

Unsere Kriterien für die Vergabe des Zertifikats „wohnmedizinisch empfohlen“ sind diese, die direkte oder indirekte Auswirkungen auf die Wohnsituation haben. Uns interessiert hier weniger die Nachhaltigkeit oder das Thema „BIO“, was aus unserer Sicht (Nahrungsmittel, Bio-spirit etc.) leider viel zu oft missbräuchlich verwendet wird. Für uns sind Eigenschaften, wie

- nachweisbar keine gesundheitsschädlichen Emissionen bei der Wohnnutzung von Baustoffen,
- besonders günstige Beeinflussung von Raumklima und Behaglichkeit, u.a. durch geprüfte Baustoffe und Belüftungsmöglichkeiten, die über gesetzlich geltende Mindestvorgaben hinausgehen,
- eine prozentuale Unterschreitung gesetzlich zulässiger Grenzwerte und/oder Richtwerte, z.B. für Einzelverbindungen und Summenparameter der Luftqualität
- und über die Norm hinausgehende, wohnmedizinische Gebrauchseigenschaften.

Unter dieser Sichtweise unterscheiden sich nicht nur die einzelnen Standards innerhalb Deutschlands, sondern auch der Europäischen Union. Der Verbraucher hat hier

leider die „Qual der Wahl“, aus hunderten Standards, Zertifikaten, Siegeln das für ihn Richtige herauszusuchen. Grundsätzlich zählen aber viele der deutschen aber auch mitteleuropäischen Standards auf dem Markt zu den Besten.

Neben der Sicherheit, dass bestehende Richtwerte nicht nur eingehalten, sondern weit unterschritten werden, haben wir, soweit technische Normen und/oder gesetzliche Vorschriften nicht existieren, unseren Untersuchungen weitere Einzelkriterien der Gesundheitsverträglichkeit zum Gegenstand (zum Beispiel CO₂, Luftschadstoffe, Schimmelpilze und Bakterien) hinzugefügt. Die Prüfung umfasst nicht nur die Einhaltung dieser Normen und Vorschriften, sondern auch den Grad der Unterschreitung im Sinne einer Verbesserung der Gesundheitsverträglichkeit. Diese Bewertungen werden weiterhin in dreijährigen Abständen den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen angepasst. Durch die Kooperationen mit Partnern auf dem Gebiet der Innenraumanalytik die modernste Analyseverfahren nutzen, sind die verwendeten Standards für den Bauherrn und damit wichtigsten Nutzer unserer Ergebnisse immer auf den aktuellsten Stand.

Verständnis des thermischen Komforts sowie der Akklimatisierung in kühlen Umgebungen

O. Glahn, S. Schwickert, M. Pilgramm

Abstrakt: Der thermische Komfort trägt in der Gebäudenutzung eine signifikante Rolle und das Verständnis der Zusammenhänge ist insbesondere relevant, um Gebäude nachhaltig hinsichtlich des Wohlbefindens der Nutzer sowie eines ressourcenschonenden Betriebes zu planen und zu betreiben. Das thermische Empfinden der Nutzer ist ein komplexes Zusammenspiel zwischen der Wärmebilanz des Körpers sowie den Einflussgrößen des Nutzerverhaltens, den physiologischen Begebenheiten und der psychologischen Umstände, sodass in diesem Artikel der derzeitige Forschungsstand über das Verständnis des adaptiven thermischen Komforts und die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Akklimatisierung in kühlen Umgebungen dargelegt werden. Es zeigt sich vor allem, dass in der Bewertung der sommerlichen Zustände nichtklimatisierte und klimatisierte Gebäude separat zu betrachten sind und dass adaptive Größen in einem Berechnungs- und Bewertungsmodell Berücksichtigung finden müssen. Zur Verringerung der unteren Komfortgrenze zeigt sich, dass insbesondere die Akklimatisierung als eine bedeut-

same Komponente zu verstehen ist, die jedoch nur bedingt beeinflusst werden kann, da eine Form der Langzeitakklimatisierung vorliegt, wodurch die Erwartung und das thermische Empfinden stark beeinflusst werden.

Einleitung

Das thermische Innenraumklima ist eine dynamische Komponente für das Wohlbefinden des Nutzers, das zugleich gesundheitsrelevante Einflussgrößen beeinflusst und mit einem großen Verbrauch an Ressourcen verbunden ist. Folglich sind für eine nachhaltige Gebäudeplanung und Betriebsweise die Abhängigkeiten und Grenzen des thermischen Empfindens zu verstehen, um Räume zu schaffen, in denen sich Nutzer wohlfühlen, die Risiken gesundheitlicher Auswirkungen minimiert werden und zugleich der Verbrauch wichtiger Ressourcen durch die Gebäude reduziert wird.

Gesundheitliche Folgen des Innenraumklimas

Die thermische Begebenheit ist eine der Einflussgrößen, wodurch das Wohlbefinden der Nutzer, aber auch verschiedenste gesundheitsrelevante Einflussgrößen beeinflusst werden. Wie in [80] zusammengefasst wird, ist das Innenraumklima dynamisch und wird durch mindestens folgende Faktoren beeinflusst:

- Materialien, die potentiell Stoffe ausstoßen oder absorbieren in Abhängigkeit zur Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Feuchtigkeit,
- Equipment (Drucker, PC) oder Prozesse, die zusätzliche Schadstoffe generieren,
- Heiz-/Kühlprozesse; Lüftungsanlagen sowie Verteilungen, die Luftströmungen erzeugen, in denen Schadstoffe transportiert werden können oder gar die Freisetzung ermöglichen,
- Bewegung der Menschen im Raum oder Aktivitäten, wodurch Schadstoffe freigesetzt werden,
- die Anwesenheit von Menschen, die durch Perspiration und Respiration Verunreinigungen der Raumluft verursachen. Insbesondere, wenn Infektionen vorliegen.

Die Befindlichkeitsstörungen der Nutzer in Bezug auf das Innenraumklima werden allgemein mit den sogenannten Sick Building Syndromen bezeichnet. Das Sick Building Syndrome ist ein Konglomerat verschiedenster Symptome von Nutzern, die auf das Innenraumklima zurückgeführt werden. Wie sich in [11] zeigt, lassen sich die Symptome in vier wesentliche Faktoren unterteilen, wobei das Sick Building Syndrome immer ein Zusammenspiel von mindestens zwei Symptomen ist:

- Müdigkeit (müde, trockene, juckende Augen, Erschöpfung, Schmerzen in Rücken, Nacken, Kopf, Schulter etc.),
- Reizung der Schleimhaut (Reizung der Nase, Hals oder Haut),
- neuropsychologische Symptome (Nervensystem bezogene Funktionen, wie Anspannung, Nervosität, Konzentrationsschwierigkeiten, Schwindel und Übelkeit etc.),
- nntere Atemwegsbeschwerden (Atemnot, Enge im Brustkorb, Keuchhusten etc.).

Die durch die Anlagentechnik beeinflussbaren Parameter, wie die Raumtemperatur, die Luftfeuchtigkeit und auch die Schadstoffkonzentration können mehrere dieser Symptome begünstigen oder gar hervorrufen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es kontraproduktiv sein

kann, Gebäude in gesunde und ungesunde Gebäude zu klassifizieren, da ein wesentlicher Anteil von Nutzern etwas am Arbeitsumfeld auszusetzen findet und somit nicht aus jeder Beschwerde der Rückschluss auf ein ungesundes Gebäude gezogen werden kann [11]. Stattdessen sollte der Fokus vielmehr auf die einzelnen Ursachen und Zusammenhänge gelegt werden, wie es auch bereits in der Raumklimatechnik praktiziert wird (siehe nachfolgend) und auch in [90] betont wird.

Zum Einfluss der Schadstoffe in der Raumluft von normal genutzten Räumen zeigt sich, dass aus der über Gerüche wahrgenommenen Umgebung kein direkter Zusammenhang zu Gesundheitsrisiken gezogen werden kann. In der Luft liegen zwar flüchtige Stoffe vor, die ab einer gewissen Konzentration zu Reizungen führen können, jedoch liegen diese in seltenen Fällen in einer entsprechenden Konzentration im Innenraum vor und auch die Kombination der flüchtigen Stoffe wird als Ursache der Reizung ausgeschlossen. Die menschliche Nase kann die meisten flüchtigen Stoffe in einer Konzentration wahrnehmen, die einem tausendstel der kritischen Konzentration entspricht. Allerdings zeigt sich, dass eine Geruchswahrnehmung zu einer gefühlten Reizung führen kann, die sich in Ärger, angespannter Stimmung, einem veränderten Atmungsschema, einem verschlimmerten Asthma, Angst vor unbekanntem Risiken oder Gesundheitsschäden, aber auch in direkten Risiken einer psychologischen und physiologischen Veränderung äußern kann. Über die Auswirkung von Ozon initiierte Terpene oder Glyoxal liegen hierbei jedoch zur Bewertung noch unzureichende Daten vor [90]. Auch in Bezug zur CO₂-Konzentration können kaum Zusammenhänge zu den Befindlichkeitsstörungen der Nutzer gezogen werden, wie in [12] zusammengefasst wird. Zu berücksichtigen ist jedoch auch, dass die Auswirkungen vieler Stoffe unserer Raumluft noch nicht bekannt sind. So stehen beispielsweise manche Semi-VOCs (SVOCs) unter Verdacht, neurotoxisch oder störend für das Hormonsystem zu sein. Die SVOCs sind Komponenten, wie Phthalate (Weichmacher) und Polybromierte Diphenylether (PBDE), die eine große Anwendung in Kunststoffprodukten finden und im Innenraum als Gas, auf Luftpartikeln und im Staub vorkommen.

Abgesehen von den flüchtigen organischen Verbindungen können auch Luftpartikel in der Innenraumluft zu einer nachhaltig schädlichen Auswirkung bei Kindern führen. Es zeigt sich hierbei, dass höhere Konzentrationen von Partikeln in der Größe < 1µm, wie sie beispielsweise durch Rauchen oder äußere Abgase in den Innenraum gelangen, ein größeres Risiko für Bronchitis bei Kindern verursachen [37].



TIKKURILA BIORID GEGEN SCHIMMEL UND KONDENSFEUCHE



- Anti-Schimmel-Beschichtung mit Langzeitwirkung
- lösemittelfrei
- wirkt rein physikalisch

Jetzt informieren auf
www.tikkurila.de

In Bezug zur Temperatur zeigen sich ebenfalls mehrere Einflussparameter auf die Gesundheit. Bei Kindern beeinflusst diese die Lungenfunktion, und hohe maximale Umgebungstemperaturen im Sommer führen bei Kindern mit Asthma zu größeren Atemschwierigkeiten und zwar mit einem Zeitversatz von ca. 1 bis 3 Tagen, wie in [56] festgestellt worden ist. Die Ursache für den negativen Einfluss der Temperatur und dem Zeitversatz wird primär in der größeren Aktivität der Allergene gesehen. Untersuchungen für den Winter konnten der vorliegenden Literatur jedoch nicht entnommen werden.

Darüber hinaus sind die Emissionen aus volatilen Komponenten abhängig von der Temperatur, doch wie bereits oben erwähnt, lassen sich bislang aus den typisch im Innenraum vorzufindenden Konzentrationen keine direkten Rückschlüsse auf die bekannten Symptome ziehen.

Ein wesentlich relevanterer Parameter, der von den thermischen Begebenheiten beeinflusst wird, ist die relative Luftfeuchtigkeit, die ebenfalls mit verschiedenen Atemwegsinfektionen, aber auch Allergenen, Krankheitserregern und schädlichen Chemikalien in Bezug gebracht wird, wie in [1] zusammengefasst ist. Laut der Autoren zeigt sich aus Untersuchungen in Büros, Schulen und Wohnungen, dass die geringsten Atemwegsbeschwerden bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 40 % – 70 % vorzufinden sind. Gemäß der darin durchgeführten Literaturzusammenfassung steigen außerhalb dieser Grenzwerte die Anfälligkeit gegenüber Bakterien, Viren, einer allergischen Rhinitis sowie Asthma. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit über ca. 70 % erhöht sich zudem signifikant das Wachstum der Fungi und Milben und unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 40 % steigen die Atemwegskrankheiten.

Es zeigt sich darüber hinaus, dass eine relative Luftfeuchtigkeit unter 20 % zu Augenreizungen führen kann und unter 30 % – 40 % es zu einer Trockenheit der Atemwegs- und Nasenschleimhaut führen kann, das wiederum Erkältungssymptome begünstigt oder Menschen mit Bronchialkonstriktion direkt beeinflusst. Eine trockene Schleimhaut erhöht das Infektionsrisiko des Menschen, da sie als natürliche Barriere gegen Reizstoffe, Mikroben und unangenehme klimatische Begebenheiten schützt. Die Interaktion der Ziliaraktivität und der Viskosität der Schleimhautflüssigkeit sind wichtig für den Selbstreinigungsprozess. Zwar wird die Luft in den Luftwegen immer auf ca. 37 °C und 100 % relativer Luftfeuchte konditioniert, allerdings zeigen sich bei entsprechend trockener Luft Reizungssymptome [13].

Grundlagen des adaptiven Komforts

Um die thermischen Begebenheiten hinsichtlich einer komfortablen Umgebung mit einem geringeren Infektionsrisiko zu steuern, ist es wichtig, die adaptiven Zusammenhänge des thermischen Komforts zu verstehen.

In Deutschland lässt sich der Stand der Technik bezüglich der klimatischen Raumanforderungen für die Planung, Ausführung und auch Instandhaltung aus den Richtlinien [86, 87, 26, 24, 25, 28, 29, 85] ableiten. Darüber hinaus sind ergänzende Informationen aus dem [30] sowie der [27] zu entnehmen. Außerdem gelten für Arbeitsstätten die technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR). Für Raumtemperaturen ist hierbei die [6] und für die Luftqualität die [5] heranzuziehen. Zudem wird häufig das Urteil [55] in Bezug zu den Grenzparametern der maximalen Raumtemperatur zitiert.

Als zentrales Dokument, um in der Planung sowie im Betrieb entsprechende Grenzparameter des thermischen Komforts abzuleiten, wird vor allem auf die [24] verwiesen, die jedoch mehrere Möglichkeiten der Bewertung und somit auch abweichende Rückschlüsse über die zu erwartende Zufriedenheit zulässt. Folglich ist es erforderlich in der Komfortbewertung das gesamte Spektrum der Einflussgrößen zu verstehen, um die normativen Empfehlungen anzuwenden und entsprechende Abweichungen zu interpretieren.

Auch wenn sich aus den genannten Normungen teilweise konstante Temperaturgrenzwertempfehlungen ableiten lassen, ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um ein sich bewegendes Ziel handelt, das sich kontinuierlich verändert. Die dynamischen Einflussgrößen werden in dem sogenannten adaptiven Ansatz zusammengefasst, der allgemein darauf basiert, dass Menschen auf Veränderungen, die zu Unbehagen führen, entsprechend reagieren, um ihren Komfort zu erhalten. Primär liegt das Verständnis adaptiver Maßnahmen darin, dass Fenster, Sonnenschutz oder Lüfter genutzt bzw. verändert werden können. Jedoch beinhaltet dies auch Möglichkeiten zur Anpassung der Kleidung, der Aktivität oder Körperhaltung. Viele dieser adaptiven Möglichkeiten haben keine direkte Auswirkung auf die Komfortumstände, ermöglichen jedoch, dass der Nutzer die Begebenheiten soweit verändern kann, dass er sich behaglich fühlt [62].

Seit mehreren Jahrzehnten werden Studien durchgeführt, die versuchen, das thermische Komfortempfinden des Menschen zu spezifizieren und die Einflussgrößen zu quantifizieren. Die Möglichkeiten zur Beschreibung des thermischen Komforts sind jedoch auf Grund der Komplexität des individuellen Nutzers sehr eingeschränkt.

Für die Bewertung der thermischen Zustände gibt es verschiedene Methoden, die in der Forschung und auch Normung angewendet werden. Eine sehr häufig zitierte Literatur über den thermischen Komfort ist [33], worin ein Berechnungsmodell beschrieben wird, das auf dem Körper-Thermoregulierungssystem basiert und sowohl in der [25] als auch [4] angewendet wird. Das Modell bestimmt über eine Wärmebilanz des Körpers den neutralen Zustand, welcher als thermischer Komfortzustand angesehen werden kann, sofern keine zu hohe Strahlungsasymmetrie, Zugluft und zu warme oder kalte Oberflächen vorzufinden sind. In dem Modell wird ein Komfortzustand über den PMV (predicted mean vote) beschrieben. Der PMV ist ein Index des vorhergesagten mittleren Komfortvotums, woraus der Prozentsatz vorhergesagter unzufriedener Personen resultiert und somit eine Bewertung zulässt. In dieser Bewertung wird davon ausgegangen, dass die neutralen Komfortzustände nicht für jedes Individuum bereitgestellt werden können, sobald mehrere Personen in einem Raum anwesend sind. Somit sollte das Ziel darin liegen, den optimalen Komfortzustand für die Gruppe statt jenen des Individuums zu erzeugen. Ausgedrückt wird dies durch die höchste Wahrscheinlichkeit der Gruppenzufriedenheit [33]. Hierbei werden folgende Variablen berücksichtigt:

- Energieumsatz des menschlichen Körpers (Wärmeerzeugung durch Stoffwechselprozesse in Abhängigkeit der Aktivität),
- externe Arbeit (mechanische Arbeit), die nicht als Wärme vom Körper abgeführt werden muss (für die meisten Aktivitäten entspricht dies gleich null),
- Bekleidungsisolierung und Anteil bekleideter Fläche (thermischer Widerstand durch Kleidung),
- Lufttemperatur,
- mittlere Strahlungstemperatur,
- Luftgeschwindigkeit,
- Luftfeuchte (Wasserdampfpartialdruck).

Die mathematische Formel des PMV Modells ist zunehmend verfeinert worden und ist aus der [25] zu entnehmen.

Wie bereits erwähnt, ist jedoch bei der Komfortbewertung zu berücksichtigen, dass Menschen das natürliche Bestreben besitzen, sich an verändernde Umgebungen anzupassen und somit permanent das Komfortempfinden selbst beeinflussen. Folglich sind in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Forschungsergebnissen publiziert worden, in denen versucht wurde, dieses natürliche Bestreben zu quantifizieren und in ein adaptives Kom-

fortmodell zu überführen, da ein allgemeiner wissenschaftlicher Konsens darüber herrscht, dass eine adaptive Bewertung des Komforts die größte Möglichkeit der realitätsnahen Modellierung bietet.

Das adaptive Modell wird nach [22] in Nutzerverhalten, physiologische und psychologische Aspekte untergliedert. Hierbei bedeutet die physiologische Anpassung die Adaption durch physische Reaktion. Dies lässt sich unterscheiden in genetische Anpassungsfähigkeit (generationsübergreifend) und Akklimatisation (innerhalb der individuellen Lebensdauer). Die psychologische Dimension der thermischen Anpassungsfähigkeit bezieht sich auf ein verändertes Empfinden auf Grund vergangener Erfahrungen und Erwartungen. Das Lockern von Erwartungen kann mit psychischer Gewohnheit in Verbindung gebracht werden. Verhaltensanpassungen umfassen hingegen die Veränderungen, die eine Person bewusst oder unbewusst durchführt, um die Wärme- und Massenströme zu beeinflussen, die auf das thermische Gleichgewicht des Körpers einwirken. Dies äußert sich in Nutzeraktivitäten hinsichtlich Fenster- und Türöffnen, Bedienung von Ventilatoren oder Sonnenschutz [22].

Die Forschungen, die in den vergangenen Jahren über adaptive Komfortmodelle publiziert wurden, konzentrieren sich vor allem auf die Kühlperiode und konnten insbesondere abweichende Komfortempfindungen zwischen klimatisierten und nicht klimatisierten Gebäuden aufzeigen, sodass eine entsprechende Unterscheidung auch in die Europäische [24] und Nordamerikanische Normung [4] eingegangen ist.

Allerdings kann aus der vorliegenden Literatur kein validiertes adaptives Komfortmodell entnommen werden, das die oben aufgeführten adaptiven Aspekte in einen quantitativen Zusammenhang überführt. Das weit verbreitete PMV-Modell ist prinzipiell ein statisches Modell, welches jedoch durch die Abhängigkeit zu der Kleidung, Aktivität der Nutzer, aber auch Luftgeschwindigkeit adaptive Komponenten beinhaltet, die durch eine Verhaltensanpassung des Nutzers beeinflusst werden. Es wurde jedoch im Jahr 1970 als ein Ingenieurleitfaden für zentral klimatisierte Gebäude erstellt, worin die Nutzer nur geringfügige oder gar keine Steuermöglichkeiten über deren thermische Umgebung besitzen und ist nicht auf natürlich belüftete Gebäude anwendbar, wie es in mehreren Forschungen dargestellt wird. Vergleiche hierzu [22, 59, 61].

Es sind zwar in den vergangenen Jahren verschiedenste Modelle präsentiert worden, die die PMV-Bewertung über Faktoren gemäß vorliegender Bewertungen anpas-

sen, wie beispielsweise in [74], worin die Eingangsparameter für Kleidung und Aktivität in einen Zusammenhang zur Verhaltensveränderung, physiologischen und psychologischen Anpassung gebracht und zum Teil durch Funktionen zur gleitenden Außentemperatur und operativen Temperatur in das Wärmebilanzmodell integriert werden. Ähnliche Ansätze finden sich auch in [49] für warme Begebenheiten oder in [92] und [39] für nicht klimatisierte Gebäude. Diese Erweiterungen sind jedoch bislang noch nicht hinreichend validiert, sodass aus der Literatur noch keine fachliche Übereinstimmung dieser Ansätze zu entnehmen ist. Zudem stellt die Methodik zur Bewertung des thermischen Komforts durch die Wärmebilanz des menschlichen Körpers allgemein einen umfangreichen Ansatz dar, der durch die Komplexität der Eingangsparameter auch zugleich die Fehlerwahrscheinlichkeit dieser Eingangsgrößen erhöht.

In [10] zeigt sich zudem, dass die Wahrnehmung des Innenraumklimas, basierend auf Beschwerden, stark von der psychologischen Verfassung abhängig ist. In der darin beschriebenen Bürostudie konnten keine der Gebäudeigenschaften direkt mit den Beschwerden assoziiert werden. Es zeigte sich vielmehr, dass die Innenraumbeschwerden insbesondere bei den Nutzern auftraten, die sich ebenfalls über individuelle Körpersymptome beschwerten, die in keinem Bezug zu dem Innenraumklima gestellt werden konnten.

Unterscheidung klimatisierte und nichtklimatisierte Gebäude

Wie in [21] zusammengefasst wird, herrscht allgemeiner Konsens darüber, dass bei der Bewertung des thermischen Komforts hinsichtlich der maximalen Temperatur zwischen klimatisierten und nichtklimatisierten Gebäuden zu unterscheiden ist.

Hierbei zeigt sich allgemein, dass die Nutzer von natürlich be- und entlüfteten Gebäuden einen größeren Toleranzbereich vorweisen. Die Auswertung der ASHRAE RP-884 Datenbank, worin Mess- und Umfragedaten von ca. 160 Gebäuden enthalten sind, zeigt, dass sowohl die 80 %ige als auch die 90 %ige Toleranz gegenüber Temperaturüberschreitungen im Sommer bei natürlich belüfteten Gebäuden ca. 70 % höher als bei mechanisch belüfteten Gebäuden liegt. Dies umfasst im Durchschnitt einen Unterschied in der Toleranz von 2,5 K für die 80 %ige und 2,8 K für die 90 %ige Zufriedenheit [22]. Bestätigt wird dies ebenfalls in [96], worin aus der Zusammenfassung mehrerer Studien zu entnehmen ist, dass sowohl für natürlich belüftete als auch klimatisierte

Gebäude die Akzeptanz der Raumtemperaturen signifikant zwischen 25,5 – 28,5 °C sinkt. Wobei die 80 %ige Zufriedenheit in natürlich belüfteten und nichtklimatisierten Gebäuden bei ca. 27,5 °C liegt und ca. 2K höher als in klimatisierten Gebäuden ist.

Vergleichbare Erkenntnisse leiten sich aus einer Bürostudie ab, worin zwischen dem natürlichen und klimatisierten Betrieb gewechselt wurde. Hierbei zeigt sich, dass bei nahezu identischer Luftgeschwindigkeit, operativer Temperatur und relativer Luftfeuchte, das thermische Empfinden der Nutzer zwischen dem klimatisierten Betrieb und dem freien Betrieb voneinander abweicht. Während des klimatisierten Betriebes sind durchschnittlich 2,1 K kältere Temperaturen gewünscht. Zudem zeigt sich, dass die clo-Werte (Bekleidungsisolationswert) in der Studie während der freien Betriebsphase geringer sind, was darauf schließen lässt, dass sich die Nutzer den Begebenheiten anpassen [23].

Zusammenfassend zeigt sich, dass Nutzer in Gebäuden ohne Klimatisierung eine höhere Toleranz in der maximalen Komforttemperatur vorweisen als Personen in klimatisierten Gebäuden. In der Fachwelt gibt es hierzu jedoch verschiedenste Spekulationen bzw. Hypothesen. In [22] wird dies darauf zurückgeführt, dass sich die Nutzer zu sehr an das konstant klimatisierte Innenklima gewöhnen und somit eine andere Erwartungshaltung haben. In [62] wird dieser These widersprochen und mit einer Akkumulation mehrerer kleiner Effekte der adaptiven Maßnahmen begründet. Eine spätere Hypothese, veröffentlicht in [9], begründet diese Anomalie damit, dass natürlich belüftete Gebäude zum einen dem Nutzer größere Einflussmöglichkeiten bieten und dass dieses Steuerungsgefühl zugleich die Erwartungen lockert und zu größeren Temperaturtoleranzen führt.

Als einen weiteren Einflussparameter wird zudem in beispielsweise [66] die unterschiedliche Empfindung des natürlichen Windes aufgeführt.

Das Komfortempfinden bei niedrigen Außentemperaturen ist hierbei nur geringfügig erforscht. In [47], worin mehrere Komfortdatenbanken ausgewertet wurden, zeigt sich, dass ohne eine Heizung sowie eine Lüftungsanlage die neutrale Temperatur der Nutzer bis ca. 16 °C operativer Temperatur sinken kann, wenn der gleitende Mittelwert der Außentemperatur bei ca. 10 °C liegt, da sich die Nutzer entsprechend der Umgebung anpassen. Beim Betrieb einer Heizung wird jedoch davon ausgegangen, dass die minimale neutrale Temperatur bis 18 °C sinken kann und bei sehr kühlen Außentemperaturen (<– 10 °C) sogar wieder bis 20 °C ansteigt.

In [63] zeigt sich zudem, dass Nutzer in kühlen bis neutralen Umgebungen eine Lufttemperatur bevorzugen, die in der Nähe der durchschnittlichen Innenlufttemperatur während der Saison liegt und in der dargelegten Studie ca. 20,7 °C±0,9K beträgt.

Nutzeradaption

Wie bereits einleitend beschrieben, umfassen die Nutzeradaptionen jene Veränderungen, die eine Person bewusst oder unbewusst durchführt, um die Wärme- und Massenströme zu beeinflussen, die auf das thermische Gleichgewicht des Körpers einwirken. Die drei Kategorien der thermischen Anpassung können, wie oben dargelegt, in verhaltensorientierte, physiologische und psychologische Anpassung unterschieden werden.

Die verhaltensorientierten Anpassungen sind Aktionen, die Personen selbst durchführen, um die Wärmebilanz des Körpers zu verändern und somit den thermischen Komfort zu erhalten. Diese Verhaltensanpassungen lassen sich wiederum in drei Kategorien unterscheiden: persönliche, technische und kulturelle Anpassung. Unter persönlichen Anpassungen findet sich die Veränderung der eigenen Aktivität, der Kleidung, der Haltung sowie das Konsumieren von warmen oder kalten Lebensmitteln, aber auch das Bewegen zu anderen Orten. Die technische Einflussnahme umfasst die Modifikation der direkten Umwelt oder Umgebung, wie die Nutzung der Klimaanlage, des Fensters oder des Sonnenschutzes. Als kulturelle Verhaltensanpassungen werden hingegen Maßnahmen zur generellen Anpassung des Tagesablaufes, wie die „spanische Siesta“ beschrieben [93].

Hierbei sind zur verhaltensorientierten Anpassung insbesondere Studien zum Fensteröffnungsverhalten und einer Veränderung der Kleidung zu finden. Wie in [31] zusammengefasst, können die Auslöser des Fensteröffnens noch nicht direkt spezifiziert und quantifiziert werden. Die darin zitierten Forscher zeigen zwar eine Veränderung des Verhaltens zwischen den Jahreszeiten und dass die Fensterstellung selten am Tag verändert wird. Allerdings ist aus manchen Feldstudien zu entnehmen, dass die Innentemperatur die dominierende Größe ist, wie in [44] dargelegt. Andere Untersuchungen wie [42], präsentieren wiederum einen wesentlich stärkeren Bezug zur Außentemperatur statt zur Innentemperatur. Und in [68] ist zudem ein Modell veröffentlicht worden, das einen Zusammenhang zwischen der Innen- und Außentemperatur berücksichtigt.

Die Kleidung als eine weitere Verhaltensanpassung nimmt einen direkten Einfluss auf die thermische Bilanz

des Körpers. Die Kleidungsisolationswert wird in der Einheit clo angegeben. Hierbei entspricht $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ (m}^2 \text{ K/W)}$, das ungefähr einer Zusammensetzung aus Hemd, Hose, Jacke und Schuhen entspricht [25]. In der Berechnung des PMV, zeigt sich, dass ca. 0,3 clo (repräsentativ für eine Jacke) eine Veränderung der optimalen Temperatur um ca. 2K verursachen. In [71] werden 20 Parameter aufgeführt/untersucht, die Einfluss auf die Kleidung nehmen können. Die darin zusammengefassten Auswertungen aus den Komfortdatenbanken ASHRAE RP-884 [22] und ASHRAE RP-921 [17] zeigen, dass prinzipiell kein Unterschied in der Bekleidung zwischen Männern und Frauen sowie zwischen natürlich belüfteten und mechanisch klimatisierten Gebäuden besteht. Zudem zeigt sich, dass insbesondere die Außentemperatur, die operative Temperatur und die relative Luftfeuchte einen Einfluss auf die Bekleidung der Nutzer nimmt. Luftgeschwindigkeiten sowie der Aktivitätsgrad (metabolic activity) beeinflussen diesbezüglich nur geringfügig das Verhalten des Nutzers. Aus den Datenbanken abgeleitet, wird zudem ein dynamisches Kleidungsmodell in ausschließlicher Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur (gemessen um 6.00 Uhr) vorgestellt, das eine maximale Bekleidung von 1,0 und eine minimale Bekleidung von 0,46 ausweist [71]. Das Modell ist entsprechend in der [4] integriert worden. In der [24] findet sich bislang nur eine starre saisonale Unterscheidung für die Heizperiode = clo = 1,0 und Kühlperiode = clo = 0,5.

Die physiologische Anpassung beinhaltet körperliche Aktionen wie Schwitzen und Verengung/Erweiterung der Gefäße, was sowohl eine Form der genetischen Anpassung als auch eine Akklimatisierung an die thermische Umgebung ist [93, 22].

In [46] werden Ergebnisse mehrerer Studien zusammengefasst, worin viele Bezüge zum Schwitzen oder zum Metabolismus gestellt werden. So weist beispielsweise die basale Stoffwechselrate in einem Temperaturband zwischen 10 – 25 °C eine lineare Korrelation zur durchschnittlichen Außentemperatur auf. Eine Steigerung der Monatsdurchschnittstemperatur um 10 K verursacht eine Reduktion der basalen Stoffwechselrate um 2,5 – 3,0 kcal/m²/h [46]. Des Weiteren zeigen Personen, die noch nicht in der warmen Umgebung akklimatisiert sind und moderate Arbeit in dieser verrichten, eine höhere Steigerung der Körpertemperatur, eine stärkere Herzkreislaufbelastung, eine höhere Konzentration von Plasmalaktat und eine gesteigerte Müdigkeit als akklimatisierte Personen. Darüber hinaus verbessert sich die Akklimatisierung, indem Personen länger der Wärme ausgesetzt sind oder physisch trainieren [46]. Der Wärmeverlust des Körpers

durch Strahlung und Konvektion ist proportional zum Temperaturgradienten zwischen der Hauttemperatur und Umgebungstemperatur. Die Anpassungsfähigkeit der Hauttemperatur unterscheidet sich zwischen Männern und Frauen, wird aber auch durch das langfristige Klima einer Region beeinflusst, sodass Personen aus wärmeren Regionen aber auch Frauen eine höhere Hauttemperatur vorweisen und weniger Schweiß produzieren [46]. Die Adaption des Schwitzens wird durch zwei Phänomene beschrieben. Zum einen durch die Anpassung der Schweißdrüsen zur Wärme, und zum anderen durch die adaptiven Veränderungen im Schweißzentrum. Zudem erfolgt bei einer kurzzeitlichen Wärmeakklimatisierung eine höhere Schweißproduktion als bei einer langfristigen Wärmeakklimatisierung, da bei einer langfristigen Akklimatisierung die Schweißdrüsen weniger angesprochen werden und die Anpassung durch die Körpertemperatur und das Schweißzentrum erfolgt. Folglich schwitzen Personen weniger, die in der Lage sind, eine höhere Haut- und Körpertemperatur zu erhalten [46].

Die psychologische Anpassung kann abweichend zu den anderen adaptiven Maßnahmen nicht gemessen oder quantifiziert werden. Es handelt sich hierbei um ein Gefühl der thermischen Wahrnehmung basierend auf vorherigen Erfahrungen und Erwartungen. Es zeigt sich, dass die Sensibilität des menschlichen Körpers reduziert wird, wenn er einem gewissen thermischen Zustand über eine längere Zeit ausgesetzt wird. Ein weiterer Aspekt ist die Einflussmöglichkeit auf die Umgebungszustände, da in weiteren Studien aufgezeigt werden konnte, dass Personen eine größere Toleranz gegenüber den Veränderungen des thermischen Innenraumklimas haben, wenn sie diese steuern können [22, 57]. Bestätigt wird das Phänomen der Einflussmöglichkeit unter anderem in [9], worin die Möglichkeit des Fensteröffnens eine Verschiebung der neutralen Temperatur um ca. +1,5 K ermöglichte. Auch wenn das Toleranzband der Komforttemperatur durch die Möglichkeit der Steuerung verändert wird, wie Studien demonstrieren, ist es in der Realität schwierig, diese adaptiven Möglichkeiten zu quantifizieren. Es zeigt sich beispielsweise auch, dass die Möglichkeit zur Steuerung nicht unbedingt bedeutet, dass die Nutzer diese auch verwenden und die Vermehrung der Einflussmöglichkeiten nicht dazu führt, dass die Nutzer auch zwangsweise alle bedienen werden. Die Brauchbarkeit einer spezifischen Steuerung verändert sich von Zeit zu Zeit in Abhängigkeit zu den Begebenheiten [62]. Bestätigt wird diese Schwierigkeit der Modellierung von Einflussmöglichkeiten ebenfalls in [65], worin zusammengefasst wird, dass die bislang durchgeführten Studien über die Verfüg-

barkeit, Erreichbarkeit und Komplexität von Steuerungssystemen, aber auch der Inneneinrichtung immer nur in einem eingeschränkten Rahmen für spezifische Phänomene durchgeführt worden sind und sich die Vielzahl der Einflussparameter noch nicht in ein Modell überführen lässt.

Nach [22] bieten jedoch die Verhaltensanpassungen, ob bewusst oder unbewusst, die größten Möglichkeiten der Komfortkontrolle. Diese sind zudem maßgebend für die Korrelation zwischen der thermischen Neutralität im Innenraum und dem Außenklima, da diese einen direkten Einfluss auf die Wärmebilanz nehmen im Gegensatz zur Akklimatisierung oder der Gewöhnung an die Umstände. Wie aus der darin beschriebenen Studie hervorgeht, verändert sich die Kleidung sowohl in natürlich als auch mechanisch belüfteten Gebäuden um 0,1 clo pro 2 K Raumtemperaturanstieg [22]. Detailliertere und differenziertere Auswertungen zur Bekleidungsisolierung aus der gleichen Datenbank finden sich in dem oben zitierten Bericht [71].

Wie in [41] zusammengefasst, gibt es bislang keine hinreichende Forschung über kulturbedingte Abweichungen im Komfortempfinden, auch wenn dies in mehreren Veröffentlichungen über den adaptiven Komfort als Einflussgröße angeführt wird.

Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den thermischen Komfort

Die Luftgeschwindigkeit beeinflusst das Komfortempfinden durch die Veränderung des konvektiven Wärmeaustausches und der Verdunstung. Wie in [33] und [61] dargelegt, wird ab einer Luftgeschwindigkeit von ca. 0,1 m/s die freie Konvektion von der gezwungenen Konvektion überlagert und erhöht somit den Wärmefluss. Die in [9] vorgestellte Bürostudie zeigt, dass sogar Luftgeschwindigkeiten ab 0,05 m/s von ca. 50 % der Testpersonen wahrgenommen werden können. Die Testpersonen trugen hierbei Kleidung mit einem durchschnittlichen CLO von ca. 0,7 (z.B: lange Hose, Schuhe und Hemd) und übten Tätigkeiten mit einem durchschnittlichen MET von 1,3 (sitzende Tätigkeiten, Büroarbeiten) aus. Vergleichbare Erkenntnisse lassen sich auch aus entsprechenden Laborstudien [35, 79] entnehmen.

Die Verdunstung und Schweißproduktion steht ebenfalls in einem direkten Bezug zur Luftgeschwindigkeit, wie in [81] ermittelt wurde. Die Verdunstung trägt zum Wärmeaustausch des menschlichen Körpers insbesondere bei, wenn die Lufttemperatur über der Hauttemperatur liegt.

Hierbei wird der Kühleffekt durch die Verdunstung am größten. Dies geschieht ab ca. 30 °C operativer Temperatur [8]. Diese sogenannte Verdunstungskühlung ist ein Zweiphasen-Wärmeübergang bei dem Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig. Hierbei kommt es zur Kühlung der Haut und der darüber liegenden Schicht, da für diesen Phasenwechsel Energie in Form der Verdampfungsenthalpie benötigt wird, welche aus der näheren Umgebung der Phasengrenze entstammt. Wichtiges Kriterium hierbei ist der Feuchtegehalt der umgebenden Luft, denn je trockener diese ist, umso wirksamer ist die Verdunstungskühlung [45]. In einer ungesättigten Umgebung verhindert eine hohe Luftgeschwindigkeit hierbei eine Sättigung der Luft an der Grenzschicht und begünstigt somit die Verdunstungskühlung. Wie in [73] beschrieben, kann die gesamte Kühlung des Körpers allein durch die Verdunstungs- und sensible Kühlung verdoppelt werden, wenn 20 % der Oberfläche feucht ist.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Steuerung der Luftgeschwindigkeit, insbesondere, wenn diese nutzerindividuell stattfindet, bei warmen Temperaturen eine Erhöhung des thermischen Komfortbandes ermöglichen kann. Dies zeigen auch mehrere Studien, wie es in [91] zusammengefasst und auch in [95] durch weitere Untersuchungen mit einem Deckenventilator bestätigt wird. Hierbei zeigte sich, dass erst bei einer Raumlufttemperatur von über 28 °C und hoher Luftfeuchtigkeit (60 % und 80 %) das thermische Empfinden signifikant beeinflusst wird. Zudem zeigte sich, dass kaum ein Unterschied zwischen 0,7 m/s bis 1,8 m/s liegt. In [91] wird darüber hinaus beschrieben, dass größere Luftgeschwindigkeiten ebenfalls bevorzugt werden, wenn höhere Luftfeuchten vorliegen. In [2] wird 22,5 °C als Grenztemperatur für eine bevorzugte Geschwindigkeitssteigerung deklariert, um das Zugluftisiko zu reduzieren.

Der mögliche Kühleffekt durch Steigerung der Luftgeschwindigkeit ist in mehreren Studien bereits untersucht worden. Hierbei zeigt sich, dass der Effekt des erhöhten Wärmeverlustes durch gesteigerte Luftbewegung stärker bei hoher Aktivität sowie leichter Kleidung wirkt und verstärkt auftritt, wenn die Strahlungstemperatur größer als die Lufttemperatur ist. Die Steigerung der bevorzugten operativen Temperatur ist jedoch hierbei limitiert. Wie in [72] zusammengefasst und auch in [69] dargelegt, kann die operative Temperatur durch erhöhte Luftgeschwindigkeit allgemein nicht mehr als 3 K über die Grenze der Komfortzone angehoben werden und die Luftgeschwindigkeit sollte prinzipiell nicht höher als 0,8 m/s betragen,

da sonst Zegerscheinungen auftreten. Folglich entstehen Schwierigkeiten insbesondere bei hohen Temperaturen, wenn die bevorzugte Luftgeschwindigkeit nicht mehr den neutralen Komfortzustand aufrechterhalten kann. Dies resultiert aus dem Konfliktbereich zwischen Kühleffekt und der Zugluftgefahr [91].

Auch gegenwärtige Normungen erlauben eine Erweiterung des Komfortbandes, wenn höhere Luftgeschwindigkeiten vorliegen. In der [4] finden die oben genannten 3 K maximale Temperaturdifferenz in Abhängigkeit zur Luftgeschwindigkeit Anwendung, in der [24] kann ebenfalls eine Korrektur in Anlehnung an die [25] integriert werden, sofern der Nutzer die Luftgeschwindigkeit kontrollieren kann. Für Bürotätigkeiten (leichte, sitzende Tätigkeit) wird eine maximale Geschwindigkeit von $< 0,82$ m/s mit einer maximalen Temperaturkorrektur von < 3 K empfohlen (siehe hierzu Abbildung A.2 in [24] und Abbildung G.1 in [25]).

Wie bereits oben erwähnt, ist hierbei zu beachten, dass der Nutzer den Luftstrom individuell auf sein Bedürfnis einstellen kann, um Zuglufterscheinungen zu vermeiden. Zuglufterscheinungen sind ungewollte lokale Kälteempfindungen am Körper, die durch Luftbewegung hervorgerufen werden. Wie in [40] beschrieben wird, ist dies bei Personen, die Bürotätigkeiten ausüben, ein sehr häufiger Grund (60 % – 100 %) für Unbehaglichkeit am Arbeitsplatz. Zudem wird darin beschrieben, dass es bereits Anzeichen gibt, auch wenn noch nicht explizit nachgewiesen, dass täglich ausgesetzte Zugluft in kalten Umgebungen verschiedene Krankheiten hervorrufen kann.

Das Empfinden der Zegerscheinung hängt jedoch stark von der Frequenz des Luftstromes ab. Wie in [34] gearbeitet wurde, sind Nutzer besonders sensibel gegenüber einem Luftstrom mit einer Frequenz zwischen 0,3 – 0,5 Hz (den großen Wirbeln mit dem höchsten Energiespektrum) und neigen somit in neutralen bis kühlen Umgebungen zu einem höheren Zugluftisiko. Darüber hinaus entnimmt sich aus [19, 48, 97, 98], dass der natürliche Wind ein Spektrum aufweist, das angenehmer empfunden wird als künstlich erzeugter Luftstrom.

Einfluss des thermischen Komforts auf die Produktivität

Die oben beschriebenen Bemühungen zum Verständnis des Komforts rühren primär aus dem Bestreben, den Energieverbrauch sowie die Investitions- und Betriebskosten durch Ausreizung der Komfortgrenzen zu reduzieren. Allerdings zeigt sich, dass der Komfort zudem in einer Wechselbeziehung zu der Produktivität sowie einem wirtschaftlichen Nutzen steht, sodass eine Ausrei-

zung der Komfortgrenzen nicht nur finanzielle Einsparungen erwarten lässt, sondern auch einen Einfluss auf die Arbeitsprozesse der Nutzer nehmen kann.

In [78] wurde der wirtschaftliche Nutzen von energierelevanten Einsparmaßnahmen bewertet, die zu einer Veränderung des Raumklimas führen. In den Untersuchungen wird zusammengefasst, dass die finanziellen Verbrauchskosten sowie eingesparten CO₂-Immissionen in keinem Verhältnis zu den wirtschaftlichen Einbußen stehen [78]. In dieser Studie wurden zudem die Auswirkungen des Innenraumklimas auf Basis der menschlichen Reaktionen beobachtet. Dies beinhaltete die Müdigkeit, den zerebralen Blutfluss, die Empfindung zu der Umgebung sowie Symptome des Sick Building Syndroms. Es war zwar keine signifikante Korrelation zwischen einer Veränderung des Raumklimas und der Leistung festzustellen, jedoch zeigte sich, dass ein höherer zerebraler Blutfluss erforderlich ist, um die Leistung aufrechtzuerhalten, wenn sich das Raumklima negativ veränderte. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Leistung mit der Zeit insbesondere ab 28 °C und zunehmender Müdigkeit abnimmt und dass die Leistung gut ist, wenn die Probanden mit dem Raumklima zufrieden sind [78]. In einem Callcenter konnte zudem aufgezeigt werden, dass ein Temperaturanstieg von 25 °C auf 26 °C die Antwortquote um ca. 1,9 % reduziert und diese auch weiter linear mit steigender Temperatur sinkt [78], was sich auch aus den Untersuchungen in [76] ableiten lässt, worin aufgezeigt wird, dass zwischen 21 °C – 25 °C die Temperatur kaum einen Einfluss auf die Leistung der Arbeiter nimmt, jedoch ab 25 °C die Arbeitsleistung um ca. 2 % pro 1K Temperaturanstieg fällt. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich auch aus [54] entnehmen. Zudem zeigt sich in [53], dass bei Temperaturen von 28 °C die negative Stimmung und Ungeduld signifikant höher ist als bei 21 °C, was ebenfalls einen Einfluss auf das Arbeitsverhalten nehmen kann. In [75] wird der Produktivitätsverlust nochmals bestätigt. Darin konnte eine um ca. 10 % geringere Leistung bei 30 °C im Vergleich zu 21,6 °C festgestellt werden, wobei die quantitativen Korrelationen nicht als allgemeingültig gesehen werden können, da zum einen die Stichprobe gering war und zum anderen eine Vielzahl unterschiedlicher Symptome festgestellt werden konnte, wie in [75] reflektiert wird. Folglich lassen sich aus den genannten Korrelationen keine allgemeingültigen Rückschlüsse auf wirtschaftliche Folgen ziehen, sondern lediglich Tendenzen ableiten.

Neben der Temperatur gibt es ebenfalls Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit und der empfundenen Luftqualität. In [75] zeigt sich beispielsweise, dass die

Leistung bei einer normalen Bürotätigkeit direkt zu der Unzufriedenheit mit der Luftqualität abnehmen kann. Vergleichbare Korrelationen zeigen sich auch zwischen der Leistung und der Lüftungsrate.

Eine Bekräftigung findet sich hierfür auch in [51], worin zusammengefasst wird, dass die Rate der unzufriedenen Personen einen guten Indikator für den Produktivitätsverlust auf Grund der Innenraumluftqualität repräsentiert und dies durch einen entsprechenden Außenluftwechsel beeinflusst werden kann. Bestätigt wird der Produktivitätsverlust durch eine schlechter wahrgenommene Luftqualität ebenfalls in [64]. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die empfundene Luftqualität nicht nur durch menschliche Immissionen beeinflusst wird, sondern auch dem Einfluss der Temperatur, Feuchte, Luftgeschwindigkeit, Gerüchen etc. unterliegt und somit schwierig als Parameter zu quantifizieren ist [90, 32].

Die japanische Gesellschaft für Arbeitsgesundheit (Society for Occupational Health) gliedert die Müdigkeit in drei Kategorien mit entsprechender Differenzierung in je 10 Unterpunkte ein. Die Gruppe 1 beschreibt die Schläfrigkeit „drowsiness“, in der Gruppe 2 befinden sich die Zustände der Konzentrationsschwierigkeit „difficulty in concentration“ und die Gruppe 3 umfassen die Elemente der physischen Schwäche „projection of physical disintegration“. Diese Formen der Müdigkeit treten in Abhängigkeit zur Tätigkeit in unterschiedlicher Reihenfolge auf. Eine mentale Tätigkeit oder Nachtdienste zeigen ein Muster wie: „1 > 2 > 3“ und bei physischer Arbeit zeigt sich eine Gewichtung wie: „3 > 1 > 2“ [77].

Bei einer mentalen Tätigkeit ist festzustellen, dass je schwerer die Aufgabe ist, desto mehr sauerstoffreiches Hämoglobin und auch eine größere Gesamt-Hämoglobinkonzentration benötigt wird sowie der zerebrale Blutfluss ansteigt [77]. Allerdings zeigt sich in der Studie ebenfalls, dass die klimatischen Begebenheiten nicht immer mit einer Veränderung der Performance korrelieren. So zeigt sich, dass bei den untersuchten Frauen keine signifikante Veränderung in der Leistung zwischen den Raumtemperaturen 25 °C, 28 °C und 33 °C stattfand, jedoch die Reaktionszeit mit steigender Temperatur abnahm. Bei den männlichen Probanden zeigt die Studie hingegen widersprüchliche Ergebnisse. So war die Produktivität beim Schreibtest in einer Umgebung von 28 °C am höchsten und zwischen 25 °C und 33 °C kaum zu unterscheiden. Trotz der quantitativen Auswertung lag hingegen die subjektive Bewertung der Arbeitsleistung bei 33 °C am niedrigsten, was darauf schließen lässt, dass die Produktivität nicht ausschließlich für die Aufgabenperformance zur Bewertung herangezogen werden kann,

wie in [77] zusammengefasst wird. Zudem ist es schwierig, diese zu messen, da es Faktoren wie intellektuelle Aktivitäten beinhaltet, die von psychologischen Faktoren wie Aufmerksamkeit und Motivation beeinflusst werden [78]. Ähnliches zeigt sich bei der Beleuchtungsstärke. Hierbei gibt es ebenfalls keine signifikante Abweichung in der Performance zwischen 3 Lux und 800 Lux, obwohl die subjektive Bewertung der Nutzer bei 3 Lux wesentlich schlechter ausfiel [77].

Ein weiterer Aspekt, der sich in der wirtschaftlichen Leistung eines Unternehmens äußert, sind die Krankentage von Mitarbeitern. In [36] wird prognostiziert, dass eine Erhöhung der Außenluftwechselrate bei milden Wetterbedingungen zur Kompensation der mechanischen Kühlung zu einer Reduktion der infektiösen Partikel in der Luft führen kann und somit die Krankheitstage reduziert werden können. Zwar würden hierbei die Energiekosten steigen, doch der finanzielle Nutzen der reduzierten Krankheitsausfälle wird hierbei ca. drei- bis achtmal höher als die zusätzlichen Energiekosten prognostiziert. Vergleichbare Korrelationen werden auch in [15] zusammengefasst.

Akklimatisierung in kühlen Umgebungen

Die Akklimatisierung in kühlen Umgebungen ist als bedeutsame Komponente zu verstehen, um die minimale neutrale Temperatur zu reduzieren, um somit den Energieverbrauch zu reduzieren und die relative Luftfeuchtigkeit während der Heizperiode zu erhöhen, wodurch wiederum das Risiko der Atemwegsinfektionen verringert werden kann.

Der Akklimatisierungsprozess zu Wärme oder Kälte wird in [38] wie folgt zusammengefasst. Die primäre physiologische Anpassung zu Wärme beinhaltet eine Erhöhung des Blutflusses, Steigerung der Schweißrate mit einem frühen Beginn der Schweißproduktion in flüssiger Konzentration, Reduktion des Elektrolyteverlustes und größerem Widerstand gegenüber einer Dehydrierung sowie eine Reduktion des basalen Metabolismus und des Herzschlages, einer Abschwächung der empfundenen Anstrengung und einer Reduktion des Sauerstoffverbrauches bei einer gegebenen Aktivität. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Wärmeakklimatisierung keine größere Speicherung von Wärme im Gewebe ermöglicht.

Bei der Kälteakklimatisierung wird der Ruhemetabolismus erhöht, die Körpertemperatur fällt bei einer intensiven Kälteeinwirkung, das Zittern reduziert sich, die Effizienz der Thermoregulierung über die Gefäßveränderung verbessert sich und es kann eine geringere Erhöhung des Blutdrucks und der Herzfrequenz während der Gefäßver-

engung wahrgenommen werden. Bei nicht akklimatisierten Körpern ist die thermoregulative Anstrengung größer, wenn diese neuen klimatischen Umgebungen ausgesetzt sind.

Grundlagen Thermoregulierung des Körpers

Der Körper produziert durch den Stoffwechsel thermische Energie, die hauptsächlich in der Leber, im Gehirn, im Herzen und der Skelettmuskulatur erzeugt wird [3]. Diese thermische Energie wird mit der Umgebung durch Strahlung, Konvektion sowie Verdunstung der Haut, aber auch der Konvektion und Verdunstung über die Respiration ausgetauscht. Der Einfluss durch die Respiration umfasst in moderaten Umgebungen ca. 10 – 13 %, kann jedoch in sehr kalten Umgebungen und ruhendem Metabolismus bis zu 30 % betragen [38, 14]. Der Wärmeverlust durch die Verdunstung über die Haut erfolgt erst ab einer Umgebungstemperatur von ca. 28 °C [7] und beeinflusst somit nicht die Thermoregulierung in einer milden bis kühlen Umgebung.

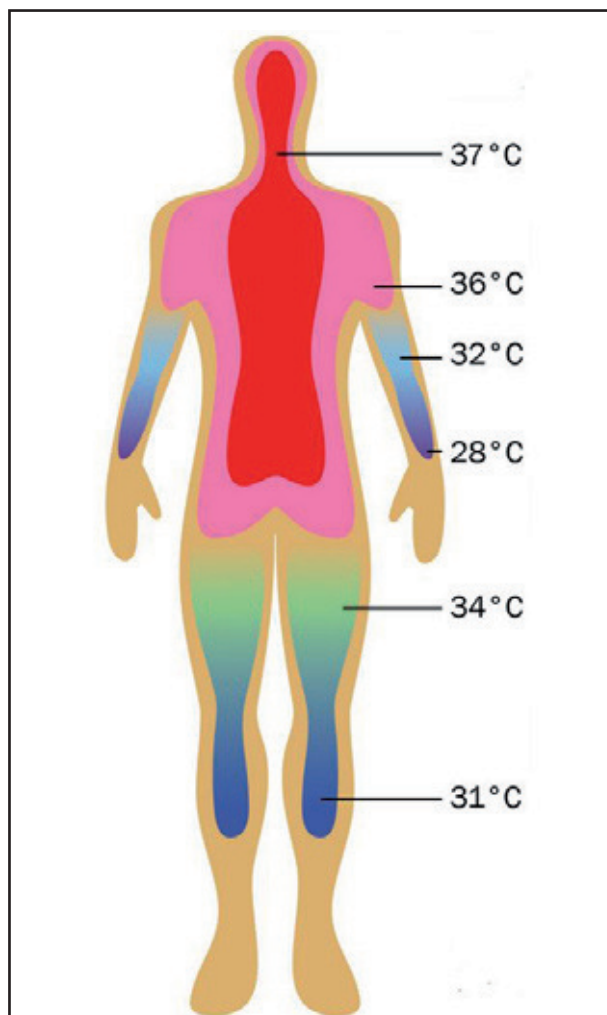


Abb.: Temperaturunterschied der Körperregionen (© Hohenstein Institute)

Das primäre Ziel des Körpers besteht bei der Thermoregulierung darin, eine möglichst konstante Körperkerntemperatur von ca. 37 °C aufrechtzuerhalten. Verantwortlich hierfür ist der Hypothalamus, ein Teil des Zwischenhirns, der neben der Thermoregulierung auch Hormone beeinflusst, die auf verschiedene Vorgänge im Körper einwirken. Wie in [67] zusammengefasst wird, gibt es eine Vielzahl von Modellen zur Beschreibung der menschlichen Thermoregulierung, die darin übereinstimmen, dass bei einer Einwirkung von Wärme, der Körper zunächst durch Erweiterung der Blutgefäße auf die thermische Last reagiert und gegebenenfalls zusätzlich durch Schwitzen die Verdunstung steigert, um die überschüssige Wärme abzuführen.

In einer kühlen Umgebung reagiert der Körper durch Verengung der Blutgefäße, um den Wärmeverlust zu reduzieren und verursacht gegebenenfalls Zittern, das sowohl durch die Hauttemperatur als auch Körpertemperatur ausgelöst werden kann. Das Zittern ist eine Thermogenese, bei der sich wiederholt Muskelgruppen zusammenziehen, wodurch Wärme ohne externe Muskelarbeit erzeugt wird. Hierbei werden vom Körper bei ruhender Tätigkeit ca. 200 – 250 W an der Luft und mehr als 350 W im Wasser an Energie erzeugt [16].

Darüber hinaus gibt es noch Verhaltensanpassungen, wie die Änderung der Bekleidung, Steigerung der Aktivität etc., um auf die Einwirkung der thermischen Last zu reagieren.

Die Gefäßverengung verringert den Blutfluss der Haut, wodurch die Wärmeübertragung zwischen dem Körperkern und der Oberfläche (Haut, Subkutis und Skelettmuskel) reduziert wird und die Isolierung der Oberfläche durch den reduzierten Temperaturgradienten steigt. Wenn jedoch die Wärmeproduktion des Körpers weiterhin geringer als der Wärmeverlust ist, sinkt die Hauttemperatur stetig. Hierbei kann der Blutfluss zu den Venen auf null reduziert werden, wodurch auf der Haut Temperaturgradienten von bis zu 10 K auftreten können. Hierbei ist Noradrenalin der primäre Neurotransmitter, der für ca. 60 % der kalteinduzierten Gefäßverengung verantwortlich ist. Wenn jedoch die Kühlung weiter anhält, sind keine adrenergen oder neuronalen Mechanismen für die Reduktion des Blutflusses der Haut verantwortlich. Die Kühlung der Haut resultiert aus einer Steigerung der mitochondrialen reaktiven Sauerstoffspezies, die wiederum die Gefäßverengung hervorrufen [16, 3]. Ältere Menschen (ab ca. 60 Jahre) sind hierbei weniger tolerant gegenüber kühlen Umgebungen als jüngere Menschen, da sich dort nur geringfügig die Gefäße verändern können

und diese zudem über eine reduzierte Wärmekonservierung verfügen [16].

Die Form und Intensität der Thermoregulierung variiert stark in Abhängigkeit zur Anthropometrie und Körperstruktur. Große Menschen verlieren auf Grund der großen Körperoberfläche mehr Körperwärme in kühlen Umgebungen als kleine Personen. Darüber hinaus zeigen Menschen mit einem großen Oberflächen-Massenverhältnis eine schnellere Reduktion der Körperkerntemperatur. Des Weiteren hat Fett den größten thermischen Widerstand der Körpergewebe, sodass bei Menschen mit einem großen Unterhautfettgewebe die Körperkerntemperatur sehr langsam sinkt und diese zugleich eine geringere Hauttemperatur vorweisen, obwohl sich die Gefäße nicht so stark und schnell wie bei dünnen Menschen zusammenziehen [16, 89].

Grundlagen der Temperaturwahrnehmung

Der Körper nimmt die thermischen Begebenheiten der Umgebung durch Rezeptoren wahr, die sich in vier Typen (kalt, warm, Kälteschmerz und heiß) unterscheiden lassen. Der Grad der Stimulierung der Nervenenden bestimmt die Intensität der Wahrnehmung. Hierbei fühlen Personen sich wesentlich kälter und wärmer, wenn die Hauttemperatur schnell fällt oder steigt. Darüber hinaus liegen wesentlich mehr Kälterezeptoren als Wärmerezeptoren vor, die auch je nach Körperteil variieren, sodass Körperregionen, wie die Hüfte oder Brust besonders sensibel gegenüber Kälte reagieren [3].

Obwohl der Einfluss der Körperkerntemperatur auf die Thermoregulierung wesentlich stärker ist als die der Hauttemperatur, nehmen beide Parameter einen gleichen Einfluss auf das thermische Empfinden der Umgebung, wobei die Hauttemperaturen am Oberkörper geringere Toleranzen vorweisen als beispielsweise die Finger, wie in [3] zusammengefasst wird. Bestätigt wird dies ebenfalls in [70] für junge Menschen. Hingegen zeigt sich bei älteren Probanden eine ausschließliche Abhängigkeit des thermischen Komforts zur Lufttemperatur.

Anpassung des Körpers an die kalte Umgebung

Die Akklimatisierung zur Kälte ist ein Begriff, wodurch die lang anhaltenden biologischen Veränderungen beschrieben werden, die sich durch eine wiederholte oder anhaltende Kälteeinwirkung entwickeln und sich günstig bei geringen Umgebungstemperaturen auswirken [43].

Wie in [67] zusammengefasst wird, ist die Akklimatisierung des gesamten Körpers jedoch schwierig nachzuweisen und die bisherigen Forschungsergebnisse sind nicht hinreichend bestätigt. Lediglich eine lokale Akklimati-

sierung der Finger und Hände konnte bislang auf Basis der Gefäßveränderung belegt werden.

Eine Theorie zur Akklimatisierung an eine kalte Umgebung ist in [94] veröffentlicht, worin sich der Prozess in drei Phasen aufteilt:

- Gewöhnung (habituation)
- Metabolische Akklimatisierung
- Isolative Akklimatisierung

Die Gewöhnung des Körpers ist eine thermoregulatorische Anpassung des Körpers auf chronische oder wiederholte Kälteeinflüsse. Die metabolische Akklimatisierung umfasst eine Muskelkontraktion wie das Zittern aber auch die Entwicklung von zitterfreier Thermogenese (NST). Die isolative Akklimatisierung wird durch eine Steigerung des Wärmeerhalts charakterisiert. Durch die isolative Akklimatisierung reduziert sich die thermische Leitfähigkeit der Haut in einer kühlen Umgebung infolge einer peripheren Gefäßverengung.

In [84] wird hingegen nur zwischen der isolativen und metabolischen Akklimatisierung unterschieden, worin ebenfalls verdeutlicht wird, dass in Bezug zur Kälteakklimatisierung die Reaktionen auf Kälte sehr individuellen Abweichungen unterworfen sind und manche Personen über die Isolierung und andere über einen gesteigerten Metabolismus reagieren, und dass die Personen, die im Sommer eine hohe Metabolismus-Reaktion auf die Kälteeinwirkung zeigen, auch im Winter entsprechend reagieren [84].

Theorie der Gewöhnung

Bei der Gewöhnung handelt es sich um eine thermoregulatorische Anpassung des Körpers auf chronische oder wiederholte Kälteeinflüsse. Wenn sich die Gewöhnung entwickelt, schwächen die physiologischen Reaktionen (das Zittern und die Gefäßverengung) ab. Dies wird in verschiedenen Studien bestätigt, wie in [16] zusammengefasst wird.

Dieser Vorgang zeigt sich sogar, wie darin beschrieben wird, wenn die Kälteeinwirkung auf relativ kleine Regionen des Körpers begrenzt ist. Zu berücksichtigen ist jedoch wie oben bereits erwähnt, dass es nur unzureichende Bestätigungen darüber gibt, dass sich die Akklimatisierung auf die Gefäßveränderung des gesamten Körpers auswirkt und bislang lediglich die lokale Anpassung hinreichend nachgewiesen ist. Dies zeigt sich beispielsweise in [82], worin festgestellt wurde, dass bei einer Reduktion der Hauttemperatur durch einen Aufenthalt in kurzer Sommerkleidung von 6 h pro Tag (insgesamt 10 Tage) in einer Umgebung mit 15 – 16 °C, sich

physisch nur der Blutfluss der Hände und der Blutdruck in Folge der Akklimatisierung verändert haben. Am Ende der Versuchsreihe sank der Blutdruck in der thermoneutralen Umgebung stärker ab und der Blutfluss der Hände war signifikant niedriger am Ende der Versuchsreihe. Es konnten jedoch in Bezug zur physischen Gewöhnung keine Auswirkungen auf die Körperkerntemperatur festgestellt werden. In [60] wird aufgezeigt, dass die Temperatur der Haut, die des Körperkerns sowie die der Finger und der Füße langsamer nach einer Akklimatisierung fällt und dass das Zittern sich signifikant nach drei Wochen der Akklimatisierung verringert.

Der Grad der Kältegewöhnung zeigt hierbei eine Korrelation zu der Dauer der Kälteeinwirkung [16].

Theorie der metabolischen Akklimatisierung

Die metabolische Akklimatisierung beschreibt die Muskelkontraktion wie das Zittern aber auch die Entwicklung von zitterfreier Thermogenese (NST) [16]. Der Energieverbrauch des Körpers ist, wie in [89] zusammengefasst wird, abhängig von der fettfreien Masse als das metabolisch aktive Gewebe (z.B. Muskeln) und der Fettmasse als das wenig metabolisch aktive Gewebe. Eine größere fettfreie Masse (mehr Muskeln) zeigt hierbei eine höhere Energieproduktion. Es zeigt sich hierbei, dass zwar der Energieverbrauch von Übergewichtigen prinzipiell höher im Vergleich zu schlanken Personen ist, sich jedoch bei der Einwirkung von Kälte nur geringfügig verändert, hingegen der Metabolismus bei schlanken Personen signifikant ansteigt. Hierbei zeigt sich zudem, dass die Differenz zwischen der Haut- und Körperkerntemperatur bei den Übergewichtigen und schlanken Probanden sehr ähnlich ist, sodass sich dies nicht auf eine Isolierung des Fettgewebes in der Unterhaut (Subkutis) zurückführen lässt und Übergewichtige in Bezug zur Körpergröße unabhängig von der Fettschicht die Wärme effizienter erhalten können [89, 20].

Dies wird zum Teil in [18] bestätigt, worin aufgezeigt wird, dass der Energieverbrauch eines Körpers von der fettfreien Masse abhängt. Jedoch weitere Einflussfaktoren wie Alter, Geschlecht, Fettmasse, Verhältnis von Oberfläche zu Volumen keine Korrelation zum Energieaufwand zeigen. In [84] zeigt sich zudem, dass zwar der individuelle Metabolismus von der fettfreien Masse abhängig ist, jedoch der Anstieg der Kälte induzierten Energieproduktion in keinen Bezug zur fettfreien Masse oder der Fettmasse gesetzt werden kann. Es zeigen sich hierbei jedoch saisonale Änderungen der metabolischen Reaktion zwischen Winter und Sommer, die jedoch ebenfalls keinen Zusammenhang zum Körperaufbau oder der

physischen Verfassung vorweisen und hierbei die Metabolismus-Unterschiede ferner auf autonome oder hormonelle Funktionen zurückgeführt werden.

Die meiste durch Kälte induzierte Thermogenese ist auf die Kontraktion der Skelettmuskulatur zurückzuführen. Dies wird häufig von den Menschen zunächst durch eine Steigerung der Aktivität oder einem Zittern hervorgerufen. Beim Zittern wird der Großteil der aufgewandten Energie in Wärme und nur ein geringer Teil in Arbeit umgesetzt. Dies geschieht bereits nach wenigen Minuten, wenn die Nutzer der Kälte ausgesetzt sind, und wird wie oben beschrieben durch einen Fall der Haut- sowie Körperkerntemperatur eingeleitet, wobei die Körperkerntemperatur den größten Einfluss auf das Zittern nimmt. Die Intensität des Zitterns erreicht hierbei das Maximum bei einer Körperkerntemperatur zwischen 34 – 35 °C und hört bei 31 °C auf [16]. Wenn das Zittern beginnt, steigt der Metabolismus um 30 – 60 %, wobei die zitterfreie Thermogenese, wie in [84] dargelegt wird, einen großen Anteil daran nimmt.

In [50] zeigt sich, dass bei älteren Menschen die Energieproduktion durch Kälteeinwirkung sinkt und auch nach der Erwärmungsphase nicht wie bei den jungen Probanden wieder auf das ursprüngliche Niveau zurückkehrt. Bestätigt wird dies ebenfalls in [18], worin die Kälte induzierte Thermogenese eine negative Korrelation zum Alter zeigt.

Es gibt Studien aus denen hervorgeht, dass nach 7 – 14 Tagen kontinuierlicher Kälteeinwirkung der ruhende Metabolismus steigt, allerdings zeigt sich dies nicht bei einem Versuch, in dem die Probanden nur 6 h/Tag der Kälte ausgesetzt waren [82].

Während der Kälteeinwirkung sinkt vor allem auch der Herzschlag, bei dem jedoch nach einer Kälteakklimatisierung keine signifikante Veränderung festzustellen ist. Ähnliches zeigt sich auch mit dem Blutdruck, der zwar durch die Kälteeinwirkung steigt, jedoch keine bedeutende Abweichung vor und nach der Akklimatisierung vorweist. Allerdings veränderte sich der Sauerstoffverbrauch signifikant durch die Akklimatisierung. Nach drei Wochen einer Kälteakklimatisierung stieg der Sauerstoffverbrauch an [60]. Es werden ca. 95 % der Energie in den Mitochondrien und 5 % in den anaerob arbeitenden Zellen produziert. Die Mitochondrien regenerieren über die Atmungskette das energiereiche Adenosintriphosphat, sodass eine Steigerung des Sauerstoffverbrauchs ein Indikator für die Energieproduktion des Körpers ist [67]. Aus [82] entnimmt sich, dass die Kälteakklimatisierung zu einem signifikanten Anstieg von zitterfreier Thermo-

genese (non shivering thermogenesis – NST) führt. NST wird in vielen Studien mit dem braunen Fett in Bezug gestellt, wie in [18], wo die Kälte induzierte Thermogenese ebenfalls mit dem Volumen an braunem Fett korreliert.

Säugetiere besitzen allgemein zwei Arten von Fettzellen. Es sind weiße und braune Adipozyten. Am bekanntesten sind hierbei die weißen Fettzellen, deren Funktion in der Energiespeicherung liegt, hingegen das braune Fettgewebe Energie produziert. Im braunen Fettgewebe wird durch das Thermogenin (UCP1) Wärme ohne Muskelaktivität generiert. Das braune Fett ist insbesondere an Nagetieren erforscht und war bislang bei Menschen vordergründig nur bei Säuglingen bekannt. Es bestand über mehrere Jahre ein allgemeiner Konsens darüber, dass das braune Fett bald nach der Geburt verschwindet und dass Erwachsene dies unter normalen Bedingungen nur noch geringfügig vorliegen haben. Dies wird seit ein paar Jahren jedoch in mehreren Studien widerlegt. Es zeigt sich darin, dass bedeutsame Konzentrationen von braunem Fett bei Menschen vorzufinden sind, die in kühlen Umgebungen leben, wobei auch bei Menschen aus den Tropen braunes Fett nachgewiesen werden konnte, wie in [83] zusammengefasst wird. Es wird zudem vermutet, dass braunes Fett gegen Fettleibigkeit wirken kann [18]. Das braune Fettgewebe steht umgekehrt in Bezug zum BMI (body mass index). Aus den Ergebnissen in [82] zeigt sich, dass durch eine Kälteakklimatisierung braunes Fettgewebe zunehmend aktiviert werden kann, wie es auch bei Nagetieren zuvor bewiesen werden konnte. Darüber hinaus zeigt sich, dass NST in Bezug zur maximalen Aktivität des braunen Fettes gezogen werden kann. Allerdings zeigt sich hierbei auch, dass die Aktivität des braunen Fettes keinen Einfluss auf die bevorzugte Temperatur oder die Komfort-Bewertung nimmt. Trotz der gesteigerten Aktivität des braunen Fettes konnte jedoch in einem Versuch nach 10 Versuchstagen keine Umwandlung von weißem zu braunem Fett bemerkt werden, wobei die Autoren die Möglichkeit offen lassen, dass eine entsprechende Umwandlung über einen längeren Zeitraum der Kälteeinwirkung nicht auszuschließen ist. In [88] wird ebenfalls beschrieben, dass kurzzeitige Kälteerfahrungen nicht ausreichen können, um braunes Fett zu aktivieren, wie auf Basis einer Studie mit einem Eismann und seinem Zwillingbruder aufgezeigt wird. Es wird hierbei vermutet, dass längere Zeiträume von milder Kälteeinwirkung effektiver für das Wachstum von braunem Fett sind, als kurzzeitige extreme Kälteerfahrungen. Aus [18] entnimmt sich zudem, dass auch bei einer Umgebungstemperatur von 19 °C der Anteil an braunem Fett gesteigert werden kann.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass es nicht ausreichend Beweise dafür gibt, dass die Thermogenese des braunen Fettes groß genug ist, um die Körperkerntemperatur während einer Kälteeinwirkung auf den gesamten Körper aufrechtzuerhalten, wofür normalerweise eine starke metabolische Reaktion erforderlich ist [16]. In [18] wird ebenfalls betont, dass der Beitrag des braunen Fettes auf die Kälte induzierte Thermogenese unklar ist.

In [88] wird zusammengefasst, dass die Studien über den Zusammenhang zwischen dem braunen Fett und NST großen Schwankungen innerhalb einer Gruppe aufzeigen, die sich gegebenenfalls auf Unterschiede in den Lebensgewohnheiten aber auch genetischen Komponenten zurückführen lassen. Neben dem braunen Fett können zudem weitere Gewebe, wie die Skelettmuskeln zu NST beitragen. Die Skelettmuskulatur ist ein vermeintlich alternatives Gewebe für NST und eine Studie macht diese für eine 40 %ige Steigerung des Körperenergieaufwandes nach einer Adrenalin-Infusion verantwortlich. In [82] und darin zitierten Studien lässt sich allerdings kein Bezug herstellen. Eine weitere Möglichkeit, die Temperatur im Körper in einer kalten Umgebung aufrechtzuerhalten oder gar zu erhöhen, bieten Meditationstechniken, wie die g-Tummo Meditation. Es handelt sich hierbei um eine Atemtechnik die von Tibetanern im Himalaya angewendet wird. Durch die Meditation wird zum einen die Thermogenese angeregt, doch um diese aufrechtzuerhalten, findet zusätzlich eine meditative Visualisierung statt, wie sich in [52] zeigt. Dadurch konnten die Probanden, die alle über mehrjährige Erfahrung dieser Meditations-technik verfügten, über einen längeren Zeitraum in kurzer Bekleidung bei ca. 0 °C Umgebungstemperatur die Körpertemperatur aufrechterhalten.

Theorie der isolativen Akklimatisierung

Die isolative Akklimatisierung wird durch eine Steigerung des Wärmeerhalts charakterisiert. Durch die isolative Akklimatisierung reduziert sich die thermische Leitfähigkeit der Haut in einer kühlen Umgebung infolge einer peripheren Gefäßverengung [16]. Dies zeigte sich beispielsweise bei einem Versuch mit den Australischen Aborigines, die daran gewöhnt waren, sich bei tiefen Temperaturen in der Nacht ohne entsprechender Kleidung aufzuhalten. In dem Versuch zeigte sich, dass bei den europäischen Probanden der Metabolismus ansteigt, wenn diese in der Kälte schlafen, hingegen bei den Aborigines der Metabolismus konstant blieb. Es zeigte sich hierbei, dass die Hauttemperatur der Aborigines in Folge einer Gefäßverengung tiefer gefallen ist, als bei den Europäern und auch die thermische Leitfähigkeit (metaboli-

sche Wärmeproduktion geteilt durch den Gradienten zwischen Kern- und Hauttemperatur) niedriger war, woraus abgeleitet wurde, dass die Aborigines über ein verbessertes Gefäßanpassungsvermögen bei Kälteeinwirkung verfügen. Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich ebenfalls bei Schwimmern wie in [94] zusammengefasst wird.

Aus [84] entnimmt sich zudem, dass der durchschnittliche Fall der mittleren Hauttemperatur während der Kälteeinwirkung nicht zwischen den Jahreszeiten abweicht, das wiederum die These aus [16] bestätigt, worin geschildert wird, dass sich die isolative Akklimatisierung erst bei stärkerer und lang anhaltender Kälteeinwirkung entwickelt.

Bei der Isolierung findet sich in manchen Studien auch eine Korrelation zum Body Mass Index (BMI), der mit der Fettschicht zusammenhängt, die den thermischen Austausch zwischen dem Körper und der Umgebung beeinflusst und darum auch als ein Faktor der thermischen Wahrnehmung gesehen wird und in [63] sogar als einen Einflussparameter auf die Sensibilität vergangener thermischer Erfahrungen (z.B.: aufgewachsen in einer Region, in der die Häuser über keine Heizung verfügten) aufgezeigt wird. Beim Vergleich zwischen schlanken und übergewichtigen Probanden zeigt sich zwar wie oben dargelegt, dass sich der Unterschied zwischen Haut- und Körperkerntemperatur bei beiden Personengruppen ähnlich verhält, jedoch entnimmt sich aus [89], dass in milder, kühler Umgebung die distale Hauttemperatur von schlanken Personen stärker sinkt als bei Übergewichtigen, jedoch die proximale Hauttemperatur weniger sinkt. Es zeigt sich hierbei zudem, dass schlanke Personen auf den Kälteeinfluss mit einer Steigerung in der Energieproduktion reagieren, hingegen Übergewichtige deren Temperaturverteilung verändern und somit deren Isolierung bzw. Wärmedämmeigenschaften erhöhen.

Als eine weitere Einflusskomponente auf den Wärmeverlust in der Kälte wird in [60] aufgezeigt, dass die orale Temperatur nach der Akklimatisierung langsamer sinkt.

Zeitliche Veränderung

Durch die Akklimatisierung wird bereits nach wenigen Tagen die Umgebung wärmer und komfortabler empfunden, wie sich aus [82] entnimmt. Allerdings zeigt sich hierbei, dass die Umgebungstemperatur von 15 – 16 °C mit leichter Bekleidung weiterhin als unangenehm wahrgenommen wurde und eine Übertragung auf andere Temperaturbegebenheiten schwierig ist.

In [38] wird zusammengefasst, dass die Kurzzeittakklimatisierung zwischen ein paar Tagen und zwei Wochen

dauern kann und diese noch langsam bis zu 30 Tage weiter fortschreitet. Die Kurzzeittakklimatisierung verliert der Körper jedoch nach ca. einem Monat der Wärme- oder Kälteeinwirkung. Die angegebene Dauer der Akklimatisierung korreliert ebenfalls mit den Ergebnissen aus [18]. Darüber hinaus findet auch eine Langzeittakklimatisierung statt, wie sich aus [58] entnehmen lässt, worin das Komfortempfinden von Personengruppen untersucht wurde, die mit und ohne Heizung aufgewachsen sind. Es zeigt sich dabei, dass die jeweiligen Personengruppen ihre Umgebung als vergleichbar komfortabel bewerten, wenn sie nie dort weggezogen sind. Zwar bewerten die Personen ohne Heizungssystem prinzipiell ihre Umgebung als etwas kühl im Winter, jedoch in einem vergleichbaren Maß als komfortabel. Personengruppen, die jedoch den Standort gewechselt haben und als Erwachsener von einer Region mit Heizung in die Gegend ohne Heizung gezogen sind, empfinden diese im Winter als wesentlich kühler und unkomfortabler, auch wenn sie bereits seit mehreren Jahren dort leben. Zudem empfinden die Personen, die in der Vergangenheit als Erwachsener in die Region mit Heizung gezogen sind, diese als wesentlich angenehmer und wärmer im Vergleich zu denjenigen, die nie den Standort gewechselt haben. Die Autoren leiten daraus ab, dass es eine historisch bedingte Erwartungshaltung gibt, die auf eine Akklimatisierung bzw. die Temperaturempfindung Einfluss nimmt.

Zusammenfassung

Damit in einem Gebäude weitestgehend auf eine thermische Konditionierung verzichtet werden kann, um den Energieverbrauch zu reduzieren und auch die Risikofaktoren auf die Gesundheit zu minimieren, bedarf es des Verständnisses der adaptiven Zusammenhänge des thermischen Empfindens. Das gesundheitliche Risiko der thermischen Konditionierung resultiert vordergründig aus dem Zusammenhang zur relativen Luftfeuchtigkeit, die mit verschiedenen Atemwegsinfektionen, aber auch Allergenen, Krankheitserregern und schädlichen Chemikalien in Bezug gebracht wird.

Aus den betrachteten Fachartikeln zum thermischen Empfinden ist insbesondere zu entnehmen, dass der thermische Komfort kein stationärer Zustand ist, sondern vielmehr eine sich kontinuierlich verändernde Größe darstellt, die sich adaptiv zu einer Vielzahl von Einflussparametern verhält. Die Einflussgrößen können hierbei übergeordnet in Aspekte des Nutzerverhaltens, den physiologischen Begebenheiten und der psychologischen Umstände eingeteilt werden und lassen sich nur bedingt quantifizieren, sodass die messtechnische Bewertung des

thermischen Komforts nur begrenzt umsetzbar ist. Dies stellt eine wichtige Kenntniserweiterung der aktuell in der Normung verwendeten Bewertungsverfahren dar, worin etwaige Einschränkungen der Anwendung nicht aufgeführt werden bzw. nur quantifizierbare Größen zur Bewertung des Komforts dienen. Bestätigt wird dies insbesondere durch eine Vielzahl von Forschungen, in denen zum Teil signifikante Abweichungen zwischen den thermischen Bewertungen nach dem PMV-PPD Modell, wie es in der [25] beschrieben ist, und dem tatsächlichen Votum der Nutzer aufgezeigt werden. Diese Abweichungen werden hierbei sowohl in nicht klimatisierten als auch klimatisierten Gebäuden festgestellt, sodass in den vergangenen Jahren ein großer Forschungsfokus auf die differenzierte Betrachtung dieser beiden Gebäudetypen gelegt wird und zudem Versuche angestellt werden, die adaptiven Größen in ein Berechnungs- und Bewertungsmodell zu integrieren.

In warmen Umgebungen können die Komforttoleranzen insbesondere durch das Öffnen der Fenster, einer Steigerung der lokalen Luftgeschwindigkeit oder durch die Anpassung der Kleidung erweitert werden. In Bezug zur Verringerung der unteren Komfortgrenze sind bislang nur wenige Möglichkeiten untersucht worden. Es zeigt sich hierbei, dass insbesondere die Akklimatisierung als eine bedeutsame Komponente zu verstehen ist, die durch einen Prozess der körperlichen Gewöhnung (thermoregulatorische Anpassung des Körpers auf chronische oder wiederholte Kälteeinflüsse), einer metabolischen Akklimatisierung (Muskelkontraktion wie das Zittern aber auch die Entwicklung von zitterfreier Thermogenese) sowie der isolativen Akklimatisierung (Steigerung des Wärmeerhalts) beschrieben werden kann. Beeinflusst wird die Akklimatisierung hierbei von der Intensität, Dauer aber auch dem Alter und der fettfreien Masse. Um jedoch eine adaptive Heizungsregelung umzusetzen, mit der die Akklimatisierung begünstigt wird, liegen derzeit nicht hinreichende Untersuchungen vor. Aus einer Studie entnimmt sich zwar, dass auch bei Umgebungstemperatur von 19 °C der Anteil an braunem Fett und somit der zitterfreien Thermogenese gesteigert werden kann, allerdings zeigt sich ebenfalls, dass eine Form der Langzeitakklimatisierung vorliegen muss, wodurch die Erwartung und das thermische Empfinden stark beeinflusst wird. Darüber hinaus liegen überwiegend Forschungen vor, die in extremen Umgebungen durchgeführt wurden und nur geringfügig auf das Innenraumklima adaptiert werden können.

Kontakt:

Detmolder Schule für Architektur und Innenarchitektur
Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Emilienstraße 45
32756 Detmold
Fon +49 (0)5231 769-6451
Fax +49 (0)5231 769 86451
Mail oliver.glahn@hs-owl.de

Literatur

1. Alsmo T., Alsmo C. (2014) Ventilation and Relative Humidity in Swedish Buildings. JEP 05(11): 1022 – 1036
2. Arens E., Turner S., Zhang H. et al. (2009) Moving air for comfort. ASHRAE Journal UC Berkeley: Center for the Built Environment: 18 – 28
3. Arens EA., Zhang H. (2006) The skin's role in human thermoregulation and comfort. Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials. Center for the Built Environment: 560 – 602
4. ASHRAE (2015) Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (55 – 2013)
5. ASR Lüftung (ASR A.3.6:2013)
6. ASR Raumtemperatur (ASR A.3.5:2014)
7. Aynsley R. (2007) Circulating fans for summer and winter comfort and indoor energy efficiency. Environment Design Guide (25): 1 – 9
8. Aynsley R. (2007) CIRCULATING FANS FOR SUMMER AND WINTER COMFORT AND INDOOR ENERGY EFFICIENCY. Environment Design Guide (25): 1 – 9
9. Brager G., Paliaga G., de Dear, Richard John (2004) Operable windows, personal control and occupant comfort. ASHRAE Transactions
10. Brauer C., Mikkelsen S. (2010) The influence of individual and contextual psychosocial work factors on the perception of the indoor environment at work: a multilevel analysis. International archives of occupational and environmental health 83(6): 639 – 651
11. Brightman H.S., Milton D.K., Wypij D. et al. (2008) Evaluating building-related symptoms using the US EPA BASE study results. Indoor Air 18(4): 335 – 345
12. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (Health evaluation of carbon dioxide in indoor air). Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 51(11): 1358 – 1369
13. Byber K., Flatz A., Norbäck D. et al. (2016) Humidification of indoor air for preventing or reducing dryness symptoms or upper respiratory infections in educational settings and at the workplace. In: Mutsch M. (Hrsg) Cochrane Database of Systematic Reviews. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK

14. Cain J.B., Livingstone S.D., Nolan RW et al. (1990) Respiratory heat loss during work at various ambient temperatures. *Respiration Physiology* 79(2): 145 – 150
15. Cao G., Awbi H., Yao R. et al. (2014) A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and Environment* 73: 171 – 186
16. Castellani J.W., Young A.J. (2016) Human physiological responses to cold exposure: Acute responses and acclimatization to prolonged exposure. *Autonomic neuroscience: basic & clinical* 196: 63 – 74
17. Cena K., de Dear R. (1998) Field Study Of Occupant Comfort And Office Thermal Environments In A Hot Arid Climate - ASHRAE RP-921. *ASHRAE Research Journal*
18. Chen K.Y., Brychta R.J., Linderman J.D. et al. (2013) Brown fat activation mediates cold-induced thermogenesis in adult humans in response to a mild decrease in ambient temperature. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 98(7): E1218 – 23
19. Chiang H-C., Pan C-s., Wu H-S. et al. (2007) Measurement of Flow Characteristics of a Ceiling Fan with Varying Rotational Speed
20. Claessens-van Ooijen A.M.J., Westerterp K.R., Wouters L. et al. (2006) Heat production and body temperature during cooling and rewarming in overweight and lean men. *Obesity (Silver Spring, Md.)* 14(11): 1914 – 1920
21. de Dear, R. J., Akimoto T., Arens EA. et al. (2013) Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air* 23(6): 442 – 461
22. de Dear, R. J., Brager G. S. (1998) Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. SF-98-7-3 (4106) (RP-884)
23. Deuble M.P., de Dear, Richard John (2012) Mixed-mode buildings: A double standard in occupants' comfort expectations. *Building and Environment* 54: 53 – 60
24. Deutsche Norm Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik (DIN EN 15251:2012-12)
25. Deutsche Norm Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005) (7730:2006-05)
26. Deutsche Norm Heizsysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Nationaler Anhang NA (DIN EN 12831 Beiblatt 1:2008-07)
27. Deutsche Norm Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung (DIN 33403)
28. Deutsche Norm Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (DIN EN 13779:2007-09)
29. Deutsche Norm Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (DIN 4108-2:2013)
30. Deutsche Norm (2003) Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung – Grundlagen zur Klimaermittlung (DIN-Fachbericht 128)
31. Fabi V., Andersen R.V., Corgnati S et al. (2012) Occupants' window opening behaviour. A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment* 58:188 – 198
32. Fang L., Clausen G., Fanger P. (1998) Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. *Indoor Air*(8): 80 – 90
33. Fanger P. (1970) Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Kopenhagen
34. Fanger P., Pedersen C. (1977) Discomfort due to air velocities in spaces. Proc. of Meeting of Commission B1, B2, E1 of the International Institute Refrigeration, Vol 4.: 289 – 296
35. Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H. et al. (1988) Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings* 12 (1): 21 – 39
36. Fisk W.J., Seppänen O., Faulkner D., Huang Y.J. (2004) Economizer system cost effectiveness: Accounting for the influence of ventilation rate on sick leave
37. Franck U., Herbarth O., Roder S. et al. (2011) Respiratory effects of indoor particles in young children are size dependent. *The Science of the total environment* 409 (9): 1621 – 1631
38. Freitas CR de, Grigorieva EA. (2014) The impact of acclimatization on thermophysiological strain for contrasting regional climates. *International journal of biometeorology* 58 (10): 2129 – 2137
39. Gao J., Wang Y., WARGOCKI P. (2015) Comparative analysis of modified PMV models and SET models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings. *Building and Environment* 92: 200 – 208
40. Griefahn B., Kunemund C., Gehring U. et al. (2000) Drafts in cold environments – the significance of air temperature and direction. *Industrial health* 38 (1): 30 – 40
41. Halawa E., van Hoof J. (2012) The adaptive approach to thermal comfort. A critical overview. *Energy and Buildings* 51: 101 – 110
42. Haldi F., Robinson D. (2009) A COMPREHENSIVE STOCHASTIC MODEL OF WINDOW USAGE: THEORY AND VALIDATION, Glasgow
43. Hellström B. (1973) Adjustment of the peripheral circulation in human cold acclimatization. A critical review. *Journal of Human Evolution* 2 (2): 93 – 104
44. Herkel S., Knapp U., Pfafferott J (2008) Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and Environment* 43 (4): 588 – 600
45. Herwig H., Moschallski A. (2009) Wärmeübertragung. Vieweg+Teubner, Wiesbaden
46. Hori S. (1995) Adaptation to Heat. *JJP* 45(6): 921 – 946
47. Humphreys M.A., Rijal H.B., Nicol J.F. (2013) Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database. *Building and Environment* 63: 40 – 55
48. Kang K-N., Song D., Schiavon S. (2013) Correlations in thermal comfort and natural wind. *Journal of Thermal Biology* 38 (7): 419 – 426
49. Kim J.T., Lim J.H., Cho S.H. et al. (2015) Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances. *Energy and Buildings* 98: 100 – 105

50. Kingma BRM., Frijns AJH., Saris WHM et al. (2011) Increased systolic blood pressure after mild cold and rewarming: relation to cold-induced thermogenesis and age. *Acta physiologica* (Oxford, England) 203 (4): 419 – 427
51. Kosonen R., Tan F. (2004) The effect of perceived indoor air quality on productivity loss. *Energy and Buildings* (36): 981 – 986
52. Kozhevnikov M., Elliott J., Shephard J. et al. (2013) Neurocognitive and somatic components of temperature increases during g-tummo meditation: legend and reality. *PloS one* 8 (3): e58244
53. Lan L., Lian Z. (2009) Use of neurobehavioral tests to evaluate the effects of indoor environment quality on productivity. *Building and Environment* (44): 2208 – 2217
54. Lan L., Wargocki P., Wyon DP. et al. (2011) Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance. *Indoor Air* 21 (5): 376 – 390
55. Landesgericht Bielefeld (2003)
56. Li S., Baker PJ., Jalaludin BB. et al. (2014) Ambient temperature and lung function in children with asthma in Australia. *The European respiratory journal* 43 (4): 1059 – 1066
57. Luo M., Cao B., Ji W. et al. (2016) The underlying linkage between personal control and thermal comfort. Psychological or physical effects? *Energy and Buildings* 111: 56 – 63
58. Luo M., Dear R. de, Ji W. et al. (2016) The dynamics of thermal comfort expectations. The problem, challenge and implication. *Building and Environment* 95: 322 – 329
59. Manu S., Shukla Y., Rawal R. et al. (2016) Field studies of thermal comfort across multiple climate zones for the subcontinent. *India Model for Adaptive Comfort (IMAC)*. *Building and Environment* 98: 55 – 70
60. Mathew L., Purkayastha SS., Jayashankar A. et al. (1981) Physiological characteristics of cold acclimatization in man. *Int J Biometeorol* 25 (3): 191 – 198
61. Melikov A. (2004) Personalized ventilation. *Indoor Air* (14): 157 – 167
62. Nicol JF, Humphreys MA (2002) Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34 (6): 563 – 572
63. Ning H., Wang Z., Ji Y. (2016) Thermal history and adaptation. Does a long-term indoor thermal exposure impact human thermal adaptability? *Applied Energy* 183: 22 – 30
64. Nishihara N., WARGOCKI P., Tanabe S-i. (2014) Cerebral blood flow, fatigue, mental effort, and task performance in offices with two different pollution loads. *Building and Environment* 71: 153 – 164
65. O'Brien W., Gunay HB. (2014) The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices – A review and proposed modeling framework. *Building and Environment* 77: 77 – 87
66. Ouyang Q., Dai W., Li H. et al. (2006) Study on dynamic characteristics of natural and mechanical wind in built environment using spectral analysis. *Building and Environment* 41 (4): 418 – 426
67. Parsons KC. (2014) Human thermal environments. The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance, Third edition. Taylor & Francis, Boca Raton
68. Rijal H.B., Tuohy P., Humphreys M.A. et al. (2007) Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings* 39 (7): 823 – 836
69. Rohles F.H., Konz S.A., Jones B.W. (1983) Ceiling Fans as Extenders of the Summer Comfort Envelope. D-AC-2752
70. Schellen L., van Marken Lichtenbelt WD., Loomans MGLC. et al. (2010) Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition. *Indoor Air* 20 (4): 273 – 283
71. Schiavon S., Lee KH. (2013) Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures. *Building and Environment* 59: 250 – 260
72. Schiavon S., Melikov A. (2008) Energy saving and improved comfort by increasing air movement
73. Schiavon S., Melikov AK. (2009) Introduction of a Cooling-Fan Efficiency Index. *HVAC&R Res.* 15 (6): 1121 – 1144
74. Schweiker M., Wagner A. (2015) A framework for an adaptive thermal heat balance model (ATHB). *Building and Environment* 94: 252 – 262
75. Seppänen O., Fisk W.J. (2006) Some Quantitative Relations between Indoor Environmental Quality and Work Performance or Health. *ASHRAE Research Journal*
76. Seppänen O., Fisk W.J., Faulkner D. (2003) Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building. *Proceedings of the Healthy Buildings 2003 Conference* (3): 394 – 399
77. Tanabe S., Nishihara N. (2004) Productivity and fatigue. *Indoor Air* 2004 (14): 126 – 133
78. Tanabe S-i., Haneda M., Nishihara N. (2007) Productivity, Energy, and Economics in Modern Offices
79. Tanabe SI., Kimura KI. (1994) Effects of air temperature, humidity, and air movement on thermal comfort under hot and humid conditions
80. Tham KW. (2016) Indoor air quality and its effects on humans – A review of challenges and developments in the last 30 years. *Energy and Buildings* 130: 637–650
81. V. Candas, J. P. Libert, J. J. Vogt (1979) Influence of air velocity and heat acclimation on human skin wettedness and sweating efficiency. *Journal of Applied Physiology* (6): 1194 – 1200
82. van der Lans, Anouk A J. J., Hoeks J., Brans B. et al. (2013) Cold acclimation recruits human brown fat and increases nonshivering thermogenesis. *The Journal of clinical investigation* 123 (8): 3395 – 3403
83. van Marken Lichtenbelt WD., Schrauwen P. (2011) Implications of nonshivering thermogenesis for energy balance regulation in humans. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology* 301 (2): R 285 – 96
84. van Ooijen AMJ., van Marken Lichtenbelt WD., van Steenhoven AA. et al. (2004) Seasonal changes in metabolic and temperature responses to cold air in humans. *Physiology & behavior* 82(2-3): 545 – 553
85. VDMA Leistungsprogramm für die Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden (VDMA 24186: 2007-01)

86. Verein Deutscher Ingenieure Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation) (VDI 2078: 2015 – 06)
87. Verein Deutscher Ingenieure Raumluftechnik Bürogebäude (VDI-Lüftungsregeln) (VDI 3804: 2009-03)
88. Vosselman MJ., Vijgen GHEJ., Kingma BRM. et al. (2014) Frequent extreme cold exposure and brown fat and cold-induced thermogenesis: a study in a monozygotic twin. *PloS one* 9 (7): e101653
89. Wijers SLJ., Saris WHM., van Marken Lichtenbelt WD. (2010) Cold-induced adaptive thermogenesis in lean and obese. *Obesity* (Silver Spring, Md.) 18 (6): 1092 – 1099
90. Wolkoff P. (2013) Indoor air pollutants in office environments: assessment of comfort, health, and performance. *International journal of hygiene and environmental health* 216 (4): 371 – 394
91. Xia YZ., Niu JL., Zhao RY. et al. (2000) Effects of Turbulent Air on Human Thermal Sensations in a Warm Isothermal Environment. *Indoor Air* (10): 289 – 296
92. Yao R., Li B., Liu J. (2009) A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment* 44 (10): 2089 – 2096
93. Yau Y., Chew B. (2013) A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. *Building Services Engineering Research and Technology* 35 (1): 23 – 35
94. Young AJ. (1996) Human adaptations to cold stress. *Physiological Basis of Occupational Health: Stressful Environments* 1996
95. Zhai Y., Zhang Y., Zhang H. et al. (2015) Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans. *Building and Environment* 90: 178 – 185
96. Zhang H., Arens E., Pasut W. (2010) Thresholds for indoor thermal comfort and perceived air quality. *Adapting to Change: New Thinking on Comfort*, Windsor, UK
97. Zhao R. (2007) Investigation of transient thermal environments. *Building and Environment* 42 (12): 3926 – 3932
98. Zhou X., Ouyang Q., Lin G. et al. (2006) Impact of dynamic airflow on human thermal response. *Indoor Air* 16 (5): 348 – 355

RECHT

Eigentumsentziehung bei „Messie-Syndrom“

Im vorliegenden Fall vermüllte der Wohnungseigentümer neben seiner Wohnung auch Kellerflur und seine Sondernutzungsfläche in der Tiefgarage. Er entfernte auch nicht sein abgemeldetes Auto aus der Tiefgarage, so dass der beschlossene Einbau von Kaltwasserzählern nicht erfolgen konnte. Es war auch nicht möglich, Fenstertauschmaßnahmen in seiner Wohnung durchzuführen. Auf wiederholte Abmahnungen reagierte der Eigentümer nicht, auch eine Mediation blieb erfolglos. Deshalb hatten die Eigentümer die Entziehung des Eigentums klageweise erfolgreich geltend gemacht. Es ist jedoch Voraussetzung eines Entziehungsanspruchs, dass eine schwere Pflichtverletzung durch den Eigentümer vorliegt, so dass den anderen Eigentümern die Fortsetzung der Gemeinschaft mit ihm nicht mehr zugemutet werden kann. Eine Pflichtverletzung im Sinne von § 18 WEG setzt hierbei nicht zwingend ein schuldhaftes oder subjektiv vorwerfbares Verhalten voraus, auch ein aufgrund einer individuellen Disposition für den Eigentümer nicht oder nur kaum vermeidbares Verhalten kann die Folge haben, dass die oben genannten Voraussetzungen zur Durchsetzung des Entziehungsanspruches gegeben sind. Im vorliegenden Fall war das Gericht davon überzeugt, dass sich das Verhalten des Eigentümers auch künftig nicht ändern wird. Eine Entziehung des Eigentums kommt aber nur als letztes Mittel infrage, wenn alle anderen Maßnahmen nicht zum Erfolg geführt haben.

Landgericht Hamburg, Az.: 318 S 50/15

Mietminderung bei zu hoher Temperatur im Schlafzimmer

Durch eine Überhitzung im Schlafzimmer, welche sich nicht beseitigen lässt, besteht ein mietmindernder Mangel. Laut Gericht muss sich während der Heizperiode die Innenraumtemperatur im Schlafzimmer auf 18 °C herunterregeln lassen.

Landgericht Berlin, Az.: 67 S 357/15

Abfall auf Privatgrundstücken

Städte dürfen Abfallberge von 1 bis 2 m Höhe auf Privatgrundstücken wegen der Gefahr durch Ratten und Schimmelbefall verbieten. Wenn der Eigentümer diesen Abfall nicht beseitigt, darf die Stadt den Abfall auf Kosten des Grundstückseigentümers entsorgen.

Verwaltungsgericht Münster, Az.: 7 L 1222/16

Mietminderung durch Baulärm

Gerichte haben schon häufig für Mietminderungen wegen Baulärms entschieden. Im vorliegenden Fall ging es um eine Frau, welche im Jahr 2000 eine Wohnung neben einem mit Bäumen bewachsenen Grundstück mietete. In den Jahren 2013 – 2015 wurde auf diesem vorher begrünten Gelände eine Tiefgarage und ein Gebäude errichtet, wodurch es zu Belästigungen durch Staub, Lärm und Erschütterungen, auch am Wochenende, kam. Die Mieterin wollte hierfür die Miete um 20 % mindern, was der Vermieter jedoch ablehnte, da er nicht für die Störungen