



# IBO

## WÄRMEANSPRÜCHE DES MENSCHEN

Physikalische, physiologische, psychologische und soziale  
Bedingungen für thermische Behaglichkeit

Tobias Waltjen

# **Wärmeansprüche des Menschen**

**Physikalische, physiologische, psychologische und  
soziale Bedingungen für thermische Behaglichkeit**

Tobias Waltjen

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden von den Autoren nach bestem Wissen erstellt. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht völlig auszuschließen. Daher übernehmen Verlag, Herausgeber und Autoren keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten.

Autor:

Dr. Tobias Waltjen

Layout:

Gerhard Enzenberger

© 2003 IBO Verlag

IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie

1090 Wien, Alserbachstrasse 5

ISBN 3-900 403-32-5

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Vorwort und Danksagung	2
<b>Physiologie</b>	<b>5</b>
1. Wärmeproduktion	5
2. Wärmeabfuhrwege	7
3. konstante Körperkerntemperaturen	9
4. Thermorezeption und Temperaturregulation	10
5. Wärmesinne	12
<b>Kulturelle Ansprüche</b>	<b>13</b>
6. Wärmeregulation durch bewusstes Verhalten	13
7. Psychologische Komponenten des Nutzerverhaltens	16
8. Das mehrmalige Verschwinden und Wiedererscheinen der Heizung	19
Sinnespsychologie und Regulationsmedizin	21
9. Objektivierte Wahrnehmungen	21
10. Adaption	23
11. Das autonome Nervensystem wird durch die Qualität von Wärmereizen beeinflusst	24
<b>Thermischer Komfort</b>	<b>25</b>
12. Einleitung	25
13. Bedingungen für den thermischen Komfort	26
14. Thermische Benutzerbedürfnisse gegenüber typischen Wohn- und Arbeitsräumen	28
15. Verschiedene Komfortbegriffe haben verschiedene Versuchsanordnungen und verschiedene Ergebnisse zur Folge	34
16. Strategien für thermische Vielfalt	36
<b>Anhänge</b>	<b>38</b>
Anhang 1: Abhängigkeit der Wärmeabgabe von der Körperoberfläche	38
Anhang 2: Unterschiede des Wärmeaustauschs mit der Luft und mit Wasser	38
Anhang 3: Wärmeleitung	39
Anhang 4 : Kontakttemperaturen	39
Anhang 5: Konvektion	41
Anhang 6: Wärmestrahlung	42
Anhang 7: Kondensation und Verdunstung	44
Anhang 8: Rolle des Feuchtedurchgangswiderstands von Kleidung	44
Anhang 9: Bemerkungen zu Fieber	45
Anhang 10: Kurmedizin	45
Anhang 11: Langfristige Anpassungsvorgänge an die Umgebungsbedingungen	46
Anhang 12: Die PMV-Gleichung und die PPD-Gleichung nach ISO 7730	46
Anhang 13: Asymmetrische Strahlungsverhältnisse	47
Anhang 14: Luftturbulenzen	48
Anhang 15: Endlich Zufriedene und noch Zufriedene	48
Anhang 16: Orientierung durch Strahlungsheizungen	49
Anhang 17: Die Wahrnehmungsschwelle des Menschen beim Strahlungsaustausch	50
<b>Literatur</b>	<b>52</b>

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Studie wurde als Beitrag zum Forschungsprojekt "Heizung und Warmwasserbereitung im urbanen Raum – ökologische Lösungen für dichtverbaute Gebiete mit mehrgeschossigen Althausbeständen und Neubautätigkeit" konzipiert, das in den Jahren 1993–1995 vom Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie gefördert wurde. Es ging darum, eine Bestandaufnahme des Wissens über die Wärmeansprüche des Menschen zu liefern, die der Konzeption von bauphysikalischen und haustechnischen Lösungen vorangestellt werden und als Grundlage dienen konnte. Später gaben Beiträge zu Forschungsaufträgen des Österreichischen Kachelofenverbandes Gelegenheit, die Studie zu erweitern und u.A. genauer auf die Rolle der durch Strahlung übertragenen Wärme einzugehen – ein altes baubiologisches Thema. Vorträge vor verschiedenen Auditorien gaben im Laufe der Jahre immer wieder Gelegenheit, den Stoff erneut durchzudenken und plausibler zu erklären.

Hier wird nun der Versuch vorgelegt, das gesammelte Material in eine Reihe kurzer Kapitel zu gliedern, die aus der Sicht der Physik, der Physiologie, der Sinnespsychologie sowie des Sozialverhaltens (das auch ökonomisch und kulturell bedingt ist) Einblicke in die bemerkenswert komplexe Beziehung des Menschen zu seiner thermischen Umwelt geben. Überlegungen, die diesen Rahmen der Darstellung gesprengt hätten, wurden in eine Reihe von Anhängen ausgegliedert. Ich danke den obenerwähnten institutionellen Förderern der verschiedenen Stadien dieser Studie. Persönlich danke ich DI Walter Pokorny und DI Thomas Zelger für zahlreiche Fachgespräche, die Kommentierung des Manuskripts und für die Ermutigung, das jahrelang zwischenlagernde, weitergärende Material in einer Publikation aufzubereiten.

Tobias Waltjen  
Wien, April 2003

# Physiologie

## 1. Wärmeproduktion

Der menschliche Körper produziert ein Leben lang unausgesetzt Wärme.

### Grundumsatz, Ruheumsatz

Der Grundumsatz ist jener Energieumsatz, der bei völliger körperlicher Ruhe, Nüchternheit und thermischer Behaglichkeit gemessen wird. Er ist gut reproduzierbar. Seine Höhe hängt vom Geschlecht, vom Alter und von der Körperoberfläche ab. Störungen der Schilddrüsenfunktion können den Grundumsatz verändern. Die Höhe des Grundumsatzes ist bei solchen Erkrankungen von diagnostischem Wert. Umsätze, die bei körperlicher Ruhe, aber unter dem Einfluss verschiedener thermischer Umgebungsbedingungen und von Nahrungsaufnahme gemessen werden, heißen Ruheumsätze.

Nicht nur zu kalte Umgebungsbedingungen können den Ruheumsatz bis um das 10fache erhöhen, sondern auch zu große Wärme erhöht den Stoffwechsel wegen der verstärkten Kreislauffähigkeit. In der Zone des thermischen Komforts ist der Ruheumsatz bei einem Minimum = Grundumsatz.

Nach Nahrungsaufnahme ist der Stoffwechsel für 4–12 Stunden erhöht.

### Leistungsumsätze

Die Wärmeproduktion des Stoffwechsels des Menschen wird als Summe von Grundumsatz (typischer Wert 80 W) und Arbeitsumsatz (0–1000 W) beschrieben.

Wärmeabgabe des Menschen pro m<sup>2</sup> Körperoberfläche in Abhängigkeit von der Stoffwechselaktivität (nach NEFF-Projekt 357; ISO 7730), 1 met = 58 W/m<sup>2</sup>:

Höhere Umsätze kommen bei sportlichen Tätigkeiten vor:

Tätigkeit	W/m <sup>2</sup>	met
schlafend	46	0,8
ruhig sitzend	58	1,0
(ISO 7730: standing, relaxed)	70	1,2
leichte Arbeit im Sitzen	70	1,2
stehend	81	1,4
mittelschwere Tätigkeit (ISO 7730: standing activity: shopping, laboratory, light industry)	93	1,6
(ISO 7730: standing activity: shop assistant, domestic work, machine work)	116	2,0
(ISO 7730: medium activity: heavy machine work, garage work)	165	2,8
gehen, 5 km/h	174	3,0

Praktisch der gesamte Energieumsatz des Menschen wird als (sensible und latente, dazu später) Wärme frei. Die mechanische Arbeit kann einen Wirkungsgrad von 30–35 % erreichen, liegt aber typischerweise bei Werten von 5 %.

Energieumsätze für sportliche Leistungen			
		(aus Keidel 1985 verändert)	
Sportart	W/kg Körpermasse	W/m <sup>2</sup> Körperoberfläche	
		50 kg, 160 cm	80 kg, 180 cm
Skilaufen 9 km/h	10,5	350,0	420,0
Rudern, fester Sitz 6 km/h	10,8	360,0	432,0
Laufen 9 km/h	11	366,7	440,0
Eislaufen 21 km/h	11,5	383,3	460,0
Schwimmen 3 km/h	12,4	413,3	496,0
Laufen 12 km/h	12,6	420,0	504,0
Laufen 15 km/h	14,1	470,0	564,0
Ringern	14,3	476,7	572,0
Badminton	14,7	490,0	588,0
Laufen 17 km/h	16,6	553,3	664,0
Radfahren 43 km/h	18,3	610,0	732,0
Skilanglauf 15,3 km/h	22,2	740,0	888,0
Handball	22,4	746,7	896,0

## 2. Wärmeabfuhrwege

### Wärmeabgabe

Die Wärme wird über die Haut und die Atemluft an die Umgebung abgegeben.

Physikalisch werden drei Wärmeübergangswege unterschieden, die bei der Wärmeabfuhr aus dem Körper alle vorkommen:

- Leitung,
- Konvektion
- Strahlung.

Sie werden als sensibler Anteil der Wärmeabgabe zusammengefasst; „sensibel“ im Sinne von „wahrnehmbar“ d.h. mit dem Thermometer messbar. Davon wird die latente Wärmeabgabe abgegrenzt, bei der Wärme durch Phasenumwandlung beim Übergang von flüssigem Wasser in Wasserdampf gebunden oder umgekehrt beim Übergang von Wasserdampf in flüssiges Wasser freigesetzt wird: Kondensation und Verdunstung

Aus dem Körperinneren wird die Wärme in Muskulatur und inneren Organen durch das Gewebe geleitet und konvektiv über das Blut in die Nähe der Körperoberfläche transportiert. Von der Haut zu dem die Haut berührenden Medium geht die Wärme über durch

- Leitung: über Kleidung, Sitzmöbel, Betten, Fußboden, Türklinken, kurz: durch berührte Gegenstände.
- Konvektion: über Luft und Wasser (beim Baden, bei Regen) über die Atemluft aus den Atemwegen.
- Strahlung: über Austausch mit allen Oberflächen der Umgebung, vor allem der Kleidung, gemäß der Temperaturdifferenzen zwischen Körperoberfläche und Umgebungsoberfläche.
- Verdunstung über Dampfdiffusion durch die Haut und die Feuchtigkeit der Atemluft. Die Atemluft wird in der Lunge mit Wasserdampf beladen. Dieser Wasserdampf ist zuvor unter Wärmeaufnahme aus der flüssigen Phase entstanden.

### Relative Anteile der Wärmeabfuhrwege

Beispiel einer Wärmebilanz für eine Frau, 35 Jahre, Größe: 165 cm, Gewicht: 60 kg, Wärmedurchgangskoeffizient der Bekleidung: 0.8 clo (vgl. Kapitel 6), leichte, sitzende Tätigkeit, Luft- und Strahlungstemperatur: 21°C, rLf.: 50 %, Luftgeschwindigkeit: 0,05 m/s

Wärmeabfuhrweg	Energiefluss (W)	rel. Anteil (%)
Stoffwechsel	+ 138	100,0
respiratorische Feuchteabgabe	- 10	7,3
respiratorische Wärme	- 2	1,5
Wasserdampfdiffusion	- 21	15,2
Schweißverdunstung	0	0,0
Konvektion	- 47	34,1
Strahlung,	- 58	42,0

Relative Anteile der verschiedenen Wärmeabfuhrwege nach MEMI (Munich Energy Balance Model for Individuals) verändert aus Höppe (1988)

- In Ruhe haben Strahlung und Konvektion einen hohen Anteil.
- Bei körperlicher Aktivität oder hoher Lufttemperatur wird die Schweißverdunstung dominierend. Sie kann Werte von 75% der Gesamtwärmeabgabe oder mehr annehmen.

- Schweißverdunstung lässt die Haut abkühlen und vermindert damit paradoxerweise die Wärmeabgabe durch Strahlung.
- Körperliche Aktivität steigert auch (in geringem Maße) den Anteil der Konvektion. Konvektion wird aber vor allem bei Luftbewegung (kalter Wind) dominierend.
- Bei Sonnenbestrahlung oder heißen umgebenden Oberflächen (Hochofen, Sauna) kann die Strahlungsbilanz sogar negativ werden. Es kommt zu einer Wärmeaufnahme durch Strahlung. Auch hier muss die Schweißverdunstung den Ausgleich schaffen. Dies berührt auch eine sehr wichtige grundsätzliche Frage: Kann der Mensch seine Umgebung sensibel kühlen? Ist die Lufttemperatur oder die Strahlungstemperatur der Umgebung höher als die Hauttemperatur, so nimmt der Körper sensibel Wärme auf. Die Schweißbildung ermöglicht allerdings eine latente Wärmeabgabe die die Wärmeaufnahme sowie die eigene Wärmeproduktion des Körpers kompensiert.

Siehe auch Bemerkungen über Wärmeabgabe in Wasser (Anhang 2)

### 3. konstante Körperkerntemperaturen

Wärmeproduktion und -abgabe stehen im Gleichgewicht. Die Temperaturen im Körperkern sind weitgehend konstant

Der Mensch ist, ebenso wie die übrigen Säugetiere, zu denen er biologisch gehört, und wie die Vögel ein gleichwarmer, ein homöothermer Organismus. Er hält eine bestimmte Körpertemperatur, genauer eine konstante Körperkerntemperatur gegenüber seiner Umgebung aufrecht.

Das hat große Vorteile: Die Geschwindigkeiten chemischer Reaktionen hängen von der Temperatur ab; in der Chemie des menschlichen Körper ist das nicht anders. Homöotherme Organismen, wie Vögel, sind von der thermischen Umgebung emanzipiert, alle Körperfunktionen, insbesondere die nervliche Reaktionsfähigkeit, bleiben unter allen Umständen aufrecht. Wechselwarmen, poikilothermen Organismen, wie Schlangen, werden in der Kälte unbeweglich und träge.

Homöotherme Organismen haben gegenüber poikilothermen Organismen einen um das drei- bis fünf-fache erhöhten Grundumsatz. Neben der unvermeidlich bei allen Lebensfunktionen entstehenden Wärme wird weitere Wärme gebildet, die dem biologischen Ziel einer konstanten Körperkerntemperatur dient.

#### 4. Thermorezeption

Der Körper hält seine Kerntemperatur aktiv aufrecht. Über die herrschenden Temperaturen der Haut und des Körperinneren orientieren ihn Signale der Thermorezeptoren.

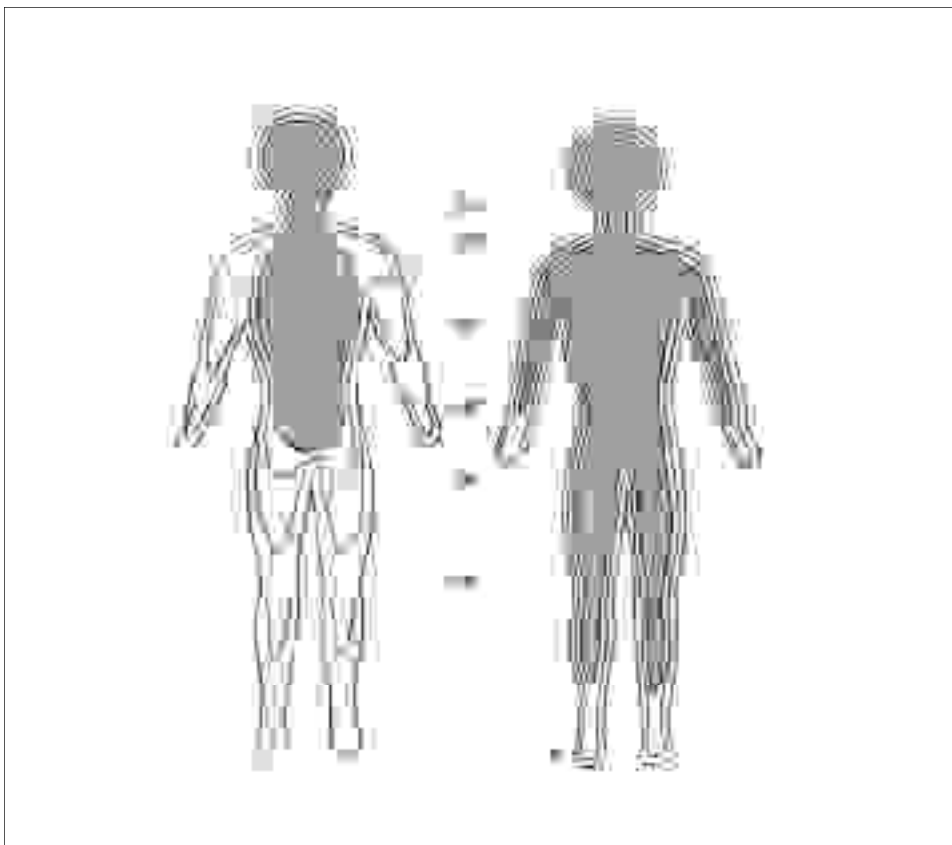
In der Haut liegen Kälterezeptoren, die auf Hauttemperaturen unterhalb von 34°C ansprechen. Im Hypothalamus befinden sich Wärmerezeptoren, die auf Temperaturen über 37°C ansprechen. Der Hypothalamus ist eine Gehirnregion in der Mitte des Kopfes, somit im Körperkern.

Solange die Wärmeabgabe aus dem Körper an die Umwelt weder so schnell vor sich geht, dass (trotz fortwährender Wärmeproduktion) die Hauttemperatur unter 34°C sinkt, noch so langsam, dass (bei unvermeidlich weitergehender Wärmeproduktion) die Temperatur im Hypothalamus über 37°C ansteigt, befindet sich der Körper im Bereich „idealer Behaglichkeit“ (Benzinger):

- keine der beiden Rezeptorenarten spricht an
- keine Regulationsvorgänge müssen eingeleitet werden

Dies ist beim unbedeckten Menschen in Ruhe bei etwa 30°C Umgebungstemperatur (Lufttemperatur = Strahlungstemperatur) der Fall. Bei höheren Stoffwechselaktivitäten gibt es Bedingungen „relativer Behaglichkeit“, bei denen Wärme- und Kälterezeptoren gleichzeitig und gleichstark gereizt werden. Das bedeutet, die Hauttemperatur sinkt ab (infolge Schweißbildung und höherer Luftgeschwindigkeit) und die Hypothalamustemperatur steigt an. Wird hingegen nur eine Rezeptorart gereizt, so wird dies als Discomfort empfunden (Benzinger zitiert nach Mayer 1984).

Auch im Rückenmark, im Abdomen, in der Muskulatur, kurz im gesamten Körper werden Thermorezeptoren vermutet. Die Thermorezeption wäre damit ein Multiple-Input-System, das ein Pendant zum komplizierten Temperaturfeld im Körperinneren des Menschen darstellen würde. Mit anderen Worten: Der „Sollwert 37°C“ ist die Funktion der Schwellentemperaturen für die verschiedenen Stellvorgänge (Schmidt/Thews S.597).



Temperaturfeld des Menschen in kalter (A) und warmer (B) Umgebung aus: Schmidt/Thews 1980

## Temperaturregulation

### Regulationsbereiche, Regulationsmechanismen

In einem gewissen Intervall um die Neutraltemperatur, bei der „ideale Behaglichkeit“ herrscht, wird die Wärmeabgabe durch Weitung und Zusammenziehung der peripheren Blutgefäße reguliert (Vasodilatation, Vasokonstriktion). Damit wird der konvektive Wärmetransport zur Körperschale reguliert. Jenseits dieses Intervalls, wenn also diese Regulationsmechanismen nicht mehr ausreichen, versucht der Körper durch Muskelzittern (aktive Wärmeproduktion) bzw. Schwitzen (ein zusätzlicher Wärmeabfuhrweg) die Körperkerntemperatur aufrecht zu erhalten.

### Regulation gegen Unterkühlung

Wird die Wärmeabfuhr im Verhältnis zur Wärmeproduktion zu groß, sinkt die Hauttemperatur also ab, so ist die erste Reaktion des Körpers die Vasokonstriktion der peripheren Blutgefäße (vasae): Die Blutgefäße werden verengt, weniger Blut fließt in die Arme und Beine, der konvektive Transport von Wärme durch das Blut zur Körperoberfläche wird vermindert. Die Hauttemperatur an der Peripherie sinkt noch weiter ab. Die Körperkerntemperatur 37°C wird im Körperkern weiterhin konstant gehalten, an der Peripherie wird sie aufgegeben.

Bleibt der Wärmeverlust auch in diesem regulierten Zustand zu groß, so erhöht der Körper die Wärmeproduktion: der Ruheumsatz wird erhöht. Schließlich setzt Muskelzittern ein: die Muskulatur wird unwillkürlich betätigt, wobei Wärme entsteht.

### Regulation gegen Überwärmung

Wird die Wärmeabfuhr im Verhältnis zur Wärmeproduktion zu gering oder stockend, signalisieren die Wärmerezeptoren im Hypothalamus Übertemperatur, so reagiert der Körper zunächst mit Vasodilatation der peripheren Blutgefäße. Die Blutgefäße werden erweitert, mehr Blut fließt in Arme und Beine, der konvektive Transport der Wärme durch das Blut zur Körperoberfläche wird verstärkt, die Hauttemperatur steigt an. Die Körperkerntemperatur 37°C herrscht bis kurz unter die Hautoberfläche vor. Ist eine hinreichende Wärmeabfuhr auch dadurch nicht gewährleistet, beginnt der Körper zu schwitzen. Dabei verliert er auf zweierlei Weise Wärme. Die Wärme der Schweißflüssigkeit, die den Körper verlässt und die Verdampfungswärme, die bei der Verdunstung des Schweißes der Umgebung entzogen wird. Die Haut kühlt dabei ab. Der Temperaturgradient zwischen Körperinnerem und Hautoberfläche vergrößert sich, was die weitere Wärmeabfuhr erleichtert. Der Strahlungstemperaturgradient zwischen Hautoberfläche und Außenwelt verkleinert sich, was paradoxerweise die Wärmeabfuhr durch Strahlung vermindert, eine mögliche Wärmeaufnahme durch die Strahlung warmer Oberflächen (Sonne!) aber erleichtert.

Biologisch ist der Mensch für ein Leben in tropischem Klima angepasst. Seine physiologischen Wärme-regulationsmechanismen sind sehr leistungsfähig für die Bewältigung überschüssiger Wärmemengen, haben aber wenig Reserven für die Kompensation zu großer Wärmeabfuhr.

Der Großteil der thermischen Regulationsanforderungen bei Kälte muss deshalb durch schützende Innenräume von Gebäuden und Fahrzeugen und durch Kleidung erfüllt werden.

## 5. Wärmesinne

Die Thermorezeptoren versorgen ganz verschiedene Sinne mit Nachrichten.

1. lösen die Temperaturrezeptoren bei Über- oder Unterschreitung ihrer Schwellentemperaturen Regulationsvorgänge aus. Dies geschieht ohne Beteiligung des Bewusstseins. Bewusst werden nur die Wirkungen der Regulation.
2. Die Hauttemperatur, zusammen mit der Wirkung der Wärmeregulation – Gänsehaut, Kältezittern, Blutfülle unter der Haut, Schwitzen, die erhöhte Herzaktivität bei Hitzebelastung – werden als Körperwahrnehmung erlebbar. Wir sagen, mir ist zu kalt, mir ist zu warm. Dies ist das Erlebnis von Komfort und Diskomfort, oder von Behaglichkeit und Unbehaglichkeit.
3. Die Reize, die die Temperaturrezeptoren vermitteln, werden aber nicht nur in Bezug auf die Befindlichkeit des Körpers ausgewertet. Aus ihnen wird auch ein Bild der Temperaturzustände der Außenwelt aufgebaut.

Infolge dieser ganz verschiedenartigen Verarbeitungen derselben Sinnesreize werden Temperaturregulation und Thermorezeption in ganz verschiedenen Kapiteln der Physiologielehrbücher besprochen. Das Wechselspiel des Einflusses von Regulationsvorgängen von Komforterlebnissen und von objektiverer Wärmewahrnehmung zeigt folgendes Beispiel:

### Baden im Sommer

Nach dem Sonnenbad langsam ins Wasser. Das Wasser fühlt sich sehr kalt an. Das ist eine „objektive“ Temperaturwahrnehmung. Ich habe aber auch einen psychologisch-physiologischen Widerwillen zu überwinden. Die Vorstellung, weitere Körperteile dieser Kälte auszusetzen, erschreckt mich. Das ist eine Komfortwahrnehmung. Sie bezieht sich auf mein Wohlbefinden, auf die Möglichkeit entspannt zu bleiben.

Schließlich habe ich es „geschafft“ und bin im Wasser. Nach sehr kurzer Zeit erscheint mir das Wasser „angenehm kühl“ obwohl die objektive Wärmewahrnehmung sich nicht ändert: Niemand wird die Adria und einen Bergsee miteinander verwechseln, was die Temperaturen angeht.

Aber das Erschrecken vor der Kälte ist verschwunden. Bleibe ich längere Zeit im Wasser bemerke ich spätestens beim Verlassen des Wassers, dass ich unterkühlt bin. Ob draußen ein kalter Wind weht (Nordsee!) oder starke Sonneneinstrahlung herrscht, die Haut wird davon wenig berührt, sie ist eine Zeit lang wie betäubt. Ist eine stärkere Unterkühlung gegeben, zittere ich und klappere mit den Zähnen. Damit ist ein Mangel an körperlicher Selbstwahrnehmung (außer vielleicht Schmerzen in der Fußsohle) verbunden, ich „spüre, dass ich nichts spüre“ Diese Empfindung ist der Empfindung des „Erschreckens vor dem kalten Wasser“ völlig unähnlich. Sie bedeutet „Entwarnung“: die Wärmeabfuhr in Luft ist jedenfalls wesentlich geringer als im Wasser. Siehe auch Anhang 2: Wärmeabfuhr in Wasser.

„Durch die Hautsinne nehmen wir äußere Objekte wahr, zugleich aber erleben wir uns selbst als körperliches Subjekt, was besonders bei schmerzhaften Empfindungen evident wird. Somit sind die kutanen Empfindungen einerseits gegenstandsbezogen oder „objektiviert“, andererseits auf den eigenen Körper bezogen und „somatisiert“, wobei die Grenzlinie zwischen Objektivierung und Somatisierung durch intentionale Einstellung erheblich verschoben werden kann.“ ...

„Eine Besonderheit der Hautempfindungen liegt darin, dass sie sowohl rationale (epikritische) als auch emotionale (protopathische) Komponenten enthalten. Bei letzteren handelt es sich affektive Erlebnisse von Lust- und Unlustcharakter, die tief in den vitalen Bereich eingreifen“ (H. Hensel 1985, Seite 19.1).

# Kulturelle Ansprüche

## 6. Wärmeregulation durch bewusstes Verhalten

Komfortempfindungen und Wärmewahrnehmungen sind warnend oder wohligh und regen zu bewussten Verhaltensweisen an, zu denen die elementarsten Tätigkeiten des Menschen gehören: Sich Bekleiden, Hausbauen, Feuer machen.

### Kleidung

„Es gibt kein schlechtes Wetter, es gibt nur unpassende Bekleidung“. Wo immer die thermischen Umweltverhältnisse die physiologischen Regulationsmöglichkeiten überfordern, kann der Mensch durch Bekleidung einen Innenraum, nämlich den Raum zwischen der Haut und den Textilschichten schaffen, in denen wieder jene tropischen Klimaverhältnisse herrschen, auf die der nackte Körper eingerichtet ist. Auf diese Weise konnten sämtliche Klimazonen der Erde von Menschen besiedelt werden. In allen Klimazonen außer den Tropen (wo tatsächlich weitgehend nackte Stammesgesellschaften gefunden wurden) ist der Mensch zwingend auf Kleidung angewiesen.

Was ist die thermische Funktion der Kleidung? Sie schützt den warmen Luftpolster zwischen Haut- und Textilschichten durch ausreichenden Strömungswiderstand gegen den Wind. Sie erhöht weiters den Wärmedurchgangswiderstand und sie erhöht den Feuchtedurchgangswiderstand. Die Erhöhung des Feuchtedurchgangswiderstandes ist unerwünscht aber letztlich nicht vermeidbar. Siehe auch Anhang 8.

### Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung. Definition der clo-Unit

Der Wärmedurchgangswiderstand von Bekleidung hat die physikalische Dimension  $m^2K/W$ . Zusätzlich wurde, die Größe clo (für clothing unit) definiert, mit der man anschauliche Zahlenwerte erhält. Der Wärmedurchgangswiderstand des unbedeckten Körpers wird mit  $clo = 0$  und der einer herkömmlichen Winterbekleidung für Innenräume mit  $clo = 1$  gleichgesetzt.

### Thermischer Widerstand von Bekleidung (ISO 7730; NEFF-Projekt 357)

Bekleidung	clo	$m^2K/W$
nackt	0,0	0,00
kurze Hose, T-Shirt	0,3	0,04
Hosen, Kurzarmhemd	0,5	0,08
Hosen, Hemd, Pullover (Winter)	1,0	0,16
ISO 7730: schwerer traditioneller europäischer Geschäftsanzug: Baumwollunterwäsche mit langen Beinen und Ärmeln, Hemd, Anzug bestehend aus Hose, Jacket und Weste, wollene Socken und schwere Schuhe	1,5	0,23

### Hausbauen, nach Hause kommen, Feuer machen, kochen

Im Freien kann die Wärmebilanz einer Person nur durch Kleidung und Verhalten beeinflusst werden. Die z.T. sehr starken thermischen Umgebungsänderungen werden in gewissen Grenzen (bei Wanderung, Sport und Spiel) als angenehm oder wenigstens „gesund“ empfunden. Kranke oder empfindliche Personen oder solche, die mental nicht auf die eigene Körperwahrnehmung und Umgebungswahrnehmung, sondern auf das Erreichen anderer Ziele eingestellt sind (rechtzeitiges Erreichen eines Termins,

„schnell nach Hause“) können dieselben Umgebungsbedingungen als lästig, unangenehm oder gar gesundheitsgefährdend empfinden.

Noch besser verdeutlichen die Beispiele des Saunabesuchs oder des „Winterschwimmens“, wie Temperaturreize weit jenseits aller Komfortgrenzen Teil des Abenteuers sein können, das eine Person bewusst sucht.

In geschlossenen Räumen werden „angenehme“ thermische Bedingungen erwartet und gewünscht, d.h. thermische Verhältnisse, wo unter den Bedingungen der Raumnutzung (geringe körperliche Aktivität) und der gewünschten Bekleidungsstärke (Wunsch beeinflusst von sozialen/gesellschaftlichen Wertsetzungen), die notwendige Wärmeregulation minimiert ist.

Dieser Wunsch „thermisch seine Ruhe haben zu wollen“ spricht für homogene thermische Umgebungsbedingungen.

Mit Hausbauen setzen Menschen ihrer Ausgesetztheit gegenüber Wind und Wetter etwas entgegen, das sie schützt. Gleichzeitig setzen sie auch ihrer Abhängigkeit gegenüber ihrer sozialen Umwelt ein Stück Unabhängigkeit entgegen, „eigenen Heim und Herd“. Traditionelle Häuser können im Winter die gewünschten homogenen thermischen Umgebungsbedingungen auf einem passenden Temperaturniveau nicht bieten. Sie müssen beheizt werden. Erst seit wenigen Jahren ist es möglich, mit vertretbaren Kosten hochwärmegedämmte Häuser zu bauen, in denen nahezu kein Heizbedarf mehr auftritt (Passivhausstandard). Auf absehbare Zeit werden aber die Mehrzahl der Häuser in kälteren Klimaten erheblichen Heizbedarf aufweisen.

Was alles ist „Heizbedarf“? Von geeigneten Luft- und Innenoberflächentemperaturen und einer wünschenswerten geringen Differenz zwischen diesen beiden Temperaturen ist in anderen Kapiteln dieser Studie die Rede. Hier soll einem psychologischen Bedarf nachgegangen werden.

Mit Feuermachen setzen Menschen der Kälte, die sie im Winter auch in ihren Häusern heimsuchen, einen extremen Gegensatz entgegen: das Feuer. Das Haus ist zu kalt. Die Kälte ist eine Bedrohung. Das Feuer ist viel zu heiß, es ist selbst eine mögliche Gefahr für das Haus und seine Bewohner. Der erlebbare Gegensatz zwischen Feuer und Winterkälte ist wohltuend und vertrauenerweckend. Beim Kochen, beim heißen Duschen und Baden schlägt uns die Wärme entgegen. Mit warmen Speisen und Getränken kann die Wärme sogar inkorporiert werden.

Die Wertschätzung, die Strahlungsöfen wie dem Kachelofen aber auch dem offenen Kaminfeuer allgemein entgegengebracht wird, beruht vielleicht darauf, dass diese nicht nur „Kältebeseitigungsmaschinen“ sind, sondern sinnliche, fühlbare Wärme und damit Erlebnisse bieten können.

In den Worten von H.-C. Flemming (1982):

tröstlich  
die wärme meines  
kohleofens  
gelegentlich  
verlasse ich das zimmer  
um in diese wärme  
zurückzukehren

### **Heizungsformen mit starkem Erlebniswert**

Strahlungsöfen haben eine Menge Temperaturreize zu bieten. Sind sie in Betrieb, kann man sich enorme Wärmemengen zuführen; die Wärmezufuhr nimmt aber mit jedem Schritt der Entfernung vom Ofen ab. Strahlungsöfen sind als Einzelöfen gern zentral aufgestellt, benachbarte Räume sind oft wesentlich kühler. Beim Hin- und Hergehen wechselt man durch Zonen verschiedener Temperatur. Morgens, bevor der

Ofen geheizt und – nach einiger Verzögerung – warm geworden ist, ist es noch kalt. Ein Kachelofenbesitzer lebt auch viel in Vorfreude auf die Wärme.

Bei offenen Kaminen ist die Richtung, aus der die Wärme kommt auch die Richtung, aus der das Licht kommt. Das Licht der Flammen bewegt sich, die Glutbrocken leuchten oder leuchten bei Berührung durch die die Flammen auf, zerfallen zu kleineren Bruckstücken. Funken stieben. Die Glut ist rot, eine psychologisch „entgegenkommende“ Farbe, abseits der Glut ist es schwarz, eine psychologisch „hineinsaugende“ Farbe. Farbkontraste, Wärmekontraste, Lichtkontraste, das Ganze in beständiger Bewegung. Gaston Bachelard (1959) hat an dieser Situation eine ganze „Psychoanalyse des Feuers“ entwickeln können. Christopher Alexander weist in seiner „Mustersprache“ (1972, dt. 1991) darauf hin, der offene Kamin sei früher der soziale Mittelpunkt des Wohnraumes gewesen, ein Platz, den heute das Fernsehgerät eingenommen habe:

„Das Fernsehgerät stellt oft einen Anziehungspunkt in einem Raum dar, aber es ist lediglich ein schwacher Ersatz für etwas tatsächlich Lebendiges und Flackerndes in einem Zimmer. Das Bedürfnis nach Feuer ist fast so elementar wie das nach Wasser. Das Feuer ist bedeutsam für Gefühle, ähnlich wie ein Baum, andere Menschen, ein Haus, der Himmel“ (Alexander, Eine Mustersprache, Muster 181, Seite 907).

## 7. Psychologische Komponenten des Nutzerverhaltens

Sich Bekleiden, Hausbauen und Feuermachen gehören zum Verhaltensinventar, mit dem der einzelne Mensch sich in Beziehung zu seinen Mitmenschen (Gruppe, Gesellschaft) setzt. Dabei werden Wärmeansprüche von ökonomischen, sozialen und kulturellen Ansprüchen überformt, ebenso wie sie diese mitprägen.

### Reaktionen auf Energiekrise

1973 machte die Energiekrise viele nachdenklich. In Frankreich wurden vorübergehend 2/3 der Energie für Gebäudebeheizung gespart. Im Winter 1979/80 gaben in Frankreich 82,5% der Haushalte bei einer Umfrage an, eine Energieverknappung zu befürchten. Der Prozentsatz sank bei folgenden Umfragen kontinuierlich auf 30,2% im Winter 1985/86. Die durchschnittlichen Wohnungstemperaturen stiegen vom Winter 1979/80 bis zum Winter 1984/85 von 18,0°C auf 19,1°C an (Monnier 1986).

### Einfluss von früheren Erfahrung mit Klima, Wohnungen und Heizungssystemen

Es wird nicht nur die absolute Temperatur, sondern auch der Kontrast zwischen den im Innenraum zu schaffenden Temperaturverhältnisse und den außen vorherrschenden Temperaturverhältnisse wahrgenommen und bewertet: In einem kalten Klima, wird das Sicherheitsgefühl (nicht das thermische Behagen) durch eine etwas überheizte Wohnung besser befriedigt als durch eine etwas zu kühle (McGeevor 1982. Vergleiche auch Kapitel 6)

### Wenig heizen als Sport

Andererseits kann auch das Sparen zum Sport werden: Das Missbehagen beim Frieren oder den notwendigen Verhaltensänderungen (Anziehen, Aufenthalt im Bett) wird kompensiert durch die Erleichterung über die erträgliche Heizrechnung oder die Vorstellung, Abhärtung sei gesund.

### Verhalten, modifiziert durch Geldmangel

Wenn Bewohner über ihre Möglichkeiten, Kälte in der Wohnung zu vermeiden, unsicher sind, dann fühlen sie sich in einer überheizten Wohnung auf der sicheren Seite. Ökonomische Probleme mit der Heizung führen zu „kurzfristigem Hedonismus und langfristiger Schicksalsergebenheit“. Überheizen wird weniger als Verschwendung empfunden, als zu zahlen und doch zu frieren (McGeevor 1982).

### Mangel an Selbstbestimmung

Warum akzeptieren Bewohner zuhause niedrigere Temperaturen als am Arbeitsplatz? Liegt es daran, dass Sie zuhause jederzeit die Temperatur erhöhen könnten, am Arbeitsplatz sich aber allenfalls beklagen können? Oder lassen sie ihrem Bedürfnis nach Wärme in der Firma freien Lauf, während sie zuhause einen Kompromiss zwischen dem Bedürfnis nach genügend Wärme und dem nach einer niedrigen Heizungsrechnung eingehen?

Abrechnungsmodalitäten wie grundpreislastige Bezahlung der Fernwärme führt, wie allgemein bekannt, zur Wärmeverschwendung. Auch bei „Warmmietern“ einerseits und Hausbesitzern andererseits findet man aus demselben Grund unterschiedliche Bereitschaft, sparsam mit der Heizung umzugehen (Ranscht-Froemsdorff 1982, Monnier 1986).

Das Verständnis für Heizungsregulation spielt eine Rolle. McGeevor (1982) befragte Bewohner englischer Sozialwohnungen, ob sie glaubten, es würde schneller warm, wenn sie den Thermostat hochstellten oder die Thermostatventile aufdrehten. 60 – 80 % bejahten die Frage. Nur die Erstmieter waren in die Bedienung der Heizung eingeführt worden, nachfolgende Mieter nicht mehr.

Selbst dort wo es Regelungsmöglichkeiten für die Bewohner gibt, fehlen oft sichtbare Verbrauchsanzei-

gen, die den Erfolg der Regelung zurückmelden. Die Wärmehähler in den untersuchten englischen Sozialwohnungen waren unter der Stiege verborgen (McGeever 1982).

Wenn die Chance besteht, zwei Bedürfnisse selbstbestimmt zum Ausgleich zu bringen – das Bedürfnis nach Wärme und das Bedürfnis, sparsam mit dem Geld umzugehen – wird sie wahrgenommen. Diese Chance besteht nicht, wenn Regulierungsmöglichkeiten unbekannt sind, wenn die Heizungskosten pauschal mit der Miete bezahlt werden oder wenn die Heizkostenabrechnung grundpreislástig ist.

### **Wärmeneid – mangelnde Abgrenzung zu Nachbarn**

In Mehrfamilienhäusern ist es kaum vermeidbar, dass manche Wohnungsnutzer für andere „mitheizen“, die ihre Wohnung unregelmäßig oder nur nachts nutzen. Daraus kann sich ein Verhalten entwickeln, das als Wärmeneid bezeichnet wird: „Lieber friere ich selber, als dass ich dem Nachbarn die Wärme schenke.“

### **Klima, Kultur, Bekleidungsgeohnheiten**

Klima und andere kulturelle Einflüsse auf Bekleidungsgeohnheiten. Welche Kleidung sind wir bereit in Innenräumen zu tragen? Siehe dazu Kapitel 14: jahreszeitgemäÙe Kleidung

Mode und geschlechtsspezifische Kleidung: Frauen werden oft als kälteempfindlicher angesehen. Viel davon liegt an den geschlechtsspezifischen Bekleidungsgeohnheiten.

Kleidung ist nicht nur Wärmeschutz, sondern hat auch soziale Signalfunktion. Traditionelle Kleidung (Tracht) zeigt das Geschlecht, den Familienstand, die Berufsgruppe an, enthält Zeichen für den sozialen Rang, signalisiert die Zugehörigkeit zu ethnischen und religiösen Gruppen oder macht den sozialen Anlass sichtbar, zu dem es getragen wird: Sonntagskleidung, Festkleidung, Hochzeitskleidung, Trauerkleidung. Auch die Mode, die sich seit dem Mittelalter in Europa entwickelt und in der Folge in der westlich geprägten Welt die traditionelle Kleidung weitgehend ersetzt hat (vgl. Hollander, 1995) sendet eine Flut von sozialen Signalen aus. Der richtig angepasste Wärmeschutz wird durch die anderen Funktionen der Kleidung immer wieder kompromittiert.

Traditionelle Abendgarderobe für Männer und Frauen sind ein gutes Beispiel dafür, dass Wärmebedürfnisse bei der Bekleidung oft eine Nebenrolle spielen müssen. Der mitunter schulter-, rücken-, und bein-freien Bekleidung der Damen stehen hochgeschlossene langärmelige Hemden, wollener Anzug und Halbschuhe der Herren gegenüber.

Ebenso bedingen Kleidungskonventionen in verschiedenen Ländern, Kulturen und Klimaten verschiedene Ansprüche und Erwartungen gegenüber der Raumtemperatur. Humphreys (1976) beschreibt in seinem Übersichtsartikel Wärmekomfortstudien aus verschiedenen Ländern, bei denen die jeweils lokal übliche Bekleidung zugrundegelegt wurde und wo nicht nach Optimaltemperaturen sondern nach akzeptablen Temperaturen gefragt wurde. Das Ergebnis: jede Temperatur zwischen 16°C und 32°C kann unter entsprechenden Klima- und Bekleidungsbedingungen als akzeptabel empfunden werden.

### **Nutzungsart, Lebensgeohnheiten, Tagesablauf**

Selten oder unregelmäßig genutzte Häuser sollen rasch erwärmbar sein, dauernd genutzte sollen ein stabiles, durch ausreichende Speichermassen gepuffertes Raumklima bieten. Allerdings ist die Nutzungsintensität beim Bau eines Hauses nicht für die ganze Lebensdauer vorhersehbar. Bei größeren Objekten werden verschiedene Nutzungsintensitäten in demselben Gebäude gleichzeitig vorkommen.

- Ferienhaus, Gartenhaus, unregelmäßig genutzte Zweitwohnungen
- permanent bewohnt, aber tagsüber unbenutzt: Berufstätige
- halbtags bewohnt: Familien mit Schulkindern an Wochentagen, ganztags an Wochenden und in den Ferien

- in der Regel nur tagsüber und wochentags genutzt: Büros, Schulen
- (früher): ganztags bewohnt: bäuerliche Wirtschaft, nur 1 Raum geheizt.
- (früher): großbürgerliche Wirtschaft, viele Einzelöfen, Personal

Bei Mehrfamilienhäusern und Verwaltungsgebäuden, bei denen mehrere der oben dargestellten Nutzungsmuster innerhalb derselben Gebäudehülle vorkommen, sollten Wände und Decken ausreichend wärmegeklämmt werden, damit Wärmeverluste auch innerhalb des Gebäudes vermieden werden.

## 8. Das mehrmalige Verschwinden und Wiedererscheinen der Heizung

Während früher das Feuer ein Gegengewicht zur Winterkälte bildete, verfolgen modernere Heizungsformen die Strategie, den Winter „auszuschalten“, die Kälte „ungeschehen“ zu machen. Die Wärme der Heizung wird für das Bewusstsein der Verbraucher etwas ähnlich naturgegebenes wie die Wärme des Sommers. Die Regulationsmöglichkeiten der Heizung und der Abrechnungsmodus der Heizkosten bleiben die letzten „Schnittstellen“ zwischen Bewohnern und der technischen sowie der sozialen Infrastruktur ihrer Heizung.

Die Entwicklung der modernen Heizsysteme, vom Einzelofen mit Festbrennstoffen bis zur Fernwärmeversorgung und dem Verschwinden sichtbarer Heizkörper, hat viele Annehmlichkeiten mit sich gebracht. Mit der Mühe des Feuermachens und Brennstofftragens verschwand das Bewusstsein von der Künstlichkeit, der Gemachtheit der Wärme im Winter. Mit der verzögerten und teilweise nicht mehr verbrauchsabhängigen Abrechnung der Heizkosten schwand sogar das Bewusstsein des finanziellen Einsatzes, der für die winterliche Wärme in den eigenen vier Wänden geleistet werden muss.

Parallel dazu veränderten sich die Vorstellungen darüber, was eine Zunahme des Heizkomforts bedeuten könnte (vgl. Tabelle unten):

Anfangs der Wunsch, mehr als ein Zimmer heizen zu können, verbunden mit Aufwand für mehr Öfen, Brennstoff und Personal, die Öfen anzuheizen.

Später wurde die Dauer der Heizperiode ausgedehnt. Wenn Wärme per Knopfdruck erreichbar war, oder der Automatik eines Thermostats überantwortet werden konnte, musste die Mühe und die Kosten des Einheizens nicht mehr aufgerechnet werden gegen die Unbequemlichkeit, sich wärmer anziehen oder abends frühzeitiger ins Bett flüchten zu müssen.

Schließlich begann das gewünschte Temperaturniveau zu steigen. Ein französisches Haushaltslehrbuch von 1936 gibt an, Raumtemperaturen von mehr als 16°C im Winter seien physiologisch schädlich. Es seien Hitzestockungen im Gehirn zu befürchten (zitiert nach Monnier 1986). Einige Jahrzehnte später berichtet Läge (1982), in der Bundesrepublik Deutschland sei die durchschnittliche Raumtemperatur beheizter Räume zwischen 1974 und 1982 um 4 Grad von 20–21 auf 24–25°C gestiegen. Eine nicht geringe Anzahl von Wohnungen werde bis 27–29°C aufgeheizt.

Materielle Aspekte	Wirkungen für die Bewohner	Die Entwicklung der Komfortmodelle
Holzkamin	physische Teilnahme (manueller Transport des Brennmaterials ...)	Anzahl der beheizten Räume ...
Kohlen- und Ölöfen		
zentrale Konvektionsheizung	physiologische Wahrnehmung (homogene konvektive Wärme deren Herkunft nicht geortet werden kann) ...	Dauer der Heizperiode ...
Zentralheizung mit automatischer Brennstoffzufuhr		
Fernwärme	Käuferbewußtsein (die Abrechnung ist gegenüber dem Konsum verschoben) ...	Temperaturniveau ...
Heizkörper unsichtbar in den Wänden und im Fußboden	<b>... nimmt ab</b>	<b>... nimmt zu</b>

Tabelle aus Monnier 1986

## **Heizung als Demonstration von Lebensstil**

Neue technische Lösungen eignen sich ebenso wie modische Rückbesinnung auf alte Lösungen zur Demonstration von Lebensstil, der das Bedürfnis nach thermischem Komfort überformt. Ab den 50er Jahren waren Zentralheizungen als Nachfolger diverser Einzelöfen nicht nur bequemere sondern auch fortschrittliche Lösungen. Ab den 80er Jahren wurden Kamine, Kachelöfen und diverse eisene Holzöfen im Zuge der Umweltbewegung und der Rückbesinnung auf verlorene sinnliche Werte zusätzlich zu einer Zentralheizung eingebaut – quasi als Erlebnisheizung.

Heute gibt es stolze Besitzer von – wiederum unsichtbaren – vollautomatischen Holzpelletsheizungen oder gar von Passivhäusern, die gar kein eigenes Heizsystem mehr benötigen, sondern mit geringfügiger Nachheizung der zugeführten Frischluft auskommen. Ein erneutes Verschwinden der Heizung zeichnet sich ab.

# Sinnespsychologie und Regulationsmedizin

## 9. Objektivierte Wärmewahrnehmungen

Die objektivierten Wärmewahrnehmungen über die Haut zeigen uns ein Bild der Außenwelt insofern sie kalt oder warm ist.

### Zur Leistungsfähigkeit und Differenzierungsfähigkeit der Wärmewahrnehmung

Seine Wahrnehmungsfähigkeit setzt den Menschen problemlos in die Lage, zu unterscheiden, ob eine Erwärmung oder Abkühlung einer Hautpartie durch Strahlung, Konvektion oder Kondensation bzw. Verdunstung zustande kommt. Es sind keineswegs physikalische Fachkenntnis oder gar Messungen erforderlich, um zu erkennen, welcher Wärmeübertragungsweg jeweils vorliegt.

Im scheinbaren Widerspruch hierzu können die Wärme- und Kälterezeptoren in der Haut nur auf Temperaturänderungen reagieren und haben keine Möglichkeit „selbst festzustellen“, worauf die Temperaturänderung zurückzuführen ist.

Hensel (1981) weist auf seine Versuche aus den 50er Jahren hin, wo er durch Einspritzen von Flüssigkeiten in die Haut sicherstellen konnte, dass „von außen“ und „von innen“ kommende Temperaturreize gleich empfunden werden. Auch die fehlende Eindringmöglichkeit von infraroter Strahlung in Gewebe – sie wird bereits in den obersten Hautschichten absorbiert – macht es unwahrscheinlich, dass die in tieferen Hautschichten liegenden Thermorezeptoren „unterscheiden“ können, ob die Haut durch konvektiven Wärmeaustausch oder Strahlung erwärmt oder abgekühlt wurde.

Weil aber zahlreiche Sinnesreize verschiedener Sinnesmodalitäten im Zentralnervensystem integriert werden, finden wir in unserem Bewusstsein Unterscheidungsmöglichkeiten vor.

Nachfolgend einige Alltagserfahrungen, die das Leistungs- und Differenzierungsvermögen der menschlichen Wärmewahrnehmung zu demonstrieren:

**Situation 1:** Spaziergang, Sonnenschein, kalter Wind. Der Sonnenschein wärmt die Haut. Durch die Richtung, aus der das Licht kommt (visueller Reiz) und den Schatten auf der lichtabgewandten Richtung ist klar, dass dies Strahlungswärme ist.

Die Abkühlung durch den Wind ist mit mechanischen Reizen (Druck, Vibration, Reibung) verbunden. „Der Wind ist heute kalt“ (Konvektion). Aber: „Im Schatten ist es sofort kalt“ oder „Du musst in die Sonne gehen, dann frierst du nicht“ (Strahlung). Im Alltag werden die mannigfaltigen Ursachen der Modifikation von Hauttemperaturen ganz selbstverständlich identifiziert. Allerdings nicht immer: Schwacher Luftzug kann manchmal von Asymmetrie der Strahlung nicht unterschieden werden.

**Situation 2:** Spaziergang, beginnender Regen. Die Tropfen sprühen ins Gesicht, „wunderbar warmer Sommerregen“, „eiskalter Schneeregen“. Nun gibt es eine dritte Quelle von Temperaturreizen, die infolge des gleichzeitigen Nässegefühls problemlos von der Einwirkung des Windes oder der Sonnenstrahlung unterschieden werden kann, auch wenn alle drei gleichzeitig wirken.

Was ist übrigens Nässegefühl? Der auftreffende Tropfen ist ein mechanischer (und akustischer) Reiz, begleitet von einer Temperaturempfindung, die sich lokal ausbreitet und fortbesteht. Luftbewegung dagegen ist weniger lokal und schneller vorübergehend und von andersartigen akustischen Wahrnehmungen begleitet. Strahlung ist nicht mit mechanischen und akustischen Reizen verbunden und hat (bei asymmetrischem Strahlungsfeld) eine Licht/Schatten-Charakteristik: Durch Drehen und Bewegen des Körpers wird feststellbar, dass der Reiz immer aus derselben Richtung kommt. Bei Luftbewegung werden nasse Hautpartien viel schneller ausgekühlt als benachbarte trockene Hautpartien (Verdunstung).

**Situation 3:** Schwüler Sommernachmittag. Person arbeitet körperlich, z.B. auf einer Baustelle, ist daher „schweißgebadet“. Wahrgenommen werden von der Person gleichzeitig:

1. Die „Blutfülle“ unter der Haut, als Spannungsempfindung und „innere Wärmeempfindung“, als wahrnehmbarer Puls an Kopf und Hals, Armen und Beinen;
2. Sonnenbestrahlung bzw. Schatten als fühlbare Unterbrechung der Sonnenbestrahlung;
3. die Kühle und Nässe der Haut;
4. die Wärme der Luft und zwar mittelbar auf der Haut als Effekt der Kühlung, deren Ausmaß von der Temperatur und Geschwindigkeit der Luft stark abhängt; und unmittelbar als Wärme- und Feuchtewahrnehmung in den Atemwegen.

## 10. Adaptation

Reize führen zu Adaptation, zum „Lernen“ des Körpers, der dadurch mehr Verhaltensoptionen gegenüber Einflüssen der Außenwelt erlangt, als es ohne solches Training der Fall wäre.

Wärmeerlebnisse haben auch gesundheitliche Auswirkungen: „Abhärtung“ ist gesund; wer Kältereize gewöhnt ist, ist auch widerstandsfähiger gegen Krankheit. So die Volksweisheit. Die Grundlagenliteratur der Kurortmedizin und Klimaheilkunde (Amelung und Hildebrandt 1985), die traditionell unter anderem mit thermischen Reizen arbeitet, bestätigt die Volksweisheit. Die Basis bilden Ergebnisse der jahrzehntelangen Erfahrungssammlung der Kurortmedizin, die im Sinne der modernen Neurologie interpretierbar sind. Die Interpretation bezieht sich auf die Struktur und Funktionsweise des autonomen Nervensystems, das für die Regulation der inneren Milieus im Organismus zuständig ist. Eines dieser Milieus ist der Wärmehaushalt.

Das autonome Nervensystem besteht funktionell aus einer Vielzahl von Regelkreisen, die einerseits in einem hierarchischen Verhältnis zueinander stehen, andererseits aber miteinander vermascht sind. Die hierarchische Struktur bedingt, dass von außen (oder innen) einwirkende Reize (Störgrößen) auf einer niedrigen Funktionsebene ausreguliert werden. Erst wenn die Regulationskapazität eines Funktionskreises erschöpft ist, wird ein übergeordneter Funktionskreis in das Geschehen eingeschaltet.

Die Regelkreise des autonomen Nervensystems sind schwingfähig und zeigen spontane, selbsterregte Schwingungen mit Periodendauern von Millisekunden bis Monaten. Die Periodendauern stehen zueinander in bevorzugt ganzzahligen Verhältnissen, was die Ökonomie dieser Vorgänge erhöht. Die Gesamtheit der aufeinander abgestimmten Schwingungsvorgänge des autonomen Nervensystems wird als Rhythmische Funktionsordnung bezeichnet. Der Körper antwortet auf Reize mit reaktiven Schwingungsvorgänge, die in der Folge regulativ gedämpft und schließlich gelöscht werden.

Die Tendenz, Regulationsvorgänge auf hierarchisch möglichst niedrig stehende Funktionskreise zu beschränken, führt auf jedem dieser Niveaus zu Anpassungsvorgängen, Adaptationen des Körpers, deren morphologische oder funktionelle Ergebnisse Adaptate genannt werden. Adaptationen sind in Abhängigkeit von Reizstärke und Reizdauer zunächst unspezifisch, bewirken also ein verbessertes Regulationsvermögen für verschiedene Reizformen (z.B. Temperaturreize und Belastungen des Immunsystems), in der Folge treten spezifische Adaptate, wie z.B. Muskelwachstum auf (Adaptatsequenz).

Reize, die zu unspezifischen Adaptationen führen, fördern also die Gesundheit und Leistungsfähigkeit im Allgemeinen. Temperaturreize, die in der Kurortmedizin bevorzugt angewendet werden, sind solche Reize. Vergleiche auch Kapitel 6.

## 11. Das autonome Nervensystem wird durch die Qualität von Wärmereizen beeinflusst

Versuchspersonen, die in einem abwechselnd mit Heizkörpern (Radiatoren) und mit einem Kachelofen beheizten Raum Zeit verbrachten, zeigten Reaktionen des autonomen Nervensystems, die mit der Qualität der in diesem Raum empfangenen Wärmereize in Verbindung gebracht werden können. Die Aktivität des Autonomen Nervensystem wurde als Steuerungsaktivität der Herztätigkeit sichtbar gemacht: EKG-Messungen der Versuchspersonen wurden als Autonome Bilder (neue Bezeichnung: Autochrone Bilder) bzw. als Recurrence Plots dargestellt.

In einer ersten Studie befanden sich die Versuchspersonen auf einem Kipptisch, der nach einer Ruhephase aufrecht gekippt wurde (Orthostasetest). Damit war eine große Kreislaufbelastung und eine anschließende Erholungsphase verbunden. Es zeigte sich unter anderem, dass bei Beheizung mit Radiator die Belastungsherzfrequenz nach dem Kippen um rund 20% höher lag, als bei demselben Versuch mit Beheizung des Versuchsraums mittels Kachelofen. Die Anzahl der Versuchspersonen und die Anzahl der Versuche waren aber zu gering für eine gültige statistische Aussage (Lipp et al. 1999).

In einer Nachfolgestudie wurden eine größere Anzahl von Versuchspersonen einer Sequenz von Ruhephase, Aufstehen, einem Trainingsprogramm (Ergometerfahrrad) und einer erneuten Ruhephase unterworfen. Der Orthostasetest wurde durch selbständiges Aufstehen von einem Ruhesessel durchgeführt. Die Kreislaufbelastung war unter diesen Umständen weniger drastisch. Die bei den Kipptischversuchen festgestellten Unterschiede der Belastungsherzfrequenz wurden unter den schonenderen Bedingungen nicht mehr festgestellt. Es zeigte sich aber, dass die Versuchspersonen rascher zu den Ruhewerten der Herztätigkeit zurückkehrten, wenn der Versuchsraum mit Kachelofen beheizt war (Lipp et al. 2000).

# Thermischer Komfort

## 12. Einleitung

Zwischen den Körperempfindungen der Blutfülle und des Schwitzens einerseits und dem Gefühl des Frierens andererseits gibt es einen Punkt der Indifferenz, ohne besonderes Gefühl, der thermische Behaglichkeit oder -Komfort genannt worden ist.

Damit ist ein Zusammenhang zwischen physiologischen Zuständen und Empfindungen der bewussten Person beschrieben. Dieser Zusammenhang ist von größtem Interesse für unser Thema, weil das Ziel der Architektur und der Haustechnik subjektiv zufriedene Bewohner und Benutzer sein müssen. Die Zufriedenheit lässt sich aber nur durch geeignete objektive bauliche und haustechnische Maßnahmen erreichen.

Nachfolgend wird das Konzept des thermischen Komforts nach ISO 7730 erklärt (Kapitel 13), Benutzerbedürfnisse gegenüber typischen Wohn- und Arbeitsräumen diskutiert (Kapitel 14), die Erweiterungen und Relativierungen, die das Konzept des Thermischen Komforts im Laufe der Zeit erfahren hat, bedacht (Kapitel 15) und schließlich resultierende Strategien für thermische Vielfalt vorgeschlagen (Kapitel 16).

### 13. Bedingungen für thermischen Komfort

Das physiologische Geschehen im Körper und die physikalische Wechselwirkung des Körpers mit der Umwelt können in einer Formel zusammengefasst und mit Behaglichkeitsurteilen der bewussten Person statistisch in Verbindung gebracht werden.

#### Komfortbestimmung nach Fanger: PMV und PPD-Gleichungen und Tabellen

Paul Ole Fanger stellt in seiner bahnbrechenden Arbeit Thermal Comfort (1970)

die Faktoren der Wärmeproduktion

- Stoffwechselrate, korrigiert für mechanische Arbeit (M) sowie
- die externe mechanische Arbeit, die nicht als Wärme vom Körper abgeführt werden muss (W)

den Faktoren der Wärmeabfuhr gegenüber:

- dem thermischen Widerstand der Bekleidung
- der mittleren Lufttemperatur  $t_a$
- der mittleren Strahlungstemperatur  $t_r$
- der relative Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$
- der Luftfeuchte (dem Wasserdampfpartialdruck)  $p_a$  (in Pascal)
- dem konvektiven Wärmeübertragungskoeffizienten  $t_{cl}$  in Watt pro Quadratmeter und Grad Celsius

Dies ist eine Wärmebilanzgleichung. Im thermischen Gleichgewicht ist die Differenz von Produktion und Abfuhr gleich Null. Kann das thermische Gleichgewicht ohne Regulationsanstrengungen aufrecht erhalten werden, so empfindet die Person thermischen Komfort. Entfernt sich die Differenz von Wärmeproduktion und -abfuhr von Null, so wissen wir, dass der Körper (Kapitel 4) und in weiterer Folge auch die bewusste Person (Kapitel 6) regulierend eingreifen werden. Damit gehen alarmierende Körperwahrnehmungen einher, die sich im Laborversuch per Fragebogen als Wärmeurteile von Versuchspersonen abfragen lassen. Dies hat Fanger getan, und er konnte so ermitteln, unter welchen Bedingungen von Wärmeproduktion- und abfuhr welches mittlere Urteil eines Kollektivs von Versuchspersonen (Predicted Mean Vote, PMV) zu erwarten ist. Die Wärmebilanzgleichung wurde von ihm so angepasst, dass ihr Ergebnis statt  $W/m^2$  ein Wärmeurteil mit einer Skala von  $-3$  („kalt“) über Null bis  $+3$  („heiß“) ist. Genaueres Anhang 12.

Aus der Predicted Mean Vote (PMV) errechnet sich die Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD, als der Prozentanteil von „Unzufriedenen“ einer Population, der unter denselben Klimabedingungen die Angaben „kühl“ ( $-1$ ) und „kalt“ ( $-2$ , bzw. „warm“ ( $-1$ ) und „heiß“ ( $-2$ ) machen wird.

Bei der Erklärung dieser Größen wird stets betont, dass mehr als 95 % Zufriedene und weniger als 5 % Unzufriedene empirisch nicht vorkommen. In der Praxis hält man auch 10 % oder 15 % Unzufriedene noch für vertretbar. Aus derselben Tabelle (PPD als Funktion von PMV) geht aber auch hervor, dass selbst unter Bedingungen, unter denen PMV bei  $\pm 2$  liegt (= warm, kühl), noch über 20 % der Population zufrieden sein werden.

## Psychophysische Beurteilungsskalen für Predicted mean Vote (PMV) und Predicted Percentage of dissatisfied (PPD)

Bezeichnung	PMV	PPD
kalt	-3	99,1
kühl	-2	76,8
etwas kühl	-1	26,1
neutral	0	5
etwas warm	1	26,1
warm	2	76,8
heiß	3	99,1

Leseweise: Beurteilen Versuchspersonen bei einem Laborversuch die Umgebungswärme im Durchschnitt mit kühl, so sind 76,5 % mit der Umgebungswärme unzufrieden,  $100 - 76,5 = 23,5$  % sind noch zufrieden.

### Randbedingungen

Der PMV-Index liefert nur gültige Werte, wenn die 6 Hauptparameter innerhalb der folgenden Intervalle liegen (ISO 7730):

$M = 46$  bis  $232 \text{ W/m}^2$  (0,8 bis 4 met)

$I_{cl} = 0$  bis  $0,310 \text{ m}^2\text{C/W}$  (0 bis 2 clo)

$t_a = 10$  bis  $30^\circ\text{C}$

$t_r = 10$  bis  $40^\circ\text{C}$

$v_{ar} = 0$  bis  $1 \text{ m/s}$

## **14. Thermische Benutzerbedürfnisse gegenüber typischen Wohn- und Arbeitsräumen**

### **Thermischer Komfort und Nutzungsart**

Wohn- und Arbeitsräume müssen den notwendigen thermischen Komfort für den Aufenthalt von Personen bieten. Manche sind darüberhinaus für bestimmte Tätigkeiten eingerichtet (z.B. Küchen), manche schließlich sind nur zur Aufbewahrung von Gegenständen, Waren u. dgl. bestimmt. An den meist kurzzeitigen Aufenthalt von Personen werden im letzteren Fall keine großen Komfortansprüche gestellt. Dafür sind Anforderungen für Lebensmittellagerung, Wäschetrocknen zu erfüllen, die auch im weiteren Sinn zu den Benutzerbedürfnissen gezählt werden müssen.

Zu den durch die Benutzer gestellten Rahmenbedingungen gehören die für den Verwendungszweck des Raums üblichen körperlichen Aktivitäten und Bekleidungsarten aber auch Nutzungsdauer und Nutzungszeiten, Lichtansprüche, Lüftungsansprüche und der Umgang mit durch die Nutzung bedingten Abwärmequellen.

Zunächst werden typische Räume bzw. Raumnutzungsarten kurz charakterisiert. Dann werden die dabei verwendeten Kriterien erklärt. Schließlich werden Rechenwerte angegeben.

### **Raumtypen**

#### **Wohnzimmer**

geeignet für ruhenden oder sitzenden Aufenthalt in jahreszeitgemäßer Hauskleidung.

Im Sommer (an heißen Tagen) wird draußen leichte Kleidung bevorzugt. Dennoch können die Komfortbedingungen beim Aufenthalt im Freien in Richtung zu warm überschritten werden. Kommt man dann von draußen in einen Innenraum, so soll es dort wohltuend kühl sein (Komforterlebnis) man möchte sich aber nichts Zusätzliches anziehen müssen.

Im Winter sind viele bereit, auch im Innenraum relativ wärmer als im Sommer angezogen zu sein, und zwar in etwa so warm, dass ein Mantel (= eine weitere Kleidungsschicht) genügt, um hinausgehen zu können, bzw., dass es genügt, den Mantel auszuziehen, um sich im Innenraum wohlfühlen. Drinnen soll es „angenehm warm“ sein. Dabei kann es sich um dieselbe Lufttemperatur wie das „angenehm kühl“ des Sommers handeln!

#### **Kinderzimmer**

benötigen genügend Wärme in Bodennähe. Speziell im Winter soll der Bodenbelag hohe Kontakttemperaturen gewährleisten (geringe Wärmeleitfähigkeiten!: Teppiche). Bei Babys, die gewickelt und vielleicht auch in Kinderzimmer gebadet werden, müssen lokal und vorübergehend sehr warme Bedingungen herstellbar sein (Heizstrahler?). Kinder sind oft körperlich aktiver als Erwachsene, kühlen aber andererseits auch schneller aus.

#### **Büros**

wie Wohnzimmer. Büromaschinen sind Abwärmequellen. Büros müssen bei gleichzeitiger Benützung durch mehrere Personen verschiedenen Wärmeansprüchen und Bekleidungsgehnheiten gleichzeitig gerecht werden. Psychologisch reagiert man in Büros empfindlicher (intoleranter) auf thermischen Diskomfort als zuhause (vgl Kapitel 7). Im Unterschied zu Wohnräumen sind Büros nachts und am Wochenende in der Regel unbenutzt.

#### **Schlafzimmer**

Im Winter kann es hier bedeutend kühler sein als in Wohnräumen. Bettdecken können nämlich dicker und besser wärmeisolierend sein, als akzeptable Hauskleidung. Es können aber auch im Winter Wärme-

verhältnisse gewünscht sein, die den unbedeckten Aufenthalt im Schlafzimmer angenehm erscheinen lassen.

Im Sommer muss es im Schlafzimmer nicht kühler sein als in Wohnräumen. Die Komfortbedingungen für ruhenden, fast unbedeckten Aufenthalt dürfen aber nicht in Richtung zu warm überschritten werden. Schlafzimmer benötigen gute Lüftung: genügend Luftraum oder offene Türen zu angrenzenden Räumen oder kontrollierte Wohnraumlüftung oder offene Fenster, ...

#### **Badezimmer, Hallenbäder, Massageräume**

sollen für ruhenden unbedeckten Aufenthalt geeignet sein. Badezimmer sind den größten Teil des Tages unbenutzt, sollen aber, typischerweise morgens und abends, rasch aufgewärmt werden können. Badezimmer enthalten potentiell Abwärmequellen: Dusche, eine gefüllte Badewanne. Schließlich wird bei der Benutzung oft viel Wasserdampf erzeugt, der während, zumindest aber nach der Badbenutzung rasch und ohne zu große Wärmeverluste abgeführt werden sollte.

Massageräume: Die erhebliche körperliche Aktivität des Masseurs wird durch entsprechend leichte Kleidung kompensiert.

Hallenbäder haben längere tägliche Nutzungszeiten, wenn es sich nicht um private Swimming-Pools handelt. Abwärme- und Wasserdampfproduktion müssen bei der Bemessung des Luftraumes und der Lüftung berücksichtigt werden.

#### **Küche, Waschküche:**

typisch ist eine leichte bis mittelschwere manuelle Tätigkeit. Dabei wird die Bekleidung der Intensität der Arbeit angepasst. Die Küche enthält Abwärmequellen: Abwaschwasser (Geschirrspüler), Herd, Backrohr, Kühlschrank, Gefriertruhen, evt. Waschmaschine. Zeitweise werden viel Hitze (professionelle Küchen), Wasserdampf und Gerüche erzeugt, die durch Lüftung abgeführt werden müssen.

Oft spielen kleine Kinder in der (privaten) Küche: Wärme in Bodennähe, Bodenbelag soll hohe Kontakttemperaturen gewährleisten (geringe Wärmeleitfähigkeit der Beläge).

#### **WC:**

wie Wohnzimmer. Erhöhter Lüftungsbedarf.

#### **Vorzimmer, Garderoben, Foyers, Geschäftslokale, Amtsräume mit Parteienverkehr.**

Solche Räume werden im Winter in winterlicher Straßenbekleidung betreten und verlassen, und man hält sich auch kurzzeitig in solcher Kleidung darin auf. Andererseits dienen sie auch kurzfristig (Vorzimmer) oder dauernd (Geschäftslokale, Amtsräume) dem Aufenthalt in winterlicher Haus- oder Bürokleidung. Dadurch ist ein Kompromiss notwendig, der den Aufenthalt sowohl in Straßenkleidung als auch in (warmer) Hauskleidung noch angenehm macht. (Manchmal angewandte Lösung: Zonierung, z.B. Strahlungsheizung in Lagerräumen.)

Bei Hereinkommenden wechselt die Stoffwechselaktivität von gehend zu sitzend oder stehend und die Umgebungstemperatur ändert sich sprunghaft.

Im Sommer: wie Wohnräume.

#### **Versammlungsräume, Vortrags- und Seminarräume, Kinos, Theater, Gastwirtschaften, Schulklassenzimmer, Hörsäle, Kirchen.**

Diese Räume sind durch den gleichzeitigen (ruhenden) Aufenthalt sehr vieler, zuweilen aber auch weniger Menschen gekennzeichnet. Das bedeutet eine variable Anzahl von Wärme-, Wasserdampf- und Geruchsquellen, die im Sommer wie im Winter bei Beheizung und Lüftung zu berücksichtigen sind, besonders dann, wenn bei niedrigen Deckenhöhen das Luftvolumen pro Person klein ist. Ist das Luftvolumen – typischerweise in Kirchen – hoch, so wird das Lüftungsproblem gemildert, dafür tritt bei oft geringer Tages- und Jahrenutzungsdauer des Raums das Problem der ökonomischen Beheizung verstärkt auf.

#### **Werkstätten, Turnsäle, Fitness- und Tanzstudios**

sind charakterisiert durch mittlere bis starke körperliche Aktivität, die durch entsprechend leichte Bekleidung kompensiert wird. Sie benötigen angrenzende Pausen-, Umkleide- und Duschräume für den ruhenden Aufenthalt in schweißnassen Kleidern oder den unbedeckten Aufenthalt, die dann entsprechend wärmer sein müssen (vgl. Badezimmer).

#### **Speisekammer, Kühlschrank, Gefriertruhe**

Typisch ist der Betrieb eines Kühl- und Gefrierschranks in der geheizten Küche. Der Einsatz von Energie zur Entfernung von Wärme, die zuvor ebenfalls unter Energieeinsatz erzeugt wurde, zählt gewiss nicht zu den Benutzerbedürfnissen (außerhalb der Heizperiode entfällt dieses Argument). Die Ablösung der traditionellen Speisekammer und des Kellers durch Kühlschrank und Tiefkühltruhe sollte unter den Gesichtspunkten der biologisch idealen Lebensmittellagerung und des Energieeinsatzes einmal hinterfragt werden! Beispiel für neue Lösungen: zentraler Kühlraum für Passivhaus-Wohnanlage mit 31 Tiefkühlschränken. Die Abwärme wird für die Temperierung eines 146 m<sup>2</sup> großen Trockenraumes verwendet (Cepheus 2001. S. 80).

Frischhaltung von Lebensmitteln erfordert Temperaturen zwischen 15° und 0° C, bzw. unter -18° C. Die relative Luftfeuchtigkeit muss teils hoch (Gemüse), teils niedrig sein (alles, wo draufsteht „kühl und trocken lagern“).

#### **Wäsche trocknen**

Dies geschieht draußen im Garten oder im Hof, drinnen auf Dachböden, in Heizungskellern und zunehmend auch in Wäschetrocknern (siehe: Waschküche, Küche).

Dachböden haben ein großes Luftvolumen mit entsprechend großer Kapazität für Wasserdampfaufnahme. Im Sommer, wie im Winter ist die Luft hier wesentlich wärmer und trockener als im Freien.

Heizungskeller haben warme trockene Luft, die als Abwärme anfällt.

Wäschetrockner (Tumbler) ersparen Platz und die Arbeitsgänge des Wäscheaufhängens und -abnehmens um den Preis eines höheren Energieverbrauchs.

#### **Lagerräume, als Lagerräume genutzte Keller, Ausstellungsräume, Galerien, Museen**

Hier sind die optimalen Lagerbedingungen für die jeweiligen Gegenstände und Güter wichtiger als die Bedürfnisse der Personen, die diese Räume meist nur kurzzeitig betreten.

Spezielle Anforderungen an Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Beleuchtungsintensität können bestehen. Solche Anforderungen können übrigens auch in Wohnräumen auftreten, die mit Klavieren oder echten Gemälden ausgestattet sind.

**Umstände, auf die wegen des thermischen Komforts baulich und haustechnisch reagiert werden muss**

**erhöhte körperliche Aktivität**

Die Kleidung wird dabei der Aktivität angepasst.

Beispiele: Küche, Waschküche, Werkstätten, Turnsäle, Tanzstudios

**unbekleideter Aufenthalt bei geringer körperlicher Aktivität**

Beispiele: Badezimmer, Hallenbäder, Massageräume

**ruhender Aufenthalt mit besonders gut isolierender Kleidung (Bettdecken)**

Beispiele: Schlafzimmer (nach traditionellem Verständnis)

**gleichzeitiger Aufenthalt von Personen mit warmer Straßenbekleidung und erhöhter körperlicher Aktivität und Personen in Büro- oder Hauskleidung in sitzender Tätigkeit im Winter.**

Beispiele: Vorzimmer, Geschäftslokale, Amtsräume mit Parteienverkehr, Schalterhallen an Flughäfen und Bahnhöfen, Verkehrsflächen von Einkaufszentren.

**Abwärmequellen vorhanden**

Diese unterstützen während der Heizperiode die Heizung, im Sommer muss die überschüssige Wärme abgeführt oder genutzt werden. Abwärmequellen sind oft nur vorübergehend wirksam, was Anforderungen an die Regulierung stellt.

Beispiele Küche, Waschküche, Badezimmer, Hallenbäder, mit EDV ausgestattete Büros, Versammlungsräume aller Art.

**erhöhter Lüftungsbedarf**

infolge Wasserdampf-, Geruchs- und Schadstoffquellen.

Beispiele: Küche, Waschküche, WC, Badezimmer, Hallenbäder, Versammlungsräume, Räume, in denen geraucht wird, Räume in denen Kopiergeräte betrieben werden.

**relativ geringes Luftvolumen, erhöhte Lüftungsanforderungen**

Beispiele: WC, Versammlungsräume mit niedrigen Decken, die meisten Küchen und Badezimmer.

**relativ großes Luftvolumen, relativ geringe Lüftungsanforderungen**

Oder: absolut hohe Lüftungsanforderungen, die durch die Pufferwirkung des großen Luftvolumens regulativ leichter zu bewältigen sind.

Beispiele: Turnsäle, große Kinosäle, Theater, Hörsäle, Hallenbäder.

**besondere Lichtansprüche**

entscheiden darüber, ob eine direkte passive Sonnenenergienutzung möglich ist und welche Orientierung in den Himmelsrichtungen zu bevorzugen ist.

Folgende Fälle sind zu unterscheiden:

- Räume, ohne bestimmte Lichtansprüche: Schlafzimmer, alle abends genutzten Räume, wie Restaurants, alle Räume zum kurzzeitigen Aufenthalt, wie Badezimmer, WC, Vorzimmer.
- Räume, in denen gedämpftes Licht von Vorteil ist: Lagerräume, Ausstellungsräume.

- Räume ohne Tageslichtzutritt: Kinosäle, Theatersäle, Dunkelkammern.
- helle Räume, direkte Sonnenbestrahlung erwünscht: Wohnräume, besonders Kinderzimmer.
- helle Räume, indirektes Sonnenlicht bevorzugt: Arbeitsräume, Bildschirmarbeitsplätze.

#### im Sommer und im Winter soll es gleich warm sein

Beispiele: Badezimmer, Umkleieräume, Speisekammern, Ausstellungsräume (definierte Klimaanforderungen für Kunstwerke, Musikinstrumente, u. dgl.).

#### im Sommer darf es wärmer sein als im Winter

Beispiele: alle Wohnräume

#### dauernder Aufenthalt von Personen, stabiles Innenraumklima erwünscht

alle dauernd, zumindest wochentags genutzten Räume. Beispiele: Wohnungen von Familien mit kleinen Kindern oder Personen mit Heimarbeitsplätzen (Home Offices, Telearbeitsplätze), Wohnungen von Senioren, Altersheime, Hotels, Krankenhäuser.

#### unterbrochener, gelegentlicher, seltener, nur kurzzeitiger Aufenthalt von Personen, rasche Temperaturregulierung gewünscht

Wohnungen von Berufstätigen, Wochenendhäuser, Ferienhäuser, selten benutzte Versammlungs- und Veranstaltungsräume, Badezimmer.

#### Vorgeschlagene Rechenwerte für typische Wohn- und Arbeitsräume

Nach ISO 7730 können im Winter Bekleidungsstärken mit clo-Werten von 1,0, im Sommer von 0,5 angenommen werden. Das NEFF-Projekt 357 untersucht die Anpassungsmöglichkeiten durch Wechsel der Bekleidung an die größeren Wärmeunterschiede in passiv solarbeheizten Gebäuden und gibt folgende Bereiche für + 0,5 PMV - 0,5 (entspricht 10% Unzufriedenen) und eine Stoffwechselaktivität von 1,2 met (entspricht 70 W/m<sup>2</sup>, leichte sitzende Tätigkeit) an:

	mögliche Lufttemperaturdifferenz (K) Breite des Komfortbandes		mögliche Ober- und Untergrenzen der Lufttemperatur (C) bei 1,2 met	
	Winter	Sommer	Winter	Sommer
<b>clo konstant:</b>				
Winter 1,0 Sommer 0,5			19,8 - 24,8	24,0 - 27,2
	4,9	3,3		
<b>clo variabel, Kleidungswechsel nur Oberkörper (Büro):</b>				
Winter 0,9 - 1,1 clo; Sommer 0,5 - 0,7 clo			19,0 - 25,2	22,3 - 27,2
	6,1	5		
<b>clo variabel, großer Bereich:</b>				
Winter 0,8 - 1,2 clo; Sommer 0,4 - 0,7 clo			18,1 - 25,6	22,3 - 27,7
	7,5	5,5		
<b>verändert nach NEFF- Projekt 357</b>				

Aus den vorstehenden Überlegungen folgen Annahmen über typische physiologische Aktivitäten und bevorzugte Bekleidungsstärken in Wohn- und Arbeitsräumen:

Raumart	typische körperliche Aktivität [W/m <sup>2</sup> ]		thermischer Widerstand der typischen Bekleidung [clo]			
	min.	max.	i m S o m m e r		i m W i n t e r	
Aktivität			min	max	min	max
Bekleidung						
Wohnzimmer, Kinderzimmer	41	70	0.4	0.8	0.8	1.2
Büros	70	70	0.5	0.7	0.9	1.1
Schlafzimmer	41	58	0.0	0.5	0.0	0.5
+ Decke:	41	58	1.5	1.5	2.0	4.0
Badezimmer, ...	70	81	0.0	0.5	0.0	0.5
Küchen,...	93	116	0.5	0.8	0.5	0.8
WC	58	70	0.4	0.8	0.8	1.2
Vorzimmer, Geschäftslokale:Hereinkommende	100	140	0.4	0.8	1.5	3.0
Vorzimmer, Geschäftslokale: zur Ruhe Gekommene	58	58	0.4	0.8	1.5	3.0
Vorzimmer, Geschäftslokale: Personal	70	116	0.5	0.7	0.9	1.1
Versammlungsräume, ...	58	70	0.4	0.8	0.8	1.2
Werkstätten, Turnsäle, ...	140	450	0.3	0.8	0.3	1.0
Werkstätten, Turnsäle:Umkleide- und Pausenräume	58	81	0.0	0.0	0.0	0.0

Aus den typischen Werten für physiologische Aktivitäten und bevorzugte Bekleidungsstärken in Wohn- und Arbeitsräumen lassen sich nach ISO 7730 operative Temperaturen (Strahlungstemperatur = Lufttemperatur) ermitteln, die thermischen Komfort gewährleisten:

Raumart	Operative Temperaturen für PMV = 0, auf ganze Grad -Werte gerundet. Nach ISO 7730-Tabellen							
	i m S o m m e r				i m W i n t e r			
	min.Aktiv		max.Aktiv.		min.Aktiv		max.Aktiv.	
Aktivität	min	max	min	max	min	max	min	max
Wohnzimmer, Kinderzimmer	27	25	26	22	25	23	22	21
Büros	25	24	25	24	22	21	22	21
Schlafzimmer	29	27	28,5	26	29	27	28,5	26
+ Decke:	21	21	20	20				
Badezimmer, ...	28	25	27	23	28	25	27	23
Küchen,...	22	20	20	16	22	20	20	16
WC	26	24	26	22	24	22	22	21
Vorzimmer, Geschäftslokale:Hereinkommende	22	18,5	18	14	13,5		< 12	
Vorzimmer, Geschäftslokale: zur Ruhe Gekommene	26	24	27	24	20		20	
Vorzimmer, Geschäftslokale: Personal	25	24	26	22	24	22	22	21
Versammlungsräume, ...	26	24	26	22	24	22	22	21
Werkstätten, Turnsäle, ...	20	15			20	12		
Werkstätten, Turnsäle:Umkleide- und Pausenräume	29	29	27	27	29	29	27	27

In herkömmlichen, relativ schwach wärme gedämmten Gebäuden müssen im Winter die zu kalten Raumoberflächen durch entsprechend höhere Raumlufttemperaturen kompensiert werden. Die angegebenen operativen Temperaturen sind nur in ideal gedämmten Gebäuden mit der Lufttemperatur gleichzusetzen!

## 15. Verschiedene Komfortbegriffe haben verschiedene Versuchsanordnungen und verschiedene Ergebnisse zur Folge

Aus der PPD-Gleichung von Fanger/ISO 7730 geht hervor, dass bei optimalen Temperaturbedingungen noch immer mindestens 5% einer statistischen Population unzufrieden sein werden. Neuere Literatur geht sogar von wesentlich höheren Prozentsätzen aus.

So brachten Untersuchungen des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik in Holzkirchen das Ergebnis, dass unter homogenen thermischen Bedingungen mindestens 15% der Versuchspersonen unzufrieden blieben (E. Mayer 1986; E. Mayer und R. Schwab 1990).

Eine Revision des Fanger'schen 5%-PPD-Minimums hin zu höheren Werten war auch zuvor schon durch mehrere andere Arbeitsgruppen vorgenommen worden:

Auf den Unterschied zwischen Komfort und Akzeptanz von thermischen Umgebungsbedingungen macht Donald A. McIntyre (1981) aufmerksam. Zu unterscheiden sei,

- die optimale Temperatur, bei der keine Änderung gewünscht wird
- die Beschreibung der Wärmeempfindungen in Kategorien
- die Beurteilung des Komforts und der Akzeptierbarkeit: Einteilung in akzeptable und nicht akzeptable Raumbedingungen

Abhängig von der lokalen Kultur und dem lokalen Klima können durch angepasste Kleidung Temperaturen zwischen 16°C und 32°C als akzeptabel angesehen werden, wie eine Auswertung von zahlreichen weltweit in verschiedenen Kulturen und Klimata durchgeführten Studien zum Wärmekomfort von Humphreys (1976, zitiert bei McIntyre 1981) zeigen.

Grivel und Candas (1991) machen auf den Unterschied aufmerksam, ob Versuchspersonen

- a) zu einer nicht veränderbaren Temperaturwahl Stellung nehmen sollen oder
- b) Wünsche auf Änderung äußern dürfen, die vom Versuchsleiter erfüllt werden oder ob
- c) sie selbst an einem Knopf drehen können, um jederzeit die Temperatur ihren momentanen Bedürfnissen anzupassen (diese Variante verwendeten die Autoren selbst).

Je nachdem heißt das Kriterium des thermischen Komforts

- a) „sensory thermoneutrality“ ,
- b) „indecision“ oder
- c) „preference“ .

Grivel und Candas deuten nur an, welche verschiedenartige Wege („episodic changes“) die Versuchspersonen bei ihren Versuchen, zu ihrer Optimaltemperatur zu gelangen, zurückgelegt haben:

„Temperature changes produced by actively behaving subjects have seldom been considered. Thermal preference (thermal comfort) did not mean a steady ambient temperature level: in most subjects, temperature changes occurred from time to time. There is no space to report which kind of episodic temperature adjustments were made; obviously thermal comfort also implied the possibility of changing the temperature level.“

Die Bandbreite der Vorzugstemperaturen bei verschiedenen Versuchspersonen betrug 9,9°C. Diese Zahl wird von den Autoren nicht kommentiert. Zahlen wie diese werden aber in einer Arbeit von Wyon und Sandberg (1993) beleuchtet und bestätigt. Die Autoren geben eine bemerkenswerte Einschätzung der relativen Bedeutung ihrer Messungen über u.a. den Einfluss vertikaler Temperaturgradienten auf den thermischen Komfort ab, wenn sie in ihrer Schlussfolgerung schreiben:

„During normal office work, individual control of whole-body heat loss would have a more beneficial effect on local thermal discomfort than would have the complete elimination of thermal gradients. ISO 7730 recommendations are valid only for conditions in which each individual has such control. In practice, thermal gradients cause much less local thermal discomfort than is caused by inter- and intra-individual variations in thermal requirements. Without individual micro-climate control, 30 – 40% may be ex-

pected to experience local thermal discomfort under conditions which comply with ISO 7730 recommendations, rather than the 5% which are predicted by the experiments on which these recommendations are based.“

Diese neuen Ergebnisse kontrastieren auffallend mit Aussagen aus den späten 70er Jahren (Olesen et al. (1979), die, nicht ganz ohne Zynismus, zu bedenken geben: „A fixation of a limit for acceptable vertical air temperature differences is, strictly speaking, not possible on a purely scientific basis. The number of thermally uncomfortable people one is ready to accept is rather a socio-economic question.“ (Seite 575) Auf die Bedeutung des bewussten Verhaltens für den Wärmekomfort einer Person wird in den Kapiteln 6 und 7 verwiesen.

## 16. Strategien für thermische Vielfalt

Wie können thermische Wahlmöglichkeiten innerhalb des Bewegungsspielraums von Personen geschaffen werden.

### Segmentieren durch Deckenheizung

Erhard Mayer stellte 1993 ein patentiertes Verfahren vor, in dem über eine elektronische beheizte künstliche Haut eine Deckenheizung/-Kühlung gesteuert wird. Die Deckenheizung/-Kühlung ist in Segmente von 5 m<sup>2</sup> geteilt, sodass eine individuelle Regelung für Büroarbeitsplätze möglich ist. Seine Ergebnisse sind besonders unter Bürosituationen interessant, wo die Plätze der Schreibtische nicht ohne weiteres verändert werden können.

Das System erlaubt aber wohl nur die segmentweise Anpassung der Zustrahlung von oben (Kalte Füße im Schatten unter der Schreibtischplatte?). Hinzu kommen als mögliche Nachteile die extrem ungünstigen Expositionswinkel des menschlichen Körpers gegenüber der Decke: Kopf, Schultern, Unterarme, Hände.

### Zonieren durch Strahlungsheizung

Ein Raum kann mittels einer Strahlungsheizung mit einem Strahlungstemperaturgradienten ausgestattet werden. Ebenso können verschiedene Räume in einer Wohnung oder einer Arbeitsstätte auf verschiedenen Temperaturniveaus gehalten werden.

Temperaturzonierung eignet sich für Räume, die im Winter das Sommeroptimum  $24,5 \pm 1,5$  °C erreichen sollen, während für angrenzende Räume das Winteroptimum ( $22 \pm 2$  °C) ausreicht:

- Badezimmer
- Vorräume zu einer Sauna
- warme Schlafzimmer
- gemütliche Ofenecke im Wohnzimmer
- sicht- und spürbares Wärmezentrum in einem Kindergarten (Kislinger 2001) oder wo immer sonst ein Zentrum der Gemeinschaft anschaulich gemacht werden soll.

Auf den Anhang 16 „Orientierung durch Strahlungsheizungen“ wird verwiesen.

In gut wärmedämmten Gebäuden lässt sich eine Zonierung innerhalb eines Raumes nur schwer realisieren. Die Luft wärmt sich rasch auf, der Gradient verflacht. Besser sind Zonierungen zwischen benachbarten Räumen innerhalb eines Gebäudes. Dazu folgende Tabelle von Randbedingungen für Temperaturgradienten.

beeinflussender Faktor	großer Gradient starke Zonierung	kleiner Gradient schwache Zonierung
Heizflächentemperatur TF1	hoch	niedrig
Lufttemperatur TL	niedrig	hoch
Bekleidungsstärke	niedrig	hoch
Projected Area Factor	groß (z.B. stehen, frontal Richtung Heizfläche)	klein (z.B. liegen, Füße Richtung Heizfläche)
Projektionsfläche der Heizfläche A bzw. Raumwinkel im Abstand S	groß	klein

Strahlungstemperaturgradienten in beheizten Innenräumen

### **Differenzieren durch Architektur**

Konzepte und Überlegungen zu thermischen Wahlmöglichkeiten sind oft auf komplizierte individuelle Regulationsmöglichkeiten der Haustechnik beschränkt worden. Einfacher und besser geht es durch gute Architektur. Als Beispiel mögen die Büroräume des IBO in Wien dienen: Altbau (Gründerzeit), südseitig an sehr breiter Straße, daher sehr sonnige Büroräume, die infolge großer Speichermassen im Sommer doch leidlich kühl bleiben. Kleine Balkone vor mehreren Räumen für kleine (Rauch)pausen. Hinter den Büros ein schattiger Gang zur Küche, zum Kopierer, zu anderen Nebenräumen, die auf den schattigen Innenhof schauen. Jedem einzelnen Ort kann man sommerliche Komfortmängel nachweisen, alle zusammen bilden sie einen für jeden Mitarbeiter zugänglichen Lebensraum voller thermischer Wahlmöglichkeiten und Abwechslungen .

## Anhänge

### Anhang 1: Abhängigkeit der Wärmeabgabe von der Körperoberfläche

Der Wärmeproduktion steht der Wärmeverlust bzw. die notwendige Abfuhr gegenüber. Es wäre nahelegend anzunehmen, dass die Wärmeproduktion von der Körpermasse abhängt. Das ist aber nicht so. Die Wärmeproduktion kann nämlich bei einem Lebewesen mit autonomer Körperkerntemperatur nur vorübergehend größer oder kleiner als die Wärmeabgabe sein. Im Durchschnitt muss sie gleich der Wärmeabgabe sein. Die Wärmeabgabe findet aber über die Oberfläche statt und ist deshalb von der Größe der Körperoberfläche abhängig.

Tatsächlich ist der Grundumsatz pro m<sup>2</sup> Körperoberfläche von der Spitzmaus bis zum Elefanten etwa gleich, der Grundumsatz pro kg Körpermasse jedoch drastisch unterschiedlich.

Die Körperoberfläche ist schwierig zu messen und wird daher nach der Formel von DuBois aus Körperlänge und Körpergewicht errechnet.

Berechnung der Körperoberfläche des Menschen aus Körperlänge und Körpergewicht nach DuBois (nach Keidel 1985, mit biometrischen Daten für Kinder aus Goebel und Glöckler 1987

Formel: Oberfläche (m<sup>2</sup>) = tMasse (kg)<sup>0,425</sup> x Länge (m)<sup>0,725</sup> x 0,20247

Alter	Länge [m]	Masse [kg]	DuBois-Oberfläche [m <sup>2</sup> ]
Geburt	50	3,4	0,21
5 Monate	64	7	0,33
9 Monate	70	9	0,4
1 Jahr	75	10	0,44
2 Jahre	87	12	0,53
3 Jahre	95	14	0,6
4 Jahre	103	16	0,67
5 Jahre	108	18	0,73
6 Jahre	116	21,5	0,83
7 Jahre	123	24	0,91
8 Jahre	130	27	0,99
9 Jahre	134	29,5	1,05
Erwachsene	160	50	1,5
Erwachsener	180	80	2

Die Körperoberfläche des Erwachsenen ist 7–10mal größer als die des Neugeborenen, die Körpermasse ist 15–20mal größer.

Dem entspricht bei Babys und Kindern ein erhöhter Grundumsatz, der die relativ größere Wärmeabgabe kompensiert.

### Anhang 2: Unterschiede des Wärmeaustauschs mit der Luft und mit Wasser

Die in der Luft wesentlichen Wärmeübertragungsmechanismen Strahlung (bis 60%) und Verdunstung (bis 70%) sind im Wasser praktisch außer Kraft gesetzt. Strahlung wird in der Grenzschicht Haut-Wasser absorbiert, ihr Anteil ist sehr klein im Vergleich zu den im Wasser dominierenden Mechanismen Leitung und Konvektion. Verdunstung ist bei eingetauchten Körperteilen nicht möglich.

Daraus folgt überraschenderweise, dass der Körper sich gegen Wärmeverlust in zu kühlem Wasser bes-

ser wehren kann, als gegen Wärmezufuhr aus zu warmen Wasser. Beispielsweise wird durch ein Bad mit 6°C über Indifferenztemperatur im gleichen Zeitraum 3mal mehr Wärme übertragen als durch ein Bad mit 6°C unter der Indifferenztemperatur.

Wie ist das möglich? Zu warmem Wasser ist der Körper hilflos ausgeliefert, Schwitzen ist nicht möglich bzw. führt nicht zum Ziel einer Absenkung der Hauttemperatur. Zu kaltes Wasser löst hingegen wirksame Regulationsaktivitäten aus: Vasokonstriktion, Auskühlen der peripheren Körperteile, Absinken der Hauttemperatur, Verlangsamung des Wärmeübergangs, dessen Größe von der Temperaturdifferenz abhängt. Bei der Wechselwirkung Körper-Luft ist das Gegenteil der Fall. Die Verdunstung von Schweiß ist eine extrem wirksame Form der Wärmeabfuhr in Luft. Sie fällt im Wasser aus. Allerdings ist zu bemerken, dass der Wärmeverlust in kalter Luft wesentlich geringer ist, als der in kaltem Wasser. Der Wärmeübergang in einem Wasserbad kann bei gleicher Temperaturdifferenz das 200fache des Wärmeübergangs in einem Luftbad betragen.

### Anhang 3: Wärmeleitung

Wärmeleitung findet innerhalb fester Körper statt oder zwischen festen Körpern, die in direktem Berührungskontakt stehen. Beispiele: Hand/Wand, Fuß/Fußboden, Haut/Kleidung, natürlich aber auch innerhalb von Bauteilen oder Ofenwänden

Die Größe einer durch Wärmeleitung pro Zeiteinheit übertragenen Wärmemenge  $Q/t$  hängt von der Temperaturdifferenz  $T_1-T_2$ , der Durchtrittsfläche  $S$ , der Schichtdicke  $d$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ab.

$$Q/t = \lambda \cdot S \cdot (T_1 - T_2)/d \quad [W/m^2 K]$$

Die Größe der Wärmeleitfähigkeit ist bei verschiedenen Materialien sehr unterschiedlich. Ihre Größe hängt bei Baustoffen hauptsächlich von ihrem Gehalt an Luft ab, die in Kapillaren oder Poren eingeschlossen ist.

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Korkdämmstoff	0,045 bis 0,055
Holz	0,130 bis 0,200
Fensterglas	0,80
Wandfliesen, Steinzeugplatten	1,0
Normalbeton	2,10
Chromnickelstahl 18/8 V2A	15
Gusseisen, Stahl	50,0 bis 60,0
Aluminium	200
Kupfer	370

Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Baumaterialien

#### Praktische Beispiele

- In Bauteilen: Wände, Zwischendecken, Fußboden, Dächer, Fundamente

### Anhang 4 : Kontakttemperaturen

Gegenstände fühlen sich unterschiedlich warm oder kalt an. Ihre Temperatur muss sich deswegen nicht unterscheiden.

Die Kontakttemperatur ist für Wärmeansprüche gegenüber der Inneneinrichtung eine wichtige Kenngröße.

Die Kontakttemperatur  $t_k$  hängt von der Hauttemperatur  $t_H$ , der Temperatur des berührten Materials  $t_M$  und den Wärmeeindringzahl  $b_H$  und  $b_M$  ab, die wie folgt definiert sind:

$$b = \frac{c}{\lambda}$$

worin

$\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit

$\rho$  die Dichte und

$c$  die spezifische Wärme sind.

Dieser Formel ist schon qualitativ anzusehen, worum es geht. Von der Wärmeleitfähigkeit hängt es ab, wie schnell Wärme aus der Tiefe des berührten Materials nachgeliefert bzw. dort hineingeleitet werden kann, die Dichte und die spez. Wärmekapazität bestimmen den Wärmevorrat pro Masseinheit, der für diesen Transportvorgang zur Verfügung steht.

Fußbodenbelag ohne Oberflächenbehandlung	Wärmeeindringkoeffizienten $b$ [J/s0,5*m2*K]	Komfortbereich der Fußbodentemperatur (°C)	obere Schmerzgrenze (°C)	untere Schmerzgrenze (°C)
Stahl	14000	29-32	14	45
Beton	1800-2200,2400	27-32	4	54
Linoleum,Gummi	600	24-35	-12	67
Eichenholz		22-35	-20	74
Kiefernholz	400-500,500-650	17-39	-53	84
Kork	100, 160-240	5-42	-140	150

Kontakttemperaturen bei Berührung verschiedener Materialien; Komforttemperaturen aus Fanger, Thermal Comfort 1970, Wärmeeindringzahlen aus ??

Aus den Eigenschaften der Haut und des berührten Materials bestimmt sich ein Wärmestrom, dessen Dichte psychophysisch als „Temperatur“ im Sinne von „warm“ und „kalt“ empfunden wird. Aus dem Wärmestrom resultiert eine Temperatur an der Berührungsfläche, die Kontakttemperatur, die zwischen Hauttemperatur und Materialtemperatur liegt.

Praktische Beispiele für das Auftreten von Kontakttemperaturen in Innenräumen:

Hand	Gesäß, Rücken	Füße
Türklinken	Sitzgelegenheiten	Fußbodenbeläge
Lichtschalter	Badewannen	Teppiche
Tischplatten	Waschbecken	Duschtassen
Handläufe	Bidets	
Fensterbeschläge	Klobrillen	

Kontakttemperaturen sollten Gestaltungselement bei der Einrichtung von Innenräumen sein! Sollten sie dabei innerhalb eines behaglich empfundenen Bereichs liegen? Nicht unbedingt, bei kurzzeitig berührten Gegenständen wie Türklinken hat der kleine Kältereiz Signalcharakter.

## Anhang 5: Konvektion

Der Wärmeaustausch mit flüssigen und gasförmigen Medien und der Wärmetransport innerhalb solcher Medien beruht auf Konvektion

Flüssige und gasförmige Stoffe beginnen sich innerlich d.h. lokal zu bewegen, wenn ihre Temperatur sich lokal ändert, weil Wärme auf sie übertragen wurde (oder weil sich die lokale Temperatur durch chemische oder radioaktive Vorgänge innerhalb der Flüssigkeit ändert).

Ablauf: Das flüssige oder gasförmige Medium wird an einem warmen Körper erwärmt, dehnt sich aus, seine Dichte verringert sich, dadurch erhält es Auftrieb gegenüber dem umgebenden Medium, steigt auf, fließt zu kühlem Körper, kühlt an diesem ab, gibt Wärme an kühlen Körper ab, zieht sich dabei zusammen, seine Dichte erhöht sich, es sinkt ab, fließt wieder zu warmem Körper, und so weiter ... Wärme wird auf diese Weise durch die wärmetragende Substanz transportiert, eventuell auch infolge Umwälzung des Mediums.

Von dieser soeben beschriebenen freien Konvektion unterscheidet man erzwungene Konvektion, bei der die lokale Bewegung des Mediums nicht nur vom lokalen Wärmeeintrag herrührt (Wind-, Flüssigkeitsströmung).

A ist die Oberfläche eines festen Körpers, der im Wärmeaustausch mit der Luft oder in einer Kühl-/Heizflüssigkeit steht.

$$Q = A \cdot T \quad [\text{J/m}^2 \text{ K}]$$

...Wärmeübergangszahl

A ...Oberfläche [ $\text{m}^2$ ]

T ... Temperaturdifferenz

Entscheidend ist hier der Wert der Wärmeübergangszahl .

hängt ab

- von den beteiligten Materialien
- von der Oberfläche (glatt, rau, strukturiert?)
- von der Orientierung im Raum (Wand, Fußboden oder Decke: senkrecht, waagrecht (Luft oberhalb), waagrecht (Luft unterhalb)).
- von der Geometrie (Oberflächenkrümmung. Konkav: Konvektion erhöht, konvex: Konvektion behindert)
- von der Geschwindigkeit des bewegten Mediums
- von der Wegstrecke in vertikaler Richtung (das aufsteigende oder fallende Medium gewinnt „Schwung“ : Übergang zu erzwungener Konvektion!)
- von der Luftfeuchte
- von der Temperatur

### Praktische Beispiele

Konvektion tritt in umbauten Räumen auf

- als unerwünschter Luftzug
- als Ursache dafür, dass sich von der Heizung erwärmte Luft als Polster oder Walze unter der Decke sammelt. Bei nicht gut abgetrennten Treppenhäusern stellt sich derselbe Effekt in verschiedenen Stockwerken ein.

## Anhang 6: Wärmestrahlung

Durch Wärmestrahlung wird Wärme von Festkörpern und Flüssigkeiten (sowie manchen Gasen) auf Festkörper und Flüssigkeiten übertragen, zwischen denen sich der luftleere Raum (Sonne – Erde) oder für die betreffende Strahlung transparente Medien (Luftschichten, Flüssigkeiten) befinden.

Jedes Medium sendet elektromagnetische Strahlung gemäß seiner Temperatur aus. Ihre Wellenlänge liegt bei den im Wohnbereich üblichen Temperaturen (< 100°C) im Ultrarotbereich (Infrarot). Strahlung in diesem Wellenlängenbereich ist nicht sichtbar aber als Wärme fühlbar.

Wärmestrahlung hat mit sichtbarem Licht einige Eigenschaften gemeinsam:

Wärmestrahlung

- durchdringt wie sichtbares Licht den luftleeren Raum (Thermosflaschen sind verspiegelt, damit das Emissions- und Absorptionsvermögen der Flaschenwände verringert ist).
- kann reflektiert und damit gespiegelt werden
- wird aber auch absorbiert (Erwärmung von bestrahlten Gegenständen)
- breitet sich geradlinig aus (nicht um die Ecke, im Unterschied zum konvektiven und leitenden Wärmetransport. Dies gilt jedenfalls bei den hier interessierenden Bedingungen: in kosmischen Dimensionen wird auch IR-Strahlung durch Massenanziehung abgelenkt und an Kanten gebeugt).
- wirft Schatten (z.B. Deckenstrahlungsheizungen können kalte Füße unter Schreibtischen bedingen).

Unterschiedlich verhalten sich die meisten Stoffe gegenüber sichtbarem Licht und Wärmestrahlung: Das von einer Lampe ausgehende sichtbare Licht wird an allen Oberflächen mehr oder weniger gut reflektiert. Jede beleuchtete Fläche im Raum wird dadurch zu einer sekundären (in der Folge tertiären usw.) Lichtquelle. Unsere Augen sehen eine beleuchtete Welt.

Im Infrarotbereich der Wärmestrahlung verhalten sich dagegen fast alle nichtmetallischen Oberflächen wie schwarze Körper. Sie absorbieren praktisch alle auftreffende Strahlung. Dabei erwärmen sie sich in unterschiedlichem Ausmaß. Ein infrarotempfindliches Auge würde sie selbstleuchten sehen. Sie „leuchten“ und nach Absorption von Strahlung (der Sonne, des Heizkörpers, des menschlichen Körpers) ändern sie „Helligkeit“ und „Farbe“. Auf diese Weise werden sie auch zu sekundären, tertiären usw. „Lichtquellen“ aber zu selbstleuchtenden, nicht reflektierenden.

Nun einige Gesetze der Wärmestrahlung

$$Q = \sigma \cdot H \cdot W \cdot (T_H^4 - T_W^4) \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{K}^4] \quad \text{Stefan Boltzmann-Gesetz}$$

— ... Stefan Boltzmann-Konstante universelle Strahlungskonstante;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$   
H,W ... Emissions/Absorptionszahlen von Haut, Wand; abhängig von der Wellenlänge der Strahlung  
T<sub>H</sub>, T<sub>W</sub> ... absolute Temperaturen von Haut, Wand [K]

Die Zunahme des Strahlungswärmestroms mit der 4. Potenz der absoluten Temperatur ist signifikant. Sie bedeutet, dass die abgestrahlte Energie extrem mit Temperaturänderungen schwankt.

Beispiel: Lösungen der Stefan-Boltzmann-Gleichung für verschiedene Oberflächentemperaturen eines Heizkörpers; angegeben ist die absolute Strahlungsleistung sowie die Netto-Strahlungsleistung nach Abzug der Rückstrahlung eines Raumes mit einer Oberflächen-Temperatur von 20°C.

Oberflächentemperatur eines Heizkörpers (°C)	absolute Strahlungsleistung des Heizkörpers (W/m²)	Netto-Strahlungsleistung eines Heizkörpers (W/m²) bei 20°C Raumoberflächentemperatur
20	419	0
30	479	60
40	545	126
50	618	199
60	698	279
70	786	367
80	882	463
90	986	567
100	1099	680

Die Strahlungsenergie einer punktförmigen Strahlungsquelle breitet sich kugelförmig aus. Sie wird also in einen Raumwinkel  $4\pi$  abgegeben. Je größer der Abstand einer absorbierenden Fläche von der Strahlungsquelle, je größer also der Radius der Kugel, desto größer die Kugeloberfläche und die „Verdünnung“ des Strahlungsstromes.

$$R = Q/4\pi r^2$$

Die auf eine absorbierende Fläche einfallende Energie (die Immission) ist also sehr sensibel von ihrem Abstand von der Strahlungsquelle abhängig.

Zum Beispiel: In 7 m Abstand verteilt sich die abgestrahlte Energie bereits auf eine gedachte Oberfläche von 616 m²:

$$4\pi r^2 = 4\pi \cdot 7^2 = 616 \text{ m}^2$$

bei 160 W Abstrahlung des ruhenden menschlichen Körpers entspricht dies

$$160/616 = 0,26 \text{ W/m}^2$$

Entsprechend geringere Werte werden von der nur 20°C warmen Wand abgestrahlt.

Die einfallende Strahlung hängt auch vom Winkel zwischen Strahlungsquelle und absorbierender Fläche ab. Dies wird durch das Lambert-Gesetz (Kosinus-Gesetz) beschrieben.

$$dI(\theta) = B_0 dS \cos \theta$$

Jeder Punkt der strahlenden Fläche  $dS$  strahlt mit einer Leuchtdichte  $B_0$  in den Raumwinkel  $4\pi$  ab. Die Lichtstärke  $dI$  einer strahlenden Fläche hängt dann von ihrer scheinbaren Größe, mithin vom Kosinus des Betrachtungswinkels  $\theta$  ab. Ein Blatt Papier z.B. ist unter jedem Winkel betrachtet gleich hell, aber nicht gleich groß.

Jetzt können wir die Strahlungstemperatur verstehen:

„Die mittlere Strahlungstemperatur (°C) ist definiert als jene einheitliche Temperatur eines schwarzen Hohlraums, bei der eine gegebene Person, die sich an einem gegebenen Ort in einer gegebenen Körperstellung und in einer gegebenen Kleidung aufhält, denselben Wärmeverlust durch Strahlung erleiden würde, wie in dem tatsächlichen Innenraum, in dem sie sich befindet. (P.O. Fanger 1974, übers. v. Verf.)“  
Messungen lassen sich trotz der komplizierten physikalischen Beziehungen einfach durchführen. Ein

Thermometer in einem geschwärzten Luftballon integriert die Strahlungstemperaturen über den gesamten Raumwinkel  $4\pi$  – ganz ohne Rechenaufwand!

#### Praktische Beispiele:

- Sonneneinstrahlung
- Strahlungszug, auch an dichten Fenstern
- Kachel- oder andere Strahlungsöfen
- therapeutische Wärmestrahler

### Anhang 7: Kondensation und Verdunstung

Zur Verdunstung von Wasser müssen 2256 kJ Wärmeenergie pro Liter aufgewendet werden – wohlge-merkt zusätzlich zur Wärme, die das Wasser erwärmt. Derselbe Betrag Wärmeenergie wird frei, wenn Wasserdampf kondensiert (ohne die Wärme, die das Wasser bei seiner Abkühlung abgibt).

Die menschliche Physiologie macht sich diesen Umstand zunutze. Durch die Verdunstung von relativ ge-ringen Mengen Schweiß lassen sich bereits große Wärmemengen abführen.

Ein Rechenbeispiel dazu: die Wärmeproduktion eines erwachsenen Menschen in Ruhe beträgt etwa 160 W (das entspricht pro Sekunde 160 Js oder 160 J).

Daraus errechnet sich:

Die Wärmeproduktion von 14 Sekunden wird benötigt um 1g Wasser zu verdunsten

Die Wärmeproduktion von 3,9 Stunden wird benötigt um 1 l Wasser zu verdunsten.

Die Verdunstungsrate und damit der Wärmeumsatz durch Kondensation und Verdunstung hängt von den Temperaturen der Haut und der Luft sowie den Wasserdampfpartialdrücken ab

$$Q = b (p_H - p_L) \quad [J/m^2 K] \quad [\text{Dimension klären: Kelvin?}]$$

$b$  ... Verdunstungszahl; hängt ab von der Oberflächenkrümmung und der Wurzel aus der Windgeschwindigkeit.

$p_H - p_L$  ... Differenz der Dampfdrücke der Haut bzw. der Luft, hängt jeweils von der Tempera-tur (der Haut, der Luft) und dem Feuchtigkeitsgehalt (der Haut, der Luft) ab.

Von der Differenz der Dampfdrücke hängt es ab, ob und in welchem Ausmaß Feuchtigkeit verdunstet oder kondensiert.

#### Praxisbeispiele:

- Badezimmer, nasse Haut: unwillkommene Abkühlung durch Verdunstung, wird gestoppt durch Abtrocknen.
- Schwitzen bei starker körperlicher Aktivität: willkommene Abkühlung.

### Anhang 8: Rolle des Feuchtedurchgangswiderstands von Kleidung

Über die Haut wird nicht nur Wärme sondern auch Feuchtigkeit, d.h. Wasserdampf abgegeben und zwar nicht nur beim eigentlichen Schwitzen, sondern auch in Ruhe. Die Haut ist nämlich nicht „dampf-dicht“, es verdunstet also ständig Feuchtigkeit aus tieferliegenden Hautschichten („insensible Transpi-ration“). Auf diese Weise bildet sich in den Schichten zwischen Haut und Kleidung eine warme und feuch-te Luftschicht, „tropische Verhältnisse“.

Durch einen hohen Feuchtedurchgangswiderstand erreicht die Luftschicht bald die Sättigungsfeuchte, eine weitere Verdunstung ist dann nicht mehr möglich. Vielmehr kondensiert die Feuchtigkeit in den

nach außen immer kühleren Textilschichten, die feucht werden und dabei ihren Wärmedurchgangswiderstand vermindern.

Keht der Körper nach einer Phase hoher Aktivität zur Ruhe zurück, wird die Wärmeproduktion geringer. Nun ist der Körper wieder auf vermehrten Wärmeschutz angewiesen, erhält aber einen verminderten Wärmeschutz durch die feucht gewordene Kleidung. Der Körper muss diese Feuchtigkeit aufwärmen, die nach und nach verdunstet die dafür zusätzlich notwendige Verdunstungswärme aufbringen. Die Entwicklung von Bekleidungstextilien geht daher dahin, den Feuchtedurchgangswiderstand zu minimieren.

### **Anhang 9: Bemerkungen zu Fieber**

Fieber wird als Sollwertverstellung beschrieben. Damit wird ausgedrückt, dass nicht etwa das Temperaturregelungssystem von einer ohne sein Zutun hervorgerufenen Wärmeentwicklung überrumpelt wird, sondern dass die fieberauslösenden Vorgänge an der Temperaturregulation ansetzen. Der „Sollwert“ wird verstellt. Die Regulation meldet, die Körpertemperatur ist zu niedrig und kurbelt damit die Wärmeproduktion an. Folgerichtig frieren wir, wenn wir Fieber bekommen und schwitzen, wenn das Fieber wieder abklingt.

Bemerkenswert ist aber, dass sich bei der Wärmewahrnehmung der Maßstab für „warm“ oder „kalt“ nicht ändert. Der Fieberkranke spürt jederzeit, dass er ungewöhnlich warm ist, „glüht“. Die Empfindung ist praktisch identisch mit der, von außen bestrahlt zu werden.

### **Anhang 10: Kurmedizin**

Unter welchen Umständen und warum sind Reize für die Aufrechterhaltung der Gesundheit des Menschen förderlich und unter welchen Umständen sind sie schädlich? Wodurch können förderliche Reize gesetzt werden: mechanisch, chemisch, radioaktiv, durch Licht, Geräusche, Klima, Diät, Sport, Änderung der zeitlichen Abfolge der Lebensvorgänge beim geregelten Ablauf des Kurbetriebs?

Die Wichtigkeit der Regulationsmedizin für die Fragestellung dieser Studie steht im Kontrast zu ihrer Verborgenheit: Vom umfangreichsten Handbuch der Balneologie (Bäderheilkunde) und Klimaheilkunde im deutschen Sprachraum: Amelung und Hildebrandt 1985 ist ein einziges Exemplar im Zentralverzeichnis der öffentlichen Bibliotheken Österreichs (<http://magnum.bibvb.ac.at>) verzeichnet!

Die Bedeutung dieses Werkes ergibt sich, wenn man zum Vergleich neuere Lehrbücher der Physiologie (wie Schmidt und Thews 1995) heranzieht. Dort zeigt sich die Tendenz, den menschlichen Organismus vorwiegend hinsichtlich seiner Leistungsgrenzen zu betrachten. Es wird, salopp gesprochen, folgendes Bild vermittelt: Es gibt Intensitäts- oder Dosisbereiche von Umweltreizen, die der (gesunde) Mensch relativ problemlos aushält. Dafür braucht man keinen Arzt, folglich schweigen die modernen Lehrbücher darüber. Weitere Bereiche können durch Selbstreparatur (Erholung, Heilung) und medizinische Interventionen beherrscht werden. Dann gibt es Grenzen der Beanspruchbarkeit, die beachtet werden müssen, z.B. in der Sport- und Arbeitsmedizin. Adaptation ist erst ein Thema, wenn es darum geht, zu zeigen, warum Reinhold Messner (als Adaptierter) in der Lage ist, ohne Sauerstoff in 8000 m Höhe zu steigen, eine Höhe, die für Unadaptierte tödlich ist.

Die Kurortmedizin und andere Formen der Regulationsmedizin, die gerade von ungefährlichen Reizstärken und ihrer Bedeutung für Gesundheit und Wohlbefinden handeln, stehen im Schatten der wissenschaftlichen Aufmerksamkeit. Sie verfügen über einen großen, in vielen Jahrzehnten gewachsenen Erfahrungsschatz, den sie auch (dies ist die Leistung von Amelung und Hildebrandt) mit den Ergebnissen der modernen Neurologie in Verbindung bringen können. Ein wirklich griffiges wissenschaftliches Instrumentarium zur Beherrschung dieses Gebiets ist aber noch ungenügend entwickelt.

## Anhang 11: Langfristige Anpassungsvorgänge an die Umgebungsbedingungen

Hitzeakklimatisation besteht darin, dass 1. der Körper lernt, die Schweißmenge, die pro Grad Rektaltemperatur und Zeiteinheit abgesondert werden kann, auf nahezu das Doppelte zu steigern, 2. der Schweiß gleichmäßiger abgesondert wird, sodass die Haut nicht nass wird, 3. die Elektrolytkonzentration sich von 0,3% auf 0,03% verringert, 4. die Anzahl aktiver Schweißdrüsen sich vermehrt (Hensel in Keidel 1985).

## Anhang 12: Die PMV-Gleichung und die PPD-Gleichung nach ISO 7730

Zu Ermittlung von PMV-Werten wird in ISO 7730 vorgeschlagen: a) die Lösung der nachstehenden Gleichung. Dazu ist ein Fortran IV-Programm in Anhang D beigelegt, b) die Benutzung der Tabelle im Anhang E von ISO 7730, c) durch direkte Messung mit einem integrierenden Messgerät.

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \left\{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6,9(M - W) - p_a] \right. \\ - 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) \\ \left. - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\}$$

mit

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \left\{ 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \times \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\} \\ h_c = \begin{cases} 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{für } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}} \\ 12,1\sqrt{v_{ar}} & \text{für } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \\ f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{für } I_{cl} < 0,078m^2 \text{ } ^\circ C / W \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{für } I_{cl} > 0,078m^2 \text{ } ^\circ C / W \end{cases}$$

mit

$PMV$  ist die vorausgesagte mittlere Wärmebeurteilung (predicted mean vote)

$M$  ist die Stoffwechselrate in Watt pro Quadratmeter Körperoberfläche [ $0,8 < met < 4,0$ ]

$W$  ist die externe Arbeit (mechanische Arbeit) in Watt pro Quadratmeter; sie ist gleich null für die meisten Aktivitäten.

$I_{cl}$  ist der thermische Widerstand der Kleidung in Quadratmetern mal Grad Celsius pro Watt [ $0 < clo < 2$ ]

$f_{cl}$  ist das Verhältnis der Körperoberfläche in bekleidetem zur Körperoberfläche im nackten Zustand.

$t_a$  ist die Lufttemperatur in Grad Celsius. [ $10 < t_a < 30$ ]

$\bar{t}_r$  ist die mittlere Strahlungstemperatur in Grad Celsius [ $10 < \bar{t}_r < 40$ ]

$v_{ar}$  ist die mittlere Luftgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde [ $0 < v_{ar} < 1$ ]

$p_a$  ist der Wasserdampfpartialdruck in Pascal [ $0 < p_a < 2700$ ]

$h_c$  ist der konvektive Wärmeübertragungskoeffizient in Watt pro Quadratmeter mal Grad Celsius.

$t_{cl}$  ist die Temperatur der Kleidungsoberfläche in Grad Celsius

Der Wertebereich für den die PMV-Gleichung gültige Ergebnisse liefert ist im Kapitel 13 angegeben.

Die PPD-Gleichung nach ISO 7730

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2)}$$

ISO 7730 enthält auch ein Diagramm in dem PMV-Werte gegen PPD-Werte aufgetragen sind. Aus diesem können PPD-Werte für jeden PMV-Wert direkt entnommen werden.

### Anhang 13: Asymmetrische Strahlungsverhältnisse

Ein Raum, die darin befindlichen Personen und Gegenstände und die durch Fensterausschnitte sichtbare Außenwelt stehen miteinander in einem ständigen Strahlungsaustausch. Die Asymmetrie dieser Strahlungsverhältnisse geht in die PMV-Gleichung nicht ein. Eine Arbeit von Fanger und Mitarbeitern (1985) ermittelte Komfortgrenzwerte für Strahlungsasymmetrien bei sitzenden Personen und Nieder-temperatur-Wärmequellen (Heißwasser-Radiatoren).

Die Versuchsanordnung sah verkürzt dargestellt so aus: Versuchspersonen saßen mit der linken Seite einem Heizkörper zugekehrt (Abstand 50 cm), dessen Temperatur variiert wurde. Die Temperatur der übrigen raumumschließenden Flächen (Klimakammer) und der Luft wurden gleich gehalten und gemeinsam so variiert, dass für die Versuchspersonen gemäß eigenen Angaben thermischer Komfort bestand.

Period	Air temp. (°C)		Panel temp. (°C)		Radiant temp.	Sensation (%)	Discomfort (%)		
					asymmetry (°C)	total	left	right	total
1	23,1 ±	2,0	23,2 ±	2,0	-0,2	-	-	-	-
2	21,9 ±	1,9	32,6 ±	2,0	6,6	50,0	0,0	0	0
3	20,7 ±	1,9	42,0 ±	1,9	13,3	75,0	0,0	6,3	6,3
4	19,3 ±	1,6	51,6 ±	1,6	20,7	87,5	6,3	6,3	12,5
5	17,9 ±	1,8	61,1 ±	1,8	28,0	87,5	6,3	0	6,3
6	16,7 ±	1,8	70,1 ±	3,3	35,1	93,8	6,3	6,3	12,5

Wirkung asymmetrischer Strahlungsfelder (warme Wand) bei thermischem Komfort (angepasste Lufttemperatur) auf Wärmewahrnehmung und Wärmekomfort (nach Fanger et al.1985, verändert).

Die vorhergehende Tabelle zeigt ansteigende Temperaturen des Heizkörpers von einem Anfangswert von 23,2°C auf 70,1°C. Die Lufttemperatur (= Temperatur der übrigen raumumschließenden Oberflächen) wird entsprechend von einem Anfangswert von 23,1°C auf 16,7°C herabgeregelt. Bereits bei einer Strahlungstemperatur-Asymmetrie von 6,6°C bemerken 50% der Versuchsteilnehmer die Wärmestrahlung (Spalte „Sensation“). Dieser Wert steigt auf 93,8%. Diskomfort tritt erst bei 13,3°C und zwar zunächst als unangenehme Kälteempfindung an der dem Heizkörper abgewandten Seite auf. Später treten unangenehme Wärmeempfindungen an der dem Heizkörper zugewandten Seite hinzu.

Wenn von den Autoren gemäß dem 5%-PPD-Minimum von ISO 7730 auch eine Strahlungstemperatur-Asymmetrie von 23°C als maximaler mit thermischem Komfort zu vereinbarender Wert herausgestellt wird (errechnet aus der Ausgleichskurve durch die Werte der Spalte „Discomfort, total“), so ist doch nicht zu übersehen, dass auch bei 35°C Asymmetrie, d.h. bei einer Heizkörpertemperatur von 70 ± 3°C und einer korrespondierenden Lufttemperatur von 17 ± 2°C noch 87,5% der Versuchspersonen „zufrieden“ waren.

Strahlungsasymmetrie infolge einer warmen Wand wurde bei wesentlich geringeren Temperaturdifferenzen bereits empfunden, aber bei wesentlich höheren Temperaturdifferenzen erst als unangenehm

empfunden als es bei den parallel durchgeführten Versuchsanordnungen kalte Wand, kalte Decke und warme Decke der Fall war.

akzeptable Differenz zur Lufttemperatur (K); 5% Unzufriedene		
Warme Wand	23	
Kalte Wand	10	(auch Grenzwert in ISO 7730)
Warme Decke (Plafond)	4	(ISO 7730: 5 K)

Fanger et al. weisen darauf hin, dass ihre Ergebnisse nicht gelten für:

- andere als die von ihnen untersuchten Expositionswinkel 0,25 für die Wand, 0,20 für die Decke (für den Fall kalte Wand wird eine Kurve angegeben)
- für Personen mit höherer körperlicher Aktivität als „sitzend“
- für thermische Umgebungen, die generell zu warm oder zu kalt sind
- für Asymmetrien infolge kurzweiliger Strahlung von Infrarotstrahlern oder Sonnenlicht

## Anhang 14: Luftturbulenzen

Die PMV-Gleichungen berücksichtigen die mittlere Luftgeschwindigkeit, aber nicht die Turbulenz der Luftbewegung. Frank et al. (NEFF-Projekt 357) zitieren Ergebnisse von Fanger et al. (1988), die die Turbulenz zusätzlich berücksichtigen. Die Berechnungsformel ersetzt nicht den Ausdruck für die Luftgeschwindigkeit in der PMV-Formel, sondern modifiziert sie. Sie wird als „zusätzliche Anforderung an den Raum“ charakterisiert

wo

$$PD = 3,143 \times (34 - t_i) \times (\bar{v} - 0,05)^{0,6223} + 0,3696 \times \bar{v} \times TU \times (34 - t_i) \times (\bar{v} - 0,05)^{0,6223}$$

wenn  $\bar{v} < 0,05 \text{ m/s}$  :  $\bar{v} = 0,05 \text{ m/s}$

wenn  $PD > 100\%$  :  $PD = 100\%$

$PD$  Prozentsatz Unzufriedener durch Zugluft [%]

$t_i$  Raumlufttemperatur [°C]

$\bar{v}$  mittlere Luftgeschwindigkeit [m/s]

$TU$  Turbulenzintensität [%],  $TU = sv / \bar{v} \cdot 100$

$sv$  Standardabweichung [m/s]

## Anhang 15: Endlich Zufriedene und Noch Zufriedene

Ein wenig beachtetes Nebenergebnis der Fangerschen Untersuchungen betrifft den inversen Wert von PPD, d.h. den „Prozentsatz der Zufriedenen“. Unter thermischen Verhältnissen, unter denen der PMV bei +2 oder -2 (zu kalt, zu warm) liegt und mit 80% Unzufriedenen zu rechnen ist, sind also folglich 20% noch zufrieden oder endlich zufrieden.

Was nicht dasselbe ist: „Noch Zufriedene“ besitzen ein leistungsfähigeres Wärmeregulationssystem als schon Unzufriedene, aber durchaus dieselben Vorzugstemperaturen. Dies haben Versuche von Fanger mit dänischen Winterschwimmern ergeben (Fanger 1977). Das Wärmeregulationssystem ist trainierbar. (vgl. z.B. Schmid/Thews 1995, S. 667).

„Endlich Zufriedene“ haben eine andere Vorzugstemperatur als ihre unzufriedenen Mitmenschen, aber nicht notwendigerweise ein leistungsfähigeres Wärmeregulationssystem. Diese Situation kann bei Fehlfunktion der Schilddrüse auftreten, von der der Grundumsatz beeinflusst wird (Schmid/Thews 1995, S. 644).

## Anhang 16: Orientierung durch Strahlungsheizungen

Kaindl (1996) verglich das Raumklima in einem Raum, der abwechselnd mit einem Heizkörper und mit einem Kachelofen mit gleicher Heizleistung beheizt wurde. Die Unterschiede der meisten gemessenen Größen zeigten sich als relativ gering, nämlich

- Lufttemperaturen ( $< 1^\circ\text{C}$ )
- vertikaler Temperaturgradient der Raumluft ( $< 0,5^\circ\text{C}$ )
- Wandtemperaturen ( $< 1^\circ\text{C}$ )
- mittlere Strahlungstemperaturen ( $1,1^\circ\text{C}$ )
- rel. Luftfeuchte („kein signifikanter Unterschied“)

Der Einfluss der beiden Heizsysteme auf das Raumklima waren in diesen Punkten nicht gut zu differenzieren. Sehr deutliche Differenzen zeigten sich in den Punkten

- mittlere Luftgeschwindigkeit 50 cm über dem Heizkörper bzw. den Kachelofen (Faktor 2)
- Verlauf der Isolinien der Strahlungstemperatur

Auf letztere soll nun eingegangen werden.

Bild 1 und Bild 2: Mittlere Strahlungstemperatur – Schnitt durch Messraum in einer Höhe von 1,5 m

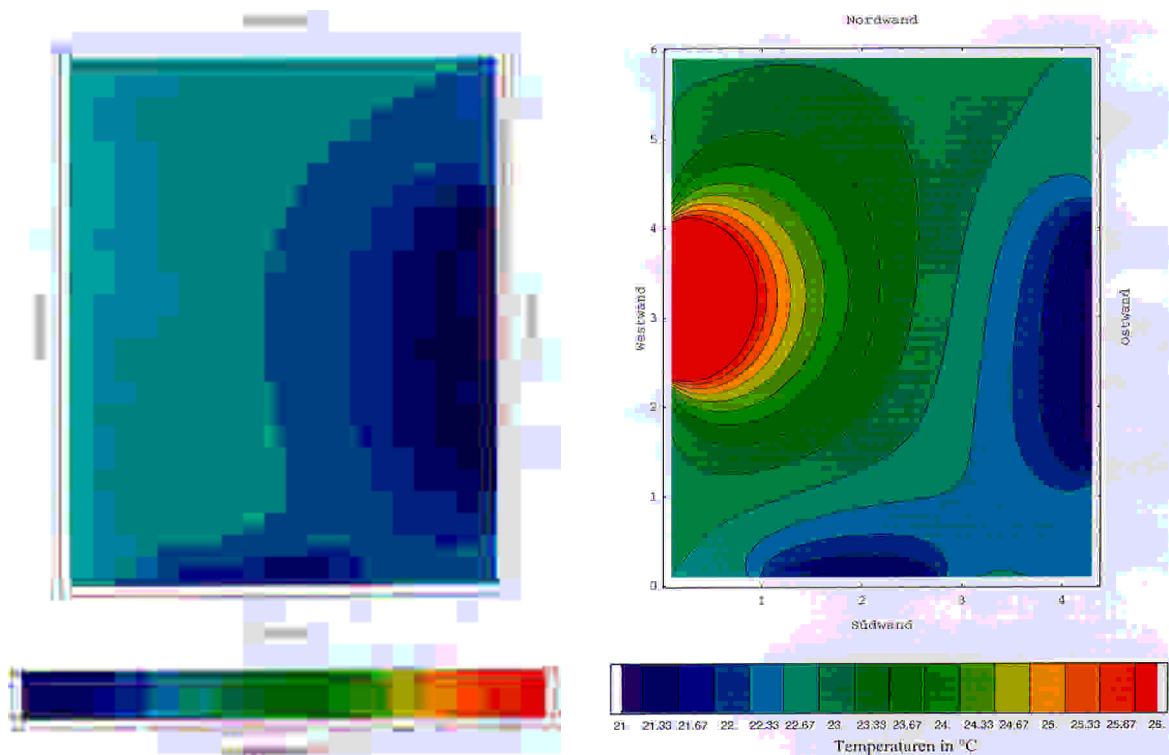


Bild 1: mit Heizkörper (an Südwand) beheizt

Bild 2: mit Kachelofen (an Westwand) beheizt

Bei Beheizung des Versuchsraums mittels Heizkörper (Bild 1) bestimmen die Fenster an der Süd- und Westwand das gesamte Strahlungsfeld, wenn man als Maß für „Bestimmen“ zugrunde legt, dass die Isolinien sich noch um die Fenster als Zentrum krümmen, und dieser Einfluss ist bedeutend stärker als bei Kachelofenbeheizung (Bild 2): Die durch die Fenster bestimmten Isolinien greifen weiter in den Raum hinein (2,4 m gegenüber 0,8 m für die  $22^\circ\text{C}$  -Linie bei Heizkörper- bzw. Kachelofenbeheizung).

Der Kachelofen baut eine Strahlungstemperaturzonierung über  $3^\circ\text{C}$  in einem Bereich von ca. 3 m um den Ofen auf und setzt damit dem thermischen Einfluss der Fenster seinen eigenen entgegen (Bipolarität). Bei Heizkörperbeheizung ist die Strahlungstemperatur in größerem Abstand von den Fenstern homogen. Die Fenster sind der einzige thermische „Akteur“. Die Situation ist unipolar.

Bild 3 und Bild 4: Mittlere Strahlungstemperatur – Schnitt durch Messraum in einer Höhe von 0,8 m

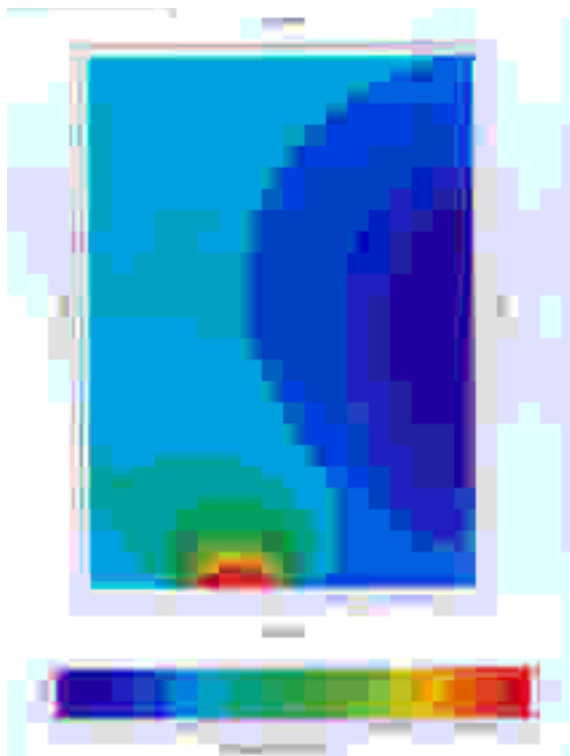


Bild 3: mit Heizkörper (an Südwand) beheizt

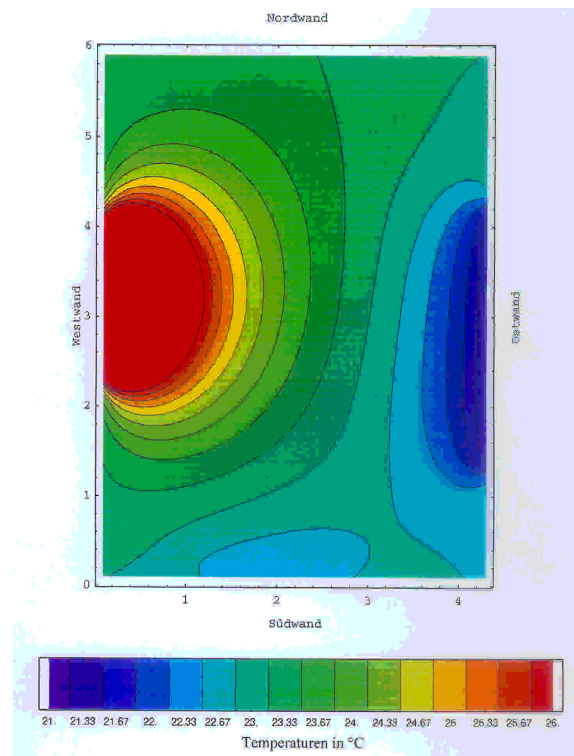


Bild 4: mit Kachelofen (an Westwand) beheizt

Der Schnitt in niedrigerer Raumhöhe dient der Darstellung des thermischen Einflusses des Heizkörpers, der in 1,5 m Höhe (Bild 1,2) überhaupt nicht mehr sichtbar ist. Indirekt zeigt er sich an den im Vergleich zum Ostfenster zurückgedrängten Isolinien des Südfensters, das sich oberhalb des Heizkörpers befindet. Unter dem Einfluss des 3 m entfernten Kachelofens sind die Isolinien des Südfensters aber (wie schon oben festgestellt) noch wesentlich stärker zurückgedrängt.

Das Vorstehende ist eine vorwiegend qualitative Betrachtung der thermischen Situation im Versuchsraum. Selbstverständlich kommt es nicht nur auf die Form der Isolinien an, sondern auch auf die Strahlungstemperaturdifferenzen, die sie repräsentieren. Diese Strahlungstemperaturdifferenzen sind daraufhin zu untersuchen, ob sie wahrnehmbar sind (Überschreiten der Unterschiedsschwelle des Wärmesinns an Händen und Gesicht). Dazu Anhang 17.

### Anhang 17: Die Wahrnehmungsschwelle des Menschen beim Strahlungsaustausch

Die Unterschiedsschwelle der Hauttemperatur für thermische Reize beträgt etwa  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wenn die Hauttemperaturänderung rasch genug ( $> 6\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$  oder  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{s}$ ) erfolgt und die Ausgangstemperatur der Haut im Neutralbereich liegt ( $31\text{--}36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) vgl. Schmidt/Thews 1980, S. 240. Wohlgermerkt sind hierbei Hauttemperaturen gemeint und nicht Strahlungstemperaturen! Der Unterschied liegt darin, dass

- eine Strahlungstemperaturänderung zwar eine Hauttemperaturänderung bewirkt, deren Größe aber nicht bekannt ist (keine Angaben in Physiologie-Lehrbüchern).
- eine Strahlungstemperaturänderung erst nach einiger Zeit eine Temperaturänderung der Haut verursacht. Diese Zeitspanne dürfte (nach der Alltagserfahrung. Beispiel: Handrücken in den Lichtkegel einer Glühbirne führen) sehr kurz ( $< 1\text{ s}$ ) sein.

Schlüter hat in einer älteren Arbeit (1969) die „Wahrnehmungsschwelle des Menschen beim Strah-

lungsaustausch mit unterschiedlich temperierten Wandflächen“ ermittelt. Demzufolge wird die Unterschiedsschwelle im Gesicht und an den Knien (mit Schienbein) bei thermischem Komfort bereits bei 2–3°C Temperaturunterschied von gegenüberliegenden Wandflächen erreicht (bzw. von Wandflächen, denen sich die auf einem Drehstuhl sitzenden Personen nacheinander zuwendeten). Dies entspricht einer Differenz der Wärmeabgaben der betrachteten Körperstellen von

	mW/cm <sup>2</sup>
Gesicht	1,31
Knie und Schienbein	1,59

## Literatur

- Alexander, Christopher; Ishikawa, Sara; Silverstein, Murray; Jacobson, Max; Fiksdahl-King, Ingrid; Angel, Shlomo: A Pattern Language. New York: Oxford Univ. Press 1977, dt.: Eine Mustersprache. Czech, Hermann (Hg.). Wien: Löcker 1995
- Amelung, W.; Hildebrandt, G. (Hg.): Balneologie und medizinische Klimatologie (3 Bde.) Berlin: Springer 1985
- Aschoff, J.; B. Günther; K. Kramer: Energiehaushalt und Temperaturregulation. Gauer, Kramer, Jung (Hrsg): Physiologie des Menschen, Bd. 2 Wien: Urban und Schwarzenberg 1971
- Bachelard, Gaston: Die Psychoanalyse des Feuers. Gallimard 1938 (frz.) Ullstein 1959 (dt)
- Benzinger, T.H.: The Physiological Basis for Thermal Comfort. INDOOR CLIMATE, Danish Building Research Institute, Copenhagen, S.441–474 (1979)
- Brengelmann, G. L.: Body Temperature Regulation. In: Patton, Fuchs et. al.: Textbook of Physiology, vol. 2, 21st ed. Saunders 1989
- CEPHEUS siehe Krapmeier et al.
- Krapmeier, Helmut; Drössler, Eckart: CEPHEUS – Wohnkomfort ohne Heizung – Living comfort without heating. Fotografien: Ignacio Martinez, Übersetzung: Pedro M. Lopez. Wien, New York: Springer 2001
- De Dear, R.J. et al.: Impact of air humidity on thermal comfort during step changes. Final Report ASHRAE 503 - RP. Laboratory of heating and air conditioning, Technical University of Denmark, June 1988
- Fanger, P.O. et al.: Comfort limits for heated ceilings. ASHRAE Trans. 86, (2) (1980) 141-156
- Fanger, P.O.: Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. USA: McGraw-Hill 1972
- Fanger, P.O.; Melikov, A.H.; Hanzawa, H.; Ring, J.: Air turbulence and the sensation of draught. Energy and Buildings (1988) H. 12, 21-39
- Fanger, P.O.; Valbjørn, O. (Hrsg.): Indoor Climate. Danish Building Research Institute, Kopenhagen 1979
- Fanger, P.O. et al.: Comfort limits for asymmetric thermal radiation. Energy-and-Buildings 8 (1985) S.225-235
- Fanger, P.O.: Radiation and Discomfort. ASHRAE Journal February 1986, S. 33
- Flemming, H.-C.: annäherung (Gedichte).Stuttgart : Eigenverlag 1982 ISBN 3-9800-564-0-6
- Frank, et al.: siehe NEFF-Projekt 357
- Goebel, W.; M. Glöckler: Kindersprechstunde, 6. Aufl.. Stuttgart: Urachhaus 1987
- Grivel, F.; Candas, V.: Ambient temperatures preferred by young European males and females at rest. Ergonomics, 1991, Vol. 34, No. 3, 365–378
- Hensel, H.: Allgemeine Sinnesphysiologie. In: Keidel, W.-D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 6. Aufl. Stuttgart; New York: Thieme 1985.
- Hensel, H.: Somato-viszerale Sensibilität. In: Keidel, W.-D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 6. Aufl. Stuttgart; New York: Thieme 1985.
- Hensel, H.: Temperaturregulation. In: Keidel, W.-D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 6. Aufl. Stuttgart; New York: Thieme 1985.
- Hensel, H.: Thermoreception and thermoregulation. London: Academic Press 1981
- Hollander, Anne: Sex and Suits – The evolution of modern dress. Kodansha International 1995. Dt.: Anzug und Eros – eine Geschichte der modernen Kleidung. Aus d. Amerikan. von Nele Löw-Beer. Berlin: Berlin 1995
- Höppe, Peter: Comfort Requirements in Indoor Climate. Energy and Buildings, 11 (1988) 249–257
- Humphreys, M.A.: Field studies of comfort compared and applied. Build. Serv. Eng. 44 (1976) 5-27

- ISO 11092: Textiles – Physiological Effects – Measurements of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test). 1993
- Keidel, W.-D. (Hg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 6. Aufl. Stuttgart; New York: Thieme 1985.
- Kislinger, Johannes: Wettbewerbsbeitrag für Kindergarten Ziersdorf, NÖ, 15.09.2000, in : IBOmagazin 1/2001 S.5.
- Knudsen, H.N. et al.: Thermal Comfort in passive solar buildings. Final Report, CEC Research Project EN3S-0035-DK(B). Laboratory of heating and air conditioning, Technical University of Denmark, May 1989
- Läge, Friedrich-Karl: Vom übermäßigen Genuß an Raumwärme – Energieeinsparung als psychologisches Problem. Sanitär und Heizungstechnik 2 (1982) 99-100
- Lipp, Bernhard; Brezovits, Karl; Moser, Maximilian; Frühwirth, Matthias; Messerschmidt, Dietmar: Die Auswirkung von kachelofen- bzw. radiatorbeheizten Räumen auf Kreislaufparameter. Joanneum Research (Inst. f. Nichtinvasive Diagnostik) Weiz, IBO GmbH, Wien: Juni 1999
- Lipp, Bernhard; Rohregger, Gabriele; Moser, Maximilian; Frühwirth, Matthias; Lackner, Karl; Klima, Herbert: Die Auswirkung von kachelofen- bzw. radiatorbeheizten Räumen auf physiologische Zustandsparameter beim Menschen. Joanneum Research (Inst. f. Nichtinvasive Diagnostik) Weiz, IBO GmbH, Wien, Atominstitut der österreichischen Universitäten, Wien: September 2000
- Mayer, E und Schwab, R.: Untersuchung der physikalischen Ursachen von Zugluft. Gesundheits-Ingenieur – gi 111 (1990) H. 1. S. 17–30
- Mayer, E.: Vorschlag für ein individuelles Raumklima durch Infrarot-Strahlung mit Regelung über eine künstliche Haut. Proceedings CLIMA 2000. London, 1.–3.11.1993, paper 290
- Mayer, E.: Thermische Behaglichkeit in Räumen. Neue Beurteilungs- und Messmöglichkeiten. Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 110 (1989), Nr.1, S.35-43
- Mecheels, J.; Urbach, K.-H.: Thermophysiologische Eigenschaften von Kleidungssystemen. Melliand Textilberichte 57 (1976) Heft 12
- McGeevor, P.A.: The Active Pursuit of Comfort – Its Consequences for Energy Use in the Home. (Das aktive Streben nach Komfort und die Folgen fuer den Energieverbrauch in der Wohnung). Energy-and-Buildings 5 (1982), Nr.2, S.103-107
- McIntyre, D.A.: The thermal radiation field. Build. Sci. 9 (1974) 247-262
- McIntyre, D.A.: Chamber studies – Reductio ad Absurdum?. Energy and Buildings, 5 (1982) 89–96 (Klimakammeruntersuchungen – Reduzierung auf's Absurde?)
- Monnier, Eric: Le confort thermique. Motivations et comportements des habitants. (WaermeKomfort. Begründungen und Verhalten der Bewohner). Cahiers-du-Centre-Scientifique-et-Technique-du-Batiment (CSTB) Nr.266 (1986), cahier 2054, S.1-9
- NEFF-Projekt 357: Thermischer Komfort bei variablen Bedingungen. Untersuchungen über die Erweiterung von Komfortzuständen zu Komfortbändern. Projektleiter: Th. Frank. Dübendorf: EMPA Abt. Bauphysik April 1990
- Olesen, B.W. et al.: Effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing. Measurement by a movable thermal manikin. ASHRAE Trans. 88 (2) (1982) 791-805
- Olesen, B.W.: Thermal comfort requirements for floors. Proc. of the Meeting of Commissions B1, B", E1 of the Int. Inst. of Refrigeration, Belgrade, 1977. Union of Mechanical and Electrical Engineers of Serbia, 1977, pp. 307-313
- Olesen, B.W.; Schoeler, M.; Fanger, P.O.: Discomfort caused by vertical air temperature differences. In: Fanger et al.: Indoor climate. Danish Building Research Institute, Kopenhagen 1979
- Pichotka, J.: Stoffwechsel der Organismen. In: Keidel, W.-D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 6. Aufl. Stuttgart; New York: Thieme 1985.

- Ranscht-Froemsdorff, Werner: Raumklima und thermische Behaglichkeitsbedürfnisse. Bauforschungsberichte des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Nr. F 1809. Stuttgart: IRB 1982.
- Recknagel, Sprenger, Hönmann: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. München, Wien: Oldenbourg 1985
- Rohles, F. M.; McCullough, E. A.: Clothing as key to energy conservation. Ind. Eng. Chem. Product Research and Development, Nr. 20, 1981
- Ryd, H.; Wyon, D.: Methods of evaluating human stress due to climate. National Swedish Building Research, D6, 1970
- Schmidt, R. F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen. Berlin, ...: Springer 1995
- Schlüter, G.: Die Wahrnehmungsschwelle des Menschen beim Strahlungsaustausch mit unterschiedlich temperierten Wandflächen. Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik – Gesundheitsingenieur 90 (1969) Heft 6 S. 165–196
- Sontag, S., et. al.: Physical and psychological comfort dimensions of insulative clothing for functioning at reduced household temperatures. In: Conference Proceedings Family and Energy Michigan State University, Mai 1984
- Stegemann, J.: Leistungsphysiologie. In: Keidel, W.-D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 6. Aufl. Stuttgart; New York: Thieme 1985.
- Wetterer, E.; R. D. Bauer und R. Busse: Bau und Funktion des Gefäßsystems. In: Keidel, W.-D. (Hrsg.): Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. 6. Aufl. Stuttgart; New York: Thieme 1985.
- Wyon, D.P.; Andersen, I.; Lundquist, G.R.: The effects of moderate heat stress on mental performance. Scand J Work Environ & Health 5 (1979)
- Wyon, D.P.; Fanger, P.O.; Olesen, B.W.; Pedersen, C.J.K.: The mental performance of subjects dressed for thermal comfort at two different air temperatures. Ergonomics 18 (1975)
- Wyon, D.P.; Sandberg, M.: Vertical temperature gradients, mean room temperatures und their effects on thermal discomfort. Research Report TN:35. Swedish institute for Building Research. Gävle. ISBN 91-7111-066-6, ISSN 0284-6713