

26

Physiologie

Hanns-Christian Gunga, Martina A. Maggioni und
Camilla Kienast

26.1 Physiologische Grundlagen

Der Mensch gehört zu den endothermen Organismen (Säugetiere, Vögel), die im Gegensatz zu wechselwarmen Lebewesen, z.B. Reptilien, nicht von der Umgebungstemperatur abhängig sind. Diese Organismen haben einen hohen Energieumsatz und können ihre Temperatur im Körperkern innerhalb eines weiten Bereichs unterschiedlicher Umgebungstemperaturen konstant halten; allerdings werden Abweichungen nur in einem sehr geringen Schwankungsbereich toleriert (Gunga 2021). Diese sogenannte Normaltemperatur im Körperkern liegt beim Menschen zwischen 36,4 und 37,4°C. Unter Grundumsatzbedingungen wird die Körperkerntemperatur durch die sehr stoffwechselaktiven Organe in der Schädel-, Brust- und Bauchhöhle aufrechterhalten. In Ruhe werden rund 80% der Wärme in den inneren Organen gebildet, während die übrigen Körperteile nur etwa 20% dazu beitragen. Bei körperlicher Arbeit ändern sich die Anteile der Wärmebildung grundsätzlich. Unter diesen Bedingungen sind bis zu 90% der gesamten Wärmebildung auf die arbeitende Muskulatur zurückzuführen, und die Gewebetemperaturen in der arbeitenden Muskulatur können dann deutlich über der Körperkerntemperatur liegen. Für den Wärmeabtransport vom Körperkern zur Körperschale (Haut) und von dort an die Umgebung stehen physikalisch vier Mechanismen zur Verfügung (Parsons 2003):

1. Konvektion,
2. Konduktion,
3. Evaporation (Schweiß) und
4. Strahlung, in Form von elektromagnetischer Infrarotstrahlung (s. Abb. 1).

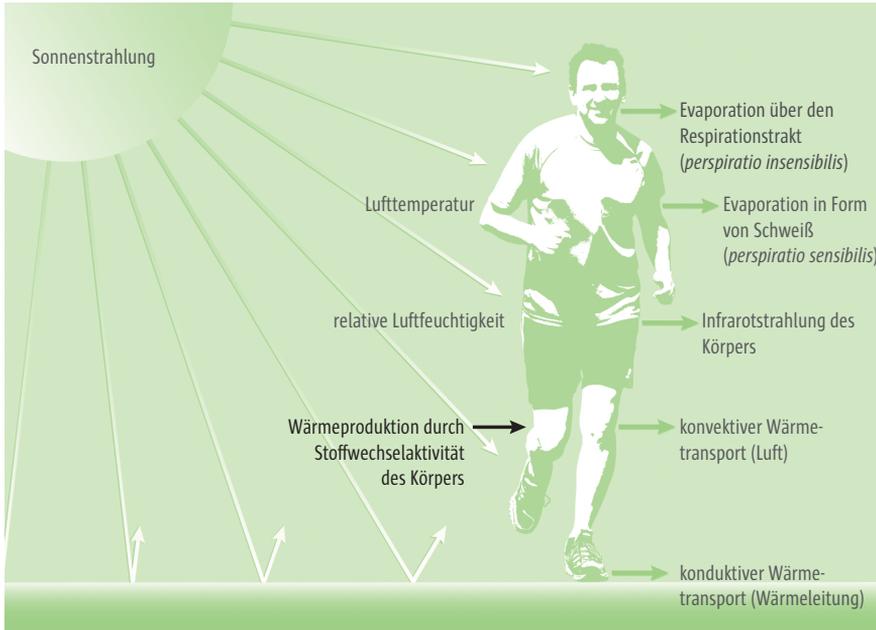


Abb. 1 Formen der Wärmezufuhr und Wärmeabgabe beim Menschen

Unter Ruhebedingungen bei moderater Außentemperatur (20°C) und geringer Windbewegung überwiegen die Wärmeverluste durch Strahlung (60%). Wärmeverluste durch Evaporation (20%) sowie Konvektion und Konduktion (20%) spielen eine untergeordnete Rolle (Kenefick u. Leon 2012). Unter wärmeren Umgebungstemperaturen (28°C) ist der Organismus zunehmend auf die Verdunstung von Schweiß angewiesen. Die produzierten Schweißmengen bei gesunden, gut trainierten Männern können bis über 3 Liter pro Stunde betragen. Dabei können mithilfe vollständiger Evaporation pro Liter Schweiß dem Körper 560 kcal an Wärme entzogen werden, ein dadurch äußerst effektiver Mechanismus. Hinzu kommt, dass unter Wärmebelastung sich gleichzeitig der Bereich der Körperkerntemperatur vergrößert und der der Körperschale (Haut) verringert (Pandolf et al. 1988). Es ist in diesem Zusammenhang wichtig die thermische Neutralzone (25–30°C) von einer Indifferenztemperatur zu unterscheiden.

Die thermische Neutralzone ist der Temperaturbereich, in dem durch die Anpassung der Hautdurchblutung eine ausgeglichene Wärmebilanz des Organismus erzielt werden kann.

Weitere Parameter wie Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlungstemperaturen wie auch die Art der Bekleidung beeinflussen zusätzlich das „Mikroklima“ in unmittelbarer Nähe der Haut. Die Indifferenztemperatur ist der Bereich, der als behaglich empfunden wird, und entspricht für den gesunden, unbedeckten und ruhenden Erwachsenen unter Grundumsatzbedingungen, bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% und nahezu unbewegter Luft (Windgeschwindigkeit 0,1 m/s)

einer Lufttemperatur von 27–31°C und liegt damit an der oberen Grenze der thermischen Neutralzone (Gunga u. Steinach 2019).

Bei schwerer körperlicher Arbeit, vor allem unter feuchtheißen Umgebungsbedingungen, verschiebt sich die thermische Neutralzone zu tieferen Temperaturen, der Grenzwert wird also früher überschritten. Denn je höher der Wasserdampfdruck in der Atmosphäre ist (schwüle Luft, Tropenklima, Regenzeit) und je geringer die Luftbewegungen sind, umso schwieriger wird die Wärmeabgabe durch Evaporation. Die sogenannte Feuchtkugel-Globustemperatur (*Wet-Bulb-Globe-Temperature* – WBGT) berücksichtigt diesen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit und erfasst darüber hinaus auch noch die Strahlungstemperaturen. Die WBGT ist aus diesem Grund wesentlich besser geeignet, die physiologische Belastung für den Körper zu erfassen, als die reine Angabe der Lufttemperatur. Ist die relative Luftfeuchtigkeit gering (Wüstenklima, Trockenzeit), kann der Mensch durchaus kurzfristig hohe Lufttemperaturen tolerieren. Ein feuchtheißes Klima führt zwar gleichfalls zur Bildung großer Schweißmengen, diese sammeln sich aber nur auf der Hautoberfläche und tropfen zu Boden oder durchfeuchten die Kleidung. Die Verdampfung bleibt aus und damit auch die Kühlung der Körperschale. Da die Muskulatur im Wesentlichen in den Extremitäten liegt, kann ein Teil der anfallenden Wärmemenge vorzugsweise gleich vor Ort an die Umgebung abgegeben werden. Die hohe Durchblutung des arbeitenden Muskels dient dabei sowohl dem An- und Abtransport von Stoffwechselprodukten als auch dem Transport von überschüssiger Wärme. Einen wichtigen Beitrag hierzu liefert vor allem die Öffnung von zahlreichen arteriovenösen Anastomosen in der Haut und den Akren („*thermal windows*“), die den Wärmetransport von der verbliebenen dünnen Körperschale an die Umgebung beschleunigen (Parsons 2003). Allerdings führt diese Öffnung der arteriovenösen Anastomosen zu einer weiteren Verlagerung des Blutvolumens in die Peripherie (Haut) und unter Umständen zu einer bedrohlichen Abnahme des zentralen Blutvolumens, was die physische Leistungsfähigkeit einschränkt und das Auftreten von Herz-Kreislauf-Beschwerden begünstigt. Zusätzlich führen die Flüssigkeitsverluste durch eine gesteigerte Schweißdrüsenaktivität zu einem verminderten Blutvolumen, was die Herz-Kreislauf-Belastung unter Hitzebelastung verschärft (Gunga u. Steinach 2019). Abbildung 2 fasst schematisch die gesundheitlichen Belastungen des Individuums als auch deren Auswirkungen auf die Gesellschaft zusammen. Im folgenden Abschnitt soll exemplarisch am Beispiel der Region Sub-Sahara verdeutlicht werden, mit welchen dramatischen Auswirkungen bei einer Temperaturerhöhung der WBGT um nur zwei Grad zu rechnen ist.

26.2 Die Auswirkungen des Klimawandels in der Sub-Sahara (SSA)

Steigende Temperaturen und Hitzewellen sind Folgen des Klimawandels. Das Ausmaß der Erwärmung ist jedoch je nach geografischer Lage global sehr unterschiedlich. Je näher am Äquator, je höher und je mehr von Land umgeben, desto höher sind die projizierten Temperaturen (Kjellstrom et al. 2016). In Subsahara-Afrika (SSA) stellt eine übermäßige Hitzeexposition bereits ein wichtiges Gesundheitsrisiko dar und ist dort tödlicher als in anderen Teilen der Welt (Smith et al. 2014; Woodward et al. 2014). Tatsächlich schätzen einige Forscher die Belastung des Klimawandels in Abhängigkeit von den verschiedenen Szenarien im Vergleich zu früheren Perioden um ein Vielfaches höher als in früheren Jahrzehnten (Scott et al. 2017).

Wir haben es in den äquatorialen Gebieten der SSA nach aktuellen Klimamodellen in den nächsten Jahrzehnten zumindest mit einem Anstieg von etwa 1-2°C zu tun (Smith et al. 2014). Selbst geringfügige Abweichungen ($\pm 1,5^\circ\text{C}$) können die physiologischen Funktionen stark beeinträchtigen und zu erheblichen Veränderungen der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit führen, während größere Abweichungen ($> 4^\circ\text{C}$) u.U. lebensbedrohlich sind (Pandolf et al. 1988; Kenefick u. Leon 2012). Jede weitere

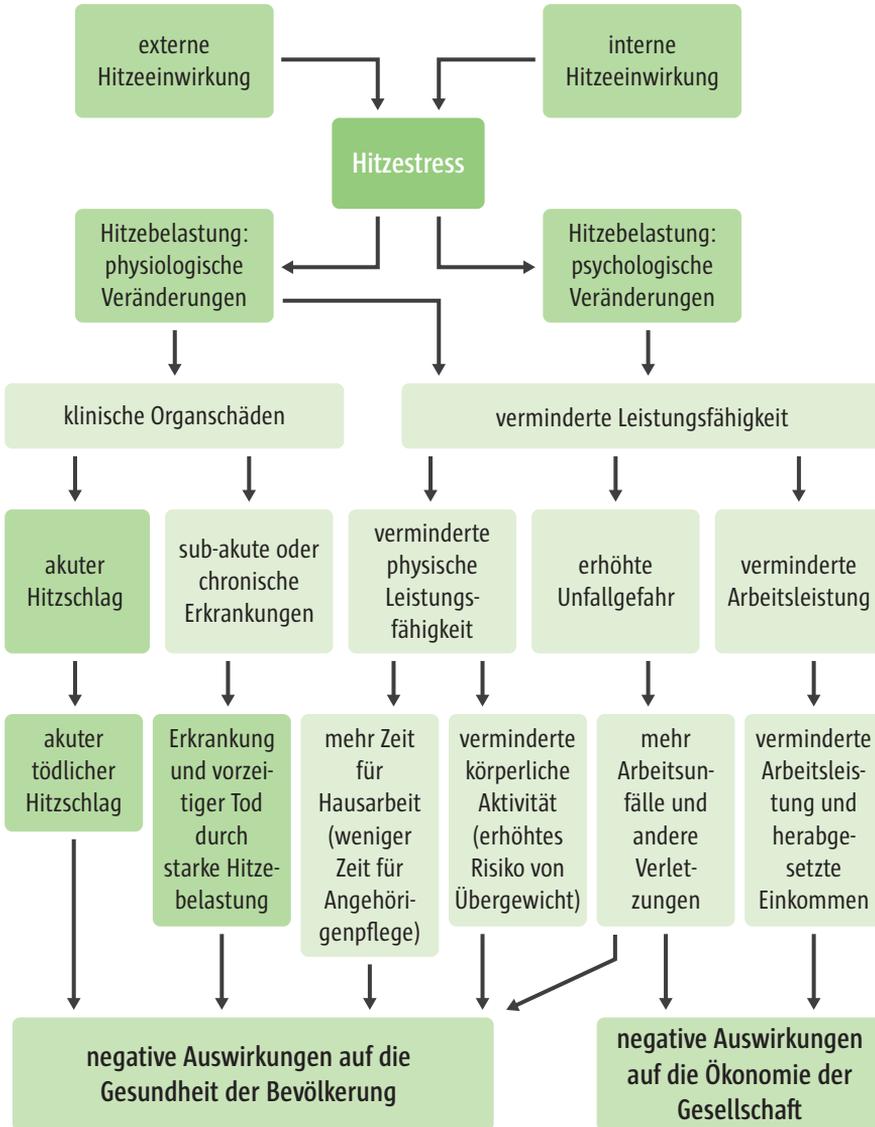


Abb. 2 Vereinfachte Darstellung der kausalen Zusammenhänge zwischen Hitzebelastung und den Auswirkungen auf das Individuum sowie die Gesellschaft (verändert nach Kjellstrom et al. 2016 mit freundlicher Genehmigung von Annual Review of Public Health, Volume 37 © 2016 by Annual Reviews, <http://www.annualreviews.org>)

Wärmebelastung kann nur für einen sehr begrenzten Zeitraum toleriert werden, hauptsächlich weil die Evaporation als effektivstes Kühlsystem bei hohen Umgebungstemperaturen, hoher relativer Luftfeuchtigkeit und Strahlung immer ineffizienter wird. Daher wirkt selbst ein geringfügiger kontinuierlicher Anstieg der Umgebungstemperaturen in SSA sich direkt auf die Gesundheit aus und verursacht verschiedene Hitzeerkrankungen, die von Dehydration, kardiovaskulärem Hitzestress, körperlichen und geistigen Beeinträchtigungen, Erschöpfung bis hin zum Hitzschlag reichen können. Darüber hinaus ist eine erhebliche Verringerung der Arbeitsfähigkeit und der damit verbundenen Arbeitsproduktivität zu erwarten. Dieses Problem wurde bereits in der Vergangenheit von mehreren Forschungsteams angesprochen (Dunne et al. 2013; Lundgren et al. 2013; Kjellstrom et al. 2016; Sahu et al. 2013; Smith et al. 2014; WHO 2014; Liu et al. 2017).

Mehreren Studien zufolge kann die weltweite Zahl der durch den Klimawandel verursachten Todesfälle durch Hitzschlag am Arbeitsplatz im Jahr 2030 zwischen 12.000–30.000 und im Jahr 2050 vermutlich bereits zwischen 26.000–54.000 liegen; nicht tödlich verlaufende Hitzeschläge werden im Jahr 2030 zwischen 35.000–65.000 Fälle betragen und im Jahr 2050 auf 40.000–73.000 ansteigen. Auch die Anzahl der Hitzeerschöpfungen soll in den kommenden Jahren steigen. Aufgrund des Klimawandels wird im Jahr 2030 weltweit mit mehr als 20 Millionen Fällen gerechnet, möglicherweise mit 40 Millionen Fällen im Jahr 2050. Dies würde abhängig vom verwendeten Klimamodell 2030 zu einem weltweiten Verlust der Arbeitskraft von 1,0 bis 1,7% und im Jahr 2050 von 1,7–2,4% führen (Berry et al. 2010; Kjellstrom et al. 2007, 2016; Kjellstrom 2012, 2016). Die Angaben dieser Autoren mögen wie kleine Veränderungen aussehen, aber in den schlimmsten betroffenen Regionen, Südasien und Westafrika, liegen die geschätzten jährlichen Arbeitskraftverluste mindestens doppelt so hoch.

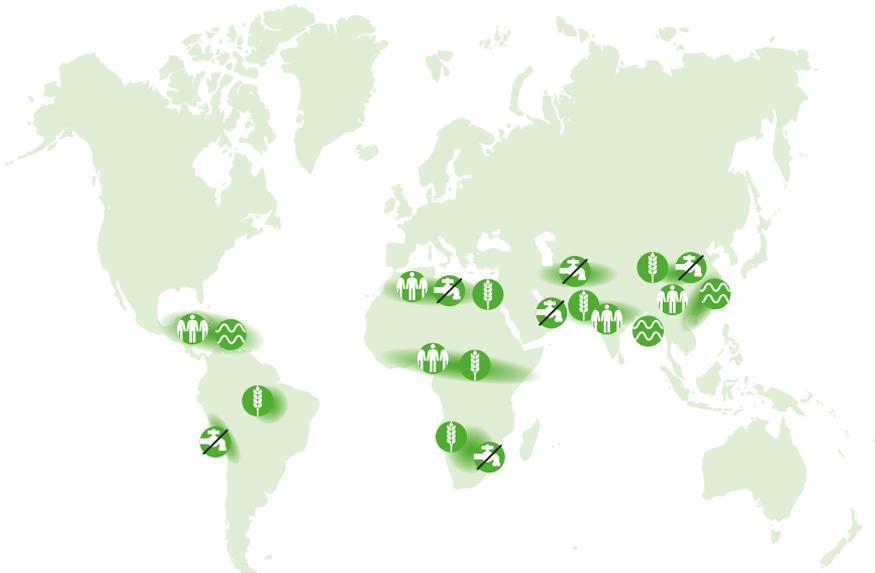
Um die Leistungseinbußen bei unterschiedlichen Klimabedingungen beurteilen zu können, wurden in den zurückliegenden 50 Jahren zahlreiche physiologische Indizes entwickelt. Die WBGT berücksichtigt, wie geschildert, alle oben genannten Umweltfaktoren und summiert sie zu einem einzigen Index. Er ist der am häufigsten verwendete Index zur Beurteilung von Hitzestress beim Menschen und zur Empfehlung von Ruhe-Arbeits-Zyklen bei unterschiedlichen körperlichen Arbeitsintensitäten, insbesondere unter heißen und feuchten Bedingungen. Dementsprechend verwendet auch die internationale Organisation für Normung ISO 7243: 2017 diesen Index als Screening-Methode zur Bewertung der Wärmebelastung, der eine Person (jeglichen Geschlechts) im Innen- und Außenbereich während eines regulären Arbeitstags von acht Stunden ausgesetzt ist.

Frühere Studien konnten zeigen, dass, wenn die stündliche WBGT 26°C überschreitet, die stündliche Arbeitsfähigkeit bei schweren Arbeiten verringert wird und über 32°C jede Arbeitsfähigkeit beeinträchtigt ist; individuell kann die stündliche Arbeitsfähigkeit je nach Alter, Geschlecht, Flüssigkeitszufuhr und Fitnessniveau sogar noch niedriger sein (Bar-Or 1998; Gunga 2021; Havenith et al. 2008; Shapiro et al. 1981; Larose et al. 2013; Pandolf et al. 1988; ISO 2017; Sawka et al. 2011; Sen u. Nag 2019).

Dementsprechend kann in den heißen, äquatorialen Regionen dieser Erde (z.B. SSA) insbesondere in den Sommermonaten schwere körperliche Arbeit (> 300 Watt) nur noch eingeschränkt oder mit größeren Ruhepausen durchgeführt werden (Berry et al. 2010; Bröde et al. 2018; Gunga 2021; Parsons 2003; Smith et al. 2014). Es ist offensichtlich, dass das Ausmaß des Verlusts der Arbeitsfähigkeit von der Art der Arbeit, der Arbeitsintensität sowie von der Umgebung abhängt.

Eine Analyse der Herzfrequenz unter Ruhe und Arbeit sowie eine parallele Erfassung der Körpertemperatur könnte zur Beurteilung der Belastung herangezogen werden. Nach aktuellem Kenntnisstand wurde bisher keine einzige Studie dieser Art in SSA durchgeführt. Im Rahmen des DFG-FOR_2936 *Klimawandel und Gesundheit in Afrika südlich der Sahara: Teilprojekt P4*. „Climate change, heat stress and its impact on health and work capacity“ soll u. a. genau dies untersucht werden. Eine entsprechende Datenaufnahme hat in Burkina Faso gerade begonnen. Kontinuierlich, über zwei Jahre, werden dabei mit Datenloggern Aktivitäts- und Ruhephasen erfasst sowie monatlich kardiovaskuläre Parameter und die Körperkerntemperatur von Männern und Frauen gemessen.

Bekanntlich betreibt ein Großteil der Menschen in SSA Subsistenzlandwirtschaft, während laut Agra-Bericht nur ein geringer Teil der landwirtschaftlichen Produkte für kleine lokale Marktunternehmen verwendet werden kann, manchmal weniger als 10% (AGRA 2017). Laut diesem jüngsten Bericht sind „Subsistenzlandwirte in der Regel am stärksten gefährdet und anfällig für Klimarisiken“. Das ist ein zentraler Punkt: Jede weitere Verringerung der Arbeitsfähigkeit durch den Klimawandel hat vielfältige Auswirkungen auf die wirtschaftliche, soziale Lage und nicht zuletzt auf die Gesundheit. Diese Entwicklung in der SSA ist exemplarisch für andere Regionen im äquatorialen Bereich, wie in Abbildung 3 dargestellt. Wassermangel, Nahrungsmangel, zunehmende gesellschaftliche Instabilität und Migrationsbewegungen



Konfliktkonstellationen in ausgewählten Brennpunkten

-  Brennpunkt
-  klimabedingte Degradation von Süßwasserressourcen
-  klimabedingter Rückgang der Nahrungsmittelproduktion
-  klimabedingte Zunahme von Sturm- und Flutkatastrophen
-  umweltbedingte Migration

Abb. 3 Auswirkungen des Klimawandels in der Sub-Sahara und anderen äquatorialen Regionen (adaptiert nach WBGU 2007, mit freundlicher Genehmigung des WBGU)

II Auswirkungen auf die Fachdisziplinen

werden die Folge sein. Da in SSA traditionell Frauen die Feldarbeit betreiben, anders als in Nordafrika, Europa und Asien (Deutscher Bundestag 2019), werden sie folglich durch den Klimawandel stärker gesundheitlich gefährdet sein als Männer.

Literatur

- Alliance for a Green Revolution in Africa (AGRA) (2017) Africa Agriculture Status Report: The Business of Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa (Issue 5). Nairobi, Kenya
- Bar-Or O (1998) Effects of Age and Gender on Sweating Pattern During Exercise. *Int J Sports Med* 19(2), 106–107
- Berry HL, Bowen K, Kjellstrom T (2010) Climate Change and Mental Health: A Causal Pathway. Framework. *Int J Public Health* 55(2), 123–132
- Bröde P, Fiala D, Lemke B, Kjellstrom T (2018) Estimated Work Ability in Warm Outdoor Environments Depends on the Chosen Heat Stress Assessment Metric. *Int J Biometeorol* 62(3), 331–345
- Deutscher Bundestag (2019) Wissenschaftliche Dienste. Demografische Entwicklungen auf dem afrikanischen Kontinent, WD 2–3000–059/19
- Dunne JP, Stouffer RJ, John JG (2013) Reductions in Labour Capacity from Heat Stress Under Climate Warming. *Nat Clim Change* 3(6), 563–566
- Gunga HC, Steinach M (2019) Wärmehaushalt und Temperaturregulation. In: Speckmann EJ, Hescheler J, Köhling R (Hrsg.) *Physiologie*. 7. Aufl. 625–650. Elsevier, Urban & Fischer
- Gunga, HC (2021) *Human Physiology in Extreme Environments*. Elsevier Science Amsterdam
- Havenith G, Fogarty A, Bartlett R, Smith CJ, Ventenat V (2008) Male and Female Upper Body Sweat Distribution During Running Measured with Technical Absorbents. *Eur J Appl Physiol* 104(2), 245–255
- ISO 7243 (2017) (Preview) Ergonomics of the Thermal Environment – Assessment of Heat Stress Using the WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) Index. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/67188.html> (abgerufen am 22.07.2021)
- Kenefick RW, Leon LR (2012) Pathophysiology of Heat-Related Illnesses. In: Auerbach PS (Hrsg.) *Wilderness Medicine*. 215–231. Elsevier Philadelphia
- Kjellstrom T, Friel S, Dixon J, Corvalan C, Rehfuess E, Campbell-Lendrum D, Gore F, Bartram J (2007) Urban Environmental Health Hazards and Health Equity. *J Urban Health* 84(3 Suppl), i86–97
- Kjellstrom T (Hrsg.) (2012) *Climate Change Exposures, Chronic Diseases and Mental Health in Urban Populations: A Threat to Health Security, Particularly for the Poor and Disadvantaged*. WHO Centre for Health Development Kobe/Japan
- Kjellstrom T, Briggs D, Freyberg, Lemke B, Otto M, Hyatt O3 (2016) Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts. *Annu Rev Public Health* 37, 97–112
- Kjellstrom T (2016) Impact of Climate Conditions on Occupational Health and Related Economic Losses: A New Feature of Global and Urban Health in the Context of Climate Change. *Asia Pac J Public Health* 28(2 Suppl), 28–37
- Kjellstrom T, Freyberg C, Lemke B et al. (2018) Estimating Population Heat Exposure and Impacts on Working People in Conjunction with Climate Change. *Int J Biometeorol* 62, 291–306. DOI: 10.1007/s00484-017-1407-0
- Larose J, Boulay P, Sigal RJ, Wright HE, Kenny GP (2013) Age-Related Decrements in Heat Dissipation During Physical Activity Occur as Early as the Age of 40. *PLoS One* 8(12), e83148
- Liu Z, Anderson B, Yan K, Dong W, Liao H, Shi P (2017) Global and Regional Changes in Exposure to Extreme Heat and the Relative Contributions of Climate and Population Change. *Sci Rep* 7, 43909
- Lundgren K, Kuklane K, Gao C, Holmér I (2013) Effects of Heat Stress on Working Populations When Facing Climate Change. *Industrial Health* 51, 3–15
- Pandolf KB, Sawka MN, Gonzalez RR (1988) *Human Performance Physiology and Environmental Medicine at Terrestrial Extremes*. Benchmark Press Indianapolis
- Parsons K (2003) *Human Thermal Environments*. Taylor & Francis London
- Sahu S, Maity SG, Moitra S, Sett M, Haldar P (2013) Cardiovascular Load During Summer Work of two Age Groups of Van-Rickshaw Pullers in West Bengal, India. *Int J Occup Saf Ergon* 19(4), 657–665



- Sawka MN, Wenger CB, Pandolf KB (2011) Thermoregulatory Responses to Acute Exercise Heat Stress and Heat Acclimation. *Compr Physiol* 14, Handbook of Physiology, Environmental Physiology, 157–185
- Scott AA, Misiani H, Okoth J, Jordan A, Gohlke J, Ouma G, Arrighi J, Zaitchik BF, Jjemba E, Verjee S, Waugh DW (2017) Temperature and Heat in Informal Settlements in Nairobi. *PLoS One* 12(11), e0187300. DOI: 10.1371
- Sen J, Nag PK (2019) Human Susceptibility to Outdoor Hot Environment. *Sci Total Environ* 649, 866–875
- Shapiro Y, Pandolf KB, Avellini BA, Pimental NA, Goldman RF (1981) Heat Balance and Transfer in Men and Women Exercising in Hot-Dry and Hot-Wet Conditions. *Ergonomics* 24(5), 375–386
- Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, Iwoch JM, Revich B, Sauerborn R (2014) Human Health: Impacts, Adaptation, and Co-Benefits. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* 709–754. Cambridge University Press Cambridge
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WBGU (2007) *Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel.* Springer Berlin Heidelberg New York
- WHO (2014) *Quantitative Risk Assessment of the Effects of Climate Change on Selected Causes of Death, 2030s and 2050s.* World Health Organization
- Woodward A, Smith K, Campbell-Lendrum D, Chadee D, Honda Y, Liu Q, Olwoch J, Revich B, Sauerborn R, Chafe Z, Haines A (2014) Climate Change and Health – The Latest Report from the IPCC. *The Lancet* 283, 1185–1189