ZUR NOTWENDIGKEIT EINER MULTIDIMENSIONALEN BETRACHTUNG VON BEHAGLICHKEIT – EIN THEORETISCHER BEITRAG ZUR KRITISCHEN REFLEXION UND ERWEITERUNG DES PMV-MODELLS NACH FANGER

Senta Mill[1], Nicholas Müller[2], Normen Langner[3]
[1] *Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, 97070 Würzburg, E-Mail: senta.mill@thws.de*
[2] *Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, 97070 Würzburg, E-Mail: nicholas.mueller@thws.de*
[3] *Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, 97070 Würzburg, E-Mail: normen.langner@thws.de*

Kurzfassung

Die Bewertung der Behaglichkeit in Innenräumen erfolgt bislang überwiegend auf Grundlage thermischer Größen. Aktuelle Studien belegen jedoch, dass Behaglichkeit ein multidimensionales Konstrukt ist, das neben thermischen auch nicht thermische Faktoren wie Beleuchtung und individuelle Faktoren wie das Geschlecht umfasst. In der wissenschaftlichen Diskussion wird der Begriff der thermischen Behaglichkeit häufig mit dem allgemeinen Konzept der Behaglichkeit gleichgesetzt, was zu einem verkürzten und unscharfen Begriffsverständnis führt und daher kritisch zu betrachten ist. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Überprüfung des weltweit verbreiteten PMV-Modells nach Fanger, verankert in der DIN EN ISO 7730, unerlässlich. Die vorgestellte theoretische Arbeit diskutiert dessen Grenzen und argumentiert für ein integratives Behaglichkeitsverständnis.

Abstract

The assessment of indoor comfort is currently conducted predominantly on the basis of thermal parameters. However, recent studies show that comfort is a multidimensional construct that encompasses not only thermal factors but also non-thermal factors such as lighting and individual influencing factors such as gender. In scientific discourse, the concept of thermal comfort is frequently equated with the general concept of comfort, resulting in a reduced and vague understanding of the term and should therefore be viewed critically. Against this background, a critical review of the globally accepted PMV model according to Fanger, anchored in DIN EN ISO 7730, appears essential. This theoretical contribution discusses the model's limitations and argues for an integrative understanding of comfort.

Einleitung

Menschen in Industrienationen verbringen den Großteil ihrer Zeit in Innenräumen; die Qualität der Innenraumumgebung beeinflusst Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit (Bauer und Mösle, 2010). In Forschung und Praxis wird Behaglichkeit jedoch häufig über thermische Bewertungsansätze operationalisiert. Insbesondere das PMV-Modell nach Fanger ist weltweit etabliert und in der DIN EN ISO 7730 normativ verankert.

Gleichzeitig zeigen aktuelle wissenschaftliche Diskussionen, dass Behaglichkeit als übergeordnetes Konzept nicht ausschließlich thermisch geprägt ist, sondern durch nicht thermische Einflüsse (z. B. Beleuchtung, Akustik, CO_2-Konzentration) sowie individuelle Faktoren (z. B. Alter, Geschlecht, Präferenzen) mitbestimmt wird. Vor diesem Hintergrund erscheint die in Teilen des Diskurses anzutreffende Gleichsetzung von *thermischer Behaglichkeit* mit *Behaglichkeit* insgesamt begrifflich verkürzend und fachlich problematisch.

Ziel dieses Beitrags ist es, (i) ein konsistentes Begriffsverständnis zu entwickeln, (ii) Einflussfaktoren strukturiert zu ordnen und (iii) die Grenzen des PMV-Modells im Sinne eines multidimensionalen Behaglichkeitsverständnisses zu diskutieren. Der Beitrag versteht sich als theoretischer Impuls zur präziseren Verwendung etablierter Komfortbegriffe und als Grundlage für integrative Bewertungsansätze.

Grundlagen der Behaglichkeit

Der Begriff der Behaglichkeit gehört zu den zentralen, zugleich jedoch am schwierigsten eindeutig zu definierenden Termini der Bauphysik. Über die letzten zwei Jahrhunderte wurde Behaglichkeit in unterschiedlichen wissenschaftlichen und kulturellen Kontexten interpretiert und umschrieben, wobei das individuell geprägte Verständnis sowie die Wissenschaftsdisziplin zu zahlreichen, teils divergierenden Definitionen führte. Vor dem Hintergrund heterogener Begriffsbestimmungen, unter anderem nach Adelung (1793), Pierer (1857), Rubner (1896) und Gomorsov (1963) wird die Behaglichkeit im Rahmen der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert:

Die Behaglichkeit beschreibt eine anhaltende, angenehme Empfindung, welche aus der Zufriedenheit des Menschen mit dem gegenwärtigen Zustand des Körpers resultiert. Dies impliziert einen Körper im Gleichgewicht, wobei thermoregulatorische Prozesse nicht übermäßig beansprucht werden und kein instinktives Bedürfnis zur Veränderung des Umfeldes besteht. Der Zustand ist von zahlreichen individuellen

Faktoren abhängig und wird in den meisten Fällen lediglich unterbewusst wahrgenommen.

Einflussfaktoren der Behaglichkeit

Behaglichkeit entsteht nicht aus der isolierten Wirkung einzelner Parameter, sondern aus dem Zusammenspiel physikalischer Randbedingungen und individueller Nutzereigenschaften. Für eine systematische Betrachtung erscheint daher die folgende Einteilung in drei Kategorien sinnvoll.

Faktoren der Behaglichkeit:

- *Thermische Faktoren:* Raumlufttemperatur in °C, Strahlungstemperatur in °C, Luftgeschwindigkeit in m/s, Luftfeuchtigkeit in %, Luftdruck in Pa, Außentemperatur in °C
- *Nicht thermische Faktoren:* Luftschall (Lautstärke) in dB(A), Belichtung in lux, CO_2-Konzentration in ppm, Gehalt an Spurenstoffen in ppm oder mg/m³
- *Individuelle Faktoren:* Tätigkeitsgrad in met, Bekleidungsgrad in clo, Alter in Jahren, Geschlecht, körperliche Verfassung, ethnische Einflüsse, Einflussnahme auf das Raumklima, zirkadianer Rhythmus, persönliche Präferenz

Thermische Faktoren gelten traditionell als Primärfaktoren und beeinflussen sowohl das Wohlbefinden als auch die Leistungsfähigkeit der Nutzer. Feld- und Laborstudien zeigen, dass sowohl Überwärmung als auch Unterkühlung mit einer Abnahme der körperlichen und kognitiven Leistungsfähigkeit einhergehen können, was sich in verminderter Konzentration und erhöhter Fehleranfälligkeit äußert (Wyon, 1986; Nicol und McCartney, 2001). Darüber hinaus rufen thermische Faktoren neben physischen auch indirekt psychische Beanspruchungen hervor. Niedrige relative Luftfeuchten können zu brennenden Augen und Hautirritationen führen (Bux und Polte, 2016), während hohe Luftfeuchten in Verbindung mit erhöhten Temperaturen ein Gefühl von Schwüle verursachen können (Pistohl et al., 2016).

Nicht thermische Faktoren tragen ebenfalls wesentlich zum Behaglichkeitsempfinden bei. Eine erhöhte CO_2-Konzentration wird mit Müdigkeit und Konzentrationsminderung assoziiert (Lahrz et al., 2008). Unzureichende Beleuchtung kann Antriebslosigkeit sowie ein erhöhtes Schlafbedürfnis hervorrufen (Milosavljevic, 2019), während erhöhte Geräuschpegel nachweislich Stressreaktionen und Leistungsabfall auslösen können (Willems, 2017).

Individuelle Faktoren wurden lange Zeit als zweitrangig betrachtet. Aktuelle Studien widersprechen dieser Annahme jedoch deutlich und zeigen, dass individuelle Eigenschaften der Nutzer das Behaglichkeitsempfinden in vergleichbarem Maße beeinflussen können wie physikalische Raumklimaparameter. So konnte festgestellt werden, dass Frauen im Vergleich zu Männern häufiger mit der Raumtemperatur unzufrieden sind und im Mittel höhere Raumtemperaturen bevorzugen (Karjalainen, 2007). Ein weiterer relevanter Einflussfaktor ist die sogenannte Klimamonotonie: Ein dauerhaft unverändertes Raumklima oder das Fehlen wahrgenommener Einflussmöglichkeiten kann zu Unzufriedenheit und Motivationsverlust führen (Bux und Polte, 2016).

Die Einteilung der Einflussfaktoren in primäre und sekundäre Faktoren ist in der bauphysikalischen Forschung weit verbreitet, suggeriert jedoch eine universelle Rangordnung der Wirksamkeit der Parameter. Ausschläge einzelner, vermeintlich sekundärer Einflussgrößen können das Behaglichkeitsempfinden jedoch in vergleichbarem Maße beeinträchtigen wie Änderungen klassischer Primärfaktoren. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit bewusst von einer hierarchischen Klassifikation abgesehen.

Begriffsverständnis und Konflikte

In der Bauphysik ist zwischen dem allgemeinen Konzept der Behaglichkeit und dem spezifischeren Begriff der thermischen Behaglichkeit zu unterschieden. Thermische Behaglichkeit beschreibt dabei die Zufriedenheit des Körpers mit den thermischen Größen des Raumklimas und bezieht sich auf jene Einflussgrößen, die das Wärme- und Kälteempfinden beeinflussen (Ihle, 2016). So wird thermische Behaglichkeit als Klimazustand angegeben, in dem der Nutzer die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Wärmestrahlung als ideal bezeichnet (Bux und Polte, 2016). In der aktuellen Fassung der DIN EN ISO 7730 wird thermische Behaglichkeit konsequent über das thermische Gleichgewicht des Körpers beschrieben, das auf der Wärmebilanz basiert.

Problematisch wird dieses klar abgegrenzte Begriffsverständnis jedoch dann, wenn thermische Behaglichkeit in Lehrmaterialien oder der Planungspraxis mit der Behaglichkeit insgesamt gleichgesetzt wird. Eine solche Gleichsetzung führt zu einem verkürzten Begriffsverständnis, da nicht thermische Faktoren sowie individuelle Nutzereigenschaften ausgeblendet werden.

Die Ursache dieser begrifflichen Unschärfe liegt weniger in der normativen Definition selbst als vielmehr in ihrer erweiterten Interpretation und Anwendung. Insbesondere die weite Verbreitung thermischer Bewertungsmodelle hat dazu beigetragen, thermische Kenngrößen als stellvertretend für das gesamte Behaglichkeitsempfinden zu verwenden. Ein weiterer Ursprung dieses Begriffskonflikts lässt sich auf ein im Jahr 1975 veröffentlichtes Schaubild zurückführen (siehe Abb. 1.). Dieses gliedert die thermische Behaglichkeit in physiologische, physikalische und intermediäre Bedingungen. Dabei werden optische und akustische Parameter sowie die Konstitution der thermischen Behaglichkeit zu-

geschrieben, obgleich diese, wie der Terminus suggeriert, keine thermischen Größen darstellen (Frank, 1975). Optische und akustische Parameter sollten daher nicht als Bestandteile der thermischen Behaglichkeit verstanden werden, sondern als Einflussgrößen, die deren Bewertung indirekt modulieren können. Die Verbreitung dieser Darstellung in Lehrbüchern bis weit nach der Jahrtausendwende hat vermutlich zur anhaltenden begrifflichen Unschärfe beigetragen (Liersch und Langner, 2020).

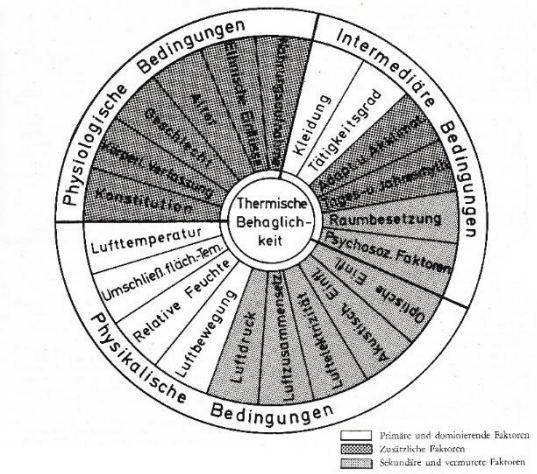

Abbildung 1: Schaubild der thermischen Behaglichkeit nach Frank. Quelle: Frank, 1975, S. 13.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine präzise begriffliche Abgrenzung notwendig. Während thermische Behaglichkeit einen klar definierten Teilaspekt beschreibt, ist Behaglichkeit insgesamt als multidimensionales Konstrukt zu verstehen. Die Abgrenzung ist nicht nur terminologisch, sondern auch methodisch relevant. Als normativ etabliertes Verfahren zur Bewertung thermischer Behaglichkeit wird das PMV-Modell in der Praxis teilweise als Maßstab für Behaglichkeit insgesamt interpretiert. Die nachfolgende Einordnung des PMV-Modells und seiner Anwendungsgrenzen zielt daher nicht auf eine Infragestellung des Modells an sich ab, sondern auf eine Präzisierung seiner Aussageweite.

PMV-Modell nach Fanger

Das von Fanger in den 1970er Jahren entwickelte PMV-Modell wird den Wärmebilanzmodellen zugeordnet (Fanger, 1970, 1982). Es bildet die Grundlage zur Berechnung des PMV (Predicted Mean Vote) und des PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) Indexes. Ziel des Modells ist es, das durchschnittliche thermische Empfinden einer größeren Personengruppe unter definierten Umgebungsbedingungen vorherzusagen. Das Modell berücksichtigt sechs Parameter: den thermischen Widerstand der Bekleidung, die mittlere Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die relative Luftgeschwindigkeit, die Luftfeuchtigkeit und den Energieumsatz. Die aus der Wärmebilanzgleichung resultierenden Größen in W/m² wurden von Fanger auf eine siebenstufige Likert-Skala von -3 („kalt“) bis +3 („heiß“) übertragen. Der PMV-Index beschreibt somit das vorhergesagte mittlere Behaglichkeitsvotum einer Personengruppe auf dieser Skala, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Skala des PMV-Index. Quelle: DIN EN ISO 7730, 2023, S. 8.

-3	-2	-1	0	1	2	3
Kalt	Kühl	Etwas kühl	Neu-tral	Etwas warm	Warm	Heiß

Wird das Raumklima von einer Person mit den Werten ± 2 oder ± 3 beurteilt, ist von einer Unzufriedenheit auszugehen. Um den PMV-Index in ein anwendbares Bewertungsmaß zu überführen, wurde der PPD-Index eingeführt. Dieser gibt den quantitativen Anteil an Personen an, die mit einem bestimmten Raumklima unzufrieden sind. Die Überführung des PMV-Index in den PPD-Index kann sowohl durch mathematische Berechnungen als auch durch grafische Darstellungen erfolgen. Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass es keinen Raumzustand gibt, mit dem alle Befragten zufrieden sind. Der Anteil der Unzufriedenen liegt selbst bei einem PMV-Index von 0 bei 5 %, wobei in der DIN EN ISO 7730 ein PPD-Index von 10 % empfohlen wird.

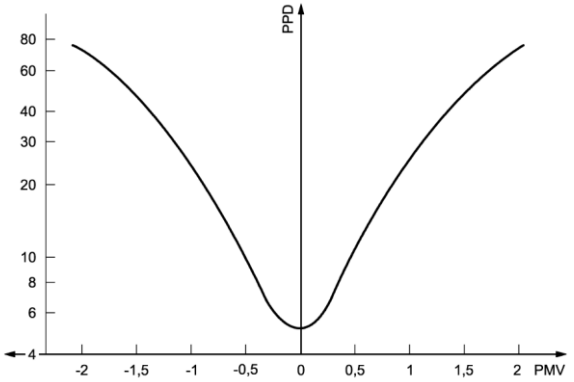

Abbildung 2: PMV- und PPD- Index. Quelle: DIN EN ISO 7730, 2023, S. 11.

Grenzen des PMV-Modells

Fanger entwickelte das PMV-Modell auf der Grundlage von Labor- und Klimakammerforschung. Die Studie basiert auf knapp 1400 Studenten im College-Alter, die im Winter für einen Zeitraum von 3 Stunden in einer Klimakammer auf Meereshöhe (1.013 hPa) stationären Bedingungen ausgesetzt waren, während sie standardisierte Kleidung trugen und standardisierte Aktivitäten (sitzende Tätigkeit) ausführten (van Hoof, 2008). Dieses Untersuchungsdesign ist aus mehreren Gründen kritisch zu betrachten. In Folgenden werden diese dargelegt.

Das PMV-Modell wurde unter der Annahme zeitlich gleichbleibender Randbedingungen entwickelt. Es setzt konstante Innenraumparameter sowie einen gleichbleibenden Aktivitätsgrad der Nutzer voraus, wie sie typischerweise in Büro-, Wohn- oder Hörsaalsituationen angenommen werden. Die Gültigkeit des Modells ist somit auf sogenannte steady-state-Bedingungen beschränkt. Bei transienten Situationen, wie beispielsweise bei raschen Änderungen der Lufttemperatur, nimmt die prognostische Aussagekraft des Modells deutlich ab, da adaptive und zeitabhängige Effekte nicht berücksichtigt werden (DIN EN ISO 7730).

Ein weiterer Anwendungsgrenzbereich ergibt sich aus der Zusammensetzung der Probandengruppen. Die experimentellen Grundlagen des PMV-Modells basieren überwiegend auf Untersuchungen mit jungen Erwachsenen, wobei der Anteil männlicher Probanden deutlich überwog. Kinder, ältere Menschen sowie Personen mit gesundheitlichen Einschränkungen wurden nicht systematisch einbezogen. Das Modell kann daher nicht ohne Korrekturfaktoren auf diese Nutzergruppen übertragen werden (van Hoof, 2008).

Auch hinsichtlich der klimatischen Randbedingungen ist der Anwendungsbereich des Modells begrenzt. Dieses wurde primär für gemäßigte Klimazonen entwickelt. Für extreme Temperaturbereiche oder hohe Luftfeuchten stehen keine verlässlichen, allgemein anerkannten Korrekturfaktoren zur Verfügung. Entsprechend definiert die DIN EN ISO 7730 enge Gültigkeitsbereiche für die zentralen Eingangsparameter, darunter Stoffwechselraten von 0,8 bis 4 met, Bekleidungsisolationen von 0 bis 2 clo, Raumlufttemperaturen zwischen 10 und 30 °C sowie Luftgeschwindigkeiten bis 1 m/s. Außerhalb dieser Intervalle ist die Anwendbarkeit und Genauigkeit der Vorhersage nicht gewährleistet (DIN EN ISO 7730).

Das PMV-Modell wurde ursprünglich für den Einsatz in konditionierten Innenräumen entwickelt und ist eng mit dem Kontext der HLK-Branche verknüpft (de Dear und Brager, 2002). Der Einfluss unterschiedlicher Gebäudetypen wurde bei der Modellentwicklung nicht explizit berücksichtigt. Hellwig (2005) zeigte jedoch, dass sich die Wahrnehmung der thermischen Umgebung zwischen klimatisierten und natürlich belüfteten Gebäuden signifikant unterscheidet. Diese Unterschiede werden unter anderem auf Anpassungsprozesse und veränderte Erwartungen der Nutzenden zurückgeführt. Vor diesem Hintergrund ist die Anwendung des PMV-Modells auf natürlich belüftete Gebäude kritisch zu bewerten, da es in solchen Gebäudetypen nachweislich an prognostischer Aussagekraft verliert (de Dear und Brager, 1998; de Dear, 2004).

Zusätzlich zu konzeptionellen Einschränkungen weist das PMV-Modell relevante softwarebedingte Unsicherheiten auf. Untersuchungen zeigen, dass die Berechnung des PMV-Indexes in Softwaretools häufig nicht auf fehlerhafte Implementierungen zurückzuführen ist, sondern auf unklare oder missverständlich formulierte normative Vorgaben sowie deren inkonsistente Interpretation (d'Ambrosio Alfano et al., 2019).

Das PMV-Modell basiert konzeptionell auf dem Prinzip der Thermoneutralität. Thermoneutralität beschreibt einen physiologischen Zustand, in dem der menschliche Körper seine Kerntemperatur ohne aktive thermoregulatorische Prozesse, wie etwa Schwitzen, aufrechterhalten kann. Dieser Zustand wird im Modell als behaglich angenommen (van Hoof, 2008). Der PMV-Index gibt dabei die thermische Empfindung der Nutzenden an, also wie warm oder kalt eine thermische Umgebung wahrgenommen wird. Diese Empfindung ist jedoch von anderen Bewertungsdimensionen wie thermischer Zufriedenheit, Akzeptanz oder Präferenz zu unterscheiden. Diese weiteren Größen beschreiben die subjektive Angemessenheit oder Erwünschtheit eines bestimmten Raumklimas. Empirische Untersuchungen zeigen, dass thermische Neutralität nicht zwangsläufig dem individuell bevorzugten oder als angenehm empfundenen Zustand entspricht. So bevorzugen viele Nutzer (vornehmlich weiblich) leicht warme Bedingungen gegenüber einem thermisch neutralen Zustand (Humphreys und Hancock, 2007). Die im PMV-Modell implizite Gleichsetzung von Thermoneutralität (PMV = 0) und Behaglichkeit kann daher zu systematischen Fehlinterpretationen führen. Vor diesem Hintergrund wird darauf hingewiesen, dass thermische Empfindung nicht ohne Weiteres mit Zufriedenheit gleichgesetzt werden darf.

Das PMV-Modell ist hochsensibel gegenüber Abweichungen der Eingangsparameter clo und met. Das Modell reagiert überproportional stark auf die angenommene Bekleidungsisolierung, wodurch die Vorhersagegenauigkeit erheblich beeinträchtigt werden kann. Croome et al. (1993) zeigen, dass das PMV-Modell die Wärmeeindrücke der Nutzer unterschätzt und unterbewertet. Dies ist auf eine zu starke Vereinfachung der Stoffwechselraten und eine zu hohe Empfindlichkeit des Modells auf clo-Werte zurückzuführen.

Weitere Modellansätze und Anpassungen

Vor dem Hintergrund zahlreicher Feldstudien wurde wiederholt festgestellt, dass die im PMV-Modell angenommene Beziehung zwischen thermischer Empfindung (PMV) und Unzufriedenheit (PPD) nicht in allen Nutzungskontexten bestätigt werden kann.

Deutlich wird dies in den Untersuchungen von Mayer, der zeigen konnte, dass das Minimum der Unzufriedenheit nicht bei einem thermisch neutralen Zustand (PMV = 0), sondern bei leicht warmen Bedingungen liegt (Mayer, 1998). Nach der sogenannten Mayer-Modifikation ergibt sich ein optimales PMV-Niveau von etwa +0,4, wobei selbst unter optimalen

Bedingungen ein minimaler Anteil von 16 % unzufriedene Personen verbleibt. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass thermische Neutralität nicht mit maximaler Behaglichkeit gleichzusetzen ist (Hellwig und Bischof, 2006). Die brasilianische Untersuchung von Araújo (1999) in natürlich belüfteten Gebäuden offenbarte selbst bei PMV = 0 einen PPD-Wert von 47,5 %, was nahezu dem Zehnfachen der Fanger-Prognose entspricht und auf eine systematische Unterschätzung der thermischen Unzufriedenheit in warmhumiden Klimaten hinweist. Die koreanische Klimakammerstudie von Yoon et al. (1999) zeigt ein Minimum von 18 % PPD bei einem leicht negativen PMV von -0,8. Daraus lässt sich ableiten, dass die Probanden kühlere Temperaturen präferierten als das Modell vorgab. Eine grafische Darstellung der Abweichungen zum PMV-Modell erfolgt in Abbildung 3.

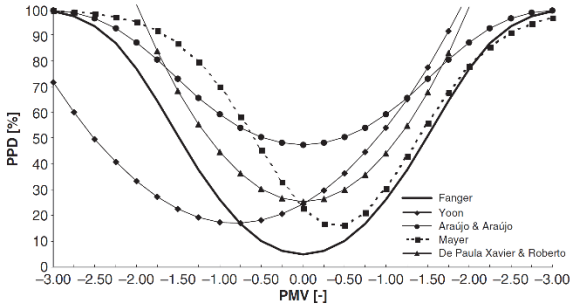

Abbildung 3: PMV- und PPD- Index verschiedener Untersuchungen. Quelle: Van Hoof, 2008, S. 185.

Diese systematischen Abweichungen lassen sich primär durch kontextspezifische Faktoren erklären: (i) den Gebäudetyp (natürliche vs. mechanische Lüftung), (ii) das regionale Klima, (iii) kulturell geprägte Erwartungshaltungen sowie (iv) die geringe Teilnehmerzahl mancher Studien. Die aggregierte Datenlage bestätigt, dass das PMV-Modell als großgruppenspezifisches Werkzeug tendenziell zu optimistische Komfortprognosen liefert. Zum anderen impliziert die heterogene Streuung der empirischen Kurven, dass eine pauschale Anwendung des Modells ohne kontextspezifische Kalibrierung zu erheblichen Fehleinschätzungen der tatsächlichen Nutzerzufriedenheit führen kann.

Vor dem Hintergrund dieser Befunde wurden verschiedene Erweiterungen des PMV-Modells vorgeschlagen. Das klassische PMV-Modell vernachlässigt, dass Nutzer ihr thermisches Empfinden aktiv an äußere Bedingungen und Vorerfahrungen anpassen (Fountain et al., 1996). In der Fachliteratur wird daher ein sogenannter Expectancy-Factor (e) vorgeschlagen, der die Erwartungshaltung gegenüber der Raumtemperatur quantifiziert und das berechnete PMV-Ergebnis entsprechend modifiziert. Der Faktor soll insbesondere in nicht klimatisierten Gebäuden mit längeren Warmperioden die erhöhte Toleranz gegenüber höheren Temperaturen abbilden. Da dieser Faktor weder in der DIN EN ISO 7730 noch im ASHRAE Standard 55 normativ verankert ist, findet er in gängigen Berechnungstools bislang keine Berücksichtigung. Um diese konzeptionelle Lücke zu adressieren, wurden in der Forschung weitere adaptive Erweiterungen des PMV-Modells entwickelt. Dazu zählt auch der adaptive PMV (aPMV), der die mittlere Außentemperatur als Indikator für adaptive Prozesse einbezieht (Enescu, 2017).

Diskussion und Fazit

Die vorliegende Arbeit ordnet den Begriff thermische Behaglichkeit ein und zeigt, dass diese lediglich einen Teilaspekt des gesamten Behaglichkeitsempfindens in Innenräumen darstellt. Die Analyse des PMV-Modells verdeutlicht, dass dieses innerhalb seines normativ definierten Anwendungsbereichs ein konsistentes Instrument zur Bewertung thermischer Behaglichkeit darstellt. Gleichzeitig zeigen die diskutierten Einschränkungen, dass Abweichungen zwischen modellierten Ergebnissen und tatsächlichem Nutzerempfinden nicht als Ausnahmefälle zu werten sind. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das PMV-Modell als Stellvertreter für die Bewertung der Behaglichkeit insgesamt jedoch kritisch zu hinterfragen ist. Vor dem Hintergrund zunehmender Nutzerdiversität und steigender veränderter Komforterwartungen erscheint eine multidimensionale Betrachtung von Behaglichkeit erforderlich. Der vorliegende Beitrag versteht sich in diesem Sinne als theoretischer Impuls für eine präzisere begriffliche Verwendung der Behaglichkeit und als Argumentation für weiterführende integrative Bewertungsansätze.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Drittmittelprojekts DROHNIS (Az.: 10.08.18.7-24.77). Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung. Die Autoren danken der Projektförderung für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

Adelung, J.C. 1793. Grammatisch-kritisches Wörterbuch der hochdeutschen Mundart. Band 1, Kapitel B. Breitkopf & Sohn Verlag, Leipzig, Deutschland, S. 809 - 810.

Araújo, V.M.D. 1999. The applicability of ISO 7730 for the assessment of the thermal conditions of users of buildings in Natal, Brazil. Proceedings of Indoor Air 99, Vol. 2, Edinburgh, UK, S. 148ff.

Bauer, M., Mösle, P. 2010. Behaglichkeit und Raumklima. In: Spath, D., Bauer, W., Green Office. Gabler, Wiesbaden, Deutschland, S. 99ff.

Bux, K., Polte, C. 2016. Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Klima. Forschungsprojekt F

2353. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Deutschland.

Croome, D.J., Gan, G., Awbi, H.B. 1993. Thermal comfort and air quality in offices. Indoor Air, Helsinki, Finland, S. 37 - 42.

d'Ambrosio Alfano, F., Olesen, B.W., Palella, B.I., Pepe, D., Riccio, G. 2019. Fifty years of PMV model: Reliability, implementation and design of software for its calculation. Atmosphere, 11, 49.

de Dear, R.J., Brager, G.S. 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transactions, 104, S. 145 - 167.

de Dear, R.J., Brager, G.S. 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings, 34, S. 549 – 561.

de Dear, R. 2004. Thermal comfort in practice. Indoor Air, 14, S. 32 - 39.

DIN EN ISO 7730. 2023. 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/DIS 7730:2023). Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

Enescu, D. 2017. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, S. 1353 - 1379.

Fanger, P.O. 1970. Thermal comfort – Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.

Fanger, P.O. 1982. Thermal comfort – Analysis and applications in environmental engineering. R.E. Krieger Publishing Company, Malabar, USA.

Fountain, M.E., Brager, G.S., de Dear, R.J. 1996. Expectations of indoor climate control. Energy and Buildings, 24, S. 179 - 182.

Frank, W. 1975. Raumklima und thermische Behaglichkeit. Berichte aus der Bauforschung, Heft 104. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, Deutschland, S. 12 ff.

Gomorsov, M. 1963. The microclimate of dwellings. Moscow State Publishing House for Medical Literature, Moscow, Russia.

Hellwig, R.T., Bischof, W. 2006. Gültigkeit thermischer Behaglichkeitsmodelle. Bauphysik, 28. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, Deutschland, S. 131 - 136.

Hellwig, R.T. 2005. Thermische Behaglichkeit – Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht. Dissertation. TU München, Fakultät für Architektur, München, Deutschland.

Humphreys, M.A., Hancock, M. 2007. Do people like to feel neutral? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale. Energy and Buildings, 39, S. 867 - 874.

Ihle, C. 2016. Der Heizungsingenieur 3. Lüftung und Luftheizung. 7. Auflage. Bundesanzeiger Verlag, Köln, Deutschland, S. 4.

Karjalainen, S. 2007. Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments. Building and Environment, 42. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, S. 1594 - 1603.

Lahrz, T., Bischof, W., Sagunski, H. 2008. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt, 51. Springer Medizin Verlag, Berlin, Deutschland, S. 1363 - 1364

Langner, N., Liersch, K.W. 2020. Bauphysik kompakt: Wärme, Feuchte, Schall. 6. Auflage. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

Mayer, E. 1998. Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? KI Luft- und Kältetechnik, 12. Hüthig Medien, Heidelberg, Deutschland, S. 575 - 577.

Milosavljevic, N. 2019. How does light regulate mood and behavioral state? Clocks & Sleep, 1(3), S. 319 - 331.

Nicol, J.F., McCartney, K.J. 2001. SCATS: Final report - Public. Oxford University, England.

Pierer, H.A. 1857. Pierer's Universal-Lexikon der Vergangenheit und Gegenwart oder Neuestes encyclopädisches Wörterbuch der Wissenschaften, Künste und Gewerbe. Vol. 2. Eigenverlag, Altenburg, Deutschland, S. 493.

Pistohl, W., Rechenauer, C., Scheuerer, B. 2016. Handbuch der Gebäudetechnik: Planungs-grundlagen und Beispiele. Vol. 2, 9. Auflage. Bundesanzeiger Verlag, Köln, Deutschland, L5.

Rubner, M. 1896. Zur Bilanz unserer Wärmeökonomie. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, Deutschland, S. 22.

van Hoof, J. 2008. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: Comfort for all? Indoor Air, 18. Blackwell Publishing, Singapore, S. 182 - 201.

Willems, W.M. 2017. Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme – Feuchte - Licht - Brand - Klima. 8. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland, S. 439ff.

Wyon, D.P. 1986. The effect of indoor climate on productivity and performance. Technische Universität Dänemark, Kopenhagen, Dänemark.

Yoon, D.W., Sohn, J.Y., Cho, K.H. 1999. The comparison on the thermal comfort sensation between the results of questionnaire survey and the calculation of the PMV values. Proceedings of Indoor Air 99, Vol. 2, Edinburgh, S. 137ff.