

November 2024

Temperatur und Feuchte Gefahren Grenzen für den menschlichen Körper

Ein Diskussionsbeitrag



Dipl.-Ing, Alfred Mörx, OVE, IEEE
Fachautor, virtuelle Workshops
Pretschgasse 21/2/10
A-1110 Wien/Österreich

Tel.: +43-(0)1-769-67-50-12
E-Mail: am@diamcons.com
www.diamcons.com



Inhalt

1	Einleitung	3
2	Trockenkugeltemperatur, Feuchtkugeltemperatur, Verdunstungskühlung.....	3
2.1	Trockenkugeltemperatur (Trockentemperatur, Lufttemperatur, T_{tr})	4
2.2	Feuchtkugeltemperatur (Feuchttemperatur, T_f)	4
3	Wärme im menschlichen Körper.....	6
3.1	Woher kommt die Wärme im menschlichen Körper?.....	6
3.2	Die Körpertemperatur	7
3.3	Regulierung der Körpertemperatur.....	7
3.4	Kühlung durch Verdunstung von Schweiß	8
4	Gefahrgrenzen und neuere Untersuchungen.....	9
5	Zusammenfassung	10
6	Verwendete Formelzeichen / Symbolverzeichnis	10
7	Verwendete und weiterführende Literatur	10



Dipl.-Ing. Alfred Mörx, OVE, IEEE (Reliability Society)

(*1958 in Wien) Fachautor und Leiter von virtuellen Workshops; langjähriger Inhaber und Leiter eines Ingenieurbüros für Physik mit dem Arbeitsschwerpunkt Risikoanalyse und Schutztechnik in komplexen technischen Systemen. Er studierte technische Physik an der TU-Wien. Als Experte für grundlegende Fragen der elektrotechnischen Sicherheit arbeitete er mehr als 35 Jahre in nationalen, europäischen und internationalen Arbeitsgruppen im Bereich sichere Elektrizitätsanwendung. Internet: www.diamcons.com , E-Mail: am@diamcons.com



Temperatur und Feuchte - Gefahrengrenzen für den menschlichen Körper

Alfred Mörx¹

1 Einleitung

In den letzten Jahren werden Ursachen und Auswirkungen von steigenden Temperaturen auf das Leben auf dem Planeten Erde stark polarisierend diskutiert.

Abseits der Ursachen und möglicher Verursacher von Temperaturerhöhungen, führen größere Werte der Trockenkugeltemperatur² (T_{tr}) in Verbindung mit der jeweils herrschenden relativen Luftfeuchte (φ) zu Belastungen (Hitzestress) für menschliches Leben³.

Ich versuche mich in diesem Aufsatz dem Thema in erster Linie naturwissenschaftlich-physikalisch anzunähern. Dazu gehört für mich vor allem eines: größtmögliche Klarheit über die Begriffe und Prozesse, die zu einem (unmittelbaren) Risiko für den menschlichen Körper durch die Temperatur an der Körperoberfläche und in der Körperumgebung führen.

Kurz: Von welcher Art von Temperatur sprechen wir überhaupt und welche (fatalen) Wirkungen auf unseren Körper gehen von diesen „Temperaturen“ aus?

Ich beginne mit der Betrachtung der meteorologischen Begriffe „Trockenkugeltemperatur“⁴ (T_{tr}) und „Feuchtkugeltemperatur“⁵ (T_f) und ihrer Bedeutung für den Wärmehaushalt des Menschen⁶. Danach folgen Überlegungen zu Temperatur und Wärmetransport.

2 Trockenkugeltemperatur, Feuchtkugeltemperatur, Verdunstungskühlung

Ich verstehe das Gesamtthema besser, wenn ich mir zunächst die Risiken von hohen Trockenkugeltemperaturen (T_{tr}) in Verbindung mit der relativen Luftfeuchtigkeit⁷ (φ) für den menschlichen Körper genauer ansehe. Dazu kommen die physikalischen Grundlagen des Wärmetransports aus der Fachliteratur der Medizinphysik und einschlägigen wissenschaftlichen Studien.

Das Verständnis für die Auswirkungen steigender Werte von T_{tr} , regional und international, fällt mir dann hoffentlich leicht.

¹ [Dipl.-Ing. Alfred Mörx](#), OVE, IEEE; freier Fachautor; www.diamcons.com, E-Mail: am@diamcons.com
Themenbezogene Interessenbindung der Autorin/des Autors: Keine

² Trockenkugeltemperatur T_{tr} ; Erläuterung des Begriffs siehe Abschnitt 2.1

³ Selbstverständlich gibt es auch Auswirkungen von Veränderungen der Temperatur auf das Leben von anderen Organismen, die natürlich wieder Auswirkungen auf das menschliche Leben haben und auch Auswirkungen von Temperaturänderungen in von Menschen unbewohnten Regionen; diese Zusammenhänge sollen in diesem Aufsatz bewusst nicht erläutert werden.

⁴ en: Dry-Bulb-Temperature, abgekürzt: T_{db} , DBT oder T_{tr} ; oft auch als Trockentemperatur bezeichnet

⁵ en: Wet-Bulb-Temperature, abgekürzt: T_{wb} , WBT oder T_f ; oft auch als Feuchtetemperatur bezeichnet

⁶ In der Kältetechnik wird die „Feuchtkugeltemperatur“ auch als „Kühlgrenztemperatur“ bezeichnet. Ebenso findet man in der Literatur den Begriff „Feuchtttemperatur“ an Stelle des Begriffs „Feuchtkugeltemperatur“.

⁷ Den Gehalt an Wasserdampf in der Luft bezeichnet man als *Luftfeuchtigkeit*. Dieser Gehalt kann als absoluter Feuchtigkeitsgehalt (f_a), z. B. als Wasserdampf in Gramm in einem bestimmten Volumen angegeben werden. Die *relative Feuchtigkeit* oder relative Feuchte (φ) ist das Verhältnis der absoluten Menge des Wasserdampfes zur Sättigungsmenge ($f_{a,max}$) bei der vorliegenden Temperatur (T_{tr}); [$\varphi = f_a / f_{a,max}$]



2.1 Trockenkugeltemperatur (Trockentemperatur, Lufttemperatur, T_{tr})

Die Temperatur als physikalische Grundgröße ist eine Möglichkeit die Empfindungen „kalt“, „warm“, „heiß“ des Menschen quantitativ zu erfassen.

Als Messgeräte können u.a. Ausdehnungsthermometer (z. B. Flüssigkeitsthermometer) verwendet werden. Das Vorratsgefäß mit der Messflüssigkeit (Thermometerflüssigkeit) ist meist kugelförmig ausgebildet. Daher auch die Bezeichnung „... Kugel ...“ in der Namensgebung der angezeigten Temperatur.

Die Trockenkugeltemperatur T_{tr} wird von einem Thermometer angezeigt, das in an einem von direkter Sonneneinstrahlung geschützter Ort in Luft angebracht ist. Das Thermometer muss trocken sein. Verwendet man im allgemeinen Sprachgebrauch und auch in Presseberichten den Begriff „Temperatur“, dann ist praktisch immer der Wert der Trockenkugeltemperatur gemeint.

2.2 Feuchtkugeltemperatur (Feuchtetemperatur, T_f)

Gleich vorab: Nicht allein die uns geläufigere Umgebungstemperatur (T_{tr}) der Luft entscheidet über die positive Wirkung des Schwitzens für das Wohlbefinden des menschlichen Körpers, sondern wesentlich die Feuchtkugeltemperatur⁸ T_f .

Ein Maß, wie gut durch Verdunstung gekühlt werden kann, ist die so genannte Feuchtkugeltemperatur T_f , ausgedrückt in Grad Celsius⁹.

Die Feuchtkugeltemperatur kann mit einem *Psychrometer*¹⁰ gemessen werden. Die Funktionsweise des Psychrometers veranschaulicht auch den Effekt der Kühlung durch Verdunstung bei relativen Feuchten φ kleiner 100 %.

Es sind zwei Thermometer in ein Gehäuse eingebaut durch das mittels Ventilator ein dauernder Luftstrom aus der Umgebung gesaugt wird (Bild 1). Dieser Luftstrom „umspült“ beide Vorratsgefäße mit den Messflüssigkeiten¹¹.

Das Vorratsgefäß der Messflüssigkeit des einen Thermometers (im Bild 1 rechts dargestellt) ist mit einer Hülle aus Filz oder einem anderen leichten Gewebe umgeben und wird mit Wasser von Umgebungstemperatur benetzt.

Das in der Hülle enthaltene Wasser verdunstet durch den vorbeiziehenden Luftstrom, die dazu notwendige Wärme wird (zu einem wesentlichen Teil¹²) der Messflüssigkeit entzogen; die Temperatur sinkt. Die vorbeiziehende Luft bewirkt das Abführen dieser Verdunstungswärme.

⁸ Es gibt noch weitere physikalische Einflussgrößen auf das menschliche Wohlbefinden, die ich hier bewusst nicht besprechen möchte.

⁹ oder in einer anderen (genormten) Temperatureinheit.

¹⁰ gr. psychros ... kühl, kalt

¹¹ Die Mindestgeschwindigkeit der vorbeiströmenden Luft beträgt 2 m/s.

¹² Genauer betrachtet wird die zum Verdunsten des Wassers benötigte Energie (Wärme) aus der inneren Energie der Luft, der Messflüssigkeit und des befeuchteten Filzes bereitgestellt. Ist der Wert von T_f erreicht, wird die Energie für das weitere Verdunsten des Wassers nur aus dem Luftstrom entnommen.



Es stellen sich nach einiger Zeit stabile Temperaturwerte auf den beiden Skalen T_{tr} und T_f ein. Der Wert der Feuchtkugeltemperatur (T_f) liegt - je nach relativer Feuchte der Luft mehr oder weniger - unterhalb dem Wert von T_{tr} .

In der Darstellung in Bild 1 kann als Beispiel für T_{tr} der Wert 20 °C und für T_f der Wert 9 °C abgelesen werden. Daraus lässt sich mittels der Grafik in Bild 2 der Wert von ϕ mit 20 % relativer Luftfeuchte ermitteln.

Mich interessiert hier jedoch der Vorgang der erzielten Abkühlung: Bei der in diesem Beispiel vorhandenen Luftfeuchte ϕ und einer Lufttemperatur T_{tr} von 20 °C wurde durch Verdunstung die Temperatur um 11 °C ($\Delta T = T_{tr} - T_f = 20 \text{ °C} - 9 \text{ °C} = 11 \text{ °C}$) auf $T_f = 9 \text{ °C}$ reduziert. Es erfolgte die Abkühlung der mit (verdunstendem) Wasser umgebenen Messflüssigkeit (menschlicher Schweiß besteht zu einem Großteil aus Wasser, siehe Abschnitt 3.3).

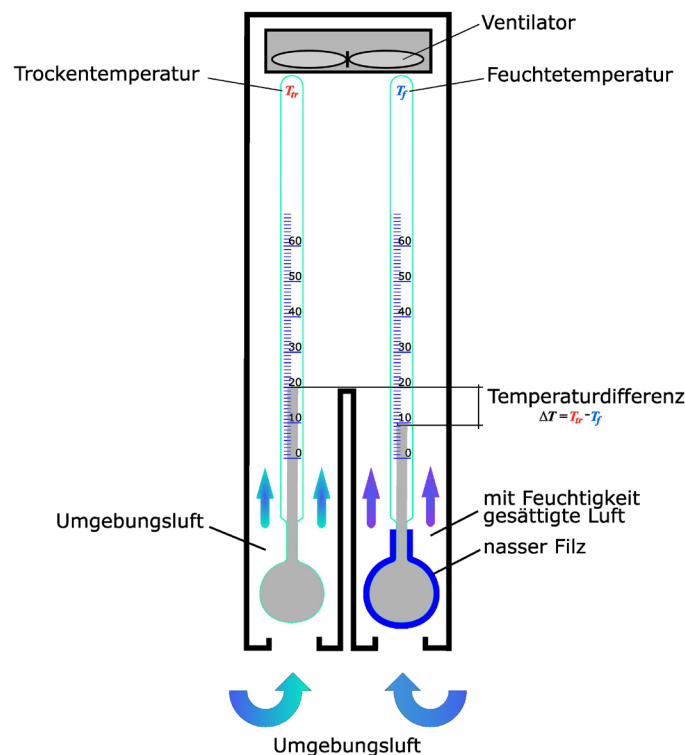


Bild 1 Funktionsprinzip eines Psychrometers nach Aßmann

Diese Grafik wurde von reado als gemeinfreies Werk hier veröffentlicht:

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?lang=de&title=File%3APsychrometer2.svg>

Lizenz der Grafik: CC BA-SA Alfred Mörx

T_f ist demnach ein Temperaturmaß, das auch die Feuchte der umgebenden Luft berücksichtigt. T_f ist die niedrigste Temperatur, die bei bekannter Lufttemperatur (T_{tr}) und relativer Feuchte (ϕ) durch Verdunstung erreicht werden kann. So kann (ein weiteres Beispiel) z. B. durch Verdunstung bei $\phi = 50 \%$ die Lufttemperatur von $T_{tr} = 48 \text{ °C}$ höchstens auf $T_f = 37 \text{ °C}$ abgesenkt werden (Bild 2).

Außerdem kann ich erkennen: Steigt die relative Feuchte der Luft bei konstanter Temperatur, *vermindert sich die Fähigkeit der Temperatursenkung durch Verdunstungskühlung*; T_f steigt und damit verringert sich auch die Möglichkeit des Körpers durch Verdunstung von Schweiß die Haut und damit den Körperkern zu kühlen (siehe dazu auch Abschnitt 3.4).

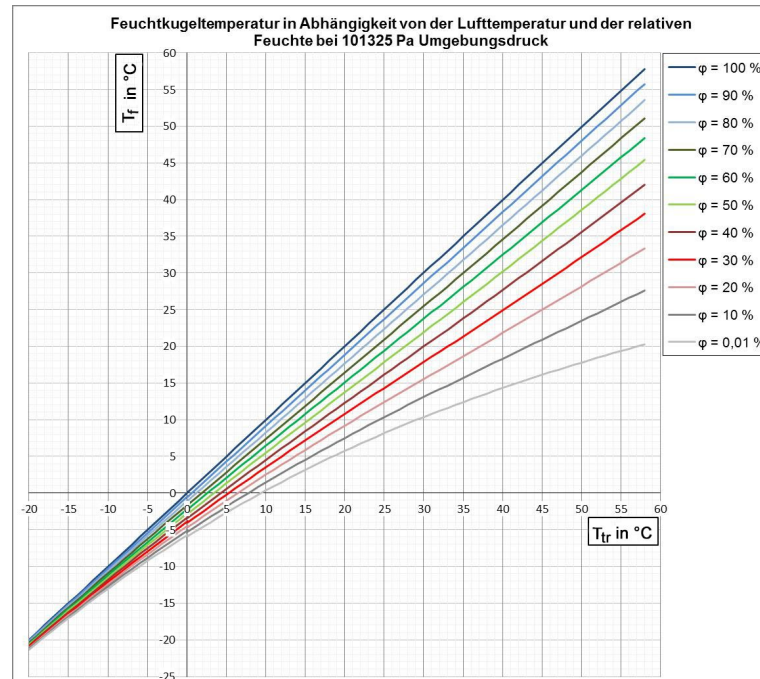


Bild 2 Verlauf der Temperatur T_f , auf die sich Luft der Temperatur T_{tr} bei einer relativen Feuchte φ durch Verdunstungskühlung bei einem Umgebungsluftdruck von 101325 Pa (mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe¹³) abkühlen lässt. Sie fällt mit sinkender Ausgangsfeuchte der Luft. D.h. ein Luftvolumen bestimmter relativer Feuchte kann mehr Wärme abgeben als die gleiche Menge Luft bei gleicher Ausgangstemperatur und gleichem Umgebungsluftdruck jedoch höherer relativer Feuchte.

Diese Grafik basiert auf der Grafik von VinDex, die unter [CC-BA-SA 4.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagramm_Feuchtkugeltemperatur.jpg) hier veröffentlicht wurde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagramm_Feuchtkugeltemperatur.jpg. Für die die Veröffentlichung in diesem Aufsatz wurden die Achsenbeschriftungen und die Bildbeschreibung von Alfred Mörx an die im Text verwendeten Bezeichnungen und Begriffe angepasst und ergänzt.

Lizenz der Grafik: CC BA-SA Alfred Mörx

3 Wärme im menschlichen Körper

3.1 Woher kommt die Wärme im menschlichen Körper?

Der menschliche Organismus erzeugt bei den in ihm ablaufenden Stoffwechselprozessen Wärme¹⁴; diese Stoffwechselprozesse können nur in einem relativ engen Temperaturbereich optimal ablaufen¹⁵.

¹³ Der mittlere Luftdruck auf Meereshöhe wird in vielen Tabellen und Grafiken als Bezugswert verwendet. Er beträgt an aktuellen Druckeinheiten 101 325 Pa (Pascal) bzw. 101,325 kPa bzw. 1013,25 hPa. In „alten“ Einheiten: 1 atm bzw. 1,013 bar oder 760 mmHg.

¹⁴ Koralewski, H.E.; Energiehaushalt und Temperaturregulation, B. Wärmehaushalt und Temperaturregulation; https://klinphys.charite.de/bioinfo/2_p-skripten/b4_b_waermehaushalt.pdf; abgerufen am 11.11.2024

¹⁵ Frank-Chris Schoebel; Wie reguliert der Mensch die Körpertemperatur; <https://www.cardiopraxis.de/wie-reguliert-der-mensch-die-koerpertemperatur>; abgerufen am 23.7.2024



3.2 Die Körpertemperatur

Der Mensch ist ein so genanntes „gleichwarmes Lebewesen“. Das bedeutet, dass sich die Körpertemperatur nicht an die Umgebungstemperatur anpasst. Im Körper laufen (komplexe) Prozesse zur Aufrechterhaltung der jeweils „optimalen“ Körpertemperatur ab. Neben dem Menschen besitzen z. B. auch Vögel und Hunde diese Eigenschaften¹⁶.

Wenn man von *der Körpertemperatur* des Menschen spricht, muss zwischen der Temperatur des *Körperkerns*, d.h. der Temperatur im Inneren von Rumpf und Schädel und der Temperatur der *Körperschale*, der Bereiche außerhalb des Körperkerns unterschieden werden¹⁷.

Die Temperatur des Körperkerns muss dabei - gemäß neueren Erfahrungen¹⁸ - im Bereich von $36,5\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$ bleiben. Liegt die Temperatur des Körperkerns über längere Zeit bei Werten über 41 °C , führt dies zu zerebralen Schäden; bei Werten über 43 °C tritt der Tod durch Hitzschlag ein¹⁹.

Die Körperkerntemperatur wird durch Transport von Wärme vom Inneren des Körpers (z. B. über das Blut) in die Umgebung konstant gehalten²⁰.

3.3 Regulierung der Körpertemperatur

Der Stoffwechsel des Menschen erzeugt Wärme, die u. a. über die Haut an die Umgebung abgeführt werden muss, um den Körperkern auf einer Temperatur *im Bereich von $36,5\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$* zu halten. Für diesen Prozess des Wärmeaustausches mit der Umgebung stehen dem Körper mehrere Methoden zur Verfügung: Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung, Ausscheidung von Urin und Kot, sowie Verdunstung von Schweiß²¹.

Schweiß entsteht durch die Fähigkeit des menschlichen Körpers, auf der Oberfläche der Haut eine vorwiegend aus Wasser bestehende Flüssigkeit zu bilden.

Dieses Wasser - entsprechende Umgebungsbedingungen vorausgesetzt (siehe Abschnitt 2.2) - verdunstet; die zum Vorgang der Verdunstung benötigte Wärmemenge (Energie) kühlt die Hautoberfläche.

¹⁶ Neben „gleichwarmen“ (homoiotherme) Lebewesen gibt es auch noch so genannte „wechselwarme“ (poikilotherme) Lebewesen, deren Körpertemperatur jeweils ungefähr jener der Umgebung entspricht. Beispiele dafür sind Fische, Schlangen, Insekten und auch alle Pflanzen.

¹⁷ Quelle: <https://viamedici.thieme.de/lernmodul/542951/530968/k%C3%B6rperpertemperatur>; abgerufen am 19.6.2024

¹⁸ Quelle: <https://www.cardiopraxis.de/normale-koerpertemperatur-mensch/>, abgerufen am 11.11.2024

¹⁹ Tritthart, Helmut A., Physik und Biophysik für Mediziner; Seite 218, 2. Auflage; Verlag Schattauer GmbH, Stuttgart 2011

²⁰ Dabei „verbraucht“ der Körper unter bestimmten Umständen bis zu 70 % der täglichen Energieaufnahme.

²¹ Tritthart, Helmut A.; Physik und Biophysik für Mediziner; Seite 228, 2. Auflage; Verlag Schattauer GmbH, Stuttgart; 2011.



3.4 Kühlung durch Verdunstung von Schweiß

Die Fähigkeit der Temperaturregulierung durch Verdunsten von Schweiß ist vor allem beim Menschen effektiv ausgebildet²², da der Mensch praktisch als einziges Lebewesen *auf der gesamten Hautoberfläche* Schweißdrüsen besitzt²³.

Die Bedeutung der Verdunstung wird in der Literatur manchmal als „Reservemechanismus“ beschrieben, dessen Bedeutung *jedoch keinesfalls unterschätzt* werden darf.

Dr. Frank-Chris Schoebel²⁴, Kardiologe in Düsseldorf und Meerbusch beschreibt die Bedeutung der Verdunstung wie folgt:

„Die Verdunstung von Körperflüssigkeit macht im Bereich der menschlichen Wohlfühltemperatur ca. 15% der Wärmeabgabe aus und kann bei steigenden Temperaturen bis zu 100% betragen. Die Wärmeabgabe erfolgt hier über die Atemluft, aber vor allen Dingen durch das Schwitzen.

Das Schwitzen wird von Menschen als der Hauptmechanismus der Wärmeregulierung wahrgenommen, was nicht richtig ist, weil bereits viel früher eine Regulierung über die Durchblutung stattfindet. In diesem Sinne ist Schwitzen bei der Wärmeregulierung ein Reservemechanismus.“

Den Vorgang des Verdunstens bezeichnet man in der Physik als Phasenübergang. Wasser geht aus der flüssigen Phase in die gasförmige Phase über. Für diesen Übergang benötigt das Wasser Energie (Wärme), diese kommt aus der Haut und der umgebenden Luft. Bei diesem Vorgang, für den man oft auch die Bezeichnung „Verdunstungskühlung“ verwendet, stehen das Wasser und die *ungesättigte feuchte Luft* in einem Wärme- und Stoffaustausch (siehe Abschnitt 2.2) .

Je nach Trockenkugeltemperatur²⁵ T_{tr} und der Feuchtigkeit φ der Luft, ist eine mehr oder weniger große Abkühlung der Haut (und damit der Körperschale und des Körperkerns) möglich.

Dies bedeutet, dass zur *Beschreibung bzw. Beurteilung der Gefährdung des menschlichen Körpers durch „hohe Temperaturen“* unbedingt (mindestens) auch die Berücksichtigung der Feuchtigkeit der den Körper umgebenden Luft notwendig ist²⁶.

²² Spektrum.de, Lexikon der Biologie; <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/schwitzen/60338>; abgerufen am 23.7.2024

²³ Waltner, C., Wiesner, H., & Colicchia, G. (2010). Die Energiebilanz des Menschen. PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung. Abgerufen von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/137>

²⁴ Schoebel, Frank-Chris; Wie reguliert der Mensch die Körpertemperatur? <https://www.cardiopraxis.de/wie-reguliert-der-mensch-die-koerpertemperatur/>; abgerufen am 19.11.2024

²⁵ In der Umgangssprache wird diese in praktisch allen Nachrichtensendungen auch im Zusammenhang mit der Belastung des menschlichen Körpers nicht ganz genau als Temperatur, Lufttemperatur oder Umgebungstemperatur bezeichnet. Insbesondere in Berichten, wo es um den zeitlichen Verlauf der Feuchtkugeltemperatur geht, wäre die Angabe von T_f von großem Vorteil!

²⁶ Diese beiden Kennzahlen sind jedenfalls wichtig, aber es gibt noch weitere Einflussgrößen auf das Risiko für den menschlichen Körper, das von steigenden Werten von T_f ausgeht.



Wie gut die „Kühlung durch Verdunstung von Schweiß“ funktioniert, anders formuliert, um wieviel Wärme durch diesen Mechanismus der Haut entzogen werden kann, hängt von der Umgebungstemperatur, der Feuchte und der Geschwindigkeit der vorbeiströmenden Luft ab. Die Menge der Wärme, die der Haut entzogen werden kann ist wieder ein Maß dafür, welchen Beitrag die Verdunstung an der Haut zur Kühlung des Körperkerns beitragen kann.

Ganz allgemein gilt: Ist die Feuchte der Luft niedrig (z. B. $\varphi = 20\%$ rel. F.), so kann bei gleicher Lufttemperatur T_{tr} der Haut mehr Wärme entzogen werden als bei hoher Feuchte (z. B. $\varphi = 80\%$ rel. F.).

Das heißt, der Beitrag der Verdunstung zur Kühlung des Körperkerns ist bei kleinen Werten der Feuchte größer als bei großen Werten der Feuchte²⁷ (und sonst unveränderten Einflussgrößen²⁸).

4 Gefahrengrenzen und neuere Untersuchungen

Wenn der Körperkern nicht im Sollwert-Bereich ($36,5\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$) gehalten bzw. in den Sollwert-Bereich zurückgeführt werden kann, entsteht gefährlicher thermischer Stress (Hitzestress, Hyperthermie) mit massivem Einfluss auf das Herz-Kreislaufsystem.

Die im Jahr 2010 veröffentlichten physiologischen Überlegungen²⁹, dass die Anpassung der Körperkerntemperatur durch den Organismus bis zum maximalen Wert von $T_f = 35\text{ °C}$ möglich ist, bis es zum Hitzestress (Hitzekrämpfe, Hitzeerschöpfung, Hitzschlag) kommt, scheinen durch neuere Untersuchungen³⁰ überholt.

Experimentelle Untersuchungen³¹, in denen durch die Versuchsteilnehmer Grundaktivitäten des täglichen Lebens nachgebildet wurden³², lagen die für die Teilnehmer kritischen T_f -Werte, je nachdem, ob heiß-trockene Umgebungsbedingungen (kritische T_f -Werte: 25 °C bis 28 °C) oder warm-feuchte Bedingungen (kritische T_f -Werte: 30 °C bis 31 °C) vorlagen, deutlich unter dem bisher theoretisch angenommenen kritischen Wert von $T_f = 35\text{ °C}$. Kritisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine ausreichende Ableitung der Wärme, die durch den Stoffwechsel und weitere Einflüsse aus der Umwelt (z. B. Wärme aus direkter und indirekter Strahlung, Windgeschwindigkeit) im Körper entsteht, in die Umgebung nicht mehr ausreichend möglich ist.

²⁷ Immer bei gleicher Umgebungstemperatur und gleichem Luftdruck.

²⁸ siehe zu weiteren Einflussgrößen auch: Vecellio, Daniel J., Wolf, Tony S., Cottle, Rachel M., Kenney, Larry., Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project); Journal of Applied Physiology; 2022; <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00738.2021>; abgerufen am 16.4.2024

²⁹ Sherwood, Steven C., Huber, Matthew; An adaptability limit to climate change due to heat stress; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; PNAS vol 107, no. 21; 2010; www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0913352107; abgerufen am 17.6.2024

³⁰ Vecellio, Daniel J., Wolf, Tony S., Cottle, Rachel M., Kenney, Larry., Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project); Journal of Applied Physiology; 2022; <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00738.2021>; abgerufen am 16.4.2024

³¹ Wolf, Tony S., Cottle, Rachel M., Vecellio, Daniel J., Kenney, Larry; Critical environmental limits for young, healthy adults (PSU HEAT Project); Journal of Applied Physiology; 2022; <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00737.2021>; abgerufen am 12.11.2024

³² Bewegung der Teilnehmer bei niedrigen Stoffwechselraten unter kontrollierten Umgebungsbedingungen.



Der früher (2010) theoretisch vorhergesagte für Menschen kritische Grenzwert von $T_f = 35\text{ °C}$ ist demnach *nicht für alle klimatischen Bedingungen und alle Regionen der Welt anwendbar* und kann unter bestimmten Bedingungen *deutlich unterhalb von 35 °C* liegen.

5 Zusammenfassung

Damit bleibt für mich als Zusammenfassung meiner Überlegungen, dass

- für eine qualifizierte Beurteilung der gesundheitlichen Beeinflussung des Menschen durch Umgebungswärme und alle daraus möglicherweise abzuleitenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Konsequenzen und vergleichenden Betrachtungen, an Stelle der Umgebungstemperatur (T_{tr}) jedenfalls die Feuchtkugeltemperatur (T_f) heranzuziehen ist und
- nach dem neueren Stand des (experimentellen, physiologischen) Wissens ab Werten zwischen $T_f = 25\text{ °C}$ und 28 °C in heiß-trockener Umgebung und ab Werten zwischen $T_f = 30\text{ °C}$ und 31 °C in warm-feuchten Umgebungen mit heftigen Reaktionen des Körpers infolge auftretendem Hitzestress zu rechnen ist.

6 Verwendete Formelzeichen / Symbolverzeichnis

DBT, T_{db} , T_{tr}	Dry-Bulb-Temperature, Trockenkugeltemperatur, Trockentemperatur, Temperatur, Umgebungstemperatur
WBD, T_{wb} , T_f	Wet-Bulb-Temperature, Feuchtkugeltemperatur, Feuchtetemperatur
φ	Luftfeuchtigkeit, relative Feuchte
f_a	Luftfeuchtigkeit, absolute Feuchte
$f_{a,max}$	Sättigungsmenge, absolute Feuchte bei der Temperatur T_{tr}

7 Verwendete und weiterführende Literatur

- [1] Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik Band I, Mechanik, Akustik, Wärme, S 717 - 720; 9. Auflage; Walter de Gruyter & Co., 1974
- [2] Meschede, Dieter; Gerthsen Physik; S 262-263, 21. Auflage; Sonderausgabe Weltbild Verlag; 2002
- [3] Tritthart, Helmut A., Physik und Biophysik für Mediziner; Seite 218, 2. Auflage; Verlag Schattauer GmbH, Stuttgart 2011
- [4] Sherwood, Steven C., Huber, Matthew; An adaptability limit to climate change due to heat stress; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; PNAS vol 107, no. 21; 2010; www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0913352107; abgerufen am 17.6.2024
- [5] Vecellio, Daniel J., Wolf, Tony S., Cottle, Rachel M., Kenney, Larry., Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project); Journal of Applied Physiology; 2022; <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00738.2021>; abgerufen am 16.4.2024



- [6] Wolf, Tony S., Cottle, Rachel M., Vecellio, Daniel J., Kenney, Larry; Critical environmental limits for young, healthy adults (PSU HEAT Project); Journal of Applied Physiology; 2022; <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00737.2021>; abgerufen am 12.11.2024
- [7] Waltner, C., Wiesner, H., & Colicchia, G. (2010). Die Energiebilanz des Menschen. PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung. Abgerufen von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/137>; abgerufen am 19.6.2024
-

2024-11-25/AM