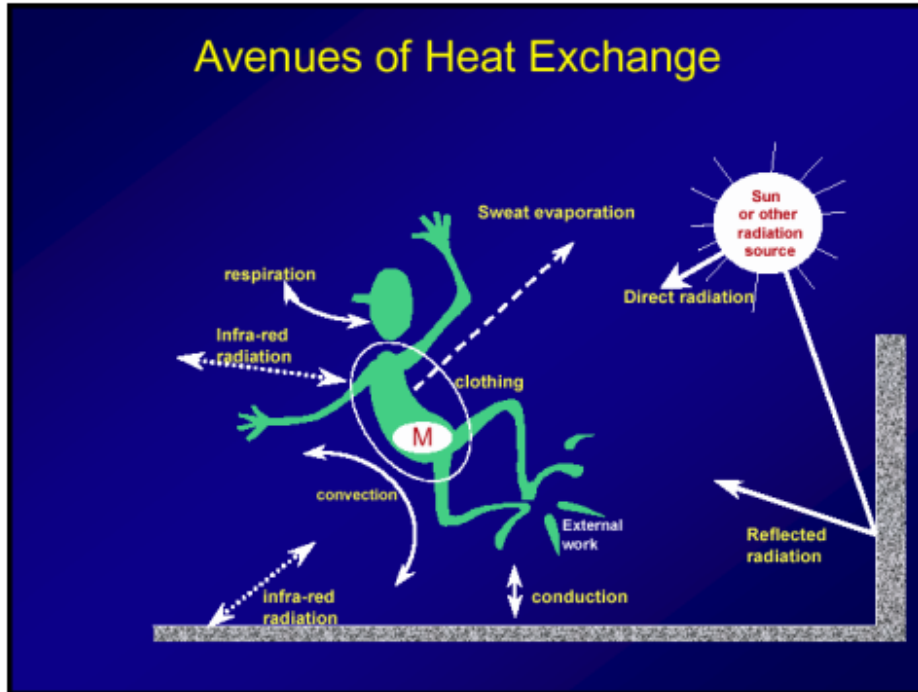
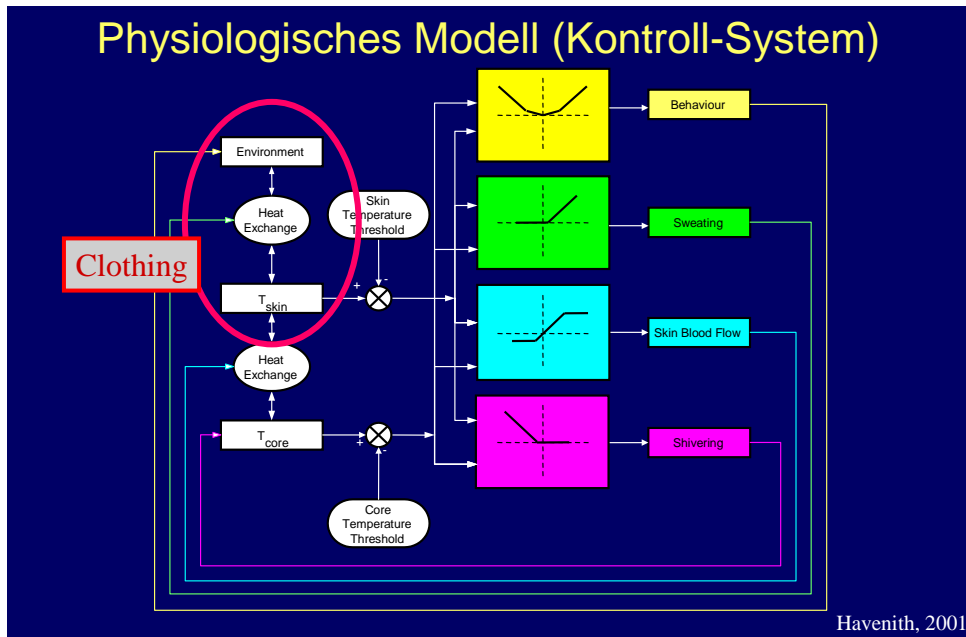


Abb. 1 Die Wärmebilanz des Menschen (Havenith, 2003, in Koppe et al. 2004)



### Physiologisches Modell (Passives System)

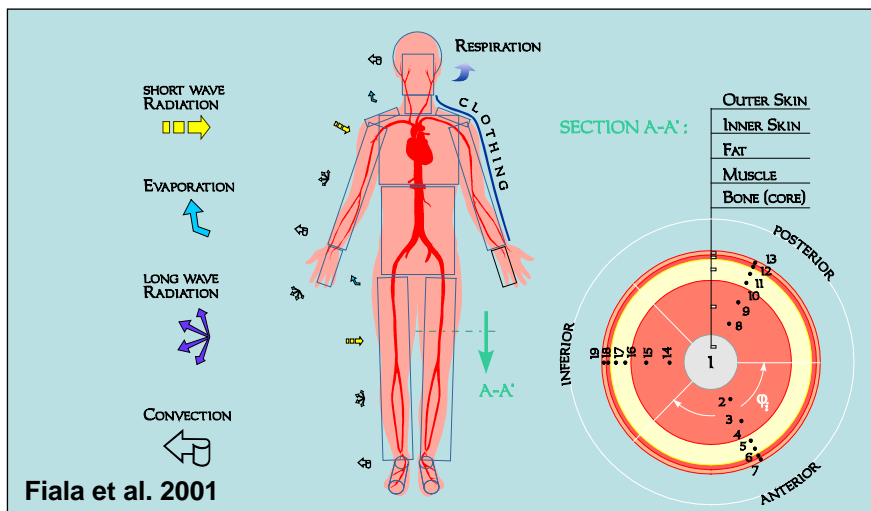


Abb. 2a,b Schematische Darstellung eines physiologischen Modells der Thermoregulation des Menschen (Fiala et al. 2001, Havenith, 2001). (a) das steuernde System, (b) das passive System.

### Thermophysiological Assessment of the Thermal Environment

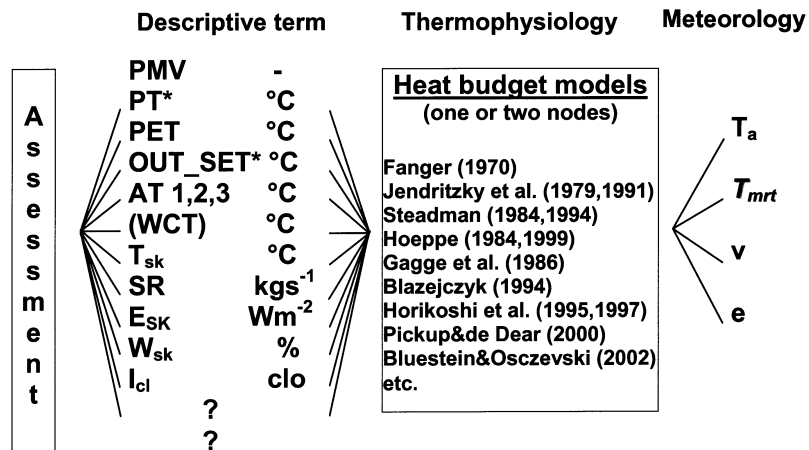


Abb. 3 PMV Predicted Mean Vote, PT\* Gefühlte Temperatur (Perceived Temperature), PET Physiological Equivalent Temperature, OUT\_SET\* Outdoor Standard Effective Temperature, AT Apparent Temperature, WCT Wind Chill Temperature, T<sub>sk</sub> mittlere Hauttemperatur, SR Schweißrate, E<sub>sk</sub> Wärmeabgabe über Verdunstung, W<sub>sk</sub> Hautbenetzungsgrad, I<sub>cl</sub> Wärmeisolation der Bekleidung, clo Bekleidungswert, T<sub>a</sub> Lufttemperatur, T<sub>mrt</sub> mittlere Strahlungstemperatur, v Windgeschwindigkeit, e Wasserdampfdruck.

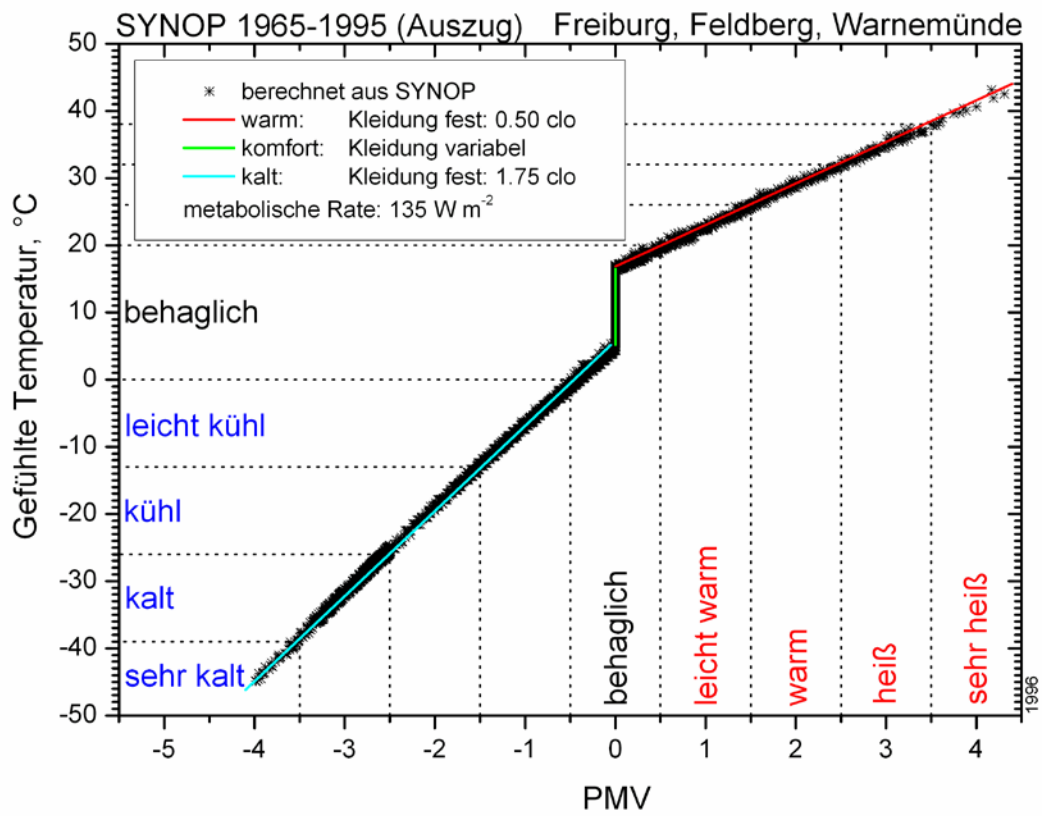


Abb. 4 PMV und Gefühlte Temperatur GT



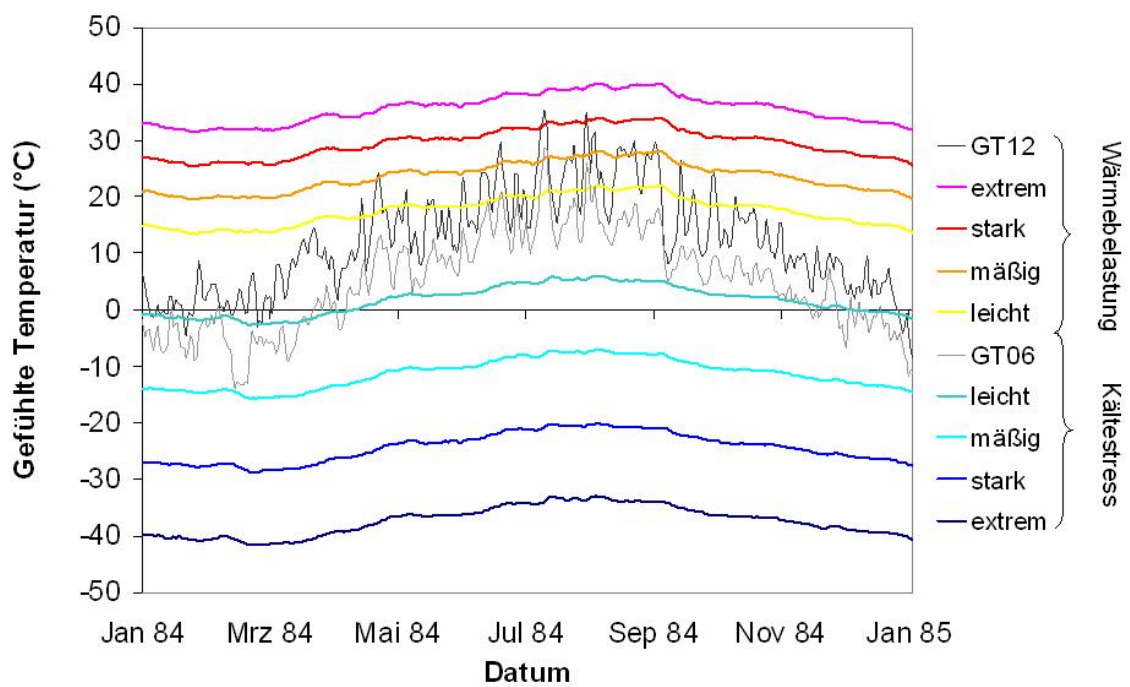


Abb. 5 Variable Schwellenwerte für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in Baden-Württemberg.

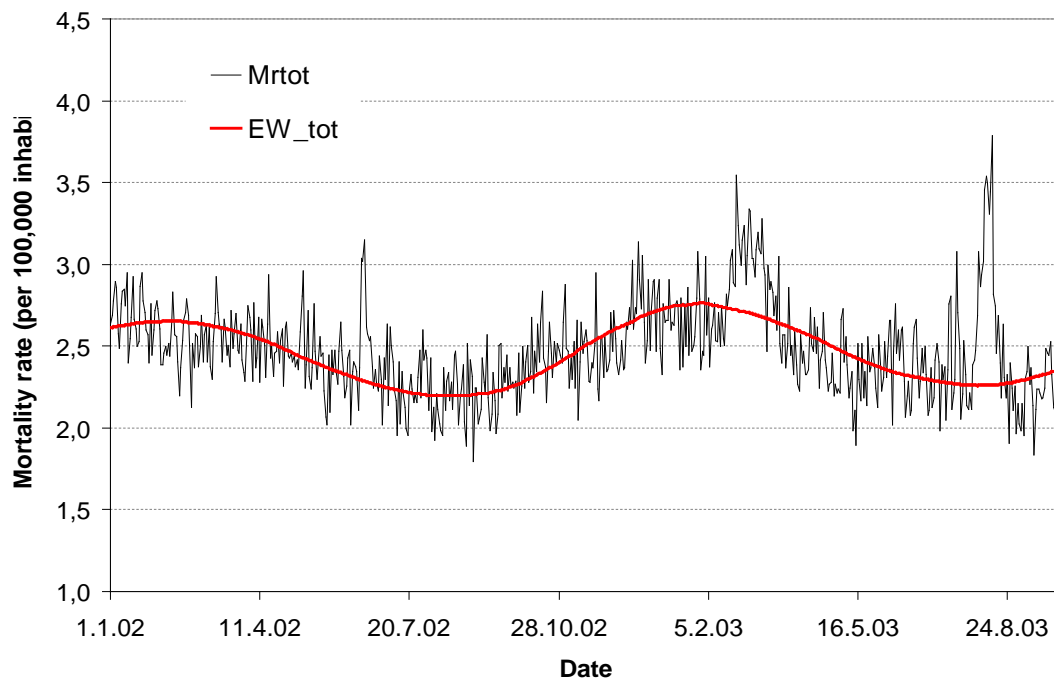
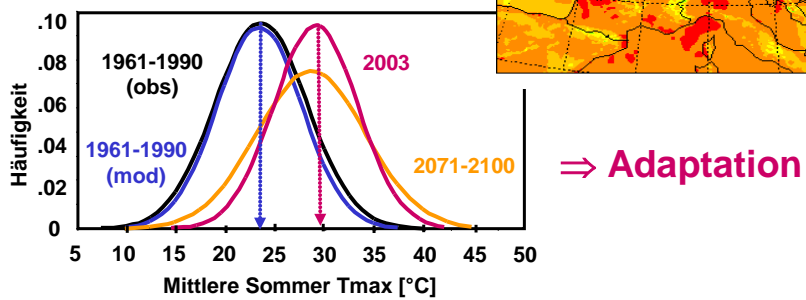
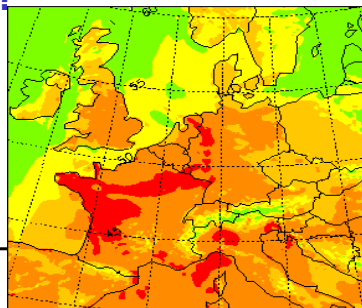


Abb. 6 Tägliche Mortalitätsraten MR in Baden-Württemberg 2002 bis Herbst 2003. Rote Linie: Erwartungswert auf Basis eines Gauß-Filters. Auffallend: MR Gipfel im Juni 2002 (kurze Hitzewelle), Episode im Frühjahr 2003 (im Zusammenhang mit einer Grippe-Epidemie), MR Spitzen im Juli und insbesondere August durch Hitzewellen (Schär and Jendritzky 2004).

## Die Hitzewelle 2003 in Europa: Ein singuläres Ereignis?

IPCC WGI, 2001:

*“Höhere Maximumtemperaturen und mehr heiße Tage über nahezu allen Landflächen sind sehr wahrscheinlich”*



Beniston, 2004

Abb. 7 Die Hitzewellen 2003 in Europa: Ein singuläres Ereignis?

Jahresm. Gef. Temp. 12 MOZ / Grad C, ECHAM4/T106 IS92-CTRL

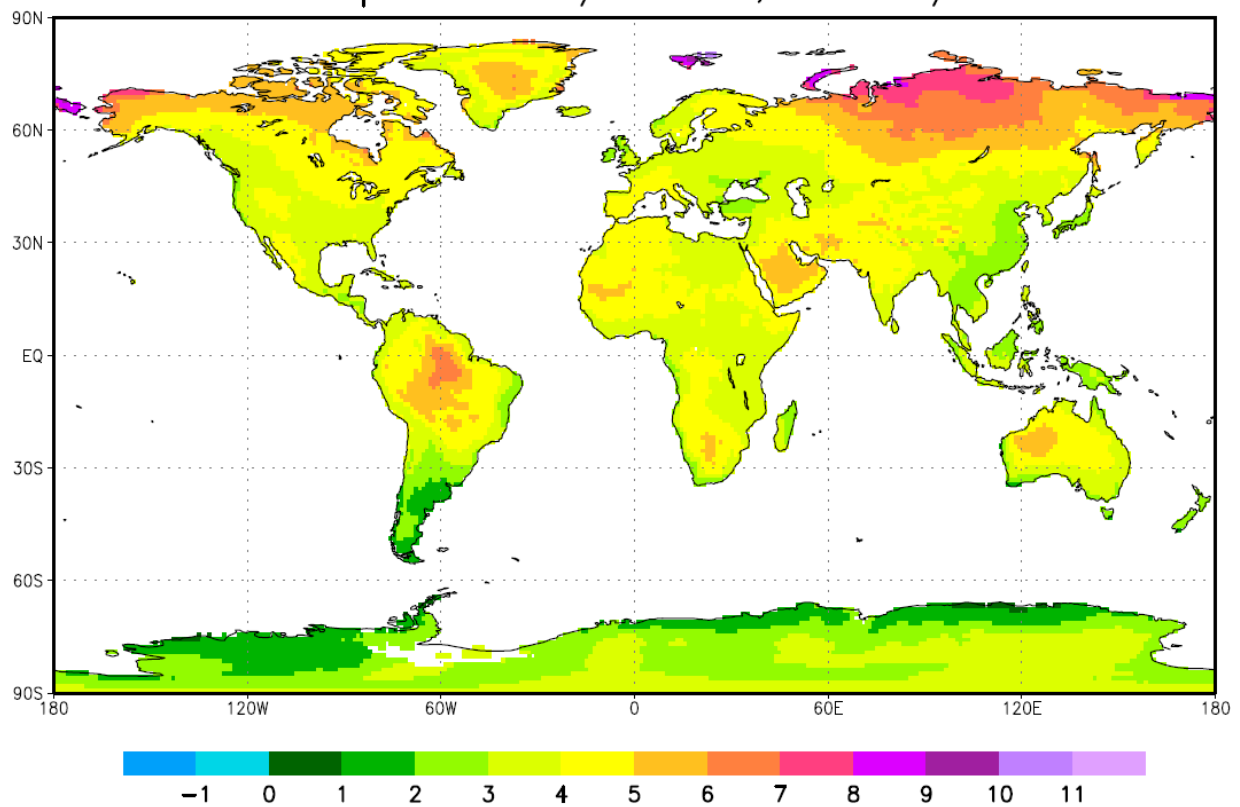


Abb. 8 Änderung des Jahresmittels der Gefühlten Temperatur GT in einem zukünftigen Klima (2041-2050) im Vergleich zum Klima 1971-1980 (Kontrolllauf) unter Annahme Immissionsszenario IS92a ("business-as-usual"). Zeitscheibenexperiment ECAM4/T106. (Quelle: Deutsches Klimarechenzentrum).

**Hypothetische 5-  
Tagesvorhersage der  
Eintrittswahrschein-  
lichkeit für eine  
Hitzewelle  
für 08/08/2003**

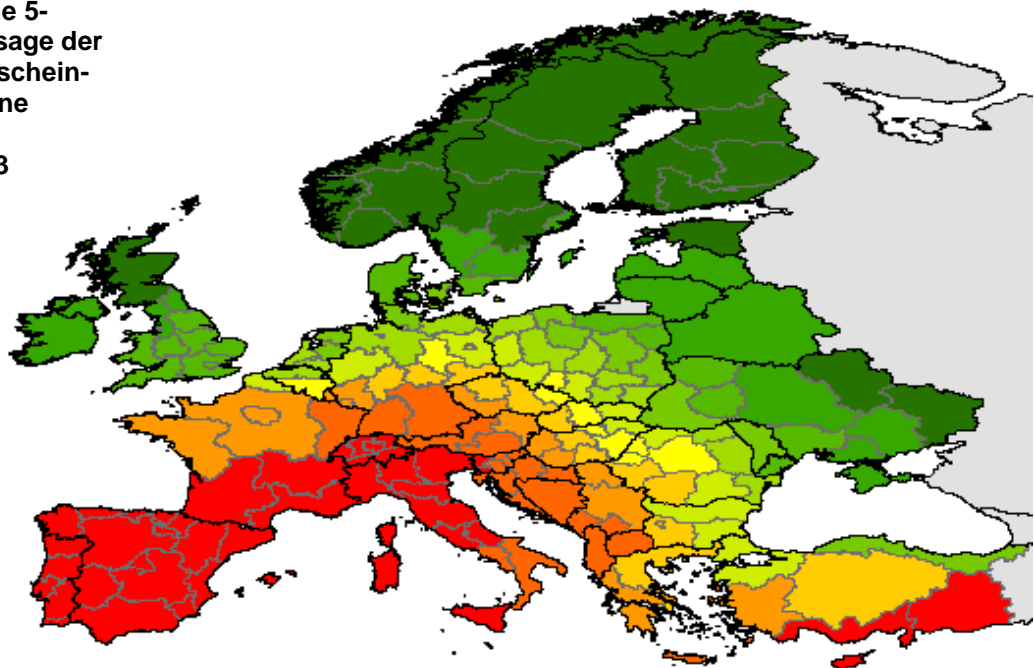


Abb. 9 Beispiel einer hypothetischen Fünftages Vorhersage der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Hitzewelle 08/08/2003 in Europa.

## Relative Mortalität: Europa 1986-1996

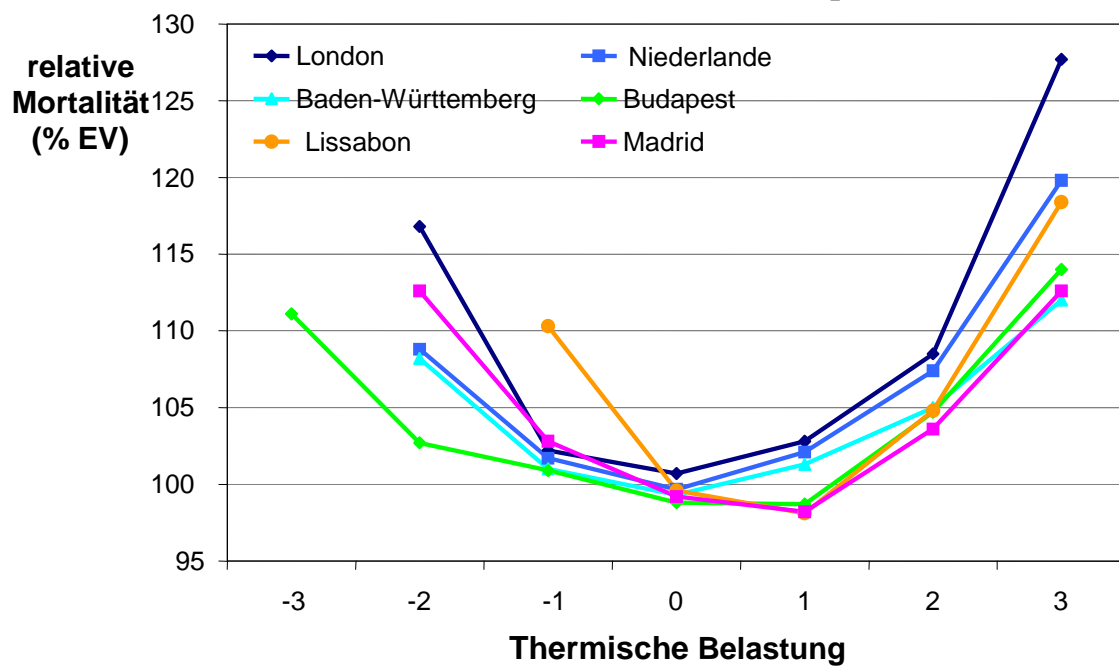


Abb. 10 Beispiele epidemiologischer Beziehungen der Mortalitätsrate zu den thermischen Bedingungen

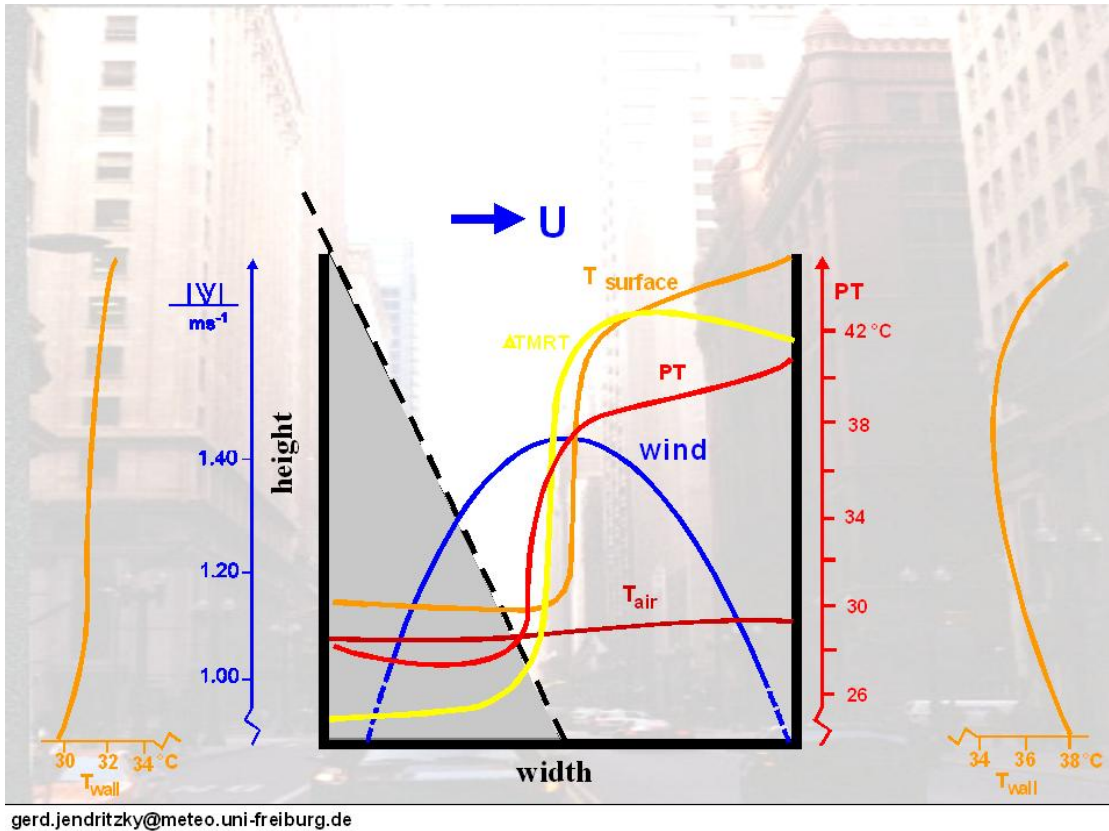


Abb. 11 Meteorologische und biometeorologische Bedingungen in einem Straßenquerschnitt mit MUKLIMO2 (PT Gefühlte Temperatur,  $\Delta T_{mrt}$  Abweichung der mittleren Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur).

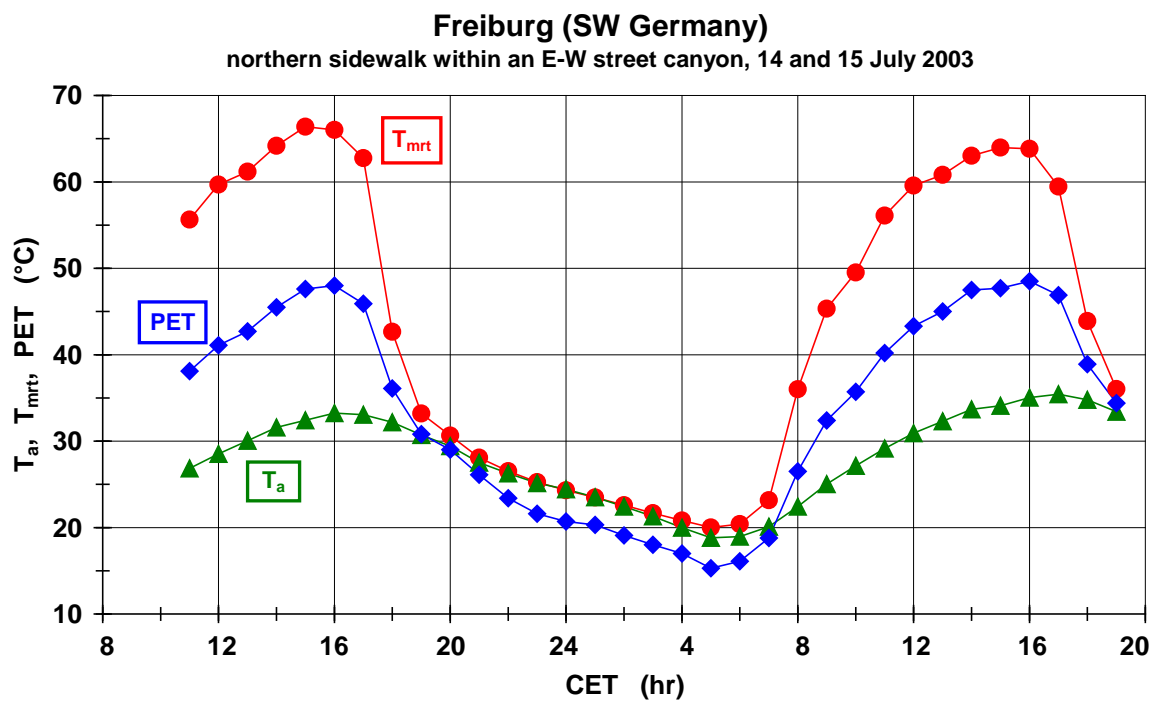


Abb. 12  $T_a$ ,  $T_{mrt}$ , PET auf der Nordseite einer E-W-orientierten Straßenschlucht in Freiburg am 14. und 15. Juli 2003.



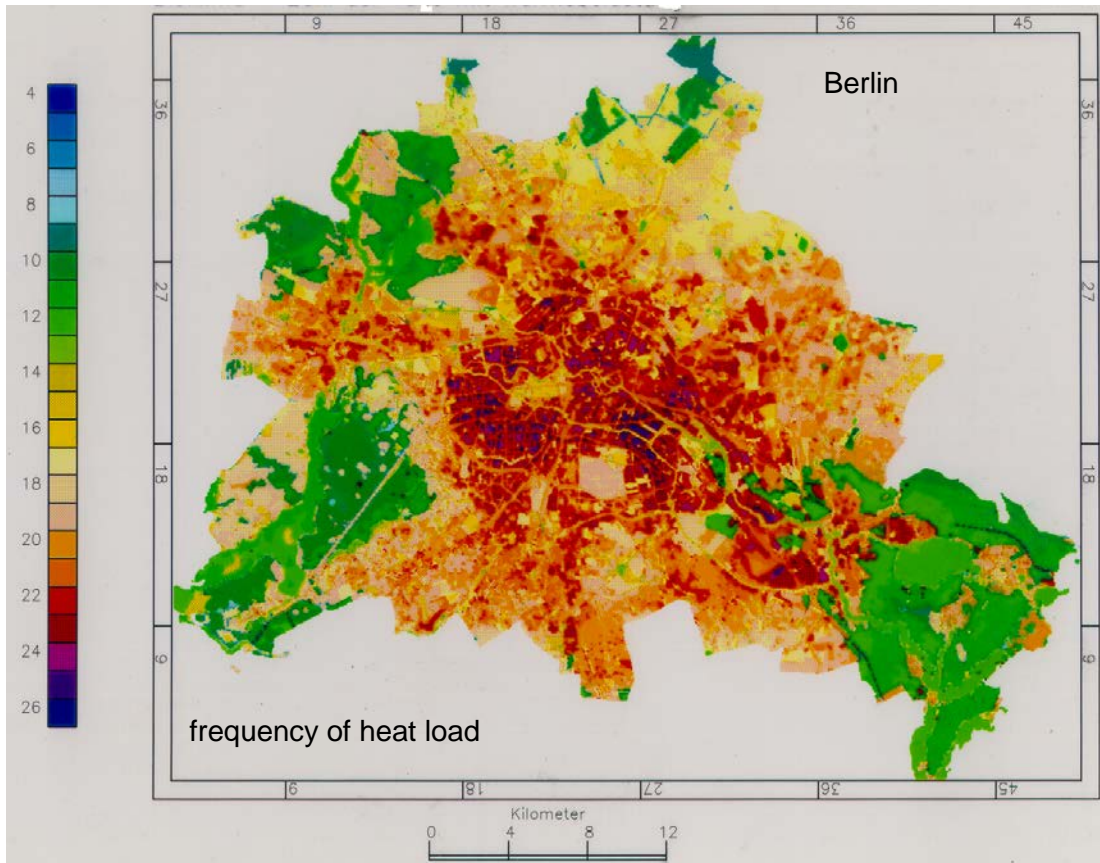


Abb. 13 Häufigkeit von Wärmebelastung in Tagen pro Jahr in Berlin auf Basis von UBIKLIM Simulationen im 10 m Raster.

Tab. 1 Gefühlte Temperatur GT und thermische Beanspruchung

| <b>Gefühlte Temperatur GT, °C</b> | <b>Thermisches Empfinden</b> | <b>Thermophysiologische Beanspruchung</b> |
|-----------------------------------|------------------------------|---|
| > +38                             | sehr heiß                    | extreme Wärmebelastung                    |
| >32 bis +38                       | heiß                         | starke Wärmebelastung                     |
| >26 bis +32                       | warm                         | mäßige Wärmebelastung                     |
| >20 bis +26                       | leicht warm                  | schwache Wärmebelastung                   |
| 0 bis +20                         | behaglich                    | Komfort möglich                           |
| <0 bis -13                        | leicht kühl                  | schwacher Kältestress                     |
| <13 bis -26                       | kühl                         | mäßiger Kältestress                       |
| <26 bis -39                       | kalt                         | starker Kältestress                       |
| < -39                             | sehr kalt                    | extremer Kältestress                      |