

# Behaglichkeitsanalysen unter transienten Bedingungen

## Erste Ergebnisse des Analysefalls „Überheizung“

Fragestellungen zur thermischen Behaglichkeit werden seit mehreren Jahrzehnten intensiv von Wissenschaftlern weltweit untersucht. Grundlegende Zusammenhänge wurden von Fanger in den 1980er-Jahren analysiert; die Ergebnisse fanden Einzug in unterschiedlichen Normen. Zu nennen sind hier beispielsweise die DIN EN ISO 7730 [1] und die EN 16798-1 [2]. Die in diesen Normen benannten Berechnungs- und Bewertungsverfahren basieren weitestgehend auf der Annahme von stationären Randbedingungen. Technische Anlagen im Gebäudebereich werden jedoch oft transient betrieben, was sich beispielsweise in einer Nacht- und Tagesabsenkung mit den entsprechend notwendigen Anheizzeiten widerspiegelt. Basierend darauf ist zu hinterfragen, ob die stationären Kriterien des PMV-/PPD-Indexes (globale Wärmephysiologie) in Kombination mit den lokalen Kriterien überhaupt zur Bewertung des Raumklimas angewendet werden können. Im ersten Teil des Beitrags soll ein Überblick zur Untersuchungsmethodik gegeben werden; im zweiten Teil werden erste Ergebnisse aus den Analysen dokumentiert und diskutiert.



PD Dr.-Ing. habil.  
Joachim Seifert,  
Privatdozent  
für Heizungs- und  
Raumluftechnik,  
TU Dresden



Dipl.-Ing.  
Maximilian Beyer,  
wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
am Institut  
für Energietechnik,  
TU Dresden



Dipl.-Ing.  
Lars Schinke,  
wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
am Institut  
für Energietechnik,  
TU Dresden



Dipl.-Ing.  
Alexander Buchheim,  
wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
am Institut  
für Energietechnik,  
TU Dresden

### Untersuchungsmethodik und Randbedingungen

Um belastbare Aussagen zur Einschätzung der wärmephysiologischen Verhältnisse unter transienten Bedingungen zu erhalten, ist es zwingend notwendig, eine Analyse mit Probanden durchzuführen. Aus diesem Grund wurde an der TU Dresden das „Combined Energy Lab 2.0“ um einen Klimaraum erweitert. Abbildung 1 zeigt die drei wesentlichen Bestandteile des „Combined Energy Lab 2.0“.

Der Klimaraum hat eine Grundfläche von  $A = 20 \text{ m}^2$  und eine Raumhöhe von  $h = 2,5 \text{ m}$ , er stellt damit beispielsweise einen repräsentativen Raum eines Gebäudes dar. Hinsichtlich aller Raummfassungsflächen kann dieser in einem Bereich von  $10 \text{ °C} \leq \vartheta_{or} \leq 50 \text{ °C}$  variiert werden. Der Versuchsstand ist mit einer Klimaanlage ausgestattet, die eine Variation der Zulufttemperatur von  $10 \text{ °C} \leq \vartheta_L \leq 35 \text{ °C}$  und der relativen Feuchte von  $20\% \leq \varphi \leq 90\%$  ermöglicht. Somit können eine große Anzahl von praktisch relevanten Fra-

gestellungen der technischen Gebäudeausrüstung mit dem Klimaraum analysiert werden. Weitere Details zum Versuchsstand sind [3] zu entnehmen.

Um grundlegende Fragestellungen zum transienten Betrieb von heizungstechnischen Anlagen beantworten zu können, wurde zunächst mit allen Probanden eine Initialisierungsphase durchlaufen. Dabei konnten die Probanden ihre eigene Komforttemperatur  $\vartheta_{op}$  einstellen. Im Anschluss an diese Phase wurde eine Temperaturrampe gefahren, bei der die Probanden keinen Einfluss mehr auf den Sollwert der Regelung hatten. Jeder Proband erfuhr jeweils eine Überheizung und eine Unterkühlung. In einem Zeitintervall von  $\Delta\tau = 10 \text{ min}$  wurden die Probanden aufgefordert, einen Fragebogen zu beantworten, der Fragen zum aktuellen Empfinden und zum Wunsch der Raumtemperaturänderung beinhaltete. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen das prinzipielle Vorgehen sowie den verwendeten Fragebogen.

Die Probanden waren 84 Personen aus dem universitären Umfeld. Die Altersverteilung der Personen ist der Abbildung 4 zu entnehmen. Es waren etwas mehr weibliche Probanden vertreten als männliche.

Dominiert wurde die Stichprobe von Personen mit einem Alter von 25 bis 40 Jahren. Personen höheren Alters waren in der Unterzahl. Trotz großer Bemühungen der Autoren eine repräsentativere Stichprobensammensetzung entsprechend der Bevölkerungszusammensetzung der Bundesrepublik

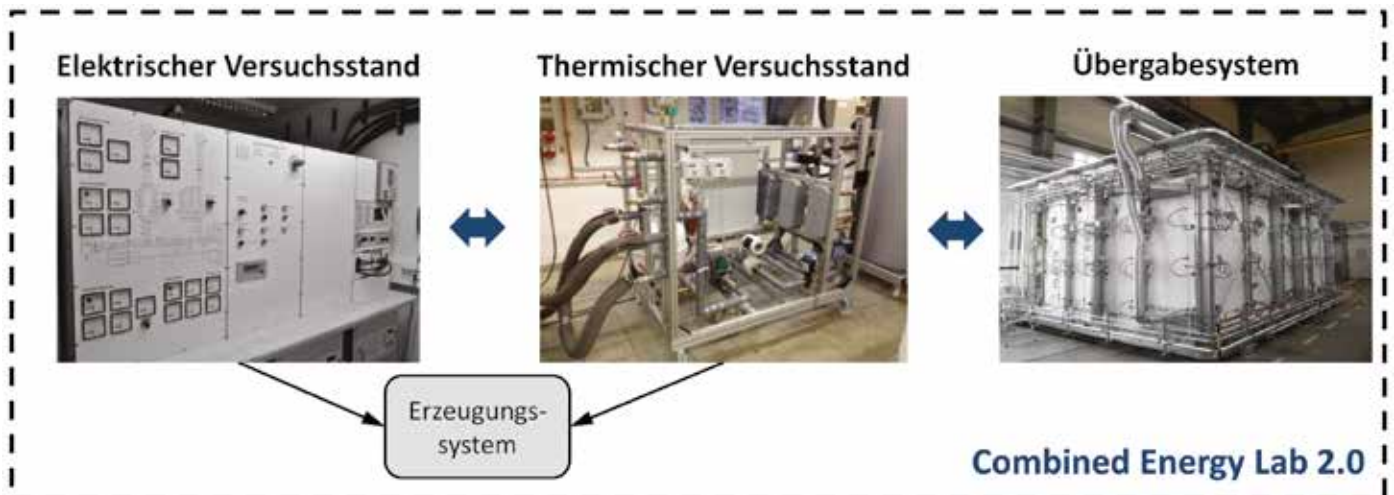


Abbildung 1: „Combined Energy Lab 2.0“ der TU Dresden

Grafik: TU Dresden

lik Deutschland zu erzielen, konnte kein signifikant höherer Anteil an älteren Personen gewonnen werden. Die nachfolgend dokumentierten Ergebnisse müssen daher unter diesem Gesichtspunkt bewertet werden.

**Ergebnisse**

Abbildung 5 zeigt die Verteilung der von den Probanden eingestellten Initialisierungstemperatur  $\vartheta_{op}$  während der ersten Phase der Versuche.

Ersichtlich ist aus Abbildung 5, dass die meisten Probanden eine Initialisierungstemperatur von  $\vartheta_{op} = 22\text{ °C}$  gewählt haben, wobei eine Tendenz zu höheren Temperaturen besteht. Diese operative Temperatur kann als die „Wohlfühltemperatur“ der Probanden interpretiert werden und korreliert mit den Angaben in [1] und [2]. Ersichtlich ist auch, dass Temperaturen unterhalb von  $\vartheta_{op} = 22\text{ °C}$  seltener gewählt worden sind.

Die dokumentierten Temperaturen stellen physikalisch gemessene Werte dar. Ergänzend wurden die Probanden nach ihren „Wunschtemperaturen“ befragt. Diese differierten jedoch signifikant von der physikalischen operativen Temperatur. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Mensch die physikalische Temperatur nur sehr unzureichend einschätzen kann.

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen ausgewählte Befragungsergebnisse der Probanden zur Überheizung. Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, dass mit höheren Raumtemperaturen ein Anstieg der Bewertung auf der linken Skala festzustellen ist. Das bedeutet, dass die höheren Temperaturen durch den Nutzer wahrgenommen werden und auf einer Skala von -3 bis +3 mit maximal 1,5 bewertet werden. Die Bewertung von 1,5 entspricht dabei einer „moderat warmen“ Bewertung. Nach dem Durchlaufen einer Beharrungsphase

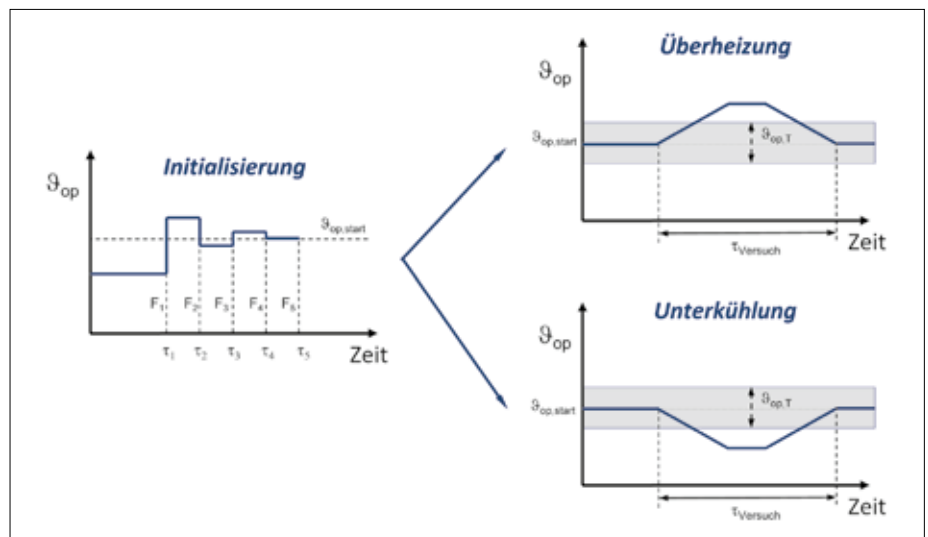


Abbildung 2: Grundlegender Ablauf der Analysen

Grafik: TU Dresden

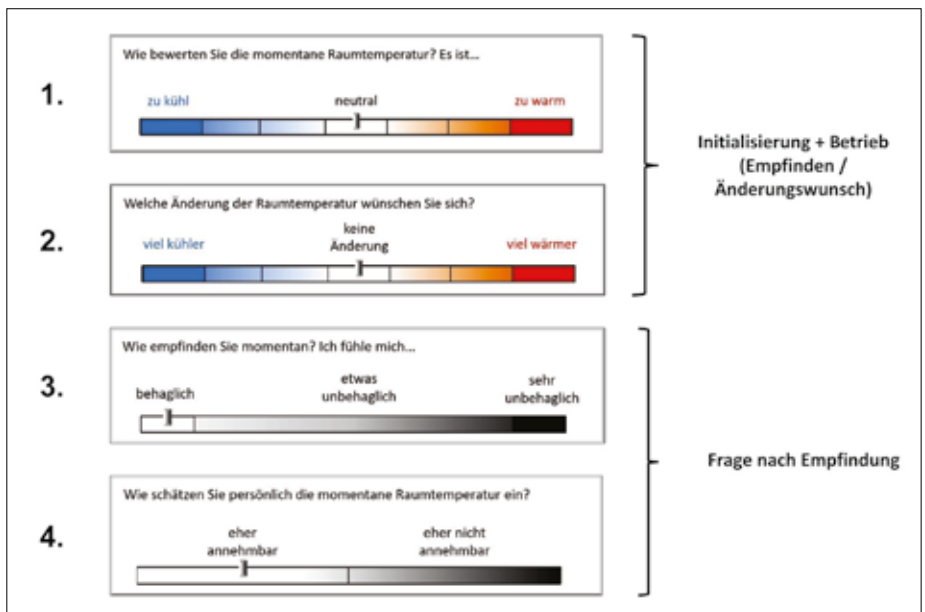


Abbildung 3: Fragebogen für die Probanden

Grafik: TU Dresden

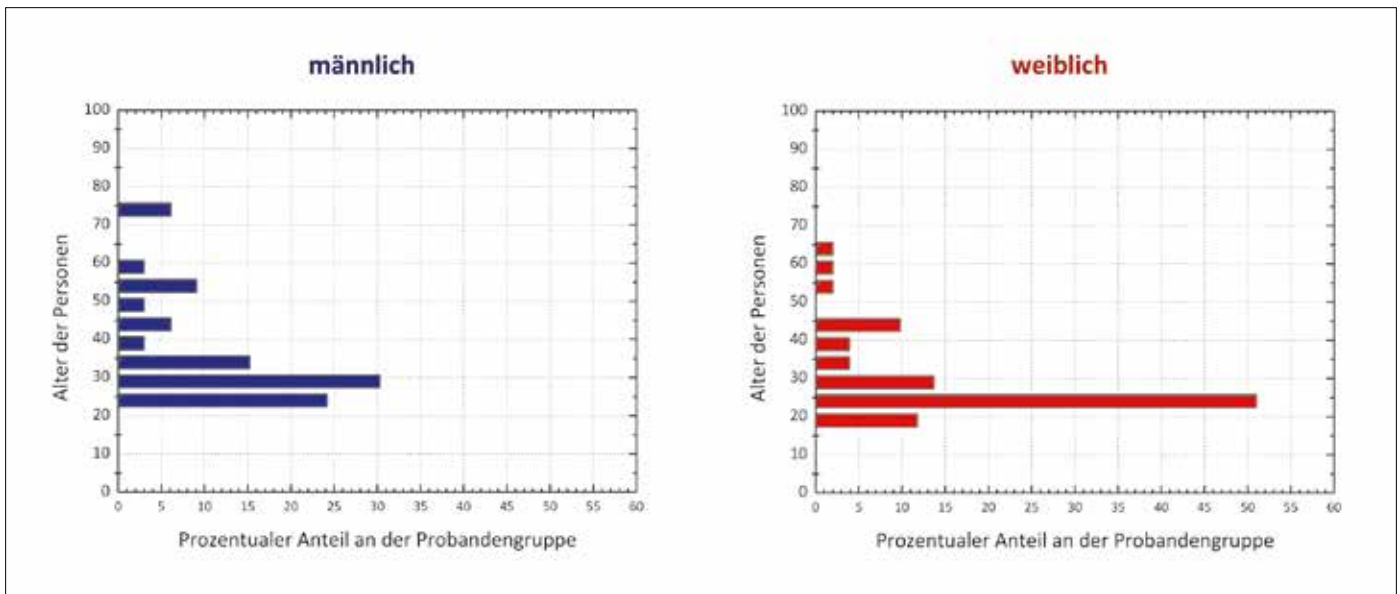


Abbildung 4: Verteilung der männlichen und weiblichen Probanden

Grafik: TU Dresden

fällt auf, dass während der anschließenden Phase mit negativem Temperaturgradienten die wärmephysiologischen Verhältnisse als kühl wahrgenommen werden. Dies lässt den Schluss zu, dass der menschliche Körper sich innerhalb der Beharrungszeit von  $\tau = 0,5 h$  an höhere Temperaturen adaptieren kann. Wird dieses Temperaturlevel zur ursprünglichen selbstgewählten Komforttemperatur abgesenkt, wird dies negativ bewertet.

Die Bewertung der aktuellen wärmephysiologischen Verhältnisse stellte die erste Frage

innerhalb des Fragebogens dar. Eine zweite Frage adressierte den Wunsch nach einer Änderung der Raumtemperatur. Abbildung 7 zeigt deutlich, dass hohe operative Raumtemperaturen mehrheitlich im untersuchten Intervall zu keinem Änderungswunsch führten. Auffällig ist jedoch auch, dass beim negativen Temperaturgradient im zweiten Teil der Untersuchung der Wunsch nach einer Anhebung der operativen Raumtemperatur bestand. Interpretierbar ist dies mit einem hohen Beharrungsvermögen sowie

mit einer Toleranz des menschlichen Organismus in Hinblick auf hohe Temperaturen. Einschränkend muss jedoch hinzugefügt werden, dass die dokumentierten Ergebnisse nur im analysierten Temperaturbereich und mit Blick auf die Probandengruppe repräsentativ sind. Bei höheren Temperaturen als  $\vartheta_{op} = 22 \text{ °C} + 2 \text{ K}$  können andere bzw. verstärkte Tendenzen auftreten.

Nicht dokumentiert werden in diesem Beitrag die Ergebnisse des Analysefalls „Unterkühlung“. Diese bleiben, auch mit Blick auf den Umfang dieser Veröffentlichung, einer weiteren Publikation vorbehalten.

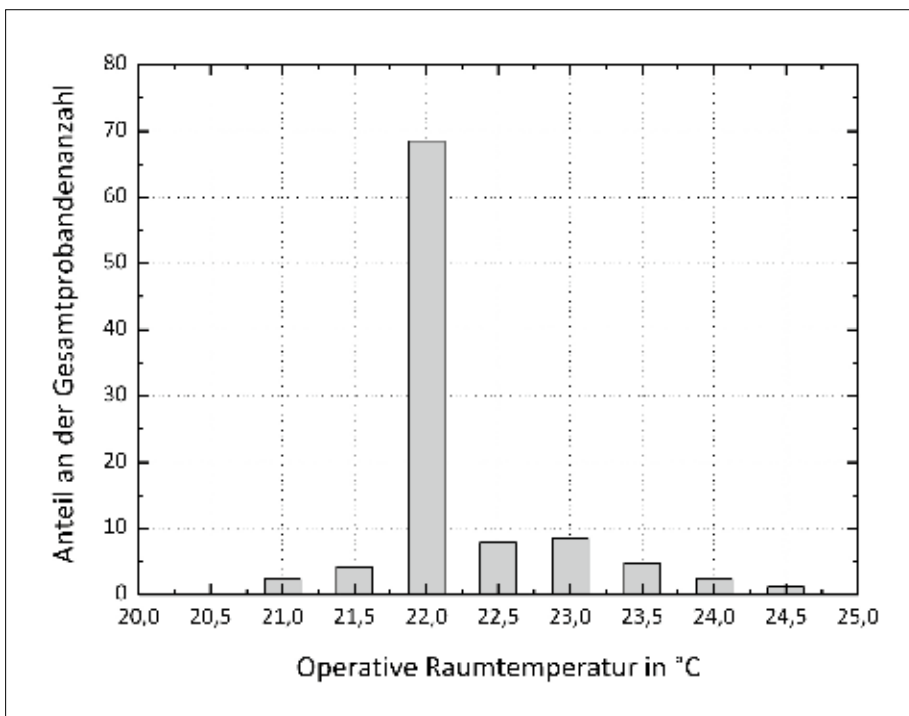


Abbildung 5: Verteilung der operativen Raumtemperatur bei den Probanden der Stichprobe

Grafik: TU Dresden

### Fazit

Innerhalb der vorliegenden Veröffentlichungen wurde zunächst ein Versuchsstand zur Analyse transients Betriebsweisen vorgestellt, der Bestandteil des Combined Energy Lab 2.0 des Instituts für Energietechnik der TU Dresden ist. Der Versuchsstand kann alle Teilbereiche der Erzeugung, Verteilung sowie Übergabe von Wärme und Kälte abdecken. Besonders ist die physikalische Kopplung mit einem Niederspannungsemulator [4], wodurch auch vorgelagerte Prozessketten mit in Analysen eingebunden werden können.

Hinsichtlich der wärmephysiologischen Bewertung transients Vorgänge wurden erste Ergebnisse innerhalb dieser Veröffentlichung dokumentiert. Diese zeigen, dass der Mensch positive Temperaturabweichungen von der individuellen Komforttemperatur toleriert und sich an diese adaptieren kann. Negative Temperaturgradienten auch oberhalb der individuellen Komforttemperatur werden jedoch als negativ wahrgenommen.



Das bedeutet, dass der menschliche Körper sensitiv auf die transiente Betriebsweise beispielsweise einer heizungstechnischen Anlage reagiert. Die Ergebnisse zeigen auch, dass hierdurch in gewissen Bereichen Freiheitsgrade für die Betriebsweise von technischen Anlagen existieren, die in veränderte regelungstechnische Strategien einfließen können.

Weiterführende Untersuchungen sollen in naher Zukunft in der Weise durchgeführt

werden, dass veränderte Temperaturgradienten analysiert werden und in einem zweiten Schritt die Beheizung bzw. Kühlung der Umfassungsflächen partiell erfolgt. Das entspricht der Nachbildung praxisnaher Heiz- und Kühlsysteme. ◀

**Danksagung**

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft

und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1166A unterstützt.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

**Literatur**

- [1] EN ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2006.
- [2] EN 16798-1: Energy performance of buildings – Part 1: Indoor environment input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality thermal environment, lighting and acoustics, 2015.
- [3] Seifert, J.; Oschatz, B.; Schinke, L.; Buchheim, A; Paulick, S.; Beyer, M.; Mailach, B.: Instationäre, gekoppelte, energetische und wärmepysiologische Bewertung von Regelungsstrategien für HLK-Systeme, Forschungsbericht, TUD 2016.
- [4] Seifert, J.; Schegner, P.; Meinzenbach, A.; Seidel, P.; Haupt, J.; Schinke, L.; Werner, J. Hess, T.: regionales Virtuelles Kraftwerk auf Basis der mini- und Mikro-KWK Technologie, Forschungsbericht, TUD 2015.

**Symbolverzeichnis**

A	Fläche	m <sup>2</sup>
h	Höhe	m
$\vartheta_L$	Lufttemperatur	°C
$\vartheta_{OF}$	Oberflächentemperatur	°C
$\vartheta_{op}$	operative Raumtemperatur	°C
$\varphi$	relative Luftfeuchte	%
$\Delta\tau$	Zeitdifferenz	s
$\tau$	Zeit	h

**Abkürzungen**

PMV	Predicted Mean Vote (erwartete durchschnittliche Klimabewertung)
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied (erwartete durchschnittliche Unzufriedenheitsrate)

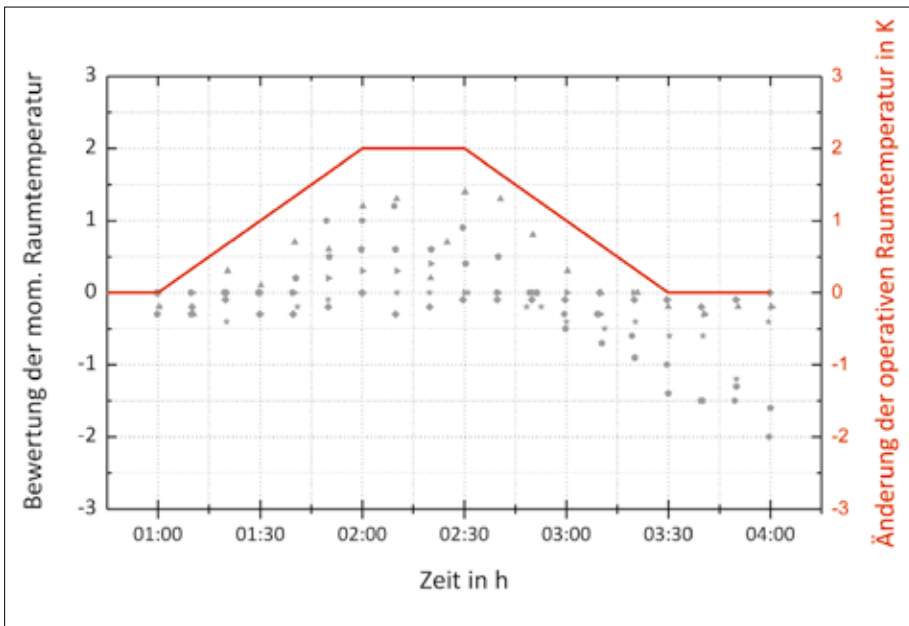


Abbildung 6: Bewertung der momentanen Raumtemperatur durch ausgewählte Probanden  
Grafik: TU Dresden

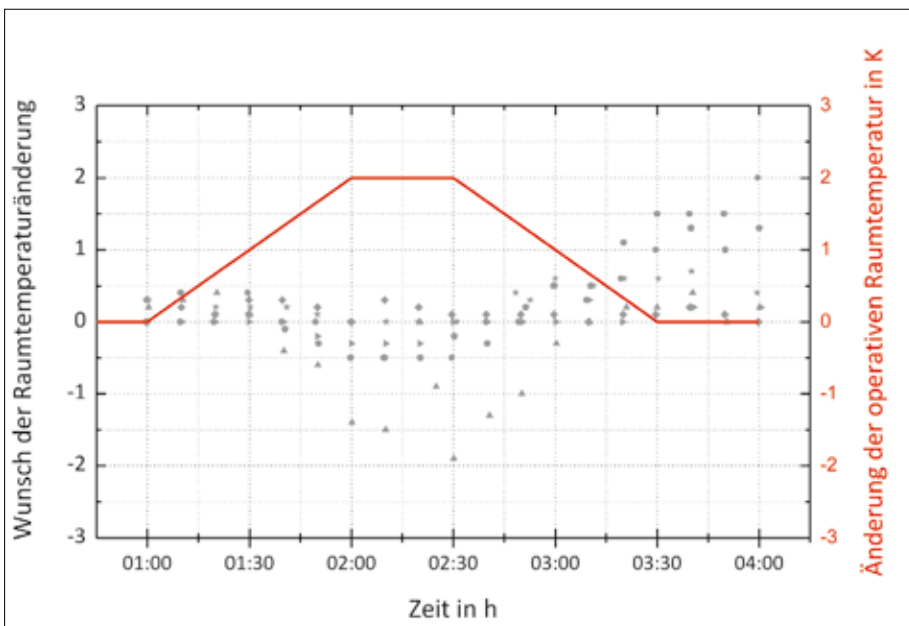


Abbildung 7: Wunsch nach der Raumtemperaturänderung durch ausgewählte Probanden  
Grafik: TU Dresden