



DER "COMFORTCUBE" BEHAGLICHKEITSWÜRFEL - INTEGRALE MESSTECHNISCHE DATENERFASSUNG EINES ERWEITERTEN RAUMKLIMAS

Normen Langner¹, Sebastian Höhn², Maximilian Schirm³

¹ Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, 97070 Würzburg,
E-Mail: normen.langner@fhws.de

² Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, 97070 Würzburg,
E-Mail: sebastian.hoehn@student.fhws.de

³ Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 97070 Würzburg,
E-Mail: maximilian.schirm@uni-wuerzburg.de

Kurzfassung/Abstract

Die aktuelle messtechnische Erfassung von Parametern zur Bewertung der Behaglichkeit in Räumen konzentriert sich häufig meist nur auf thermische Kenngrößen des Raumklimas. Insbesondere wird dabei die Temperatur als Synonym für den Raumklimakomfort herangezogen. In dem laufenden Forschungsvorhaben „comfortcube“ wird durch die Kombination bereits existierender Sensoren ein neues Mess- und Anzeigegerät entwickelt, welches sich im Vergleich zu anderen für Behaglichkeitsmessungen genutzten Messinstrumenten durch eine integrale Erfassung und Bewertung über thermische Faktoren hinausgehender Raumkomfortklimaparameter auszeichnet. Durch die gleichzeitige messtechnische Erfassung aller relevanten Raumkomfortklimaparameter und deren unmittelbaren Bewertung durch die Nutzer kann auf Basis der aktuellen baulichen Randbedingungen und des menschlichen Befindens der Prozentsatz an Unzufriedenen prognostiziert werden.

The current measurement of parameters for the evaluation of indoor room comfort often concentrates only on thermal parameters of the room climate. In particular, temperature is used as a synonym for indoor climate comfort. In the current research project "comfortcube", a new measuring and display instrument is being developed by combining already existing sensors. Compared to other measuring devices used for comfort measurements, this instrument is characterized by an integral recording and evaluation of room comfort climate parameters that go beyond thermal factors. Through the simultaneous measurement of all relevant room comfort climate parameters and their direct evaluation by the users, the percentage of dissatisfied persons can be predicted on the basis of the current structural boundary conditions and the human condition.

Einleitung

Der aktuelle Forschungs- und Wissensstand auf dem Gebiet der Behaglichkeitsbewertung konzentriert sich meist nur auf einzelne Parameter des Nutzerkomforts. Dabei wird hauptsächlich die Temperatur als Synonym für den Raumklimakomfort herangezogen. Basis der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Thema thermischer Komfort sind die Arbeiten von Fanger aus den 1970er und 1980er Jahren (Fanger, P. O., 1973, 1982, 1986). Weiterhin hat E. Mayer dazu weiterführende Untersuchungen angestellt (Mayer, E., 1989, 1993, 1998). Aktuell gibt es zahlreiche Veröffentlichungen, die sich vornehmlich mit dem Thema der thermischen Behaglichkeit auseinandersetzen (z.B. in Mayer, E., 1998, Frank W. 1968, 1975, Hellwig, R. T., 2005, 2006, von Hoof, J., 2008). In vielen der genannten Dokumente werden die von Fanger entwickelten Bewertungskriterien des PMV (predicted mean vote) und PPD (predicted percentage of dissatisfied) weiterhin verwendet oder weiterentwickelt (u.a. DIN EN ISO 7730 und ASHREA-Standard 55). Wesentliche Gemeinsamkeit der vorliegenden Forschungen zum Thema (thermischer) Komfort ist, dass diese das menschliche Wohlbefinden lediglich von den thermischen Parametern des Umgebungsklimas (Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte) abhängig machen. Ob der auf dieser Basis ermittelte Prozentsatz an Unzufriedenen (Percentage of Dissatisfied – PPD) allerdings auch unter Berücksichtigung der neben der Umgebungstemperatur gleichzeitig auch den Nutzer einwirkenden Umgebungslautstärke, -beleuchtungsbedingungen, der -luftqualität, etc. vergleichbar ausgefallen wäre, bleibt beim aktuellen Forschungs- und Wissensstand offen.

Gesundheit, Wohlbefinden, Behaglichkeit und Produktivität

Aufgrund des individuell und kulturell vielschichtig geprägten Verständnisses von Gesundheit und Wohlbefinden lassen sich entsprechend viele wissenschaft-

liche Definitionen dazu finden. Diese unterscheiden sich je nach Wissenschaftsdisziplin häufig aufgrund des angesetzten theoretischen und praktischen Rahmens, der für die Definition herangezogen wird (Hornberg C., 2016, Ziegelmann, J. P., 2002). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat dabei bereits im Jahre 1946 Gesundheit definiert als einen „Zustand des vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens, der sich nicht nur durch die Abwesenheit von Krankheit und Gebrechen auszeichnet“ (WHO, 1946). Demnach befindet sich ein gesunder Mensch in einem Zustand des allgemeinen Wohlbefindens, der wiederum durch eine physische (körperliche), psychische (geistige) und soziale Ausgeglichenheit mit dem Umfeld bzw. der Umwelt gekennzeichnet ist. In diesem idealen Zustand der vollkommenen Ausgeglichenheit besteht keine Notwendigkeit, durch instinktive Impulse in der gegebenen Situation bestimmte Aktionen zur Veränderung des Verhaltens bzw. des Umfeldes des Menschen zu veranlassen (Mehra S.-R. (2021)). Während Gesundheit demnach ein Zustand des allgemeinen Wohlbefindens darstellt, beschreibt die Behaglichkeit in einem Gebäude oder einem Raum lediglich den Teil der physischen Ausgeglichenheit und kann insbesondere durch bauphysikalische Parameter qualifiziert werden. Daraus wird ersichtlich, dass sich Menschen in Gebäuden oder Räumen auch trotz optimaler Erfüllung aller Behaglichkeitskriterien nicht wohl fühlen können, wenn psychische und soziale Aspekte unberücksichtigt geblieben sind.

Zwischenzeitlich haben sich zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen damit befasst, einen Zusammenhang zwischen Behaglichkeit und Produktivität herzuleiten. Auch wenn es sich dabei nur um einen Teil des Wohlbefindens handelt, erscheint der Ansatz, dass die körperliche Ausgeglichenheit und Zufriedenheit am Arbeitsplatz zu besseren Arbeitsergebnissen führt, naheliegend. Dass sich bei der Herleitung von Zusammenhängen insbesondere auf die Behaglichkeit konzentriert wird, kann daran liegen, dass sich die bauphysikalischen Parameter gut messtechnisch erfassen und auswerten lassen. Schwierig ist dagegen die Übertragung konkreter Messwerte auf das subjektive Empfinden der im Raum anwesenden Menschen. Dabei würde die Komplexität deutlich zunehmen, wenn zusätzlich psychische und soziale Faktoren (z.B. Wirkung von Raumfaktoren (Grundrissgestaltung, Geometrie und Proportionen des Raumes), Farbgebung, Materialität, Möblierung, Blickbeziehungen am Arbeitsplatz) in die Bewertung einfließen würden.

Die Produktivität beschreibt zunächst das Verhältnis von einem Output zu einem Input. Eine Steigerung der Produktivität wird nach dieser Definition dadurch erreicht, indem entweder der Output erhöht oder der Input verringert wird. Bezogen auf Büroarbeitsplätze wird die Produktivität durch die Arbeitsleistung (=

Output) im Verhältnis zu den Kosten für die Bereitstellung der physischen und elektronischen Arbeitsumgebung (= Input) definiert. Da über den Lebenszyklus betrachtet die regelmäßigen Lohnkosten der Mitarbeiter um ein Vielfaches höher sind als die (einmaligen) Kosten für die Arbeitsumgebung, kann nur durch eine Erhöhung der Arbeitsleistung die Produktivität gesteigert werden und nicht durch Kosteneinsparungen in der Arbeitsumgebung. Vor diesem Hintergrund stellen Maßnahmen zur Verbesserung der Behaglichkeit am Arbeitsplatz und dadurch begründete Produktivitätssteigerungen sinnvolle Investitionen dar. In Bezug auf die Behaglichkeit gibt es mehrere Studien, die eine Abhängigkeit zur Produktivität aufzeigen. Wenn beispielsweise die Raumtemperaturen entweder zu hoch oder zu niedrig sind, erhöhen sich Fehlerquoten und damit verschlechtert sich die Leistung der Mitarbeiter. Besonders bei geistiger Arbeit verringert sich die Produktivität in wärmeren Umgebungen, da sich die Wärme eher einschläfernd auf den Körper auswirkt. In Seppänen, O., et. al., 2005, werden dazu verschiedene Studien zusammengefasst, aus denen hervorgeht, dass in einem Temperaturfeld zwischen ca. 21 °C und 25 °C keine Auswirkungen auf die Produktivität festzustellen sind, Unterschreitungen oder Überschreitungen aber zur Abnahme der Produktivität führen (siehe Abb. 1). Andere Untersuchungen betrachten den Faktor der Luftqualität (Ye; Lian, et. al., 2005, Alker, J., 2014). Dabei bestätigte sich, dass eine verbesserte Belüftung die Produktivität erhöht bzw. eine schlechte Luftqualität auch die Arbeitsleistung vermindert (siehe Abb. 2).

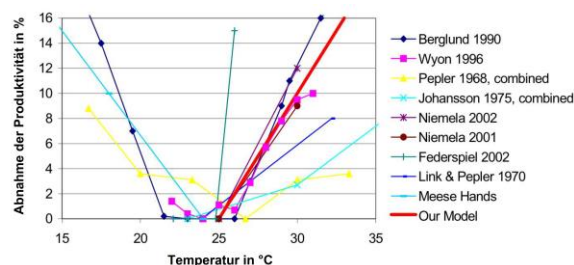


Abbildung 1: Abhängigkeit zwischen Raumtemperatur und Produktivität. Gemäß der durchgeführten Studien verringert sich die Produktivität ab unter ca. 21 °C und ab über ca. 25 °C (Seppänen, O., 2005).

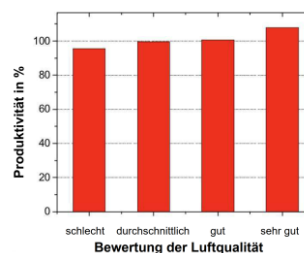


Abbildung 2: Abhängigkeit zwischen Luftqualität und Produktivität. Gemäß der durchgeführten Untersuchung verringert sich die Produktivität bei schlechter Luftqualität um ca. 5% (Ye, Lian, et. al., 2005).

Erweiterte Behaglichkeitsparameter

Bei der Betrachtung der thermischen Behaglichkeit werden in der Regel physiologische, physikalische und intermediäre Einflussparameter genannt. Dabei werden häufig auch optische oder akustische Einflüsse erwähnt, welche zunächst nicht unmittelbar mit den thermischen Parametern zusammenhängen. Für eine integrale Bewertung der Behaglichkeit und deren Bewertung kann daher auch eine Gliederung in thermische, nicht-thermische und individuelle Faktoren sinnvoll sein:

- Thermische Faktoren: Raumlufttemperatur, Außentemperatur, Oberflächentemperatur der Raumschließungsflächen, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck
- Nicht-thermische Faktoren: Schalldruckpegel, Beleuchtungsstärke, Lichtfarbe, CO₂-Gehalt und andere Spurengase (VOC/TVOC), Gerüche in der Raumluft, elektrischer Spannungsgehalt der Raumluft
- Individuelle Faktoren: Tätigkeitsgrad, Bekleidung, Alter, Geschlecht, Aufenthaltsdauer, Anzahl anwesender Personen, Konstitution und körperliche Verfassung, kultureller Hintergrund und ethnische Einflüsse, Adaption und Akklimatisation, zirkadianer Rhythmus, Farbgebung des Raumes

Die Vielzahl der das Behaglichkeitsempfinden von Menschen beeinflussenden Faktoren zeigt, dass die Behaglichkeit „ein Konglomerat aus – teilweise unbewussten – Empfindungen nicht nur auf der physischen, sondern auch auf der emotionalen und intellektuellen Ebene“ ist (Rybczynski, 1991). Die Herausforderung bei der Bewertung eines Raumklimas als mehr oder weniger „behaglich“ ist es, die gegenseitigen Beeinflussungen zwischen messbaren und nicht messbaren Parametern zu berücksichtigen und Korrelationen herauszuarbeiten, wie es beispielsweise R. T. Hellwig für die Parameter Ausleuchtung eines Raumes und Lichtfarbe in Bezug auf das Kälteempfinden gemacht hat (Hellwig, 2005).

Integrale messtechnische Datenerfassung eines erweiterten Raumklimas

Aus den vorstehenden Abschnitten geht deutlich hervor, dass zwischen Wohlbefinden und Behaglichkeit sowie Gesundheit und Produktivität eine Abhängigkeit besteht. Die messtechnische Erfassung von Daten zur Behaglichkeit konzentriert sich derzeit überwiegend auf die thermischen Faktoren. Nicht-thermische und individuelle Faktoren werden meist nicht erfasst, weshalb deren Einfluss auf die Behaglichkeit weitestgehend unerforscht ist. Im Gegensatz zu den wissenschaftlichen Anfängen der Untersuchungen zur Behaglichkeit von Fanger in den 1970er Jahren besteht heutzutage durch die enormen Speicherkapazitäten von Rechnern und mobilen Endgeräten sowie der Möglichkeit diese drahtlos mit Messgeräten zu verbinden und Daten in Echtzeit zu übertragen ein gänzlich anderes Potential Messdaten zu

erfassen und auszuwerten. Dabei bieten Applikationen auf den mobilen Endgeräten weitere Möglichkeiten, neben den gesammelten Messdaten zeitgleich auch das subjektive Empfinden der Nutzer:innen abzufragen und damit die individuellen Faktoren den thermischen und nicht-thermischen Messwerten gegenüberzustellen.

Vor diesem Hintergrund wurden für die Erweiterung des thermischen Raumklimas um nicht-thermische Größen zunächst der Helligkeitseindruck (Leuchstärke), die Luftqualität (CO₂-Gehalt) und das Lautstärkeempfinden (Schalldruckpegel) in die Behaglichkeitsbewertung aufgenommen.

Entwicklung eines kombinierten Messgerätes zur Abfrage thermischer und nicht-thermischer Faktoren

Bei dem „*comfortcube*“ (Komfortwürfel) handelt es sich um ein kombiniertes Mess- und Anzeigeinstrument, bestehend aus mehreren Sensoren zur Erfassung der thermischen, akustischen und visuellen Raumkomfortparameter inkl. des CO₂-Gehalts der Luft (Abb. 3). Insgesamt sind in dem Würfel fünf Sensoren enthalten, welche mit einem Einplatinencomputer verbunden werden. Folgende Sensoren kommen zur Anwendung:

- Bosch – BME 280: Messung des barometrischen Luftdrucks, der Raumlufttemperatur und der Relativen Luftfeuchte
- Modern Device – Wind Sensor Rev. C: Messung der Luftgeschwindigkeit
- Winsen – MH-Z19B: Messung der Luftqualität (CO₂)
- Rohm – BH1750: Messung der Helligkeit
- AZDelivery – KY-037: Messung der Lautstärke

Über einen USB-Anschluss können weitere externe Sensoren angeschlossen werden (z.B. zur Messung der Strahlungstemperatur). Zum Schutz der Sensorik und einer verbesserten Portabilität, wurde eine speziell auf die Anforderungen des Messgerätes abgestimmte Schutzhülle entwickelt (Abb. 3).



Abbildung 3: Der *comfortcube*
„Behaglichkeitswürfel“

Um eine ideale Anordnung der Sensorik in der Hülle festzulegen (z.B. um eine gegenseitige Beeinflussung durch Wärmeentwicklung auszuschließen, eine ausreichende Belüftung sicherzustellen, etc.), wurden

verschiedene Prototypen insbesondere in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Messergebnisse untersucht, indem diese mit den Messwerten geeichter Einzelmessgeräte des Herstellers Ahlborn verglichen wurden. In den Abbildungen 4 und 5 sind exemplarisch die Vergleichsmessungen der Raumlufttemperatur und der Helligkeit dargestellt, die in einem Arbeitszimmer ($A = \text{ca. } 20 \text{ m}^2$) durchgeführt wurden. Insgesamt wurden nur sehr geringe Abweichungen zwischen den Messungen festgestellt, die sich in der Regel auch innerhalb der jeweiligen Messgenauigkeit der Sensoren bewegten.

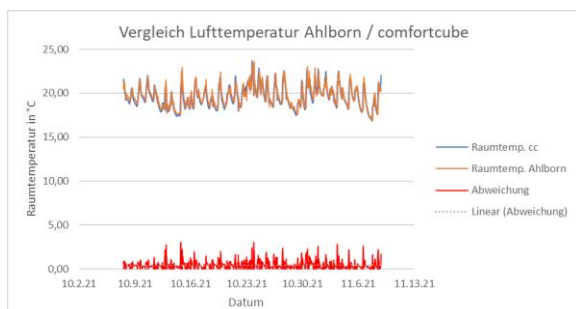


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Raumlufttemperatur gemessen mit dem digitalen Lufttemperaturfühler von Ahlborn (Sensor FH0D 46-C) und dem Temperatursensor GY-BME280 von Bosch im comfortcube. Es ergibt sich eine mittlere Abweichung von ca. $0,50 \text{ }^\circ\text{C}$, die innerhalb der Messgenauigkeit der jeweiligen Sensoren liegt.

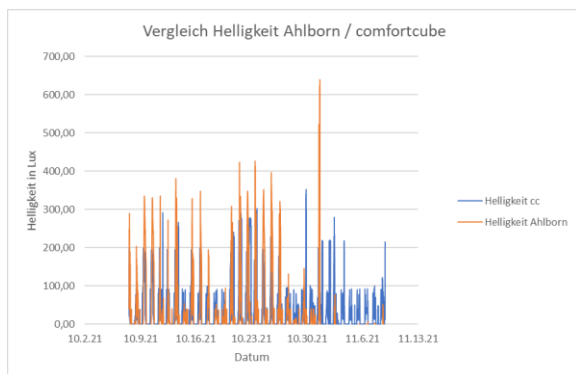


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Beleuchtungsstärke gemessen mit dem Luxmeter von Ahlborn (Sensor FL A613-VL) und dem Lichtsensor GY-302 BH1750 im comfortcube. Die mittlere Abweichung lag bei ca. 40 Lux . Dabei ist zu beachten, dass die Messgröße stark vom Aufstellort abhängt und die Sensoren zwar in unmittelbarer Nähe zueinander aufgestellt wurden, aber nicht am identischen Ort.

Abfrage individueller Faktoren

Die mit dem *comfortcube* gemessenen thermischen und nicht-thermischen Kenngrößen des Raumklimas werden direkt an eine Applikation („App“) eines mobilen oder stationären Endgerätes gesendet. Diese Applikation ist aufgebaut aus einem Frontend und einem Backend. Im Frontend der App (z.B. Smartphone, PC) können dann weitere individuelle Daten,

die zum Zeitpunkt der Messdatenerfassung im Umfeld des Nutzers gegeben sind, abgefragt und bewertet werden. Dabei sind unveränderliche Grunddaten (z.B. Geschlecht, Geburtsjahr, etc.) bereits bei der Ersteinrichtung der App eingegeben worden. Weiterhin erfolgt durch die Kopplung der App mit dem *comfortcube* in regelmäßigen Abständen eine Abfrage zum aktuellen Behaglichkeitsempfinden der Anwender. Damit können die aufgezeichneten Messwerte mit dem persönlichen Wohlbefinden der Nutzer und Nutzerinnen in Korrelation gebracht werden.

Das Backend der Applikation dient weiterhin zum anonymisierten Auslesen und Auswerten der Daten. Gleichzeitig soll dabei eine Datenbank mit allen erhobenen Messdaten angelegt werden, welche später auch als Grundlage bei der Anwendung von künstlicher Intelligenz dienen soll. Ziel ist es, aus den individuellen Angaben und den bereits erfolgten Bewertungen der Raumkomfortklimaparameter für die Nutzer konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten, damit sich unter den gegebenen bzw. den zu erwartenden Bedingungen ein optimales Behaglichkeitsempfinden einstellt.

Durchführung und Auswertung von Messungen

Die ersten Messungen mit Prototypen des *comfortcube* wurden im Umfeld der Hochschule, während Lehrveranstaltungen und Prüfungen, durchgeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der pandemischen Lage im Jahr 2021 keine Messungen möglich waren, mit deren Ergebnissen allgemeingültige Aussagen zur Behaglichkeit und dem Wohlbefinden getroffen werden konnten. Die durchgeführten Messungen dienen daher zum einen der Validierung der Messdaten und der Abfragen der individuellen Faktoren sowie zum anderen der Entwicklung geeigneter Methoden zur Auswertung empirisch ermittelter Daten und der Hypothesenentwicklung. Letztere werden in ein Forschungsmodell überführt mit dem dann die Forschungsfragen (vereinfacht: in welchen Zusammenhang stehen die Parameter eines erweiterten Raumklimas zu dem Gefühl der Behaglichkeit der Nutzer:innen, und: führt eine höhere Behaglichkeit zu mehr Produktivität) beantwortet werden sollen. Zur Überprüfung der Hypothesen soll sich zunächst an der Strukturgleichungsanalyse zur Bestimmung kausaler Wirkungszusammenhänge orientiert werden. Diese Methode bietet sich an, da die interessierenden Größen Behaglichkeit und Wohlbefinden nicht direkt gemessen werden können. Dies erfolgt dann hilfsweise durch die gleichzeitige Messung von einzelnen Parametern des Raumklimas.

Während der durchgeführten ersten orientierenden Messungen erfolgte eine Bewertung der Behaglichkeit durch die anwesenden Personen und wurde unmittelbar zum Zeitpunkt der Messung über ein Onlinetool abgefragt. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Gruppengröße lag dabei zwischen 8 und 40 mit einer guten Durchmischung

von weiblichen und männlichen Personen, deren Altersdurchschnitt zwischen 21 und 27 Jahren lag. Die Interpretation der Messdaten muss vor dem Hintergrund der pandemischen Lage und der in den Hörsälen und Seminarräumen erforderlichen hohen Außenluftwechselraten erfolgen.

Tabelle 1: Exemplarische Ergebnisse erster orientierender Messungen eines erweiterten Raumklimas. Gegenübergestellt sind Messwerte sowie deren objektive Zuordnung und die subjektive individuelle Bewertung der Nutzer:innen (jeweils über Farbskala, von grün (positiv) nach rot (negativ) bzw. rot (warm) nach blau (kalt) und Nutzerbewertung von -5 bis +5)

		Behaglichkeit	Raumlufttemperatur [°C]	Helligkeit [Lux]	CO ₂ -Gehalt [ppm]	Lautstärke [dB]
Gruppe 1	Messwert	-	18,14	368,11	448,67	44,16
	Nutzerbewertung	3,40	-1,40	0,40	na	0,00
Gruppe 2	Messwert	-	17,72	537,50	403,00	43,84
	Nutzerbewertung	1,43	-2,71	-0,14	na	-0,57
Gruppe 3	Messwert	-	18,08	460,67	416,00	42,96
	Nutzerbewertung	2,40	-1,40	0,00	na	-0,60
Gruppe 4	Messwert	-	18,01	434,17	406,67	43,75
	Nutzerbewertung	1,71	-2,29	-1,14	na	-0,14
Gruppe 5	Messwert	-	19,68	624,61	431,56	41,86
	Nutzerbewertung	2,67	-1,17	1,00	na	-0,17
Gruppe 6	Messwert	-	19,33	621,28	442,11	42,32
	Nutzerbewertung	3,75	-1,50	0,75	na	0,00
Gruppe 7	Messwert	-	19,18	618,94	448,44	43,72
	Nutzerbewertung	2,50	-2,17	0,00	na	0,00
Gruppe 8	Messwert	-	19,17	615,94	447,60	42,09
	Nutzerbewertung	3,88	-0,50	0,13	na	-0,13
Prüfung 1	Messwert	-	19,51	738,00	na	40,45
	Nutzerbewertung	3,05	-0,89	1,37	0,63	0,53
Prüfung 2	Messwert	-	20,12	730,70	na	42,52
	Nutzerbewertung	3,09	0,09	0,73	0,27	0,73
Prüfung 3	Messwert	-	21,77	199,06	504,67	42,33
	Nutzerbewertung	3,11	-0,37	1,95	-0,16	1,00
Prüfung 4	Messwert	-	21,10	239,79	463,79	42,36
	Nutzerbewertung	3,33	-0,08	2,00	1,00	-0,08
Prüfung 5	Messwert	-	22,75	272,68	480,06	45,00
	Nutzerbewertung	3,25	0,08	1,75	0,08	0,67

Insbesondere bei der im Dezember 2021 durchgeführten Messreihe mit 8 Gruppen, die nacheinander im selben Seminarraum eine Zwischenpräsentation vorgestellt haben, zeigen sich dadurch sehr niedrige Raumtemperaturen, die durchgehend auch als eher unbehaglich bewertet wurden. Bei den Prüfungen 1 bis 5 lag die Raumtemperatur zwischen ca. 20 °C - 23 °C, was möglicherweise auch zu der deutlich positiveren Bewertung der Behaglichkeit insgesamt geführt haben kann. Durch den hohen Luftwechsel war auch die auf den CO₂-Gehalt der Raumluft bezogene Luftqualität immer im niedrigen und damit guten bis sehr guten Bereich. Gleiches gilt für den Schalldruckpegel, der mit Werten zwischen L_p = 40 - 45 dB als niedrig einzustufen ist. Dies ist auf die jeweils gegebenen Prüfungssituationen zurückzuführen. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass die Faktoren Luftqualität und Lautstärke in den durchgeführten Messungen keinen wesentlichen Einfluss auf das gesamte Behaglichkeitsempfinden hatten, wohl aber die Raumtemperatur. Dabei haben z.B. die Gruppen mit der niedrigsten Raumtemperatur (Gruppe 2, 3 und 4, siehe Tab. 1) auch die Behaglichkeit insgesamt am niedrigsten bewertet. Ergänzend ist zu erwähnen, dass eine Korrelation mit der Bewertung der Zwischenpräsentation und der von den Gruppen angegebenen Behaglichkeit nicht abgeleitet werden konnte.

Herausforderungen in der Anwendung und Auswertung der Messdaten

Neben der Auswahl der Sensoren und deren Anordnung innerhalb des Messwürfels hat insbesondere der Aufstellort des *comfortcube* einen erheblichen Einfluss auf die Messwerte. Die Anordnung neben einem Fenster oder einer schlecht wärmedämmten Außenwand (z.B. im Altbau), neben einer Wärmequelle, in Boden- oder Deckennähe, in Raummitte oder in verschatteten Bereichen sind bei der Bewertung der Messergebnisse zu berücksichtigen. Für die Sammlung allgemeingültiger Datensätze ist daher bereits die Aufstellung des Messwürfels wissenschaftlich zu begleiten. Eine besondere Herausforderung stellt die Bewertung des Schalldruckpegels dar. Dabei darf nicht nur die Lautstärke der Geräuschquelle bewertet, sondern es muss differenziert werden, ob es sich z.B. um vom Nutzer als angenehm empfundene Musik oder um störenden Bau- oder Straßenlärm oder Gespräche handelt. Weiterhin hat die regelmäßige Abfrage zum aktuellen Behaglichkeitsempfinden der Anwender eine essenzielle Bedeutung zur Herstellung der Korrelation zwischen Messwerten und den individuellen Faktoren. Dabei ist sicherzustellen, dass insbesondere letztere aktualisiert werden, damit keine Fehlinterpretationen erfolgen. Während im wissenschaftlichen Feldversuch die Abfragen von den Probanden wissentlich akzeptiert werden, muss bei einer allgemeinen und individuellen Anwendung sichergestellt werden, dass automatisierte Abfragen von den Nutzern nicht störend wahrgenommen werden.

Ausblick

Im Gegensatz zu den Möglichkeiten Fangers in den 1970er Jahren können für die Fortschreibung des Bewertungssystems zur Behaglichkeit in Räumen heute leistungsstarke Computer (sowohl in Bezug auf Rechenleistung als auch Speicherkapazität) und künstliche Intelligenz herangezogen werden. Infolgedessen wird die Aufnahme und Auswertung großer Datenmengen erheblich erleichtert. Die Gewichtung der verschiedenen Faktoren ist dabei sehr individuell und differiert von Mensch zu Mensch. Beeinflusst wird die Gewichtung maßgeblich durch Faktoren wie Geschlecht, Alter, persönlichen Vorlieben etc. Die aktuell bekannten Bewertungsmethoden werden einer Vereinheitlichung dieser individuellen und gleichermaßen stark variablen Einflussgrößen nicht gerecht. Als Lösung dieses Problems erscheint deshalb der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) als das Mittel der Wahl. Dadurch könnte in Zukunft eine Phänotypisierung der diversen Wohlbefindlichkeitsprofile vollzogen und mit Hilfe von KI das System auf weitere Ziele wie z. B. eine Energieeinsparung optimiert werden. Durch ein dauerhaftes Training der KI könnten prädiktive Aussagen zur Schaffung eines persönlich optimalen Behaglichkeitsbereichs getroffen werden.

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschäftigt sich mit dem Einfluss thermischer, nicht-thermischer und individueller Faktoren auf die Behaglichkeitsbewertung. Mit einem für diesen Zweck entwickelten Mess- und Anzeigerät sollen dazu Messdaten eines erweiterten Raumklimas in Verbindung mit einem zeitgleich abgefragten Nutzerempfinden gesammelt und ausgewertet werden. Ziel ist es, Aussagen zur Abhängigkeit zwischen Wohlbefinden, Behaglichkeit und Produktivität herzuleiten, die über eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit hinausgehen.

Literatur

- Alker, J. (2014): Health, Wellbeing & Productivity in Offices. The next chapter for green building, World green building council
- ASHRAE Special Publications (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Beuth.
- DIN (Mai 2006). *DIN EN ISO 7730: 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)*. Beuth Verlag Berlin.
- EEA Technical report (2010): Good practice guide on noise exposure and potential health effects, Louxemburg, European Environment Agency
- Fanger, P. O. (1973). Thermal Environments Preferred by Man. *Build International*, 6 (1), 127–141.
- Fanger, P. O. (1982). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Robert E. Krieger.
- Fanger, P. O. (1986). Thermal environment – Human requirements. *The Environmentalist*, 6(4), 275–278. <https://doi.org/10.1007/BF02238059>
- Fanger, P. O., Hojbjerg, J. & Thomsen, J. O. (1974). Thermal comfort conditions in the morning and in the evening. *International journal of biometeorology*, 18(1), 16–22. <https://doi.org/10.1007/BF01450661>
- Frank, W. (1968). Die Erfassung des Raumklimas mit Hilfe richtungsempfindlicher Frigorimeter. *Gesundheits-Ingenieur*, 89(10), 301–308.
- Frank, W. (1975). *Berichte aus der Bauforschung: Raumklima und Thermische Behaglichkeit*. Literaturlauswertung durchgeführt im Auftrage des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Heft 104). Wilhelm Ernst & Sohn KG.
- Hellwig, R. T. (2005). *Thermische Behaglichkeit: Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht* [Dissertation]. Technische Universität, München. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss20051126-1648073927>
- Hellwig, R. T. & Bischof, W. (2006). Gültigkeit thermischer Behaglichkeitsmodelle. *Bau-physik*, 28(2), 131–136. <https://doi.org/10.1002/bapi.200610013>
- Hornberg C. (2016) Gesundheit und Wohlbefinden. In: Gebhard U., Kistemann T. (eds) *Landschaft, Identität und Gesundheit*. Springer VS, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-531-19723-4_5
- Mayer, E. (1993). Objective criteria for thermal comfort. *Building and Environment*, 28(4), 399–403. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(93\)90016-V](https://doi.org/10.1016/0360-1323(93)90016-V)
- Mayer, E. (1989). Thermische Behaglichkeit in Räumen: Neue Beurteilungs- und Meßmöglichkeiten. *Gesundheits-Ingenieur*(1), 35–43
- Mayer, E. (1998). Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? In *KI - Luft- und Kältetechnik: Zeitschrift für Forschung, Entwicklung, Herstellung und Anwendung in der Kälte-, Kryo-, Klima-, Luftreinhal- tungstechnik und Kältekonserverung* (S. 575–577). Müller Hüthig.
- Mehra S.-R. (2021) Behaglichkeit. In: *Stadtbauphysik*. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-30449-2_4
- Rybczynski, W. (1991). *Verlust der Behaglichkeit: Wohnkultur im Wandel der Zeit. dtv. Bd. 11439*. Dt. Taschenbuch-Verlag.
- Seppänen, O.; Fisk, W.; Faulkner, D. (2005): Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building, Helsinki University of Technology, Lawrence Berkeley National Laboratory USA
- van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor air*, 18(3), 182–201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>
- Ye; Lian; Zhou; Feng; Li; Liu (2005): Indoor environment, thermal comfort and productivity, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Second Medical University
- WHO (World Health Organization) (1946). Preamble to the Constitution of the World Health Organization
- Windlinger, Lukas (2014): Review zu den Einflüssen der Büroumgebung auf die Arbeitsleistung, Wädenswil, Institut für Facility Management, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften
- Ziegelmann, J. P. (2002). Gesundheits- und Krankheitsbegriffe. In: R. Schwarzer, M. Jerusalem, & H. Weber (Hrsg.), *Gesundheitspsychologie von A bis Z* (S. 149–152). Göttingen: Hogrefe Verlag