

Oftmals wird thermische Behaglichkeit in Gebäuden als eine für den architektonischen Entwurf nachrangige Eigenschaft betrachtet, da sie mit zusätzlicher Gebäudetechnik leicht umsetzbar zu sein scheint. Modelle, welche Zusammenhänge zwischen Klima, Gebäude und Mensch abbilden, können helfen, Behaglichkeit als Faktor schon während des Entwurfsprozesses zu stärken und damit primär architektonische Lösungen, also Lösungen mit möglichst wenig additiver Gebäudetechnik, zu klimatischen Entwurfsfragen zu ermöglichen. Unterschiedliche Entwurfswerkzeuge, Technologien und Strategien werden in der Planung von Gebäuden eingesetzt. Unabhängig davon bleibt die Frage, wie ein Gebäude optimal für das Klima seiner Umgebung und die erforderliche Nutzung gestaltet werden kann, für die Umsetzung einer architektonischen Lösung relevant. Modelle zur Bewertung der zu erwartenden Behaglichkeit innerhalb des Gebäudes ermöglichen hierfür ein Verständnis über Auswirkungen und somit Sinn und Nutzen verschiedener Entwurfsvarianten in einem frühen Stadium des Entwerfens.

Eine grundlegende Funktion von Gebäuden besteht in der Bereitstellung von behaglichen Umgebungsbedingungen als vermittelndes Element zwischen äußeren klimatischen Gegebenheiten und den Bedürfnissen der Bewohner, sei es für konzentriertes Arbeiten oder Erholung und Entspannung. Die Architektur beeinflusst dabei die psychische und körperliche Gesundheit des Nutzers auf vielfältige Art und Weise. Eine ausreichende Versorgung mit Tageslicht beispielsweise spielt eine wichtige Rolle für Funktionen des menschlichen Stoffwechsels und Hormonhaushaltes. Angesichts der durch Klimawandel vermehrt auftretenden extremen Wetterereignisse, verbunden mit einem Anstieg an Krankheiten und Todesfällen, wird die Notwendigkeit der Schutzfunktion von Gebäuden vor klimatischen Bedingungen deutlich. <sup>1</sup> Im Versuch der Energieeinsparung wiederum zeigt sich die Bedeutung der Einschätzung von Behaglichkeit in Gebäuden, da die Temperatur-Soll-Werte der Heiz- und Kühlanlagen entscheidend für den Energieverbrauch sind. In den Industrienationen werden immerhin rund 40 Prozent des Energiebedarfs für die Kontrolle der Raumtemperatur von Gebäuden genutzt. <sup>2</sup>

Für das architektonische Entwerfen bedarf es also auch eines grundlegenden Verständnisses der Faktoren von Behaglichkeit und der Möglichkeiten, wie Komfortmodelle zur Darstellung und planerischen Umsetzung eingesetzt werden können. Das menschliche Wohlbefinden als ein Ziel architektonischer Planung basiert dabei auf der Wahrnehmung vielfältiger externer Einflüsse und subjektiver Empfindungen. Hegger et al. nehmen eine Gliederung der für das Behaglichkeitsempfinden prägenden Wahrnehmungsebenen in physikalische, intermediäre, physiologische und psychologische Bedingungen vor. <sup>3</sup> Während thermische, olfaktorische, akustische und visuelle Bedingungen als physikalische Umgebungsbedingungen überwiegend messbar, somit eher normierbar und zur Beurteilung einer Gebäudeperformanz quantifizierbar sind, hängen physiologische und psychologische Kriterien von individuellen Eigenschaften und subjektiven Empfindungen ab. Intermediäre, d.h. vermittelnde Bedingungen wiederum bieten durch ihren oft nutzungsabhängigen Charakter gegebenenfalls einen Anpassungsspielraum, sei es durch Wahl der Bekleidung, des Ortes innerhalb eines Gebäudes oder

der Intensität einer Tätigkeit. Besonders die bedeutende psychologische Rolle der Möglichkeit einer direkten Einflussnahme auf die Umwelt, beispielsweise durch zu öffnende Fenster, wurde in zahlreichen Studien hervorgehoben. <sup>4</sup> So vergrößert sich die Nutzerzufriedenheit und der als behaglich empfundene Zustandsbereich eines Gebäudes, sobald eigene Regulierungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen.

Eine vorrangige Bedeutung für ein als behaglich empfundenen Raumklima kommt der thermischen Behaglichkeit zu. Im ASHRAE Standard 55, einem Handbuch zu allgemein anerkannten Regeln bezüglich der Planung von Gebäudetechnik, wird sie definiert als: „State of mind, which expresses satisfaction with the thermal environment“. <sup>5</sup> Thermische Behaglichkeit resultiert hauptsächlich aus den physikalischen Einflussgrößen Raumlufttemperatur, Oberflächentemperatur, Raumluftfeuchte und Luftbewegung, sowie den individuellen Faktoren Bekleidung, körperliche Betätigung, Alter und Geschlecht. <sup>6</sup> Differenzen zwischen Raumluft- und Oberflächentemperatur sollten möglichst gering sein und asymmetrische thermische Strahlung, Zugluft und vertikale Temperaturunterschiede vermieden werden. Besonders bei sitzenden Tätigkeiten werden Temperaturänderungen bereits bei geringen Schwankungen empfindlich wahrgenommen, bei aktiver körperlicher Tätigkeit ist dies weit weniger der Fall. Luftbewegungen sollten außer für gewünschte Kühleffekte bei höheren Temperaturen im Sommer gering bleiben. Richtungsänderungen der Luft führen hierbei zu einem höheren Toleranzbereich, Schwankungen in der Windgeschwindigkeit hingegen werden als unangenehm empfunden. Steigende Raumluftfeuchte führt zu einer höheren gefühlten Raumtemperatur, eine besondere Rolle spielt die Luftfeuchtigkeit auch für mikrobiologisches Wachstum bei hoher Luftfeuchte und statischer Aufladung und begünstigter Staubentwicklung bei niedriger Luftfeuchte. <sup>7</sup>

Der Zustand der thermischen Behaglichkeit wird in einer weiteren Definition von Benzinger als „the absence of driving impulses from cutaneous and hypothalamic receptors“ bezeichnet, und bezieht sie darin direkt auf physiologische Prozesse des Wärmehaushaltes des menschlichen Körpers. <sup>8</sup> Dessen Temperaturempfinden ist eng verbunden mit seinem momentanen thermischen Zustand, mit thermophysikalischen Prozessen zur Gewährleistung einer konstanten Kerntemperatur des Körpers und der Feuchtigkeitswahrnehmung der Hautoberfläche. Während sich manche Lebewesen mit ihrer Körpertemperatur an die Umgebung anpassen können, müssen homoiotherme Lebewesen wie der Mensch eine möglichst konstante Kerntemperatur, unabhängig des aktuellen Klimas, in relativ engen Grenzen aufrechterhalten. Diese ist bei einem gesunden Menschen mit ca. 37°C zumeist höher als die Umgebungstemperatur; sinkt die Kerntemperatur unter 32°C oder steigt über 42°C drohen unwiderrufliche Schäden bis hin zum Tod. Kälterezeptoren auf der Haut und Wärmerezeptoren im Hypothalamus liefern dem Körper Signale, um Energieproduktion und Energieabgabe im Gleichgewicht und die Körpertemperatur im Bereich idealer Behaglichkeit zu halten. <sup>9</sup> Bei sinkender Umgebungstemperatur werden Herz, Hirn und wichtige Organfunktionen geschützt, indem zunächst die Extremitäten durch eingeschränkte Durchblutung abgekühlt werden. Muskelbewegung erzeugt Wärme, was durch Zittern sichtbar wird. Bei zu warmer Umgebung wird im Körper zunächst die Durchblutung erhöht, zusätzlich wird die Hautoberfläche durch Verdunstung gekühlt. Die Wärmeübertragung des Körpers erfolgt über Konvektion an die Raumluft, Wärmestrahlung und Verdunstung und zu einem geringeren Anteil über Wärmeleitung an den Körper berührende Gegenstände. <sup>10</sup>

#### Energiebilanzmodelle

Zahlreiche Modelle und Indices sind entwickelt worden, um physikalische und physiologische Eigenschaften der thermischen Behaglichkeit möglichst realistisch abzubilden. Auliciems und Szokolay benennen alleine 20 aktuelle Modelle, was auf die Komplexität des Unterfangens hinweist. <sup>11</sup> Eine umfassende Beschreibung der Einflüsse von thermischen und hygrischen, d.h. die Luftfeuchte betreffenden Umgebungsbedingungen auf den Menschen erfolgt in Energiebilanzgleichungen, in denen alle relevanten Energieströme zusammengeführt werden. Kenntnis über die

physikalischen Prinzipien aus Wärmelehre und Thermodynamik, physiologische Zusammenhänge und ihre Verknüpfungen sind hierfür nötig. Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik müssen im biologischen System Mensch, unter der Annahme eines stationären thermischen Zustandes, d.h. einer Idealisierung des thermischen Zustandes im Zeitablauf als konstant, die aufgenommenen und abgegebenen Energiemengen identisch sein. Die Modelle liefern meist stochastische Durchschnittsinformationen, Abweichungen sind entsprechend in der Realität immer vorhanden. <sup>12</sup>

Als ein Pionier im Bereich der Untersuchung und Bewertung thermischer Behaglichkeit gilt Povl Ole Fanger, der einen umfassenden und weit verbreiteten Ansatz zur Gesamtbewertung von physiologischen Kriterien und Kriterien des Raumklimas entwickelt hat. Zahlreiche internationale Normen basieren auf seinem Modell des „Predicted Mean Vote“, der im Durchschnitt zu erwartenden Raumklimabewertung. Fangers Modell basiert auf einer von ihm bereits 1967 aufgestellten Behaglichkeitsgleichung, welche erstmals die Bewertung einer Kombination von Bekleidung, Aktivität, Lufttemperatur, mittlerer Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit ermöglichte. <sup>13</sup> Aus der Wärmeproduktion des Körpers unter Berücksichtigung von Verlusten durch Schwitzen, Diffusion, Atmung, Wärmeleitung über die Bekleidung sowie Konvektion und Strahlung wird in einer physiologischen Wärmebilanzgleichung eine thermische Belastung pro Hautoberfläche und Stunde berechnet. Eine Vereinfachung der Gleichung kann über Richtwerte zu Temperatur und Wassergehalt der Atemluft, Emissionsgrad und Fläche des menschlichen Körpers zur Strahlungsberechnung erfolgen. Als Parameter verbleiben somit Wasserdampfpartialdruck, Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen, Luftgeschwindigkeit, die Wärmeproduktion des Körpers, relative Luftgeschwindigkeit an der Körperoberfläche sowie der Anteil bekleideter Körperoberflächen, Wärmewiderstand der Kleidung und mittlere Hauttemperatur. Der zu ermittelnde Bewertungsindex des Predicted Mean Vote (PMV) erfolgt in einer Sieben-Punkte-Skala mit dem neutralen Nullpunkt als Mittelpunkt. Die Abweichungen werden bis zu einem Betrag von Drei als positiver Wert bei Überhitzung und negativer Wert bei Unterkühlung angegeben. Zur Entwicklung des mathematischen Modells wurde in Klimakammerstudien mit Versuchspersonen ein Zusammenhang zwischen ihrer auf dieser Skala basierenden Behaglichkeitsbewertung und der thermischen Belastung ermittelt. Ausgehend vom PMV-Index kann eine quantitative Aussage zum Prozentsatz der mit dem Klima unzufriedenen Personen über die Berechnung der „Predicted Percentage of Dissatisfied“ als PPD-Index vorgenommen werden, wobei der Minimalwert der unzufriedenen Personen bei fünf Prozent liegt. <sup>14</sup>

#### Adaptive Modelle

Probleme beim Einsatz des PMV-Index können durch den relativ engen Behaglichkeitsbereich entstehen, welcher den Einsatz von Klimatechnik für ein bevorzugtes Innenraumklima begünstigen kann. Bei natürlicher Lüftung im Sommer können leicht höhere und als unbehaglich bewertete Temperaturen auftreten, ohne hierbei wiederum den Faktor der möglichen Beeinflussung der Lüftung für das Behaglichkeitsempfinden einzubeziehen. Für Gebäude, die Nutzungen mit einem geringen Aktivitätsgrad beinhalten, wie beispielsweise Büroarbeit am Schreibtisch und wenn die Nutzer sich an die momentanen Witterungsverhältnisse mit ihrer Bekleidung anpassen können, bieten adaptive Modelle die Möglichkeit, Bewertungen der thermischen Behaglichkeit für natürlich belüftete Räume unter Berücksichtigung des Anpassungsspielraumes durchzuführen. Nicol et.al. beschreiben den Ansatz des adaptiven Prinzips: „If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways which tend to restore their comfort.“ <sup>15</sup> Zusätzlich zu den unbewusst ablaufenden physiologischen Reaktionen auf ein unbehagliches Umgebungsklima, werden in die adaptiven Modelle bewusste und denkbare Handlungen einbezogen, beispielsweise das Öffnen von Fenstern, zusätzliche Bekleidung, Ortswechsel innerhalb eines Raumes oder Gebäudes. Anpassung in einer Umgebung wird als Lernprozess betrachtet, der von einem gewohnten Zustandsbereich ausgeht und Strategien zur Vermeidung von als unbehaglich empfundenen Abweichungen entwickelt. Grundlage bei der Formulierung von Algorithmen zur Nutzung

von Modellen der adaptiven Anpassung in der architektonischen Planung sind empirische Beobachtungen in Feldstudien. Ein Ansatz zur Interpretation und Rückführung der Ergebnisse von Feldstudien in Modelle thermischer Behaglichkeit wird beispielsweise von Nicol und Humphreys vorgeschlagen. <sup>16</sup>

Bei dem Versuch, computerbasierte Simulationswerkzeuge in den architektonischen Entwurf zu integrieren, spielt also, neben der Modellierung des digitalen Simulationsmodells aus Parametern des Gebäudes und der Umgebung, die Modellbildung der Behaglichkeitskriterien eine entscheidende Rolle. Erst durch die Analyse der durch das Simulationsmodell generierten Daten mithilfe des Behaglichkeitsmodells können diese interpretiert und argumentativ im Gestaltungsprozess genutzt werden. Eine Schwierigkeit liegt hierbei in der Wahl des geeigneten Modells und dessen Abstraktion und Auswahl der maßgebenden Faktoren. Das Außenklima im Wechsel der Jahreszeiten und im Verlauf des Tages, die Gebäudeumgebung, das Gebäude mit seiner Form und Materialität und die Bewohner mit ihrem Nutzerverhalten und subjektiven Erfahrungen sind Teile eines Gesamtsystems, welches dynamisch und im ständigen Wandel das Erreichen eines Zustandes der Behaglichkeit als Prozess definieren.

- 1 Crichton, D., Nicol, F., & Roaf, S.: *Adapting Buildings and Cities for Climate Change*. Taylor & Francis, Vereinigtes Königreich 2009.
- 2 Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., & Zeumer, M.: *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur*. Edition Detail. Birkhäuser, Basel 2007.
- 3 Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., & Zeumer, M.: *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur*. Edition Detail. Birkhäuser, Basel 2007.
- 4 Brager, G., Paliaga, G., & de Dear, R.: *Operable windows, personal control and occupant comfort*. UC Berkeley: Center for the Built Environment. ASHRAE Transactions, 110(2):1735, 2004.
- 5 ASHRAE: ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2010.
- 6 Häupl, P., Homann, M., Kölzow, C., Riese, O., Maas, A., Höfker, G., Nocke, C., & Willems, W.: *Lehrbuch Der Bauphysik*. Springer Fachmedien, Wiesbaden 2012.
- 7 CIBSE: *Guide A: Environmental design*. CIBSE Publications, 2007.
- 8 Benzinger, T.H.: „The physiological basis for thermal comfort.“, in: Fanger, P.O. und Valbjorn, O. (Hg.): *Indoor Climate*, S. 441-476, Danish Building Research Institute, Kopenhagen 1979.
- 9 Waltner, C., Wiesner, H., & Colicchia, G.: *Die Energiebilanz des Menschen*. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 2010.
- 10 Hegger, M., Reichel, A., & Schultz, K.: *Wärmen und Kühlen: Energiekonzepte, Prinzipien, Anlagen*. Scale Series. Birkhäuser Verlag GmbH, Basel 2010.
- 11 Auliciems, A. & Szokolay, S.V.: *Thermal Comfort*. London: Passive and Low Energy Architecture (PLEA), London 2007.
- 12 Hammer, N., Koch, E., & Rudel, E.: „Die Beurteilung der thermischen und hygrischen Empfindlichkeit des Menschen nach verschiedenen Methoden“, in: *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, S.343-355. Springer Verlag, Berlin 1986.
- 13 Fanger, P.O.: *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*, Kopenhagen 1970.
- 14 Häupl, P., Homann, M., Kölzow, C., Riese, O., Maas, A., Höfker, G., Nocke, C., & Willems, W.: *Lehrbuch Der Bauphysik*. Springer Fachmedien, Wiesbaden 2012.
- 15 Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S.: *Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice*. Earthscan from Routledge, London 2012.
- 16 Nicol, F. & Humphreys, M.: „Thermal comfort as part of a self-regulating system.“ *Building Research and Practice* 6(3) (1973), S. 191-197.