

**Aspekte zur Klimaphysiologie und
Temperaturregulation des Menschen
bei warmem Umgebungsklima**

Daniel Schuler

bürkel baumann schuler

**Aspekte zur Klimaphysiologie und
Temperaturregulation des Menschen
bei warmem Umgebungsklima**

Daniel Schuler

Bürkel Baumann Schuler, Ingenieure+Planer AG
Neuwiesenstrasse 2, 8400 Winterthur, 1987

Vorwort

Die physikalischen Gesetzmässigkeiten der Thermodynamik einerseits und die physiologischen Vorgänge im menschlichen Organismus andererseits machen die Klimaphysiologie zu einem interdisziplinären Arbeitsfeld, welches gleichermaßen Ingenieure und Mediziner seit Beginn dieses Jahrhunderts beschäftigt. Die vollständige Beschreibung und Quantifizierung verschiedener Klimabedingungen und seine Auswirkungen auf den Menschen haben dabei mehrere Ziele. Die Analyse von Komfortbedingungen in Aufenthaltsräumen, wie sie der Lüftungs- und Klimaingenieur als Grundlage bei der Auslegung raumluftechnischer Anlagen benötigt, ist als ein wichtiger Aspekt zu nennen. In vielen Arbeitsbereichen wie beispielsweise im Bergbau, in Stahlhütten oder in der Glas- und Keramikindustrie treten jedoch klimatische Verhältnisse auf, bei denen die maximale physiologische Belastbarkeit des Menschen von Interesse ist. Der technische Fortschritt hat dazu geführt, dass heute solchen Extrembelastungen mit geeigneten Mitteln, wie beispielsweise Kühlanlagen, begegnet werden kann. In wie weit die umfangreichen Erkenntnisse aus den genannten Bereichen auch auf die Beurteilung der klimatischen Verhältnisse in stark belegten Schutzbauten übertragen werden können, ist Ausgangspunkt und Gegenstand laufender Untersuchungen. Eine erste Auswertung und Zusammenfassung aus der Fülle von Literaturquellen scheint aufgrund dieser aktuellen Problematik interessant. In diesem Zusammenhang sind die wichtigsten Grundzüge zur Klimaphysiologie und Temperaturregulation des Menschen bei warmem Umgebungsklima dargestellt.

Daniel Schuler

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Ausgangslage	4
2 Kennzeichnung der Klimawirkung	5
2.1 Direkte Klima-Indizes	5
2.2 Empirisch bestimmte Klima-Indizes	6
2.3 Rechnerisch (rational) bestimmte Klima-Indizes	9
3 Wärmebildung und Wärmeabgabe des Menschen	10
4 Temperaturregulation	14
4.1 Chemische (metabolische) Temperaturregulation	14
4.2 Physikalische Temperaturregulation	16
5 Einflüsse auf den Wärmehaushalt des Körpers	19
5.1 Einfluss der Nahrung auf die Umsatzrate	19
5.2 Einflüsse auf das Schwitzvermögen und den Wasser- und Salzhaushalt des Körpers	21
6 Ueberwärmungsgrenzen	23
7 Zusammenfassung	25
Literaturverzeichnis	26

1 Ausgangslage

Das Wohlbefinden, die Leistungsfähigkeit, aber auch die Gesundheit des Menschen hängt in hohem Mass von seinem Umgebungsklima ab. Dieses wird im wesentlichen von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Luftbewegung und den Wärmestrahlungseinflüssen bestimmt. Klimabedingungen, welche als komfortabel empfunden werden, sind heute quantitativ durch breit angelegte Untersuchungen abgedeckt [1]. Auch über die physiologischen Einflüsse von extrem warmen Klimata, wie sie beispielsweise in den Tropen vorherrschen, sind schon frühe qualitative Beobachtungen bekannt [2]. In unseren Breitengraden sind solche Klimabedingungen normalerweise nicht denkbar. Eine Ausnahme bildet der lang dauernde Aufenthalt in dicht belegten Schutzräumen während den Sommermonaten mit starker Sonneneinstrahlung. Die sich in diesem Fall einstellenden Klimabedingungen können so extrem werden, dass physiologisch gegebene Grenzwerte erreicht oder sogar überschritten werden, und ein Verbleiben oder Ueberleben der Insassen im Schutzraum verunmöglicht wird. Die Gefahr, dass sich in Schutzräumen durch ansteigende Raumtemperatur und hohe Luftfeuchtigkeit solche extreme klimatischen Verhältnisse einstellen können, ist schon lange erkannt, und Versuche zum Raumklima in Schutzräumen wurden deshalb schon vor Jahren durchgeführt [3, 4]. Am Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH-Zürich entwickelte Simulationsrechnungen ermöglichen heute Prognosen des Schutzraumklimas [5]. Die mit diesem Rechenmodell prognostizierten Klimawerte konnten während des Schutzraumbelegungsversuchs des Bundesamts für Luftschutztruppen im Jahr 1982 mit guter Genauigkeit verifiziert werden [6]. Die vom Menschen unter den spezifischen Bedingungen in einem Schutzbau über längere Zeit ertragbaren Klimagrenzwerte können hingegen noch nicht als gesichert betrachtet werden, da die in der Literatur angegebenen Maximalwerte zu stark voneinander abweichen.

2 Kennzeichnung der Klimawirkung

Die für die Kennzeichnung des Umgebungsklimas benutzten Indizes können in drei Gruppen unterteilt werden:

- direkte Klima-Indizes
- empirisch bestimmte Klima-Indizes
- rechnerisch (rational) bestimmt Klima-Indizes

2.1 Direkte Klima-Indizes

Die einfachste und auch gebräuchlichste Grösse um das Umgebungsklima zu beschreiben, ist die direkte Angabe der *Trockentemperatur* (dry-bulb-temperature). Für mittlere relative Luftfeuchtigkeiten von 40-60% und bei kühlen und durchschnittlichen Temperaturen ist diese Angabe aussagekräftig. Bei warmen Klimakonditionen und erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit ist die alleinige Angabe der Trockentemperatur ungenügend, da der Wärmehaushalt des Körpers durch vermehrte Schweißsekretion reguliert wird (vgl. Kap. 4.2). Für eine vollständige Kennzeichnung solcher Klimabedingungen müssen noch weitere direkte Klima-Indizes wie die *relative Luftfeuchtigkeit* und die *Luftgeschwindigkeit* angegeben werden. Weitere ebenfalls gebräuchliche und direkt messbare Klima-Indizes sind die *Taupunkttemperatur*, welche ein Mass für den Wasserdampfgehalt der Umgebungsluft darstellt, sowie die *Feucht- oder Nasskugeltemperatur* (wet-bulb-temperatur), welche zur Beschreibung feucht-warmer Klimabedingungen geeignet ist.

Zur einfachen Kennzeichnung der Klimawirkung auf den Menschen ist es jedoch von Vorteil, wenn die wichtigsten Einflussfaktoren auf seinen Wärmehaushalt und sein Temperaturempfinden in einer einzigen Grösse zusammengefasst werden können. Wegen der grossen Anzahl das Umgebungsklima bestimmender

Faktoren ist es aber nicht möglich, alle in einem einzigen Klima-Index zusammenzufassen. Für unterschiedliche Umgebungsbedingungen sind darum auch verschiedene Indizes entwickelt worden, welche die jeweils dominierenden Grössen möglichst genau beschreiben. Diese kombinierten Klima-Indizes lassen sich in die schon erwähnten zwei Hauptgruppen der empirisch und der rechnerisch bestimmten Klima-Indizes unterteilen.

2.2 Empirisch bestimmte Klima-Indizes

Schon 1923 hat eine Forschungsgruppe (*Houghton, Yaglou*) unterstützt von der "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers" (ASHRAE) einen als Effektivtemperatur (ET) bezeichneten, empirisch bestimmten Index definiert [7]. Die Effektivtemperatur ist heute noch der gebräuchlichste und am weitesten verbreitete Index zur Beschreibung des Umgebungsklimas. Die ET-Skala wurde durch eine grosse Serie von Untersuchungen bestimmt, in denen Versuchspersonen das Empfinden von verschiedenen Klimata verglichen. Indem die Versuchspersonen durch zwei benachbarte Räume mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen gingen, wurden Kombinationen von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit ermittelt, welche jeweils das selbe Temperaturempfinden hervorriefen.

Figur 1 zeigt diese Beziehungen für Luftbewegung oder -turbulenzen mit ca. 0,1m/s. Eine gegebene Trockentemperatur (dry-bulb-temperature) und die Diagonale für 100 % relative Luftfeuchtigkeit definieren dabei die Effektivtemperatur. Alle Kombinationen von Trockentemperatur und Luftfeuchtigkeit entlang den von dieser Diagonalen nach südost verlaufenden Linien haben dabei die selbe Effektivtemperatur - rufen also die gleiche Temperaturempfindung hervor. Resultate für längere, 3-stündige Klimaexpositionen, wie sie von anderen Autoren [8] angegeben werden, sind im Effektivtemperatur-Diagramm (Fig. 1)

ebenfalls eingetragen, wobei die als komfortabel bzw. ziemlich warm empfundenen Bedingungen angegeben sind.

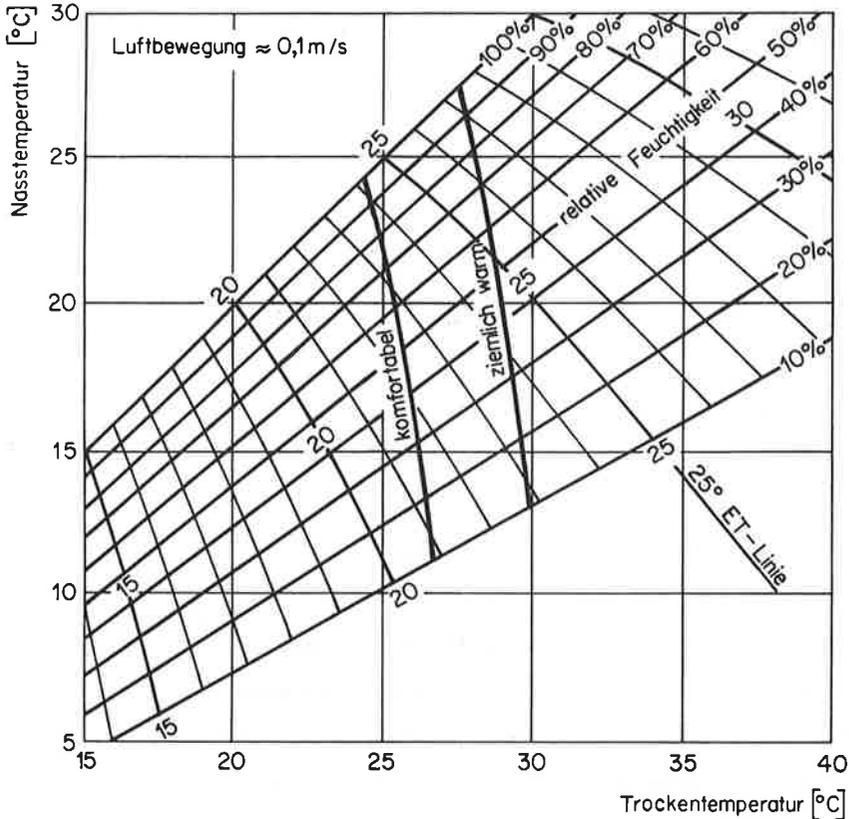


Fig. 1 Effektivtemperatur-Skala für Luftbewegungen mit 0,1 m/s und den als komfortabel bzw. ziemlich warm empfundenen Effektivtemperaturen bei 3-stündiger Exposition nach [8]

Die nicht entlang den ET-Linien verlaufenden Linien für die 3-stündige Klimaexposition lassen die Mängel der ET-Skala erkennen, so wie sie aufgrund einer momentanen Temperaturempfindung festgelegt wurde. Aufgrund der bei kurzzeitiger Klimaexposition noch nicht relevanten Kreislaufbelastung durch die erhöhte Schweißsekretion (vgl. Kap. 4.2 und 6), resultiert bei der originalen ET-Skala eine Ueberbewertung der Trockentemperatur bzw. eine Unterbewertung der Luftfeuchtigkeit. Im weiteren fehlen auch Aussagen bezüglich der physische

Tätigkeit und der Wärmestrahlungseinflüsse, wie sie bei Temperaturdifferenzen zwischen der Luft und den Umschliessungsflächen massgebend werden. Diese Unzulänglichkeiten führten zu diversen korrigierten und modifizierten empirisch bestimmten Klima-Indizes (Fig. 2).

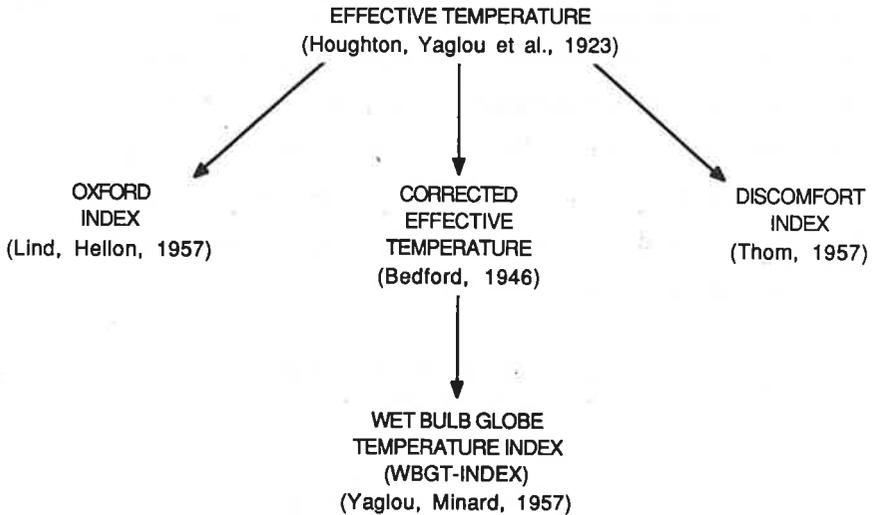


Fig. 2 Von der Effektivtemperatur abgeleitete empirische bestimmte Klima-Indizes nach [9]

2.3 Rechnerisch (rational) bestimmte Klima-Indizes

Im Gegensatz zum empirisch bestimmten Effektivtemperatur-Index wurden rechnerisch (rational) bestimmte Klima-Indizes (rational heat stress indices) eingeführt, welche auf der physikalischen Betrachtung der Wärmeaustauschvorgängen des menschlichen Körpers mit seiner Umgebung basieren. Die "Operative Temperature" wurde 1937 entwickelt, um die im Effektivtemperatur-Index nicht eingeschlossenen Strahlungsvorgänge zu erfassen. Diese beschreibt den Wärmeaustausch infolge Strahlung und Konvektion (vgl. Kap. 4.2.). Sie bezieht dafür aber die Luftfeuchtigkeit nicht mit ein. Ausgehend von der "Operative Temperature" findet sich auch in dieser Gruppe eine Reihe von abgeleiteten und modifizierten Indizes (Fig. 3).

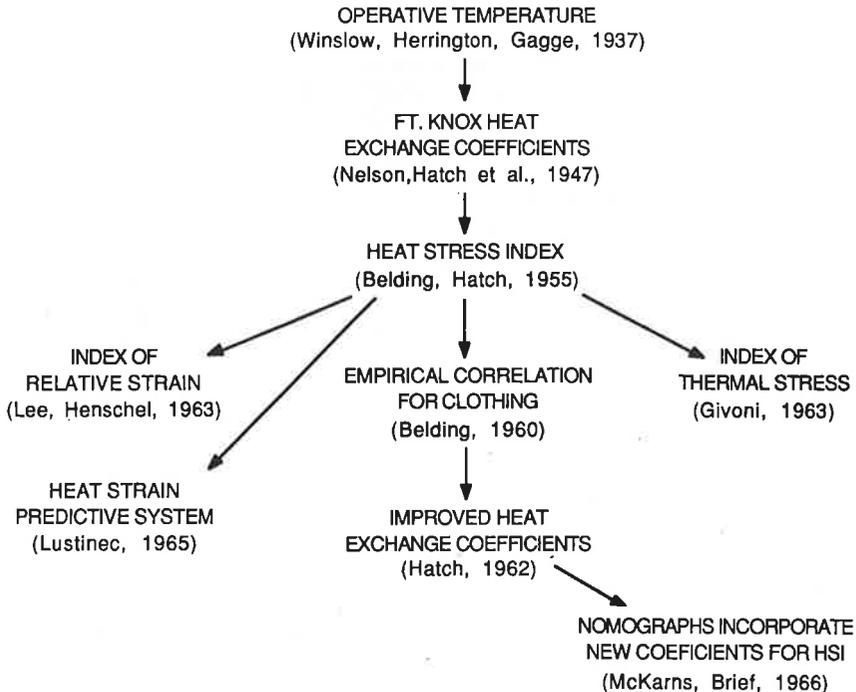


Fig. 3 Rechnerisch (rational) bestimmte Klima-Indizes (rational heat stress indices) nach [9]

3 Wärmebildung und Wärmeabgabe des Menschen

Der Mensch gehört zu den homoiothermen Lebewesen. Er besitzt die Fähigkeit, seine Innentemperatur auch bei wechselnden Umweltbedingungen und unterschiedlicher eigener Stoffwechselleistung innerhalb einer geringen Schwankungsbreite konstant zu halten. Die Erhaltung der konstanten Körperkerntemperatur von $36,9^{\circ}\text{C}$, welche im Tagesverlauf nur wenig schwankt, ist die Voraussetzung für die Funktion unseres Zentralnervensystems und damit lebenswichtig. Die Wärmeabgabe und unter Umständen auch die wärmeerzeugenden Prozesse müssen darum den äusseren klimatischen Verhältnissen angepasst werden können. Der Vergleich mit einem technischen Regelkreis zur Beschreibung der Regulationsvorgänge im Organismus drängt sich auf. Die Körperinnentemperatur wird gemessen und mit einem "Sollwert" verglichen. Die Abweichungen vom Sollwert bilden die Grundlage für die Steuerung von Wärmebildung und Wärmeabgabe [10, 11, 12, 13].

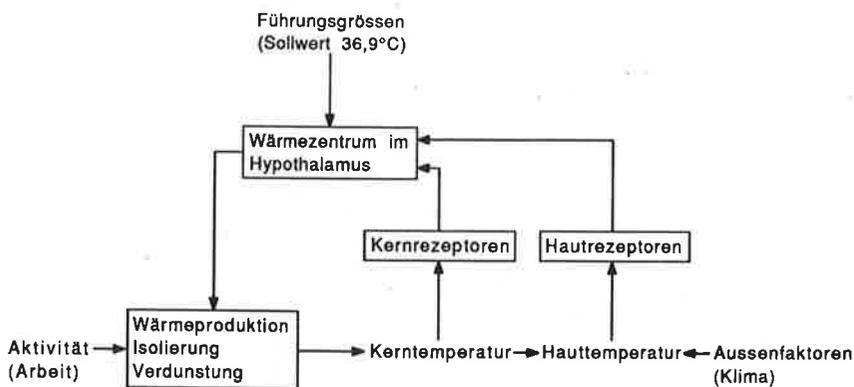


Fig. 4 Regelkreis der Temperaturregulation

Da die äusseren Körperteile (Körperschale) eine niedrige Temperatur als die Kernregionen aufweisen, findet unter normalen Verhältnissen ein dauernder Wärmestrom vom Innern des Körpers nach aussen statt. Der Wärmetransport

verläuft dabei über den Blutkreislauf, wobei das im Körperkern erwärmte venöse Blut in der Körperschale abgekühlt wird. Die grosse Temperaturdifferenz zwischen Körperkern und -schale, wie sie bei kühler Umgebung festgestellt wird, verschwindet bei hoher Aussentemperatur oder bei Muskelarbeit fast völlig (Fig. 5). Aus diesen Ausführungen geht hervor, dass keine klar definierte Körpertemperatur existiert, und die Körperschale keine feste anatomische Begrenzung hat. Für Körpertemperaturmessungen wäre es am wichtigsten, die Temperatur des Zwischenhirns zu kennen, auf welche geregelt wird. Da diese klinisch jedoch nicht bestimmbar ist, begnügt man sich mit der Messung einer Temperatur, welcher der mittleren Kerntemperatur nahe kommt. So wird meistens die Rektaltemperatur oder etwas ungenauer die Mund- oder Axillartemperatur angegeben. Als physiologische Schwankungsbreite der Rektaltemperatur kann $36,4 - 37,4^{\circ}\text{C}$ angesehen werden, wobei eine erhöhte Temperatur bei physischer Belastung aber auch normal ist.

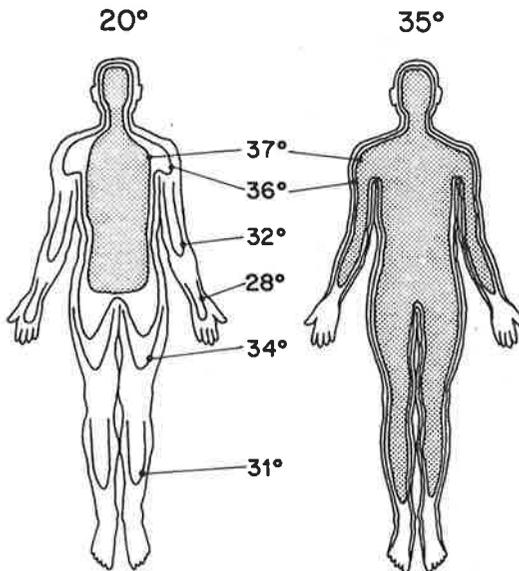


Fig. 5 Isothermen in der Körperschale bei 20°C und bei 35°C Raumtemperatur nach [10] (grau = homoiothermes Kerngebiet)

Die Energieproduktion der Zelle steht im Zentrum der Wärmebildung, da die Zellen zur Aufrechterhaltung ihrer Struktur und Leistungsbereitschaft dauernd Energie einsetzen müssen. Der Energieumsatz, bestehend aus dem Umsatz der Zellen und dem Energieverbrauch für die Funktion von Herz, Kreislauf, Atmungsmuskulatur, Nieren, Leber und innersekretorischen Drüsen wird als *Grundumsatz* bezeichnet. Er liegt bei Erwachsenen bei 5000-7000 kJ/Tag. Zusätzliche Leistungen wie Muskel- und Verdauungsarbeit oder Temperaturregulation bewirken eine Erhöhung der Umsatzrate. Die Umsatzsteigerung tritt bereits bei Leistungen auf, die äusserlich nicht sichtbar sind. Dazu gehört vor allem die statische Arbeit der Muskeln, welche der Aufrechterhaltung des Körpers dient. So erhöht bereits "bequemes Sitzen" den Umsatz um rund 10%, "lässiges Stehen" um etwa 20%.

Der Grundumsatz ist abhängig von Alter, Körpergrösse, Körpergewicht und Geschlecht. Nachfolgend ist eine aus [14] entnommene empirisch gefundene Berechnungsformel angegeben, mit der sich die Grundumsatzwerte für Männer und Frauen in Abhängigkeit der genannten Grössen bestimmen lassen. In Figur 6 ist der durchschnittliche Grundumsatz für Männer und Frauen in Funktion des Alters dargestellt.

$$U_{\text{Männer}} = 278 + 20,9 \cdot K + 57,5 \cdot G - 28,2 \cdot A$$

U: Grundumsatz [kJ/Tag]

K: Körpergrösse [cm]

$$U_{\text{Frauen}} = 2742 + 7,74 \cdot K + 40 \cdot G - 19,55 \cdot A$$

G: Körpergewicht [kg]

A: Lebensalter [Jahre]

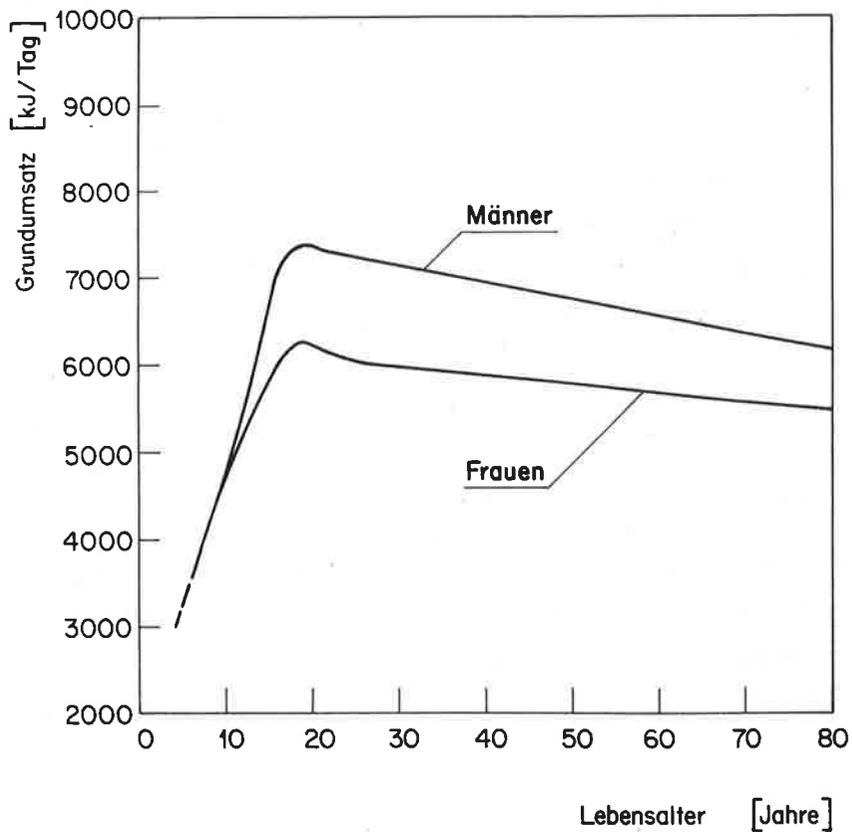


Fig. 6 Durchschnittlicher Grundumsatz von Männern und Frauen in Abhängigkeit des Lebensalters nach [14]

4 Temperaturregulation

Durch Änderung der Hautdurchblutung (Vasomotorreflex) kann das Temperaturgefälle zwischen Körper und Umgebung angepasst und damit die Wärmeabgabe reguliert werden. Bei erhöhter Umgebungstemperatur kann die Wärmeabgabe zusätzlich durch Schweißsekretion und damit durch Wärmeentzug bei Wasserverdampfung vergrößert werden. Da jede Art von Lebensäußerung mit einer Stoffwechselleistung verbunden ist, kann die Wärmebildung den äusseren klimatischen Verhältnissen nicht unbedingt im erforderlichen Mass angepasst werden. Sie erweist sich unter Umständen sogar als eine Störquelle, deren Einfluss mit der Wärmeabgabe kompensiert werden muss. Die die Wärmeabgabe steuernden Vorgänge werden unter dem Begriff *physikalische (vasomotorische) Temperaturregulation*, die der Wärmebildung unter *chemischer (metabolischer) Temperaturregulation* zusammengefasst [10, 15].

4.1 Chemische (metabolische) Temperaturregulation

Durch chemische Temperaturregulation hat der menschliche Organismus die Möglichkeit, die Umsatzrate in kühler Umgebung zu erhöhen, um mit der gesteigerten Wärmebildung ein Auskühlen des Körpers zu verhindern. Selbst in warmer Umgebung kann die Umsatzrate jedoch nicht unter den Grundumsatz abgesenkt werden. Hat der Organismus keine ausreichenden Kühlmöglichkeiten, steigt seine Kerntemperatur und damit auch der Umsatz (Wärmebildung) an [10]. Bei Körpertemperaturen über 37°C ist darum eine aktive Regulation der Wärmeproduktion nicht mehr möglich [16]. Die Wirkung der Körpertemperatur auf die Umsatzrate wird sogar zu einer Störquelle für die Temperaturregulation, wobei die gesteigerte Wärmebildung mit erhöhter physikalischer Wärmeabgabe wett gemacht werden muss. Bei Laboruntersuchungen ist festgestellt worden, dass sich der Grundumsatz bei mässiger Hitze (21,0-29,5°C ET) noch nicht stark ändert. Die obere kritische Temperatur, bei welcher eine relevante Umsatzsteigerung eintritt, liegt bei ungefähr 31°C ET. Mit Zunahme der

Kerntemperatur um 1°C wächst der Umsatz dann um etwa 13%. Bei überhitzten Versuchspersonen wurde bei 40°C Körpertemperatur eine eineinhalb mal so hohe Stoffwechselrate festgestellt wie bei normaler Kerntemperatur. Dabei ist es nicht sicher, ob das eine einfache Folge der RGT-Regel (Reaktions-Geschwindigkeits-Temperatur-Regel) ist, oder in wie weit der Stoffwechsel homiothermer Gewebe auch von zentralnervösen Regulationen abhängt [10].

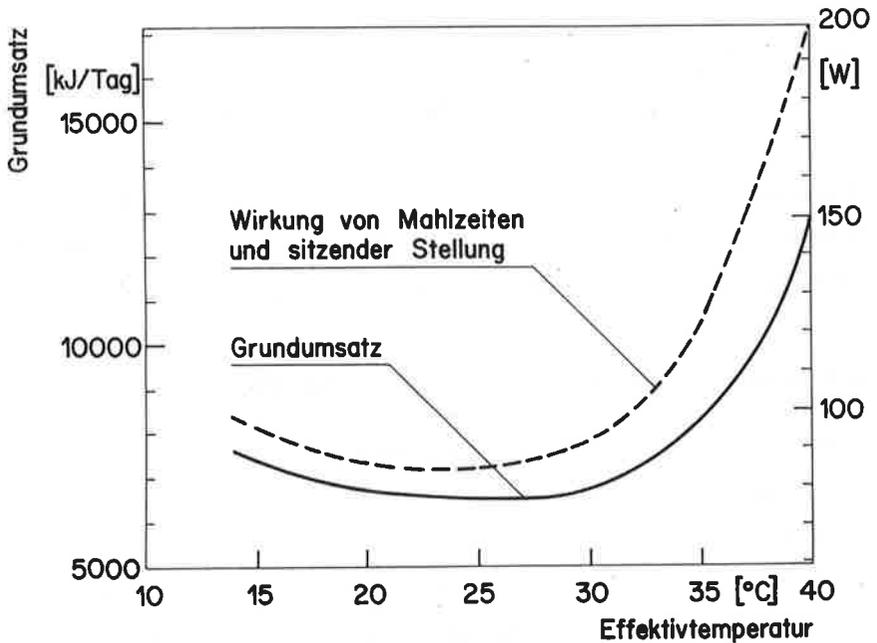


Fig. 7 Abhängigkeit des Grundumsatzes von der Effektivtemperatur nach [17]

4.2 Physikalische (vasomotorische) Temperaturregulation

Durch Steuerung der Wärmeabgabe hat die menschliche Temperaturregulation die eigentliche Möglichkeit, den Organismus gegen Auskühlung und vor allem gegen Ueberwärmung zu schützen. Bei der Wärmeabgabe wird zwischen dem (inneren) Wärmetransport vom Körperkern an die Körperoberfläche und der (äusseren) Wärmeabgabe von der Körperoberfläche an die Umgebung unterschieden. Beim Wärmetransport an die Körperoberfläche überwiegt der konvektive Transport mit dem Blut. Durch Wärmeleitung wird die Wärme nur in den obersten Hautschichten abgeleitet. Der Kreislauf bietet dabei mehrere Möglichkeiten, die Wärmeabgabe zu erleichtern. Zum einen kann Wärme in solche Körperteile transportiert werden, die bei kleinem Durchmesser eine relativ grosse Oberfläche haben (Extremitäten), zum andern werden durch Oeffnen der peripheren Blutgefässe Teile der Körperschale besser durchblutet. Damit wird die isolierende Oberflächenschicht dünner und die Wärmeabgabe verbessert (Vasomotorreflex).

Die Wärmeabgabe von der Körperoberfläche an die Umgebung erfolgt auf mehreren physikalisch verschiedenen Wegen, durch Leitung und Konvektion sowie durch Strahlung und Wasserverdunstung.

Äussere Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion

Auf den äusseren Wärmestrom durch Leitung und Konvektion übt die an der Haut anliegende ruhende Grenzschicht der Luft einen grossen Einfluss aus, da hier die Wärme nur durch Leitung übertragen werden kann. Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit wird die Grenzschicht dünner und damit die Wärmeabgabe erleichtert. Bei hohen Temperaturen erschwert bereits eine leichte, die Grenzschicht schützende Bekleidung die Wärmeabgabe noch zusätzlich. An der Aussenseite der Grenzschicht beginnt der *konvektive Wärmetransport*. Die abgegebene Wärmemenge ist darum wiederum in starkem Mass von der Luftgeschwindigkeit abhängig. Der konduktive Wärmetransport ist infolge der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Luft nur von untergeordneter Bedeutung.

Aeusserere Wärmeabgabe durch Strahlung

Wegen der Tatsache, dass der Körper in den meisten Temperaturbereichen den grössten Teil seiner Wärme über Strahlung abgibt, nehmen die Oberflächentemperaturen der Umschliessungsflächen (Böden, Wände, Decken) eine physiologisch wichtige Stellung ein. Die durch Strahlung abgegebene Wärmemenge ist dabei abhängig von der Differenz zwischen der Temperatur der Körperoberfläche und den Temperaturen der Umschliessungsflächen. Nach dem Gesetz von *Stefan-Boltzmann* stehen die Temperaturen dabei in der 4. Potenz, was zur Folge hat, dass der Wärmestrahlungsanteil stark mit dieser Temperaturdifferenzen ansteigt. Die empfundene Temperatur entspricht in einer groben Näherung dem Mittelwert aus der Lufttemperatur und der Temperatur der Umschliessungsflächen [13]. Die Oberflächenbeschaffenheit der Umschliessungsflächen und die Art der Bekleidung haben dabei eine untergeordnete Bedeutung, da im Bereich der langwelligen Wärmestrahlung (4...20 μm) die üblichen Kleiderstoffe, die normalerweise verwendeten Baustoffe sowie die menschliche Haut als praktisch vollständig schwarze Körper wirken.

Wärmeabgabe durch Wasserverdunstung

Dem Körper kann Wärme entzogen werden, wenn an seiner Oberfläche Wasser verdunstet (ca. 2420 kJ/kg Wasser). Um bei erhöhter Körpertemperatur die Wärmeabgabe zu verstärken, setzt deshalb die durch das Nervensystem ausgelöste Schweißsekretion ein. Die durch Verdunstung abgegebene Wärmemenge (latente Wärme) nimmt mit steigender Temperatur zu, während die trocken abgegebene Wärme (sensible Wärme) abnimmt. Dadurch wird die Schweißsekretion bei warmem Klima zum wichtigsten "Kühlmechanismus" des Körpers. Die Wasserabgabe basiert dabei auf zwei Vorgängen. Die *insensible Wasserabgabe* beruht auf reiner Wasserdampfdiffusion durch die obersten Hautschichten und untersteht keiner thermoregulatorischen Kontrolle. Durch eine erhöhte Körpertemperatur wird die *insensible Wasserabgabe* nicht erhöht [1]. Bei

der *sensiblen (glandulären) Wasserabgabe* hat der Körper die Möglichkeit, mit Hilfe der Schweißdrüsen in grossen Mengen Wasser an seiner Oberfläche austreten zu lassen. Mit Ausnahme der Handflächen und der Fusssohlen verfügen Kopf und Rumpf über mehr Schweißdrüsen als die Extremitäten und somit über bessere "Kühlmöglichkeiten".

Da der bei der Verdunstung entstehende Wasserdampf zuerst durch die am Körper anliegende Grenzschicht hindurch diffundieren muss, bevor er konvektiv abtransportiert werden kann, hängt die Verdunstungsmöglichkeit auf der Haut primär vom Wasserdampfgehalt in dieser Grenzschicht und damit von der Hauttemperatur ab. Weil die Hauttemperatur und damit die Wasseraufnahmefähigkeit in der Grenzschicht normalerweise höher ist als in der Umgebung, kann darum auch in mit Feuchtigkeit gesättigter Luft noch Wärme durch Schwitzen abgegeben werden. Die Klimaphysiologie benutzt aus diesem Grund auch den Begriff des *physiologischen Sättigungsdefizits*, welches definiert ist als die Differenz zwischen der maximalen Feuchte bei 32,5°C und der in der Umgebungsluft vorhandenen Feuchtigkeit. Die Wahl von 32,5°C als Bezugstemperatur, welche ungefähr der Temperatur der ausgeatmeten Luft entspricht, ist deshalb günstig, weil bei heissem Klima die mittlere Hauttemperatur häufig in der Nähe dieses Wertes liegt [17].

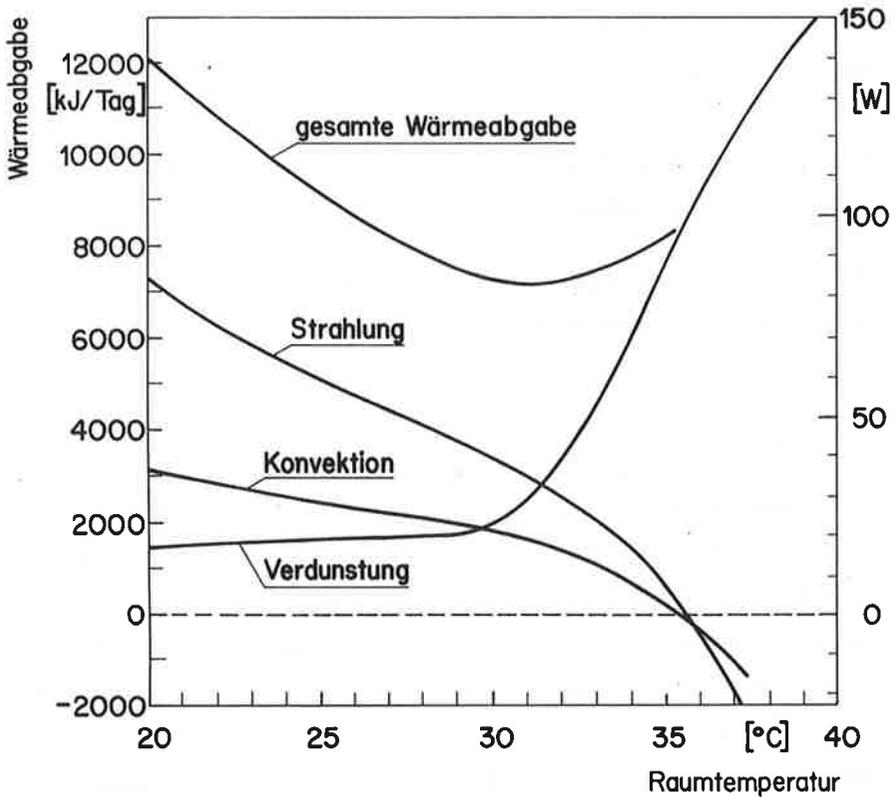


Fig. 8 Auf verschiedene Arten abgegebene Wärmemengen in Funktion der Raumtemperatur nach [10]

5 Einflüsse auf den Wärmehaushalt des Körpers

5.1 Einfluss der Nahrung auf die Umsatzrate

Neben der Muskelarbeit hängt die Umsatzsteigerung von der Art der aufgenommenen Nahrung ab. Nahrungsaufnahme deckt jedoch nicht einfach die im Grundumsatz verbrauchte Energie, da der Organismus die Nährstoffe zum Teil umbauen, speichern bzw. in eine andere Speicherform umwandeln und später wieder mobilisieren muss. Diese Umwandlungen sind alle mit Energieverlusten in Form von Wärme verbunden, so dass Nahrungsaufnahme den Grundumsatz

um einen gewissen Betrag steigert und Ersatz nur möglich ist, wenn Nahrung mit Ueberschuss zugeführt wird. Diese umsatz erhöhende Wirkung wird als *spezifisch dynamische Wirkung der Nahrungsstoffe* bezeichnet. Vor allem leicht verdauliche Eiweisskörper bringen die stärkste Umsatzsteigerung zustande, da Eiweiss nicht oder nur in geringem Mass gespeichert werden kann, und ein grosser Teil des zugeführten Eiweisses mit Energieverlusten (Wärme) abgebaut und zu Fett aufgebaut werden muss. Ersetzt man 100 kJ der beim Grundumsatz verbrauchten Energie in Form von Eiweiss (z.B. reine Fleischkost), werden anschliessend 130 kJ freigesetzt, wobei die verbrauchte Mehrenergie aus der Körpersubstanz nach geliefert werden muss. Bei reiner Eiweisskost würde auf lange Sicht eine Unterernährung mit Abmagerung des Körpers die Folge sein. Bei Kohlehydraten und Fetten ist die spezifisch dynamische Wirkung minimal, und der durch Eiweiss provozierte Mehrverbrauch lässt sich kompensieren. [10, 15].

16-Stunden-Tages-Grundumsatz	4800 kJ	
8-Stunden-Schlaf-Grundumsatz	2200 kJ	≈90% des Ruheumsatzes am Tag
Leistungszuwachs	1700 kJ	
Arbeit	1200 kJ	
	9900 kJ	
≈10% spezifisch dynamische Wirkung der Nahrung	1000 kJ	
Totaler Energiebedarf pro Tag	10900 kJ	

Fig. 9 Grobe Berechnung des Energiebedarfs einer Person bei leichter Büroarbeit nach [10]

5.2 Einflüsse auf das Schwitzvermögen und den Wasser- und Salzhushalt des Körpers

Beim Bedürfnis nach vermehrter Wärmeabgabe nimmt zuerst die unmerkliche (insensible) Feuchtigkeitsabgabe durch die Haut zu (vgl. Kap. 4.2). Muss die Wärmeabgabe stark erhöht werden, so dass das auf dem Weg der Leitung, der Strahlung und der insensiblen Wasserabgabe nicht mehr möglich ist, kommt es zum Schweissausbruch. Ausgelöst wird die Schweissekretion bei erhöhter Körpertemperatur durch das Nervensystem. Schwitzen kann darum auch durch die Verabreichung von Nervengiften unterdrückt oder hervorgerufen werden. So wird beispielsweise durch Verabreichung von Atropin die Schweissabsonderung unterdrückt. Die unmerkliche (insensible) Wasserabgabe wird dadurch jedoch nicht verändert.

Der Wasserbedarf des Menschen bei grosser Hitze kann beträchtlich sein (Hitzearbeit 3-5 l/Tag, Wüstenwanderung bis 12 l/Tag). Wird nicht genügend getrunken, nimmt die Leistungsfähigkeit rasch ab, und das Allgemeinbefinden verschlechtert sich. Wird mehr Flüssigkeit zugeführt als dem Organismus durch Schweissekretion verloren geht, wird der Ueberschuss nicht auf dem Weg über die Schweissdrüsen, sondern durch die Nieren ausgeschieden. Bei grosser Hitze wird häufig auch mehr geschwitzt, als verdunstet werden kann (Hypersekretion). Tropfender Schweiss ist aber "unökonomisch", da dem Körper einerseits Flüssigkeit verloren geht, und andererseits der abtropfende Schweiss keine Kühlwirkung mit sich bringt. Bei langer Hitzeexposition erschöpft sich die Fähigkeit zum Schwitzen zudem zunehmend.

Der Gewichtsverlust, der bei starkem Schwitzen entsteht, kann im allgemeinen auch durch grosse Mengen reinen Wassers nicht vollständig gedeckt werden. Salzausschwemmung bei grosser Hitze und gesteigerter Flüssigkeitszufuhr führen zu Chloridmangel und damit wieder zu verstärktem Flüssigkeitsverlust. Nur wenn mit Speisen oder Getränken gleichzeitig Salz zugeführt wird, kann das Wasser im Körper zurückbehalten und damit auch die Schweissmenge

reduziert werden. Bei hitzegewohnten Personen ist überdies eine ausgeprägtere Fähigkeit vorhanden, den Salzgehalt des Schweißes zu verdünnen.

Die Schweißverdunstung an der Körperoberfläche wird durch die Art der Bekleidung entscheidend beeinflusst. Eine enge überall geschlossenen Kleidung, welche die Luftbewegung längs des Körpers behindert, schränkt die Verdunstungsmöglichkeiten erheblich ein. Es gibt jedoch auch Kleidungen, welche die Schweißverdunstung begünstigen. Feuchter Tricotstoff bietet infolge der grossen Oberfläche seiner Fasern und wegen seiner guten Durchlässigkeit unter Umständen bessere Verdunstungsbedingungen als die nackte schweisstriefende Haut [17].

6 Ueberwärmungsgrenzen

Über die Höhe der maximal erträglichen Effektivtemperatur liegen verschiedene, sich nicht immer deckende Angaben vor. Gemäss [9] fand *Haldane* schon 1905 eine Beziehung zwischen dem Befinden schweissbedeckter Personen und mit dem Nassthermometer gemessenen Temperaturen. Sein empirisch bestimmter Feuchte-Kugel-Index (wet-bulb-index) ergab obere Grenzwerte für die Nasstemperatur (wet-bulb-temperature), bei welchen jeweils noch kein Anstieg der Körpertemperatur resultierte. Diese Grenzwerte liegen für ruhende bekleidete Personen in ruhiger Luft bei 31°C Nasstemperatur und nach Erhöhung der Luftgeschwindigkeit auf 0,8 m/s bei 34°C Nasstemperatur. Bei mittelschweren physischen Tätigkeiten wird ein tieferer Grenzwert von 25°C Nasstemperatur angegeben. In Klimata mit hohen Luftfeuchtigkeiten werden diese Werte heute noch als ungefähr realistisch eingeschätzt [9]. Die ASHRAE [7] gibt den gleichen Grenzwert mit 31°C ET an, was jedoch bei relativen Luftfeuchtigkeiten unter 100% eine etwas tiefere Nasstemperatur ergibt (vgl. Fig. 1). Die SUVA [18] wiederum bezeichnet Klimabedingungen oberhalb 33°C ET als kritisch. Diese Angabe gilt jedoch bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,3 m/s und für die beschränkte Dauer eines Arbeitstages, dafür aber bei leichter körperlicher Betätigung. Im Gegensatz zu diesen Angaben scheint ein Grenzwert mit maximalen Tagesmittelwerten für langfristige Aufenthalte in Schutzbauten von 25°-27°C ET, wie sie von *Blumer et al.* [4] angegeben wird, eher tief.

Die Höhe der zulässigen Grenztemperatur ist aber auch von der Dauer der Klimaexposition abhängig. Vor allem bei kurzen Expositionszeiten nimmt die physiologische Grenztemperatur mit zunehmender Dauer stark ab (Fig. 10). In Untersuchungen bei trocken-warmen Klimabedingungen, welche über den Zeitraum von mehreren Tagen durchgeführt wurden, konnten andererseits Akklimatisationsmechanismen festgestellt werden, die zu einer erhöhten Schwissekretion und einer Abnahme der Kerntemperatur der überhitzten Versuchspersonen führten [8]. In feucht-warmem Klima ist es jedoch fraglich,

ob eine solche Akklimatisation wirksam wird. Wahrscheinlicher ist, dass die andauernde hohe Kreislaufbelastung und die sich erschöpfende Schweissverdunstung dominieren, und damit bei langer Expositionszeit die physiologisch bedingte Temperaturgrenze tiefer anzusetzen ist, als das bei einem kurzzeitigen Aufenthalt der Fall ist.

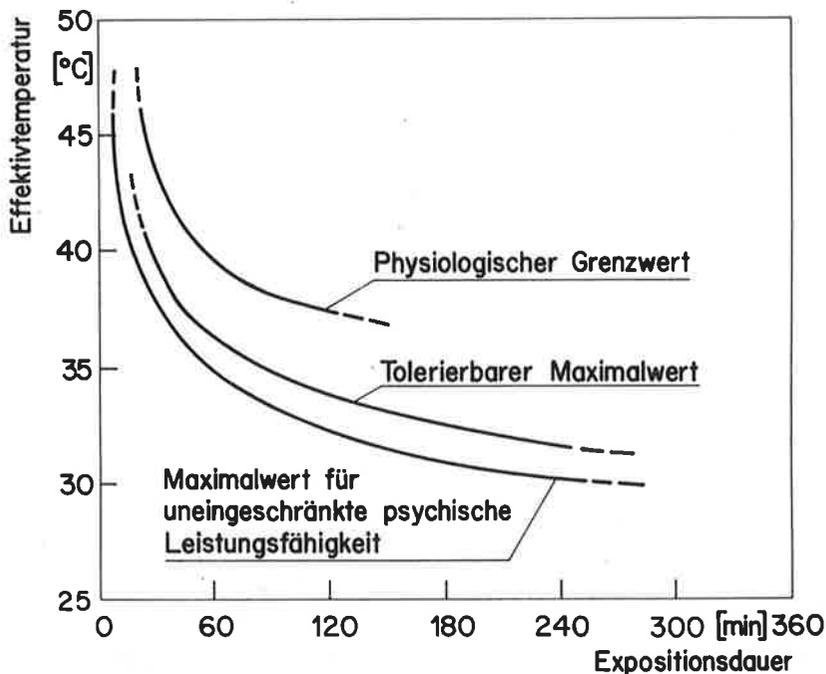


Fig. 10 Grenzwerte für die Effektivtemperatur in Funktion der Expositionszeit nach [14]

Bei einer Kerntemperatur von $38,8^{\circ}\text{C}$ beginnt der *Hitzestress*. Mit dem Ansteigen der Kerntemperatur nimmt die Pulsfrequenz um etwa 36 Schläge pro $^{\circ}\text{C}$ zu. Der *Hitzschlag* ist eine direkte Folge unzureichender Entwärmung des Körpers. Die Kerntemperatur kann schnell ansteigen (bis zu $3,5^{\circ}\text{C}$ in 2 Stunden). Da das maximal erweiterte Gefäßsystem von der zirkulierenden Blutmenge nicht mehr ausreichend gefüllt wird, erweist sich meist der Kreislauf als das schwächste Glied. Bei Kerntemperaturen von 40°C fällt der Blutdruck schon bei der geringsten zusätzlichen Belastung bei weichem und überaus schnellem Puls.

Unter dem Einfluss von Hitze nimmt die Pulsfrequenz beim Untrainierten wesentlich stärker zu als beim Trainierten. Frequenzen über 135/min entsprechen einem Zustand "allgemeinen Unbehagens". Pulsschlag über 160/min kann nur kurze Zeit ertragen werden. Auftretende *Hitzekrämpfe* beruhen auf den durch die grossen Schweissmengen bedingten Chloridverlusten. Kerntemperaturen über 42°C sind immer kritisch. Bei einer Körpertemperatur von 43°C beträgt die Mortalität ca. 70%. Nach Ueberschreiten von 44°C wurde noch nie eine Erholung beobachtet [10].

7 Zusammenfassung

Für die Erhaltung des Wärmeleichgewichts des Menschen spielt die Wärmeabgabe durch Konvektion, Strahlung und Schweissabsonderung eine primäre Rolle. Die Wärmeproduktion hingegen ist bei warmen Klimabedingungen eine Störquelle für die Temperaturregulation, da mit steigender Körpertemperatur auch die Umsatzrate ansteigt. Die Höhe der Effektivtemperatur, welche zu Hitzestress und Ueberhitzung führt, ist zudem vielfältig abhängig von Einflussfaktoren wie der Expositionsdauer, der physischen Tätigkeit und Konstitution, der Flüssigkeitsaufnahme, der Bekleidung, dem Akklimatisationsgrad und auch der psychischen Belastung. Zur Beurteilung und Prognose der Klimabedingungen in dicht belegten Schutzräumen sind sowohl die physiologischen Grenzwerte als auch die Wärme- und Wasserdampfabgabe der Schutzraumsinsassen von grosser Bedeutung. Wegen der grossen Anzahl von Indizes sind für die Kennzeichnung des Klimas und für die Angabe von Grenzwerten vergleichbare und den Umgebungsbedingungen angepasste Klima-Indizes zu gebrauchen.

Literatur

- [1] *Fanger, P. O.*: Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970
- [2] *Castellani, A.*: Climate and Acclimatization, Some Notes and Observations. John Bale Sons+Curnow LTD, 1938
- [3] *Anet, B. et al.*: Versuche zum Raumklima in TWP-Schutzräumen. Studienkommission des EJDP für Zivilschutz, 1969
- [4] *Blumer, W. et al.*: Klimatechnische Aspekte des Schutzraumbaus. Forschungsinstitut für militärische Bautechnik, FMB 73-11 (11), Zürich, 1973
- [5] *Gansner, W.*: Modell des Klimaübertragungsverhaltens zwangsbelüfteter Schutzräume mit Belegung. Diss. ETH 6185, 1978
- [6] *Gansner, W., Schuler, D.*: Schutzraumbelegungsversuch BALST 1982, Teilbericht Schutzraumklima. Gruppe für Rüstungsdienste, AC-Laboratorium Spiez, Bericht Nr. 8559, 1985
- [7] *ASHRAE* : Handbook of Fundamentals, Physiological Principles, Comfort and Health. New York, 1972
- [8] *McCormick, E. J.*: Human Factors Engineering, 3th Edition. Mc-Graw Hill, New York, 1970
- [9] *Hardy, J. D. et al.*: Physiological and Behavioral Temperatur Regulation. Charles C. Puplicher, Springfield, Illinois, 1970
- [10] *Aschoff, J. et al.*: Energiehaushalt und Temperaturregulation. Urban&Schwarzenberg, München, Berlin Wien, 1971

- [11] *Cleffmann, G.*: Stoffwechselfysiologie der Tiere; Stoff- und Energieumsetzung als Regelprozesse. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1979
- [12] *Bligh, J.*: Environmental Physiology of Animals. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1976
- [13] *Grandjean, E.*: Fitting the task to the man; An ergonomic approach. Taylor + Francis, London, 1980
- [14] *Kuhlmann, A.*: Einführung in die Sicherheitswissenschaft. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag TÜV Rheinland, 1981
- [15] *Rein, H.*: Einführung in die Physiologie des Menschen. Springer-Verlag, Berlin, 1960
- [16] *Kleiber, M.*: Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, 1967
- [17] *Högger, D.*: Industrielle Arbeit bei grosser Hitze. Verlag des Schweiz. Handelsblattes, Bern, 1947
- [18] *SUVA, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt*: Merkblatt für die Arbeit bei feuchtwarmen Klimabdingungen unter Tag. Form.1974.d, Februar 1973