

1.2 Das Humanbioklima im Wandel: Wirkungen der atmosphärischen Umwelt auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen

GUDRUN LASCHEWSKI & CHRISTINA ENDLER

Das Humanbioklima im Wandel: Wirkungen der atmosphärischen Umwelt auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen: Ein grundlegendes Thema der Humanbiometeorologie ist die Wirkung der atmosphärischen Umwelt auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen. Das Themenspektrum reicht vom Wärmeaustausch unseres Körpers mit der Atmosphäre über die Wirkung der Sonnenstrahlung auf den Körper bis zur Gefährdung durch Luftverschmutzung. Im vorliegenden Kapitel wird ein Überblick über wichtige Themen gegeben und zugleich eine Einführung in das Kapitel 3.1 des Buches, welches sich mit weiteren Details beschäftigt. Der bereits eingesetzte Klimawandel ändert auch das Ausmaß von Beeinträchtigungen des Menschen durch häufigere Wärmebelastung, stärkere UV-Strahlung und neue allergene Pollen oder erhöhte Ozonkonzentrationen in der Atemluft. Dies verstärkt die Morbidität (und teils auch Mortalität) der Bevölkerung. Es ist sehr wahrscheinlich, dass diese Wirkungen sich in naher Zukunft verstärken werden. Zahlreiche Unsicherheiten erschweren jedoch die Beurteilung des konkreten Ausmaßes der Veränderungen und damit der Beeinträchtigungen der Gesundheit des Menschen.

The human bioclimate in transition: Effects of atmospheric environment on the wellbeing and health of the people: The fundamental issue in human biometeorology is the assessment of the direct health effects of the atmospheric environment. This covers the range from heat exchange to solar radiation and air pollution. An overview is given to highlight important topics and to introduce chapter 3.1 of this book, where further details are discussed. Due to climate change also the human bioclimate is subject to several changes such as increases in the frequency of heat stress, the doses of UV-radiation during summer, the concentrations of pollen and ozone close to the earth surface. Most of these changes are accompanied by an increased morbidity (and in part also mortality) of the population and are expected to continue in the future. A number of uncertainties makes it difficult to definitely specify the magnitude of the changes and their impacts.

Mensch und Atmosphäre

Die Atmosphäre wirkt komplex auf den menschlichen Organismus. Der Mensch befindet sich permanent in einer Auseinandersetzung mit den atmosphärischen Umweltbedingungen (physikalische und chemische Eigenschaften der Atmosphäre, Wetter und Klima). Er reagiert mit Anpassungsreaktionen auf die atmosphärischen Reize, welche den Organismus fordern und – bei eingeschränkter Anpassungsfähigkeit oder zu hoher Reizdosis – auch überfordern können. Daraus ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Atmosphäre und der menschlichen Gesundheit und Leistungsfähigkeit, aber auch dem Wohlbefinden des Menschen.

Um die Beziehungen zwischen atmosphärischen Umweltfaktoren und Gesundheit zu untersuchen, werden epidemiologische Methoden analog der Umweltmedizin angewendet. Die Komplexität der Materie und der Einfluss zahlreicher Störgrößen erlauben jedoch keine einfachen Ursache-Wirkungsbeziehungen. Negative Ergebnisse lassen deshalb nicht unmittelbar auf das Fehlen eines Zusammenhanges zwischen Gesundheit und der atmosphärischen Umwelt schließen. In der Forschung macht sich der Mangel an räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Morbiditätsdaten nachteilig bemerkbar. Zusätzliche Komplikationen werden bei epidemiologischen Studien durch die Fähigkeit des Organismus zur Akklimatisation (der Adaptation

an die atmosphärische Umwelt) hervorgerufen. Die Tatsache, dass die Ergebnisse von epidemiologischen Untersuchungen nur im »Durchschnitt« für eine Gruppe, nicht aber für ein Individuum, gelten, d.h. nur eine gewisse Eintrittswahrscheinlichkeit angeben, deutet auf das unlösbare Generalitäts-Individualitäts-Dilemma (JENDRITZKY et al. 1998).

Gesundheitseffekte der atmosphärischen Umweltbedingungen gehen in der Regel nicht von einem einzelnen meteorologischen Element aus. Bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen können Wärmebelastung, hohe UV-Strahlungsintensitäten und höhere Immissionskonzentrationen von Photo-Oxidantien (z.B. Ozon) auftreten. Im Winter werden z.B. bei Smog während austauscharmer Wetterlagen in städtisch-industriellen Ballungsgebieten meist gleichzeitig Kältestress und eine Schadstoffbelastung der Luft beobachtet. Klassischerweise sind entsprechend bei der Bewertung von Wetterlagen die drei Hauptthemen thermischer, aktinischer und lufthygienischer Wirkungskomplex zu berücksichtigen (Abb. 1.2-1).

Der thermische Wirkungskomplex

Der thermische Wirkungskomplex behandelt die komplexen Bedingungen des Wärmeaustausches des Menschen mit seiner Umgebung mit dem Ziel ein thermisches Gleichgewicht zu erhalten. Dies spielt eine zentrale Rolle im Bereich des Humanbioklimas.

Wirkungen der thermischen Umwelt

Der Mensch ist dauerhaft seiner thermischen Umwelt exponiert und muss gleichzeitig eine konstante Körpertemperatur gewährleisten. Wärmeproduktion (Metabolische Rate in Form von Grund- und Aktivitätsumsatz) und Wärmeabgabe müssen durch Thermoregulationsmechanismen ins Gleichgewicht gebracht werden. Die Thermoregulation zeigt unter thermisch indifferenten Bedingungen minimale Aktivität; mit zunehmender Wärme- oder Kältebelastung steigen dabei auch die Anforderungen an das Herz-Kreislaufsystem, da Blutdruck und Thermoregulation eng miteinander verbunden sind (HENSEL 1973). Bei ungenügender Wärmeabgabe kann es bei kreislauffähigen Menschen infolge starker Erschlaffung und Erweiterung (Vasodilatation) der Hautgefäße zum Hitzekollaps durch Blutdruckabfall kommen. Zunehmende Hyperthermie beeinflusst auch das zentrale Nervensystem ungünstig mit Verringerung der Fähigkeit zur Thermoregulation. Temperaturen im Gehirn oberhalb 41°C führen zu Delirium, Krämpfen und Bewusstseinschwund (Hitzschlag). Unter starker Abkühlung kommt es ebenfalls zu Bewusstseinsstörungen und Irregularitäten bei der Herzarbeit. Bei 27 °C tritt Kältetod durch Kammerflimmern ein. Thermische Belastung wirkt sich auch negativ auf nicht direkt thermisch bedingte Erkrankungen aus. Dies liegt daran, dass dem Thermoregulationssystem im menschlichen Körper eine relativ hohe Priorität zukommt (PARSONS 2003).

Bestimmte Elemente des thermischen Wirkungskomplexes lassen sich auch gesundheitsfördernd einsetzen. Insbesondere leichte Kältereize können ein Training des Thermoregulationssystems bewirken. Die positiven Wirkungen umfassen die Zunahme der

physischen Ausdauerleistungsfähigkeit und der kardiovaskulären Funktionsreserve und sind entsprechend sowohl für die Prävention von Herz-Kreislaufkrankheiten als auch Erkältungskrankheiten nutzbar.

Modellierung des Wärmeaustausches des Menschen mit seiner Umgebung

Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwellige Strahlung sind die meteorologischen Variablen, die die Wärmeabgabe des Körpers beeinflussen. Daneben bestimmen die metabolische Rate und die Wärmeisolation der Bekleidung den Wärmehaushalt des Menschen.

Grundsätzlich entspricht es dem heutigen Stand der Wissenschaft, den Wärmeaustausch des Menschen mit seiner Umgebung über mathematische Modelle zu beschreiben. Entsprechend der Vielseitigkeit der Anwendungen existiert eine breite Palette von Modellen:

- Modelle für Komfort und stationären Zustand (FANGER 1970);
- Modelle des Gesamtkörpers, die den thermophysiological geregelten Wärmeübergang vom Körperkern zur Haut und von der Haut durch die Kleidung zur Atmosphäre (2-Segment-Modelle) in der zeitlichen Entwicklung (GAGGE et al. 1986, BLAZEJCZYK 1994, PICKUP & DE DEAR 2000, DE DEAR & PICKUP 2000, MALCHAIRE et al. 2001) oder den stationären Zustand beschreiben (STEADMAN 1984 und 1994, HÖPPE 1984 und 1999, HORIKOSHI et al. 1995);
- Modelle für ausgewählte Körperareale, z.B. für den Fuß (LOTENS et al. 1989) oder für Erfrierungen im Gesicht die Wind-Chill-Temperatur (TIKUJISS & OS-CZEWSKY 2002 und 2003, SHITZER 2006, BEN SHABAT et al. 2014) und

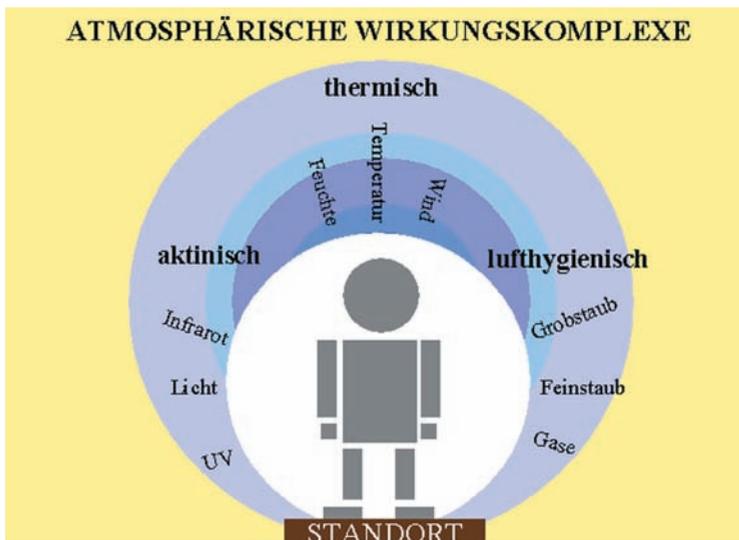


Abb.1.2-1: Atmosphärische Wirkungskomplexe.

- Multi-Segment-Modelle der menschlichen Thermoregulation, die die Wärmeflüsse für den Körper in einer Auflösung bis zu 340 Segmenten beschreiben (STOLWIJK 1971, KONZ et al. 1977, WISSLER 1985, FIALA et al. 1999 und 2001, HAVENITH 2001, HUIZENGA et al. 2001, TANABE et al. 2002).

Grundprinzip der Modelle ist es, den Wärmeaustausch des Menschen mit seiner Umgebung über die Komponenten der Wärmebilanzgleichung (erster Hauptsatz der Thermodynamik) zu beschreiben.

Die Wärmebilanzgleichung bestimmt die einzelnen Energieflüsse (Abb. 1.2-2) in thermophysiologisch korrekter Weise, beinhaltet jedoch keine Bewertung des thermischen Empfindens.

Thermisches Empfinden und Gefühlte Temperatur

Das thermische Empfinden ist eine subjektive Bewertung der Auswirkung der Umgebungsbedingungen in Hinsicht auf den Zustand von Komfort oder Art und Stärke der Diskomfort. Diskomfort wird bewusst wahrgenommen und resultiert in Verhaltensanpassungen mit dem Ziel, thermischen Komfort wieder herzustellen.

Dabei existieren mehrere Konzepte, thermischen Komfort und thermisches Empfinden auf der Basis der vorgefundenen Umgebungsbedingungen vorherzusagen. Das durch Untersuchungen in Klimakammern an mehr als 1.500 Probanden wohl am besten validierte Schema ist das »Predicted Mean Vote« (PMV) von FANGER (1970), das sich anders als viele Indizes über Jahrzehnte als unverändert gültig erwiesen hat und auf der auf Komfortbedingungen reduzierten Variante der Wärmebilanzgleichung aufbaut. PMV reicht in der 7-stufigen ASHRAE-Skala (1997) von -3 für kalt bis +3 für heiß und wird häufig noch um die Werte ± 4 für

extrem ergänzt. PMV ist in einer Vielzahl von internationalen und nationalen Richtlinien eingeführt. Allerdings wird als nachteilig angesehen, dass sich einem Laien die Bedeutung der Zahlenwerte nicht selbstständig erschließt. Ein anderes weit verbreitetes und dem Anwender leichter erschließbares Konzept ist das einer »äquivalenten« Temperatur. Das ist die Lufttemperatur, die in einer Referenzumgebung herrschen müsste, um das gleiche thermische Befinden wie in der aktuellen Umgebung hervorzurufen.

Zu den äquivalenten Temperaturen gehören zum Beispiel die Physiologische Äquivalenttemperatur PET (HÖPPE 1999), der Universal Thermal Climate Index UTCI (FIALA et al. 2012, BLAZEJECZYK et al. 2012) und die Gefühlte Temperatur (Perceived Temperature) PT (STAIGER et al. 2012). Der PT liegt ein vollständiges Wärmehaushaltsmodell des menschlichen Körpers zugrunde (Klima-Michel-Modell; JENDRITZKY et al. 1990). Das Wärme- bzw. Kälteempfinden wird dabei über die Komfortgleichung von FANGER (1970) mit einer Feuchte-Korrektur nach GAGGE et al. (1986) für den aufrecht stehenden Menschen berechnet. Die Gefühlte Temperatur PT in °C ist die Lufttemperatur einer Standardumgebung, in der das gleiche Wärme- bzw. Kälteempfinden auftreten würde, wie in der aktuellen Umgebung. In der Standardumgebung ist die mittlere Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur, und die Windgeschwindigkeit ist auf einen leichten Zug reduziert. Die thermophysiologische Bewertung erfolgt für einen Norm-Menschen, den Klima-Michel. Dieser erbringt eine Arbeitsleistung von 172,5 W, d.h. etwa 135 W/m² gesamte metabolische Rate bezogen auf die Hautoberfläche. Dies entspricht etwa Gehen mit etwa 4 km/h in der Ebene. Da die Bewertung an Außenbe-

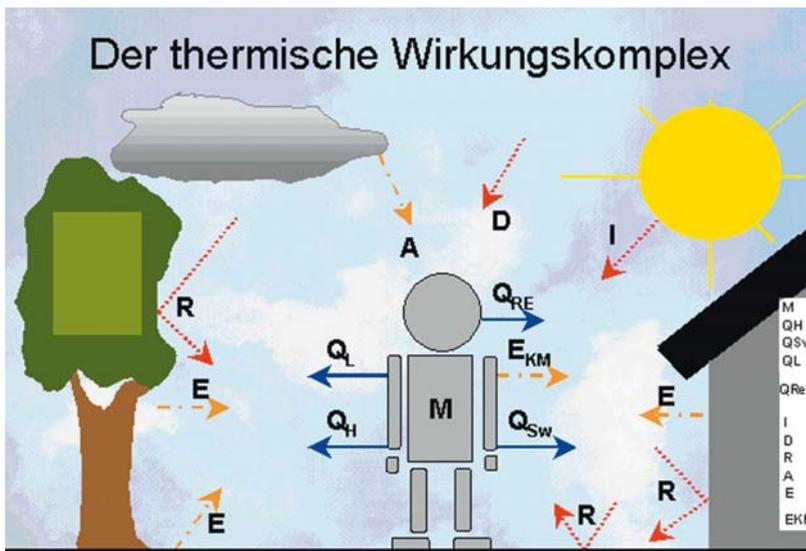


Abb. 1.2-2: Der thermische Wirkungskomplex.

dingungen ausgerichtet ist, kann der Norm-Mensch seine Kleidung zwischen sommerlich und winterlich variieren, um soweit erreichbar thermischen Komfort herzustellen. Sommerliche Kleidung, Kleidungsisolationswert 0,5 clo entspricht einer leichten langen Hose, einem kurzärmeligen Hemd und Sandalen, winterliche Kleidung, Kleidungsisolationswert 1,75 clo, einem Anzug aus wollenem Material, einer Kopfbedeckung, einem Wintermantel und festen, wärmenden Schuhen.

Das Empfinden von thermischem Komfort oder Diskomfort kann nach *Tab.1.2-1* bewertet werden, welche die bei der jeweiligen Gefühlten Temperatur zu erwartenden thermischen Empfindungen und die dazu korrespondierenden thermophysiologicalen Beanspruchungen angibt.

Sterbefälle und thermische Belastung

Die medizinische Relevanz der thermischen Umgebungsbedingungen wird bei statistischen Untersuchungen von Mortalitätsdaten und thermischen Belastungen (z.B. auf der Basis der Gefühlten Temperatur) besonders deutlich (LASCHEWSKI & JENDRITZKY 2002). In Baden-Württemberg ergaben sich für »leichten Kältestress« bis »starke Wärmebelastung« im Zeitraum 1968–2003 signifikante Unterschiede zwischen den mittleren relativen Mortalitäten von jeweils benachbarten Belastungsklassen (*Abb. 1.2-3*). Die geringsten relativen Mortalitäten traten während »Komfortbedingungen« auf. Mit zunehmender Wärmebelastung erhöhte sich die relative Abweichung vom Erwartungswert und somit auch die Sensitivität der Bevölkerung. Sterben bei »leichter Wärmebelastung« etwa 1% mehr Menschen als erwartet, sind dies bei mäßiger bereits 6% und bei starker Belastung über 13% (KOPPE 2005).

Viele Studien verwenden als Belastungsmaßstab keine Äquivalenttemperatur sondern die mittlere täg-

liche Lufttemperatur. Übersichtsartikel bestätigen für verschiedene Regionen und Klimate einen Temperatureffekt auf die Mortalitätsrate (ASTROM et al. 2011, YU et al. 2012).

Hitzebelastung trifft insbesondere Personen mit eingeschränkter Anpassungskapazität aufgrund mangelhafter Fitness und nicht notwendigerweise »nur« ältere Mitbürger. Darüber hinaus gibt es Hinweise für eine Zunahme von Verkehrs- und Arbeitsunfällen.

Auch wenn die medizinische Relevanz der thermischen Umweltbedingungen über die Betrachtung von Sterbefallzahlen besonders deutlich wird, muss angenommen werden, dass bei extremen Bedingungen auch sonst Gesunde in Leistungsfähigkeit und Wohlbefinden beeinträchtigt werden und Menschen mit krankheitsbedingter mangelhafter Anpassungskapazität schon bei geringeren äußeren Störungen mit einer Verschlechterung ihres Zustandes reagieren. Die Sterbefallzahlen sind also nur die »Spitze des Eisberges«. Sie geben aber Hinweise auf den Gesundheitszustand der gesamten Bevölkerung.

Wandel der thermischen Umwelt und seine Auswirkungen

Es wird erwartet, dass Hitzewellen in Zukunft häufiger, intensiver, länger und mit größerer räumlicher Ausdehnung auftreten werden als in der Vergangenheit (IPCC 2013). Besondere Risikogebiete sind voraussichtlich die großen Städte, da hier die Hitzewellen zusätzlich durch Wärmeineffekte verstärkt werden. Thermische Belastung forderte bereits in der Vergangenheit eine nicht zu vernachlässigende Anzahl an Menschenleben (MENE & EBI 2006). Als Reaktion auf die Hitzesituation im Jahre 2003 wurden in einer Reihe von Ländern Europas Hitzewarnsysteme installiert, um die negativen Folgen zu mindern (s.a. Kap. 5.3).

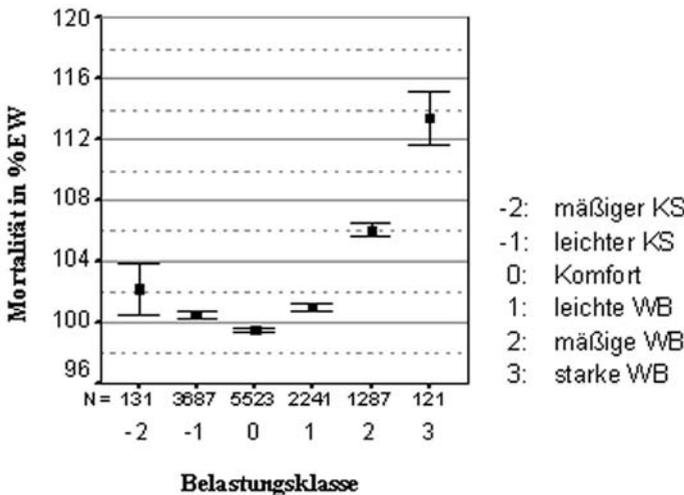


Abb.1.2-3: Mittlere relative Mortalität (Baden-Württemberg, 1968–2003). N: Anzahl der Tage mit der angegebenen thermischen Belastung; EW: Erwartungswert; KS: Kältestress; WB: Wärmebelastung; Balken: 95%-Konfidenzintervall des Mittelwertes (nach KOPPE 2005).

Durch die Fähigkeit der Menschen sich kurz- und langfristig in gewissen Grenzen an die thermische Umwelt anzupassen, sind für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels nicht nur die Höhe des zu erwartenden Temperaturanstieges wichtig, sondern auch Änderungen in der Klimavariabilität. Durch die physiologische Anpassung ändert sich die Reaktion des menschlichen Körpers auf die thermische Umwelt, weil diese durch eine Effizienzsteigerung des Thermoregulationssystems die effektiv auf ein Individuum wirkende thermische Belastung reduziert. Daneben kann die verhaltensgesteuerte kurzfristige Anpassung z.B. über die Änderung der getragenen Bekleidung den auf ein Individuum einwirkenden thermischen Stress vermindern (KOPPE 2005).

In einem regionalen Klimaänderungsszenario des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung PIK wurden beispielhaft für Baden-Württemberg die Änderungen der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit thermischer Belastung (Bewertung auf der Basis der Gefühlten Temperatur) und die daraus resultierenden Auswirkungen auf thermisch bedingte Mortalitätsraten untersucht. Die Häufigkeit von Tagen mit mindestens »mäßiger Wärmebelastung« erhöht sich in diesem Szenario im Zeitraum 2001–2055 (Zukunftsszenario) im Vergleich zum Zeitraum 1951–2000 (Basisszenario) um 5–30% (STOCK 2005). Der Rückgang der Tage mit Kältestress ist dabei weniger stark ausgeprägt (Abb. 1.2-4).

Gleichzeitig ist von einer Sensitivitätssteigerung der Bevölkerung durch den höheren Anteil älterer Menschen auszugehen. Im Zukunftszeitraum kommt es verglichen mit dem Basiszeitraum zu einem Rückgang der kältebedingten und zu einem Anstieg der wärmebedingten Mortalität. Die Bilanz dieser Effekte hängt dabei vom Szenario über die Entwicklung der Mortalitätsrate über den bekannten Bereich (1968–2003) hinaus ab. Wird von einem negativen Trend in der Mortalitätsrate ausgegangen, erhöht sich die thermisch bedingte Mortalität lediglich in den tieferen Regionen Baden-Württembergs. Wird von einer konstant bleibenden Mortalitätsrate ausgegangen, überwiegt in allen Höhenlagen der Einfluss des Anstiegs der wärmebe-

dingten Mortalität (KOPPE 2005). Zu berücksichtigen sind ferner zusätzliche Unsicherheiten bei der Abschätzung einer Reduktion der Wintermortalität, da sich die meisten Menschen dann überwiegend in Innenräumen aufhalten, die durch die Möglichkeit zu heizen momentan noch stärker von den thermischen Außenbedingungen abgekoppelt sind als im Sommer. So ließ sich z.B. in Deutschland zwischen 1946 und 1995 ein Rückgang der Wintermortalität feststellen, der u.a. mit der großen Verbreitung von Zentralheizungen und der besseren medizinischen Versorgung assoziiert war (LERCHL 1998). Dies zeigt die Notwendigkeit zur Einbeziehung weiterer u.a. sozioökonomischer Faktoren in eine ausgewogene Klimafolgen-Abschätzung.

Der Aktinische Wirkungskomplex

Der aktinische Wirkungskomplex behandelt die Strahlung der Sonne im UV-, im sichtbaren (Licht) und im Infrarot-Bereich. Dabei werden diejenigen direkten biologischen Effekte der Sonnenstrahlung betrachtet, die über die Rolle im Wärmehaushalt (s. thermischer Wirkungskomplex) hinausgehen (Tab. 1.2-2) (BÜHRING & JUNG 1992, ICNIRP 1995, WHO 1964).

Wirkungen der solaren Strahlung

Die Beleuchtungsstärke des Lichts als dem sichtbaren Teil des Spektrums der Sonnenstrahlung erreicht bei Sonnenhöchststand Werte über 100 kilolux. Dichte Bewölkung führt zu einer drastischen Reduktion der Helligkeit, sodass eine Verkürzung der Hellphasendauer für eine Mindestbeleuchtungsstärke von 2,5 kilolux um etwa 5 Stunden eintritt (JENDRITZKY et al. 1998). Eine solche Veränderung des Hell-Dunkel-Verhältnisses kann auch die Rolle des Lichtes als Zeitgeber beeinflussen. Generell erzeugen helles Licht und starke Kontraste eine ergotrope, d.h. auf Aktivität und Arbeit ausgerichtete Stimmungslage, die Leistungen oft erst ermöglicht; trübe, dämmerige und kontrastarme Bedingungen wirken hingegen dämpfend.

Trotz ihres relativ geringen Anteils an der Gesamtstrahlungsintensität der Sonne besitzt die UV-Strahlung eine außerordentlich große biologische Bedeutung. Neben unspezifischen Wirkungen wie der Beeinflussung

Gefühlte Temperatur °C	PMV	Thermisches Empfinden	Thermophysiological Beanspruchung
≤ -39	≤ -3.5	sehr kalt	extremer Kältestress
-26 bis -39	-3.5 bis -2.5	kalt	starker Kältestress
-13 bis -26	-2.5 bis -1.5	kühl	mäßiger Kältestress
0 bis -13	-1.5 bis -0.5	leicht kühl	schwacher Kältestress
0 bis +20	-0.5 bis +0.5	behaglich	Komfort möglich
+20 bis +26	+0.5 bis +1.5	leicht warm	schwache Wärmebelastung
+26 bis +32	+1.5 bis +2.5	warm	mäßige Wärmebelastung
+32 bis +38	+2.5 bis +3.5	heiß	starke Wärmebelastung
≥ +38	≥ +3.5	sehr heiß	extreme Wärmebelastung

Tab. 1.2-1: Gefühlte Temperatur, »Predicted Mean Vote (PMV)«, thermisches Empfinden und thermische Beanspruchung.

von Widerstandskraft, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit, Ökonomisierung des Kreislaufs, des vegetativen Nervensystems, Modulation des Immunsystems und der Beeinflussung endokrinologischer Parameter werden den drei nach biologischen Gesichtspunkten eingeteilten UV-Bereichen noch weitere in Tab. 1.2-2 aufgelistete Wirkungen zugeordnet.

Der menschliche Organismus schützt sich gegen die UV-Strahlung durch Pigmentierung und eine Verdickung der Hornschicht der Haut (Lichtschwiele). Darüber hinaus ist der Organismus in der Lage, gewissen UV-B-Schäden durch Reparaturmechanismen zu begegnen. Eine günstige Auswirkung der UV-B-Strahlung ist die Initiierung der Vitamin D₃-Synthese. Dazu reichen jedoch schon geringe Dosen an UV-Strahlung, die weit unter der Schwelle zum Sonnenbrand liegen. Vitamin D₃ ist an der Regulation der Phosphor-Calcium-Homöostase beteiligt und hat als Hormon zusätzlich eine immunmodulierende Wirkung (BÜHRING & JUNG 1992). Es werden auch krebsschutzprotektive Wirkungen diskutiert, wobei aber noch ein erheblicher Forschungsbedarf besteht (ZEEB & GREINERT 2010).

Als schädliche Effekte der UV-Strahlung treten akute (reversible) wie auch chronische Wirkungen auf (WHO 2002):

Tab. 1.2-2: Wirkungen der solaren Strahlung.

UV-C (100–280 nm)	bakterizide Wirkung Zellzerstörung Erythem
UV-B (280–315 nm)	sekundäre Pigmentierung »Lichtschwiele« Alterung der Haut antirachitische Wirkung bakterizide Wirkung Hautkarzinom Keratitis Ökonomisierung des Blutkreislaufes Immunsuppression Verbesserung der unspezifischen Abwehr Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit
UV-A (315–400 nm)	Sofortpigmentierung therapeutische Wirkung z. B. als Photochemotherapie (PUVA) zur Behandlung von Psoriasis, Akne und Neurodermitis Katarakte
Sichtbares Licht (380–780 nm)	Lichtwirkung über Auge Wirkung auf Hypothalamus Zeitgeberfunktion Wärmewirkung
Infrarot	Wärmewirkung erythemverringemde Wirkung

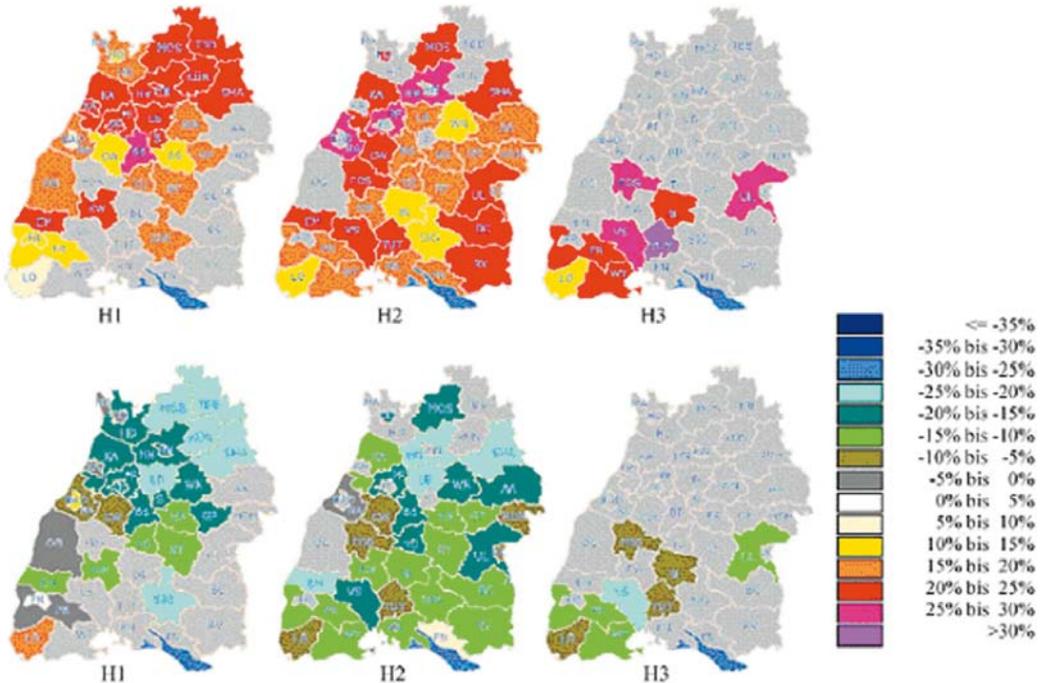


Abb 1.2-4: Relative Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit mäßiger bis extremer Wärmebelastung (oben) und Tagen mit mäßigem bis starkem Kältestress (unten) im Zukunftsszenarium 2001–2055 relativ zum Basisszenarium 1951–2000 für alle Höhenstufen (H1: 0–400 m; H2: 400–800 m; H3: ≥ 800 m) (KOPPE 2005).

- akut: Sonnenbrand (Erythem) der Haut, Immunsuppression, Photokeratitis (z. B. Schneeblindheit), Photokonjunktivitis (Bindehautentzündung)
- chronisch: vorzeitige Alterung der Haut, bösartige Hautkrebsarten, Katarakt (Linsentrübung).

Häufige und starke Sonnenbestrahlungen mit Sonnenbrand besonders im Frühkindes- und Jugendalter fördern die Bildung des malignen Melanoms, des schwarzen Hautkrebses (LEITLINIENPROGRAMM ONKOLOGIE 2014). Die Zahl der Neubildung maligner Melanome hat sich in den letzten 40 Jahren alle 7 bis 8 Jahre verdoppelt. Das ist auf das geänderte Freizeitverhalten zurückzuführen, das Hautbräunung mit guter Gesundheit gleichsetzt. Wegen dieser Grundtendenz und der vom Lebensalter abhängigen Art der Aktivität empfängt der Mensch in den ersten 20 Lebensjahren ca. 50% seiner Lebensdosis an UV-Strahlung. Dabei ist die Empfindlichkeit der Haut sehr individuell; man unterscheidet grob vier Hauttypen (GREITER 1984).

Der UV-Index

Da die beobachteten Schädigungen überwiegend auf unangepasstes Verhalten zurückgeführt werden, ergibt sich daraus die Notwendigkeit, die Bevölkerung über die Gesundheitsrisiken bei übermäßiger Sonnenexposition zu informieren und aufzuklären, um eine gezielte individuelle Anpassung an die Risiken der UV-Bestrahlung zu ermöglichen. Der Deutsche Wetterdienst DWD berechnet dazu den international standardisierten UV-Index (STAIGER & KÖPKE 2005) (s.a. Kap. 5.3). Beim UV-Index (ICNIRP 1995) wird dabei die spektrale UV-Bestrahlungsstärke mit einer standardisierten Erythemwirkungsfunktion der CIE (Commission Internationale d'Éclairage) gewichtet. Die Vorhersage des UV-Index erfolgt beim DWD in einem mehrstufigen Verfahren. In einem ersten Schritt wird ein großräumiger UV-Index in Abhängigkeit vom vorhergesagten Gesamtazon und dem Sonnenzenitwinkel berechnet, da die den Erdboden erreichende sonnenbrandwirksame UV-Strahlung insbesondere durch die stratosphärische Ozonschicht stark vermindert wird. Satellitenmessungen sind der Ausgangspunkt der verwendeten Ozonvorhersage. Die Berechnung des Transfers der UV-Strahlung durch die Atmosphäre erfolgt mit schnellen Algorithmen auf der Grundlage des Strahlungstransfermodells STARneuro (SCHWANDER et al. 2001). Die UV-Bestrahlungsstärke am Boden kann durch Streuung und Absorption durch Aerosole vermindert werden.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Anpassung des großräumigen UV-Index an die aktuellen Werte der aerosoloptischen Dicke und des Absorptionsvermögens der Aerosole. Dazu werden tagesaktuelle Vorhersagen des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wetter-

vorhersage (EZMW) verwendet. Die Höhe eines Ortes über dem Meeresspiegel beeinflusst die UV-Bestrahlungsstärke wesentlich; sie nimmt mit der Höhe um etwa 8 bis 10% per 1.000 m zu. Die Beträge werden größer, wenn die Luft durch Aerosole getrübt ist. In der dritten Vorhersagestufe wird der großräumige UV-Index an eine beliebige Höhe zwischen -500 und +9.000 m über NN angepasst.

Die Albedo des Untergrundes als ein Maß seines Rückstreuvermögens hat im UV vergleichsweise geringe Werte von 3% für eine Sommerwiese und ca. 8% für die Meere. Nur für Bedingungen von Schnee und Eis ist sie signifikant erhöht. Insbesondere bei Neuschnee kann fast das gesamte UV reflektiert werden. In der vierten Vorhersagestufe wird der Albedoeffekt über einen Faktor berücksichtigt, der zwischen einer regionalen Albedo und homogen mit Schnee (Eis) bedecktem Gelände (Inlandeis von Grönland und Meereis) unterscheidet. Der Anpassung des UV-Index unbewölkt an die Bewölkungsverhältnisse dient dann ein Wolkenmodifikationsfaktor, welcher mit einem Verfahren auf Grundlage der Globalstrahlung ermittelt wird (STAIGER et al. 2008).

Der UV-Index ist weltweit einheitlich. Der UV-Index variiert im Bundesgebiet zwischen 1 und 6 bis 7 in Norddeutschland und bis zu 8 in Süddeutschland; in den höheren Lagen der Alpen treten auch Werte um 9 auf. Ziel des Verfahrens ist es weniger die Eigenschutzzeit der Haut maximal auszunutzen, sondern die Lebenszeitdosis an UV-Strahlung zu vermindern. Die aufgenommene Strahlung hängt außerdem noch von der jeweiligen Aktivität ab; sie ist am höchsten beim Sonnenbad (der Sonne wird eine größtmögliche Bestrahlungsfläche dargeboten), wird jedoch bei Bewegung im Freien wegen der veränderten Geometrie und ggf. Bekleidung beim Sport reduziert.

Wandel der UV-Bestrahlung

Für die UV-Belastung spielt neben dem Gesamtazon auch die Bewölkung und deren Veränderung eine wichtige Rolle. Bei wolkenlosem Himmel ist die Ozonschichtdicke von wesentlicher Bedeutung, wobei insbesondere die UV-Spitzenbelastung beeinflusst wird. Die Dicke der Ozonschicht hat in den vergangenen Jahren aufgrund der chemischen Ozonzerstörung durch Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) und aufgrund langfristiger meteorologischer Änderungen, die zu einer Umverteilung des Ozons in der Stratosphäre geführt haben, abgenommen. Diese Ozonverluste haben zu einer verstärkten UV-Bestrahlung geführt, und zwar insbesondere im Spätwinter und Frühling, also in jenen Monaten, in denen die menschliche Haut am wenigsten an verstärkte UV-Strahlung adaptiert ist. In den

unteren Luftschichten hat infolge des Sommersmogs stellenweise eine vermehrte Ozonproduktion in den Sommermonaten stattgefunden, die zu einer teilweisen Kompensation des stratosphärischen Ozonverlustes führte, jedoch aufgrund anderer Gesundheitsbeeinträchtigungen als schädlich anzusehen ist (s. lufthygienischer Wirkungskomplex).

Wolken wirken sich insbesondere auf die Gesamtdosis der UV-Bestrahlung aus. Die Bewölkung hat sich langfristig ebenfalls verändert, da mit der Erwärmung über Mitteleuropa eine Zirkulationsänderung gekoppelt ist, welche zu einer Anhebung und Abkühlung der Tropopause führt. Dadurch wird die Bildung von Cirruswolken begünstigt. Die Bewölkung nahm im Mittel im Frühjahr und Herbst zu, wodurch der Anstieg der UV-Dosis wegen der Ozonverluste zum Teil kompensiert wurde. Im Sommer ist die Bewölkung dagegen zurückgegangen, wodurch sich die Tagesdosis deutlich erhöht hat, obwohl die Ozonverluste in diesen Monaten weniger ausgeprägt waren (TREPTE & WINKLER 2004). Vergleichende Darstellungen der mittleren UV-Tagesdosis in den Jahren 1970 und 2000 zeigen in den Monaten Mai bis August deutlich höhere Werte im Jahre 2000 (Abb. 1.2-5).

Klimamodelle zeigen, dass der anthropogene Treibhauseffekt zu einer Umstellung der typischen Zirkulationssysteme in Europa führt. Dadurch wird in Deutschland eine Abnahme der Bewölkung in den Sommermonaten erwartet. Bedingt durch den hohen Sonnenstand mit den höchsten absoluten UV-Strahlungswerten in diesen Monaten – und verbunden mit dem derzeitigen Freizeitverhalten vieler Menschen – ist mit einer erhöhten UV-Exposition bei vielen Personen zu rechnen. In den strahlungsarmen Zeiten im Winter, Vorfrühling und Herbst wird der durch die prognosti-

zierte Erholung der Ozonschicht bedingte Rückgang der UV-Belastung durch die Bevölkerungszunahme sogar noch verstärkt. Im Sommer hingegen überkompensiert der Rückgang der Bewölkung den Effekt der Ozonerholung und führt zu einer Zunahme der mittleren UV-Dosis um mehr als 10% (KÖPKE et al. 2004).

Insgesamt bleibt die Einschätzung der künftigen Entwicklung mittels Klimamodellen jedoch wegen der großen Komplexität der Atmosphäre mit vielen Unsicherheiten behaftet. Zusammenfassend bleibt es nach wie vor schwierig, eine wirklich belastbare Aussage über die mittelfristige Entwicklung der UV-Belastung zu treffen.

Der Lufthygienische Wirkungskomplex

Obwohl sich die Luftreinhaltung wegen ihrer Bedeutung für die menschliche Gesundheit zu einer eigenständigen Disziplin entwickelt hat, gehört der lufthygienische Wirkungskomplex (JENDRITZKY et al. 1998, JENDRITZKY et al. 2003, VDI 2008) zu einem der klassischen Bereiche des Human-Bioklimas. Er behandelt die natürlichen und anthropogenen Luftbeimengungen.

Wirkungen natürlicher und anthropogener Luftbeimengungen

Die Luft besteht aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen. Natürliche Luftbeimengungen stammen aus Quellen, die über die gesamte Erde mehr oder minder gleichmäßig verbreitet sind. Es handelt sich hierbei um vom Boden aufgewirbelten Staub, feste und gasförmige Stoffe aus Vulkantätigkeit, Seesalz sowie organische Beimengungen überwiegend aus der Vegetation (Pollen, Sporen, Bakterien, pflanzliche Kohlenwasserstoffe, z.B. Terpene). Weltweit gesehen stellen diese natürlichen Stoffe den größten Anteil an den Luftbei-

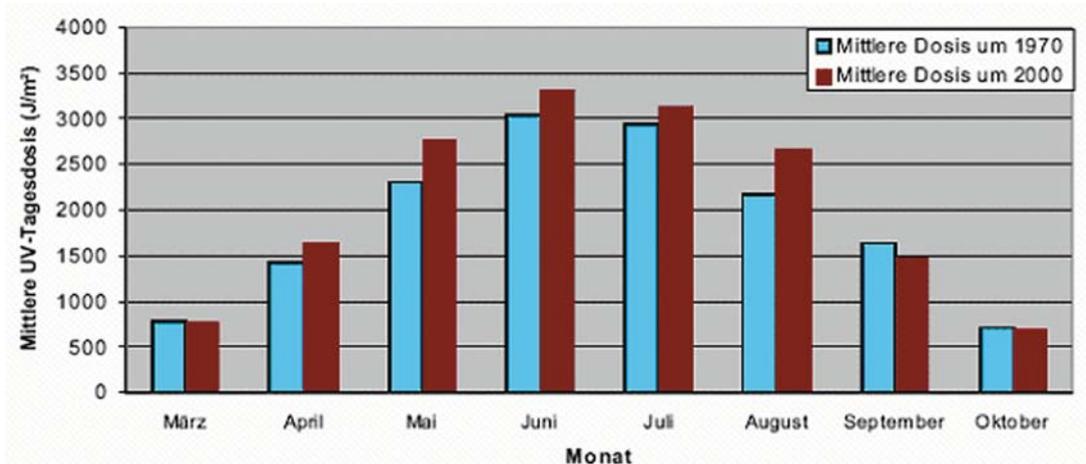


Abb. 1.2-5: Rekonstruierte mittlere UV-Tagesdosis in Würzburg in ausgewählten Monaten (TREPTE & WINKLER 2004).

mengungen. Pollen gelten als entscheidende Auslöser von allergischen Erkrankungen wie z.B. Asthma und Heuschnupfen.

Anthropogene Luftbeimengungen haben ihren Ursprung in menschlichen Aktivitäten. Ihr Kennzeichen ist die z.T. extreme örtliche und zeitliche Belastung. Als Quellen sind insbesondere Verkehr, Industrie, Kraftwerke, Gewerbe und die Hausfeuerung zu nennen. Die Einwirkung auf den Menschen läuft über die Stufen Emission (Einbringen von der Quelle in die Atmosphäre), wetterlagenabhängige Ausbreitung (erhöhte Konzentrationen bei austauscharmen Wetterlagen), eventuell luftchemische Umwandlung in der Atmosphäre und schließlich Immission (Aufnahme durch den Menschen, z.B. über die Atemwege). Die für Auftreten und Verlauf von Gesundheitsbeeinträchtigungen und Erkrankungen bedeutsamsten Luftschadstoffe sind die Reizgase Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffdioxid (NO_2) und Ozon (O_3), aber auch partikelförmige Luftbeimengungen (z.B. Feinstaub, Ruß) und saure Aerosole (MORISKE & TUROWSKI 1998). Weitere wegen ihres akut oder chronisch schädlichen Potenzials wichtige Stoffe stellen Photooxidantien dar, wie Peroxiacetylnitrat (PAN) und andere flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC) wie Benzol, Toluol, Trichlorethylen, Tetrachlorethylen und Formaldehyd. Benzol und Benzpyren (und andere PAHs) gelten als kanzerogen; Kohlenmonoxid (CO) wirkt hämatotoxisch durch starke Bindung an das Hämoglobin der Blutkörperchen.

Die meisten Luftschadstoffe führen nicht zu spezifischen Erkrankungen. In Abhängigkeit vom Schadstoff, seiner Konzentration, der Expositionsdauer sowie der kombinierten Wirkung mit anderen Schadstoffen (Synergie) werden einige Organe stärker beeinflusst als andere. Die häufigsten Störungen werden durch Reizgase und partikelförmige Luftbeimengungen an Schleimhäuten und Atemwegen verursacht, die sich als Entzündungen im Bereich von Augen, Nase und oberen Atemwegen, verminderter Lungenfunktion, erhöhter Anfälligkeit für Atemwegsinfektionen und vermehrtem Auftreten von chronischen Bronchitiden äußern. Solche Störungen oder Erkrankungen werden aber auch durch andere Faktoren beeinflusst wie Immunschwäche, Allergien, Schadstoffexpositionen am Arbeitsplatz und, natürlich, Rauchen. Die Auswirkungen von Luftbeimengungen auf die Gesundheit sind in der Regel multifaktoriell bedingt; unspezifische Störungen stehen dementsprechend im Vordergrund.

Wirkungen des troposphärischen und bodennahen Ozons

Im Gegensatz zum Ozon in der Stratosphäre, welches die mit Risiken für den Menschen verbundene UV-

Strahlung vermindert, ist das in der Troposphäre und bodennah vorkommende Ozon in höheren Konzentrationen schädlich, besonders wenn es während sommerlicher Schönwetterperioden als Schlüsselsubstanz des sogenannten Sommersmogs in Verbindung mit andauernd hohen Temperaturen auftritt.

Die Reizwirkung des »photochemischen Smogs« auf Augen und Schleimhäute des Nasen-Rachenraums kommt vor allem durch Photooxidantien zustande, die als Nebenprodukt der atmosphärischen Ozonbildung entstehen (z.B. PAN und Formaldehyd). Diese Substanzen sind gut wasserlöslich, aber weniger toxisch und in geringeren Konzentrationen vorhanden als Ozon. Aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit dringt Ozon viel weiter in die Lunge ein und kann zu einer Schädigung der Zellmembran mit damit verbundenen entzündlichen Prozessen führen. Dadurch können gleichzeitig anwesende chemische oder biologische Allergene tiefer in das geschädigte Gewebe eindringen, was eine Allergisierung begünstigen kann, obwohl Ozon selbst kein Allergen ist. Etwa 10 bis 15% der Bevölkerung reagieren besonders empfindlich auf Ozon. Gesundheitliche Beeinträchtigungen (BAYRAM et al. 2002) sind um so eher zu erwarten, je höher die Ozonkonzentration der inhalierten Luft ist, je länger man dem Ozon ausgesetzt ist, und je höher das Atemminutenvolumen während der Exposition ist.

Wandel im Bereich des lufthygienischen Wirkungskomplexes

Es gibt eine beträchtliche Zahl von Luftbeimengungen, die einzeln oder im Zusammenwirken von gesundheitlicher Relevanz sind und deren Konzentrationen in der Atmosphäre auch durch Einflüsse des Klimawandels mit geprägt werden. Beispielhaft werden im Folgenden mögliche Einflüsse des Klimawandels auf Ozon und Pollen, d.h. eine durch anthropogene Einflüsse geprägte gasförmige und eine natürliche partikelförmige Luftbeimengung dargestellt.

Wandel der troposphärischen und bodennahen Ozonkonzentrationen

Troposphärisches Ozon kann den Treibhauseffekt verstärken. Wie auch andere Treibhausgase, absorbiert Ozon einen Teil der von der Erde abgestrahlten Wärme und beschleunigt damit das Aufheizen der Atmosphäre. Somit bestehen Querverbindungen zu den anderen Wirkungskomplexen, besonders dem thermischen. Seit ca. 1990 ist in Deutschland kein einheitlicher Trend der troposphärischen Ozonkonzentrationen mehr zu erkennen. Die Spitzenbelastungen haben zum Teil deutlich abgenommen, die Jahresmittelwerte sind an einigen Stationen jedoch weiter angestiegen (WAGNER et al. 2003).

Betrachtet man das bodennahe Ozon, so zeigen die monatlichen Spitzenkonzentrationen an den meisten Messstationen keine Veränderung (FRICKE 1996). Die Häufigkeit der Überschreitung der vorgegebenen Ozonegrenzwerte (bzw. Ozonzielwerte) von 180 und 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ist während der letzten Jahre parallel zum Rückgang der Vorläuferemissionen sogar zurückgegangen. Dagegen zeigen die Mittelwerte der bodennahen Ozonkonzentrationen seit 1970 eine deutliche Konzentrationszunahme um rund 30%, die einen Anstieg der Hintergrund-Ozonkonzentration widerspiegelt (FRICKE 1996, KAMINSKI & GILGE 2000). Bisher sind für den Menschen jedoch keine dadurch bedingten negativen Auswirkungen bekannt.

Mit dem Klimawandel wird in Mitteleuropa ein verstärktes Auftreten von sehr warmen Sommern und Hitzewellen erwartet, also Bedingungen die grundsätzlich das Entstehen von Sommersmog begünstigen. Besonders im Umfeld der Städte und Ballungsräume wird es maßgeblich von der Emission der Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung und dem bodennahen atmosphärischen Austausch abhängen, ob das zwangsläufig auch zu einem häufigeren Auftreten von Sommersmog mit den beschriebenen Gesundheitsrisiken führen wird. Für Berlin konnte GROSS (1996) exemplarisch ein häufigeres Auftreten hoch reichender Temperaturinversionen (> 300 m) zeigen. Aufgrund der größeren Erhaltungsneigung derartiger Episoden, könnte sich bereits dadurch das Problem der Luftverunreinigung verschärfen.

Wandel des Pollenflugs und seine Auswirkungen

Klimatische Veränderungen können das Auftreten allergener Pollen beeinflussen, von ihrer Entstehung bis hin zu ihrer Ausbreitung. Retrospektive Untersuchungen zeigen folgende Auswirkungen der komplexen klimatischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte: früherer Pollenflugbeginn, längere Pollenflugsaison, Zunahme der Pollenmenge sowie Veränderung der Verteilung und des Auftretens von Pollen.

Belegen lassen sich die genannten Auswirkungen sowohl durch Einzeluntersuchungen an allergenen Pollen (z.B. Vorverschiebung und Verlängerung der Saison von Hasel-, Birken- und Graspollen bei Zunahme der Pollenkonzentration 1969–1996 in der Schweiz (FREI 1998)) als auch durch eine grundsätzliche Änderung der Phänologie (z.B. Vorverschiebung der phänologischen Frühlingsphase (z.B. MENZEL et al. 2006); Vorverschiebung und Verlängerung der Wachstumsphase (CHMIELEWSKI 2000 und 2003)). Die phänologischen Veränderungen sind dabei als Indikator für das Verhalten allergener Pollen zu verstehen.

Zusätzlich ist eine Zunahme des Potenzials allergener Pollen durch Neophyten zu beobachten.

So zeigt beispielsweise eine Studie vom Biodiversität und Klima Forschungszentrum (BiK-F) für das Beifußblättrige Traubenkraut *Ambrosia artemisiifolia* auf, dass sich die potenziell gefährdeten Gebiete in den nächsten Jahrzehnten nach Norden bzw. Nordosten ausbreiten werden und sich dadurch das Gefährdungsareal im Vergleich zum aktuellen Verbreitungsgebiet verdoppeln wird (CUNZE et al. 2013).

Feldversuche an *Ambrosia* (ZISKA & CAULFIELD 2000, WAYNE et al. 2002, WAN et al. 2002) und Wiesen-Lieschgras (ALBERTINE et al. 2014) stützen die Vermutung, dass auch zukünftig die Pollenproduktion dieser wie auch anderer Pflanzen bei Zunahme der CO_2 -Konzentration steigen wird. Inwieweit allerdings hohe Temperaturen oder andere Faktoren der gesteigerten Photosyntheseleistung entgegensteuern, ist noch ungewiss. So hat auch die Witterung des vergangenen Jahres bis zum Beginn der Pollensaison Einfluss auf die (aktuelle) Pollenproduktion. Während der Pollensaison sind eher die vorherrschenden Wetterbedingungen bestimmend. So nimmt beispielsweise die Pollenkonzentration (in der Luft) bei vermehrten, andauernden Niederschlägen ab. Auch wenn die heutigen Klimamodelle eine Vielzahl von Prozessen und Rückkopplungen im Klimasystem abbilden können, sind einige Prozesse und Zusammenhänge noch nicht vollkommen verstanden und erfasst. So stellt auch der Niederschlag eine Herausforderung für die Modellierung dar. Darüber hinaus ist der Pollenflug auch ganz wesentlich von der Flächennutzung abhängig. Änderungen landwirtschaftlicher Aktivitäten (Anbau von bestimmten Kulturpflanzen), Änderungen der Landnutzung (Rückgang von Wiesen- und Grünflächen) oder stadtplanerische Maßnahmen (Wahl der Park- und Straßenbäume) verändern die Quellgebiete und können sich so nachhaltig auf den Pollenflug auswirken.

Neben dem allergenen Potenzial einzelner Pollen ist auch die Menge der Pollen in der Luft bedeutsam für die gesundheitlichen Auswirkungen. So zeigen die Studien von DALES & ÇAKMAK (2004) und ANNESI-MAESANO et al. (2012) eine positive Korrelation zwischen Pollenkonzentration und akuten Asthmaanfällen bzw. Heuschnupfen. Nichtsdestotrotz fällt die Immunantwort zu Beginn der Pollensaison bei noch relativ geringen Konzentrationen deutlich stärker aus als gegen Ende der Saison bei höheren Konzentrationen (DE WEGGER et al. 2011).

In städtischen Gebieten führen höhere verkehrsbedingte Emissionen zu einem erhöhten Risiko für allergische Reaktionen. So können beispielsweise Dieselrußpartikel, Stickoxide oder Ozon die Struktur-

eigenschaften der Pollen verändern, den Allergengehalt erhöhen und damit allergische Reaktionen begünstigen (DIAZ-SANCHEZ et al. 1997, D'AMATO 2002, MAJD et al. 2004, BARTRA et al. 2007). Dies zeigt sich mitunter bereits in einer Zunahme der Sensibilisierung gegenüber Pollenallergenen in Städten (NICOLAOU et al. 2005).

Die Möglichkeiten zur individuellen Anpassung haben aufgrund der großen Anzahl von Pollenallergikern eine gesamtgesellschaftliche Bedeutung, auch wenn die detaillierten Auswirkungen eines möglicherweise mit dem Klimawandel veränderten Pollenflugs noch mit einigen Unsicherheiten behaftet sind. Für die Risikogruppe der Pollenallergiker wird während der Pollensaison vom DWD in Zusammenarbeit mit der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst das Auftreten allergener Pollen operationell vorhergesagt (s.a. Kap. 5.3).

Zusammenfassung

Mit dem Klimawandel werden auch Veränderungen des Humanbioklimas einhergehen. Dazu zählen beispielsweise eine größere Häufigkeit von Tagen mit Wärmebelastung und höheren UV-Strahlungsdosen im Sommer sowie veränderte Konzentrationen von Pollen und bodennahem Ozon. Retrospektive Auswertungen zu den Folgen der Exposition und Variabilität lassen erwarten, dass durch den Wandel des Humanbioklimas mit dem Risiko einer erhöhten Morbidität (und zum Teil auch Mortalität) der Bevölkerung zu rechnen ist. Die Gesellschaft sollte sich rechtzeitig durch Anpassungsmaßnahmen darauf einstellen, auch wenn noch zahlreiche Unsicherheiten die Präzisierung der Aussagen erschweren und weiterer Forschungsbedarf besteht.

Literatur

ALBERTINE J. M., MANNING W. J., DACOSTA M., STINSON K. A., MUILENBERG M. L. & C. A. ROGERS (2014): Projected Carbon Dioxide to Increase Grass Pollen and Allergen Exposure Despite Higher Ozone Levels. *PLoS ONE* 9(11): e111712.

ANNESI-MAESANO I., ROUVE S. & H. DESQUEYROUX (2012): Grass Pollen Counts, Air Pollution Levels and Allergic Rhinitis Severity. *Int. Arch. Allergy Immunol.* 158(4): 397–404

ASTROM D. O., FORSBERG B. & B. ROCKLOV (2011): Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies. *Maturitas*, 69: 99–105.

ASHRAE (1997): ASHRAE Handbook - Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

BAYRAM H., RUSZNAK C., KHAIR O., SAPSFORD R. J. & M. M. ABDELAZIZ (2002): Effect of ozone and nitrogen dioxide on the permeability of bronchial epithelial cell cultures of non-asthmatic and asthmatic subjects. *Clinical Experimental Allergy* 32: 1285–1292.

BARTRA J., MULLOL J., DEL CUVILLO A., DÁVILA I., FERRER M., JÁUREGUI I., MONTORO J., SASTRE J. & A. VALERO (2007): Air pollution and allergens. *J. Invest. Allergol. Clin. Immunol.* 17 Suppl 2: 3–8.

BEN SHABAT Y., SHITZER A. & D. FIALA (2014): Modified wind chill temperatures determined by a whole body thermoregulation model and human-based facial convective coefficients. *Int. J. Biometeorol.* 58: 1007–1015.

BLAZEJCZYK K., EPSTEIN Y., JENDRITZKY G., STAIGER H. & B. TINZ (2012): Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int. J. Biometeorol.* 56: 515–535.

BLAZEJCZYK K. & B. KRAWCZYK (1994): Bioclimatic research of the human heat balance. Polish Academy of Sciences, Inst. of Geography and Spatial Organization, PAN IGiPz Nr. 28. 1994. pp.

BÜHRING M. & E. G. JUNG (Hrsg.) (1992): UV-Biologie und Heliotherapie. Hippokrates, Stuttgart. 98 S.

CHMIELEWSKI F.-M. (2000): Regional Trends of the beginning of growing season in Europe and possible climatic causes. *International Conference Progress in Phenology*, October 4–6, 2000, Freising.

CHMIELEWSKI F.-M. (2003): Phenology and Agriculture. *Agrarmeteorologische Schriften*, Heft 12, Humboldt-Universität Berlin.

CUNZE S., LEIBLEIN C. & O. TACKENBERG (2013): Range Expansion of *Ambrosia artemisiifolia* in Europe Is Promoted by Climate Change. *ISRN Ecology*, vol. 2013, Article ID 610126, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/610126>.

DALES R. E., CAKMAK S. et al. (2004): Influence of outdoor aeroallergens on hospitalization for asthma in Canada. *J. Allergy Clin. Immunol.* 113(2): 303–306.

D'AMATO G. (2002): Environmental urban factors (air pollution and allergens) and the rising trends in allergic respiratory diseases. *Allergy* 57 Suppl 72: 30–3.

DE DEAR R. & J. PICKUP (2000): An Outdoor Thermal Environment Index. Part II: Applications. In: De Dear R., Kalma J., Oke T. & A. Auliciemi (eds.): *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium. Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99* (Sydney, 8–12 Nov. 1999). Geneva, WCASP-50, 258–290.

DE WEGER L. A., BEERTHUIZEN T., GAST-STROOKMAN J. M., VAN DER PLAS D. T., TERREEHORST I., HIEMSTRA P. S. & J. K. SONT (2011): Difference in symptom severity between early and late grass pollen season in patients with seasonal allergic rhinitis. *Clin. Transl. Allergy* 1:18. doi:10.1186/2045-7022-1-18.

DIAZ-SANCHEZ D., TSIEN A., FLEMING J. & A. SAXON (1997): Combined diesel exhaust particulate and ragweed allergen challenge markedly enhances human in vivo nasal ragweed-specific IgE and skews cytokine production to a T helper cell 2-type pattern. *J. Immunol.* 158(5): 2406–13.

FANGER P. O. (1970): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. Danish, Technical Press, Copenhagen. 244 pp.

FIALA D., LOMAS K. J. & M. STOHRER (1999): A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *J. Appl. Physiol.* 87: 1957–1972.

FIALA D., LOMAS K. J. & M. STOHRER (2001): Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.* 45: 143–159.

FIALA D., HAVENITH G., BRÖDE P., KAMPMANN B. & G. JENDRITZKY (2012): UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int. J. Biometeorol.* 56: 429–441.

FREI T. (1998): The effects of climate change in Switzerland 1969–1996 on airborne pollen quantities from hazel, birch and grass. *Grana* 37: 172–179.

- FRICKE W. (1996): Bodennahes Ozon – Anstieg der Mittelwerte, aber kein Anstieg der Maxima seit 1971. Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes Nr. 34.
- GAGGE A. P., FOBELETS A. P. & L. G. BERGLUND (1986): A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.* Vol. 92 (2): 709-731.
- GREITER F. (1984): Sonne und Gesundheit. G. Fischer, Stuttgart, 25-103.
- GROSS G. (1996): Stadtklima und Globale Erwärmung. *Gewissenschaften* 14: 245-248.
- HAVENITH G. (2001): Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response. *J. Appl. Physiol.* 90: 1943-1954.
- HENSEL H. (1973): Temperaturregulation. In: Keidel W. D. (Hrsg.). *Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart, Thieme-Verlag, 224-235.
- HOEPE P. (1984): Die Energiebilanz des Menschen. Universität München - Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 49.
- HOEPE P. (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.* 43: 71-75.
- HORIKOSHI T., TSUCHIKAWA T., KURAZUMI Y. & N. MATSUBARA (1995): Mathematical Expression of Combined and Separate Effect of Air Temperature, Humidity, Air Velocity and Thermal Radiation on Thermal Comfort. *Archives of Complex Environmental Studies*, 7(3-4): 9-12.
- HUIZENGA C., ZHANG H. & E. ARENS (2001): A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment* 36: 691-699.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (1995): Global Solar UV Index. A joint recommendation of the World Health Organization, the World Meteorological Organization, the United Nations Environment Programme, and the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Oberschleißheim*
- IPCC (2013): Climate Change - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & P. M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.
- JENDRITZKY G., MENZ G., SCHIRMER H. & W. SCHMIDT-KESSEN (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponenten im Bioklima des Menschen. *Fortgeschriebenes Klima-Michel-Model*. Beitr. Akademie f. Raumforschung u. Landesplanung, Bd. 114, Hannover, 80 S.
- JENDRITZKY G., BUCHER K., LASCHEWSKI G., SCHULTZ E. & H. STAIGER (1998): Medizinische Klimatologie. In: Hildebrandt G. & Ch. Gutenbrunner (Hrsg.) - *Balneologie und medizinische Klimatologie*. Springer, Heidelberg, 477-598.
- JENDRITZKY G., GRÄTZ, A., LASCHEWSKI G. & G. SCHEID (2003): Das Bioklima in Deutschland. Bioklimakarte mit Begleittext und Informationen zur Wohnortwahl. 3. vollst. überarb. Aufl., Flöttmann Verlag, 21 S.
- KAMINSKI U. & S. GILGE (2000): Zum Trend der Hintergrundkonzentration von Ozon. *Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes* Nr. 75, 2 S.
- KÖPKE P., REUDER J. & J. SCHWEEN (2004): UV-Strahlung – gestern, heute und morgen. In: *Rundgespräche der Kommission für Ökologie der Bayer. Akad. Wiss.* 27: 19-28.
- KOPPE C. (2005): Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 226, Offenbach am Main, 168 S.
- KONZ S., HWANG C., DHIMAN B., DUNCAN J. & A. MASUD (1977): An experimental validation of mathematical simulation of human thermoregulation. *Comput. Biol. Med.* 7: 71-82.
- LASCHEWSKI G. & G. JENDRITZKY (2002): Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. *Climate Research* 21: 91-103.
- LEITLINIENPROGRAMM ONKOLOGIE (Deutsche Krebsgesellschaft, Deutsche Krebshilfe, AWMF) (2014): S3-Leitlinie Prävention von Hautkrebs, Langversion 1.0, AWMF Registernummer: 032/052/OL, <http://leitlinien-programmonkologie.de/Leitlinien.7.0.html> (Zugriff am 17.02.2014).
- LERCHL A. (1998): Changes in the seasonality of mortality in Germany from 1946 to 1995: the role of temperature. *Int. J. Biometeorol.* 42: 84-88.
- LOTENS W. A., HEUS R. & F. J. VAN DE LINDE (1989): A 2-node thermoregulatory model for the foot. *Proc. of the Int. Symp. on Thermal Physiology*.
- MAJD A., CHEHREGANI A., MOIN M., GHOLAMI M., KOHNO S., NABE T. & M. A. SHARIATZADE (2004): The Effects of Air Pollution on Structures, Proteins and Allergenicity of Pollen Grains. *Aerobiologia* 20 (2): 111-118.
- MALCHAIRE J., PIETTE A., KAMPMANN B., MEHNERT P., GEBHARDT H., HAVENITH G., DEN HARTOG E., HOLMER I., PARSONS K., ALFANO G. & B. GRIEFAHN (2001): Development and Validation of the Predicted Heat Strain Model. *Ann. Occup. Hyg* 45: 123-135.
- MENNE B. & K. L. EBI (eds) (2006): *Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health*. Steinkopff Verlag, Darmstadt.
- MENZEL A., SPARKS T. H., ESTRELLA N., KOCH E., AASA A., AHAS R., ALM-KÜBLER K., BISSOLLI P., BRASLAVSKA O., BRIEDE A., CHMIELEWSKI F. M., CREPINSEK Z., CURNEL Y., DAHL A., DEFILA C., DONNELLY A., FILELLA Y., JATCZAK K., MAGE F., MESTRE A., NORDLI O., PENUELAS J., PIRINEN P., REMISOVA V., SCHEIFINGER H., STRIZ M., SUSSNIK A., VLIET VAN A. J. H., WIELGOLASKI F.-E., ZACH S. & A. ZUST (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12: 1969-1976. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>.
- MORISKE W. & E. TUROWSKI (1998): *Handbuch für Bioklima und Lüftungstechnik*. Ecomed Verlag, Landsberg.
- NICOLAOU N., SIDDIQUE N. & A. CUSTOVIC (2005): Allergic disease in urban and rural populations: increasing prevalence with increasing urbanization. *Allergy* 60: 1357-1360. DOI: 10.1111/j.1398-9995.2005.00961.x.
- PARSONS K. C. (2003): *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance*. 2. Ausgabe. London, Taylor & Francis.
- SCHWANDER H., KAIFEL A., RUGGABER A. & P. KOEPKE (2001): Spectral radiative-transfer modeling with minimized computation time by use of a neural-network technique. *Appl. Optics* 40: 331-335.
- SHITZER A. (2006): A parametric study of wind chill equivalent temperatures by a dimensionless steady-state analysis. *Int. J. Biometeorol* 50: 215-223.
- PICKUP J. & R. DE DEAR (2000): An Outdoor Thermal Environment Index. Part I: The model and its assumptions. In: De Dear R., Kalma J., Oke T. & A. Auliciems (eds.): *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium*. Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99 (Sydney, 8-12 Nov. 1999), Geneva, WCASP-50:

- 258-290.
- STAIGER H., DENOUTER P. N., BAIS A. F., FEISTER U., JOHNSON B. & L. VUILLMIER (2008): Hourly resolved cloud modification factors in the ultraviolet. *Atmos. Chem. Phys.* 8: 2493-2508.
- STAIGER H. & P. KÖPKE (2005): UV-Index forecasting on a global scale. *Meteorol. Z.*, 14 (2): 1-12.
- STAIGER H., LASCHEWSKI G. & A. GRÄTZ (2012): The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int. J. Biometeorol* 56: 165-176.
- STEADMAN R. G. (1984): A universal scale of apparent temperature. *J. of Climate and Appl. Met.* 23(12): 1674-1687.
- STEADMAN R. G. (1994): Norms of apparent temperature in Australia. *Australian Meteorol. Magazin* 43(1): 1-16.
- STOCK M. (Hrsg.) (2005): KLARA - Klimawandel, Auswirkungen, Risiken, Anpassung. PIK-Report No. 99. 222 S.
- STOLWIJK J. A. J. (1971): A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA contractor report, NASA CR-1855, Washington DC.
- TANABE S. I., KOBAYASHI K., NAKANO J., OZEKI Y. & M. KONISHI (2002): Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings* 34: 637-646.
- TIKUISIS P. & R. J. OSCZEWSKI (2003): Facial cooling during cold air exposure. *BAMS* 84 (7): 927-933.
- TIKUISIS P. & R. J. OSCZEWSKI (2002): Dynamic model of facial cooling. *J. Appl. Met.* 41 (12): 1241-1246.
- TREPTE S. & P. WINKLER (2004): Rekonstruktion der UV-Strahlung am Hohen Peißenberg und in Würzburg ab 1968 unter Berücksichtigung der langfristigen Veränderungen von Gesamt ozon, Bewölkung und atmosphärischer Trübung. *Berichte der Deutschen Wetterdienstes* 225, Ofenbach am Main. 48 S.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2008): Umweltmeteorologie. Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Luftthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil 1: Klima. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b. VDI-Richtlinie 3787, Bl. 2.
- WAGNER M., HÖPPE P. & U. KOLLER (2003): Krank durch Ozon? GSF-FLUGS. 9 S.
- WAN S., YUAN T., BOWDISH S., WALLACE L., RUSSELL S. D. & Y. LUO (2002): Response of an allergenic species, *Ambrosia psilostachya* (Asteraceae), to experimental warming and clipping: implications for public health. *Am. J. Bot.* 89: 1843-1846.
- WAYNE P., FOSTER S., CONNOLLY J., BAZZAZ F., EPSTEIN P. et al. (2002): Production of allergenic pollen by ragweed is increased in CO₂-enriched atmosphere. *Ann. Allergy Asthma Immunol.* 88(3): 279-82.
- WHO (World Health Organization) (1964): Ultraviolet Radiation. Aus: Authoritative Scientific Review of Environmental and Health Effects of UV, with Reference to Global Ozone Layer Depletion. *Environmental Health Criteria* 160. Geneva.
- WHO (World Health Organization) (2002): Global solar UV-index: a practical guide. A joint recommendation of the World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environmental Programme, and the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. World Health Organization, Geneva. 28 pp.
- WISSLER E. H. (1985): Mathematical simulation of human thermal behaviour using whole body models. In: Shitzer A. & R. C. Eberhart (eds.), *Heat transfer in medicine and biology-analysis and applications*. New York and London: Plenum Press. 325-373.
- YU W., MENGERSEN K., WANG X., YE X., GUO Y., PAN X. & S. TONG (2012): Daily average temperature and mortality among the elderly: a meta-analysis and systematic review of epidemiological evidence. *Int. J. Biometeorol.* 56: 569-581.
- ZEEB H. & J. GREINERT (2010): Bedeutung von Vitamin D in der Krebsprävention. *Dt. Ärzteblatt* 107: 638-42.
- ZISKA L. H. & F. A. CAULFIELD (2000): Rising CO₂ and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy inducing species: implications for public health. *Aust. J. Plant Physiol.* 27: 1-6.

Kontakt:

Dr. Gudrun Laschewski
 Dr. Christina Endler
 Deutscher Wetterdienst (Freiburg i. Br.)
 Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
 gudrun.laschewski@dwd.de
 christina.endler@dwd.de

Laschewski, G. & Chr. Endler (2014): *Das Humanbioklima im Wandel: Wirkungen der atmosphärischen Umwelt auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen*. In: Lozán, J.L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Elektronische Veröffentlichung (Kap. 1.2)* - www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de.