THERMOPHYSIOLOGISCHE MODELLIERUNG DER KOMPENSATIONSTEMPERATURDIFFERENZ DEZENTRALER KÜHLGERÄTE

Sabine Hoffmann[1], Zahra Rashtian[1], Philip Balizki[1], Monica Martins Pinto[1], Stefan Spies[1]
[1] *Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Fachgebiet Gebäudesysteme und Gebäudetechnik, 67663 Kaiserslautern*
E-Mail: sabine.hoffmann@rptu.de

Kurzfassung

Dezentrale Heiz- und Kühlgeräte (auch Personalised Environmental Control Systems, abgekürzt PECS) können in Räumen eingesetzt werden, wo sich mehrere Menschen mit unterschiedlicher thermischer Empfindung aufhalten. Sie besitzen die Fähigkeit, das thermische Empfinden in unmittelbarer Nähe des Menschen zu beeinflussen. Dabei bezeichnet die Kompensationstemperaturdifferenz die Unterschiede der operativen Temperatur, bei der mit und ohne Nutzung von PECS dasselbe thermische Empfinden entsteht. In diesem Beitrag werden zwei Kühlgeräte, eine radiativ wirkende Kühlwand und ein konvektiv wirkender Bürostuhl, mit einem Thermophysiologie- und einem Empfindungsmodell simuliert.

Abstract

Decentralized heating and cooling devices (also known as Personalized Environmental Control Systems, or PECS for short) can be used in rooms where several people with different thermal sensitivities are present. They have the ability to influence the thermal sensation in the immediate vicinity of the person. The compensation temperature difference refers to the differences in the operating temperature at which the same thermal sensation is achieved with and without the use of PECS. In this article, two cooling devices, a radiative cooling wall and a convective office chair, are simulated using a thermophysiology model and a sensation model.

Einleitung

Dezentrale Heiz- und Kühlgeräte, auch PECS (Personalised Environmental Control System) genannt, können ein lokales Behaglichkeitsklima schaffen und somit die individuellen Anforderungen von Gebäudenutzer*innen erfüllen. Gerade in Räumen, in denen sich mehrere Personen gleichzeitig dauerhaft aufhalten, wie z. B. in Großraumbüros, führen die unterschiedlichen thermischen Präferenzen immer wieder zu Differenzen. Direkt oder in unmittelbarer Nähe zum Körper können PECS für ein individuelles thermisches Wohlfühlklima sorgen.

Die Nutzung von energieeffizienten PECS kann dazu beitragen, den Gesamtendenergieverbrauch des Gebäudes zu reduzieren, wenn damit die Heiz- bzw. Kühllasten der zentralen Anlagentechnik verringert werden. Dies kann realisiert werden, indem die Bandbreite der Zieltemperaturen erweitert wird. Ein simulationsbasierter Ansatz, in dem verschiedene PECS modelliert wurden, zeigte Endenergieeinsparungen von bis zu 15 %, wenn gleichzeitig die Solltemperaturen der zentralen Raumkonditionierung angepasst wurden (Boudier und Hoffmann 2022; Boudier 2021).

Um den Effekt für spezifische PECS zu quantifizieren, wird in verschiedenen Publikationen die Größe des „corrective power“ oder auf deutsch „Kompensationstemperaturdifferenz“ eingeführt (Zhang u. a. 2015; Hoffmann 2026). Diese gibt an, um wieviel kälter (im Heizfall) bzw. um wieviel wärmer (im Kühlfall) ein Raum sein darf, wenn dezentrale Heiz- und Kühlgeräte eingesetzt werden. Die Kompensationstemperaturdifferenz kann experimentell oder durch Simulationen bestimmt werden. Sie stellt die (horizontale) Differenz der operativen Temperaturen bei derselben thermischen Empfindung dar. Auf der y-Achse ist dabei das thermische Empfinden üblicherweise auf einer Skala von -3 (kalt) bis +3 (heiß) aufgetragen.

Abb. 1 zeigt das Konzept der Kompensationstemperaturdifferenz $\Delta\theta_c$ einer radiativ wirkenden Kühlwand, wie sie auch in diesem Beitrag betrachtet wird. Dabei hängt der Wert des $\Delta\theta_c$ von der betrachteten operativen Bezugstemperatur ab (Hoffmann 2026).

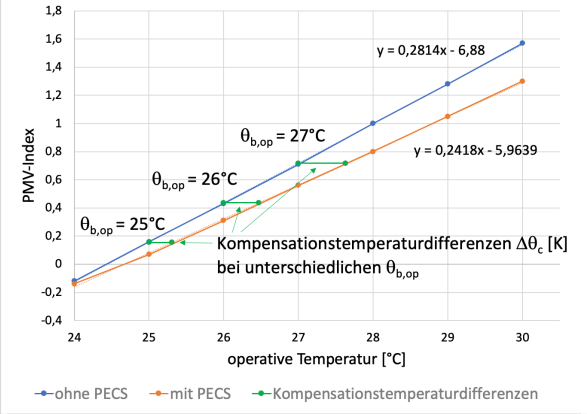


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kompensationstemperaturdifferenz einer radiativ wirkenden Kühlwand (Hoffmann 2026)

In diesem Beitrag werden zwei dezentrale Kühlgeräte modelliert mit dem Ziel, die Kompensationstemperaturdifferenzen simulationsbasiert zu bestimmen. Die Herausforderung der Simulationen besteht dabei in der Validierung der Simulationsergebnisse, insbesondere weil die dafür nötigen Multi-Segment-Ansätze zur thermophysiologischen Modellierung nicht für die bei PECS üblichen, stark transienten und asymmetrischen Wärmeströme validiert wurden.

Die nachfolgenden Betrachtungen behandeln keinen spezifischen Gebäudetyp, da die operativen Temperaturen des Raums als Randbedingungen dienen und nicht selbst über Gebäudesimulation bestimmt werden. Relevant sind die hier präsentierten Ergebnisse grundsätzlich für alle Räume, bei denen die metabolische Rate der einer sitzenden Tätigkeit entspricht (met ≈ 1.0 - 1.1) und bei denen für den Sommerfall eine leichte Bekleidung angenommen werden kann (clo ≈ 0.5 - 0.7).

Betrachtete PECS

Es werden folgende zwei Möglichkeiten der dezentralen Kühlung untersucht: 1) eine mobile Kühlwand (Abb. 2), die thermoelektrisch betrieben wird und deren Oberflächentemperatur um einige Kelvin unter die Lufttemperatur absenken kann (Kimmling 2023) und 2) eine Stuhlkühlung durch integrierte Ventilatoren zur Umwälzung der Umgebungsluft (Abb. 3). Der Bürostuhl ist seit 2016 als kommerzielles Produkt erhältlich.

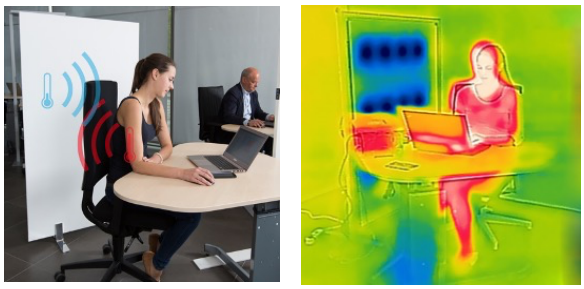


Abbildung 2: Mobile Kühlwand. Links: Foto eines Prototyps und Verdeutlichung des Prinzips. Rechts: Aufnahme mit Thermografiekamera. (Livinglab-smartofficespace.com)



Abbildung 3: Bürostuhl mit Kühlfunktion. Links: Foto des Stuhls, Bedienpanel unterhalb des Sitzes auf der rechten Seite. Rechts: Anordnung der Ventilatoren im Bereich der Lehne sowie des Sitzes. (Quelle: Klöber GmbH)

Die Kühlwand erhöht durch die reduzierte Oberflächentemperatur den langwelligen Wärmeaustausch des menschlichen Körpers mit der Umgebung. Dabei können bei der in Abb. 2 gezeigten mobilen Kühlwand geometrische Sichtfaktoren zum betrachteten Menschen im Bereich von 0.2 – 0.25 angenommen werden.

Der Bürostuhl erhöht einerseits den konvektiven Wärmeverlust durch erhöhte Luftgeschwindigkeit an der bekleideten Hautfläche, wobei die Temperatur der umgewälzten Luft der Raumlufttemperatur entspricht. Damit ist der konvektive Wärmeverlust durch die Temperaturdifferenz zwischen Hauttemperatur und Lufttemperatur begrenzt und nimmt mit höheren Umgebungstemperaturen deutlich ab. Allerdings führt die erhöhte Konvektion zu einer vermehrten evaporativen Wärmeabfuhr, da der durch Schwitzen verursachte Feuchtigkeitsfilm auf der Haut besser verdunsten und damit dem Körper Wärme entziehen kann.

Ergebnisse aus Feldstudien

Für beide Kühl-PECS liegen Ergebnisse aus experimentellen Studien vor, bei denen Gebäudenutzer*innen ihre thermische Empfindung mit und ohne Nutzung der dezentralen Kühlung bewertet haben.

Für die thermoelektrische Kühlwand wurden zwei Proband*innenstudien unter realitätsnahen Bürobedingungen durchgeführt. Beide Untersuchungen fanden während sommerlicher Randbedingungen bei erhöhten Raumtemperaturen statt. Die Raumtemperaturen wurden nicht aktiv kontrolliert und die Oberflächentemperaturen der Kühlwand schwankten zwischen 21 °C und 24 °C.

Insgesamt nahmen 17 Personen an den Studien teil, die die Kühlwand während definierter Arbeitsphasen für jeweils 15 min nutzten und ihr thermisches Empfinden mit und ohne aktivierte Kühlfunktion bewerteten. Parallel zur subjektiven Befragung wurden die relevanten Umgebungsparameter kontinuierlich erfasst, wodurch ein Zusammenhang zwischen dem subjektiven thermischen Empfinden und dem Betriebszustand der Kühlwand hergestellt werden kann. Weitere Details zu dem Studienaufbau können (Kimmling 2023) und (Zickgraf 2025) entnommen werden.

In Abb. 4 sind Regressionsanalysen für alle Bewertungen ohne Nutzung der Kühlwand (Kühlen aus) sowie für Bewertungen während des Betriebs (Kühlen an) mit jeweils n = 27 Bewertungen gezeigt. Die Bestimmtheitsmaße sind mit $R^2 = 0{,}08$ (Kühlen aus) und $R^2 = 0{,}13$ (Kühlen an) jedoch sehr niedrig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass 1) nur diskrete, ganzzahlige Werte möglich waren, 2) teilweise auch gegenläufige Bewertungen abgegeben wurden (d.h. keine Änderung des Empfindens oder wärmeres Empfinden mit Kühlfunktion) und 3) aufgrund der unterschiedlichen persönlichen Empfindungen eine hohe Streuung vorliegt.

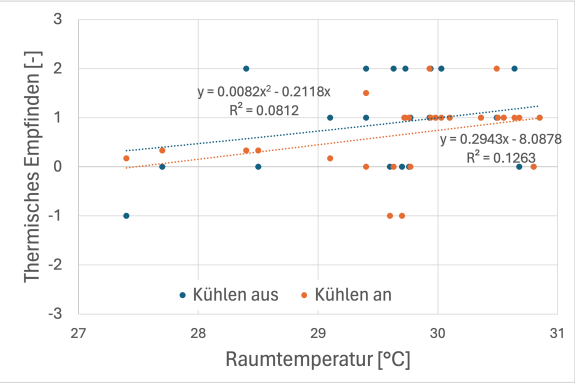


*Abbildung 4: Auswertung der subjektiven Bewertungen (n = 27) aus zwei Proband*innenstudien zur Nutzung der radiativ wirkenden Kühlwand*

Mit dem Bürostuhl wurde eine Feldstudie im Sommer 2015 (August – Oktober) durchgeführt (Hoffmann und Boudier 2016). Da der Sommer 2015 über einen langen Zeitraum sehr hohe Außentemperaturen aufwies, wurden die in einem Bürogebäude verteilten und mit entsprechender Sensorik ausgestatteten Stühle hauptsächlich im Kühlmodus genutzt. Insgesamt nahmen 26 Personen (10 weiblich, 16 männlich) teil, die den Stuhl täglich nutzten und zweimal pro Tag ihr thermisches Empfinden mit und ohne Kühlfunktion bewerteten. In den Räumen wurden gleichzeitig die Umgebungstemperaturen gemessen, woraus sich in Abb. 5 (analog zu Abb. 4) der Zusammenhang von subjektivem thermischem Empfinden mit und ohne Nutzung der Kühlfunktion des Stuhls ableiten lässt. Trotz größerer Bandbreite der Raumtemperaturen und höherer Anzahl an Bewertungen erklärt das Regressionsmodell auch hier nur einen geringen Anteil der Varianz des thermischen Empfindens.

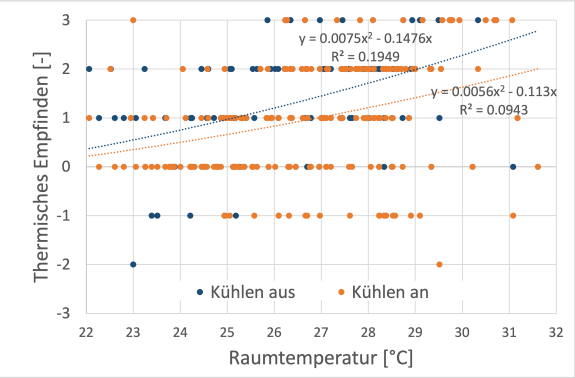


Abbildung 5: Auswertung der subjektiven Bewertungen (n = 228) aus einer Feldstudie des Bürostuhls mit Kühlfunktion

Methodik der Simulation

Für die Modellierung des thermischen Empfindens bei Nutzung des Bürostuhls und der Kühlwand wurde das Thermophysiologie-Modell JOS-3 (Takahashi u. a. 2021) verwendet. Dieses berechnet dynamisch die Körpertemperaturen für transiente Umgebungsbedingungen. Die simulierten Temperaturen stellen die Grundlage der Gleichungen zur Bestimmung der lokalen thermischen Empfindung (TE_{lokal}) für jedes Körperteil dar sowie der globalen Empfindung des ganzen Körpers (TE), auch „overall sensation“ genannt. Diese beruhen auf den Gleichungen von Zhang et al. (Zhang u. a. 2010a; 2010c). Die Körpertemperaturen werden dafür mit vorher bestimmten neutralen „setpoint temperatures“ verglichen. Transiente Effekte werden berücksichtigt.

Es handelt sich sowohl bei dem Physiologiemodell als auch bei dem Empfindungsmodell um komplexe und auf sich verändernde Randbedingungen sensitiv reagierende Modelle. Grundsätzlich sind sie geeignet, um sowohl stationäre als auch transiente Situationen zu beurteilen. Allerdings ist zu beachten, dass die experimentelle Datengrundlage, auf der die Modelle beruhen, begrenzt ist und die Simulationswerkzeuge für die Nutzung von PECS (noch) nicht validiert sind. In diesem Beitrag werden daher die berechneten Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der Feldstudie verglichen.

Vergleich mit PMV für neutrale und stationäre Bedingungen

In einem ersten Schritt werden Ergebnisse aus dem numerischen und transienten Modell betrachtet, wenn die Randbedingungen während eines Zeitraums von 10 Stunden stationär gehalten werden und keine PECS modelliert werden. Die Simulation folgt einer ebenfalls 10 Stunden dauernden „Warm-up“-Phase zur Initialisierung der Werte. Die weiteren Randbedingungen und Parameter sind so gewählt, dass sie bei angenommenen operativen Temperaturen von 24 °C bis 26 °C annähernd neutrale Bedingungen hervorbringen: Bekleidungsgrad 0.6 clo, metabolische Rate 1.1 met, Luftgeschwindigkeit 0.1 m/s, relative Feuchte 50 %. Das globale thermische Empfinden (TE) der Simulationsergebnisse wird mit den Gleichungen nach Zhang berechnet; für die PMV-Werte wurde das CBE Thermal Comfort Tool (https://comfort.cbe.berkeley.edu/) genutzt.

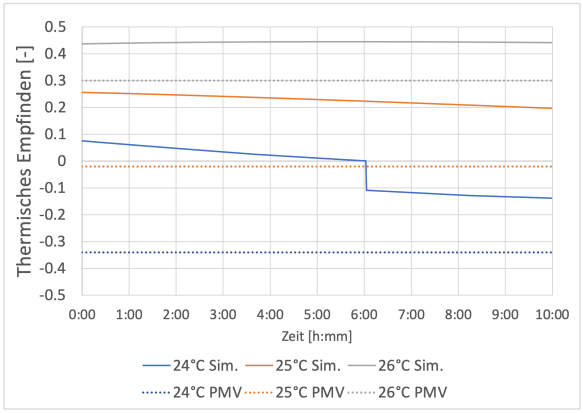


Abbildung 6: Vergleich der transienten Simulation bei stationären Randbedingungen mit PMV bei annähernd neutralem Empfinden ohne PECS

In Abb. 6 stellen die horizontalen, gestrichelten Linien den (konstanten) PMV-Wert dar, während die durchgezogenen Linien die TE-Werte aus der Simulation repräsentieren. Es ist ersichtlich, dass trotz stationärer Randbedingungen während der Simulationszeit von 10 Stunden das dynamische Modell aufgrund der komplexen thermoregulatorischen Prozesse im Körper eine Zeitabhängigkeit aufweist. Des Weiteren ist zu sehen, dass es eine Verschiebung der absoluten Werte gibt, wobei der PMV-Wert um ca. 0.13 bis 0.4 Punkte unter den berechneten TE-Werten liegt.

Der Sprung bei der Berechnung von TE im Falle von 24 °C stellt eine Besonderheit im „Overall Sensation" Modell von Zhang dar. Er ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt der Wert für TE_{lokal} des Oberkörpers („chest") negativ wird, was im Modell zu einem abrupten Abfall von TE („overall sensation" führt.

Simulation der PECS

Im nächsten Schritt wurden die PECS bei jeweils konstanten operativen Temperaturen in 1 K Schritten von 26 °C - 30 °C (Kühlwand) bzw. 26 °C - 31 °C (Bürostuhl) simuliert. Die Betriebsweise wird wie folgt gewählt: Nach der zehnstündigen Initialisierung wird eine Stunde ohne PECS simuliert. Anschließend wird das PECS für eine Stunde aktiviert. Diese Abfolge wiederholt sich fünfmal, sodass insgesamt eine Simulationszeit von 10 Stunden erzielt wird. In Abb. 7 (ebenso wie in Abb. 8 und Abb. 10) wird der berechnete Wert des globalen thermischen Empfindens am Ende der zweiten Betriebsphase des PECS aufgetragen, also nach 3:59 (h:mm), da dies im Rahmen einer realen Nutzung realistisch erscheint. In den Abb. 9a und 9b wird der gesamte zehnstündige Simulationszeitraum gezeigt.

Modellierung der Kühlwand

Die Kühlwand wird im Physiologiemodell JOS-3 modelliert, indem die unteren und oberen Extremitäten einer Körperseite mit einer Strahlungstemperatur von 22.5 °C beaufschlagt werden, während alle anderen Körperteile einer mittleren Strahlungstemperatur ausgesetzt werden, die der Lufttemperatur in der jeweiligen Simulation entspricht.

Das in Abb. 7 gezeigte und durch Simulation berechnete thermische Empfinden ändert sich durch den Betrieb der Kühlwand bei operativen Raumtemperaturen von 26 - 27 °C kaum. Bei 28 °C wird eine Reduktion von 0.37 K erzielt, bei 29 °C von 0.23 K.

Bei einer operativen Temperatur von 30 °C sind die Werte von TE annähernd identisch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Zhang'sche „overall sensation" Modell in diesem Empfindungsbereich den Mittelwert der zwei höchsten lokalen Empfindungen darstellt, also $TE = (TE_{lokal,max} + TE_{lokal,max-1})/2$. Die höchsten Werte für TE_{lokal} erzielen bei 30 °C der Kopf und der Oberkörper, die beide nicht durch die Kühlwand beeinflusst wurden.

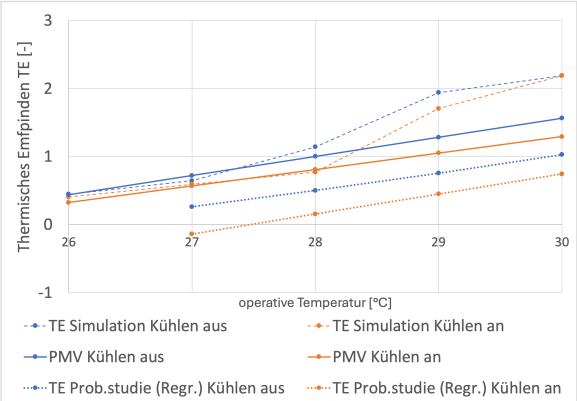


*Abbildung 7: Thermisches Empfinden aus transienten Simulationen bei unterschiedlichen operativen Temperaturen mit und ohne Kühlwand im Vergleich mit den Werten aus Abb. 1 (PMV-basiert) und aus Abb. 4 (Regressionsgleichungen der Proband*innenstudie)*

Abb. 7 zeigt zudem die mit dem PMV-Modell berechneten Werte für die Kühlwand, bei der die mittlere Strahlungstemperatur wie folgt gewählt wird: $MRT = 0.75\ \theta_{op} + 0.25\ \theta_{Kühlwand}$. Die Temperatur der Kühlwand wurde wie in der Simulation auf 22.5 °C festgelegt. Für den Temperaturbereich von 26° C bis 27 °C verhalten sich beide Ansätze ähnlich. Während PMV-Werte einen linearen Anstieg auch darüber hinaus aufweisen, steigen die simulierten Werte dagegen für 28 °C und 29 °C an. Die Reduktion von TE durch die Kühlwand bei gleicher operativer Temperatur sind für diese Temperaturen jedoch bei beiden Ansätzen ähnlich. Vergleicht man dazu die in Abb. 7 aufgetragenen Werte aus den Regressionsgleichungen der Proband*innenstudien, weisen diese niedrigere TE-Werte auf und zeigen tendenziell eine etwas höhere Reduktion.

Modellierung des Bürostuhls

Der Bürostuhl wird im Thermophysiologiemodell dargestellt, indem während der Betriebszeiten die angenommene Luftgeschwindigkeit von 0.1 m/s für die exponierten Körperteile Rücken, Becken und Oberschenkel auf 0.3 m/s erhöht wird. Betrachtet wurden wiederum die TE-Werte am Ende der zweiten Nutzungsperiode. Hier ergab sich aus der Kombination der berechneten Hauttemperaturen, der TE_{lokal}-Werte sowie des globalen thermischen Empfindens ein unerwartetes Ergebnis. Abb. 8 zeigt, dass das thermische Empfinden bei Nutzung der Kühlfunktion ansteigt.

Die Analyse der Hauttemperaturen (Abb. 9a) sowie der lokalen Empfindungen der einzelnen Körperteile (Abb. 9b) über den gesamten Simulationszeitraum ergibt, dass die Kühlung der Körperteile Rücken,

Becken und Oberschenkel zu einem Temperaturanstieg der anderen Körperteile führt. Dies ist der Thermoregulation geschuldet, die über eine Anpassung des Blutflusses die erhöhten Wärmeverluste der physiologisch besonders schützenswerten Bereiche des Körperkerns (Rücken und Becken) kompensiert. In der Konsequenz erhöhen sich auch die auf den Hauttemperaturen basierenden lokalen Empfindungen der nicht mit einer erhöhten Luftgeschwindigkeit beaufschlagten Körperteile. Das Modell schließt daraus auf einen Anstieg des globalen thermischen Empfindens.

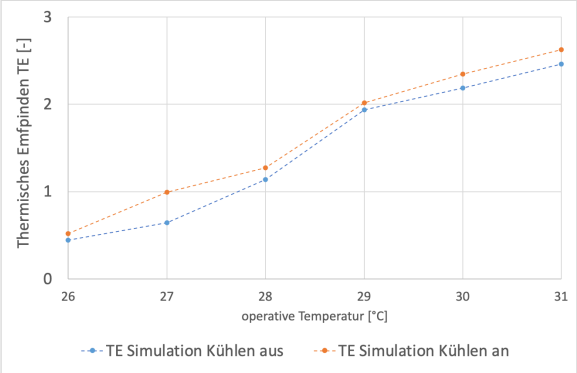


Abbildung 8: Thermisches Empfinden aus transienten Simulationen mit und ohne Nutzung der Kühlfunktion des Bürostuhls

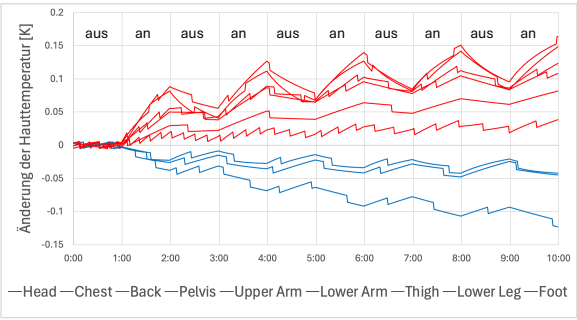


Abbildung 9a: Änderung der Hauttemperaturen im Physiologiemodell JOS-3 bei einer transienten Simulation mit einer operativen Temperatur von 28 °C

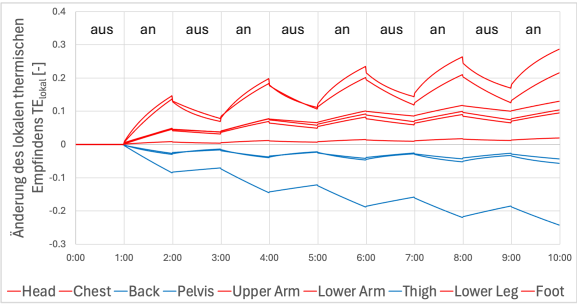


Abbildung 9b: Änderung des lokalen Empfindens im Zhangschen Empfindungsmodell basierend auf Hauttemperaturen aus Abb. 9a

Der Übersichtlichkeit wegen werden in den Abb. 9a und 9b alle Körperteile, die sich erwärmen rot gekennzeichnet und die gekühlten Körperteile blau. Der stärkste Abfall von Hauttemperatur und TE_{lokal} bei Nutzung des Bürostuhls ergibt sich in der Simulation dabei am Rücken, sowohl für die Hauttemperatur als auch für die lokale Empfindung. Letztere ist in Abb. 10 im Vergleich zu den Regressionsgleichungen der Feldstudie aufgetragen. Man kann erkennen, dass die Steigung aus der Feldstudie in etwa dem Anstieg des lokalen Empfindens in der Simulation entspricht. Dennoch treten signifikante Unterschiede sowohl in den Absolutwerten als auch in der erzielten Reduktion des thermischen Empfindens durch die Nutzung des Stuhls auf.

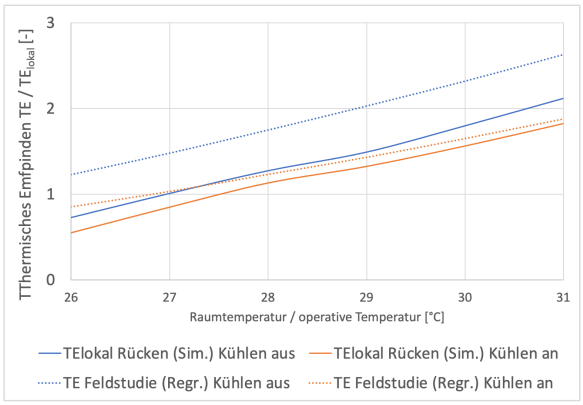


Abbildung 10: Lokales thermisches Empfinden am Rücken aus transienten Simulationen bei unterschiedlichen operativen Temperaturen mit und ohne Nutzung der Kühlfunktion des Bürostuhls im Vergleich mit den Werten aus Abb. 5 (Regressionsgleichungen der Feldstudie)

Diskussion

Betrachtet man zuerst die Unterschiede zwischen einerseits thermophysiologischer Simulation und Empfindungsmodellierung und andererseits dem PMV-Modell ohne Nutzung von PECS, erscheinen die Ergebnisse nachvollziehbar und realistisch. Die Differenzen bei neutralen Bedingungen sind moderat und der stärkere Anstieg des Empfindens in der Simulation bei 28 - 29 °C ist schlüssig. Für die betrachteten Temperaturbereiche sind sowohl JOS-3 als auch das verwendete Empfindungsmodell zudem hinreichend validiert. Die Unterschiede lassen sich aus den unterschiedlichen Ansätzen eines Multi-Segment-Modells einerseits und einem reinen globalen Wärmebilanzmodell andererseits erklären.

Bei der dynamischen Modellierung der Kühlwand entsprechen die erzielten Reduktionen von TE in hohem Maße den Betrachtungen mit dem PMV-Modell. Bei der Simulation werden nur die oberen und unteren Extremitäten exponiert, d. h. mit einer geringeren Strahlungstemperatur beaufschlagt, während die Körperteile des Körperkerns keine Änderung erfahren. Die TE_{lokal}-Werte von Kopf und Oberkörper weisen mit und ohne Kühlwand keine Unterschiede auf. Folglich bestimmen die gekühlten Arme, Hände, Beine und Füße das globale Empfinden.

Bei der Modellierung des Bürostuhls ergeben sich dagegen unrealistische Ergebnisse in Form einer berechneten höheren thermischen Empfindung bei Nutzung der Kühlfunktion. Wie im entsprechenden Abschnitt erläutert, erklärt sich dieses Phänomen aus einer thermoregulatorischen Kompensation bei Kühlung des Körperkerns, die zu einer Erhöhung von Hauttemperatur und lokalem Empfinden der restlichen Körperteile führt. Hinsichtlich der Modellierung von PECS bedeutet dies, dass besonderes Augenmerk auf die tatsächlichen physiologischen Vorgänge gelegt werden muss, wenn Körperteile der Körpermitte Wärmeabfuhr erfahren. Hier sind experimentelle Validierungen durch Messungen der tatsächlichen Hauttemperatur unbedingt anzuraten.

Feldstudien und Proband*innenstudien eignen sich gut, um eine Einschätzung des Potenzials einzelner PECS zu erhalten. Für die Validierung der Simulationsergebnisse sind sie allerdings nur eingeschränkt geeignet, da sie im Allgemeinen eine zu hohe Varianz aufweisen. Dies ist den unterschiedlichen thermischen Präferenzen der teilnehmenden Personen, der meist eher geringen Anzahl an Bewertungen und der üblicherweise verwendeten diskreten 7-Punkt Skala des thermischen Komforts geschuldet.

Die Bestimmung der Kompensationstemperaturdifferenz als horizontale Differenz der operativen Temperaturen bei gleichem Empfinden mit und ohne PECS sollte nach den Erkenntnissen dieser Arbeit einige Punkte berücksichtigen: Die simulierten Empfindungswerte ohne PECS müssen mit herkömmlichen und gut validierten Ansätzen (PMV, kontrollierte Proband*innenstudien in Klimakammern etc.) verglichen werden. Die simulierte Reduktion des thermischen Empfindens durch den Einsatz von PECS als vertikale Differenz von TE bei gleicher operativer Temperatur sollte darüber hinaus auch den Erfahrungen bei der Nutzung des PECS in Feldversuchen entsprechen.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Auswirkung zweier Personalised Environmental Control Systems (PECS) auf das thermische Empfinden von Gebäudenuterz*innen simuliert. Die Simulationsergebnisse mit dem Thermophysiologiemodell JOS-3 und dem daran gekoppelten Zhang‘schen Empfindungsmodell für eine mobile Kühlwand weisen für niedrigere Temperaturbereiche von 26 - 27 °C eine sehr gute Übereinstimmung mit dem PMV-Modell auf, für den Temperaturbereich 28 - 29 °C weichen sie nachvollziehbar davon ab. Die berechnete Reduktion durch Nutzung der Kühlwand entspricht näherungsweise auch den Ergebnissen von Proband*innenstudien. Die Modellierung eines Bürostuhls mit Kühlfunktion durch erhöhte Konvektion im Sitz- und Rückenbereich ergab unerwartete Ergebnisse, die im Beitrag analysiert und anschließend diskutiert werden.

Literatur

*Boudier, Katharina. 2021. „Modellierung der Interaktion von Gebäudenutzer*innen und Gebäudetechnik - Potenzialanalyse dezentraler Heiz- und Kühlsysteme hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit und des Energieverbrauchs auf Basis eines adaptiven Gebäudereglers“. Technische Universität Kaiserslautern*

Boudier, Katharina, und Sabine Hoffmann. 2022. „Analysis of the Potential of Decentralized Heating and Cooling Systems to Improve Thermal Comfort and Reduce Energy Consumption through an Adaptive Building Controller“. Energies 15 (3): 1100. https://doi.org/10.3390/en15031100.

Hoffmann, Sabine. 2026. „Bewertung von dezentralen Kühlsystemen (PECS) im Rahmen des sommerlichen Wärmeschutzes“. Bauphysik, Nr. 1.

Hoffmann, Sabine, und Katharina Boudier. 2016. A New Approach to Provide Thermal Comfort in Office Buildings – a Field Study with Heated and Cooled Chairs.

Kimmling, Mathias. 2023. Development of a Thermoelectric Cooling Partition for User-Specific Longwave Radiative Cooling of Building Occupants.

Takahashi, Yoshito, Akihisa Nomoto, Shu Yoda, u. a. 2021. „Thermoregulation Model JOS-3 with New Open Source Code“. Energy and Buildings 231 (Januar): 110575. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110575.

Zhang, Hui, Edward Arens, Charlie Huizenga, und Taeyoung Han. 2010a. „Thermal Sensation and Comfort Models for Non-Uniform and Transient Environments: Part I: Local Sensation of Individual Body Parts“. Building and Environment 45 (2): 380–88. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.018.

Zhang, Hui, Edward Arens, Charlie Huizenga, und Taeyoung Han. 2010c. „Thermal Sensation and Comfort Models for Non-Uniform and Transient Environments, Part III: Whole-Body Sensation and Comfort“. Building and Environment 45 (2): 399–410. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.020.

Zhang, Hui, Edward Arens, und Yongchao Zhai. 2015. „A Review of the Corrective Power of Personal Comfort Systems in Non-Neutral Ambient Environments“. Building and Environment 91 (September): 15–41. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.013.

Zickgraf, Cosima. 2025. Effizienzbewertung einer thermoelektrischen Kühlwand und Vergleich mit herkömmlichen Kühlsystemen hinsichtlich Ökonomie, Ökologie und thermischem Komfort. Masterarbeit, RPTU Kaiserslautern