



# Intelligente Regelung von Klimaanlage – Modell- und Laboruntersuchungen zur Wirkung des Raumklimas auf die Haut

baua: Bericht

**Forschung  
F 2299-2**

C. Felsman  
H. Gebhardt  
R. Gritzki  
B. Hensel  
K. Kabitzsch  
M. Keuchel  
W. Kozak  
M. Rösler

**Intelligente Regelung von Klimaanlage –  
Modell- und Laboruntersuchungen zur  
Wirkung des Raumklimas auf die Haut**

1. Auflage 2020  
Dortmund/Berlin/Dresden

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt F 2299-2 „Entwicklung eines Aml-Plattformkonzepts auf der Basis von Modell- und Laboruntersuchungen zur Wirkung des Raumklimas auf die Haut“ im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Autoren: Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsman (Projektleiter) TU Dresden, Institut für Energietechnik,  
Prof. Dr.-Ing. Hansjürgen Gebhardt, Institut ASER e. V., Wuppertal  
Dr.-Ing. Ralf Gritzki, TU Dresden, Institut für Energietechnik  
Dr.-Ing. Burkhard Hensel, TU Dresden, Institut für Angewandte Informatik  
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Kabitzsch (Projektleiter), TU Dresden, Institut für Angewandte Informatik  
Dipl.-Ing. Martin Keuchel, Institut ASER e. V., Wuppertal  
Dr.-Ing. Wojciech Kozak, TU Dresden, Institut für Energietechnik  
Dr.-Ing. Markus Rösler, TU Dresden, Institut für Energietechnik

Fachliche Beratung: Dr.-Ing. Kersten Bux  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelfoto: Dr.-Ing. Ralf Gritzki TU Dresden, Institut für Energietechnik

Umschlaggestaltung: Susanne Graul  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)  
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund  
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund  
Telefon 0231 9071-2071  
Telefax 0231 9071-2070  
E-Mail [info-zentrum@baua.bund.de](mailto:info-zentrum@baua.bund.de)  
Internet [www.baua.de](http://www.baua.de)

Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin  
Telefon 030 51548-0  
Telefax 030 51548-4170

Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden  
Telefon 0351 5639-50  
Telefax 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



doi:10.21934/baua:bericht20200626 (online)  
[www.baua.de/dok/8839836](http://www.baua.de/dok/8839836)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzreferat</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Vorwort</b>	<b>8</b>
<b>1 Hintergrund</b>	<b>9</b>
1.1 Ausgangslage	9
1.2 Ansatzpunkte	9
1.3 Anwendungsfall „Trockene Luft“	10
1.4 Arbeitsgruppe	11
<b>2 Literaturrecherche zu Hautmodellen</b>	<b>12</b>
<b>3 Aml-basierte Regelung von Klimaanlage</b>	<b>14</b>
3.1 Aml-Interface	14
3.2 Zum Stand der Technik	15
3.3 Konzept des prädiktiven Reglers	16
3.4 Implementierung	19
3.4.1 Überblick	19
3.4.2 Optimierungsalgorithmus	22
3.4.3 Ergebnisse des Reglertests	24
3.5 Kopplung mit einer Gebäudesimulation	26
3.5.1 Modellvalidierung	27
3.5.2 Geregelter Betrieb	28
3.5.3 Fazit des Tests der Kopplung mit der Gebäudesimulation	31
<b>4 Geometrisch und zeitlich hoch aufgelöste Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen</b>	<b>33</b>
4.1 Unterstützung der Probandenversuche	33
4.2 Aufbau des finalen Simulationsmodelles, gekoppelte Berechnungen und Vergleich mit Messdaten	39
4.3 Weitergehende Betrachtung unterschiedlicher Klimakonzepte	54
<b>5 Probandenversuche</b>	<b>61</b>
5.1 Zum Hintergrund	62
5.2 Orientierende Vorversuche	67

<b>6</b>	<b>Beschreibung der Hauptversuche</b>	<b>68</b>
6.1	Layout der Versuchsanordnung	68
6.2	Versuchsdurchführung	69
6.3	Messparameter	70
6.4	Eingesetzte Fragebögen	72
6.5	Außenklimabedingungen	74
6.6	Innenraumklima während der Hauptversuche	74
6.7	Zu den Probanden	75
6.8	Angaben der Probanden zu Versuchsbeginn	76
6.9	Bestimmung der Bekleidungsisolations	76
<b>7</b>	<b>Auswertung der Hauptversuche</b>	<b>78</b>
7.1	Zur Darstellung der Ergebnisgrößen	78
7.2	Vergleichende Darstellung ausgewählter Ergebnisgrößen	79
7.3	Zum Klimaempfinden	81
7.4	Zum Zugluftempfinden	86
7.5	Zu körperlichen Empfindungen	86
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>94</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>97</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>104</b>

# Intelligente Regelung von Klimaanlage – Modell- und Laboruntersuchungen zur Wirkung des Raumklimas auf die Haut

## Kurzreferat

Auf Basis von Modell- und Laboruntersuchungen zur Wirkung des Raumklimas auf die Haut wurde ein Aml-Plattformkonzept (Aml = Ambient Intelligence) entwickelt, welches mit einer intelligenten Raumklimaregelung die Austrocknung der Haut bei winterlich trockener Raumluft reduzieren soll. Dabei wurden Untersuchungen der raumklimatischer Situationen in Büros auf Basis gekoppelter Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen durchgeführt. Notwendigen Stoffdaten wurden mit Probandenversuchen in einer Klimakammer ermittelt. Die Ergebnisse der drei Teilbereiche - Entwicklung Regler, Strömungssimulation und Probandenversuche - wurden in einer gemeinsamen Handlungsempfehlung zusammengeführt.

Die entwickelte **intelligente Raumklimaregelung** mit dem integrierten Raummodell ermöglicht es zu „erahnen“, welche Auswirkungen die raumklimatischen Parameter auf Personen haben werden. Die Ergebnisse der mit dem Regler ausgeführten Berechnungen zeigen die Möglichkeit zur Einstellung optimierter thermisch und hygrisch behaglicher raumklimatischer Verhältnisse. Die dabei in den Regler erfolgte Integration eines detaillierten Personenmodelles stellt eine Neuheit dar.

Die **gekoppelten Simulationen** von Raumluftströmung, Gebäude und technischen Anlagen enthält ein detailliertes Personenmodell, was eine Abbildung der Reaktion von Personen (Abdunstung der Haut, thermisches Empfinden) auf die raumklimatischen Parameter (Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit und Turbulenzgrad der Luft) ermöglichte. Je nach Heizungs- und Luftführungssystem zeigen die Simulationen im Nahbereich der Personen unterschiedliche Strömungsverhältnisse, die die Abdunstung der Haut mehr (z. B. Mischlüftung) oder weniger (z. B. Quelllüftung) begünstigen.

Mit **Probandenversuchen** ( $n = 66$ ) wurden mit 8 Konstellationen ( $t_a = 20\text{ °C}/24\text{ °C}$ ,  $RH = 20\%/40\%$ ,  $v_a$  etwa  $0,04\text{ m/s}/0,12\text{ m/s}$ ) die Eckpunkte der Bereiche, wie sie in der winterlichen Heizphase typischerweise zu beobachten sind, messtechnisch erfasst. Demnach hat die Lüftungsart einen signifikanten Einfluss auf das Klimaempfinden und die Abdunstung der Haut. Die Versuchsserien zeigen insgesamt, dass sich der Einfluss der Luftgeschwindigkeit in Bezug auf die Abdunstung sowie das subjektive Empfinden und Bewerten des Raumklimas ausgeprägter darstellt als die Variation der relativen Luftfeuchte.

Eine ergänzend veröffentlichte **Handlungsempfehlung** gibt Hinweise zur Optimierung der Raumlüftung und zu Verhaltensweisen der Beschäftigten, um negative Auswirkungen des Raumklimas während der winterlichen Heizphase zu reduzieren.

### Schlagwörter:

Aml-basierte Regelung, RLT-Anlagen, trockene Luft, Hautfeuchtigkeit, Abdunstung, Gebäudesimulation, Strömungssimulation, Personenmodell, Probandenversuche

# Smart control of air conditioning systems – Model based and laboratory studies on the impact of indoor climate on the skin

## Abstract

An Aml platform concept (Aml = Ambient Intelligence) was developed based on model and laboratory studies which have analysed the impact of indoor air climate on the skin. This concept is intended to lower the drying of the skin by a smart room climate control system in dry indoor air under winter conditions. The room climate situations in offices have been investigated by applying coupled building, system and flow simulations. Necessary property data were determined with test person experiments in a climate chamber. The outcomes of the three subareas - controller development, air flow simulation and test person experiments - were combined in a joint recommendation for action.

The developed model based **smart room climate control** makes it possible to "guess" what impact the room climate parameters may have on the occupants. The results of the calculations carried out with the controller show the opportunity of adjusting optimised thermal and hygienic comfortable room climate conditions. The integration of a detailed thermoregulatory model into the controller is an innovation.

The **coupled simulations** of indoor air flow, building envelope and technical systems include a detailed thermoregulatory model, which allowed the reproduction of the person's reaction (skin dehydration, thermal sensation) on the indoor climate conditions (temperature, humidity, air velocity and intensity of air turbulence). Depending on the type of heating and air supply system, the simulations show different flow conditions in the vicinity of the persons, which more (e.g. mixed ventilation) or less (e.g. displacement ventilation) favour the drying of the skin.

**Test person experiments** (n = 66) at 8 configuration ( $t_a = 20^\circ\text{C}/24^\circ\text{C}$ , RH = 20 %/40 %,  $v_a$  about 0,04 m/s/0,12 m/s) were used to measure the cornerstones of the areas typically observed in the winter heating period. According to this, the type of ventilation has a significant impact on the climate sensation and the evaporation of the skin. The test series showed that air velocity has a more pronounced impact on the evaporation and the subjective perception and evaluation of the room climate than the fluctuation in relative humidity.

A **recommendation for action** published as an supplementary annex provides information how to optimise room ventilation and how to behave in order to reduce negative effects of the indoor climate on the sensation of employees during the winter heating period.

### Key words:

Aml control, HVAC system, dry air, skin moisture, evaporation rate, building simulation, computational fluid dynamics, thermoregulatory model, test person experiments

## Vorwort

Dieser Forschungsbericht beinhaltet wesentliche Ergebnisse des BAuA-Forschungsvorhabens F2299-2 Aml - basierte Regelung von Klimaanlageanlagen - Teil 2: „**Entwicklung eines Aml-Plattformkonzepts auf der Basis von Modell- und Laboruntersuchungen zur Wirkung des Raumklimas auf die Haut**“ zusammen.

An der Durchführung der Forschungsarbeiten und der Erstellung des Forschungsberichtes waren verschiedene **Forschergruppen aus Dresden, Dortmund und Wuppertal** beteiligt.

Begleitet wurden die Forschungsarbeiten durch **Frau Prof. Dr. med. Manigé Fartasch vom Institut für Prävention und Arbeitsmedizin (IPA) der DGUV in Bochum**. Die Autoren bedanken sich für ihre wertvollen Hinweise und Empfehlungen gerade aus berufsdermatologischer Sicht.

Weiterer Dank gilt den beteiligten Mitarbeitern aus den BAuA-Fachgruppen "**Arbeitsstätten, Maschinen- und Betriebssicherheit**" (FG 2.4) sowie dem "**Labor Produkte und Arbeitssysteme**" (FG 2.5). Hervorzuheben sind dabei Herr **Dr.-Ing. Kersten Bux**, der u. a. den Forschungsverbund koordinierte sowie **Frau Anke Berger und Herr Dipl.-Ing. Ulrich Hold**, die sehr wesentlich zur Realisierung der Versuchsanordnung und zum reibungslosen Ablauf und Durchführung der physikalischen ebenso wie dermatologischen Messungen beigetragen haben.

Schließlich gilt der Dank der Autoren den **über 70 Probanden**, durch deren aktive Beteiligung an den Laborversuchen die Erkenntnisse bezüglich des Einflusses von **Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit** insbesondere auf die Haut deutlich erweitert werden konnten.

Diese so erweiterten Erkenntnisse erscheinen geeignet, um sie insbesondere bei künftigen - zunehmend intelligenter werdenden - technischen Regelsystemen zur **Lüftung und Klimatisierung von Arbeitsstätten** verstärkt zu nutzen. Die im Rahmen der Forschungsarbeiten entwickelten **technischen Modelle und Konzepte** stellen dabei einen wesentlichen Ausgangspunkt dar.



# 1 Hintergrund

## 1.1 Ausgangslage

Die seit 1998/1999 in regelmäßigen Abständen durchgeführten BIBB-BAuA-Befragungen zu Belastungen am Arbeitsplatz weisen den Bereich „Klima“ – ausgedrückt in „Kälte, Hitze, Nässe, Zugluft“ – konstant häufig aus. Auf die Frage welche Belastungen am Arbeitsplatz häufig oder regelmäßig vorkommen, wird der Faktor „Klima“ mit 21 % bzw. 22 % ebenso häufig genannt wie z. B. „schwere Lasten heben und tragen“, „Lärm“ oder „Öl, Fett, Schmutz, Dreck“ und doppelt so häufig wie z. B. „grelles Licht, schlechte Beleuchtung“.

Optimierte Klimabedingungen reduzieren Gesundheitsrisiken. Das zeigt sich u. a. in einer von Hahn (HAHN, 2007) durchgeführten umfassenden Literaturstudie zum Thema „Trockene Luft und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit“. Die Autorin kommt zu dem Schluss, dass es zwar eine Reihe widersprüchlicher Studienergebnisse gibt, was die gesundheitsbezogene Definition einer unteren Grenze erschwert. „Unumstritten sei jedoch die Tatsache, dass Krankheitserreger in der Raumluft eine von der relativen Luftfeuchte abhängige Lebensdauer aufweisen. Darüber hinaus wächst mit zunehmender relativer Luftfeuchte durch Wasseranlagerungen nicht nur die Partikelgröße der Mikroorganismen, sondern auch der Staubpartikel, wodurch diese schneller absinken, was letztlich zu einer Reinigung der Luft führt“.

Man könnte ergänzen, dass es bei geringen relativen Luftfeuchten umso wichtiger ist, die Luftgeschwindigkeit ebenso wie die Turbulenz möglichst gering zu halten, um die Verteilung von Krankheitserregern in der Luft zu minimieren.

Da in den letzten beiden Dekaden bei der BIBB/BAuA-Befragung keine wesentliche Reduzierung der Belastungen durch den Bereich „Klima“ erreicht werden konnte, lässt sich vermuten, dass sich die in diesem Bereich auftretenden Belastungen mit traditionellen Methoden und Maßnahmen nicht wesentlich weiter reduzieren lassen.

Der mit ca. 20 % als hoch einzuschätzende Prozentsatz macht allerdings deutlich, dass weiterer Optimierungsbedarf besteht. Hierfür sind neuartige, innovative Maßnahmen notwendig, die sich beispielsweise im Zuge der zunehmenden Digitalisierung mit ihren erweiterten Möglichkeiten umsetzen lassen.

## 1.2 Ansatzpunkte

Der Mensch strebt tendenziell eher stabile als wechselnde raumklimatische Bedingungen an, da jede diesbezügliche Änderung mit Anpassungsprozessen verbunden ist: Diese Prozesse laufen mehr (Anpassung der Bekleidung und/oder Arbeitsschwere) oder weniger bewusst (physiologische Prozesse wie Erhöhung der Schweißrate oder Kältezittern) ab, binden jedoch in jedem Fall Ressourcen, die für andere Aufgaben nicht mehr zur Verfügung stehen.

Als „Grundprinzipien einer innovativen Klimaoptimierung“ lassen sich folgende Ansätze identifizieren:

**Asymmetrien minimieren:** hierzu zählt z. B. Zugluft ebenso wie Strahlungsasymmetrien vermeiden,

**Individualisierung stärken:** hierzu zählt z. B. nicht „das Büro“, sondern „den Arbeitsplatz“ optimieren,

**Optimierungsalgorithmen entwickeln:** hierzu zählt z. B. verstärkte Berücksichtigung der Luftfeuchte und -geschwindigkeit.

Die vorgenannten Handlungsfelder zielen sowohl auf die überwiegend von psychischen Anforderungen geprägte Büroarbeit als auch auf die von physischen und psychischen Anforderungen geprägten Montagearbeiten ab.

Die zunehmende Digitalisierung in allen Lebensbereichen, so auch im Arbeitsleben (s. a. Arbeiten 4.0, Industrie 4.0), bietet auch hier enorme Chancen. Sensoren und Aktoren werden immer kompakter und differenzierter. Bei Vorliegen validierter Optimierungsalgorithmen können mittels intelligenter, echtzeitfähiger Regelungssysteme optimale Bedingungen für Personengruppen bis hin zur Einzelperson geschaffen werden. Hierbei ist die Berücksichtigung weiterer Faktoren wie z. B. Energieeffizienz und Luftqualität problemlos möglich.

Ein „persönliches raumklimatisches Optimum“ besteht zweifelsfrei. Dieses ist i. a. jedoch individuell verschieden und auch bei einer Person nicht zeitlich invariant, sondern in jedem Fall von weiteren Einflussfaktoren, wie z. B. von der Jahreszeit und der Außentemperatur abhängig. Entsprechend gilt es, die Möglichkeiten der Digitalisierung frühzeitig zu nutzen, um zu optimierten Klimabedingungen beitragen zu können.

### 1.3 Anwendungsfall „Trockene Luft“

Das hier bearbeitete BAuA-Projekt F2299 betrachtet vor diesem Hintergrund das Phänomen „Trockene Luft“ und dadurch verursachte Auswirkungen auf die Gesundheit und das Wohlbefinden, z. B. Hautaustrocknung oder Augenreizungen, wie sie an Büroarbeitsplätzen insbesondere in den Wintermonaten zu beobachten sind, und erarbeitet Optimierungsalgorithmen und Handlungsempfehlungen für diesen Anwendungsfall.

Sind die komplexen Zusammenhänge zwischen dem Betrieb einer Raumluftechnischen (RLT-) Anlage, dem resultierenden Raumklima und dadurch verursachten Auswirkungen auf die Gesundheit und das Wohlbefinden, z. B. Hautaustrocknung oder Augenreizungen wie beim Phänomen der „Trockenen Luft“, bekannt, so könnte mit einer intelligenten Klimaregelung gezielt darauf Einfluss genommen werden, um z. B. die Auswirkungen dieses Phänomens zu mindern.

Dabei erweisen sich traditionelle Algorithmen, wie z. B. das PMV (Predicted Mean Vote) und PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), die bereits in den 1970er-Jahren entwickelt und in den Folgejahren u. a. über die Normung verbreitet wurden, als

unzureichend, da - das zeigen Beispielrechnungen - sie i. w. die Lufttemperatur bzw. die operative Raumtemperatur optimieren. Andere Faktoren, wie die relative Luftfeuchte, die Luftgeschwindigkeit oder der Turbulenzgrad, werden deutlich geringer bis gar nicht berücksichtigt, tragen jedoch offensichtlich zum Unbehagen ebenso wie körperlichen Beschwerden bei.

Die Verdunstungsrate der Haut, als Indikator für „trockene Luft“, spielt dabei eine zentrale Rolle. Sie hängt nicht nur von Temperatur und relativer Feuchtigkeit der umgebenden Luft, sondern auch von deren Geschwindigkeit und Turbulenzgrad ab.

Mit der Abdunstung auf der Haut wird ein Indikator untersucht, der dazu beitragen kann, o. a. Phänomen „Trockene Luft“ besser zu beschreiben und zu analysieren.

## **1.4 Arbeitsgruppe**

Kooperierende Partner innerhalb des BAuA-Projektes F2299-2 sind:

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Dresden/Dortmund:  
Gruppe 2.4: Arbeitsstätten, Maschinen- und Betriebssicherheit  
Gruppe 2.5: Labor „Produkte und Arbeitssysteme“  
zusammen mit den externen Partnern

Technische Universität Dresden  
Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung  
Professur für Technische Informationssysteme  
Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der DGUV, Bochum  
Abteilung für klinische und experimentelle Berufsdermatologie  
Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie (ASER) e. V. Wuppertal  
Bereich Informationsmanagement und Arbeitsgestaltung

Die Arbeitsgruppe fasst damit die für diese Fragestellungen notwendigen Fachdisziplinen in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe zusammen.

## 2 Literaturrecherche zu Hautmodellen

Im Rahmen der durchzuführenden Simulationen spielen Hautmodelle eine wesentliche Rolle. Diese Ersatzmodelle der menschlichen Haut sollen im Rahmen dieses Projekts zusätzliche Aussagen zu den folgenden Punkten liefern:

1. Einfluss des Klimas auf den Hautkomfort: Der Hautkomfort ist für die gesunde Haut im behaglichen Raumklima gegeben. Die Gesundheit der Haut wird nach Aussagen von (STICK et al., 2012) erst durch eine längere, mehrwöchige Exposition in einem unverträglichen Klima beeinträchtigt. Dadurch wird die Barrierefunktion der Haut geschwächt. Ein gutes Maß der Barrierefunktionstauglichkeit der Haut ist ihre Verdunstungsrate, siehe (SCHAEFER, REDELMEIER, 1996).
2. Einfluss des Klimas auf die momentane und langfristige Verdunstungsrate der Haut: Die momentane Verdunstungsrate hängt von dem momentanen Wassergehalt der Haut und ihrer Barrierefunktionstauglichkeit ab. Die Austrocknung der Haut kann negative Auswirkungen auf ihre Barrierefunktionstauglichkeit haben, wenn die Erzeugung des natürlichen Befeuchtungsfaktors (sog. NMF - natural moisturizing factor) gestört wird.

Die Modelle der Haut sind notwendig um:

- die Simulation des Einflusses der unterschiedlichen Heizungs- und Lüftungskonzepte auf den Hautzustand durchzuführen,
- einen Vergleich mit den Ergebnissen der Probandenstudie durchführen zu können und
- den Referenzdatensatz zur Vermeidung der winterlichen Hauttrockenheit erstellen zu können.

In der Literaturrecherche zeigten sich unter anderem zwei Modelle, die für die oben genannten Zwecke nützlich scheinen:

1. Diffusionsmodell von (WANG et al., 2006): Dieses Modell beschreibt die momentane Durchlässigkeit der Haut für eine gegebene chemische Substanz. Diese Ausgabe kann auch bezüglich der Durchlässigkeit für Wasser angepasst werden. Dann liefert das Modell eine Aussage zur momentanen Verdunstungsrate der Haut, die eine für das Projekt interessierende Aussage darstellt. Als Eingabe des Modells muss der momentane, von den benutzten Kosmetika und dem Waschverhalten abhängige Zustand der Haut angegeben werden. Die Eigenschaften der tiefer liegenden Schichten der Haut werden in diesem Modell als konstant angenommen. Wenn die Eigenschaften der Haut durch längere Austrocknung oder die Nutzung von Kosmetika geändert werden, lässt sich das durch das Modell nicht berücksichtigen.
2. Biomechanisches Modell von (LEVI, DAUSKARDT, 2012): Dieses Modell beschreibt die mechanischen Spannungen in der Haut in Abhängigkeit von ihrem Wassergehalt und sagt dadurch die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung an der Hautoberfläche vor. Damit wird das langfristige Austrocknen abgebildet, das zur Schädigung der Haut und dem darauffolgendem Diskomfort führen kann. Es

berücksichtigt den Einfluss der Kosmetika bzw. des intensiven Waschens. Leider besitzt es keinen Bezug zur Verdunstungsrate der Haut. Die Eingangsparameter des Modells können nur durch invasive Messungen gewonnen oder aufgrund der Literaturdaten angenommen werden.

Beide Modelle sind aufwendig in ihrem Aufbau und verlangen eine längere Implementierungsphase, die zur Abstimmung der Eingangsparameter durch Kopplung mit den anderen Modellen gebraucht wird.

Die Wahl fiel deshalb auf ein komplettes, an der RTWH Aachen entwickeltes Personenmodell, das die Reaktionen der Haut weitgehend einbezieht und auch eine Verdunstungsrate der Haut ausgibt, (STREBLOW, 2010). Dieses Modell wurde im Rahmen des Projektes getestet, unter Benutzung der Projektergebnisse erweitert und sowohl in das Programmpaket TRNSYS-TUD/ParallelINS als auch in den Aml-Regler implementiert und in den Berechnungen angewendet.

Auch an dieser Stelle zeigt sich, dass es unabdingbar war, im Rahmen des Projektes Probandendaten zu generieren, da zuverlässige Daten zu den Parametern der Haut unter definierten Randbedingungen für den Abgleich der Simulationsmodelle benötigt wurden, bzw. die Thematik der trockenen Luft reproduzierbare und belastbare Probandendaten erfordert.

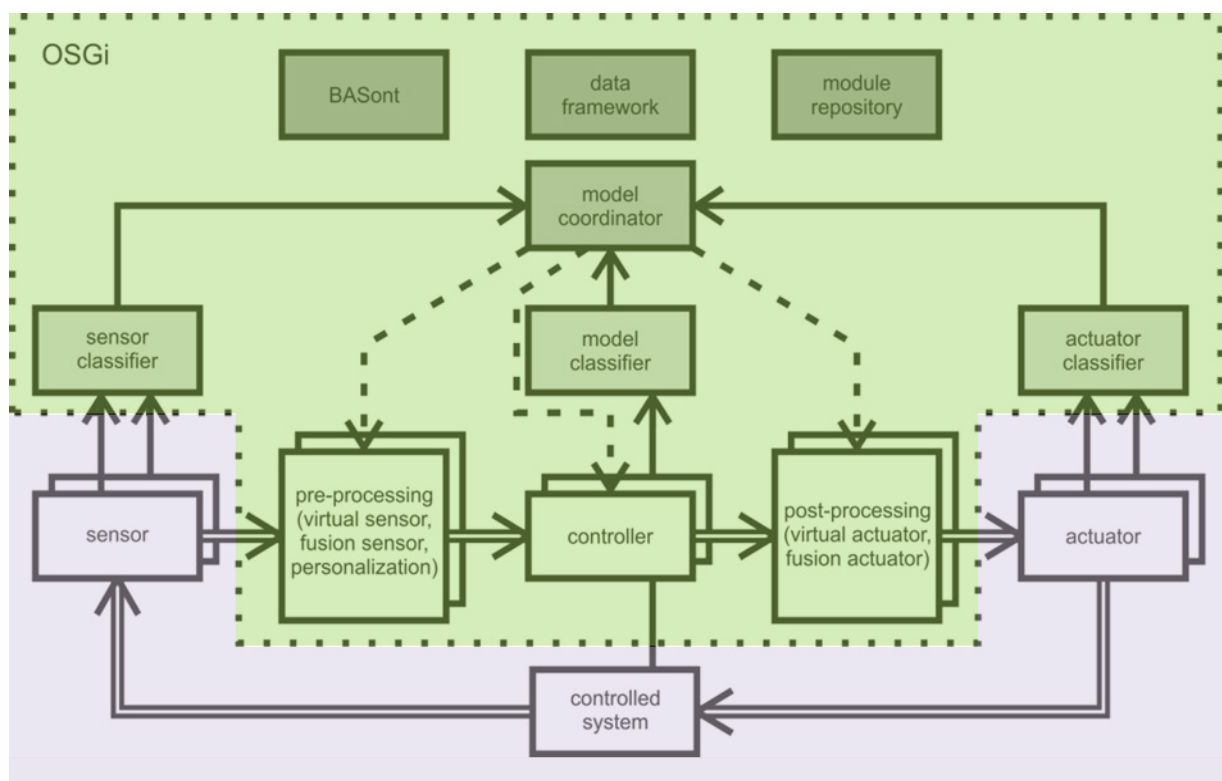
## 3 Aml-basierte Regelung von Klimaanlage

### 3.1 Aml-Interface

Das Fachgebiet Ambient Intelligence (Aml) beschäftigt sich mit der zunehmenden Verwendung intelligenter, vernetzter Sensorik und Aktorik im Gebäude zur Verbesserung verschiedener Bereiche des Alltags. Dazu gehört eine fortgeschrittene Art der Klimaregelung, die sowohl nutzerspezifische Wünsche als auch die technische Ausrüstung des jeweiligen Raums berücksichtigt.

Im Kern der Aml-basierten Klimaregelung steht das sogenannte Aml-Interface. Dieses ist die Schnittstelle zwischen einem Aml-basierten Regler – der mehr als „klassische“ Klimaregler den Luftzustand am Aufenthaltsort (statt Sensorort) nach personenspezifischen Anforderungen optimiert – und seiner Umgebung, das heißt einerseits der Sensorik und Aktorik, sowie andererseits einer Gebäudesimulation, welche vorausschauend die (zukünftigen) Raumlufteigenschaften berechnet.

Im ersten Teilprojekt zur Aml-basierten Klimaregelung wurde ein Aml-Plattform-Modell definiert. Dieses wird nun in zwei Teile zerlegt, zwischen welchen das Aml-Interface (bzw. ein Teil davon) eingefügt wird (**Abb. 3.1**).

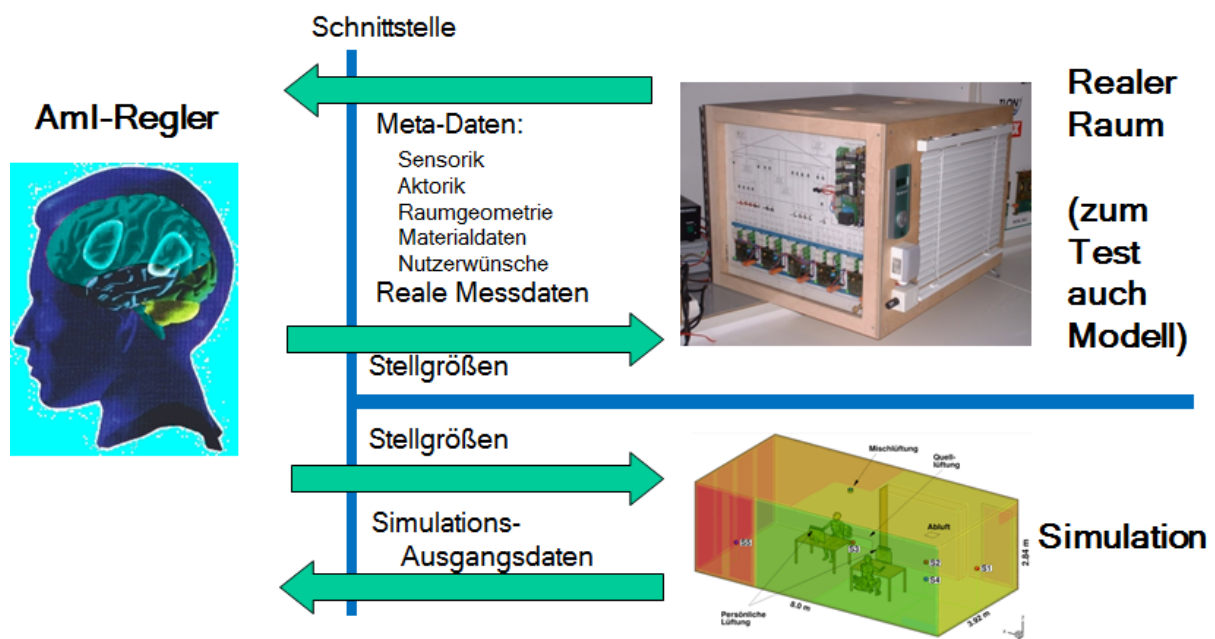


**Abb. 3.1** Aml-Plattformmodell mit (farblicher) Zweiteilung am Aml-Interface

Entsprechend Abb. 3.1 werden über das Aml-Interface einerseits Mess- und Steuerdaten, andererseits Metadaten über die vorhandenen Sensoren und Aktoren ausge-

tauscht. Während Aml insgesamt ein breites Feld von Anwendungen hat (Beleuchtung, Sicherheit, Arbeitsassistenzsysteme, Behaglichkeit usw.), liegt der Fokus im Rahmen des Projekts auf der Regelung von Klimaanlage.

Ein prädiktiver Regler muss nicht nur mit den Sensoren und Aktoren Daten austauschen (vgl. Abb. 3.1), sondern auch mit der Gebäudesimulation, die zur Optimierung der Stellgrößenverläufe verwendet wird. Da auch die Gebäudesimulation ähnliche Daten bereitstellt bzw. entgegennimmt wie die reale Klimatechnik, kann weitgehend dasselbe Interface verwendet werden. Abb. 3.2 zeigt die ausgetauschten Daten zwischen dem Aml-Regler, dem realem Raum und der Gebäudesimulation. Dabei kann im Rahmen des Projekts der reale Raum zwecks Beeinflussbarkeit auch durch einen Modellraum ersetzt werden.



**Abb. 3.2** Daten, die über das Aml-Interface im Rahmen einer prädiktiven Regelung ausgetauscht werden.

### 3.2 Zum Stand der Technik

Ein Überblick über den Stand der Technik von Aml-Reglern wurde bereits im Abschlussbericht des ersten Teilprojekts gegeben und wird hier nicht wiederholt. Stattdessen soll der Fokus auf modellbasierten prädiktiven Reglern (bzw. Steuerungen) und ihrer Kopplung zur Gebäudesimulation liegen.

Die Bezeichnung „prädiktiv“ kommt daher, dass mithilfe eines Modells („modellbasiert“) der Regelstrecke<sup>1</sup> der zukünftige Verlauf der Regelgrößen<sup>2</sup> vorhergesagt wird. Durch Optimierung des Stellgrößenverlaufs kann man so den gewünschten Regelgrößenverlauf erreichen. Auf diesem Grundkonzept arbeiten viele Regler (CAMACHO et al.

<sup>1</sup> der zu regelnde physikalische Prozess, hier das thermische Verhalten des Raums

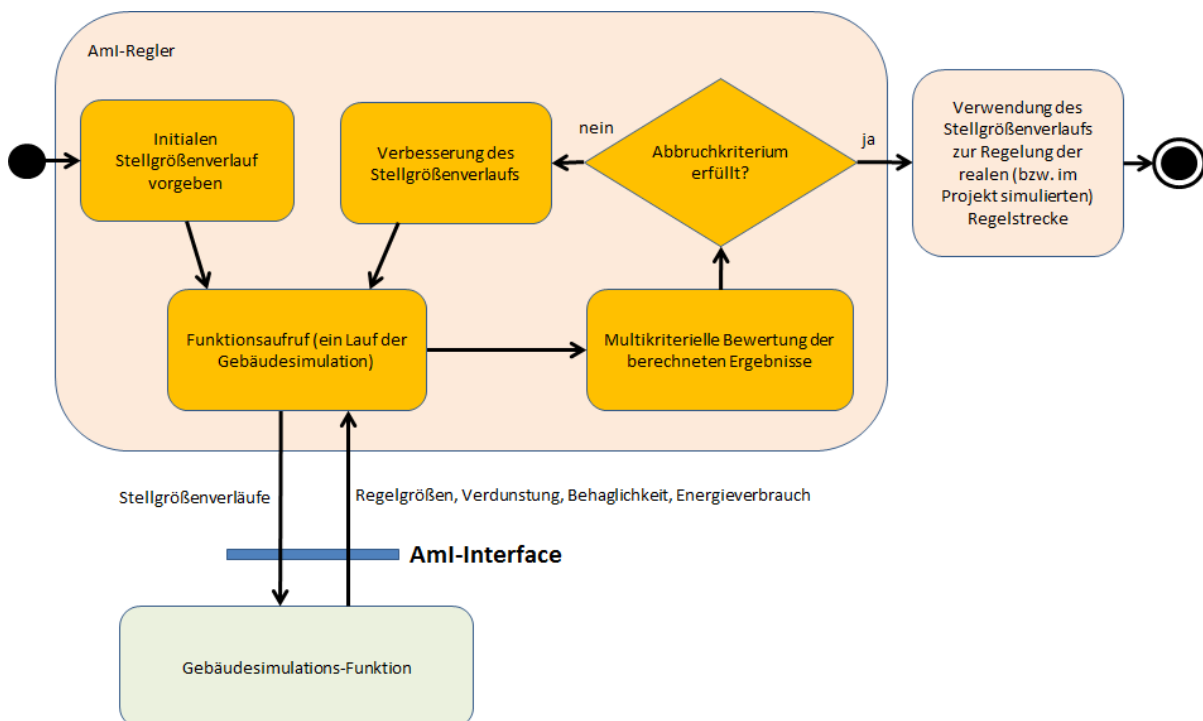
<sup>2</sup> die zu regelnden physikalischen Größen, hier beispielsweise Lufttemperatur und relative Luftfeuchte am Aufenthaltsort des Menschen

2004). Das physikalische Modell der Regelstrecke ist in manchen Fällen – auch im Falle der Gebäudesimulation – zunächst ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell). Da die Simulation eines FE-Modells meist zu lange dauert, um im Rahmen eines prädiktiven Reglers in Echtzeit verschiedene Varianten (für verschiedene Stellgrößenverläufe) zu simulieren, wird das FE-Modell oft durch ein einfacheres Modell anderer Struktur (oft Differenzgleichung bzw. zeitdiskrete Übertragungsfunktion) ersetzt (CAMACHO et al. 2004, WELLERS et al. 1999).

Dabei wird das Modell üblicherweise auch linearisiert. Für lineare Modelle kann man den optimalen Stellgrößenverlauf mithilfe des Modells explizit (analytisch) berechnen, sofern keine Nebenbedingungen berücksichtigt werden müssen, sodass auf Simulationen verzichtet werden kann. Andernfalls – was auch bei der Aml-basierten Klimaregelung aufgrund der komplexeren Optimierungsziele der Fall ist (siehe unten) – müssen entweder numerische (z. B. quadratische Programmierung, CAMACHO et al. 2004) oder simulationsbasierte Optimierungsverfahren eingesetzt werden. Im letzteren Fall kann als Grundlage der Simulation auch ein FE-Modell dienen, sofern es schnell genug ausführbar ist. Diese Lösung hat bis jetzt jedoch nur geringe Bedeutung erlangt (BERNHARD et al. 2006, DUBY et al. 2014).

### 3.3 Konzept des prädiktiven Reglers

Der Aml-Regler arbeitet in einer iterativen Optimierungsschleife, die zu jedem Abtastschritt einmal ausgeführt wird (prädiktive Steuerung/Regelung, kurz MPR), siehe Abb. 3.3.



**Abb. 3.3** Optimierungszyklus eines prädiktiven Reglers für Klimaanlage (Zustandsdiagramm).



Der Regler gibt zunächst einen (noch nicht optimalen) Stellgrößenverlauf vor. Mit diesem wird einmal – über das Aml-Interface – die (ggf. vereinfachte) Gebäudesimulation durchgeführt, welche für diesen Stellgrößenverlauf die Regelgrößen Verdunstungsrate an der Haut, Behaglichkeit, Luftqualität und Energieverbrauch zurückliefert. Mit diesen Größen wird eine multikriterielle Gütefunktion ausgewertet. Ist ein (vorgegebenes) Abbruchkriterium erfüllt, so wird der Stellgrößenverlauf für die Regelung der realen Regelstrecke verwendet. Andernfalls wird der Stellgrößenverlauf verändert und die Gebäudesimulation erneut durchgeführt. Diese Schleife wiederholt sich, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist.

Da die eigentlich zur Berechnung der Luftparameter an der Haut notwendige CFD-Simulation (Strömungssimulation) zu rechenaufwendig ist, um in einer Schleife zur Optimierung immer wieder aufgerufen zu werden, soll die Schnittstelle es erlauben, verschiedene Komplexitätsstufen der „Gebäudesimulations-Funktion“ zu testen, ohne dass die Schnittstelle selbst angepasst werden muss. Für den Aml-Regler ist daher (bis auf die Aufrufdauer) unerheblich, ob in der „Gebäudesimulations-Funktion“ eine komplexe CFD-Gebäudesimulation durchgeführt wird oder vereinfachte Modelle Verwendung finden.

Eine weitere Sicht auf das Aml-Interface ist in Abb. 3.4 dargestellt. Dort wird einerseits der Inhalt der „Gebäudesimulations-Funktion“ detaillierter beleuchtet, zusätzlich sind die verwendeten Modelle und übertragenen Daten präziser dargestellt, ohne dabei den Typ der Modelle (Funktion, Simulation etc.) zu spezifizieren. Die Stellgrößen bestehen aus

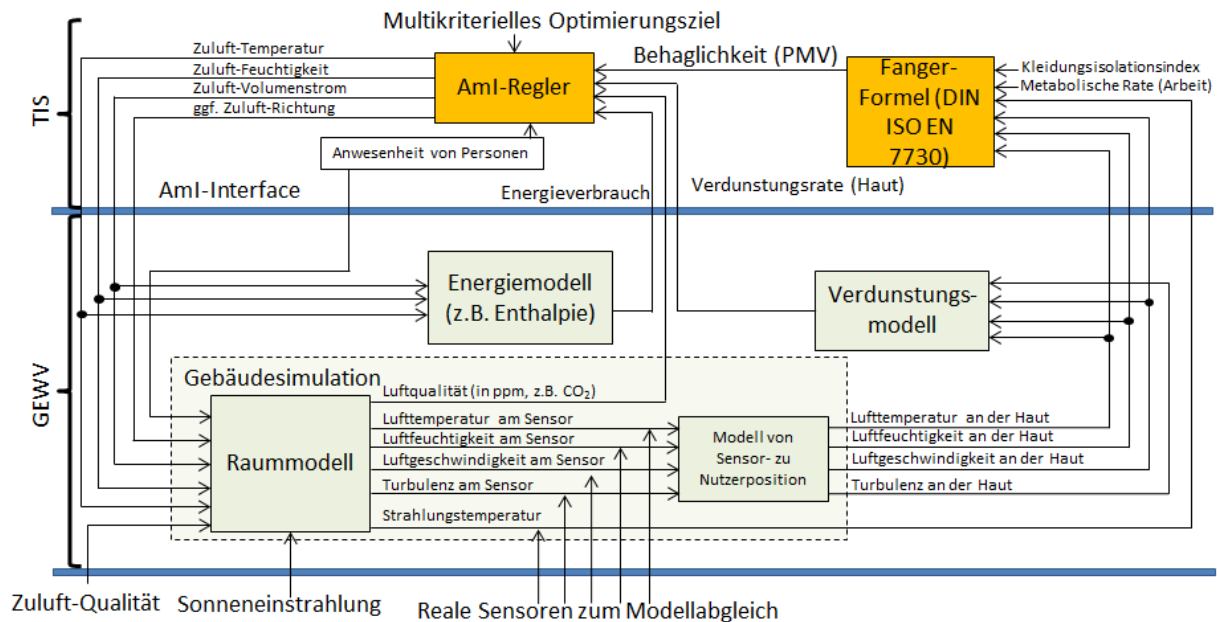
Zuluft-Temperatur,  
 Zuluft-Feuchtigkeit,  
 Zuluft-Volumenstrom,  
 ggf. Zuluft-Richtung (über bewegliche, elektronisch steuerbare Luftklappen).

Auch wenn es sich dabei genau genommen um Führungsgrößen (Sollwerte) untergeordneter Regelkreise handelt, werden diese Werte im Projekt als Stellgrößen betrachtet. Es wird außerdem zum Nachweis von Potential und Funktionalität der Aml-Regelung vereinfachend angenommen, dass diese Lufteigenschaften verzögerungsfrei (sofort) am Luftaustritt anliegen, d. h. die vorgelagerte Luftaufbereitung und der Lufttransport sind noch nicht Bestandteil der Regelstrecke. Neben den genannten Größen werden im Projekt keine weiteren Stellgrößen verwendet, insbesondere keine zusätzlichen Heizungssysteme, Lüftungen etc.

Aus den genannten Stellgrößen berechnet ein Raummodell (Gebäudesimulation oder vereinfachtes Modell) die Größen, die zur Ermittlung von Verdunstungsrate und Behaglichkeit an der Position des Raumnutzers notwendig sind. Diese sind:

Lufttemperatur,  
 Luftfeuchtigkeit,  
 Luftgeschwindigkeit,  
 Turbulenz und  
 Strahlungstemperatur.

Zudem wird die Luftqualität am Aufenthaltsort des Nutzers ermittelt. Zu den Eingangsgrößen des Raummodells gehören neben den bereits genannten Stellgrößen auch die Zuluft-Qualität, die Anwesenheit von Personen und die Sonneneinstrahlung. Ggf. werden separat oder als Zwischenschritt die entsprechenden Raumluftrößen an der Sensorposition (d. h. beispielsweise neben der Tür, nicht unmittelbar an der Haut des Nutzers) berechnet. Das hat den Zweck, dass das Raummodell mit der Realität über die realen Sensormesswerte abgeglichen werden kann und auch unbekannte Störgrößen (z. B. zusätzliche Wärmeeinträge durch elektrische Geräte, Personen oder Sonneneinstrahlung) bei der Berechnung der Luftparameter an der Haut Berücksichtigung finden können.



**Abb. 3.4** Datenflüsse und Teilmodelle der "Gebäudesimulations-Funktion".

Neben den Luftparametern wird aus den Stellgrößen auch der Energieverbrauch zur Konditionierung der Zuluft berechnet. Das kann im einfachsten Fall über die Enthalpie erfolgen, in komplexeren Modellen aber auch detaillierter den Energieverbrauch der Luftbehandlungselemente (Luftbefeuchter, Luffterhitzer usw.) berücksichtigen.

Das Verdunstungsmodell ermittelt – entsprechend der Ergebnisse des ersten Teilprojekts „Aml-basierte Klimaregelung“ und den Ergebnissen der Probandentests aus der Lufttemperatur, -feuchtigkeit, -geschwindigkeit und -turbulenz die Verdunstungsrate an der Haut.

Die Behaglichkeit wird über die Fanger-Formel (Predicted Mean Vote (PMV), DIN EN ISO 7730) berechnet.

Der Aml-Regler verwendet bei der Optimierung der Stellgrößenverläufe eine multikriterielle Gütefunktion aus den Teilgütekriterien:

Behaglichkeit (PMV),  
Verdunstungsrate an der Haut,  
Energieverbrauch und

Luftqualität (in ppm, z. B. CO<sub>2</sub>-Anteil).

Beispiele für daraus abgeleitete Optimierungsziele sind:

Minimierung der Verdunstungsrate,

Minimierung der Verdunstungsrate unter Einhaltung eines zugelassenen Intervalls für die Behaglichkeit und Luftqualität oder

Minimierung des Energieverbrauchs unter Einhaltung eines zugelassenen Intervalls für Behaglichkeit, Luftqualität und Verdunstungsrate.

Bei der Luftqualität wurde bewusst offengelassen, ob es sich bei dem verwendeten Wert (angegeben in ppm) um einen CO<sub>2</sub>-Sensor, einen Mischgassensor oder etwas anderes handelt. Dadurch ist der Regler flexibel für verschiedene Anwendungsfälle einsetzbar.

Bei der Optimierung kann auch die Anwesenheit von Personen berücksichtigt werden. So ist es beispielweise möglich, in Zeiten ohne Raumnutzung die Luft mit bestmöglicher Energieeffizienz zu konditionieren, während zu Zeiten der Raumnutzung auf Behaglichkeit und Verdunstungsrate Rücksicht genommen wird. Um diese Informationen in die prädiktive Optimierung mit einzubeziehen, ist es notwendig, die zukünftige Raumnutzung zu kennen (Belegungsplan). Je präziser diese bekannt ist, desto besser werden die Regelungsergebnisse sein. Sofern die Wünsche des jeweiligen Raumnutzers bekannt sind, können auch diese bei der Optimierung Berücksichtigung finden.

In Abb. 3.4 ist auch die Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung (GEVV) sowie dem Lehrstuhl für Technische Informationssysteme (TIS) dargestellt. Während GEVV die Modelle der „Gebäudesimulations-Funktion“ bereitstellt, sind der Regler selbst mit dem Optimierungsalgorithmus, sowie die Berechnung des PMV die Aufgabe von TIS.

Auf die (längerfristig geplante) Vorgabe von Simulations-Meta-Daten wie Raumgeometrie, physikalischen Luft- und Raumparametern (z. B. Wärmedurchgangskoeffizienten, Rauigkeit von Wänden) und Positionen von Aktoren und Sensoren über das Aml-Interface an die Gebäudesimulation wird zunächst verzichtet, um die Komplexität in Grenzen zu halten. Auch der langfristige Einfluss der Luftparameter auf die Haut (über die Austrocknung der Wände) wurde in diesem Projekt noch nicht berücksichtigt.

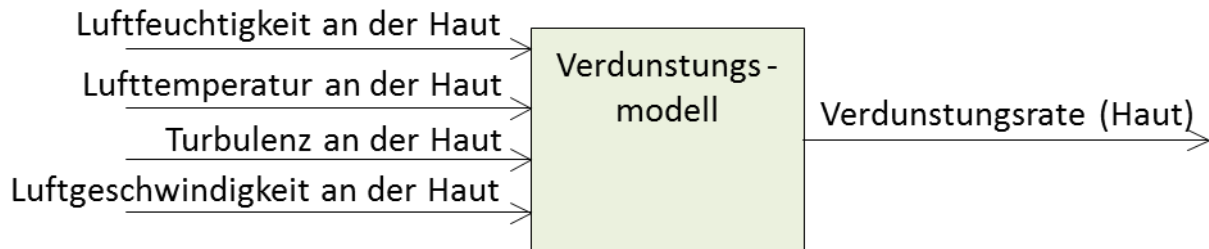
## 3.4 Implementierung

### 3.4.1 Überblick

Das zuvor vorgestellte Konzept des Aml-Interfaces wurde exemplarisch in Matlab implementiert. Dabei wurde für jeden der in Abb. 3.4 dargestellten Blöcke jeweils eine Matlab-Funktion erstellt. Die eingehenden Pfeile wurden als Funktionsparameter umgesetzt, die ausgehenden Pfeile als Funktionsrückgabewerte. Beispielsweise wird aus dem Block „Verdunstungsmodell“ (Abb. 3.5) eine Matlab-Funktion mit mindestens drei Eingangsparametern und einem Ausgangsparameter, nämlich

```
function r_evaporation = evaporation_model_iterative(T_skin, rh_skin, v_air_skin,
turbulence_skin, mode_evaporation_model, model_index, time_index)
```

Der Zusatz „iterative“ im Funktionsnamen weist darauf hin, dass die Funktion für eine iterative Ausführung ausgelegt ist, d. h. sie wird wiederholt zu verschiedenen Zeitpunkten aufgerufen und jeweils nur der zu den jeweiligen Eingangssignal-Abschnitten zugehörige Abschnitt der Ausgangssignale berechnet.



**Abb. 3.5** Verdunstungsmodell als Beispiel eines Blocks.

Aus implementatorischen Gründen mussten bei den meisten Funktionen weitere, nicht in Abb. 3.4 dargestellte Eingangsparameter ergänzt werden. Insbesondere betrifft das mehrere nachfolgen beschriebene, wiederkehrende Fälle.

Da das Aml-Interface entsprechend Abb. 3.2 sowohl für den Datenaustausch zwischen Regler und realer Mess- und Steuerungstechnik als auch zwischen Regler und Simulationsmodell verwendet werden soll, müssen diese beiden Fälle beim Funktionsaufruf unterscheidbar sein. Im Rahmen des Projektes wird auch die „reale“ Mess- und Steuerungstechnik inklusive des „realen“ Raums durch ein Simulationsmodell ersetzt. Dieses Simulationsmodell muss vom Simulationsmodell unterscheidbar sein, welches innerhalb des Aml-Reglers zur Optimierung des Stellgrößenverlaufs verwendet wird (beispielsweise um das Störverhalten des Reglers untersuchen zu können, d. h. das Verhalten bei Störungen, die im realen Raum vorhanden sind, im Modell des Reglers aber nicht bekannt sein können). Bei objektorientierten Programmiersprachen ist dies leicht durch zwei Objekte einer Klasse umsetzbar. Obwohl Matlab prinzipiell objektorientierte Softwareentwicklung unterstützt und dies auch zunehmend Verwendung findet, wurde in diesem Fall einer einfacheren Lösung der Vorzug gegeben, welche zugleich mehr Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Modellformen erlaubt: In verschiedenen Funktionen wird ein ganzzahlig-skalarer Funktionsparameter „`model_index`“ ergänzt, sodass die aufgerufene Funktion anhand einer eindeutigen ID (Identifikationsnummer) unterscheiden kann, welches Modell zu verwenden ist. Die aufrufende Funktion muss dadurch die Umsetzung des Modells nicht kennen, sondern nur die ID des Modells.

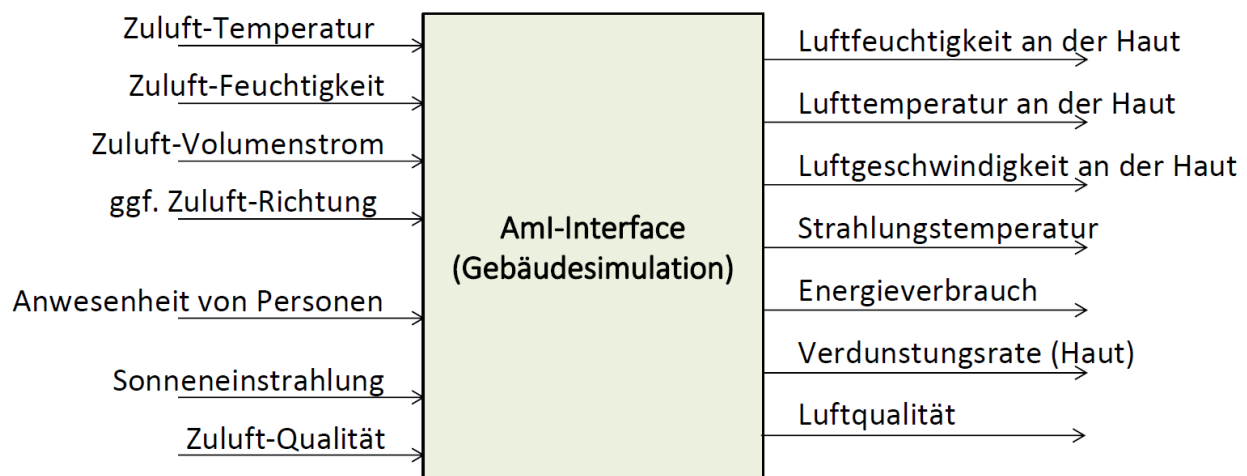
Viele Modelle sind dynamisch, d. h. sie haben ein Gedächtnis, um Speichervorgänge abbilden zu können, wie sie in physikalischen (trägen) Prozessen üblich sind. Besonders beim Raummodell ist das der Fall, weil nicht nur die aktuellen, sondern auch die früheren Stellgrößenwerte die aktuellen Raumlufthverhältnisse beeinflussen. Da im Rahmen der modellbasierten prädiktiven Regelung das Simulationsmodell mehrfach mit veränderten Stellgrößentrajektorien (Stellgrößenverläufen) aufgerufen wird, muss die aufgerufene Funktion immer „wissen“, ob der neue Aufruf den nächsten Zeitschritt einleitet oder eine Alternative zum vorhergehenden Aufruf darstellt. Abhängig davon müssen die internen Variablen unterschiedlich initialisiert und die Eingangsdaten entsprechend unterschiedlich verarbeitet werden, um die korrekten

Rückgabewerte zu berechnen. Aus diesem Grund wurde in den entsprechenden Funktionen ein Funktionsparameter „`time_index`“ ergänzt.

Für viele Funktionen kann es unterschiedliche Implementierungen geben, beispielsweise um beim Raummodell unterschiedliche Kompromisse zwischen Rechendauer und Genauigkeit oder im Regler verschiedene Optimierungsziele und Optimierungsalgorithmen wählen zu können. Aus diesem Grund enthalten viele Funktionen einen Parameter „`mode`“ (Modus), der angibt, welches Modell zu verwenden ist bzw. in welchem Modus die Funktion arbeiten soll.

Da die übergebenen Zeitreihen keine Zeitstempel enthalten, wird auch die Abtastperiode übergeben (`samplingInterval`). Wegen der Annahme einer äquidistanten Abtastung lassen sich so in der Gebäudesimulation unter Verwendung des „`time_index`“ konkrete Zeitintervalle berechnen. Dies ist insbesondere wegen der Zeitkonstanten der Speicherglieder im Gebäude von Bedeutung.

Für die Funktionen „Raummodell“, „Energiemodell“, „Verdunstungsmodell“ und „Modell von Sensor- zu Nutzerposition“ wurden zunächst nur sehr einfache „Dummy-Implementierungen“ verwendet, um die Funktionsfähigkeit des Reglers selbst prinzipiell testen zu können. Beispielsweise gibt das Raummodell als Ausgangsgrößen die Luftparameter aus, die dem Modell als Zuluftparameter als Eingangsgrößen übergeben werden, d. h. die Dynamik des Raums und Störgrößen werden noch nicht berücksichtigt. Diese Dummy-Implementierungen sind später durch die physikalisch begründete Gebäudesimulation zu ersetzen.



**Abb. 3.6** Gebäudesimulation (via Aml-Interface) als Block.

Als Beispiel einer der implementierten Funktionen wird im Folgenden die Matlab-Funktion des Aml-Interfaces selbst (bzw. des Teils davon, der in Abb. 3.4 dargestellt ist) vorgestellt. Dies stellt ausnahmsweise keinen Block in Abb. 3.4 dar, sondern eine „übergeordnete Funktion“ (Abb. 3.6), in welcher die untergeordneten Blöcke als Funktionen sequentiell aufgerufen werden.

```
function [T_skin, rh_skin, v_air_skin, T_radiation, P, r_evaporation, air_quality_skin].
= ami_interface_iterative(T_supply_air, rh_supply_air, dV_supply_air,...
direction_supply_air, occupancy, supply_air_quality, solar_radiation, samplingInterval,
model_index, time_index)
```

Die Parameter und Rückgabewerte dieser Funktion werden in der folgenden Tabelle 3.1 erläutert.

**Tab. 3.1** Parameter und Rückgabewerte der Funktion "ami\_interface\_iterative".

Typ	Name	Erläuterung
<b>Rückgabewerte</b>	T_skin	Zeitreihe (Vektor) der Temperatur an der Haut, in °C
	rh_skin	Zeitreihe (Vektor) der Luftfeuchtigkeit an der Haut, in Prozent
	v_air_skin	Zeitreihe (Vektor) der Luftgeschwindigkeit an der Haut, in m/s
	T_radiation	Zeitreihe (Vektor) der Strahlungstemperatur an der Haut, in °C
	P	Energieverbrauch im berechneten Zeitraum (skalärer Wert, in J)
	r_evaporation	Zeitreihe (Vektor) der Verdunstungsrate an der Haut, in g/(h·m <sup>2</sup> )
	air_quality_skin	Zeitreihe (Vektor) der Luftqualität an der Haut, in ppm
<b>Eingangsparameter</b>	T_supply_air	Zeitreihe (Vektor) der Zuluft-Temperatur, in °C
	rh_supply_air	Zeitreihe (Vektor) der Zuluft-Feuchtigkeit, in Prozent
	dV_supply_air	Zeitreihe (Vektor) des Zuluftvolumenstroms, in m <sup>3</sup> /h
	direction_supply_air	Zeitreihe (Vektor) der Zulufrichtung, Winkel in Grad
	occupancy	Zeitreihe (Vektor) der Anwesenheit (Personenanzahl)
	supply_air_quality	Zeitreihe (Vektor) der Zuluft-Qualität in ppm
	solar_radiation	Zeitreihe (Vektor) der Sonneneinstrahlung (Bestrahlungsstärke) in W/m <sup>2</sup>
	samplingInterval	Abtastperiode in s, Annahme von äquidistanter Abtastung
	model_index	Index des Modells, das verwendet werden soll (um „realen Prozess“ und das zur Optimierung verwendete Hilfsmodell auseinanderzuhalten)
	time_index	Zeitindex des Starts zum Rücksetzen der Gebäudesimulation auf den korrekten Anfangszustand

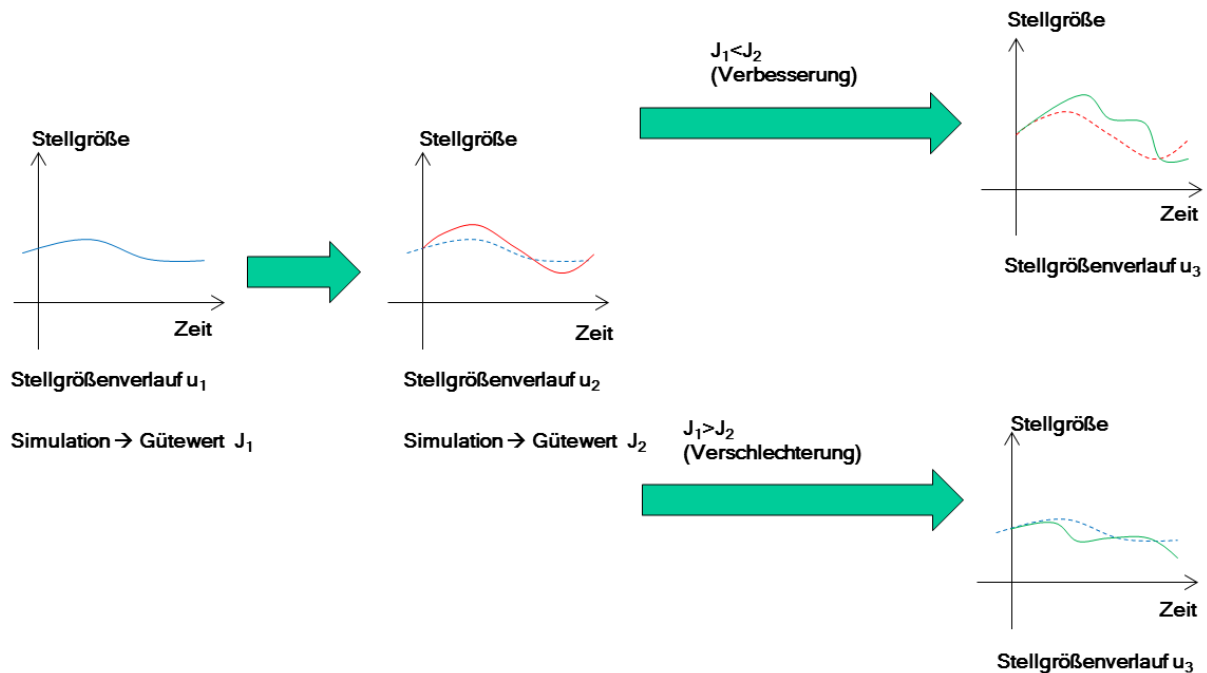
### 3.4.2 Optimierungsalgorithmus

Modellbasierte prädiktive Regler/Steuerungen (MPR) unterscheiden sich einerseits durch die verwendete Modellbeschreibung und die berücksichtigbaren Randbedingungen, andererseits durch den verwendeten Optimierungsalgorithmus. Beide Kriterien kann man nicht voneinander trennen, da die Modellform und die zu berücksichtigenden

Randbedingungen die Wahl des Optimierungsalgorithmus einschränken und umgekehrt. Werden sehr einfache, generische Optimierungsalgorithmen verwendet, so sind bezüglich des zugehörigen Modells und der berücksichtigten Randbedingungen kaum Grenzen gesetzt. Jedoch sind derartige Optimierungsalgorithmen relativ langsam bzw. liefern sie in der verfügbaren Zeit im Schnitt ein unschärferes Optimierungsergebnis als „spezialisiere“ Optimierungsalgorithmen. Letztere nehmen unmittelbar Bezug auf die konkrete Modellform und nutzen deren Besonderheiten aus, um sich der bestmöglichen Lösung schneller anzunähern. Z. B. lässt sich bei linearen Modellen der optimale Stellgrößenverlauf unmittelbar berechnen, sofern keine Nebenbedingungen zu beachten sind. Dies erlaubt die Berechnung des theoretisch optimalen Stellgrößenverlaufs in kürzerer Zeit als mit generischen Algorithmen – jedoch nur unter den genannten Bedingungen. Zu letzteren MPR-Varianten gehören auch ihre bekanntesten Vertreter – Generalized Predictive Control und Dynamic Matrix Control (CAMACHO et al. 2004).

Der implementierte Algorithmus enthält sowohl eine zufällige als auch eine systematische Komponente. Die Vorteile dieser Kombination werden weiter unten erläutert. Jede Stellgröße bildet eine Zeitreihe, die pro Abtastschritt einen Wert enthält, beginnend „jetzt“ und reichend bis zum sogenannten „Stellhorizont“. Nur das Zeitintervall zwischen diesen beiden Grenzen wird bei der Optimierung berücksichtigt. Dieses Konzept bezeichnet man als „gleitender Horizont“ (CAMACHO et al. 2004). Eine solche Zeitreihe kann man daher als Vektor darstellen. Fasst man die verschiedenen Vektoren der unterschiedlichen Stellgrößen zusammen, so erhält man eine Menge  $\mathbf{U}_1$ . Der Aml-Regler initialisiert diese Stellgrößenverläufe zunächst mit physikalisch plausiblen Standardwerten. Dann wird das Aml-Interface mit diesen Stellgrößenverläufen aufgerufen (vgl. Abb. 3.3). Als Resultat erhält man Zeitreihen (Vektoren) für die Ausgangsgrößen sowie den skalaren Energieverbrauch, die sich ebenfalls zu einer Menge  $\mathbf{Y}_1$  zusammenfassen lassen. Diese Menge wird von einer Bewertungsfunktion ausgewertet, sodass man eine skalare Größe  $\mathbf{J}_1$  erhält, welche die Qualität des Regelungsergebnisses, den Energieverbrauch und die (geschätzte) Verdunstungsrate der Haut berücksichtigt.

Nun wird jedes Element der Stellgrößenzeitreihen der Menge  $\mathbf{U}_1$  mit einem zufälligen Wert im Intervall  $[1-s, 1+s]$  multipliziert, wobei  $s=0,2$  in den durchgeführten Versuchen am „trivialen“ Raummodell gute Ergebnisse zeigte, d. h. eine schnelle Konvergenz zu einem guten Endwert. Mit der so veränderten Menge  $\mathbf{U}_2$  wird das Aml-Interface erneut aufgerufen und die Ergebnisse  $\mathbf{Y}_2$  zum Gütewert  $\mathbf{J}_2$  ausgewertet. Ist das Ergebnis besser (in diesem Fall gilt i. d. R.  $\mathbf{J}_2 < \mathbf{J}_1$ ), so dient der veränderte Vektor  $\mathbf{U}_2$  als Grundlage für eine weitere zufällige Änderung des Stellgrößenverlaufs nach demselben Prinzip, d. h. eine Menge  $\mathbf{U}_3$ . Andernfalls wird die veränderte Matrix  $\mathbf{U}_2$  verworfen und die alte „beste“ Menge  $\mathbf{U}_1$  erneut als Grundlage zur Berechnung einer neuen Menge  $\mathbf{U}_3$  verwendet. Abb. 3.7 verdeutlicht das Konzept.



**Abb. 3.7** Prinzip des implementierten einfachen Optimierungsalgorithmus.

Dieses Vorgehen wird entsprechend Abb. 3.3 zyklisch wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Auf diese Weise nutzt der Optimierungsalgorithmus bereits erworbenes „Wissen“ über gute Stellgrößenverläufe, was ihn schneller als beispielsweise eine Monte-Carlo-Optimierung (Zufallssuche) macht. Gleichzeitig vermeidet die zufällige Änderung aller Stellgrößenwerte weitgehend das Feststecken in lokalen Minima, was bei rein deterministischen Optimierungsverfahren (z. B. gradientenbasierte Suche) bei komplexeren, nichtlinearen Modellen leicht passieren kann. Bekannte Optimierungsansätze, die vergleichbar arbeiten und ebenfalls eine Kombination von zufälliger und systematischer Suche nutzen, sind evolutionäre Algorithmen und Simulated Annealing.

### 3.4.3 Ergebnisse des Reglertests

Aus den in Abschnitt 3.4.1 genannten Gründen konnte der Regler noch nicht mit einer physikalisch begründeten Gebäudesimulation gekoppelt werden, sondern es wurde zunächst nur ein sehr einfaches „Dummy-Gebäudemodell“ verwendet, das lediglich so viel „Wissen“ enthält, wie notwendig ist, um die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Reglers zu testen.

Wie oben bereits erwähnt wurde, enthält das Optimierungsziel des Reglers folgende Teilgütekriterien:

- thermischer Komfort (PMV nach DIN ISO EN 7730),
- Energieeinsatz (u. a. für Luftbehandlungseinrichtungen),
- Verdunstungsrate der Haut,
- Luftqualität (in ppm, z. B. CO<sub>2</sub>-Anteil).

Die Teilgütekriterien werden durch eine gewichtete Summe zusammengefasst, wobei die Gewichte entsprechend des Aml-Gedankens einen nutzerspezifischen Kompromiss zwischen thermischem Komfort, trockener Luft und Energieeinsatz erlauben.



In Tabelle 3.2 sind die gemittelten und gerundeten optimalen Werte der Stellgrößen dargestellt. In Wirklichkeit handelt es sich jeweils um eine Zeitreihe bis zum „Stellhorizont“, deren Werte durch den zufälligen Anteil des Optimierungsalgorithmus um den Endwert schwanken. Die Richtung der Zuluft ist nicht angegeben, weil sie im einfachen Dummy-Gebäudemodell nicht verwendet wird und dadurch bei der Optimierung zufällige Werte annimmt. Je nach Gewichtung der Optimierungsziele werden selbst bei dem Dummy-Gebäudemodell sehr unterschiedliche Zuluftparameter optimal.

Zunächst wurde jeweils nur eines der vier Teilgütekriterien bewertet, d. h. die anderen Teilgütekriterien entfielen (mit Null bewertet). Dies ermöglicht besonders gut überprüfbare Plausibilitätstests. Wird ausschließlich die *thermische Behaglichkeit (PMV)* optimiert, liefert der Optimierungsalgorithmus „angenehme“ Zuluftparameter wie 25 °C, 50 % relative Luftfeuchte und 0,1 m/s Luftgeschwindigkeit. Das liegt daran, dass im Dummy-Raummodell aufgrund der hier vorausgesetzten idealen Durchmischung der Raumluft die Luftparameter an der Haut den Zuluftparametern entsprechen. Wird nur der *Energieverbrauch* optimiert, so ergeben sich deutlich andere optimale Zuluftparameter. Sie entsprechen den Außenluftparametern, weil das Einblasen unveränderter Außenluft im einfachen Modell den geringsten Energieverbrauch erfordert. Der niedrigste Energieeinsatz ergibt sich dementsprechend, wenn zusätzlich die Luftgeschwindigkeit Null ist (abgeschaltete Anlage), was der Optimierungsalgorithmus wegen der fast vernachlässigbar niedrigen Gewichtung der Luftgeschwindigkeit im Energiemodell nicht feststellen konnte. Optimiert man nur die *Verdunstung*, ist eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % optimal, da nach dem verwendeten Modell dann keine Verdunstung mehr stattfindet. Die jeweils verbleibenden Raumluftparameter werden vom Optimierungsalgorithmus dann zufällig gewählt, weil sie das Gütekriterium nicht mehr beeinflussen, sobald die relative Luftfeuchte bei 100 % liegt. Ähnlich verhält es sich bei alleiniger Optimierung der Luftqualität. Da diese im Dummy-Raummodell nur von der Luftgeschwindigkeit abhängt, wird diese bei der Optimierung unendlich groß während die anderen Zuluft-Parameter zufällige Werte annehmen.

**Tab. 3.2** Mittelwerte der optimierten Zuluftparameter beim Dummy-Raummodell.

Gewichtung der zu bewertenden Einzel-Gütekriterien	Gewichtung PMV	1	0	0	0	1
	Gewichtung Energie	0	1	0	0	0,3
	Gewichtung Verdunstung	0	0	1	0	1
	Gewichtung Luftqualität	0	0	0	1	0,001
Gemittelte und auf ganze Zahlen gerundete optimale Werte der Stellgrößen	Lufttemperatur	25 °C	10 °C	beliebig	beliebig	5 °C oder 24 °C
	Luftfeuchtigkeit	50 %	40 %	100 %	beliebig	40 % oder 100 %
	Luftgeschwindigkeit	0,1 m/s	0,1 m/s	beliebig	maximal/unendlich	0,15 m/s oder 0,01 m/s

Um beim einfachen Gebäudemodell die Zahlenwerte der Teilgütekriterien auf ein ähnliches Niveau zu bringen, müssen PMV und Verdunstung mit ca. 1, der Energieverbrauch etwa mit 0,3 und die Luftqualität mit ca. 0,001 gewichtet werden. In diesem Fall bringen verschiedene Simulationen des Regelkreises zufällig eine von zwei unterschiedlichen Lösungen als Optimum hervor – entweder soll die Zuluft der Außenluft entsprechen (dann wird der Energieverbrauch minimal, die Behaglichkeit und Verdunstungsrate aber nicht) oder die relative Luftfeuchte soll nahe 100 % betragen und die Lufttemperatur 24 °C (dann wird die Verdunstung minimal bei gleichzeitig akzeptabler Behaglichkeit durch die Lufttemperatur). Die Ursache, dass eine dieser beiden Lösungen „zufällig“ gewählt wird, besteht darin, dass beide Lösungen eine ähnliche gewichtete Summe der Gütekriterien erzeugen und es keine „besseren“ Lösungen gibt. Man kann die beiden Lösungen als (näherungsweise) „Pareto-optimal“ bezeichnen, siehe COLLETTE und SIARRY (2003).

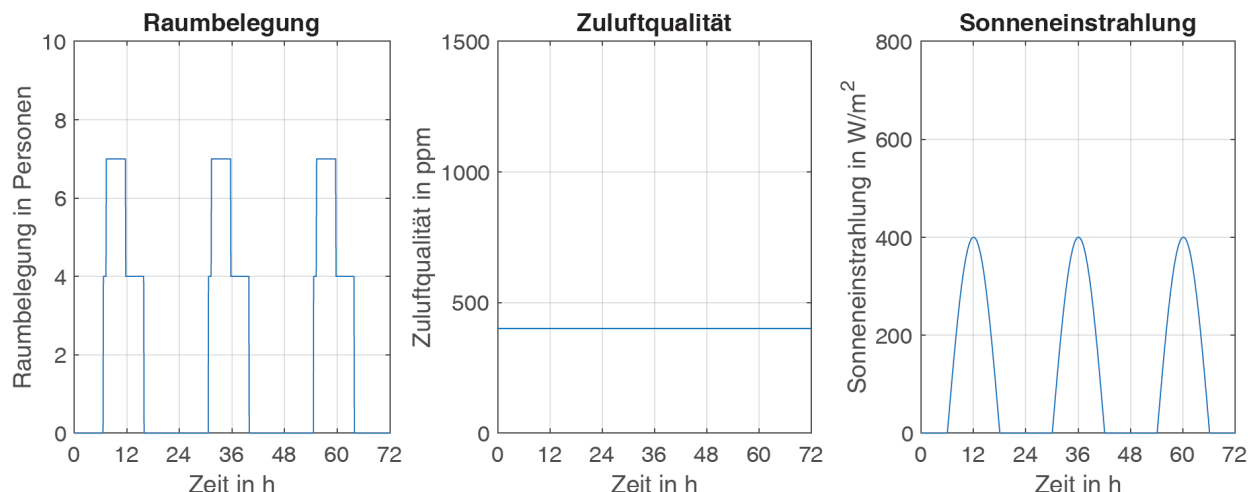
### 3.5 Kopplung mit einer Gebäudesimulation

Um den Aml-Regler unter realitätsnäheren Bedingungen zu testen, wurde er mit einem Gebäudemodell getestet, welches in seiner Komplexität für die vorliegende Aufgabe zugeschnitten und in zahlreichen Schritten gemeinsam mit der Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung entwickelt wurde. Damit in der Optimierungsschleife eine für die Optimierung brauchbare (möglichst große) Anzahl an Iterationen möglich ist, darf dieses Modell nicht zu komplex sein, muss aber wesentliche Eigenschaften des Raumverhaltens und die Verdunstung realitätsnah abbilden. Zunächst wurde daher ein Ein-Knoten-Modell für einen Raum in Kombination mit der Polynom-Beschreibung der Verdunstung (Ergebnis von Phase 1 des Projekts Aml-basierte Klimaregelung) eingesetzt. Dieses Modell benötigt für die Simulation nur sehr wenig Zeit (ca. 400 Simulationen pro Sekunde bei Verwendung eines i5-Prozessors und einer simulierten Dauer von je drei Tagen). Allerdings ist die Polynom-Beschreibung der

Verdunstung aus Teil 1 des Projekts nicht geeignet, die tatsächliche Verdunstung ausreichend gut widerzuspiegeln, insbesondere, weil bei einem Anstieg der Lufttemperatur die Verdunstung absinkt und nicht – wie es in der Realität ist – ansteigt. Diese Unzulänglichkeit war den Experimentalbedingungen aus Phase 1 geschuldet. Aus diesem Grund wurde zur Berechnung der Verdunstung auf ein komplettes Personenmodell, in einer auch unter Benutzung der Projektergebnisse erweiterten Fassung nach (STREBLOW 2010), zurückgegriffen. Dieses, in C++ geschriebene Modell konnte in Matlab als Mex-Funktion erfolgreich eingebunden werden. Aufgrund der Komplexität dieses Modells und der darin notwendigen Zugriffe auf Dateien steigt die Simulationsdauer dabei jedoch signifikant an (nur noch ca. 36 Iterationen pro Sekunde). Für einen Echtzeitbetrieb mit einer Abtastperiode von fünf Minuten bedeutet das, dass pro Abtastschritt etwa 10.000 Optimierungs-Iterationen durchführbar sind. Wie die nachfolgenden Simulationen zeigen, sollte das für ein zufriedenstellendes Regelkreisverhalten allerdings ausreichen. Für die geometrisch detaillierten Simulationsstudien in diesem Projekt wäre „Echtzeit“ aber aus Zeitgründen nicht praktikabel (weil dann jede Simulation von drei Tagen auch drei Tage dauern würde), weshalb als Kompromisslösung für die meisten Simulationsstudien das Verdunstungsmodell innerhalb der Optimierungsschleife ausgelassen und erst im Anschluss mit den optimalen Randbedingungen berechnet wurde. Nur wenn die Verdunstung Teil des Gütekriteriums ist, ist dieser Weg nicht möglich.

### 3.5.1 Modellvalidierung

Der Gebäude- bzw. Raumsimulation wird ein Raum mit den Maßen 10 m x 6 m x 3 m (B x T x H) zugrunde gelegt. Eine Fensterfläche von 8 m<sup>2</sup> wird angenommen. Die Raumbelegung, Zuluftqualität (Außenluftqualität) und Sonneneinstrahlung werden wie in Abb. 3.8 gezeigt angenommen.



**Abb. 3.8** Randbedingungen der Simulationen.

Für die Berechnung des PMV werden ein Kleidungsisolationsindex von 0,8 clo und eine metabolische Rate von 1,1 met eingesetzt. Die (simulierte) Abtastperiode beträgt fünf Minuten. Es werden immer drei aufeinander folgende Tage simuliert, um bei der Bewertung der Zeitverläufe dem „Einschwingverhalten“ am Anfang der Simulation ausgehend aus den Anfangsbedingungen ein geringeres Gewicht zu geben. Der CO<sub>2</sub>-

Ausstoß pro Person wird mit 20 l/h und die Dichte von CO<sub>2</sub> mit 1830 mg/l angenommen. Der Konversionsfaktor zwischen ppm und mg/m<sup>3</sup> beträgt 1,96 mg/(m<sup>3</sup> ppm). Der Zuluftvolumenstrom durch Luftundichtigkeiten beträgt 36 m<sup>3</sup>/h, was 20 % des Rauminhalts pro Stunde entspricht. Die Wärmeabgabe pro Person beträgt 100 Watt, die angenommene Körperoberfläche 1,8 m<sup>2</sup>. Die Fläche des Zuluftauslasses wurde mit 100 cm<sup>2</sup> festgesetzt, die Luftgeschwindigkeit am Sensor soll 30 % der Zuluftgeschwindigkeit am Luftauslass betragen. Variationen des Strömungsverhaltens werden also nicht simuliert. Auch die ggf. unterschiedlichen Luftbedingungen zwischen Sensorposition und dem Aufenthaltsort der Personen werden im aktuellen Modell nicht berücksichtigt. Der anteilige Sonneneintrag aus der Strahlungsleistung wird mit 30 % angesetzt, die thermische Kapazität der Zone mit 10.000 kJ/K. Die Zuluftströmung, welche eine der Stellgrößen ist, wird im Raummodell nicht berücksichtigt und daher auch bei der Optimierung nicht betrachtet.

Um das Modell zunächst selbst zu validieren (und nicht den Regler), wurden die Stellgrößen zunächst nicht automatisch optimiert, sondern manuell beeinflusst. Damit wurde das aus den gegebenen Stellgrößen erzeugte Raumverhalten erfolgreich auf Plausibilität geprüft.

### **3.5.2 Geregelter Betrieb**

Nun kann mit dem validierten Modell der eigentliche Aml-Regler unter realitätsnäheren Bedingungen als beim Dummy-Modell von Abschnitt 3.4.3 getestet werden. Bei dieser Untersuchung ist besonders interessant, das Optimierungsziel zu variieren und zu zeigen, dass je nach Optimierungsziel dafür geeignete Stellgrößenverläufe generiert werden und diese zu den gewünschten Regelungsergebnissen führen.

Entsprechend des in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Optimierungsverfahrens werden die Stellgrößenwerte iterativ ermittelt. Als Startwerte der Stellgrößen werden dazu in jedem Abtastschritt eine konstante Zulufttemperatur von 25 °C, eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % und ein Zuluftvolumenstrom von 100 m<sup>3</sup>/h angesetzt. Bei N Stellgrößen und einem Stellhorizont von M Abtastschritten beträgt die Anzahl der „Freiheitsgrade“ (vom Optimierer beeinflussbaren Werte) N·M. Die zufällige Veränderung pro „Freiheitsgrad“ beträgt pro Iteration maximal ±50 %. Ein Vorzeichenwechsel ist somit unmöglich, was bei den gewählten Stellgrößen praktisch keine Einschränkung darstellt.

Ein großer Vorteil prädiktiver Regler besteht in der einfachen Möglichkeit, Randbedingungen in das Gütekriterium aufzunehmen. Legt man fest, dass das Gütekriterium mit einem großen Wert beaufschlagt wird, wenn im Raum relative Luftfeuchte 30 % unterschreitet, so wird dies bei der Optimierung vermieden, dargestellt in Abb. 3.9 und Abb. 3.10.

Die finalen Simulationen wurden mit folgenden Randbedingungen durchgeführt:

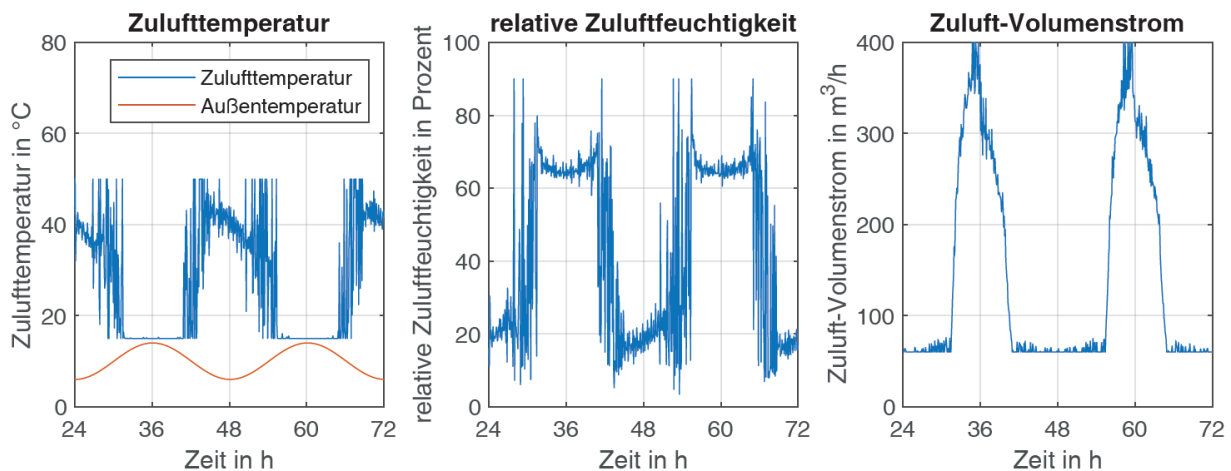
- Zulufttemperatur 15 °C bis 50 °C,
- reiner Heizbetrieb (niemals kühlen) und
- Zuluftvolumenstrom 60 m<sup>3</sup>/h bis 400 m<sup>3</sup>/h (Mindestvolumenstrom 60 m<sup>3</sup>/h, maximaler Volumenstrom 400 m<sup>3</sup>/h - d. h. ca. doppelter Rauminhalt pro Stunde -, da nicht nur gelüftet, sondern gleichzeitig konditioniert werden muss).

Optimiert wird nur das PMV, jedoch mit der Nebenbedingung, dass die Luftfeuchtigkeit im Raum 30 % nicht unterschreiten darf. Ausgedrückt als zu minimierende Gütefunktion  $J$  (Gütekriterium):

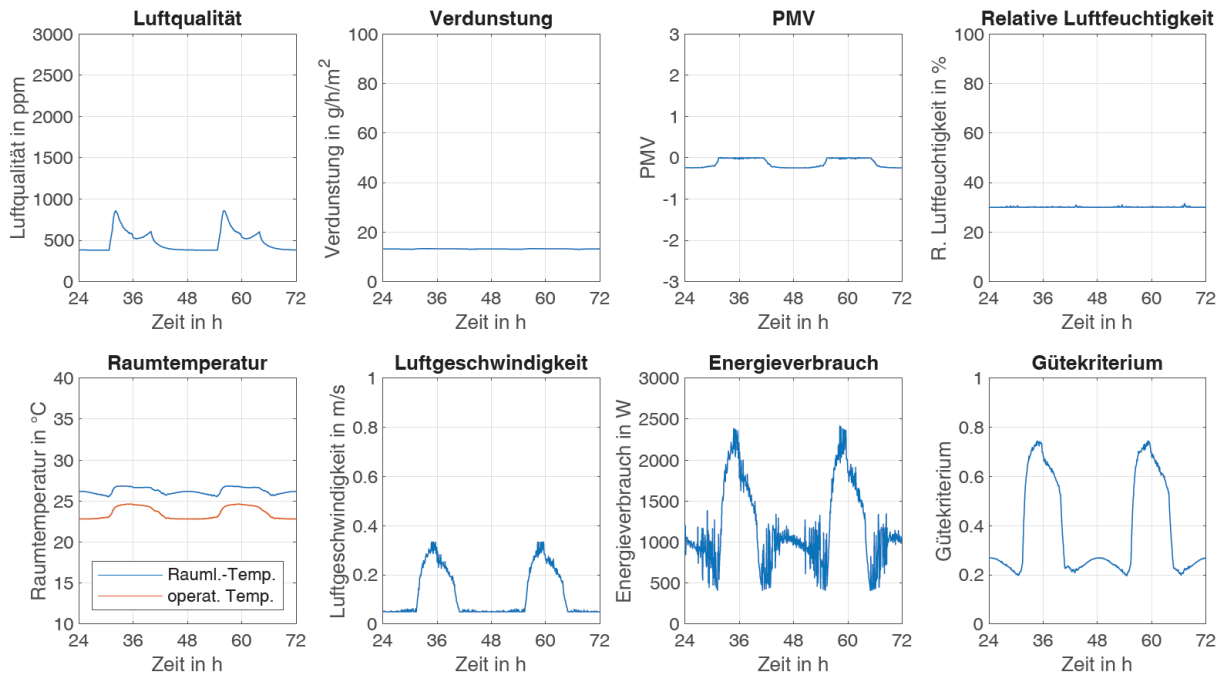
$$J = \begin{cases} \sum_{i=1}^T |PMV_i| & \text{falls } rH_k \geq 30\% \forall k \in \{1, T\} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$$

mit dem Prädiktionshorizont  $T$ . Damit bewertet das Gütekriterium den Erfolg der Optimierung des PMV, dargestellt als Summation der Beträge des PMV über die Abtastschritte.

Dargestellt sind nur Tag 2 und Tag 3 der Simulation (daher 24 bis 72 Stunden), da Tag 1 (möglicherweise verwirrende) Einschwingvorgänge zeigt.



**Abb. 3.9** Stellgrößen bei Optimierung des PMV unter Einhaltung einer Mindestluftfeuchtigkeit von 30 % im Raum (ca. 4000 Iterationen pro Abtastschritt).



**Abb. 3.10** Raumbezogene, aktuelle Größen bei Optimierung des PMV unter Einhaltung einer Mindestluftfeuchtigkeit von 30 % im Raum (ca. 4000 Iterationen pro Abtastschritt und Gütekriterium als Summe der Abtastschritte).

Bezogen auf einen (hier nicht dargestellten) ebenfalls untersuchten Fall der Optimierung des PMV *ohne* die Beschränkung der relativen Luftfeuchte nach unten wird hier tatsächlich ständig eine relative Luftfeuchte von mindestens 30 % gewährleistet, wozu allerdings das PMV etwas weiter vom Idealwert abweichen muss. Dass ab ca. 6 Stunden simulierter Zeit die Luftfeuchtigkeit ständig 30 % beträgt, liegt nicht etwa daran, dass diese Größe daraufhin geregelt würde, sondern daran, dass eine höhere Luftfeuchtigkeit unabhängig von der Wahl der anderen Stellgrößen zu einem schlechteren PMV führen würde und die Optimierung derartige Lösungen verwirft. Zugleich sind die Stellgrößen entsprechend verändert, vor allem ist die Zuluftfeuchtigkeit gegenüber einer Optimierung ohne diese Randbedingung deutlich erhöht. Hier zeigt sich der Nutzen des Regelungsansatzes ganz besonders, auch in Hinblick auf die Vermeidung des Problems „Trockene Luft“, was Auslöser für die Untersuchungen zur Entwicklung des Aml-Reglers war: Zur Einhaltung einer solchen Randbedingung sind nur nichtlineare prädiktive Regler in der Lage.

Eine weitere Möglichkeit für die Wahl des Gütekriteriums besteht darin, eine Fallunterscheidung zwischen Nutzungs- und Nichtnutzungsperiode vorzunehmen, beispielsweise indem in der ungenutzten Zeit das PMV nicht optimiert wird, sondern nur der Energieverbrauch. Aufgrund der zuvor beschriebenen gefundenen Lösung ändert das hier aber wenig am Simulationsergebnis.

Anhand verschiedener Beispiele konnte so gezeigt werden, dass der im Projekt entwickelte Aml-Regler grundsätzlich in der Lage ist, verschiedene Regelungsziele in Kombination zu betrachten. Die Auswahl eines empfehlenswerten Gütekriteriums ist dagegen ein komplexes Thema und im Rahmen dieses Projektes noch nicht möglich. Dies wird im nachfolgenden Abschnitt genauer diskutiert und sollte Gegenstand weiterführender Forschungsarbeiten sein.

### 3.5.3 Fazit des Tests der Kopplung mit der Gebäudesimulation

Die Untersuchungen zur Kopplung des Aml-Reglers mit einer einfachen Gebäudesimulation haben gezeigt, dass die Kopplung prinzipiell zu plausiblen Ergebnissen führt. Sowohl die Ergebnisse der Raumsimulation bei vorgegebenen Stellgrößen als auch die Optimierungsergebnisse zeigen sinnvolle Werte. Durch die Flexibilität des Optimierungsalgorithmus ist es möglich, für verschiedene Zielstellungen nur das Optimierungskriterium auszutauschen, während das Optimierungsverfahren selbst unverändert bleibt. Der Nachteil des Verfahrens ist eine langsamere Konvergenz verglichen zu Verfahren, die „Expertenwissen“ einbeziehen. Eine solche Erweiterung ist für die Zukunft allerdings denkbar.

Bei einfachen Optimierungskriterien wurde häufig ein „Springen“ zwischen verschiedenen Lösungen beobachtet. Die Ursache dafür liegt darin, dass ähnliche Gütekriterien-Werte unter verschiedenen Kombinationen der Stellgrößen erreicht werden können und der Optimierer konsequent die Lösung mit der besten (zahlenmäßig niedrigsten) Güte verwendet. Dies ist eine Notwendigkeit bei einer automatischen Optimierung im Rahmen einer prädiktiven Regelung. Da nur eine Lösung tatsächlich umgesetzt werden kann, muss die Optimierung auch zu einem eindeutigen Ergebnis kommen, was wiederum ein skalares Gütekriterium erfordert. Die zufällige Komponente des Optimierungsalgorithmus verstärkt dieses Problem. Für zukünftige Forschungen wird vorgeschlagen, an der Vermeidung des „Springens“ zwischen verschiedenen Lösungen mit ähnlicher Güte zu arbeiten, beispielsweise durch Bestrafen von Stellgrößenänderungen bei der Optimierung, wie beispielhaft in Abschnitt 3.5.2 gezeigt wurde. Eine Herausforderung besteht dabei darin, dass trotzdem sprungartige Stellgrößenänderungen möglich sein sollten, wo sie sinnvoll sind, z. B. bei Nutzungsänderungen oder Sollwertsprüngen.

Die Anzahl der Iterationen pro Abtastschritt wurde zwischen 10 und 10.000 variiert, wobei unabhängig davon der Prädiktionshorizont zwischen 3 und 30 Abtastschritten variierte (d. h. 15 Minuten bis 2,5 Stunden Vorausschau). Bei einem kurzen Prädiktionshorizont hat sich gezeigt, dass bereits ca. 100 Optimierungsschritte ausreichen, um praktisch gute Stellgrößenverläufe sicherzustellen. Das wiederum bedeutet, dass eine Teilsimulation bis zu drei Sekunden dauern dürfte. Dementsprechend könnte das Gebäudemodell erheblich komplexer sein als es momentan ist.

Wird dagegen ein langer Prädiktionshorizont verwendet, so stellt sich heraus, dass erwartungsgemäß bessere (längerfristig vorausschauende) Ergebnisse möglich sind, jedoch unter der Notwendigkeit einer erheblich größeren Anzahl an Iterationen. Letzteres liegt daran, dass aufgrund der größeren Anzahl von Abtastschritten (Freiheitsgraden im Sinne der Optimierung) die Optimierung langsamer zu der besten Lösung konvergiert. Bei  $N$  Stellgrößen und einem Stellhorizont von  $M$  Abtastschritten beträgt die Anzahl der Freiheitsgrade  $N \cdot M$ . Zusätzlich zu der Verlangsamung der Optimierung durch die langsamere Konvergenz steigt aber zugleich auch der Rechenaufwand pro Simulation linear mit  $M$ . Somit hängt der Rechenaufwand sinngemäß insgesamt quadratisch vom Stellhorizont  $M$  ab. Dieser Zusammenhang gilt jedoch nur tendenziell, da er unter anderem nicht berücksichtigt, dass die am Ende gefundene Lösung bei einem größeren Stellhorizont der optimalen Lösung bei kleinerem Stellhorizont überlegen ist.

Weiterhin ist eine Optimierung unter Einbeziehung von Randbedingungen interessant, denn dann wird die Freiheit des Optimierungsalgorithmus bestmöglich ausgenutzt. Jedoch wird dafür ein relativ weiter Stellhorizont benötigt, um zukünftige Änderungen der Randbedingungen im Voraus berücksichtigen zu können, was wiederum einen hohen Rechenaufwand bedeutet. In diesem Zusammenhang sind auch Untersuchungen zu einem praxistauglichen Kompromiss zwischen Modellgenauigkeit und Rechenaufwand interessant: Je genauer und rechenaufwändiger das Modell ist, desto weniger Iterationen des Optimierers sind pro Abtastschritt möglich, desto weniger „Korrekturen“ sind aber auch im jeweils nächsten Abtastschritt notwendig.

Ein Aml-Regler sollte nutzerspezifisch arbeiten, was hier durch die Einstellbarkeit der Gewichte der Gütekriterienkombination erreicht werden kann. Denkbar sind zudem Empfehlungen zur langfristigen Auswirkung des Raumklimas auf Phänomene wie trockene Augen, Mund und Hals, welche – auch in Kombination mit Lüftungsempfehlungen – auf einem Bediendisplay im Raum oder direkt auf dem PC am Arbeitsplatz des Nutzers angezeigt werden könnten. Dazu muss entweder der Nutzer auf dem PC eine entsprechende Software installieren oder der Regler muss beispielsweise befähigt werden, dem Nutzer eine E-Mail zu senden, was wegen der im Aml-Umfeld ohnehin notwendigen Vernetzung des Reglers kein technisches Problem darstellt.



## 4 Geometrisch und zeitlich hoch aufgelöste Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen

Die räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Simulationsmodelle sollen in diesem Projekt folgende Ziele erfüllen:

1. Die Unterstützung der Planung von Probandenversuchen in der Klimakammer. Dabei soll die Wahl der Luftführung und die Platzierung der Arbeitsplätze eine realitätsnahe Abbildung der winterlichen Bedingungen an einem Büroarbeitsplatz für die zwei typischen Lüftungsarten: Mischlüftung und Quelllüftung ermöglichen.
2. Die realistische Nachbildung aller Stellgrößen, die vom Aml-Regler benutzt werden, um eine Kopplung des komplexen oder vereinfachten Personen- und Gebäudemodells mit diesem Regler zu ermöglichen.
3. Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher Heizungs- und Lüftungskonzepte auf die Haut, auf die im Raum befindlichen Sensoren und auf die vorhergesagte thermische Behaglichkeit der Personen.

### 4.1 Unterstützung der Probandenversuche

Das für die Simulationen genutzte Programmpaket ist ein zu großen Teilen in Eigenentwicklung des Projektpartners TU Dresden, GEVV entstandenes, im Zeitbereich gekoppeltes System zur instationären Gebäude-, Anlagen und Strömungssimulation, das die Modellierung und Untersuchung thermischer und hygienischer Verhältnisse in Räumen und Gebäuden ermöglicht.

Für die thermische Gebäude- und Anlagensimulation kommt TRNSYS-TUD, eine an der TU Dresden umfassend erweiterte Version des kommerziellen Gebäude- und Anlagensimulationsprogramms TRNSYS zur Anwendung (PERSCHK, 2010). Zu den besonderen, hier genutzten Merkmalen des Programms zählt die Möglichkeit, dank des implementierten geometrisch basierten Gebäudemodells, den räumlich hoch aufgelösten Strahlungswärmeaustausch zu berücksichtigen. Zudem erfolgt über die Wandflächen eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Kopplung mit dem Strömungssimulationsprogramm ParalleINS (KNOPP et al., 2005).

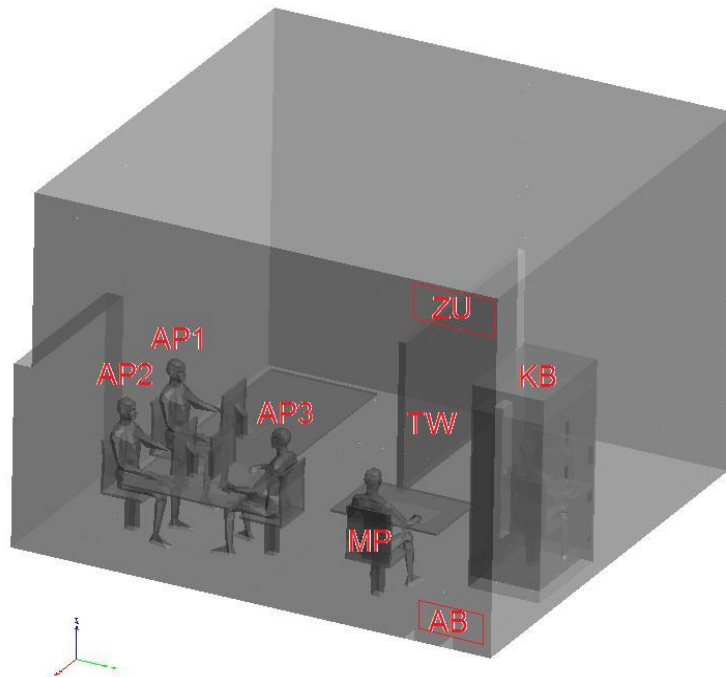
ParalleINS ist ein auf die Berechnung instationärer, nichtisothermer und turbulenter Raumluftrömungen spezialisierter CFD-Code auf Basis einer speziell für diesen Anwendungsbereich optimierten Finite Elemente Methode. Das Programm ermöglicht die Vorgabe beliebiger lokaler und globaler Wärme-, Feuchte- und Schadstoffquellen. Die Modellierung der bei Raumluftrömungen auftretenden turbulenten Strömungsstrukturen erfolgt auf Basis statistischer Turbulenzmodellierung (in diesem Falle auf Basis eines  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodells) in Verbindung mit speziellen iterativen Wandfunktionen, um den korrekten konvektiven Wärmeübergang an den Umfassungsflächen sicherzustellen. Das ermöglicht Berechnungen mit angemessener Genauigkeit in komplexen, großskaligen Raumgeometrien über längere Zeiträume.

Der modulare Aufbau und die offene Kopplungsstrategie beider Programmsysteme bieten sehr gute Möglichkeiten, das Paket optimal an neue Problemstellungen anzupassen. Das Programmpaket wurde bereits in zahlreichen Projekten eingesetzt und verifiziert, siehe z.B. KOZAK et al. 2014, STUBBE et al. 2015, SEIFERT et al. 2017.

Als Größen zur Bewertung der untersuchten gekoppelten Simulationen kommen alle Feldgrößen der modellierten Transportgleichungen, wie Geschwindigkeit, Temperatur, Wassergehalt und Luftalter zur Anwendung. Zusätzlich werden daraus alle für die Beurteilung der Behaglichkeit aus thermischer und hygienischer Sicht erforderlichen Größen berechnet, so dass sämtliche für eine umfassende Bewertung relevanten Daten räumlich und zeitlich hoch aufgelöst vorliegen.

Um die Vorteile der hohen geometrischen Auflösung zu nutzen, wurde zudem ein iteratives Modell des thermischen Verhaltens der Menschen (STREBLOW, 2010) in die Simulationsumgebung implementiert, das im Zeitbereich der Simulationen die Temperierung der einzelnen Körperteile in Abhängigkeit des jeweils vorliegenden lokalen Umgebungsklimas übernimmt.

Die nachfolgend beschriebenen, gekoppelten Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen starteten in einer ersten Projektphase mit der Nachbildung der Probandenuntersuchungen in der Klimakammer der BAuA in Dortmund. Hierbei wurde ein detailliertes geometrisches Modell der Personen genutzt, siehe auch Abb. 4.1.



**Abb. 4.1** Erstes geometrisches Modell der Klimakammer der BAuA in Dortmund mit Klimabox und statischen Personen. AP-Arbeitsplatz; ZU-Zuluftöffnung; AB-Abluftöffnung; KB-Klimabox; MP-Messplatz; TW-Trennwand.

Die Simulationen der Versuchsanordnungen und der Variantenuntersuchungen selbst erfolgten instationär und berücksichtigen sowohl die entsprechenden anlagentechnischen und bauphysikalischen Eigenschaften der Klimakammer und der Klimabox, als

auch detailliert die Effekte der Raumluftrömung und des Strahlungswärmeaustausches. Dies gilt ebenso für den zeitlichen Temperaturverlauf der Wände, die in der Versuchsanordnung befindlichen Sensoren und die Anbindung an das Personenmodell (STREBLOW, 2010). Dazu ist das rechnerische Personenmodell in den Gesamtprozess der Kopplung eingebunden. Die Berechnung des Strahlungswärmeaustauschs aller beteiligten Umfassungsflächen erfolgt geometrisch mit Hilfe von Flächen-zu-Flächen-Einstrahlzahlen, die mit Hilfe eines sehr schnellen, Open-GL basierten Berechnungsverfahrens ermittelt wurden (siehe KRAMER et al. 2014). Es wird im Rahmen der gekoppelten Simulationen innerhalb der einzelnen Programmkomponenten mit unterschiedlichen geometrischen und zeitlichen Auflösungen gearbeitet. Die Kopplung selbst erfolgt über einen intensiven Datenaustausch über definierte Interfaceflächen (hier ca. 7500) und zu festgelegten Zeitpunkten (hier alle 9 s) im Iterationsprozess.

Die Vernetzung der zwei miteinander verbundenen Raumvolumina des Versuchstandes erfolgte tetraederbasiert. Hierbei wurden, entsprechend der geometrischen und strömungstechnischen Details, Tetraeder mit mittleren Kantenlängen zwischen 0,002 m und 0,1 m verwendet. Das Berechnungsgitter der zwei Gesamtvolumen besteht insgesamt aus ca. 0,95 Millionen Elementen (0,75 Mio Kammer 0,2 Mio Box) und aus etwa 7500 Randbedingungsflächen, wobei auf die modellierten Personen allein jeweils ca. 1300 (am Strahlungswärmeaustausch beteiligte) Teilflächen entfallen. Als Laufzeit kann auf Workstations in etwa Echtzeit realisiert werden.

Auf Basis der Ergebnisse der Simulationen dieser ersten Projektphase konnten folgende Arbeitshypothesen formuliert werden.

Das Strömungsmuster in der Klimakammer entspricht einer Mischlüftung.

Es besteht ein erhöhtes Zugluftrisiko am Arbeitsplatz 1, deshalb wird die Verlegung dieses Arbeitsplatzes gemäß Abbildung 4.2 vorgeschlagen.

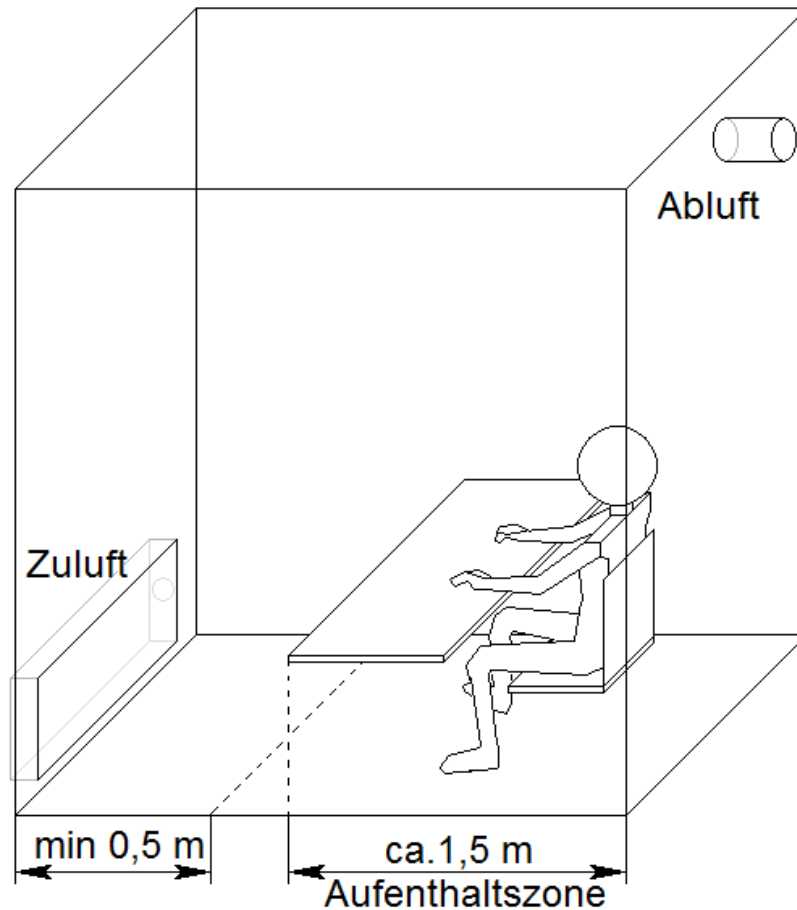
Die Strömung in der Klimabox ist so untypisch, dass sie sich einer Klassifizierung entzieht, dementsprechend ist eine nochmalige Modifikation der Box erforderlich.

Die bisherige Klimabox weist Lufttemperaturen auf, die um ca. 2 K höher als in der Klimakammer liegen.

Erst die Nutzung der geometrisch hoch aufgelösten Versuchsanordnung erlaubt Aussagen zu den tatsächlichen Bedingungen in der Klimabox.

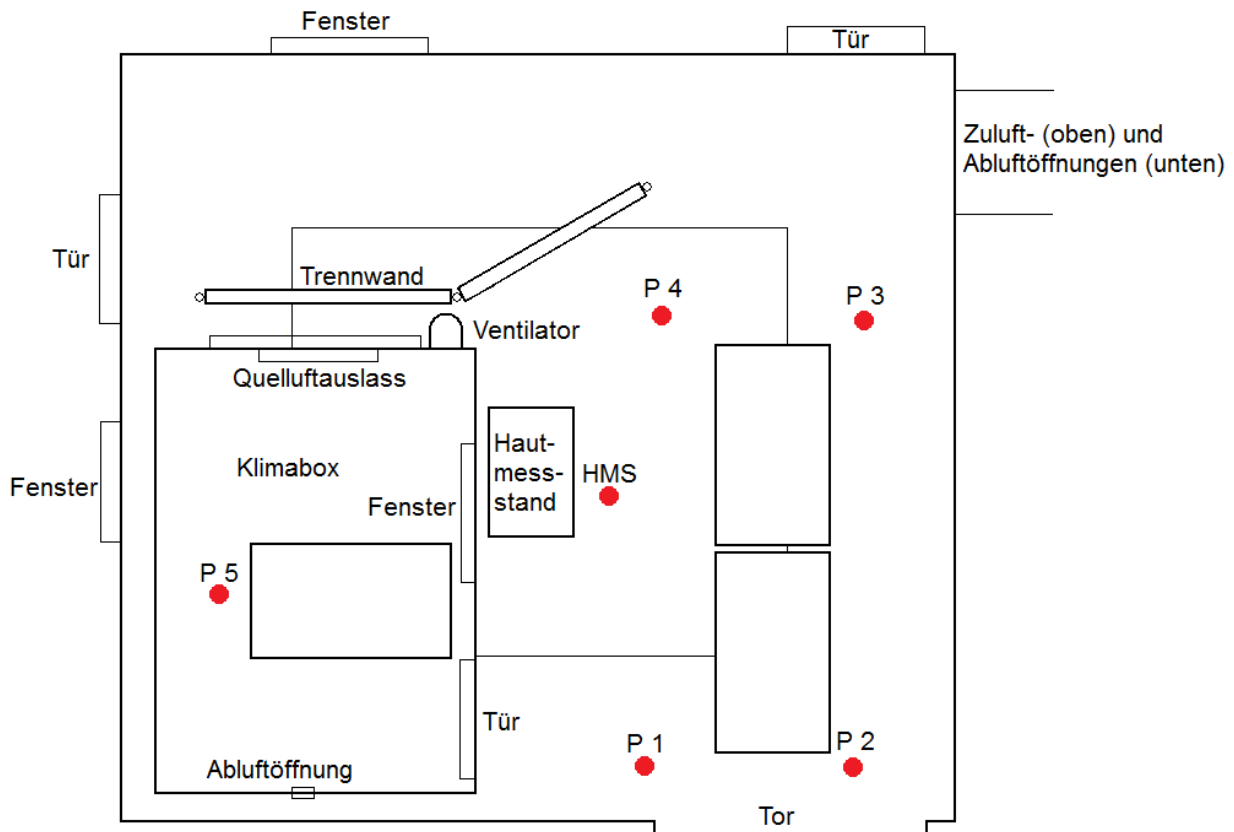
Die entwickelten geometrischen und rechnerischen Modelle können zur Bearbeitung der weiteren Arbeitsschritte verwendet werden.

Um tatsächlich eine quelluftartige Strömung in der Klimabox realisieren zu können, wurde der Neubau einer Klimabox angeregt (siehe Abb. 4.2) und vom Institut ASER e. V. umgesetzt. Die sich daraus ergebende Versuchskonfiguration ist messtechnisch erfasst worden, um die raumklimatischen Verhältnisse an den vorgesehenen Arbeitsplätzen beurteilen zu können.



**Abb. 4.2** Aufbau einer neuen Klimabox, mit der das Strömungsmuster einer Quelllüftung realisiert wird.

In Abb. 4.3 ist dargestellt, an welchen Stellen ein Messbaum positioniert wurde (P1 bis P5). An diesem wurden jeweils drei Geschwindigkeitssensoren in Höhen von 0,15 m, 0,60 m und 1,5 m befestigt. Die Abtastfrequenz der Sensoren beträgt  $0,1 \cdot 1/s$ . Die Geschwindigkeiten wurden über einen Zeitraum von zwei bis zehn Minuten erfasst. Innerhalb dieser Zeit mittelt der Datenlogger die Werte der Luftgeschwindigkeiten und der Turbulenzgrade und zeichnet diese in einem Intervall von zehn Sekunden auf.



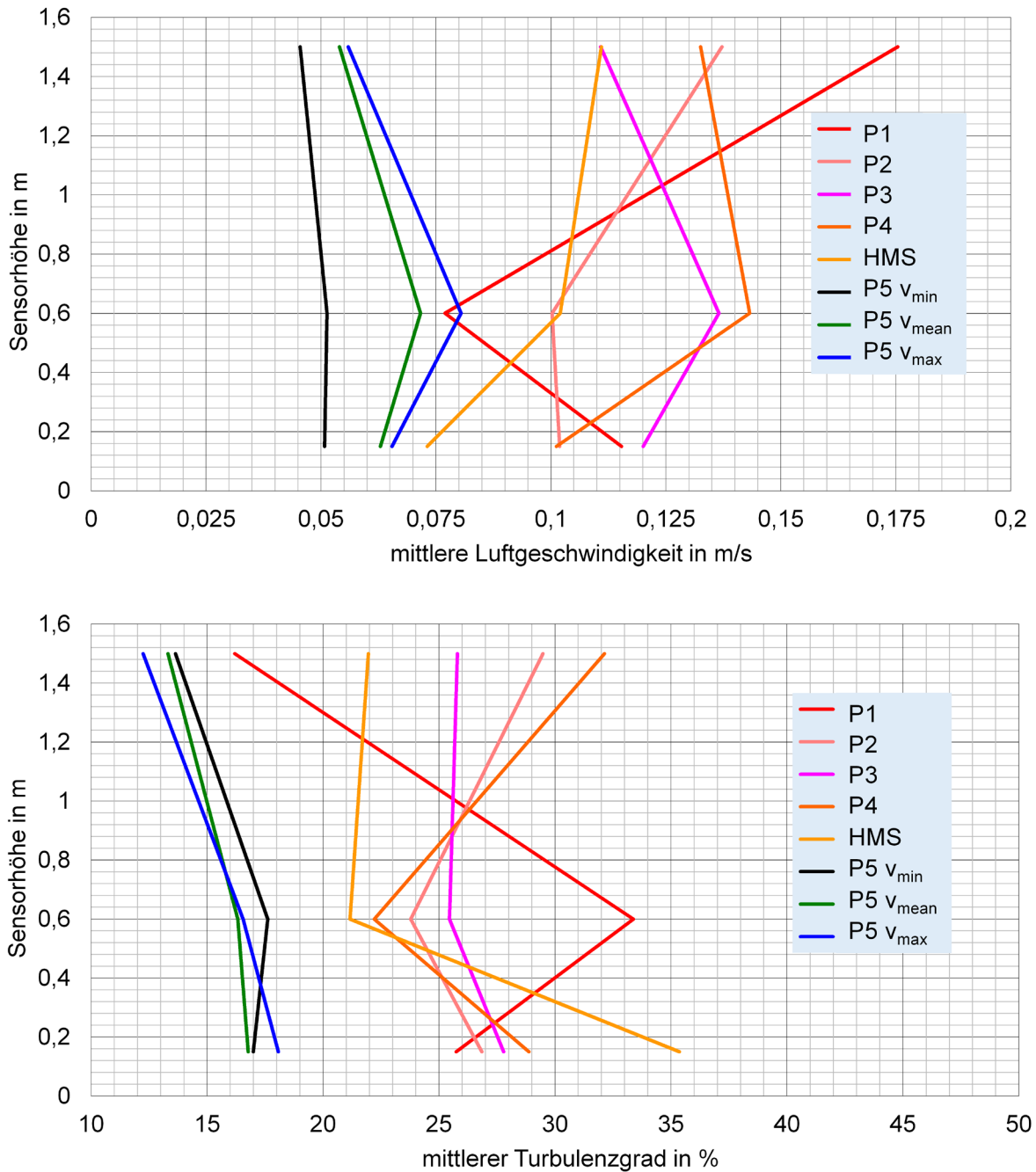
**Abb. 4.3** Platzierung des Messbaumes mit drei Geschwindigkeitssonden während der Testmessungen.

Abb. 4.4 zeigt die Höhenprofile der Luftgeschwindigkeit und des Turbulenzgrades in der Strömung. Dabei gilt je ein Profil pro Messplatz in der großen Klimakammer und drei Profile für den Messplatz in der Klimabox (Aufzeichnung für die unterschiedlichen Einstellungen des Lüftungsvolumenstromes in der Klimabox).

Die Profile innerhalb der Klimakammer wurden bei einer Zuluftgeschwindigkeit von ca. 1,6 m/s erfasst. Für die Klimabox sind drei Profile bei verschiedenen Zuluftvolumenströmen dargestellt.

Die Luftgeschwindigkeiten in der Klimabox liegen konsistent unter 0,1 m/s. Die Turbulenzgrade betragen hier weniger als 20 %. Die Strömung ist sehr impulsarm und langsam, was dem Strömungsbild einer Quelllüftung entspricht.

Die Geschwindigkeitsprofile in der Klimakammer liegen im Allgemeinen über 0,1 m/s. Die höchsten Werte kommen von der Messstelle in der Nähe des Hautmessstandes (HMS) in einer Höhe von 0,15 m und vom Platz P1 in einer Höhe von 0,6 m. Der Platz P1 weist durch die großräumige Zirkulation der Raumluftströmung zudem die größte Variation der Geschwindigkeitsbeträge aus. Die Geschwindigkeit erreicht in 1,5 m Höhe fast 0,18 m/s und es zeigt sich ein sehr inhomogenes, für eine Aufenthaltszone mit Mischlüftung eher untypisches Geschwindigkeitsprofil.



**Abb. 4.4** Höhenprofile der mittleren Luftgeschwindigkeit und des mittleren Turbulenzgrades der Luft über Bilanzräume von 10 Sekunden. Arbeitsplätze P1-P5 und Hautmessstand (HMS) gemäß Abb. 4.3. P1 bis P4 sowie HMS gemessen in der großen Klimakammer;  $v_{\min}$ ,  $v_{\text{mean}}$  und  $v_{\max}$  gemessen bei verschiedenen Luftvolumenströmen in der Klimabox (P5)

An den verbleibenden Plätzen P2-P4 herrschen Luftgeschwindigkeiten zwischen 0,1 m/s und 0,15 m/s. Die Turbulenzgrade liegen für alle Messstellen in der Klimakammer konsistent über 20 %. Die Strömungsverhältnisse an den Plätzen P2, P3 und P4 können als repräsentativ für die Mischlüftung bezeichnet werden.

**Fazit:**

Das Strömungsmuster um die Arbeitsplätze an den Messstellen P2, P3 und P4 in der großen Klimakammer kann als Mischlüftung klassifiziert werden.

Die Verhältnisse am Platz P1 und am Hautmessstand deuten auf eine relativ starke und potenziell instabile Durchströmung dieses Teils der Klimakammer hin. Dies kann Zuglufterscheinungen an den benachbarten Arbeitsplätzen zur Folge haben.

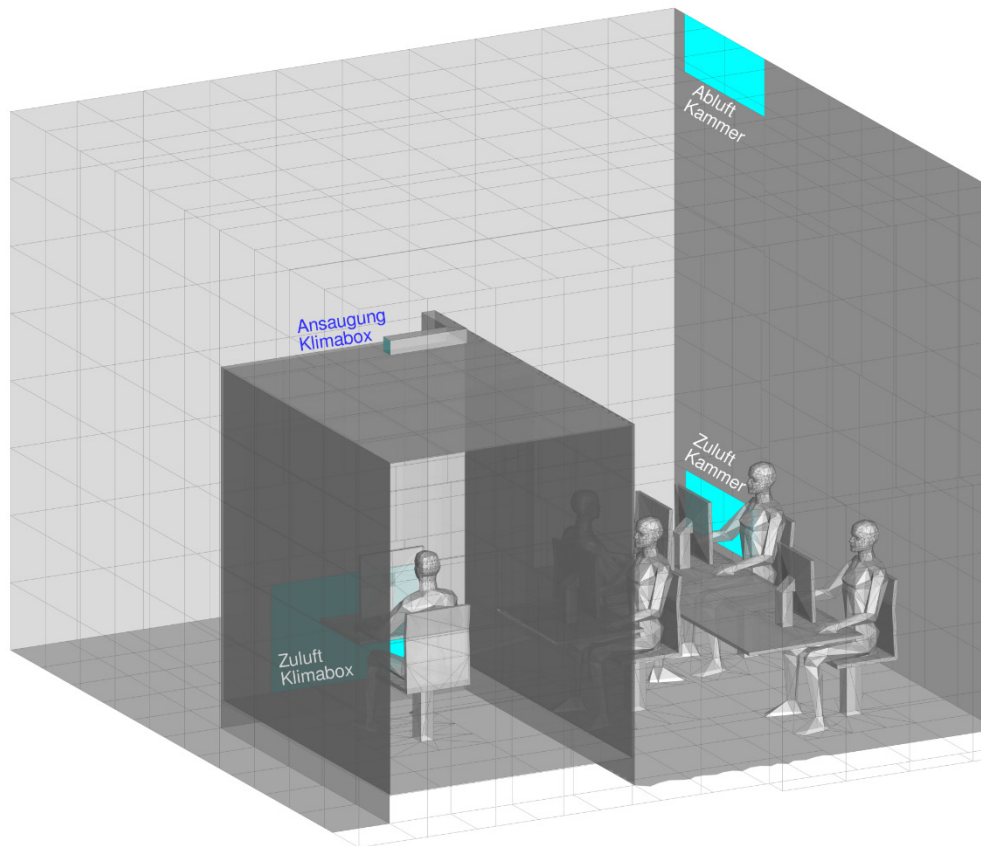
Das Strömungsmuster am Arbeitsplatz in der Klimabox kann als Quelllüftung klassifiziert werden.

## **4.2 Aufbau des finalen Simulationsmodelles, gekoppelte Berechnungen und Vergleich mit Messdaten**

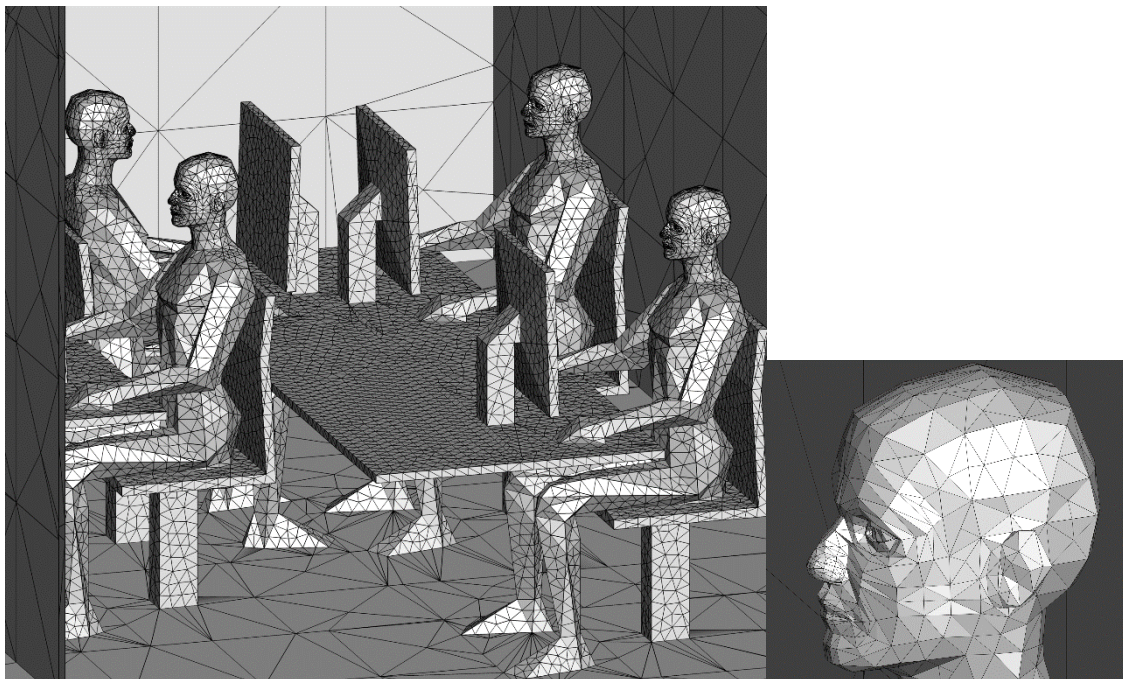
Der Umbau der Klimakammer mit dem dazugehörigen Neuaufbau der Klimabox bedingte auch einen vollständigen Neuaufbau des geometrischen Simulationsmodelles, da alle Informationen nicht nur bilanziell sondern detailliert geometrisch verarbeitet werden. Auch in diesem Modell wurden die Probanden wieder sehr detailliert nachgebildet, um den Szenarien in den Probandenversuchen möglichst nahe zu kommen, siehe Abb. 4.5 und Abb. 4.6. Dies betrifft neben der geometrischen Nachbildung auch den zeitlichen Verlauf des Untersuchungsplanes (Abb. 6.3, zwischen 8:40 Uhr und 14:40 Uhr). Auf diese Weise wurden die variablen Anwesenheitszeiten der Probanden (Positionen und Anzahl durch Aktivierung bzw. Deaktivierung der jeweiligen Personenmodelle und der personenbezogenen Feuchtequellen) und die dazugehörigen technischen Geräte in Kammer und Box berücksichtigt. Für vergleichende Betrachtungen der Probandenversuche und der Simulationen wurden zudem die drei Temperatur- und Feuchtesensoren (zwei in der Kammer und einer in der Box) an exakt den gleichen Positionen modelliert, an denen sie während aller Versuche positioniert waren.

Aufgrund der während der Probandenversuche gemessenen, im Zeitverlauf sehr inhomogenen und schwankenden Zuluftparameter (infolge der Temperaturregelung der Kammer) wurde entschieden, in den Simulationen mit konstanten Zulufttemperaturen und Zuluftfeuchten zu arbeiten, die die gewünschten Temperaturwerte von 20 °C bzw. 24 °C in den Aufenthaltsbereichen in etwa erreichen, bzw. die den Mittelwerten der Messdaten aller jeweiligen Probandenversuche möglichst nahe kommen. In diesem Falle waren das 19 °C und 23 °C (jeweils bei einer relativen Luftfeuchte von 22 % bzw. 44 %), was letztlich auch in etwa den mittleren Zuluftparametern bei den Versuchen entsprach.

Es wurden alle vier Szenarien der Probandenversuche simuliert. Aufgrund der Vielzahl der verfügbaren Resultate erfolgt eine detaillierte Bewertung der Ergebnisse hier beispielhaft anhand der Konstellation 24 °C und 20 % r.F im Aufenthaltsbereich. Die Darstellung der Feldgrößen der Simulationsergebnisse erfolgt für 12 Uhr, also zu einem Zeitpunkt mit maximaler Personenbelegung.



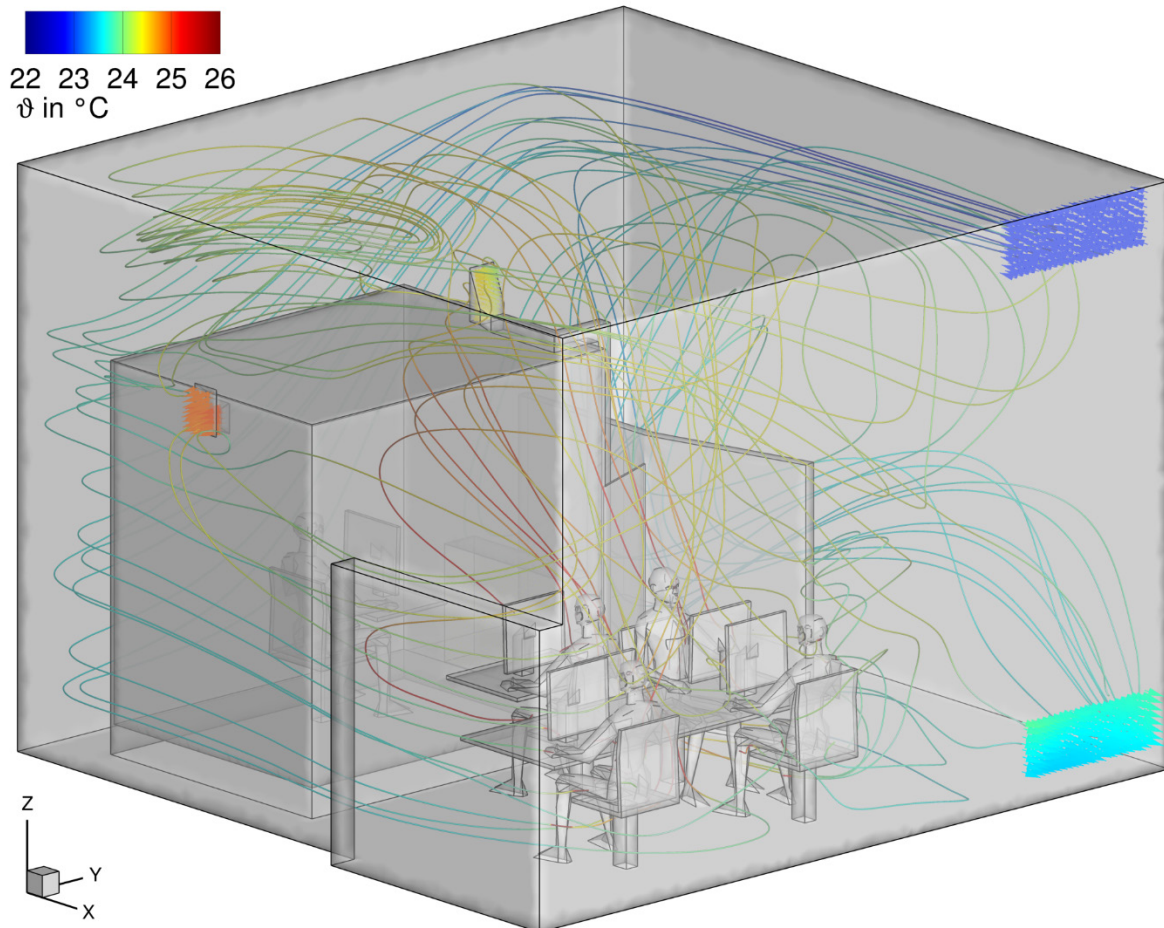
**Abb. 4.5** Geometrisches Modell der Klimakammer (mit Segmentierung der Flächen für Randbedingungs-austausch und Strahlungswärmeübertragung) der BAuA in Dortmund, Blick ins Innere der Klimabox und der Klimakammer.



**Abb. 4.6** Modellierte Personen in der Klimakammer und Kopfbereich im Detail mit Oberflächenvernetzung.

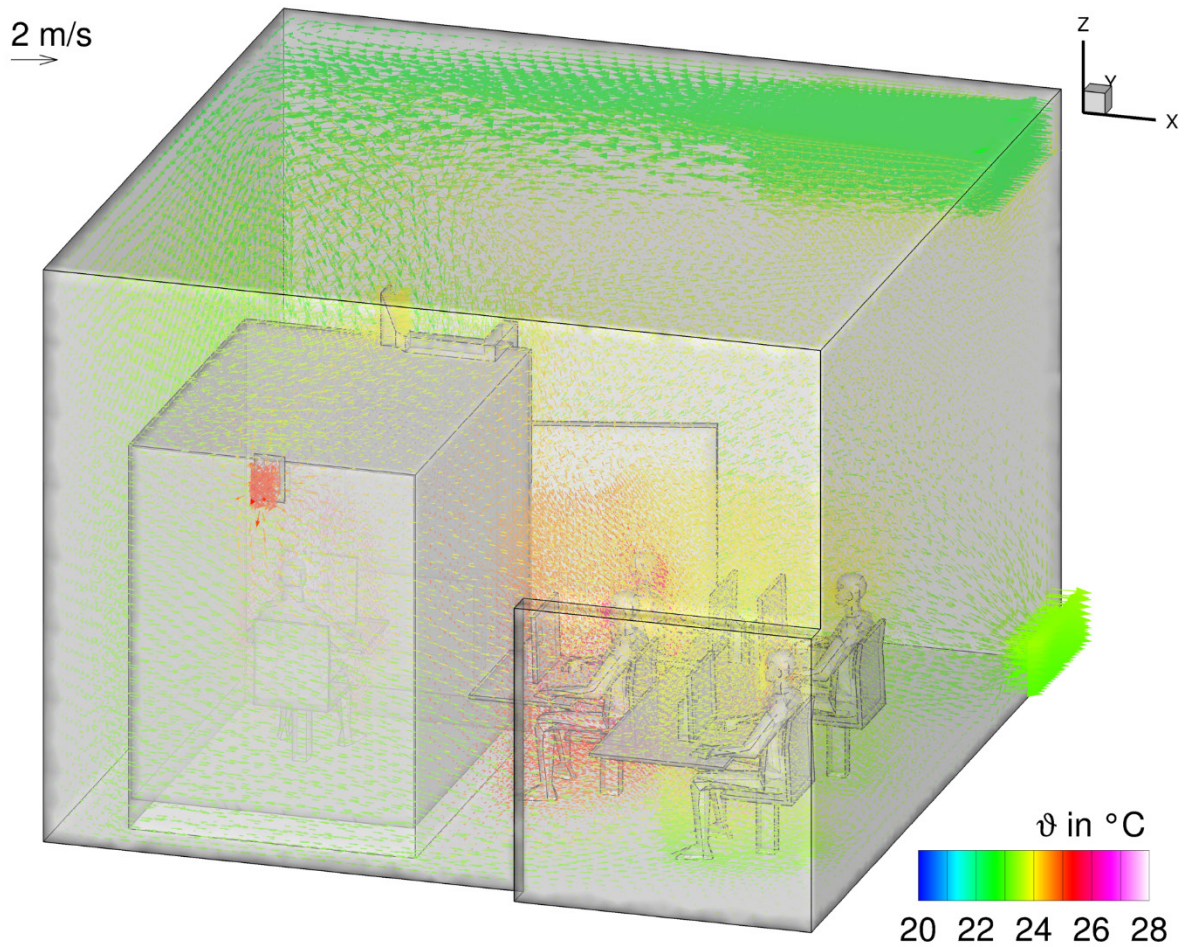


Es ist in Abb. 4.7 und Abb. 4.8 erkennbar, dass die Zuluft für die Klimabox weiterhin aus der Klimakammer entnommen wird. Mit der Annahme idealer Durchmischung, die auch messtechnisch weitgehend nachgewiesen werden konnte, ist diese Vorgehensweise gerechtfertigt. Zudem zeigt die Darstellung des Strömungsfeldes in der Kammer einen durch die Personen bedingten deutlichen Anstieg der Lufttemperaturen in weniger gut belüfteten Bereichen (Arbeitsplätze direkt hinter der Box).

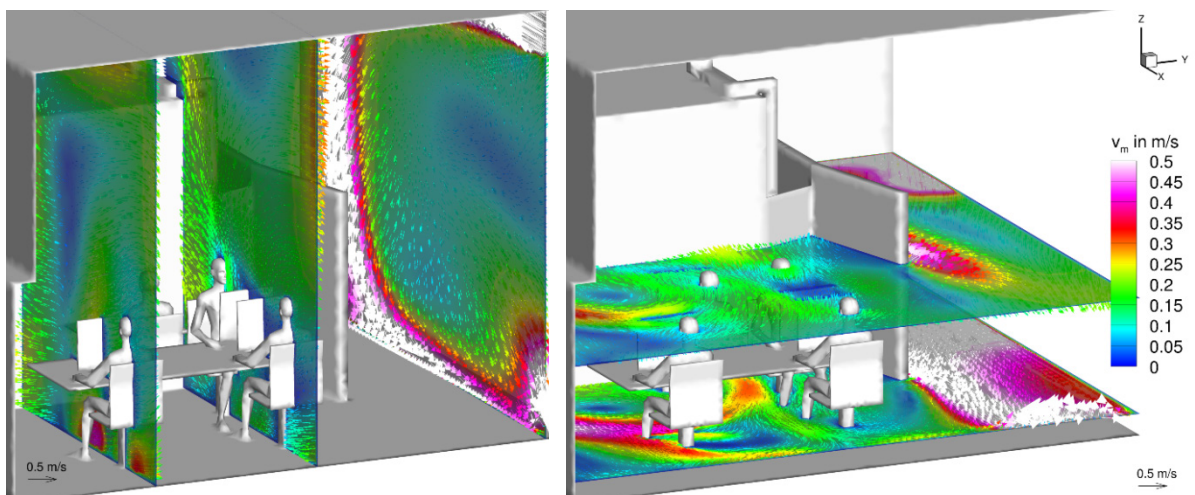


**Abb. 4.7** Kennzeichnung der Zu- und Abluftöffnungen sowie der Luftführung (über Strömungsvektoren und Stromlinien) im geometrischen Modell der Klimakammer der BAuA in Dortmund (Luftansaugung für die Klimabox oberhalb der Box).

Es ist darüber hinaus zu erkennen, dass die in der hinteren oberen Ecke eintretende Zuluft den Raum intensiv durchspült und eine deutliche Tiefenwirkung um die Klimabox herum erreicht. Die sich ausbildende Zuluftwalze wird dabei von der aufgestellten Abschirmung der Probanden gut abgelenkt, siehe Abb. 4.8. Die Zuluft teilt sich an der der Zuluftöffnung gegenüber liegenden Wand in einer Weise, dass ein Teil der Luft um der Klimabox strömt und neben der Klimabox in die Aufenthaltszone der Probanden mit immer noch erheblichem Impuls eintritt, das ist im Abb. 4.9 im rechten Bild, unten, zu sehen.



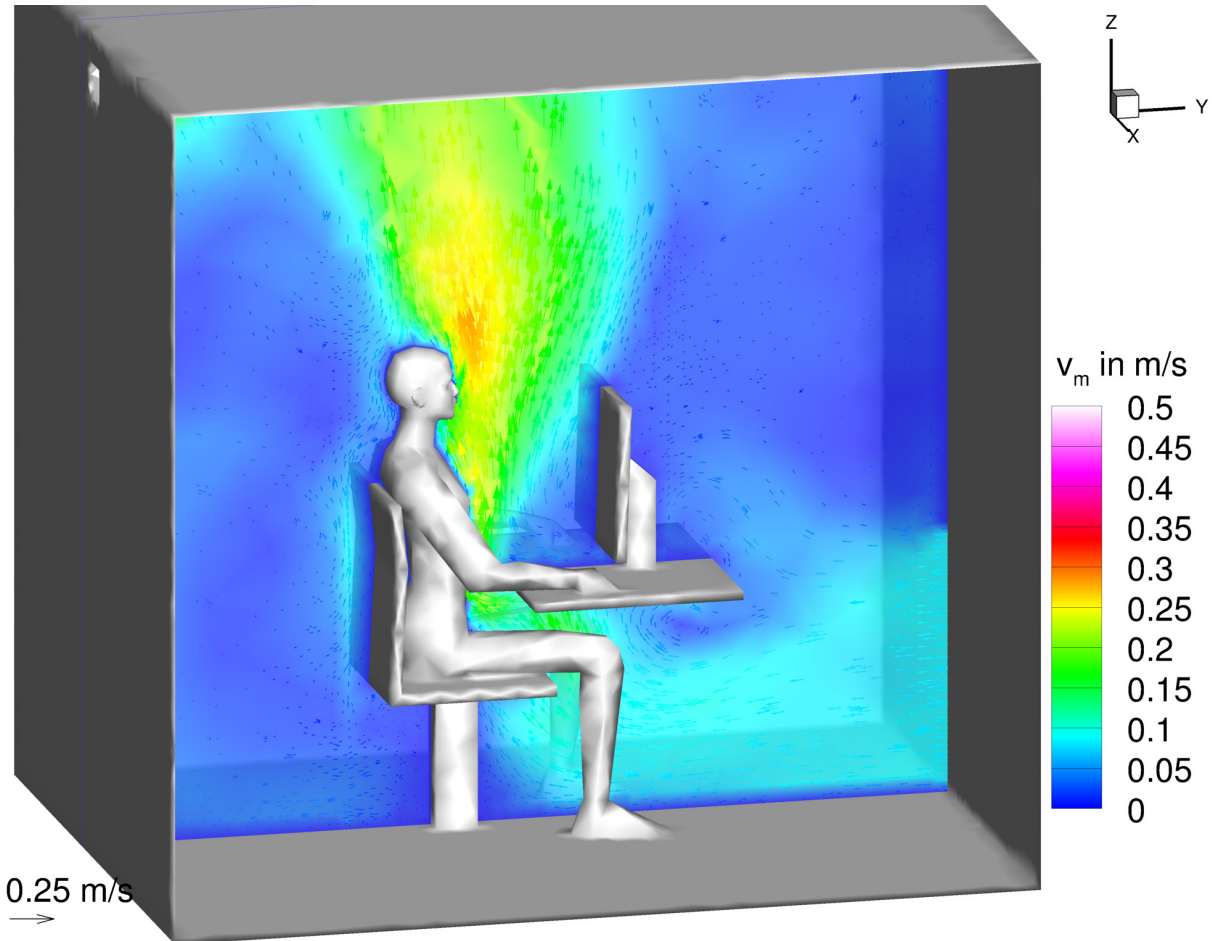
**Abb. 4.8** Geometrisches Modell der Klimakammer der BAuA in Dortmund, entsprechend der Lufttemperatur eingefärbtes Geschwindigkeitsfeld.



**Abb. 4.9** Vertikale und horizontale Schnittebenen der resultieren Geschwindigkeit in der Klimakammer mit Geschwindigkeitsvektoren (Farbe entspricht resultierender Geschwindigkeit).

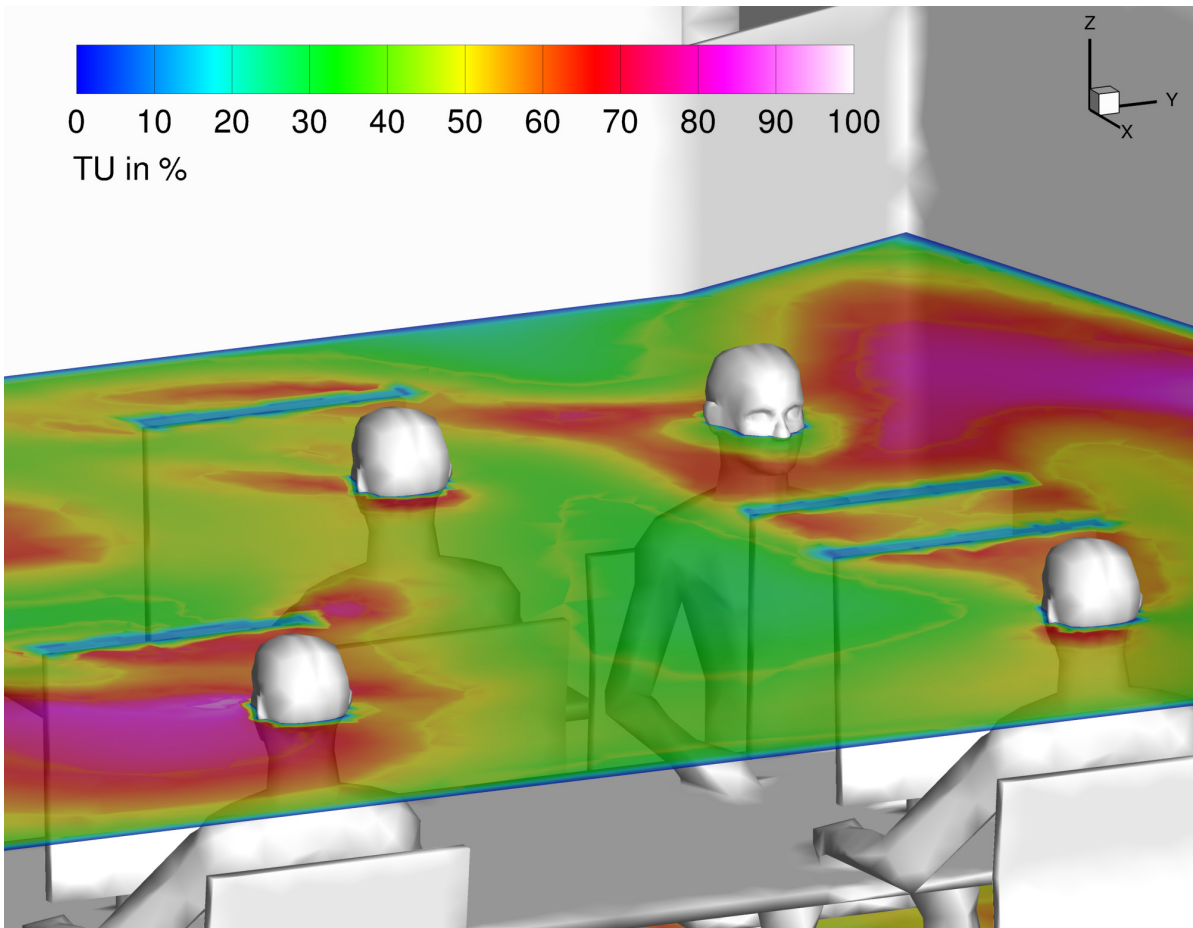
In der Klimabox hingegen ist eine typische Quelllüftung sichtbar, siehe Abb. 4.10. Die dem Raum entnommene Zuluft wird über einen Quellluftauslass dem Probanden zugeführt, in dessen Auftriebsströmung weiter erwärmt und in den oberen Teil des Raumes abgeführt.

Insofern sind auch in der Simulation die bewusst gestalteten unterschiedlichen Strömungsformen in Klimakammer und Klimabox eindeutig identifizierbar.

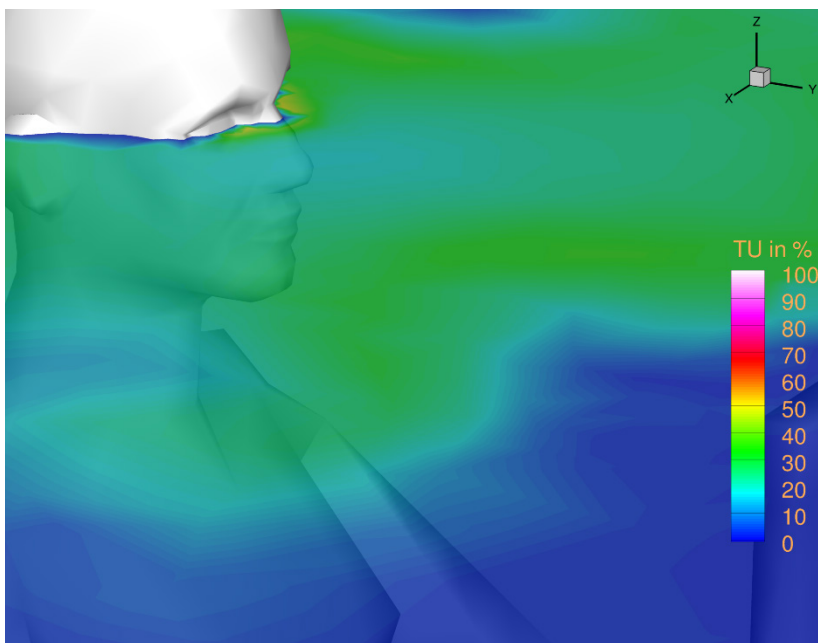


**Abb. 4.10** y-z-Schnittebenen der resultieren Geschwindigkeit in der Klimabox.

Neben der Strömungsform ist auch der in der Strömung vorliegende Turbulenzgrad von Interesse, da dieser ebenfalls Einfluss auf die Austauschvorgänge zwischen Raumluft und Probanden hat. Dementsprechend werden die entsprechenden Werte in Abb. 4.11 und Abb. 4.12 in Schnittebenen im Kopfbereich gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Mischlüftung in der Klimakammer einen höheren Turbulenzgrad erzeugt als die Quelllüftung in der Klimabox. Das entspricht so auch den Erwartungen.



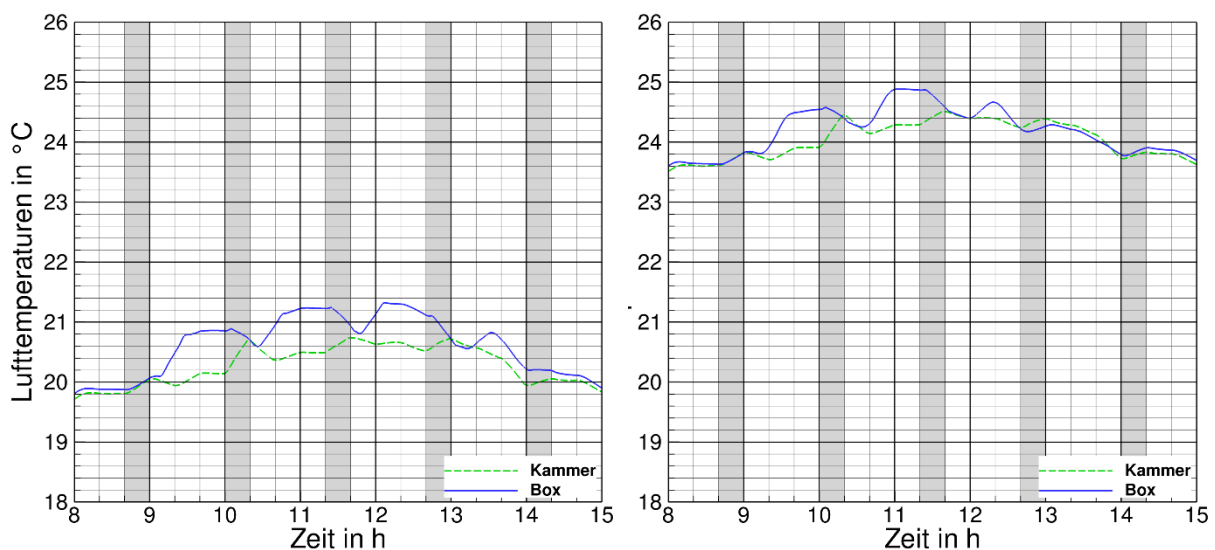
**Abb. 4.11** x-y-Schnittebene des Turbulenzgrades der Raumluftrömung in der Klimakammer im Kopfbereich der Probanden.



**Abb. 4.12** x-y-Schnittebene des Turbulenzgrades der Raumluftrömung in der Klimabox im Kopfbereich des Probanden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse ausgewählter Messungen während der Probandenversuche in der Klimakammer und der Klimabox mit den Ergebnissen der durchgeführten gekoppelten Simulationen verglichen. Zuerst erfolgt der Vergleich ausgewählter Messreihen mit den Simulationsdaten für die Messpunkte, die in der Klimakammer zwischen den beiden Tischen (zwei Sensoren) und in der Klimabox (ein Sensor) an der Position P5 (siehe Abb. 4.3 und Abb. 6.1) platziert wurden (Sensoren für Temperatur und relative Luftfeuchte).

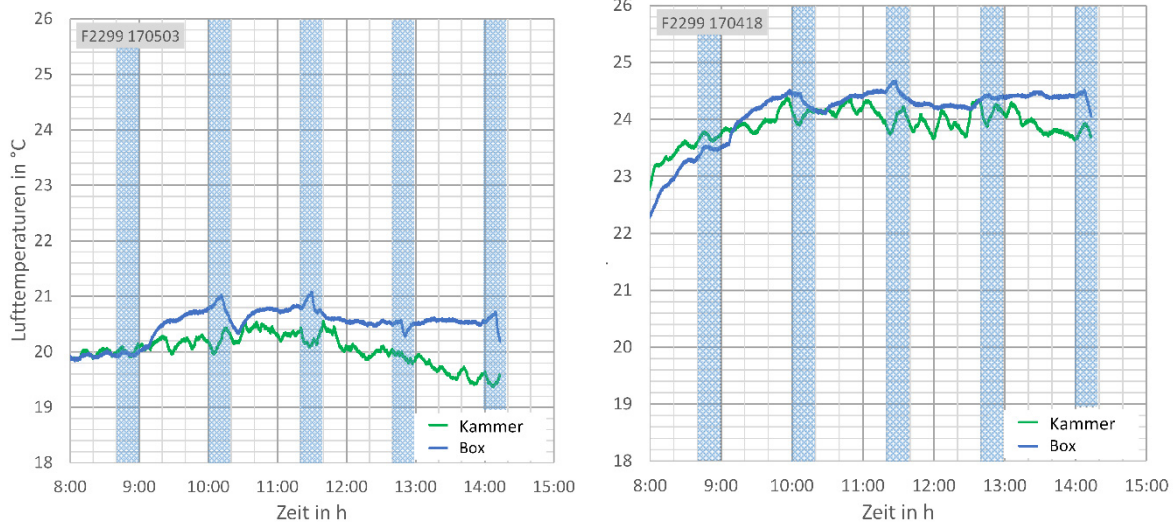
Da die Messreihen in den Probandenversuchen einer breiten Streuung unterliegen, erfolgt der Vergleich hier nachfolgend exemplarisch für Messreihen mit entsprechend ähnlichen Starttemperaturen. In diesem Falle wurden die zwei Probandenversuche F2299-170418 (für 24 °C im Aufenthaltsbereich) und F2299-170503 (für 20 °C im Aufenthaltsbereich) gewählt und den Simulationen mit konstanten Zulufttemperaturen von 19 °C und 23 °C gegenübergestellt, siehe Abb. 4.13 und Abb. 4.14.



**Abb. 4.13** Simulierte Sensortemperaturen für Klimakammer und Klimabox an zwei Messpunkten, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C, rechts für 24 °C (grau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).

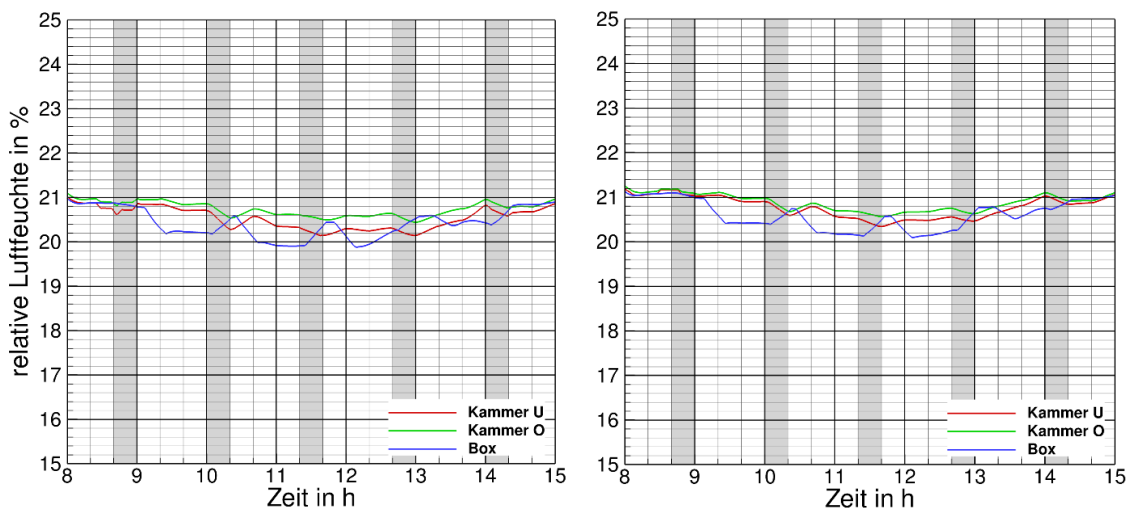
Der Vergleich von simulierten und gemessenen Temperaturen zeigt bei beiden Temperaturniveaus im Falle der Klimakammer eine gute Übereinstimmung sowohl bezüglich der Höhe der Temperaturen als auch bezüglich der zeitlichen Temperaturverläufe. Die in den Diagrammen dargestellten Temperaturen der Sensoren der Klimakammer beziehen sich dabei jeweils auf den oberen Sensor.

Im Falle der Klimabox sind die Abweichungen zwischen Messungen und Simulationen etwas ausgeprägter. Die Temperaturanstiege in der Box sind während der ersten Probandenversuche (Zeit zwischen den farbig unterlegten Bereichen) in etwa vergleichbar, im weiteren Zeitverlauf sind die gemessenen Schwankungen der Temperaturen in der Box jedoch geringer. Die auftretenden etwas höheren Temperaturgradienten in den Simulationen sind die Folge des Personenmodells, das zum einen die Person in der Box sofort aktiviert und zum anderen etwas überhöhte Temperaturwerte des Probanden vorhersagt. Zudem zeigt sich, dass der Untersuchungsplan in den Probandenversuchen nicht exakt eingehalten wurde. Der Temperaturabfall in der Klimabox beginnt bei beiden Versuchen stets 10 Minuten später.



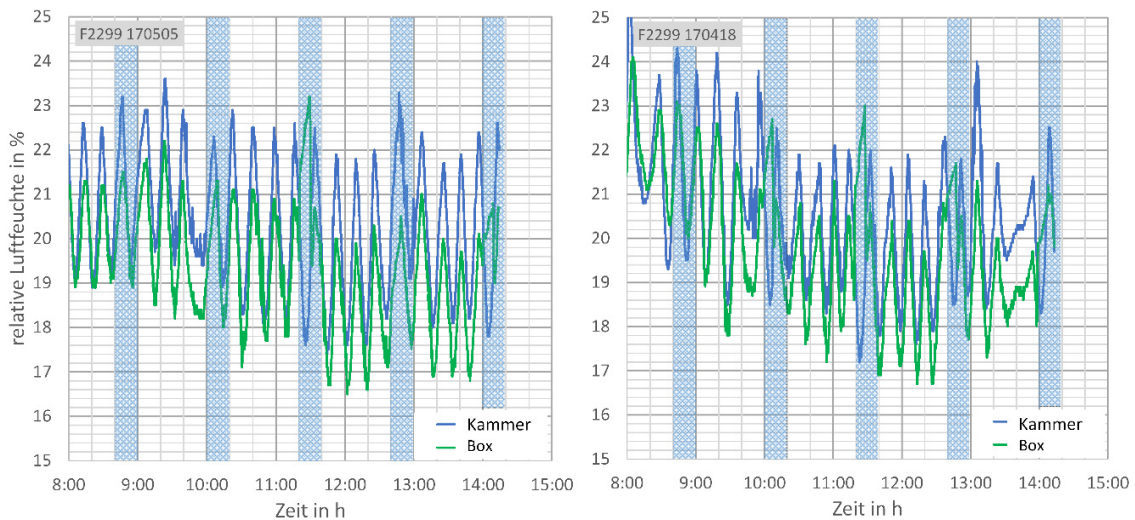
**Abb. 4.14** Gemessene Sensortemperaturen ausgewählter Probandenversuche für Klimakammer und Klimabox an den Messpunkten, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C (3.5.2017), rechts für 24 °C (18.4.2017) (blau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).

Die Betrachtung der Werte der relativen Luftfeuchte zeigt bezüglich der zeitlichen Mittelwerte ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Daten, siehe Abb. 4.15 und Abb. 4.16. Im Falle der Messungen treten allerdings regelungsbedingt erhebliche Schwankungen der Zuluftparameter, insbesondere der relativen Zuluftfeuchte auf, in deren Folge die Messwerte um bis zu 3 % schwingen.



**Abb. 4.15** Simulierte relative Luftfeuchten an den Sensorpunkten für Klimakammer und Klimabox, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C, rechts für 24 °C (grau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).

Anhand der Simulationsergebnisse in der Klimabox sind sowohl die temperaturbedingten Abnahmen der relativen Luftfeuchte als auch die Anstiege infolge der personenbedingten Feuchtequellen erkennbar. Das Simulationsmodell ist somit für Betrachtungen bezüglich des Einflusses der relativen Luftfeuchte ebenfalls gut geeignet.

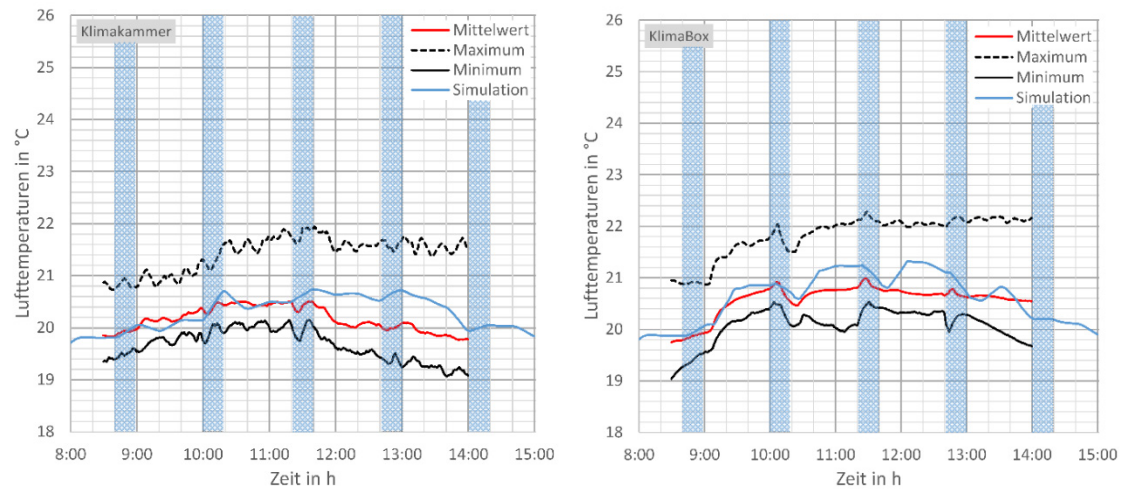


**Abb. 4.16** Relative Luftfeuchten an den Sensorpunkten ausgewählter Probandenversuche für Klimakammer und Klimabox, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C (5.5.2017), rechts für 24 °C (18.4.2017) (blau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).

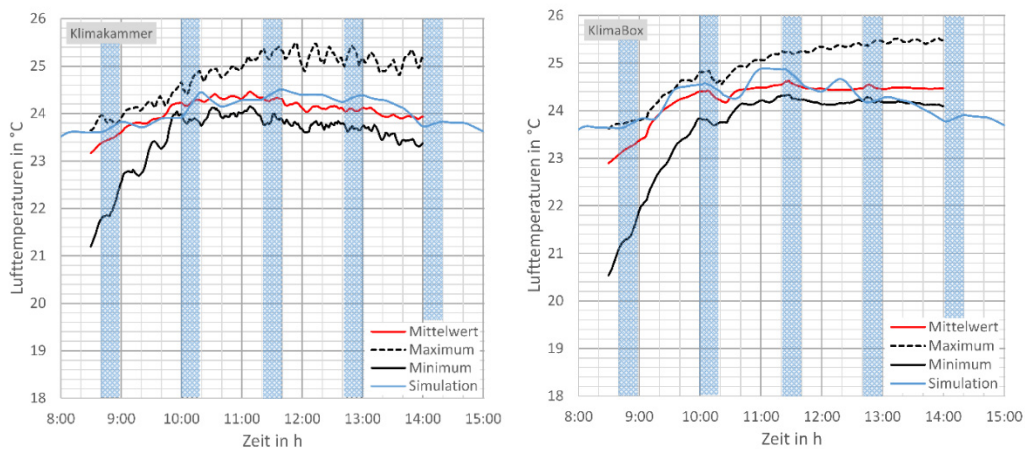
Zusammenfassend ist feststellbar, dass das Simulationsmodell aus strömungstechnischer Sicht sehr gut in der Lage ist, derartige Probandenversuche mit angemessener Genauigkeit abzubilden. Ergänzend muss zudem angemerkt werden, dass ein direkter Vergleich zwischen den Messungen und den Simulationen zusätzlich erschwert wird, da nicht alle Details (z. B. Wärmeabgabe technischer Geräte) der verschiedenen und sich auch wiederholenden Experimente aufgezeichnet werden konnten. Dementsprechend mussten hierfür sinnvolle Annahmen getroffen werden.

Um zu verdeutlichen, wie sich die simulierten klimatischen Bedingungen in die klimatischen Bedingungen während der Probandenversuche insgesamt einordnen, wurde zusätzlich eine Mittelung über alle gleichartigen Experimente (Ensemblemittelung: Kurven „Messung“) mit der Angabe eines entsprechenden Korridors der Streuung der Messdaten (schwarze Linien) durchgeführt, siehe Abb. 4.17 bis Abb. 4.20.

Anhand der Daten ist feststellbar, dass die simulierten klimatischen Verhältnisse sehr gut zu den durchgeführten Probandenversuchen passen. Dies gilt für alle betrachteten Feldgrößen. Die in den Simulationen berechneten Sensortemperaturen liegen in nahezu allen Fällen innerhalb der Grenzwerte der Probandenversuche. Gleiches gilt für die Luftgeschwindigkeiten und die Turbulenzgrade an den Sensorpositionen in Abb. 4.19 und Abb. 4.20.

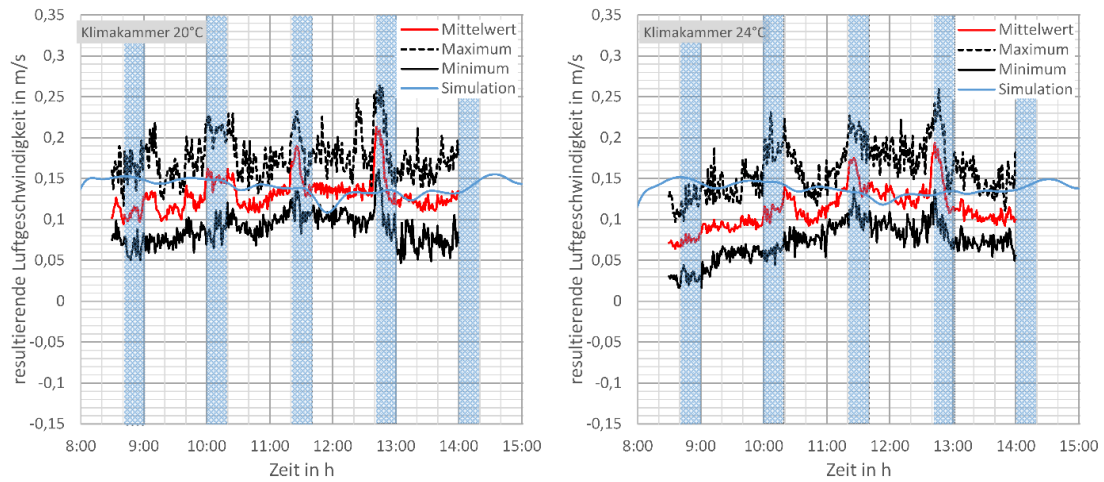


**Abb. 4.17** Zusammenfassung aller Messdaten der Lufttemperatur für den Sensor in der Klimakammer (links) und in der Klimabox (rechts), Temperaturen im Aufenthaltsbereich 20 °C, Darstellung der Minimal-, der Maximal- und der Mittelwerte im Vergleich mit Simulationsdaten.

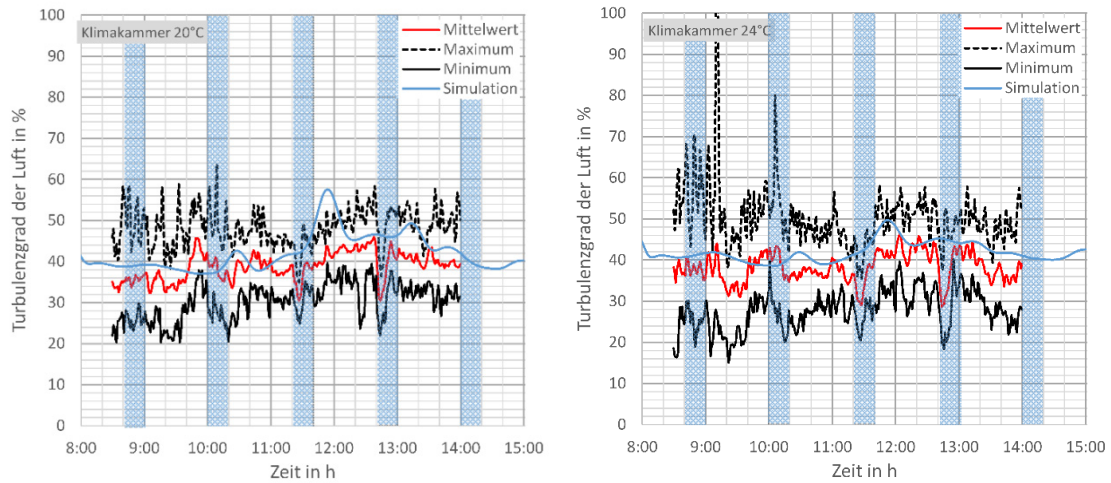


**Abb. 4.18** Zusammenfassung aller Messdaten der Lufttemperatur für den Sensor in der Klimakammer (links) und in der Klimabox (rechts), Temperaturen im Aufenthaltsbereich 24 °C, Darstellung der Minimal-, der Maximal- und der Mittelwerte im Vergleich mit Simulationsdaten.





**Abb. 4.19** Vergleich aller Messdaten (min, max, mittel) und der Simulationsergebnisse der Luftgeschwindigkeit für den Sensor in der Klimakammer, links Temperaturen im Aufenthaltsbereich 20 °C, rechts 24 °C.



**Abb. 4.20** Vergleich aller Messdaten (min, max, mittel) und der Simulationsergebnisse des Turbulenzgrades für den Sensor in der Klimakammer, links Temperaturen im Aufenthaltsbereich 20 °C, rechts 24 °C.

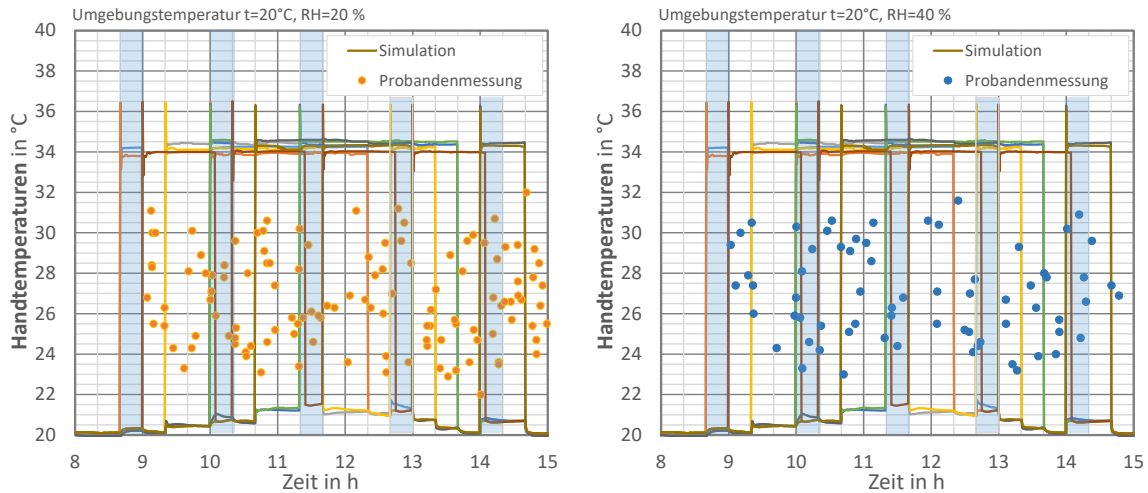
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen, die direkt an den Probanden in der Klimakammer durchgeführt wurden mit den Ergebnissen der Simulationen hinsichtlich der Kopplung mit dem Personenmodell nach (STREBLOW, 2010) verglichen. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den Simulationsdaten um Zeitreihen der vier Probanden in einer Simulation handelt und bei den Messdaten um **alle** durchgeführten Messungen der Probandenuntersuchungen. Die Einordnung der Probandenversuche über der Zeit erfolgt hier per Zufallswert, um eine bessere Sichtbarkeit der einzelnen Messdaten zu erreichen. Anderenfalls wären die Messwerte, die zu festgelegten Zeitpunkten aufgenommen wurden, nur als vertikale Balken sichtbar.

Der Vergleich der Messdaten mit den Ergebnissen der Simulationen zeigt, dass das Personenmodell die Hauttemperatur der Hände deutlich (siehe Abb. 4.21 und Abb. 4.22) und des Kopfes leicht (siehe Abb. 4.23) überschätzt. Die Verdunstungsraten der Hände und des Kopfes werden jedoch gut abgebildet, siehe Abb. 4.24 bis Abb. 4.26. Hierbei ist anzumerken, dass die in den Diagrammen sichtbaren Sprünge und die dazugehörigen Werte im Raumtemperaturbereich durch die wechselnden Anwesenheitszeiten der Probanden hervorgerufen werden. Sind die Probanden abwesend, wechseln die Körperteile des jeweiligen Personenmodells für den entsprechenden Zeitraum auf Raumtemperatur.

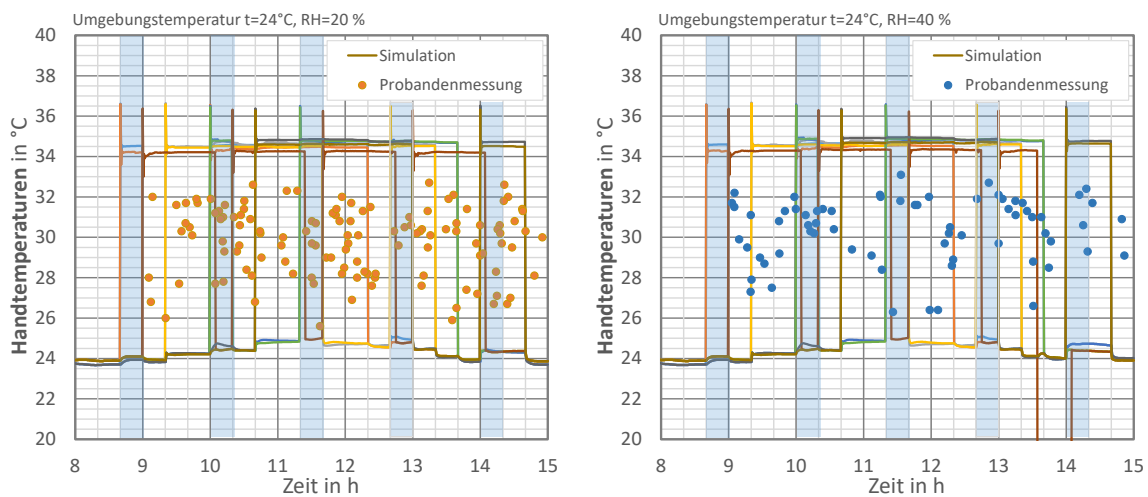
Wie die dargestellten Abbildungen zeigen, bildet das Modell nach (STREBLOW 2010) das Verhalten des menschlichen Körpers hinsichtlich der jeweiligen Körpertemperaturen quantitativ nur bedingt ab. Die qualitativen Änderungen der Verdunstungsraten und Hauttemperaturen lassen sich dagegen gut bis sehr gut erfassen.

Bei der Betrachtung der Änderungen der Verdunstungsraten in Abhängigkeit von den Änderungen der Umgebungsparameter zeigte sich, dass manche Tendenzen gegenläufig sind. Diese teilweise gegenläufigen Tendenzen der Verdunstungsraten zeugen davon, dass die im Model von (STREBLOW 2010) angenommene Abhängigkeit der Verdunstungsrate vom Gradienten des Partialdruckes des Wassers bei der Temperatur der Hautoberfläche und bei der Lufttemperatur zu stark vereinfacht ist. Es kann postuliert werden, dass die zur Verfügung stehende Wassermenge an der Hautoberfläche nicht immer gleich ist, sondern auch in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und potenziell auch anderen Faktoren variiert.

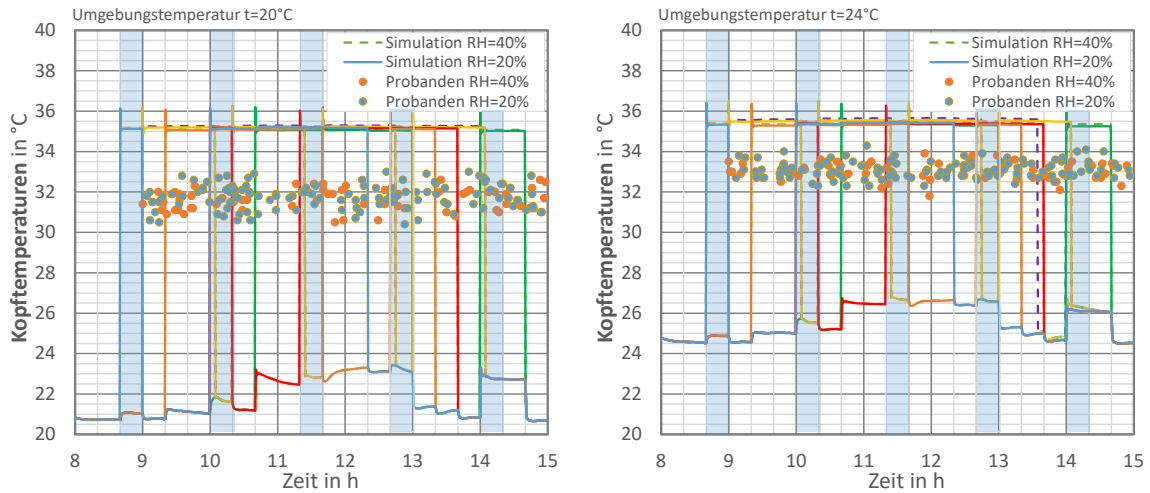
Die Unterschiede zwischen Misch- (Klimakammer) und Quell- (Klimabox) Lüftung werden beim Vergleich von Mess- und Simulationsdaten bezüglich der erreichten Hauttemperaturen und Verdunstungsraten nicht herausgearbeitet, sondern das Niveau der berechneten Simulationenwerte für die verschiedenen Situationen mit der Gesamtheit der vorhandenen Messwerte für die betreffende Randbedingungskonstellation verglichen, siehe Abb. 4.21 bis Abb. 4.26.



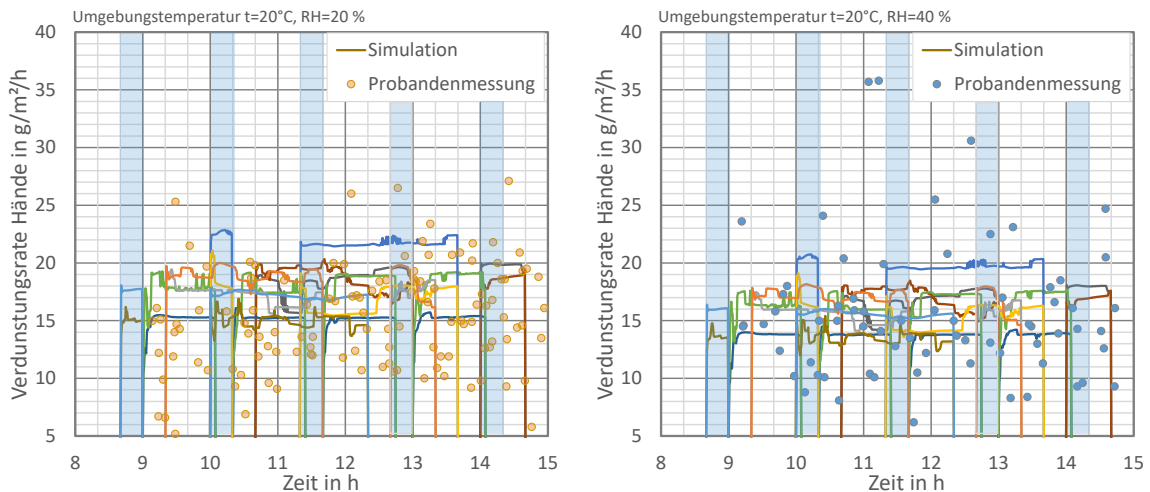
**Abb. 4.21** Vergleich der Hauttemperatur der Hände zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur  $20^{\circ}\text{C}$ , links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von  $20\%$ , rechts bei  $40\%$ . Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien.



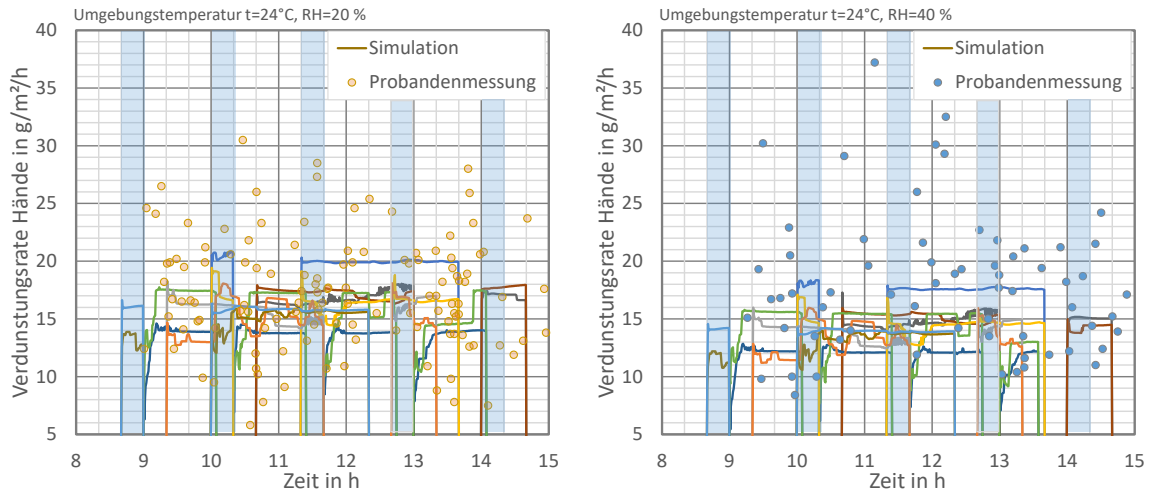
**Abb. 4.22** Vergleich der Hauttemperatur der Hände zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur  $24^{\circ}\text{C}$ , links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von  $20\%$ , rechts bei  $40\%$ . Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien.



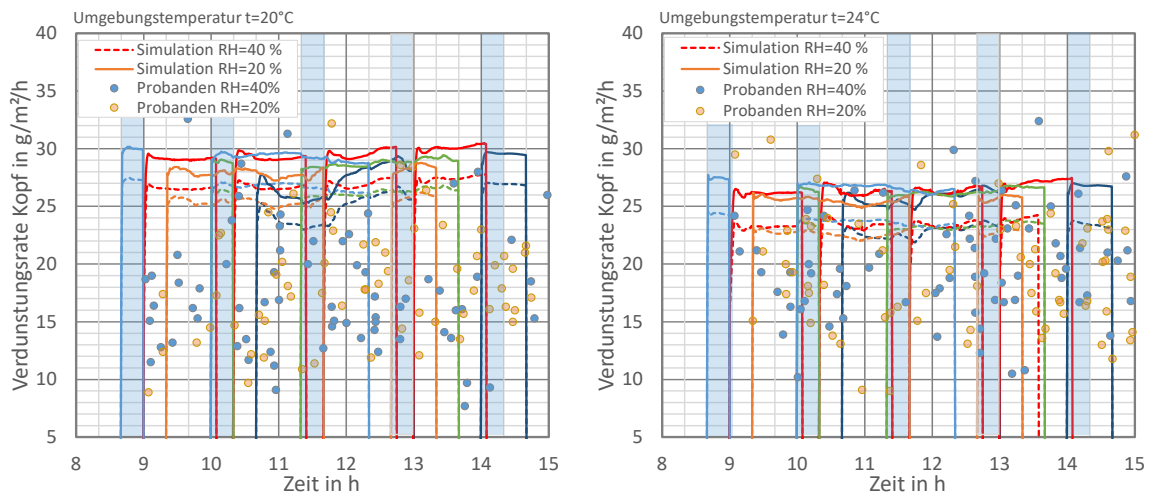
**Abb. 4.23** Vergleich der Hauttemperatur des Kopfes zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010), links für die Umgebungstemperatur 20 °C, rechts für 24 °C, jeweils für beide relativen Luftfeuchtigkeiten der Umgebung. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien.



**Abb. 4.24** Vergleich der Verdunstungsrate der Hände in  $\text{g/h/m}^2$  zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur 20 °C, links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von 20 %, rechts bei 40 %. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien.



**Abb. 4.25** Vergleich der Verdunstungsrate der Hände in  $\text{g/h/m}^2$  zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur  $24\text{ }^\circ\text{C}$ , links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von  $20\%$ , rechts bei  $40\%$ . Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien.

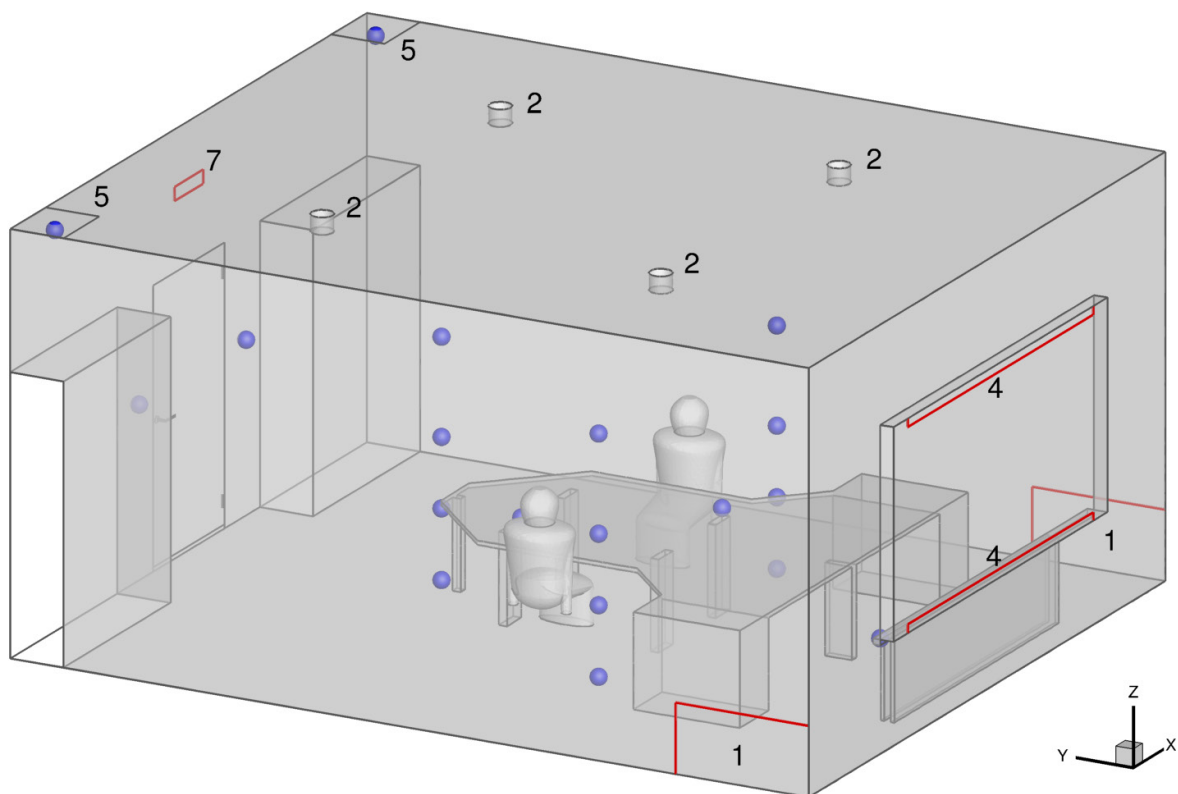


**Abb. 4.26** Vergleich der Verdunstungsrate des Kopfes in  $\text{g/h/m}^2$  zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010), links für die Umgebungstemperatur  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , rechts für  $24\text{ }^\circ\text{C}$ , jeweils für beide relativen Luftfeuchtigkeiten der Umgebung. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien.

### 4.3 Weitergehende Betrachtung unterschiedlicher Klimakonzepte

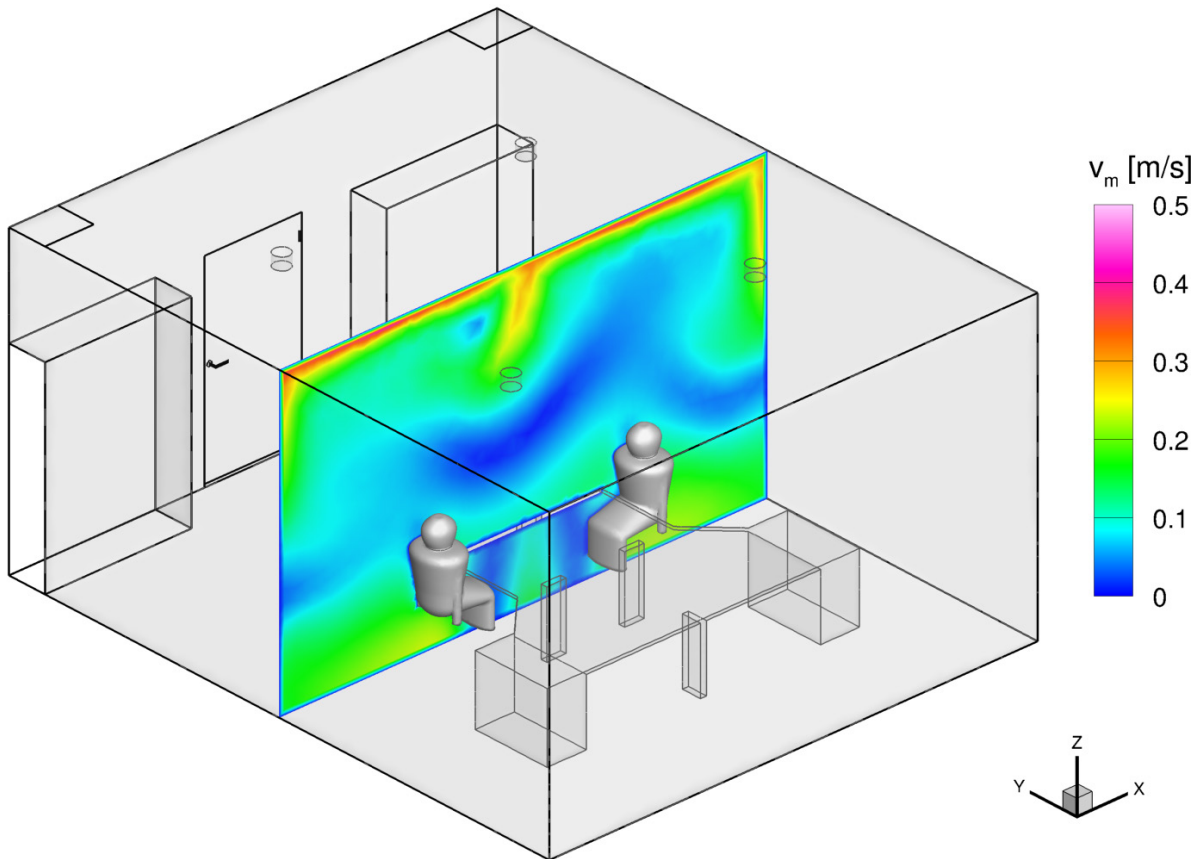
Mit dem Nachweis, dass die Simulation phänomenologisch adäquate Strömungs- und Temperaturverhältnisse liefert, die weitgehend auch mit den messtechnisch ermittelten Werten übereinstimmen, wird nachfolgend eine Extrapolation für verschiedene Szenarien in Büro- (und Wohn-)räumen vorgenommen.

Die Berechnungen wurden analog zur Klimakammer in Dortmund mit gekoppelter Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulation durchgeführt. Der Büroraum aus Abb. 4.27 wurde mit verschiedenen Heizungs- und Lüftungssystemen ausgestattet und für unterschiedliche Wärmeschutzniveaus berechnet.



**Abb. 4.27** Geometrie des gewählten Büroraumes (Grundfläche 5 m x 6 m) für die Raumluftrömungsstudien bei verschiedenen Heizungs- und Lüftungssystemen, mit Kennzeichnung verschiedener Optionen für Zu- und Abluft (1 bis 7) und potentiellen Sensorpositionen (blaue Kugeln).

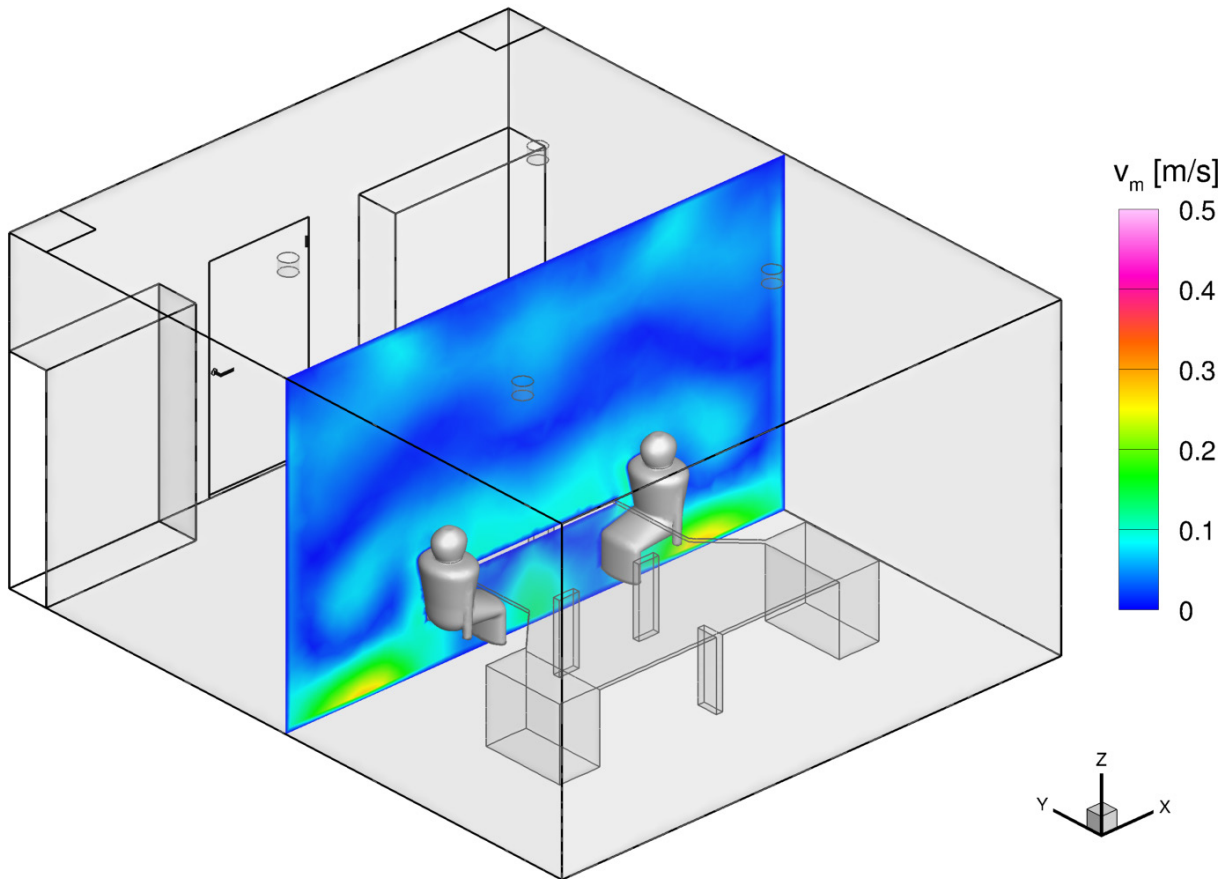
Die folgenden Abbildungen zeigen die Raumluftrömungssituation für einen repräsentativen Donnerstag der Heizperiode jeweils 14:00 Uhr. Die Raumluftrömungssituation wird vorrangig anhand von Schnittbildern der resultierenden Luftgeschwindigkeit diskutiert. Es wird mit einer Lüftungsanlage begonnen, da hier sehr klare Unterschiede in den Luftströmungsverhältnissen aufgezeigt werden können.



**Abb. 4.28** Resultierende Geschwindigkeit bei im x-z- Mittelschnitt bei Lüftung durch Drallluftdurchlässe (Nr. 2 in Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau nach EnEV09, schwere Bauweise.

Drallluftdurchlässe sind sehr oft eingesetzte Luftdurchlässe, die eine sehr gute Durchmischung erzielen. Dementsprechend wird der gesamte Aufenthaltsbereich mit angemessener Luftbewegung beaufschlagt. Die Personen werden gleichmäßig umströmt und die thermischen und hygrischen Einträge im Raum verteilt.

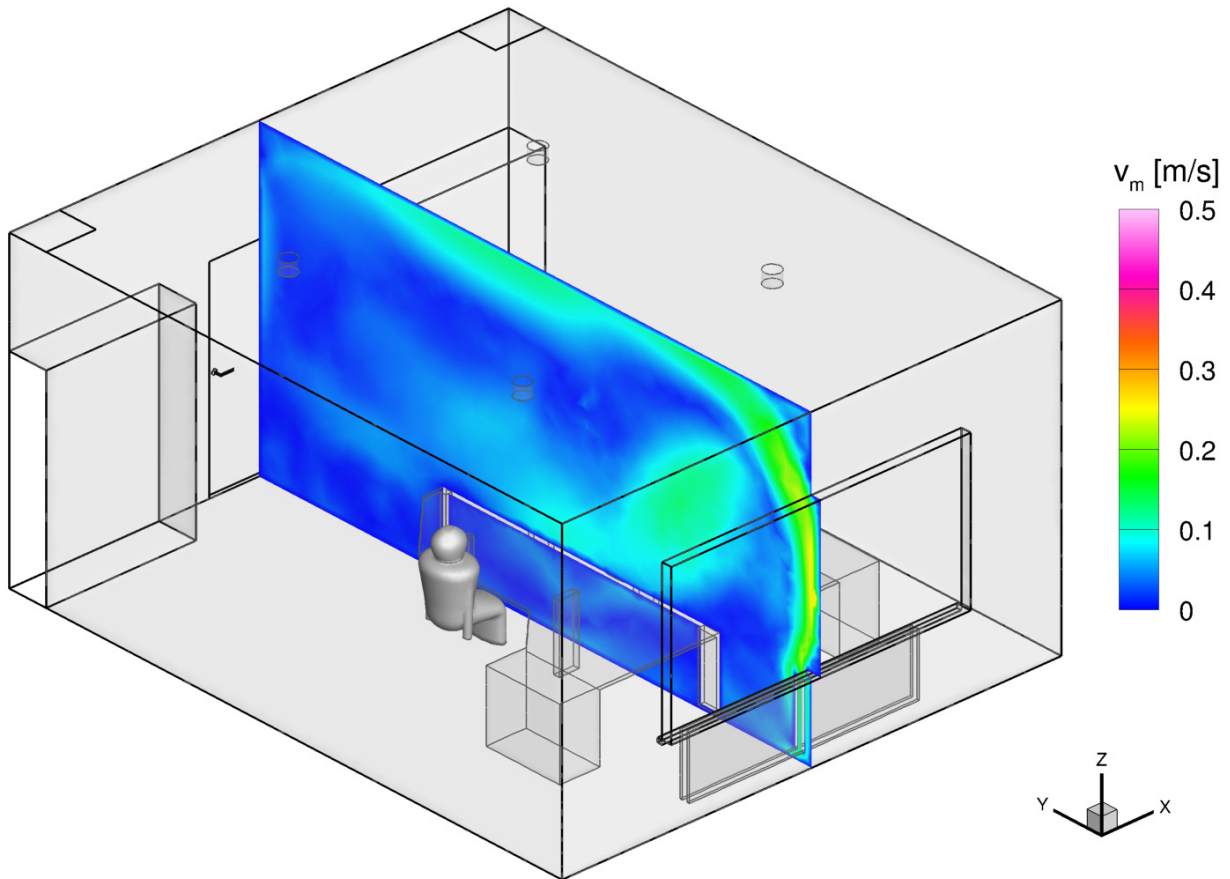
Wenn die Klimaanlage gut eingestellt ist und vorausschauend geregelt wird, sind trotz der intensiven Austauschvorgänge mit der Haut keine Beeinträchtigungen durch Austrocknung von Haut und Augen zu befürchten. Wenn keine Regulierung der Luftfeuchte vorgesehen ist, kommt es voraussichtlich im Sommer zu recht hohen und im Winter zu sehr niedrigen relativen Luftfeuchten, da mit hohen Luftwechslern gearbeitet wird, vgl. dazu (KOZAK et al. 2014).



**Abb. 4.29** Resultierende Geschwindigkeit im x-z- Mittelschnitt bei Quelllüftung (Luftdurchlässe Nr. 1 gemäß Abb. 4.27 aktiv), Wärmeschutzniveau nach EnEV09, schwere Bauweise.

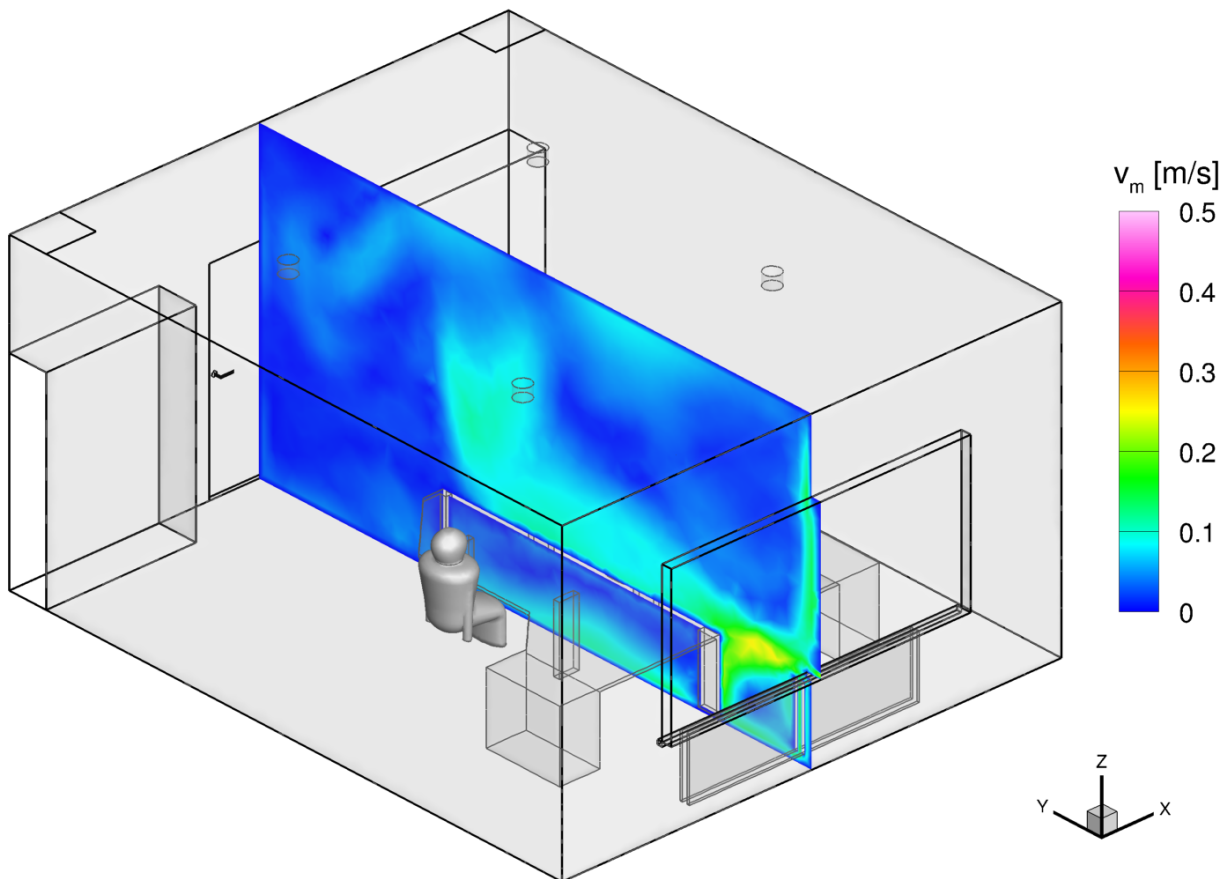
Die bei Quelllüftung vorzufindenden Strömungsverhältnisse sind wesentlich beruhigter als bei Mischlüftung. Das entspricht dem Konzept der Quelllüftung und befördert die Ausbildung von Auftriebsgrenzschichten. Innerhalb dieser Auftriebsgrenzschichten um Personen können Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge relativ ungestört ablaufen. Sofern die Klimaanlage gut geregelt ist, sind keinerlei Beschwerden zu Austrocknungserscheinungen der Haut zu befürchten.





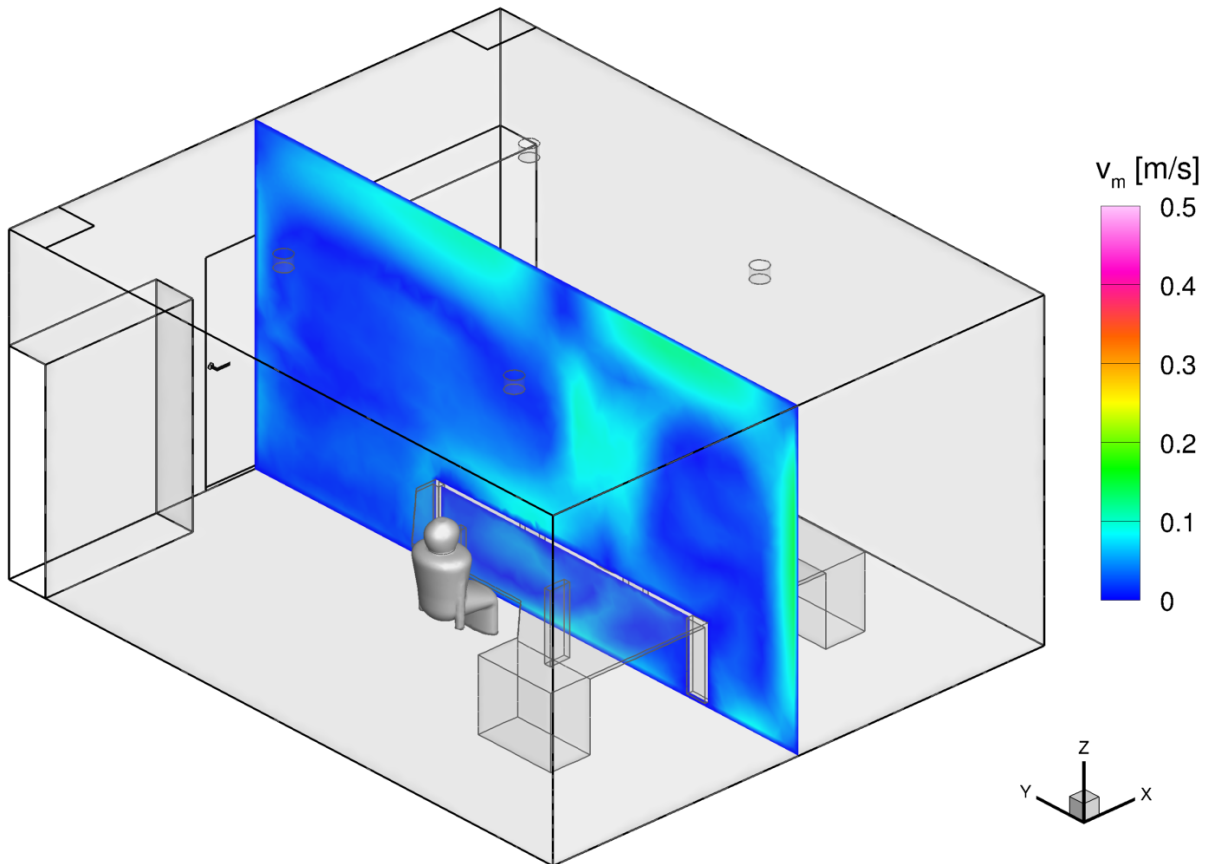
**Abb. 4.30** Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Heizkörperheizung (vgl. Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau: sanierter Altbau.

Der Heizkörper, hier unter dem Fenster angeordnet, erzeugt eine Raumlufthwalze, die je nach abzugebender Leistung, die Luftbewegung in der Aufenthaltszone bestimmt. Die Frischluftzufuhr erfolgt durch intervallweises Öffnen der Fenster. Hier hängt es wesentlich vom Lüftungsverhalten der Nutzer ab, ob, etwa durch zu intensives oder unbedachtes Lüften, die relative Luftfeuchtigkeit im Winter sehr niedrige Werte erreicht.



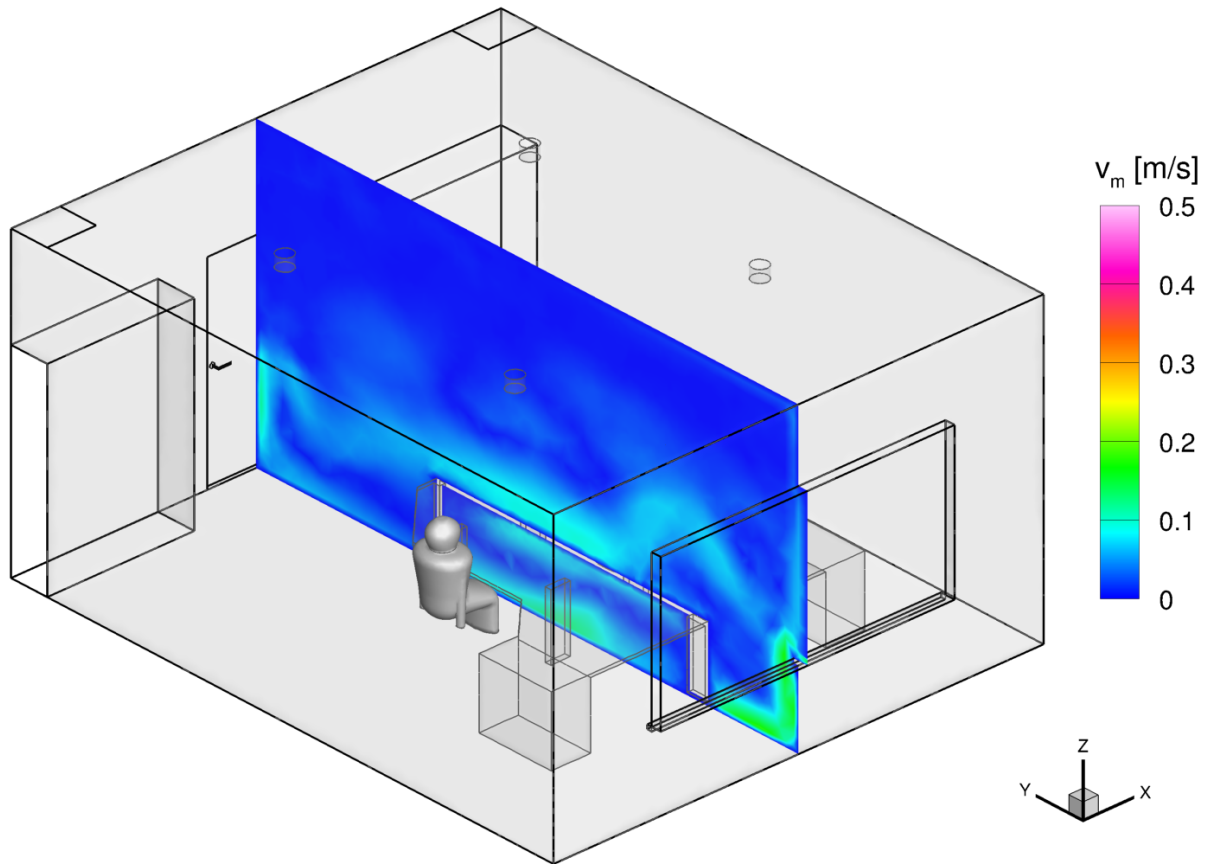
**Abb. 4.31** Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Heizkörperheizung mit ALD zur Lüftung (Nr. 4 unten in Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau: sanierter Altbau.

Wird der Heizkörper mit einem Außenluftdurchlasselement (ALD) kombiniert, welches den hygienisch erforderlichen Zuluftvolumenstrom permanent sichert, bestimmt meist die Strömung durch das ALD das Strömungsmuster im Raum, bzw. in der Aufenthaltszone. Die Zuströmung sollte so erfolgen, dass die thermische Behaglichkeit der Personen allzeit gesichert ist. Die zugeführte Außenluft vermischt sich im vorliegenden Fall mit der vom Heizkörper erzeugten Auftriebsströmung erwärmter Luft und der Fallströmung abgekühlter Luft am Fenster. Der Betrieb des ALD, meist in Zusammenhang mit einer Abluftanlage, entscheidet, natürlich auch abhängig von den Wetterbedingungen, ob im Winter sehr niedrige Werte der relativen Luftfeuchtigkeit auftreten. Eine einfache Sensorik und Regelungstechnik kann diesem Umstand wirksam begegnen.



**Abb. 4.32** Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Fußbodenheizung und Dralluftdurchlässe in der Decke (Nr. 2 in Abb. 4.27) Wärmeschutzniveau EnEV09, leichte Bauweise, Glasfassade.

Eine Fußbodenheizung erzeugt allgemein ein sehr gleichmäßiges Strömungs- und Raumtemperaturfeld. Durch den hohen Strahlungsanteil an der Wärmeübergabe kommt die strömungsinduzierende Konvektion nur wenig zur Wirkung. Im betrachteten Beispiel ist die Fußbodenheizung mit einer Lüftungsanlage mit Dralluftdurchlässen an der Decke kombiniert, die dem Raum das Strömungsmuster aufprägen. Wenn dies unter Sicherung der thermischen Behaglichkeit geschieht und die Klimaanlage hinsichtlich Luftfeuchte gut geregelt ist, sollte es auch im strengen Winter keine Probleme mit trockener Luft geben. Ist die Fußbodenheizung mit Fensterlüftung kombiniert, gelten nahezu analoge Aussagen wie bei der Heizkörperheizung, auch hier ist auf das Lüftungsverhalten zu achten.



**Abb. 4.33** Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Betonkernaktivierung mit ALD zur Lüftung (Nr. 4 unten in Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau EnEV09, schwere Bauweise.

Die Betonkernaktivierung im Fußboden wirkt ähnlich der Fußbodenheizung, ein die thermische Behaglichkeit störender Einfluss auf die Raumluftströmung ist nicht zu erwarten. Wird die Betonkernaktivierung mit einem Außenluftdurchlasselement (ALD) kombiniert, welches den hygienisch erforderlichen Zuluftvolumenstrom permanent sichert, bestimmt auch hier die Strömung durch das ALD das Strömungsmuster im Raum, bzw. in der Aufenthaltszone. Da kein Heizkörper vorhanden ist, gleitet die kühle Außenluft in den unteren Bereich der Aufenthaltszone. Je nach Betrieb des ALD, meist in Zusammenhang mit einer Abluftanlage, entscheidet sich, natürlich auch abhängig von den Wetterbedingungen, ob im Winter sehr niedrige Werte der relativen Luftfeuchtigkeit auftreten. Die Regelungstechnik, die für Betonkernaktivierung unumgänglich ist und Aml beinhalten sollte, kann diesem Umstand wirksam begegnen.

## 5 Probandenversuche

Gegenstand dieses Kapitels ist die Beschreibung und Auswertung von Probandenversuchen, die in der Klimakammer der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) am Standort Dortmund durchgeführt wurden. Die Organisation und Durchführung der Probandenversuche erfolgte durch die Fachgruppe 2.5: Labor „Produkte und Arbeitssysteme“ mit Unterstützung des Institutes ASER e.V. in Wuppertal.

In Vorversuchen wurde die Messtechnik ebenso wie Durchführung sowie die Anordnung der Arbeitsplätze erprobt und gleichzeitig erste Erkenntnisse zum Zeitverlauf der Zielgrößen ebenso wie zum Einfluss von Umgebungsparametern auf die Zielgrößen gewonnen.

Die Hauptversuche gliedern sich in 2 Versuchsserien mit identischer Versuchsanordnung und -durchführung. Beide Versuchsserien wurden jeweils im Zeitraum Mitte März bis Anfang Mai bei zumeist winterlichen Außentemperaturen durchgeführt.

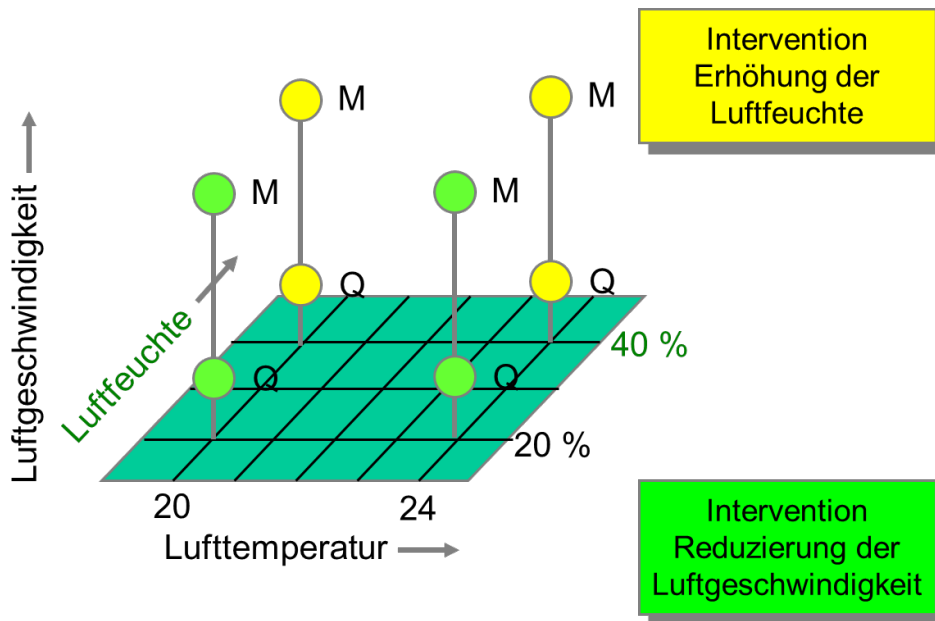
Versuchsserie 1 wurde bei einer relativen Luftfeuchte von 20 %, Versuchsserie 2 bei einer relativen Luftfeuchte von 40 % während der Versuchszeiten durchgeführt. In beiden Versuchsserien wurden 2 Innenraumtemperaturen (20 °C und 24 °C) sowie zwei Lüftungsszenarien (Quell- und Mischlüftung) mit unterschiedlichen mittleren Luftgeschwindigkeiten (gering/erhöht) betrachtet.

Um die resultierenden 8 Bedingungskonstellationen (2 Innenraumtemperaturen, 2 Luftgeschwindigkeiten, 2 relative Luftfeuchten) erfassen zu können, wurden die Versuchsserien organisatorisch auf die Jahre 2017 und 2018 aufgeteilt. Versuchsserie 1 wurde 2017 mit insgesamt 66 Versuchspersonen, Versuchsserie 2 mit einem Sub-Kollektiv von 35 Versuchspersonen 2018 durchgeführt.

Ein im Vorfeld beantragtes Ethik-Votum der Bergischen Universität Wuppertal bestätigte die Unbedenklichkeit der Studie.

Mit den acht gewählten Bedingungskonstellationen konnten so Eckpunkte der Klimabedingungen abgedeckt werden, wie sie an bundesdeutschen Büroarbeitsplätzen in den Wintermonaten zu beobachten sind (s. a. BISCHOF et. al., 2003). Auf diese Studie wird im Folgeabschnitt im Rahmen einer Hintergrundbetrachtung noch näher eingegangen.

Diese Eckpunkte können wie in Abb. 5.1 grafisch dargestellt veranschaulicht werden.



**Abb. 5.1** Untersuchte Klimabedingungen (grün/vorn: Versuchsserie 1, gelb/hinten: Versuchsserie 2).

Wie Abb. 5.1 ebenfalls veranschaulicht, kann das gewählte Versuchsdesign auch als 2 Interventionen (Erhöhung der relativen Luftfeuchte und Reduzierung der Luftgeschwindigkeit) interpretiert werden, die für die gewählten Lufttemperaturen einzeln und gemeinsam untersucht werden.

## 5.1 Zum Hintergrund

In einer umfangreichen Feldstudie um die Jahrtausendwende (BISCHOF et. al., 2003) wurden insgesamt 14 Gebäude und annähernd 1.500 Arbeitsplätze mess- und befragungstechnisch untersucht, um weitergehende Erkenntnisse zu Expositionen und gesundheitlichen Beeinträchtigungen in Büroräumen zu erzielen.

Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchungen für die Messgrößen Lufttemperatur (Tabelle 5.1) und relative Luftfeuchte (Tabelle 5.2) an den betrachteten Arbeitsplätzen. Markiert sind dabei jeweils die Wertebereiche nach den Unterscheidungsmerkmalen Klimatisierung und Saison. Dabei zeigt sich für natürlich belüftete Räume ein gegenüber klimatisierten Räumen um ca. 1-1,5 °C geringeres Temperaturniveau. Die Unterschiede zwischen der kälteren Jahreszeit ( $T_a < 1\text{ °C}$ ) und der wärmeren Jahreszeit ( $T_a > 14\text{ °C}$ ) belaufen sich auf etwa 2 °C.

Betrachtet man die in diesen Untersuchungen ermittelten relativen Luftfeuchten an den betrachteten Arbeitsplätzen (Tabelle 5.2), so finden sich erwartungsgemäß deutliche Unterschiede zwischen klimatisierten und natürlich belüfteten Räumen. Der Unterschied beträgt hier etwa 20 % relative Luftfeuchte. Ebenso finden sich ausgeprägte Unterschiede bei der Betrachtung der kälteren Jahreszeit ( $T_a < 1\text{ °C}$ ) und der wärmeren Jahreszeit ( $T_a > 14\text{ °C}$ ). Bereits das 25. Perzentil weist hier Werte im Bereich von 20 % relative Luftfeuchte aus.

Für die zu im Rahmen dieses Projektes zu untersuchenden Bedingungen kann aus den geschilderten Daten abgeleitet werden, dass eine Raumlufttemperatur von ca. 20 °C und ca. 24 °C bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 20-25 % die Eckpunkte des für Winterbedingungen relevanten Wertebereiches in Büroräumen recht gut spiegeln.

**Tab. 5.1** Deskription der Variable **Lufttemperatur** im Raum nach verschiedenen Merkmalen (aus: BISCHOF et. al., 2003)

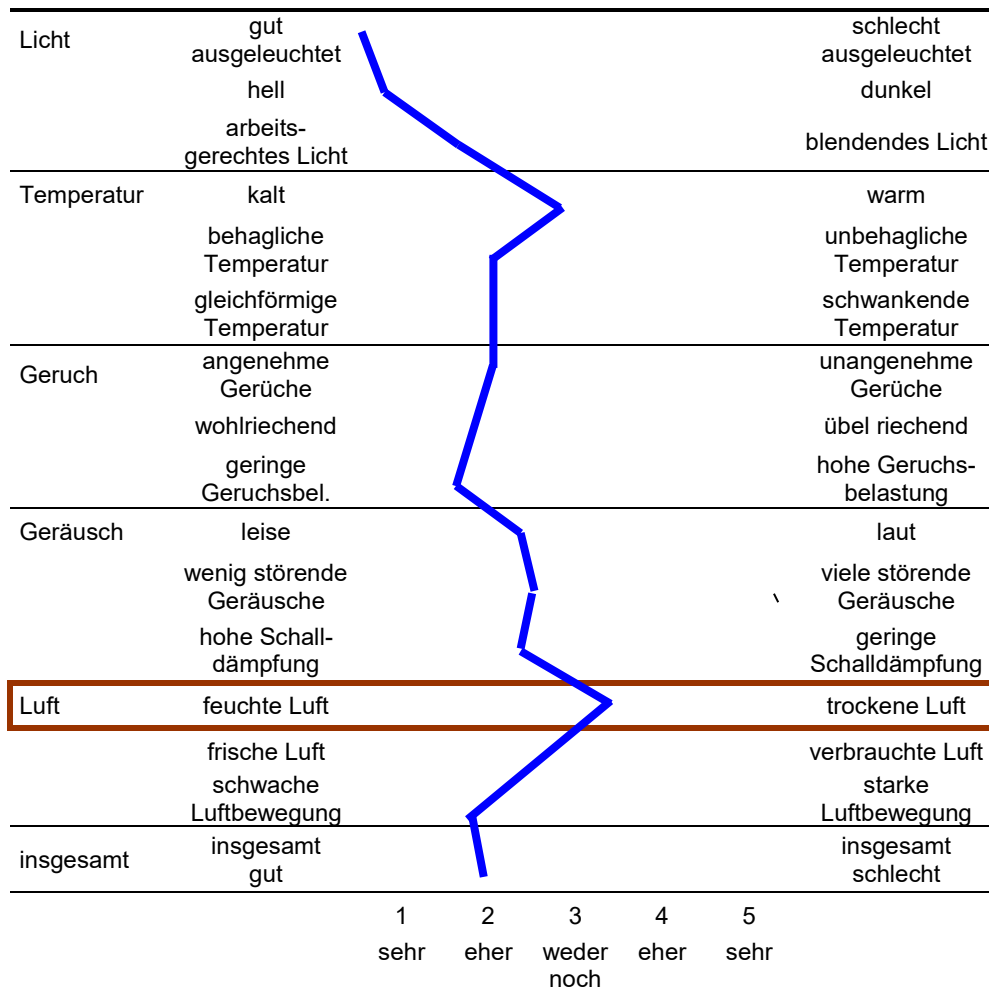
Variable	Ausprägung	n	MW	STD	25.Perc.	50.Perc.	75.Perc.	95.Perc.
<b>Gebäude/gesamt</b>	Gebäude 3 – 16	1461	23.2	1.4	22.4	23.2	23.9	25.7
<b>Gebäude 3</b>	höchster Median	95	26.2	0.7	25.8	26.1	26.6	27.2
<b>Gebäude 10</b>	niedrigster Median	97	20.8	1.1	20.1	20.7	21.5	22.7
<b>Klimatisierung 1</b>	natürlich belüftet	611	22.4	1.2	21.8	22.6	23.2	24.2
	klimatisiert	850	23.7	1.3	22.9	23.6	24.4	26.3
<b>Klimatisierung 2</b>	natürlich belüftet	611	22.4	1.2	21.8	22.6	23.2	24.2
	klim.+öffenb. Fenst.	438	23.9	1.5	22.8	23.6	24.6	26.6
	klim.+ n. öffenb. Fenst.	387	23.6	0.9	23.0	23.6	24.3	25.2
<b>Luftführung</b>	natürlich belüftet	611	22.4	1.2	21.8	22.6	23.2	24.2
	Decke-Decke	249	24.3	1.4	23.3	24.0	25.2	26.8
	Boden-Decke	124	23.0	1.1	22.5	23.0	23.7	24.9
	Induktion	298	23.4	1.3	22.5	23.1	24.2	25.9
	Quellluft	179	23.9	0.6	23.5	23.9	24.3	24.9
<b>Befeuchter</b>	natürlich belüftet	611	22.4	1.2	21.8	22.6	23.2	24.2
	in Betrieb	610	23.9	1.4	23.0	23.7	24.6	26.5
	nicht in Betrieb	240	23.4	0.9	22.8	23.4	24.1	24.5
<b>Vliesfaktor</b>	< 37	791	22.8	1.4	22.0	22.8	23.5	25.0
	>= 37	639	23.7	1.3	22.9	23.5	24.4	26.4
<b>Regalfaktor</b>	<= 4.5	1068	23.3	1.4	22.5	23.2	24.1	26.1
	> 4.5	362	22.7	1.5	21.9	23.0	23.8	24.6
<b>Geschlecht</b>	weiblich	564	23.1	1.3	22.3	23.1	23.9	24.9
	männlich	868	23.3	1.5	22.4	23.2	24.1	26.0
<b>Bürogröße</b>	Großraumbüro	525	23.7	1.1	23.0	23.6	24.4	25.6
	Mehrplatzbüro	811	22.8	1.4	22.1	22.8	23.5	25.3
	Einzelbüro	97	23.5	1.9	22.3	23.4	24.0	26.8
<b>Saison</b>	Ta < 1 °C	431	22.4	1.3	21.6	22.6	23.4	24.5
	1 °C <= Ta <= 14 °C	646	22.9	1.1	22.3	22.9	23.5	24.8
	Ta > 14 °C	384	24.4	1.2	23.6	24.2	24.9	26.7
<b>Öffentlicher Dienst</b>	nein	829	23.2	1.0	22.5	23.2	23.9	24.6
	ja	632	23.2	1.8	22.2	23.0	24.4	26.4
<b>Luftbelastungsindex (außen)</b>	<= 1.3	849	23.4	0.9	22.8	23.4	24.1	24.9
	> 1.3	612	22.9	1.8	21.8	22.7	23.5	26.5
<b>Beschäftigte/Geb.</b>	< 600	912	23.4	1.4	22.5	23.4	24.2	26.2
	>= 600	549	22.8	1.3	22.2	22.9	23.5	24.9
<b>Baujahr</b>	> 1980	694	22.6	1.3	22.0	22.8	23.4	24.5
	< 1980	767	23.7	1.3	22.9	23.5	24.4	26.3
<b>Lage</b>	Großstadt-Zentrum	622	22.8	1.3	22.1	23.1	23.8	24.5
	Großstadt-Peripherie	325	24.3	1.6	23.0	24.3	25.6	26.7
	Kleinstadt	401	22.9	1.0	22.3	23.0	23.6	24.4
	ländliches Gebiet	113	22.8	0.8	22.4	22.8	23.3	24.2

**Tab. 5.2** Deskription der Variable **relative Luftfeuchte** im Raum nach verschiedenen Merkmalen (aus: Bischof et. al., 2003)

Variable	Ausprägung	n	MW	STD	25.Perc.	50.Perc.	75.Perc.	95.Perc.
<b>Gebäude/gesamt</b>	Gebäude 3 – 16	1439	40	13	31	42	51	60
<b>Gebäude 2</b>	höchster Median	108	59	3	57	58	60	63
<b>Gebäude 7</b>	niedrigster Median	117	18	4	15	18	20	25
<b>Klimatisierung 1</b>	natürlich belüftet	611	29	9	22	29	36	44
	klimatisiert	828	48	8	43	49	55	61
<b>Klimatisierung 2</b>	natürlich belüftet	611	29	9	22	29	36	44
	klim.+öffenb. Fenst.	438	47	8	43	47	51	60
	klim.+n. öffenb. Fenst.	366	50	9	41	52	58	61
<b>Luftführung</b>	natürlich belüftet	611	29	9	22	29	36	44
	Decke-Decke	242	52	8	48	56	58	63
	Boden-Decke	124	43	10	39	44	48	55
	Induktion	283	47	8	41	45	52	63
	Quellluft	179	50	4	47	49	53	57
<b>Befeuchter</b>	natürlich belüftet	611	29	9	22	29	36	44
	In Betrieb	588	49	9	41	51	57	61
	nicht in Betrieb	240	47	6	44	46	50	62
<b>Vliesfaktor</b>	< 37	773	38	12	28	39	45	56
	>= 37	636	44	13	35	47	55	61
<b>Regalfaktor</b>	<= 4.5	1053	42	12	32	44	51	60
	> 4.5	356	35	14	21	36	44	57
<b>Geschlecht</b>	weiblich	554	39	14	27	42	50	60
	männlich	856	41	12	32	42	51	59
<b>Bürogröße</b>	Großraumbüro	504	42	13	35	45	51	61
	Mehrplatzbüro	810	39	12	28	40	47	58
	Einzelbüro	97	47	13	38	51	58	60
<b>Saison</b>	Ta < 1 °C	431	30	12	21	27	39	51
	1 °C <= Ta <= 14 °C	624	40	10	33	41	45	58
	Ta > 14 °C	384	53	5	49	53	57	62
<b>Öffentlicher Dienst</b>	nein	829	38	15	23	43	50	60
	ja	610	43	9	35	41	51	59
<b>Luftbelastungsindex (außen)</b>	<= 1.3	827	46	10	39	46	54	61
	> 1.3	612	32	13	22	31	43	53
<b>Beschäftigte/Geb.</b>	< 600	912	40	15	25	44	51	59
	>= 600	527	41	9	35	40	45	60
<b>Baujahr</b>	> 1980	694	35	12	25	37	43	52
	< 1980	745	45	12	36	49	54	60
<b>Lage</b>	Großstadt-Zentrum	622	38	15	23	39	51	59
	Großstadt-Peripherie	303	44	9	38	44	51	58
	Kleinstadt	401	40	13	29	40	55	61
	ländliches Gebiet	113	43	2	42	44	45	46

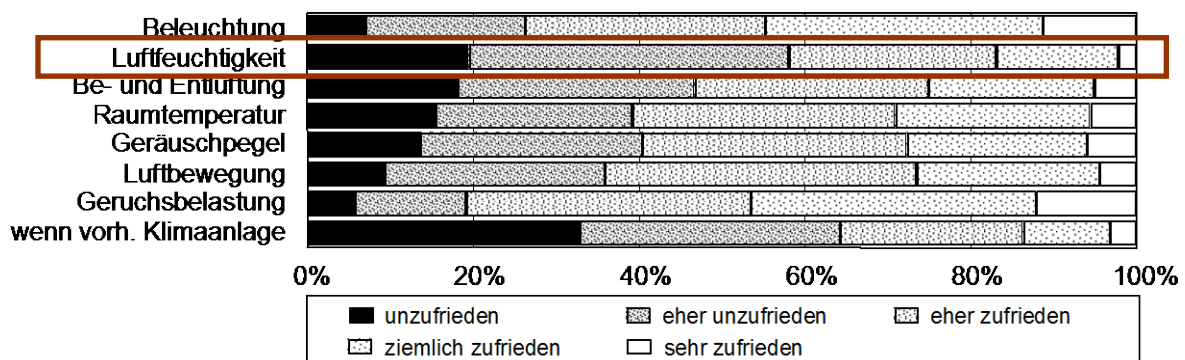
Zur Verdeutlichung der Relevanz des hier bearbeiteten Themas werden weiter Befragungsergebnisse der Untersuchungen von BISCHOF et. al. (2003) betrachtet. Die folgenden Abbildungen (Abb. 5.2 bis Abb. 5.4) geben hierzu wichtige Anhaltspunkte und Informationen.





**Abb. 5.2** Beurteilung des Raumklimas aus der Sicht der dort beschäftigten Personen (aus: Bischof et. al., 2003)

Danach zeigt sich, dass „trockene Luft“ im Vergleich zu anderen Raumklimaparametern eine herausragende Stellung aus der Sicht der Beschäftigten einnimmt (vgl. Abb. 5.2). Dies bestätigt sich bei der Betrachtung der Zufriedenheit mit dem Raumklima – auch hier nimmt die Unzufriedenheit mit der Luftfeuchte im Raum eine Spitzenposition ein und wird nur von der Unzufriedenheit mit einer ggfs. vorhandenen Klimaanlage übertroffen (vgl. Abb. 5.3).



**Abb. 5.3** Zufriedenheit mit dem Raumklima der dort beschäftigten Personen (aus: BISCHOF et. al., 2003)

Entsprechend nimmt auch der Wunsch nach einer höheren Luftfeuchtigkeit bei der Betrachtung der Verbesserungspotenziale des Raumklimas aus der Sicht der Beschäftigten eine Spitzenposition ein. Abb. 5.4 zeigt hierzu das Ergebnis einer Befragung von insgesamt 4.589 Personen in verschiedenen Bürogebäuden. Auf die offene Frage, inwiefern das Raumklima verbesserungsbedürftig sei, gaben mehr als  $\frac{2}{3}$  der befragten Personen (4.589-1.453 = 3.136 Personen) Verbesserungswünsche an, wobei Mehrfachnennungen möglich waren. 1.453 Personen hatten keine Empfehlungen oder gaben diese nicht an. Geordnet nach Themenfeldern wird der Wunsch nach „höherer Luftfeuchtigkeit“ nur von dem nach „mehr Frischluft“ übertroffen und betraf 16,7 % der gegebenen Antworten.

Frage	Antwort	Häufigkeit	Prozent der gegebenen Antworten
Inwiefern ist das Raumklima verbesserungswürdig?	mehr Frischluft	863	26,8
	höhere Luftfeuchtigkeit	537	16,7
	Änderung der Temperatur	498	15,5
	Lärm, Licht, Raucher Nichtraucher, Sonstiges	447	13,9
	bessere Temperaturregulation	374	11,6
	Änderung an der Klimaanlage	150	4,7
	weniger Zugluft	130	4,0
	zu trockene Luft	112	3,5
	Geräusche (Reduzierung des Lärmpegels)	72	2,2
	Geruch	17	0,5
	besser keine Klimaanlage	12	0,4
	Zimmerbelegung	4	0,1
	keine Angabe: n= 1.453		

**Abb. 5.4** Verbesserungspotenziale des Raumklimas aus der Sicht der dort beschäftigten Personen (aus: BISCHOF et. al., 2003, Mehrfachnennungen möglich).

Für die hier durchzuführenden Untersuchungen ergibt sich die Möglichkeit, diese Aspekte und deren Wirkungen unter Laborbedingungen eingehender und systematisch zu untersuchen und hier Verbesserungsmöglichkeiten zu entwickeln.

Ziel dabei ist es, einerseits kurzfristige Auswirkungen (Befinden, Messgrößen) als auch längerfristige Auswirkungen bei Exposition in den Wintermonaten zu betrachten.

## 5.2 Orientierende Vorversuche

Zur Erprobung des Messdesigns ebenso wie zur Beantwortung spezifischer Fragestellungen wurden an insgesamt 3 Tagen Vorversuche mit 3 bzw. 4 Probanden durchgeführt.

In einer ersten **Vorversuchsreihe** wurde der Frage nachgegangen, welches Zeitverhalten das „Gesamtmesssystem“ Mensch + Messgröße aufweist, um hieraus Rückschlüsse auf die notwendige Untersuchungsdauer zu ziehen. Diese Vorversuche wurden mit 3 Probanden und einer Expositionszeit von ca. 4 Stunden durchgeführt.

Betrachtet wurden dabei im Wesentlichen die Messparameter der Wirkungsseite

- Transepidermaler Wasserverlust („Abdunstung“, Tewameter),
- Hauttemperatur (Skin-Thermometer),
- Hautfeuchte (Corneometer).

Die Vorversuche zeigten, dass die Messgrößen sich zwar inter-individuell zum Teil deutlich unterschieden, jedoch individuell nach einer Expositionszeit von 1-1,5 Stunden keine wesentlichen Änderungen zu beobachten waren. Für die Hauptversuche konnte damit eine Expositionszeit dieser Größenordnung als ausreichend aussagekräftig angesehen werden.

In einer zweiten **Vorversuchsreihe** wurde das Messdesign weiter erprobt, um erste orientierende Aussagen ableiten zu können. Die Vorversuche wurden mit 4 Probanden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Entsprechend den Ergebnissen aus Vorversuchsreihe 1 wurde je Versuchsabschnitt eine Expositionsdauer von ca. 1,5 Stunden vorgegeben. Die Einstellungen der Klimakammer wurden am 1. Versuchstag mit 20 °C/23 % RH, am zweiten mit 24 °C/23 % RH vorgegeben.

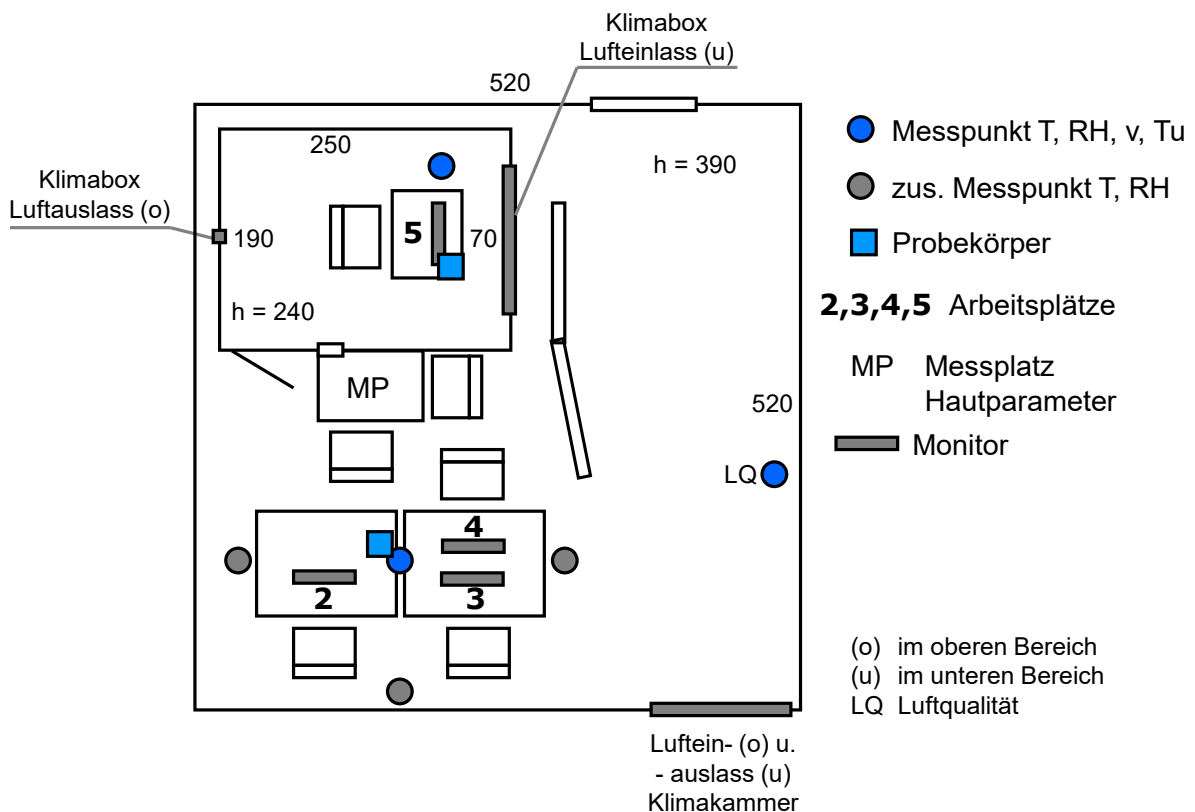
In der Tendenz waren dabei mit steigender Raumtemperatur eine höhere Abdunstung und eine höhere Hauttemperatur zu beobachten. Demgegenüber war bei den betrachteten Bedingungen keine Tendenz bei Hautfeuchte und dem hier auch betrachteten Parameter Hautfett zu beobachten.

## 6 Beschreibung der Hauptversuche

Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst das für beide Versuchsserien identische Layout der Versuchsanordnung, die gewählte Form der Versuchsdurchführung sowie die Messparameter der Wirkungsseite. Hieran anschließend werden die ebenfalls in beiden Versuchsserien versuchsbegleitend eingesetzten Fragebögen zum Klimaempfinden sowie zu körperlichen Empfindungen erläutert. Abschließend werden Kenndaten zu den Klimabedingungen während der Hauptversuche sowie Kenndaten zu den Versuchspersonen ausgewiesen.

### 6.1 Layout der Versuchsanordnung

Abb. 6.1 zeigt das Layout der Versuchsanordnung und weist die Abmessungen sowie die Messpunkte für die Bestimmung der Klimaparameter aus.



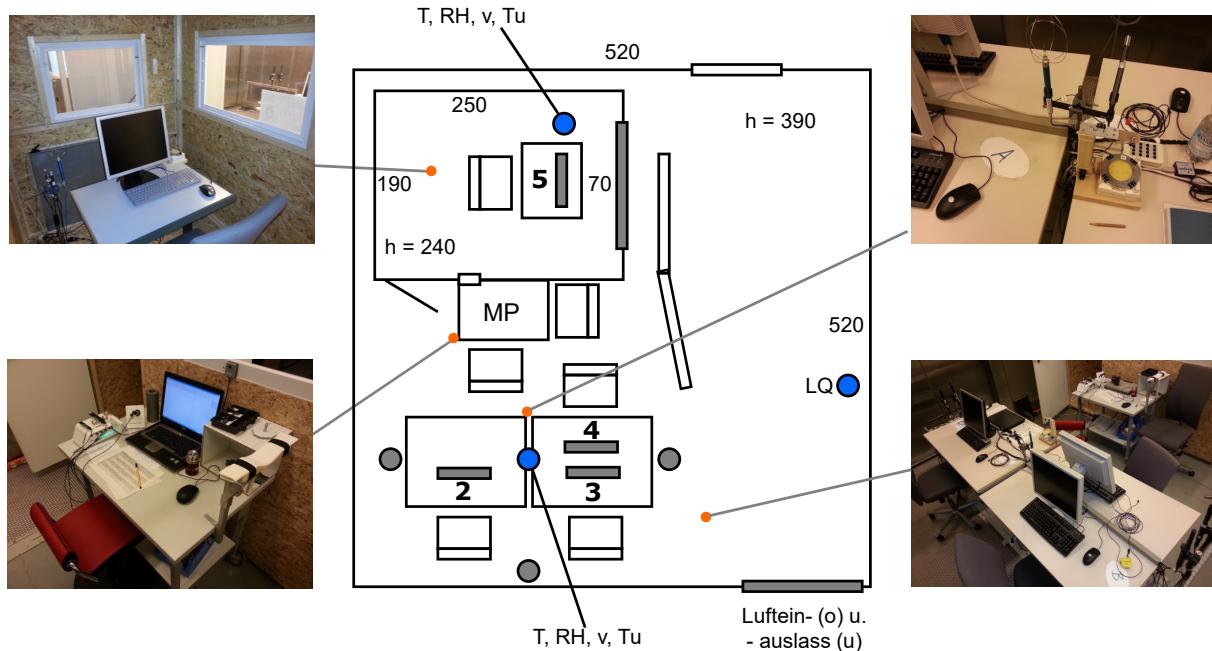
**Abb. 6.1** Layout der Versuchsanordnung (alle Abmessungen in cm).

Die Klimabox mit Quelllüftung hat eine Grundfläche von ca. 5 m<sup>2</sup>. Der dortige Versuchsplatz hat die Kennung „5“, verfügt über ein eigenes stationäres Messsystem und wurde zeitweise zusätzlich mit einem Probekörper, wie er in Teilprojekt 1 (KOZAK et al. 2014) entwickelt wurde, ausgestattet.

Die übrigen Versuchsplätze mit den Kennungen „2“ bis „4“ befinden sich außerhalb der Klimabox innerhalb der Klimakammer mit einer Grundfläche von ca. 26 m<sup>2</sup>. Die

Belüftung ist an diesen Versuchsplätzen mit einer Mischlüftung vergleichbar. Ein zentraler Messpunkt für die Versuchsplätze „2“ bis „4“ registriert die dortigen Klimabedingungen. Versuchsplatz „1“ ist aus technisch-organisatorischen Gründen für die Messbeobachtung reserviert.

Zur besseren Orientierung wurde das Layout in Abb. 6.2 um einige Illustrationen ergänzt.



**Abb. 6.2** Layout der Versuchsanordnung mit Illustrationen.  
(Bildquelle: Institut ASER e.V.)

## 6.2 Versuchsdurchführung

Aus den Überlegungen und den Ergebnissen der Vorversuche wurde ein Versuchsplan für jeweils zwei aufeinanderfolgende Versuchstage mit jeweils 4 gleichzeitig exponierten Probanden entwickelt. Dieser ist in Abb. 6.3 wiedergegeben und weist die Expositionsphasen zusammen mit den Phasen der Datenerhebung im Anschluss an eine Expositionsphase aus.

Zeit	08:40	09:00	09:20	09:40	10:00	10:20	10:40	11:00	11:20	11:40	12:00	12:20	12:40	13:00	13:20	13:40	14:00	14:20
20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	
Proband																		
1	V	Q	Q	Q	DQ	M	M	M	M	DM	N							
2			V	M	M	M	M	DM	M	Q	Q	Q	DQ	N				
3					V	Q	Q	Q	DQ	M	M	M	M	DM	N			
4							V	M	M	M	M	DM	M	Q	Q	Q	DQ	N

**Erläuterungen:**

- V** - Vorbereitung (Fragen vor der Expositionsphase, Ausgangswerte Hautparameter)
- Q** - Exposition Quellung (Messung Lidschlag, Protokoll Bekleidung, Trinkmenge)
- M** - Exposition Mischlüftung (Messung Lidschlag, Protokoll Bekleidung, Trinkmenge)
- DQ** - Datenerhebung im Anschluss an Exposition Quellung (Fragen nach der Expositionsphase, Messung Hautparameter)
- DM** - Datenerhebung im Anschluss an Exposition Mischlüftung (Fragen nach der Expositionsphase, Messung Hautparameter)
- N** - Nachbereitung (Zusammenstellung Unterlagen Versuchstag)

Proband	Gesamtdauer: 06:00 h		
	Beginn	Ende	Dauer
1	08:40	12:20	03:40 h
2	09:20	13:20	04:00 h
3	10:00	13:40	03:40 h
4	10:40	14:40	04:00 h

**Abb. 6.3** Versuchsplan während der Hauptversuche.

Der Versuchsplan sieht jeweils einen Start gegen 8:30 Uhr vor. Im Rahmen der Vorphase (V) erfolgt die Einweisung und eine erste Befragung der Versuchspersonen. Diese werden im Abstand von jeweils etwa 40 Minuten in der Klimakammer den kontrollierten Bedingungen, die für winterliche Szenarien üblich sind, ausgesetzt und konnten dort büroähnliche Tätigkeiten am Bildschirm durchführen. Die Expositionszeit bis zur Messung der Wirkparameter (DQ, DM) beträgt ca. 60-80 Minuten.

Durch die verschobenen Startzeitpunkte konnte einerseits sichergestellt werden, dass jeder Proband ohne weitere Unterbrechung an einem Versuchstag zwei Expositionsphasen durchläuft und andererseits für die Durchführung der Datenerhebung lediglich ein Messplatz erforderlich ist.

Jeder Messtag umfasst für einen Probanden zwei Expositionen mit unterschiedlichen Lüftungsszenarien (Q-uellüftung/M-ischlüftung). Den Abschluss bildet jeweils eine Nachphase (N). Die Gesamtdauer der Untersuchungen an einem Tag beträgt so ca. 6 Stunden und erlaubt noch eine erste Dokumentation der Messgrößen. Für jeden einzelnen Probanden beträgt die Vorortzeit demnach ca. 4-4,5 Stunden.

Die Probanden waren an jeweils zwei aufeinander folgenden Tagen vor Ort. Versuchstag 1 war mit einer Innenraumtemperatur von ca. 24 °C der jeweils „wärmere“ Tag, am darauf folgenden Versuchstag 2 wurde jeweils eine Innenraumtemperatur von 20 °C vorgegeben, so dass die Probanden nach ihrem Klimaempfinden am ersten Tag ihre Bekleidung nach Wunsch am 2. Tag anpassen konnten.

Die Rekrutierung der Probanden erfolgte über eine Pressemitteilung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Interessierte Personen erhielten eine Information zu den geplanten Versuchen und bestätigten schriftlich ihre freiwillige Teilnahme an den Versuchen.

## 6.3 Messparameter

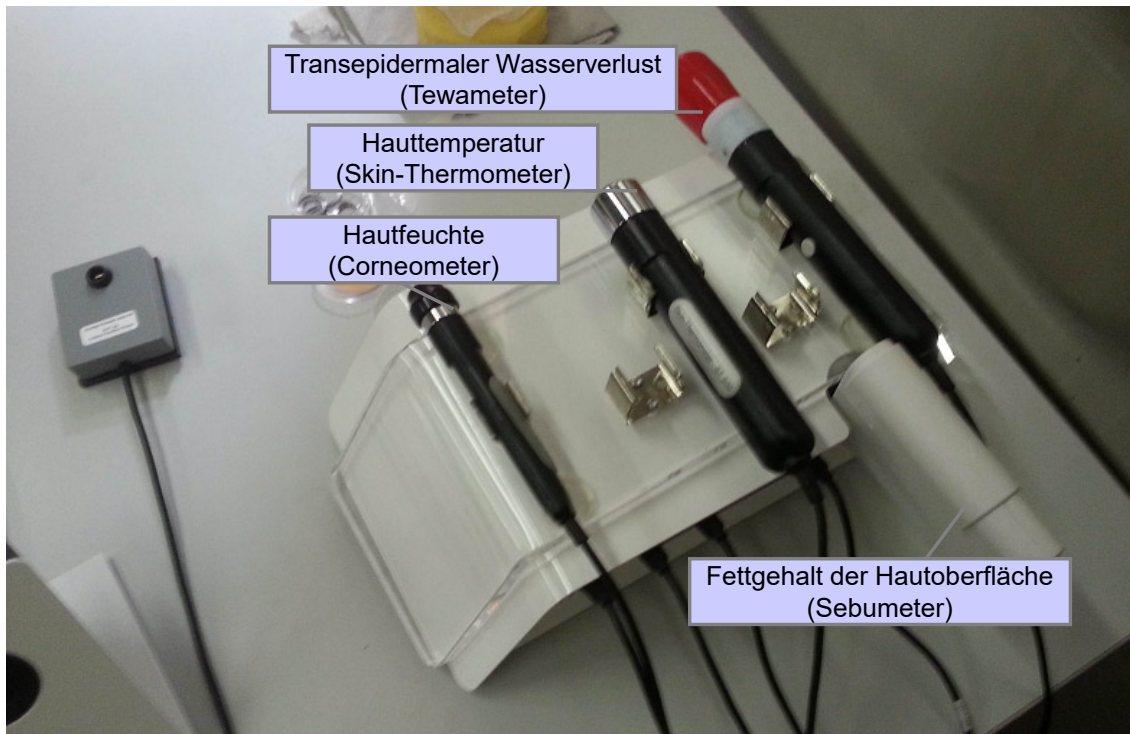
Neben den weitgehend kontrollierten Umgebungsbedingungen wurden während der Hauptversuche folgende Parameter mit den jeweils angegebenen Messfühlern der Fa. Courage&Khazaka GmbH an Hand und Stirn erfasst:

- Transepidermaler Wasserverlust („Abdunstung“, Tewameter),
- Hauttemperatur (Skin-Thermometer) und
- Hautfeuchte (Corneometer).

Zur Klassifizierung des Hauttyps wurde einmalig vor Versuchsbeginn erfasst:

- Fettgehalt der Hautoberfläche (Sebumeter)

Abb. 6.4 zeigt die hierzu eingesetzte Messtechnik, die von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin bereitgestellt wurde, in einer Übersicht.



**Abb. 6.4** Eingesetzte Messtechnik zur Erfassung der Wirkparameter.  
(Bildquelle: Institut ASER e.V.)

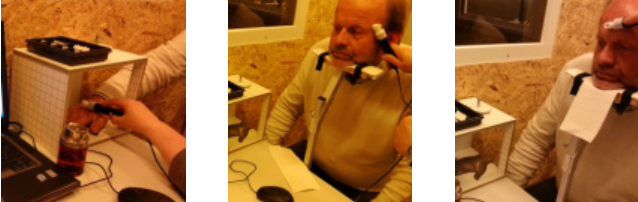
Abb. 6.5 zeigt die Durchführung der Einzelmessungen in einer Übersicht. Sie gliedern sich in eine Referenzmessung zu Beginn eines Messtages sowie Messungen im Anschluss an eine Exposition.

Zu Beginn eines Messtages wird jeweils der Fettgehalt der Hautoberfläche mittels Sebumeter im Handbereich sowie auf der Stirn bestimmt. Zusätzlich wird im Sinne eines möglichen Bezugspunktes im (im Regelfall bekleideten) Unterarmbereich die Hautfeuchte mittels Corneometer, die Hauttemperatur mittels Skin-Thermometer sowie die Abdunstung mittels Tewameter bestimmt und dokumentiert.

Im Anschluss an eine Exposition wird die mittlere Hautfeuchte sowie die mittlere Hauttemperatur im Handrückenbereich sowie an der Stirn bestimmt. Ebenso erfolgt die Messung der Abdunstung mittels Tewameter auf dem Handrücken sowie im Schläfen- und Stirnbereich (vgl. Abb. 6.5).

- **Referenzmessung**  
**Fettgehalt – Hand**   **Fettgehalt – Stirn**   **Hautfeuchte – U-Arm**   **Hauttemp. - U-Arm**   **Abdunstung – U-Arm**  

- **Messung Hautfeuchte** Hand – Stirn      **Messung Hauttemperatur** Hand – Stirn  

- **Messung Abdunstung** Hand – Schläfe – Stirn  


**Abb. 6.5** Durchführung der Probandenversuche – Messung der Hautparameter.  
 (Bildquelle: Institut ASER e.V.)

## 6.4 Eingesetzte Fragebögen

Abb. 6.6 und Abb. 6.7 zeigen die eingesetzten Fragebögen vor (Abb. 6.6) und während (Abb. 6.7) der Expositionsphasen und weisen die gewählten Codierungen der Antworten aus.

Die Fragen vor der Expositionsphase werden eingeleitet durch einige Fragen zur Person (z. B. Alter, Geschlecht, Brillenträger/-in) sowie Merkmalen wie z. B. Einsatz von Cremes, Hautreizungen im Winter, täglicher Aufenthalt im Freien. Diese Fragen werden nur am ersten Versuchstag („Tag 1“) gestellt.

Zusätzlich wird an beiden Versuchstagen – im Sinne eines Ausgangswertes – einzelne körperliche Empfindungen, die kennzeichnend für winterlich-trockene Luft sind, in ihrer Intensität (von „nicht vorhanden“ bis „sehr störend“ abgefragt und dokumentiert (vgl. Abb. 6.6).

Ebenso wird zu Beginn eines Versuchstages die jeweils getragene Bekleidung mit einem Foto dokumentiert, so dass im Rahmen der Auswertung eine Abschätzung der Bekleidungsisolation erfolgen kann.



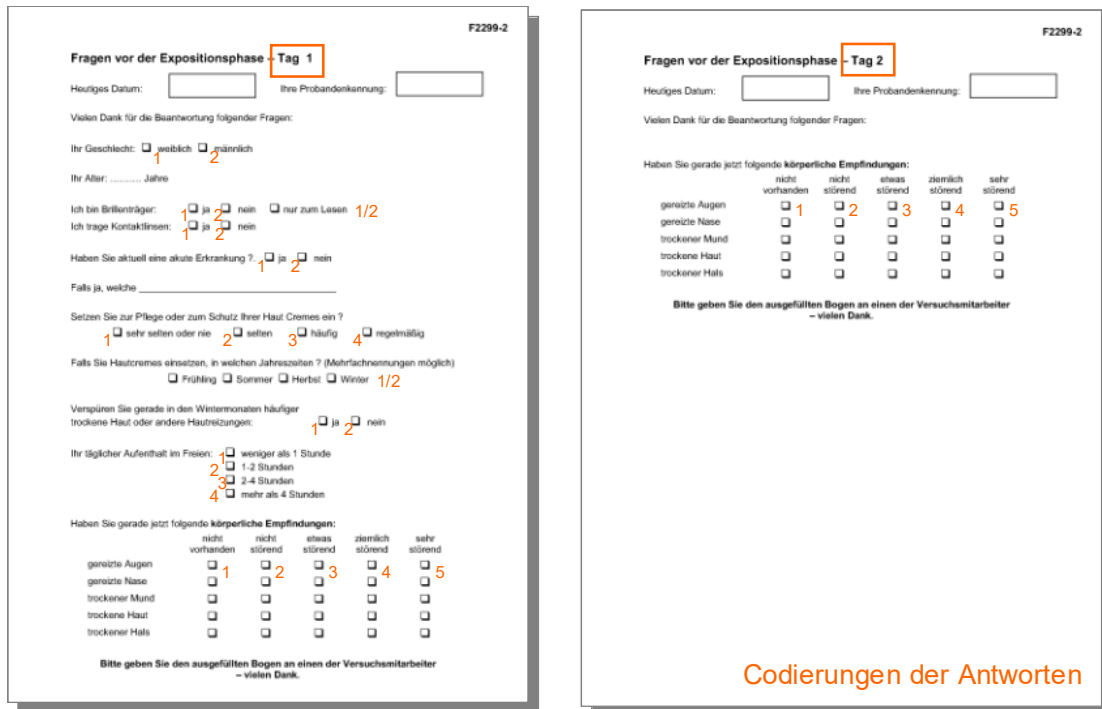


Abb. 6.6 Eingesetzte Fragebögen – hier: Fragen vor der Expositionsphase

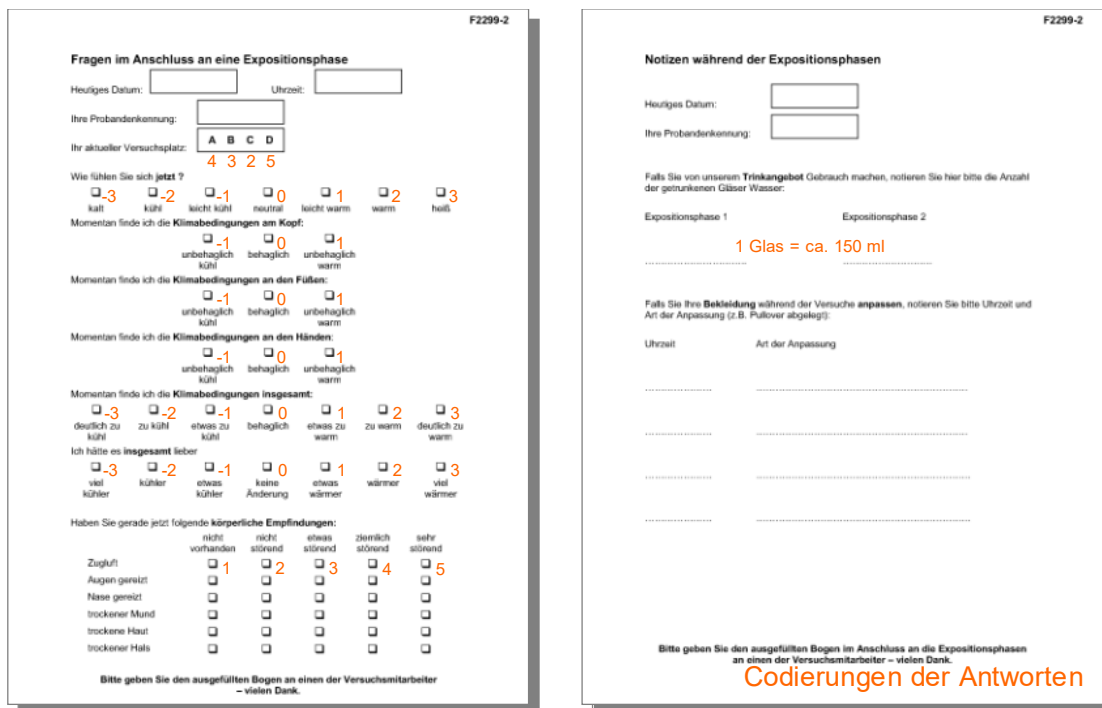


Abb. 6.7 Eingesetzte Fragebögen – hier: Fragen im Anschluss an eine und Notizen während der Expositionsphasen

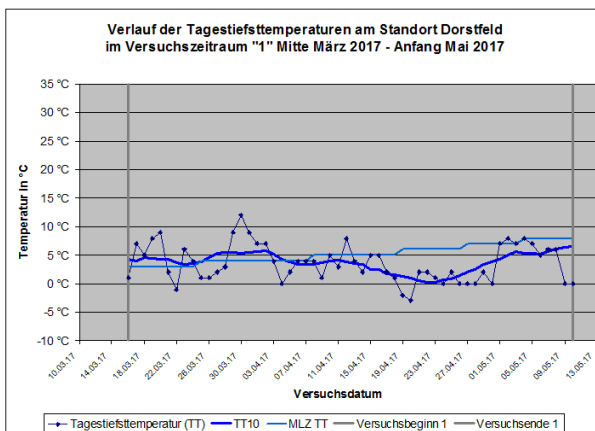
Abb. 6.7 zeigt die Fragestellungen im Anschluss an eine Expositionsphase und Notizen während der Expositionsphasen. Der Fragebogen im Anschluss an eine Expositionsphase wurde unmittelbar vor den Messungen der Hautparameter durch die Probanden ausgefüllt und beinhaltet Fragen zum Klimaempfinden sowie zur Intensität der körperlichen Empfindungen, ergänzend wurde eine Frage zur Zugluft aufgenommen.

## 6.5 Außenklimabedingungen

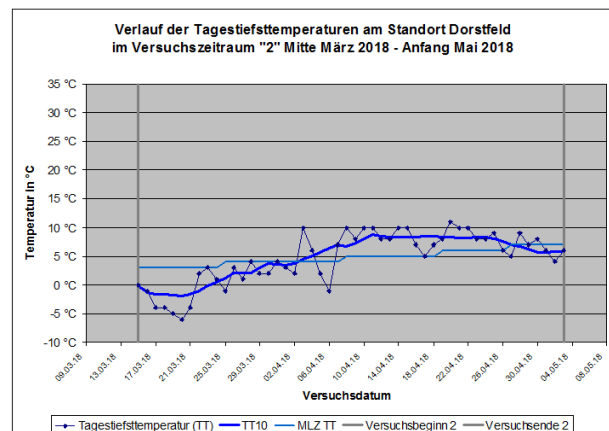
Abb. 6.8 zeigt die Außenklimabedingungen während der beiden Versuchsserien. Deutlich wird, dass die für die relative Luftfeuchte mitbestimmende Tagestiefsttemperatur in beiden Versuchsserien nahezu durchgängig unter 10 °C, überwiegend auch unter 5 °C lag.

Bei vorgegebenen identischen Innenraumtemperaturen von 20 °C bzw. 24 °C und identischer Wahl der Versuchsmonate (jeweils Mitte März bis Anfang Mai), waren die Außenklimabedingungen – ermittelt aus den Tagestiefsttemperaturen - in Versuchsserie 2 gegenüber Versuchsserie 1 in der zweiten Hälfte der Versuchsphase etwas erhöht.

Versuchsserie 1: 16.03.-10.05.2017



Versuchsserie 2: 15.03.-04.05.2018



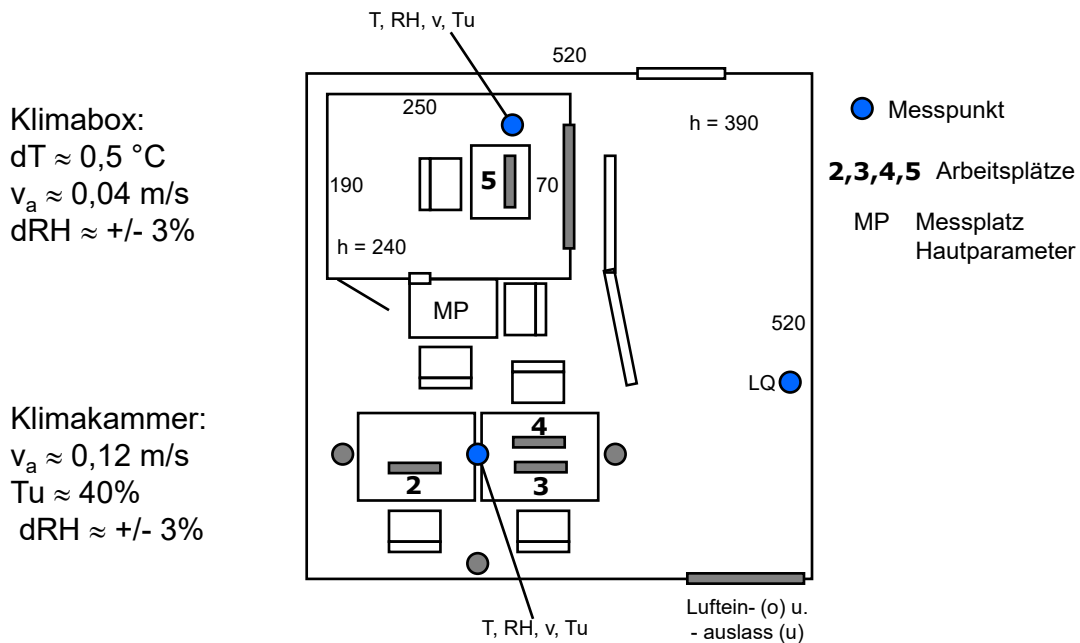
TT10 = Mittelwert über 10 Werte (symmetrisch) MLZ TT: Langzeitmittelwert

**Abb. 6.8** Außenklimabedingungen während der Versuchsserien hier: Tagestiefsttemperaturen ( $\approx$  Nachttiefsttemperaturen).  
Datenquelle: AccuWeather.com

## 6.6 Innenraumklima während der Hauptversuche

Abb. 6.9 zeigt das Layout der Versuchsanordnung zusammen mit einigen Kennwerten zu den kontrollierten Klimabedingungen. Innerhalb der Klimabox ist aufgrund der Zuluft aus der Klimakammer die Lufttemperatur im Mittel gegenüber der Klimakammer um ca. 0,5 °C erhöht („ $dT \approx 0,5 \text{ °C}$ “), was jedoch im Rahmen der lokalen Bestimmungsgenauigkeit liegt und damit in etwa identisch mit der Lufttemperatur innerhalb der Klimakammer ist.

Die mittlere Luftgeschwindigkeit („ $v_a$ “) ist innerhalb der Klimabox mit ca. 0,04 m/s erwartungsgemäß („Quelllüftung“) deutlich geringer als an den Versuchsplätzen innerhalb der Klimakammer ( $v_a$  hier im Mittel ca. 0,12 m/s).



**Abb. 6.9** Layout der Versuchsanordnung und ausgewählte Klimaparameter.

Die ebenfalls kontrollierte relative Luftfeuchte variiert aufgrund der Regelung im Mittel um ca.  $\pm 3\%$ .

Damit konnten weitestgehend konstante Klimabedingungen an allen Versuchsplätzen realisiert werden (vgl. Abb. 6.9).

## 6.7 Zu den Probanden

Wie eingangs erläutert, wurde aus organisatorischen Gründen Versuchsserie 1 ( $RH = 20\%$ ) mit insgesamt 66 Probanden, Versuchsserie 2 ( $RH = 40\%$ ) im Folgejahr mit einem Sub-Kollektiv von 35 Probanden durchgeführt. 32 dieser Probanden nahm an beiden Versuchsserien teil.

Von den Probanden waren 55 % (36) in Versuchsserie 1 und 60 % (21) weiblichen Geschlechts. Damit konnte in etwa eine Gleichbesetzung realisiert werden. Das Alter der Probanden betrug in beiden Versuchsserien ( $39 \pm 12$ ) Jahre ( $MW \pm s$ ). Mit 23 bis 61 Jahren und 24 bis 57 Jahren war auch der Altersbereich der Probanden in beiden Versuchsserien nahezu identisch und überdeckt damit in etwa jeweils das Alter der Erwerbsbevölkerung.

Legt man eine Gruppenbildung von „bis 30 Jahre“, „31-50 Jahre“ und „über 50 Jahre“ zugrunde, so sind die Altersgruppen mit 38 %, 27 % und 35 % (Versuchsserie 1) bzw. 46 %, 17 % und 37 % durchgängig und zumindest annähernd gleich besetzt. Die Altersverteilung spiegelt sich auch bei zusätzlicher Berücksichtigung des Geschlechts.

Legt man weiter eine vom Hersteller des Messsystems vorgeschlagene Gruppenbildung für die Sebumetrie (Fettgehalt der Hautoberfläche) zugrunde, so kann die Haut der Probanden überwiegend als „fettarm, trocken“ (67 % bzw. 74 %) bzw. „normal“

(30 % bzw. 26 %) eingestuft werden. Im Fall der Corneometrie (Hautfeuchte) kann die Haut überwiegend als „ausreichend feucht“ (47 % bzw. 63 %) bzw. „trocken“ (41 % bzw. 31 %) eingestuft werden.

Etwa 55 % bzw. 40 % der Probanden waren Brillenträger, 6 % bzw. 3 % trugen Kontaktlinsen und 89 % hatten keine akute Erkrankung. Etwa 83 % der Probanden in Versuchsserie 2 gaben an, Nichtraucher zu sein.

## 6.8 Angaben der Probanden zu Versuchsbeginn

Eine Analyse weiterer Angaben der Probanden zu Versuchsbeginn zeigte folgende Ergebnisse.

Danach ist der Einsatz von Cremes zum Schutz oder zur Pflege der Haut eher üblich, lediglich 17 % bzw. 9 % der Probanden beantworteten diese Frage mit „sehr selten oder nie“. Der Einsatz von Cremes liegt mit 85 % bzw. 89 % schwerpunktmäßig im Winter. Mit 62 % bzw. 60 % sind die Sommermonate in beiden Versuchsserien diejenigen mit dem geringsten Einsatz von Cremes.

79 % bzw. 74 % der Probanden verspüren gerade in den Wintermonaten trockene Haut oder andere Hautreizungen. Etwa 2/3 der Probanden gaben jeweils ihren täglichen Aufenthalt im Freien mit weniger als eine Stunde oder 1-2 Stunden an.

Betrachtet man Kennwerte zu körperlichen Empfindungen zu Beginn eines Versuchstages, so ist festzustellen, dass mit ca. 80 % überwiegend keine entsprechend negativen Reizungen („nicht vorhanden“ oder „nicht störend“) vorhanden waren. Wenn vorhanden, wurden diese schwerpunktmäßig im Hautbereich mit überwiegend geringer Intensität („etwas störend“) angegeben.

## 6.9 Bestimmung der Bekleidungsisololation

Wie auch im Arbeitsleben konnten die Probanden ihre Kleidung frei wählen. Sie wurden lediglich aufgefordert, eine für sie und die Situation „Büroarbeit“ adäquate Bekleidung zu wählen. Entsprechend variierte die Bekleidung von Person zu Person.

Zur Abschätzung der resultierenden Bekleidungsisololation wurde die Bekleidung zu Beginn eines jeden Versuchstages fotografisch dokumentiert. Die Isolationen der getragenen Kleidungsstücke wurden für jeden Probanden jeweils aufsummiert und so ein Isolationswert für die Bekleidung der Probanden und den Versuchstag bestimmt.

Grundlage bildeten dabei die in DIN EN ISO 9920 – „Ergonomie des Umgebungsklimas – Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination“ in der dortigen Tabelle B.1 genannten Werte. Zur Abgrenzung unterschiedlicher Ausprägungen wurde jeweils zwischen „dünn“ – „normal“ – „fest“ unterschieden.

Tabelle 6.1 zeigt die für die einzelnen Kleidungsstücke zugrunde gelegten Isolationswerte.

**Tab. 6.1** Kleidungsstücke und Isolationswerte (vgl. DIN EN ISO 9920)

<b>Kleidungsstück:</b>	<b>Ausführung:</b>		
	<b>„dünn“</b>	<b>„normal“</b>	<b>„fest“</b>
Schuhe	0,05 clo	0,10 clo	0,15 clo
Hose	0,20 clo	0,25 clo	0,30 clo
Rock	0,10 clo	0,15 clo	0,20 clo
Kleid	0,15 clo	0,20 clo	0,25 clo
Hemd/Bluse	0,10 clo	0,15 clo	0,20 clo
Pullover	0,20 clo	0,30 clo	0,35 clo
Jacke	0,25 clo	0,30 clo	0,35 clo
Weste	0,15 clo	0,20 clo	0,25 clo
Schal	0,05 clo	0,10 clo	0,15 clo
T-Shirt	0,15 clo		
Unterwäsche	+ 0,05 clo		

Hinweis: 1 clo (clothing-unit) = 0,155 m<sup>2</sup> K / W

Die gewählte Reihenfolge der Versuchstage – zunächst 24 °C, dann 20 °C Raumtemperatur – gestattete es den Probanden, ggfs. am zweiten Versuchstag eine Anpassung vorzunehmen. Bei ähnlichen Standardabweichungen und Wertebereichen ergaben sich auch deshalb an den beiden Versuchstagen signifikant unterschiedliche mittlere Bekleidungsisolierungen, wie sie auch im Arbeitsleben zu beobachten sind (vgl. Tabelle 6.2).

**Tab. 6.2** Ermittelte mittlere Bekleidungsisolierungen  
hier: Versuchsserie 1

<b>Raumtemperatur</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Standardabweichung</b>	<b>Wertebereich</b>
24°C	0,76 clo	0,15 clo	0,45 – 1,20 clo
20°C	0,84 clo	0,15 clo	0,40 – 1,25 clo

## 7 Auswertung der Hauptversuche

Die nachfolgenden Auswertungen zeigen Mittelwertvergleiche der durchgeführten Versuchsserien. Dabei wurden zunächst die Versuchsserien getrennt voneinander ausgewertet, um sie anschließend vergleichend gegenüberzustellen.

### 7.1 Zur Darstellung der Ergebnisgrößen

Abb. 7.1 zeigt eine Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen für Versuchsserie 1. Unterschieden werden dabei die unterschiedlichen Lufttemperaturen (24 °C/20 °C) sowie die Art der Belüftung (Q-uelllüftung/M-ischlüftung). Gleichzeitig wird die gewählte Form der Ergebnisdarstellung erläutert.

		Versuchsserie 1: RH = 20%				
		Quelllüftung (Q)		Mischlüftung (M)		Q-M
Var	Bezeichnung	24°C	20°C	24°C	20°C	Tendenz
Klimaempfinden	AKE_al_Qw Klimaempfinden - <b>allgemein</b> -3 - kalt 0 - neutral +3 - heiß	0,3	-1,1	-0,4	-1,7	↘
		0,000		0,000		
		0,000		0,001		
Klimaempfinden	AKE_Hd_Qw Klimaempfinden - <b>Hände</b> -1 - unbehaglich kühl 0 - behaglich +1 - unbehaglich warm	-0,1	-0,5	-0,3	-0,8	↘
		0,000		0,000		
		0,002		0,003		
Klimaempfinden	AZu_Qw Klimaempfinden - <b>Zugluft</b> 1 - nicht vorhanden 3 - etwas gestört 5 - sehr gestört	1,2	1,5	1,9	2,5	↗
		0,011		0,001		
		0,000		0,000		
Hauttemperatur	WTe_Hd_Qw Hauttemperatur - <b>Hand</b> in °C	30,4	27,7	29,6	26,5	↘
		0,000		0,000		
Hauttemperatur	WTe_Sn_Qw Hauttemperatur - <b>Stirn</b> in °C	33,0	32,0	33,1	31,7	→
		0,000		0,000		
Hautfeuchte	WCo_Hd_Qw Hautfeuchte - <b>Hand</b> in Comeometer-Einheiten	21,8	21,1	19,9	19,9	↘
		0,307		0,495		
Hautfeuchte	WCo_Sn_Qw Hautfeuchte - <b>Stirn</b> in Comeometer-Einheiten	43,8	43,8	40,8	41,7	↘
		0,498		0,321		
Abdunstung	WTw_Hd_Qw Abdunstung - <b>Hand</b> in g/h/m <sup>2</sup>	16,0	14,2	18,6	16,8	↗
		0,006		0,022		
		0,001		0,000		
Abdunstung	WTw_Sf_Qw Abdunstung - <b>Schläfe</b> in g/h/m <sup>2</sup>	18,3	17,4	17,7	17,1	→
		0,159		0,204		
Abdunstung	WTw_Sn_Qw Abdunstung - <b>Stirn</b> in g/h/m <sup>2</sup>	19,1	17,6	19,7	19,0	↗
		0,130		0,267		
		0,295		0,132		

N = 66 weiblich: 36 männlich: 30

Intervention  
Quelllüftung statt  
Mischlüftung

Erläuterung zur Darstellung:  
Ergebnisse einseitiger t-Test für:

Quelllüftung (Q)		Mischlüftung (M)	
24°C	20°C	24°C	20°C
0,3	-1,1	-0,4	-1,7
0,000		0,000	
0,000			

Q<sub>24°C</sub> vs. Q<sub>20°C</sub>  
Q<sub>24°C</sub> vs. M<sub>24°C</sub>  
Q<sub>20°C</sub> vs. M<sub>20°C</sub>  
M<sub>24°C</sub> vs. M<sub>20°C</sub>

**Abb. 7.1** Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24 °C/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p \leq 0,01$ , gelb:  $0,01 < p \leq 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Versuchsserie 1 bei 20 % RH.

Die ebenfalls angegebenen p-Werte sowie die Einfärbung sind jeweils das Resultat eines einseitigen t-Tests, der zur Orientierung – unabhängig vom Skalenniveau – eingesetzt wurde. Diese Form der Auswertung ist geeignet, um deutliche Unterschiede kenntlich zu machen.

Abb. 7.1 zeigt z. B., dass das Klimaempfinden ebenso wie die Hauttemperatur die unterschiedlichen Expositionen im Regelfall hoch-signifikant voneinander trennt. Im Fall der Abdunstung gilt dies auch für den Handbereich, im Stirnbereich sind diese Trennungen weniger signifikant. Hier spielen sicher auch schwierigere Messprozesse eine nicht unwesentliche Rolle.

## 7.2 Vergleichende Darstellung ausgewählter Ergebnisgrößen

Abb. 7.2 zeigt eine erweiterte Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen in einer vergleichenden Darstellung der Versuchsserien 1 bei 20 % RH (links) und 2 bei 40 % RH (rechts).

		Versuchsserie 1: RH = 20%				Versuchsserie 2: RH = 40%			
		Quelllüftung (Q)		Mischlüftung (M)		Quelllüftung (Q)		Mischlüftung (M)	
Var	Bezeichnung	24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C
Klimaempfinden	AKE_al_Qw Klimaempfinden - <b>allgemein</b> -3 - kalt 0 - neutral +3 - heiß	0,3	-1,1	-0,4	-1,7	0,4	-1,2	-0,3	-1,9
		0,000		0,000		0,000		0,000	
		0,000		0,001		0,001		0,001	
	AKE_Hd_Qw Klimaempfinden - <b>Hände</b> -1 - unbehaglich kühl 0 - behaglich +1 - unbehaglich warm	-0,1	-0,5	-0,3	-0,8	0,0	-0,5	-0,2	-0,7
		0,000		0,000		0,000		0,000	
		0,002		0,003		0,015		0,044	
AZu_Qw Klimaempfinden - <b>Zugluft</b> 1 - nicht vorhanden 3 - etwas gestört 5 - sehr gestört	1,2	1,5	1,9	2,5	1,1	1,5	1,7	2,5	
	0,011		0,001		0,011		0,002		
	0,000		0,000		0,000		0,000		
Hauttemperatur	WTe_Hd_Qw Hauttemperatur - <b>Hand</b> in °C	30,4	27,7	29,6	26,5	30,8	27,6	30,0	26,1
		0,000		0,000		0,000		0,000	
	0,006		0,003		0,016		0,005		
	WTe_Sn_Qw Hauttemperatur - <b>Stirn</b> in °C	33,0	32,0	33,1	31,7	33,1	31,8	33,0	31,5
0,000		0,000		0,000		0,000			
		0,455		0,019		0,115		0,020	
Hautfeuchte	WCo_Hd_Qw Hautfeuchte - <b>Hand</b> in Corneometer-Einheiten	21,8	21,1	19,9	19,9	25,0	21,8	21,8	19,8
		0,307		0,495		0,073		0,142	
	0,076		0,195		0,073		0,154		
	WCo_Sn_Qw Hautfeuchte - <b>Stirn</b> in Corneometer-Einheiten	43,8	43,8	40,8	41,7	49,4	47,3	45,3	43,8
0,498		0,321		0,213		0,279			
		0,062		0,136		0,066		0,072	
Abdunstung	WTw_Hd_Qw Abdunstung - <b>Hand</b> in g/h/m <sup>2</sup>	16,0	14,2	18,6	16,8	17,0	14,5	20,1	16,8
		0,006		0,022		0,071		0,006	
	0,001		0,000		0,022		0,059		
	WTw_Sf_Qw Abdunstung - <b>Schläfe</b> in g/h/m <sup>2</sup>	18,3	17,4	17,7	17,1	17,8	17,2	17,2	15,6
		0,159		0,204		0,342		0,046	
			0,284		0,346		0,284		0,127
WTw_Sn_Qw Abdunstung - <b>Stirn</b> in g/h/m <sup>2</sup>	19,1	17,6	19,7	19,0	19,7	16,8	19,8	18,7	
	0,130		0,267		0,009		0,186		
	0,295		0,132		0,480		0,067		

N = 66

weiblich: 36

männlich: 30

weiblich: 21

männlich: 14

**Abb. 7.2** Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24 °C/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten grün:  $p \leq 0,01$ , gelb:  $0,01 < p \leq 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Vergleich der Ergebnisse bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % (Versuchsserie 1, links) und 40 % (Versuchsserie 2, rechts).

Unterschieden werden dabei die unterschiedlichen Lufttemperaturen (24/20 °C) sowie die Art der Belüftung (Q-uellüftung/M-ischlüftung). Dargestellt sind jeweils Zielgrößen aus den Bereichen Klimaempfinden, Hauttemperatur, Hautfeuchte sowie Abdunstung.

So wird in Abb. 7.2 anhand der Einfärbung deutlich, ob und wie effektstark sich Lufttemperatur (20 °C/24 °C) und das Lüftungsszenario (Q-uellüftung und M-ischlüftung) auf die einzelnen Zielgrößen auswirken. Eine große Anzahl grüner oder zumindest gelber Felder zeigen ausgeprägte oder zumindest tendenzielle Zusammenhänge zwischen Bedingungs- und Zielgrößen.

Diese gewählte Form der Auswertung macht u. a. auch deutlich, welche Mittelwertunterschiede für signifikante Änderungen bei den einzelnen Parametern notwendig sind. Abb. 7.2 zeigt, dass für nahezu alle Ergebnisgrößen die gewählten Lufttemperaturen und Lüftungsszenarien die Unterschiede zu deutlichen und signifikanten Änderungen führen, dies gleichermaßen für relative Luftfeuchten von 20 % ebenso wie für 40 %. Geringfügige Abweichungen hinsichtlich der Signifikanzaussagen sind weniger in den leicht veränderten Bedingungen als vielmehr in dem unterschiedlich großen Probandenkollektiv begründet.

Auch wird deutlich, dass insbesondere die ermittelte Abdunstung im Handbereich deutlich stärkere Effekte bei den betrachteten Lüftungsszenarien aufweisen als die ermittelten Werte zur Hautfeuchte. Entsprechend scheint die Abdunstung (Tewameter) die betrachteten Lüftungsszenarien deutlicher zu trennen als die Messwerte zur Hautfeuchte (Corneometer).

Betrachtet man jedoch die Zahlenwerte der Versuchsserie 1 und 2 im Vergleich, so sind sie nahezu identisch, lediglich im Fall der Abdunstung ist eine Tendenz zu etwa geringeren Werten bei einer relativen Luftfeuchte von 40 % erkennbar. Diese beobachteten Effekte liegen jedoch deutlich unterhalb der Effekte, die bei den unterschiedlichen Lüftungsarten und sonst gleichen Bedingungen zu beobachten sind.

Diese bereits aus Abb. 7.2 ableitbare Aussage wird in Abb. 7.3 visualisiert und bestätigt. Dabei wurde eine identische Darstellung gewählt, deren Einfärbung nunmehr neben der Lufttemperatur die betrachteten relativen Luftfeuchten von 20 bzw. 40 % zum Inhalt hat. Bleibt der Effekt der Lufttemperatur erwartungsgemäß erhalten, so sind die Effekte der unterschiedlichen relativen Luftfeuchten deutlich geringer als bei der Betrachtung der unterschiedlichen Lüftungsszenarien (vgl. Abb. 7.2). Dies gilt für nahezu alle betrachteten Zielgrößen.

Während dieser Effekt bei den Zielgrößen zum Klimaempfinden ebenso wie bei Hauttemperaturen wenig überraschend ist, gilt dies offenbar auch für die Zielgrößen zu Hautfeuchte und Abdunstung.

Es kann also festgehalten werden, dass die verschiedenen, betrachteten Lüftungsszenarien bei gleichen Lufttemperaturen einen größeren Effekt als die betrachteten relativen Luftfeuchten (20 % und 40 %) aufweisen. Bei den betrachteten Bedingungskonstellationen wird die Abdunstung insbesondere im Handbereich damit schwerpunktmäßig durch die Lufttemperatur und die Luftgeschwindigkeit bestimmt.



Var		Bezeichnung		Quelllüftung (Q)				Mischlüftung (M)			
				VR 1; RH=20%		VR2; RH=40%		VR 1; RH=20%		VR2; RH=40%	
				24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C
Klimaempfinden	AKE_al_Qw	Klimaempfinden - <b>allgemein</b>		0,3	-1,1	0,4	-1,2	-0,4	-1,7	-0,3	-1,9
		-3 - kalt		0,000		0,000		0,000		0,000	
		0 - neutral			0,316				0,274		
	+3 - heiß				0,404				0,099		
	AKE_Hd_Qw	Klimaempfinden - <b>Hände</b>		-0,1	-0,5	0,0	-0,5	-0,3	-0,8	-0,2	-0,7
		-1 - unbehaglich kühl		0,000		0,000		0,000		0,000	
		0 - behaglich			0,177				0,147		
	+1 - unbehaglich warm				0,338				0,222		
	AZu_Qw	Klimaempfinden - <b>Zugluft</b>		1,2	1,5	1,1	1,5	1,9	2,5	1,7	2,5
1 - nicht vorhanden		0,011		0,011		0,001		0,002			
3 - etwas gestört			0,199				0,264				
5 - sehr gestört				0,385				0,451			
Hauttemperatur	WTe_Hd_Qw	Hauttemperatur - <b>Hand</b> in °C		30,4	27,7	30,8	27,6	29,6	26,5	30,0	26,1
				0,000		0,000		0,000		0,000	
				0,112				0,165			
					0,450				0,240		
WTe_Sn_Qw	Hauttemperatur - <b>Stirn</b> in °C		33,0	32,0	33,1	31,8	33,1	31,7	33,0	31,5	
			0,000		0,000		0,000		0,000		
			0,433				0,126				
				0,019				0,047			
Hautfeuchte	WCo_Hd_Qw	Hautfeuchte - <b>Hand</b> in Corneometer-Einheiten		21,8	21,1	25,0	21,8	19,9	19,9	21,8	19,8
				0,307		0,073		0,495		0,142	
				0,043				0,110			
					0,347				0,487		
WCo_Sn_Qw	Hautfeuchte - <b>Stirn</b> in Corneometer-Einheiten		43,8	43,8	49,4	47,3	40,8	41,7	45,3	43,8	
			0,498		0,213		0,321		0,279		
			0,007				0,033				
				0,052				0,184			
Abdunstung	WTw_Hd_Qw	Abdunstung - <b>Hand</b> in g/h/m <sup>2</sup>		16,0	14,2	17,0	14,5	18,6	16,8	20,1	16,8
				0,006		0,071		0,022		0,006	
				0,181				0,106			
					0,390				0,466		
	WTw_Sf_Qw	Abdunstung - <b>Schläfe</b> in g/h/m <sup>2</sup>		18,3	17,4	17,8	17,2	17,7	17,1	17,2	15,6
				0,159		0,342		0,204		0,046	
			0,341				0,291				
				0,443				0,043			
WTw_Sn_Qw	Abdunstung - <b>Stirn</b> in g/h/m <sup>2</sup>		19,1	17,6	19,7	16,8	19,7	19,0	19,8	18,7	
			0,130		0,009		0,267		0,186		
			0,295				0,491				
				0,259				0,427			

**Abb. 7.3** Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24 °C/20 °C) und relativer Luftfeuchte (20 %/40 %) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten grün:  $p \leq 0,01$ , gelb:  $0,01 < p \leq 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$  hier: Vergleich der Ergebnisse bei Quelllüftung (links) und Mischlüftung (rechts).

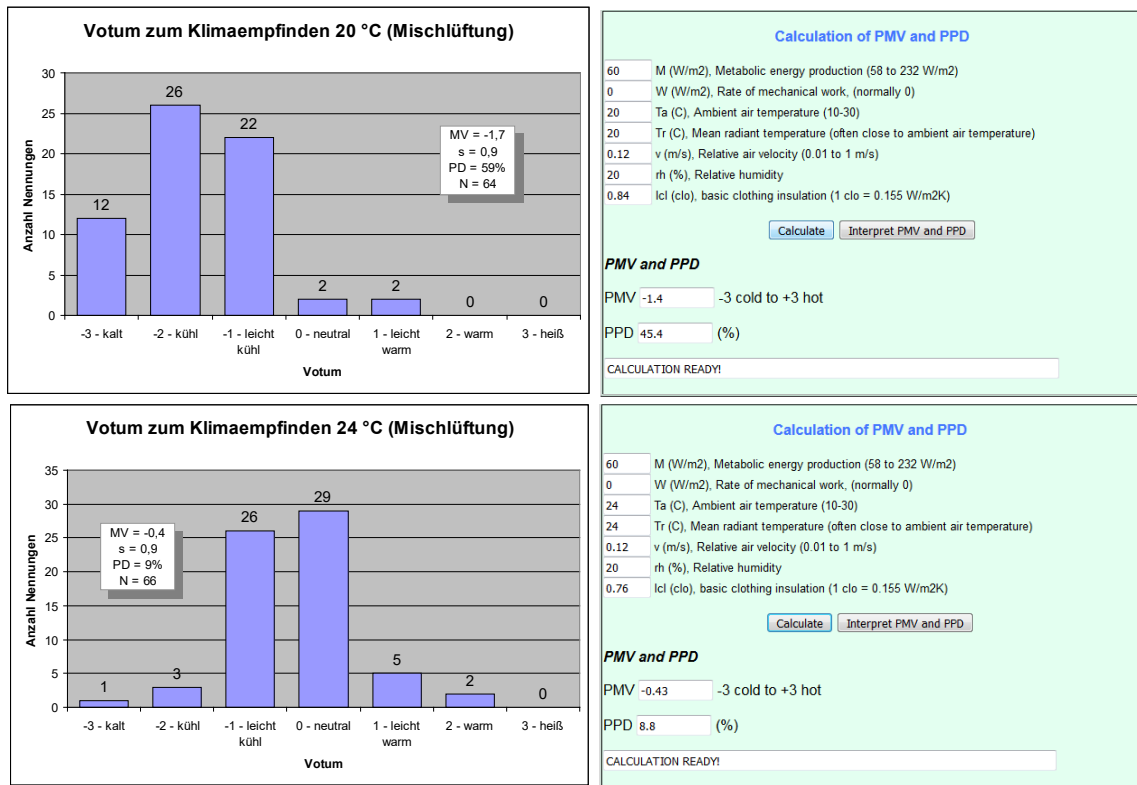
### 7.3 Zum Klimaempfinden

Abb. 7.4 und Abb. 7.5 zeigen die Ergebnisse der Auswertung des Klimaempfindens allgemein nach Beendigung einer Expositionsphase. Vergleichend sind jeweils die Werte bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % (Versuchsserie 1) und den Raumtemperaturen 20 °C und 24 °C für die Lüftungsbedingungen „Mischlüftung“ (Abb. 7.4) und Quelllüftung (Abb. 7.5) dargestellt.

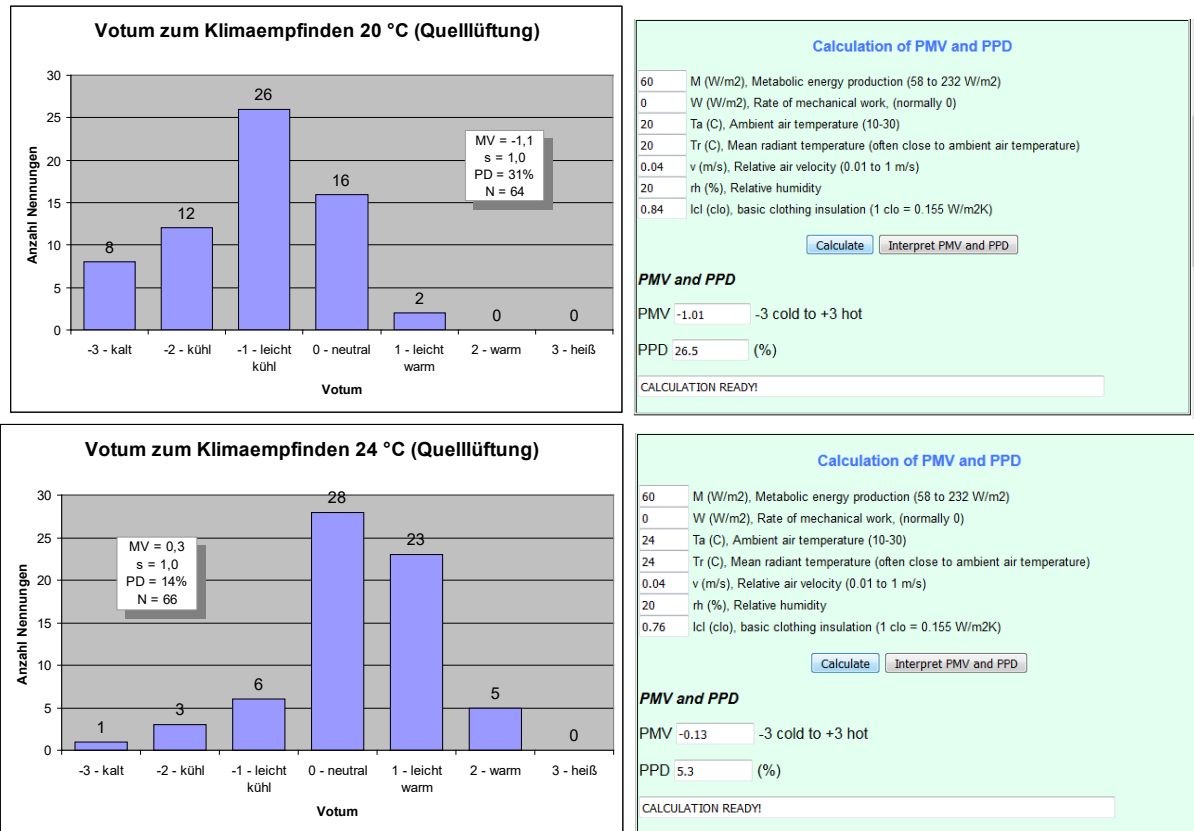
Neben den ermittelten Werten (MV – Mean Vote, PD – Percentage of Dissatisfied) sind jeweils auch die nach dem PMV/PPD-Modell entsprechend DIN EN ISO 7730 für die verschiedenen Versuchsbedingungen rechnerisch ermittelten Werte ausgewiesen. Grundlage für die Berechnung der Modellwerte bildet ein vom Institut „Ergonomics and Aerosol Technology (EAT)“ der Universität Lund in Schweden bereitgestelltes Tool,

das unter [http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk\\_miljoe/PMV-PPD.html](http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html) abgerufen werden kann.

Neben den Temperatur- und Luftfeuchte-Vorgaben wurde dabei eine metabolische Wärmeproduktion von  $60 \text{ W/m}^2$  (entsprechend ca.  $110 \text{ W}$  für ruhiges Sitzen), eine mittlere Luftgeschwindigkeit von  $0,12 \text{ m/s}$  Mischlüftung bzw.  $0,04 \text{ m/s}$  für Quelllüftung (vgl. Abb. 6.9) sowie die für die verschiedenen untersuchten Raumtemperaturen ermittelte mittlere Bekleidungsisolations von  $0,84 \text{ clo}$  bzw.  $0,76 \text{ clo}$  (vgl. Tabelle 6.2) eingesetzt.



**Abb. 7.4** Zum Klimaempfinden – Vergleich der ermittelten und prognostizierten Werte – hier: betrachtete Mischlüftung bei  $20 \text{ °C}$  u  $24 \text{ °C}$ , jeweils  $20 \text{ \% RH}$ .



**Abb. 7.5** Zum Klimaempfinden – Vergleich der ermittelten und prognostizierten Werte – hier: betrachtete Quelllüftung bei 20 °C u 24 °C, jeweils 20 % RH.

Berücksichtigt man die Varianz und die Bestimmungsgenauigkeit der Eingangswerte sowie die mit N = 64 bzw. 66 vergleichsweise geringe Stichprobe, so ist die Übereinstimmung der Ergebnisse mehr als nur zufriedenstellend (vgl. Tabelle 7.1).

**Tab. 7.1** Vergleich der für die untersuchten Versuchsbedingungen ermittelten und prognostizierten Werte zum Klimaempfinden in einer Übersicht

Temperatur/ relative Luftfeuchte:	20 °C/20 %		24 °C/20 %	
	MV/PMV	PD/PPD	MV/PMV	PD/PPD
Mischlüftung ( $v_a = 0,12$ m/s)	-1,7/-1,4	59 %/45 %	-0,4/-0,4	9 %/9 %
Quelllüftung ( $v_a = 0,04$ m/s)	-1,1/-1,0	31 %/27 %	+0,3/-0,1	14 %/5 %

Der „Anteil Unzufriedener“ (PD) wurde dabei analog zum Modellvorgehen als Anteil der Urteile zum Klimaempfinden bestimmt, die außerhalb des Bereiches „-1 - leicht kühl“ bis „+1 - leicht warm“ lagen. Das Prinzip dieses Vorgehens kann grundsätzlich auch auf andere Skalenwerte – z. B. zu körperlichen Empfindungen - übertragen werden, indem jeweils ein „Zufriedenheitsbereich“ definiert und der anteilige Rest als (mit der Bedingung) „unzufrieden“ definiert wird. Auf diese Weise kann jeweils ein Kennwert bestimmt werden, der weitgehend unabhängig von der einzelnen Skalierung ist.

Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3 zeigt das Vorgehen anhand der betrachteten Dimensionen des Klimaempfindens für die betrachtete Mischlüftung (Tabelle 7.2) sowie die betrachtete Quelllüftung (Tabelle 7.3), jeweils bei Raumtemperaturen von 20 °C und 24 °C. Die eingerahmten Werte zeigen dabei jeweils die Ergebnisse bei einer relativen Luftfeuchte von 20 %, die darunter angegebenen Werte spiegeln die Ergebnisse der Versuche bei einer relativen Luftfeuchte von 40 %. Während bei der Beurteilung des mittleren Votums (MV) die jeweils gewählte Skalierung zu berücksichtigen ist, ist der Anteil Unzufriedener (PD) weitgehend unabhängig von der gewählten Skala unmittelbar vergleichbar.

**Tab. 7.2** Mittleres Votum (MV) und Anteil Unzufriedener (PD) für die betrachteten Dimensionen des Klimaempfindens – hier: betrachtete Mischlüftung bei 20 °C u 24 °C, jeweils 20 % RH und 40 % RH.

Frage:	Antwortmöglichkeiten und Skalierung:							MV (20°C/24°C)		PD (20°C/24°C)	
	kalt (-3)	kühl (-2)	leicht kühl (-1)	neutral (0)	leicht warm (+1)	warm (+2)	heiß (+3)				
Wie fühlen Sie sich <b>jetzt</b> ?								<u>-1,7</u> -1,9	<u>-0,4</u> -0,3	<u>59 %</u> 68 %	<u>9 %</u> 9 %
Momentan finde ich die die Klima- bedingungen <b>am Kopf</b> (als..)			unbe- haglich kühl (-1)	behag- lich (0)	unbe- haglich warm (+1)			<u>-0,4</u> -0,5	<u>-0,1</u> -0,1	<u>38 %</u> 53 %	<u>9 %</u> 11 %
Momentan finde ich die die Klima- bedingungen <b>an den Füßen</b> (als..)			unbe- haglich kühl (-1)	behag- lich (0)	unbe- haglich warm (+1)			<u>-0,4</u> -0,5	<u>-0,1</u> -0,1	<u>42 %</u> 50 %	<u>14 %</u> 11 %
Momentan finde ich die die Klima- bedingungen <b>an den Händen</b> (als..)			unbe- haglich kühl (-1)	behag- lich (0)	unbe- haglich warm (+1)			<u>-0,8</u> -0,7	<u>-0,3</u> -0,2	<u>75 %</u> 68 %	<u>30 %</u> 26 %
Momentan finde ich die Klima- bedingungen <b>insgesamt</b> (als..)	deutlich zu kühl (-3)	zu kühl (-2)	etwas zu kühl (-1)	behag- lich (0)	etwas zu warm (+1)	zu warm (+2)	deutlich zu warm (+3)	<u>-1,5</u> -1,8	<u>-0,4</u> -0,3	<u>53 %</u> 59 %	<u>5 %</u> 0 %
Ich hätte es <b>insgesamt</b> lieber..	viel kühler (-3)	kühler (-2)	etwas kühler (-1)	keine Ände- rung (0)	etwas wärmer (+1)	wärmer (+2)	viel wärmer (+3)	<u>+1,3</u> +1,5	<u>+0,4</u> +0,2	<u>41 %</u> 50 %	<u>5 %</u> 0 %

Erläuterung: grün unterlegt – Antworten „Zufriedener“

Erwartungsgemäß finden sich jeweils die höchsten Anteile Unzufriedener bei lokaler Betrachtung der Extremitäten (Füße, Hände), wobei im Handbereich der höchste Anteil festzustellen ist. Im Kopfbereich führt die dort bestehende stärkere Durchblutung zu geringeren Anteilen Unzufriedener.

Ein Vergleich der Ergebnisse zum Klimaempfinden und zur Klimapräferenz (jeweils erste und letzte Zeile in der Darstellung) führt in der Tendenz insbesondere im Fall der

Mischlüftung zu geringeren Unzufriedenheitswerten, d. h. obwohl der Zufriedenheitsbereich des Klimaempfindens überschritten wird, wünscht sich der Proband in Einzelfällen keine oder nur eine geringe Änderung der Klimasituation.

**Tab. 7.3** Mittleres Votum (MV) und Anteil Unzufriedener (PD) für die betrachteten Dimensionen des Klimaempfindens – hier: betrachtete Quelllüftung bei 20 °C u 24 °C, jeweils 20 % RH und 40 % RH

Frage:	Antwortmöglichkeiten und Skalierung:							MV (20°C/24°C)		PD (20°C/24°C)	
	kalt (-3)	kühl (-2)	leicht kühl (-1)	neutral (0)	leicht warm (+1)	warm (+2)	heiß (+3)				
Wie fühlen Sie sich <b>jetzt</b> ?			leicht kühl (-1)	neutral (0)	leicht warm (+1)			<u>-1,1</u>	<u>+0,3</u>	<u>31 %</u>	<u>14 %</u>
								-1,2	+0,4	35 %	14 %
Momentan finde ich die die Klima- bedingungen <b>am Kopf</b> (als..)			unbe- haglich kühl (-1)	behag- lich (0)	unbe- haglich warm (+1)			<u>-0,1</u>	<u>+0,1</u>	<u>23 %</u>	<u>12 %</u>
								-0,3	+0,2	29 %	17 %
Momentan finde ich die die Klima- bedingungen <b>an den Füßen</b> (als..)			unbe- haglich kühl (-1)	behag- lich (0)	unbe- haglich warm (+1)			<u>-0,3</u>	<u>-0,1</u>	<u>33 %</u>	<u>14 %</u>
								-0,4	0,0	35 %	9 %
Momentan finde ich die die Klima- bedingungen <b>an den Händen</b> (als..)			unbe- haglich kühl (-1)	behag- lich (0)	unbe- haglich warm (+1)			<u>-0,5</u>	<u>-0,1</u>	<u>52 %</u>	<u>24 %</u>
								-0,5	0,0	47 %	14 %
Momentan finde ich die Klima- bedingungen <b>insgesamt</b> (als..)	deutlich zu kühl (-3)	zu kühl (-2)	etwas zu kühl (-1)	behag- lich (0)	etwas zu warm (+1)	zu warm (+2)	deutlich zu warm (+3)	<u>-1,1</u>	<u>+0,1</u>	<u>30 %</u>	<u>5 %</u>
								-1,1	+0,2	26 %	9 %
Ich hätte es <b>insgesamt</b> lieber..	viel kühler (-3)	kühler (-2)	etwas kühler (-1)	keine Ände- rung (0)	etwas wärmer (+1)	wärmer (+2)	viel wärmer (+3)	<u>+1,1</u>	<u>-0,2</u>	<u>31 %</u>	<u>6 %</u>
								+1,0	-0,2	24 %	9 %

Erläuterung: grün unterlegt – Antworten „Zufriedener“

Im Vergleich zwischen der betrachteten Mischlüftung (Tabelle 7.2) und Quelllüftung (Tabelle 7.3) weist die Quelllüftung überwiegend positivere Werte aus. Besonders deutlich ist dies im Bereich des Klimaempfindens insgesamt als auch im Bereich der Extremitäten.

Die jeweils ebenfalls angegebenen Werte bei Auswertung der Versuchsserie 2 bei einer relativen Luftfeuchte von 40 % ergaben erwartungsgemäß sowohl für die Misch- (Tabelle 7.2) als auch für die Quelllüftung (Tabelle 7.3) vergleichbare Ergebnisse und bestätigen so den deutlicheren Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf das Klimaempfinden.

## 7.4 Zum Zugluftempfinden

Das Zugluftempfinden spielt gerade bei verschiedenen Lüftungsarten eine wesentliche Rolle. Abb. 7.6 zeigt hierzu eine ebenfalls orientierende Auswertung. Erwartungsgemäß ist das Zugluftempfinden von der Lufttemperatur abhängig (vgl. DIN EN ISO 7730) und ist bei geringeren Lufttemperaturen (hier: 20 °C) höher ausgeprägt als bei höheren Lufttemperaturen (hier: 24 °C).

Weiter ist erwartungsgemäß festzustellen, dass die Quelllüftung (Versuchs-Platz 5) die geringsten Werte zum Zugluftempfinden aufweist. Die höchsten Werte wurden an Versuchsplatz 3 – also an dem Platz mit der größten Nähe zum Luftein- und -auslass – festgestellt. Die Plätze 2 und 4 weisen dagegen ähnliche Werte im Mittelbereich aus (vgl. Abb. 7.6).

Zum Zugluftempfinden (1-5)

Platz:	24 °C				20 °C			
	2	3	4	5	2	3	4	5
MW:	1,7	2,3	1,8	1,2	2,3	2,9	2,4	1,5
Anzahl:	27	14	13	53	26	14	12	52

Zugluftempfinden: von kein (1) bis sehr störend (5)

Platz 2  $\approx$  Platz 4

Platz 3 > Platz 2,4 > Platz 5

Platz 2, 3, 4 (M): 20 °C  $\gg$  24 °C

Platz 5 (Q): 20 °C > 24 °C

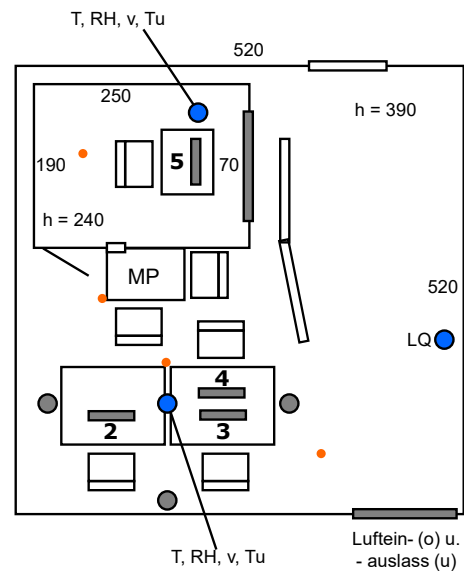


Abb. 7.6 Zum Zugluftempfinden.

## 7.5 Zu körperlichen Empfindungen

Zu Beginn eines Versuchstages sowie jeweils nach einer Expositionsphase wurden die Probanden nach der Intensität körperlicher Empfindungen gefragt, die im Zusammenhang mit trockener Luft häufiger diskutiert und genannt werden (siehe auch Abb. 6.6 und Abb. 6.7).

Abb. 7.7 zeigt die Fragestellung im Einzelnen sowie die gewählte Skalierung. Datentechnisch wurde die Skalierung mit den Zahlenwerten 1 – „nicht vorhanden“ bis 5 –

„sehr störend“ zugeordnet. Neben der Haut wurden dabei insbesondere auch die Schleimhäute betrachtet.

Haben Sie gerade jetzt folgende **körperliche Empfindungen**:

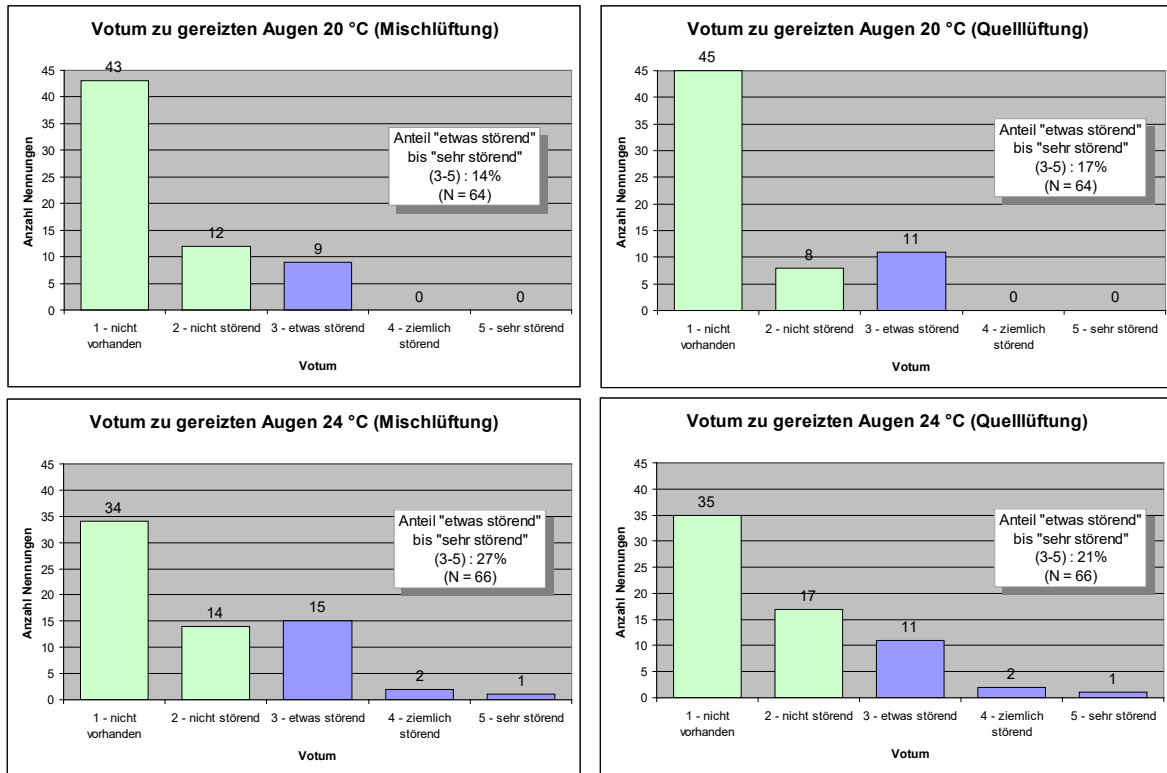
	nicht vorhanden	nicht störend	etwas störend	ziemlich störend	sehr störend
gereizte Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
gereizte Nase	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
trockener Mund	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
trockene Haut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
trockener Hals	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Abb. 7.7** Fragestellungen zu körperlichen Empfindungen

Abb. 7.8 und Abb. 7.9 auf der Folgeseite geben einen Überblick über die Verteilung der Voten in Versuchsserie 1. Dies einerseits für das Merkmal „gereizte Augen“ (Abb. 7.8) als Beispiel für ein Merkmal, dass mit den Schleimhäuten verbunden ist sowie für das Merkmal „trockene Haut“ (Abb. 7.9), das mit der Haut verbunden ist. Dies jeweils für die betrachteten Versuchskombinationen von Temperatur und Lüftungsart.

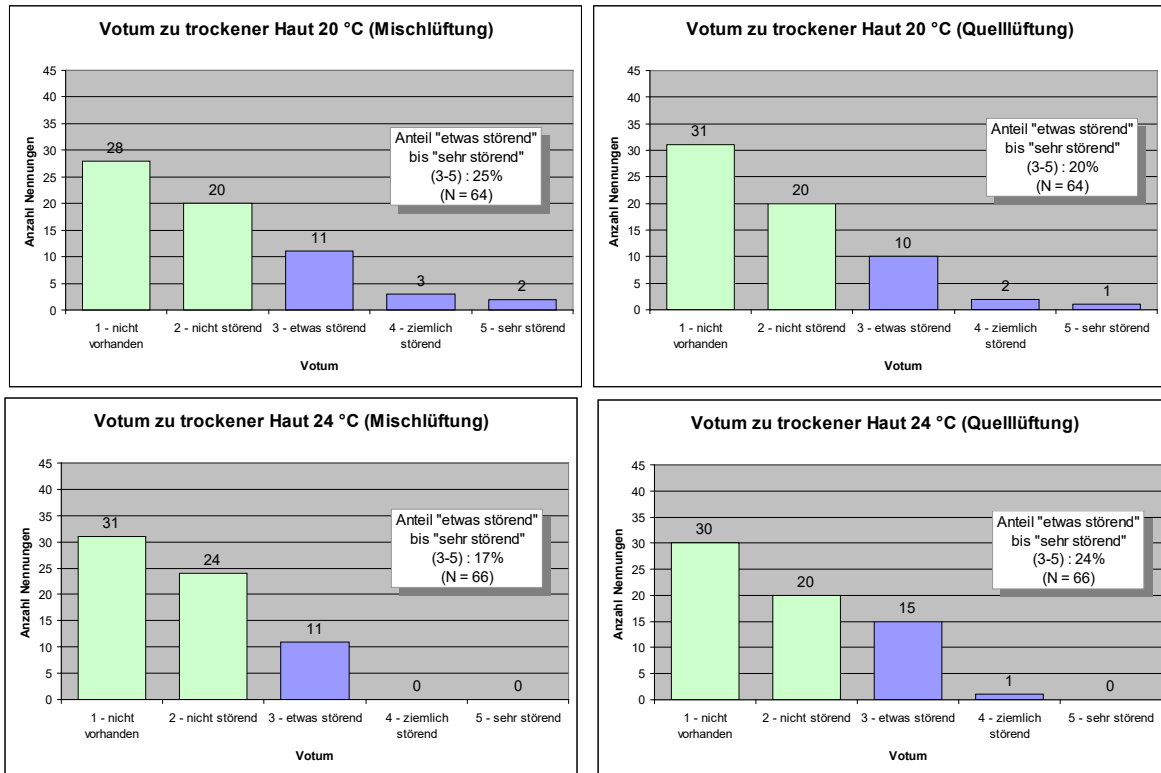
Die Betrachtung der Verteilung zeigt jeweils einen überwiegenden Anteil der Antworten „nicht vorhanden“ oder „nicht störend“. Außerhalb dieses Bereiches variieren die Anteile je nach Versuchsbedingung zwischen 14 % und 27 %, wobei die Größenordnung für beide Merkmale sehr ähnlich ist.

Betrachtet man mögliche Zusammenhänge, so ist zwischen den betrachteten Lüftungsarten keine Tendenz festzustellen, wohl aber zwischen den betrachteten Temperaturen. In der Tendenz ist Anteil derer, die zumindest „etwas störend“ angegeben haben, im Fall „gereizter Augen“ (Abb. 7.8) bei der höheren Temperatur ebenfalls höher. Im Fall des Merkmals „trockene Haut“ (Abb. 7.9) ist hier zunächst keine eindeutige Tendenz.



**Abb. 7.8** Übersicht der abgegebenen Voten - hier: Merkmal gereizte Augen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (20 °C/24 °C) und Lüftungsart (Q/M) (grün: nicht vorhanden oder störend, blau: etwas bis sehr störend).





**Abb. 7.9** Übersicht der abgegebenen Voten - hier: Merkmal trockene Haut in Abhängigkeit von Raumtemperatur (20 °C/24 °C) und Lüftungsart (Q/M) (grün: nicht vorhanden oder störend, blau: etwas bis sehr störend).

Um dies näher zu untersuchen, zeigt Abb. 7.10 eine Auswertung analog zu Abb. 7.1, hier jedoch für die betrachteten Merkmale im Bereich körperlicher Empfindungen. Bereits die Einfärbung verdeutlicht, dass kaum Zusammenhänge erkennbar sind. Schwache Zusammenhänge sind jeweils zwischen den Temperaturen erkennbar, wobei in der Tendenz die mittlere Ausprägung des „Gestört-seins“ im Fall der Schleimhäute (Augen, Nase, Mund, Hals) bei geringeren Temperaturen geringer ausgeprägt ist, während im Fall der Haut die Tendenz eher umgekehrt ist, wobei bei der Interpretation natürlich die vergleichsweise kurze Expositionszeit zu beachten ist.

		Versuchsserie 1: RH = 20%				
Var	Bezeichnung	Quellüftung (Q)		Mischlüftung (M)		Q-M Tendenz
		24°C	20°C	24°C	20°C	
AEm_Ae_Qw	<b>gereizte Augen</b>	1,7	1,5	1,8	1,5	→
	1 - nicht vorhanden	0,037		0,012		
	3 - etwas gestört	0,327				
	5 - sehr gestört	0,500				
AEm_Ne_Qw	<b>gereizte Nase</b>	1,6	1,5	1,6	1,6	→
	1 - nicht vorhanden	0,308		0,465		
	3 - etwas gestört	0,421				
	5 - sehr gestört	0,411				
AEm_Md_Qw	<b>trockener Mund</b>	1,7	1,6	1,6	1,5	→
	1 - nicht vorhanden	0,093		0,104		
	3 - etwas gestört	0,222				
	5 - sehr gestört	0,235				
AEm_Ht_Qw	<b>trockene Haut</b>	1,8	1,8	1,7	1,9	→
	1 - nicht vorhanden	0,445		0,079		
	3 - etwas gestört	0,223				
	5 - sehr gestört	0,212				
AEm_Hs_Qw	<b>trockener Hals</b>	1,7	1,5	1,6	1,4	→
	1 - nicht vorhanden	0,089		0,068		
	3 - etwas gestört	0,200				
	5 - sehr gestört	0,175				

**Erläuterung zur Darstellung:**  
Ergebnisse einseitiger t-Test für:

Quellüftung (Q)		Mischlüftung (M)	
24°C	20°C	24°C	20°C
1,7	1,5	1,8	1,5
0,037		0,012	
0,327			
0,500			

$Q_{24^\circ\text{C}} \text{ vs. } Q_{20^\circ\text{C}}$   
 $Q_{24^\circ\text{C}} \text{ vs. } M_{24^\circ\text{C}}$   
 $Q_{20^\circ\text{C}} \text{ vs. } M_{20^\circ\text{C}}$   
 $M_{24^\circ\text{C}} \text{ vs. } M_{20^\circ\text{C}}$

**Abb. 7.10** Übersicht zu Ergebnisgrößen körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24 °C/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p \leq 0,01$ , gelb:  $0,01 < p \leq 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Versuchsserie 1 (RH = 20 %).

Bezieht man das Ausgangsniveau (Votum zu Beginn eines Versuchstages) und bildet die Differenz zwischen dem Votum nach der Expositionsphase und diesem Votum zu Beginn eines Versuchstages, so ergibt sich das in Abb. 7.11 dargestellte Bild.

Dabei bestätigen sich i. w. die zuvor gemachten Aussagen: bei insgesamt geringen statistischen Ausprägungen der Zusammenhänge, ist in der Tendenz im Bereich der Schleimhäute (Augen Nase, Mund, Hals) eine geringere Verschlechterung bei geringeren Temperaturen festzustellen. Im Fall des Merkmals trockene Haut ist die Tendenz auch hier umgekehrt. Während in beiden Lüftungssituationen bei der höheren Temperatur im Mittel eine geringfügige Verbesserung gegenüber der Ausgangssituation (negative Werte) zu beobachten ist, liegt der Wert bei der geringeren Temperatur im positiven Bereich, was einer im Mittel geringfügigen Verschlechterung gegenüber der Ausgangssituation gleichkommt. Im Fall der Mischlüftung ist dieser Zusammenhang sogar hoch signifikant.

Dabei ist zu beachten, dass das Ausgangsniveau zu Beginn eines Versuchstages im Fall der trockenen Haut mit 1,9 gegenüber den übrigen Merkmalen (gereizte Auge: 1,3, gereizte Nase: 1,5, trockener Mund: 1,4 sowie trockener Hals: 1,4) deutlich ausgeprägter ist.

		Versuchsserie 1: RH = 20%				Q-M Tendenz
		Quellüftung (Q)		Mischlüftung (M)		
Var	Bezeichnung	24°C	20°C	24°C	20°C	
DEm_Ae_Qw	<b>gereizte Augen</b>	0,4	0,3	0,5	0,3	→
	-3 - deutl. Verbesserung	0,156		0,090		
	0 - keine Veränderung	0,343				
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,500				
DEm_Ne_Qw	<b>gereizte Nase</b>	0,1	0,2	0,0	0,2	→
	-3 - deutl. Verbesserung	0,171		0,092		
	0 - keine Veränderung	0,416				
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,406				
DEm_Md_Qw	<b>trockener Mund</b>	0,4	0,2	0,3	0,1	→
	-3 - deutl. Verbesserung	0,114		0,113		
	0 - keine Veränderung	0,252				
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,210				
DEm_Ht_Qw	<b>trockene Haut</b>	-0,2	0,0	-0,3	0,2	→
	-3 - deutl. Verbesserung	0,046		0,000		
	0 - keine Veränderung	0,229				
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,093				
DEm_Hs_Qw	<b>trockener Hals</b>	0,3	0,1	0,2	0,0	→
	-3 - deutl. Verbesserung	0,070		0,036		
	0 - keine Veränderung	0,189				
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,152				

Quellüftung (Q)		Mischlüftung (M)	
24°C	20°C	24°C	20°C
0,4	0,3	0,5	0,3
0,156		0,090	
0,343			
0,500			

Erläuterung zur Darstellung:  
Ergebnisse einseitiger t-Test für:

$Q_{24^\circ\text{C}} \text{ vs. } Q_{20^\circ\text{C}}$   
 $Q_{24^\circ\text{C}} \text{ vs. } M_{24^\circ\text{C}}$   
 $Q_{20^\circ\text{C}} \text{ vs. } M_{20^\circ\text{C}}$   
 $M_{24^\circ\text{C}} \text{ vs. } M_{20^\circ\text{C}}$

**Abb. 7.11** Übersicht zu Ergebnisgrößen der Änderung körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24 °C/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p \leq 0,01$ , gelb:  $0,01 < p \leq 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Versuchsserie 1 (RH = 20 %).

Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen der Versuchsserie 2 bei einer relativen Luftfeuchte von 40 % so ergeben sich die in Abb. 7.12 und Abb. 7.13 dargestellten Bilder.

In Abb. 7.12 ist dabei zunächst ein Vergleich der Ergebnisse bei den unterschiedlichen relativen Luftfeuchten dargestellt. Die Einfärbung macht wiederum die Effekte von Lufttemperatur und Lüftungsszenario deutlich, d. h., ob und inwieweit ein Effekt bezogen auf die Zielgrößen besteht.

Abb. 7.13 zeigt den Vergleich der beiden Lüftungsszenarien. Die Einfärbung macht auch hier wiederum die Effekte von Lufttemperatur und betrachteten relativen Luftfeuchten deutlich, d. h., ob und inwieweit ein Effekt bezogen auf die Zielgrößen besteht.

Auch hier zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bereits zuvor. In beiden Fällen überwiegen die Mittelwertänderungen hin zu geringfügig positiven Werten, was einer geringfügig negativen Veränderung der körperlichen Empfindungen während der Expositionsphasen entspricht. Negative Werte, also positive Veränderungen der körperlichen Empfindungen sind dabei überwiegend bei den höheren Lufttemperaturen zu beobachten. Betrachtet man die Signifikanzen, so zeigen sich lediglich vereinzelt signifikante Unterschiede und dann jeweils nur bei Betrachtung der Lufttemperaturen. Diese Beobachtung ist gleichermaßen bei beiden untersuchten relativen Luftfeuchten festzustellen.

		Versuchsserie 1: RH = 20%				Versuchsserie 2: RH = 40%			
		Quelllüftung (Q)		Mischlüftung (M)		Quelllüftung (Q)		Mischlüftung (M)	
Var	Bezeichnung	24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C
DEm_Ae_Qw	<b>gereizte Augen</b>	0,4	0,3	0,5	0,3	0,1	0,3	0,0	0,2
	-3 - deutl. Verbesserung	0,156		0,090		0,082		0,130	
	0 - keine Veränderung	0,343				0,368			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,500				0,143			
DEm_Ne_Qw	<b>gereizte Nase</b>	0,1	0,2	0,0	0,2	-0,2	0,1	-0,3	0,1
	-3 - deutl. Verbesserung	0,171		0,092		0,044		0,002	
	0 - keine Veränderung	0,416				0,225			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,406				0,341			
DEm_Md_Qw	<b>trockener Mund</b>	0,4	0,2	0,3	0,1	0,5	0,1	0,3	0,2
	-3 - deutl. Verbesserung	0,114		0,113		0,010		0,244	
	0 - keine Veränderung	0,252				0,180			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,210				0,229			
DEm_Ht_Qw	<b>trockene Haut</b>	-0,2	0,0	-0,3	0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,0
	-3 - deutl. Verbesserung	0,046		0,000		0,446		0,057	
	0 - keine Veränderung	0,229				0,500			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,093				0,072			
DEm_Hs_Qw	<b>trockener Hals</b>	0,3	0,1	0,2	0,0	0,5	0,2	0,2	0,3
	-3 - deutl. Verbesserung	0,070		0,036		0,045		0,276	
	0 - keine Veränderung	0,189				0,061			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,152				0,243			

N = 66                      weiblich: 36                      männlich: 30                      weiblich: 21                      männlich: 14

**Abb. 7.12** Übersicht zu Ergebnisgrößen der Änderung körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24 °C/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p \leq 0,01$ , gelb:  $0,01 < p \leq 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Vergleich der Ergebnisse bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % (Versuchsserie 1, links) und 40 % (Versuchsserie 2, rechts).

		Quelllüftung (Q)				Mischlüftung (M)			
		VR 1; RH=20%		VR2; RH=40%		VR 1; RH=20%		VR2; RH=40%	
Var	Bezeichnung	24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C	24°C	20°C
DEm_Ae_Qw	<b>gereizte Augen</b>	0,4	0,3	0,1	0,3	0,5	0,3	0,0	0,2
	-3 - deutl. Verbesserung	0,156		0,082		0,090		0,130	
	0 - keine Veränderung	0,047				0,015			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,300				0,360			
DEm_Ne_Qw	<b>gereizte Nase</b>	0,1	0,2	-0,2	0,1	0,0	0,2	-0,3	0,1
	-3 - deutl. Verbesserung	0,171		0,044		0,092		0,002	
	0 - keine Veränderung	0,068				0,021			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,195				0,253			
DEm_Md_Qw	<b>trockener Mund</b>	0,4	0,2	0,5	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2
	-3 - deutl. Verbesserung	0,114		0,010		0,113		0,244	
	0 - keine Veränderung	0,332				0,471			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,110				0,363			
DEm_Ht_Qw	<b>trockene Haut</b>	-0,2	0,0	-0,2	-0,2	-0,3	0,2	-0,2	0,0
	-3 - deutl. Verbesserung	0,046		0,446		0,000		0,057	
	0 - keine Veränderung	0,397				0,330			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,017				0,101			
DEm_Hs_Qw	<b>trockener Hals</b>	0,3	0,1	0,5	0,2	0,2	0,0	0,2	0,3
	-3 - deutl. Verbesserung	0,070		0,045		0,036		0,276	
	0 - keine Veränderung	0,161				0,444			
	+3 - deutl. Verschlechterung	0,325				0,011			

**Abb. 7.13** Übersicht zu Ergebnisgrößen der Änderung körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24 °C/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p \leq 0,01$ , gelb:  $0,01 < p \leq 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Vergleich der Ergebnisse bei Quelllüftung (links) und Mischlüftung (rechts).

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die unterschiedlichen untersuchten Lüftungsarten mit geringen und erhöhten Luftgeschwindigkeiten eher höhere Effekte zeigen als das bei der hier betrachteten Änderung der relativen Luftfeuchte von 20 % auf 40 % beobachtet werden konnte.

Die Kombinationswirkung von Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit zeigt dabei im Mittel nicht nur im Hinblick auf das Klimaempfinden sondern auch in der Tendenz bei körperlichen Empfindungen einen deutlicheren Einfluss als eine Variation der relativen Luftfeuchte von 20 % auf 40 %.

In der Tendenz zeigt sich, dass höhere Raumtemperaturen zwar mit einem besseren Klimaempfinden, jedoch auch mit stärkeren Reizungen der Schleimhäute verbunden zu sein scheinen.

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde auf Basis zahlreicher Modell- und Laboruntersuchungen ein Aml-Plattformkonzept (**Aml = Ambient Intelligence**) zur Wirkung des Raumklimas auf die Haut entwickelt. Ziel ist es, mit einer intelligenten Regelung des Raumklimas die Austrocknung der Haut bei winterlich trockener Raumluft zu reduzieren. Für die Konzeption des dafür nötigen Aml-Reglers und der integrierten Modelle wurden vielfältige Untersuchungen raumklimatischer Situationen in Büros in unterschiedlicher Detailstärke auf Basis gekoppelter Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen durchgeführt. Dafür notwendige Stoffdaten (Wasserverlust der Haut) wurden mit Probandenversuchen in einer Klimakammer ermittelt.

Für die Aml-Konzeptentwicklung, den Aufbau von Simulationsmodellen sowie Probandenversuche wurden drei Entwicklungslinien verfolgt, die Betrachtungsmöglichkeiten für das Phänomen „Trockene Luft“ bieten. Sie werden in gemeinsamen Handlungsempfehlungen zusammengeführt, die Hinweise zu möglichen technischen, organisatorischen und persönlichen Maßnahmen zum Umgang mit der während der Heizphase auftretenden trockenen Raumluft geben.

Für das **Aml-Konzept** wurde zunächst ein Interface definiert. Darauf aufbauend erfolgte die Implementierung eines Reglers mit integriertem, an die Regelung gekoppeltem Raummodell. Zudem wurde ein ebenfalls mit dem Raummodell gekoppeltes Personenmodell in den Regler integriert. Auf diese Weise ist es möglich, im Regler zu „erahnen“, welche Auswirkungen die raumklimatischen Parameter auf die Personen haben werden. Die Ergebnisse der diesbezüglichen Berechnungen zeigen gemäß den jeweiligen Vorgaben optimierte thermisch und hygrisch behagliche raumklimatische Verhältnisse. Die Integration eines Personenmodelles in einen Regler stellt eine Neuheit dar, die nach dem Projekt weiterentwickelt werden kann.

Für die **gekoppelten Simulationen** von Raumluftströmung, Gebäude und technischen Anlagen wurden zwei Modelle der Klimakammer in Dortmund in unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung erzeugt, um zum einen sehr detailstark (aber zeitintensiv) und zum anderen weniger detailliert, dafür jedoch sehr schnell Informationen zur Vorbereitung der Probandenversuche liefern zu können. Die Ergebnisse zeigten, dass vor allem die Strömungsverhältnisse in der ursprünglich vorgesehenen Klimabox weder als Quelläftung noch als Verdrängungslüftung eingestuft werden konnten. Daraufhin wurden unter Nutzung der Berechnungsmodelle Veränderungsvorschläge für Umbauten ausgearbeitet und umgesetzt. Durch die Um- und Neugestaltungen zeigten sich in den anschließenden Messungen durchgängig höhere mittlere Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade in der Raumluftströmung der Klimakammer, die als typische Mischlüftung charakterisiert werden kann, gegenüber einer Klimabox, in der eine eindeutige Quelläftungssituation vorliegt.

Die erforderlichen Veränderungen in Klimakammer und Klimabox waren geometrisch so weitreichend, dass das Strömungssimulationsmodell vollständig neu aufgebaut werden musste. Die Berechnungen wurden zudem ebenfalls um ein Personenmodell erweitert, um eine vollständige Abbildung aller raumklimatischen Parameter auf die Person in die Simulation und vor allem, die Reaktion der Personen darauf einzubeziehen. Der Vergleich mit den Messwerten fällt unterschiedlich aus. Zum einen ist sehr

gut zu sehen, wie die raumklimatischen Parameter auf das Personenmodell wirken und dass das Personenmodell tendenziell korrekte Reaktionen zeigt. Zum anderen gibt es bislang noch teilweise Abweichungen zwischen einzelnen Berechnungsergebnissen und den Messergebnissen, z. B. bei der berechneten Verdunstungsrate im Bereich des Kopfes.

Da die hier genutzten, detailstarken Berechnungsmodelle einen sehr großen rechen- und datentechnischen Aufwand erzeugten, wurden auf Basis dieser Modelle für die Variantenuntersuchungen entsprechende Vereinfachungen der Modellierung, z. B. bei der Nachbildung der Personen vorgenommen. Auf die Einkopplung des Personenmodelles wurde zugunsten der üblicherweise genutzten Gütekriterien (thermischer Komfort, Energieeinsatz, Verdunstungsrate der Haut und Luftqualität) verzichtet. Außerdem wurde eine typische Büroraumgeometrie ausgewählt, um in der Praxis häufig auftretende Heizungs- und Lüftungssysteme berechnen und bewerten zu können. Dies erfolgte für unterschiedliche Szenarien und Heizfälle. Je nach Wärmeübergabemechanismus und Luftführungsart erzeugen die Systeme im Nahbereich der Personen unterschiedliche Strömungsverhältnisse, die die Austrocknung von Haut und Augen mehr oder weniger begünstigen.

Die **Probandenversuche** wurden in zwei Versuchsserien in den Jahren 2017 und 2018 jeweils im Zeitraum Mitte März bis Anfang Mai in der Klimakammer der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin am Standort Dortmund bei jeweils konstanter relativer Luftfeuchte von 20 % (Versuchsserie 1) und 40 % (Versuchsserie 2) durchgeführt. Die Regelung der Klimakammer ermöglichte dabei weitgehend konstante Klimabedingungen hinsichtlich Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte. Die weiterentwickelte Klimabox ermöglichte darüber hinaus mit Quell- und Mischlüftung unterschiedliche Lüftungsszenarien abzubilden, wie sie in der Praxis vorzufinden sind.

Mit insgesamt  $2 \times 2 \times 2 = 8$  Bedingungskonstellationen (2 Raumtemperaturen (20 °C/24 °C – 2 relativen Luftfeuchten (20 %/40 %) - 2 Strömungsgeschwindigkeiten (etwa 0,04 m/s/0,12 m/s) konnten so Eckpunkte der drei Klimagrößen, wie sie in der meist winterlichen Heizphase zu beobachten sind, betrachtet und ausgewertet werden. Insgesamt 66 Probanden nahmen an Versuchsserie 1 teil, für Versuchsserie 2 wurde ein Sub-Kollektiv von 35 Personen gewählt. Mit Blick auf die Erwerbsbevölkerung wurde bei der Auswahl der Probanden eine weitgehende Gleichverteilung hinsichtlich Geschlecht und Alter beachtet. Die Expositionsdauer bei jeder der insgesamt 8 Bedingungskonstellationen betrug für jeden Probanden ca. 1-1,5 Stunden. In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Expositionsdauer auf z. B. 4 Stunden keine wesentlichen Veränderungen der Wirkparameter mit sich brachte.

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Lüftungsart einen signifikanten Einfluss auf das Klimaempfinden und die Abdunstung der Haut aufweist. Die Quelläftung mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten wird von Probanden besser bewertet und verursacht in der Tendenz eine geringere Abdunstung der Haut. Bei Raumtemperaturen von 20 °C wird das Raumklima als leicht zu kalt bewertet und die Abdunstung verringert sich. In der Tendenz ist bei dieser Raumtemperatur eine geringere Ausprägung negativer körperlicher Empfindungen zu beobachten. Ein Vergleich der Versuchsserien zeigte, dass der Einfluss der Luftgeschwindigkeit sich ausgeprägter darstellt als

die Variation der relativen Luftfeuchten an den gewählten Eckpunkten, eine Intervention mit dem Ziel geringerer Strömungsgeschwindigkeiten durchaus wirkungsvoll sein kann.

Bei Arbeiten mit Probanden im geplanten Zeitfenster eines Projektes lassen sich in Laborversuchen lediglich Kurzzeiteffekte beobachten, die u. U. von Speichereffekten und Regulierungsmechanismen der menschlichen Haut überlagert werden. Die zusätzliche Berücksichtigung von möglichen Langzeiteffekten erfordert Ergebnisse von Langzeit- oder Feldstudien, um Aussagen zur Langzeitwirkung der relativen Luftfeuchtigkeit treffen zu können.

Aus den Ergebnissen der einzelnen Entwicklungslinien wurden **Handlungsempfehlungen** abgeleitet, die sich sowohl an den Betrieb technischer Anlagen zur Optimierung der Raumluft als auch an Verhaltensweisen der Beschäftigten richten, um negative Auswirkungen während der meist winterlichen Heizphase zumindest helfen zu reduzieren („Trockene Luft im Büro - Tipps für Arbeit und Wohlbefinden“, gesondert veröffentlicht).



## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 3.1</b>	Aml-Plattformmodell mit (farblicher) Zweiteilung am Aml-Interface	14
<b>Abb. 3.2</b>	Daten, die über das Aml-Interface im Rahmen einer prädiktiven Regelung ausgetauscht werden.	15
<b>Abb. 3.3</b>	Optimierungszyklus eines prädiktiven Reglers für Klimaanlage (Zustandsdiagramm).	16
<b>Abb. 3.4</b>	Datenflüsse und Teilmodelle der „Gebäudesimulations-Funktion“.	18
<b>Abb. 3.5</b>	Verdunstungsmodell als Beispiel eines Blocks.	20
<b>Abb. 3.6</b>	Gebäudesimulation (via Aml-Interface) als Block.	21
<b>Abb. 3.7</b>	Prinzip des implementierten einfachen Optimierungsalgorithmus.	24
<b>Abb. 3.8</b>	Randbedingungen der Simulationen.	27
<b>Abb. 3.9</b>	Stellgrößen bei Optimierung des PMV unter Einhaltung einer Mindestluftfeuchtigkeit von 30 % im Raum (ca. 4000 Iterationen pro Abtastschritt).	29
<b>Abb. 3.10</b>	Raumbezogene Größen bei Optimierung des PMV unter Einhaltung einer Mindestluftfeuchtigkeit von 30 % im Raum (ca. 4000 Iterationen pro Abtastschritt).	30
<b>Abb. 4.1</b>	Erstes geometrisches Modell der Klimakammer der BAuA in Dortmund mit Klimabox und statischen Personen. AP-Arbeitsplatz; ZU-Zuluftöffnung; AB-Abluftöffnung; KB-Klimabox; MP-Messplatz; TW-Trennwand.	34
<b>Abb. 4.2</b>	Aufbau einer neuen Klimabox, mit der das Strömungsmuster einer Quelllüftung realisiert wird.	36
<b>Abb. 4.3</b>	Platzierung des Messbaumes mit drei Geschwindigkeitssonden während der Testmessungen.	37
<b>Abb. 4.4</b>	Höhenprofile der mittleren Luftgeschwindigkeit und des mittleren Turbulenzgrades der Luft über Bilanzräume von 10 Sekunden. P1-P5, HMS – gemessen in der großen Klimakammer; VMIN, VMID und VMAX gemessen bei verschiedenen Luftvolumenströmen in der Klimabox nach Abb. 4.3.	38
<b>Abb. 4.5</b>	Geometrisches Modell der Klimakammer (mit Segmentierung der Flächen für den Randbedingungs- und Strahlungswärme-austausch) der BAuA in Dortmund, Blick ins Innere der Klimabox und der Klimakammer.	40
<b>Abb. 4.6</b>	Modellierte Personen in der Klimakammer und Kopfbereich im Detail mit Oberflächenvernetzung.	40
<b>Abb. 4.7</b>	Kennzeichnung der Zu- und Abluftöffnungen (über Strömungsvektoren) im geometrischen Modell der Klimakammer der BAuA in Dortmund (Luftansaugung für die Klimabox oberhalb der Box).	41
<b>Abb. 4.8</b>	Geometrisches Modell der Klimakammer der BAuA in Dortmund, entsprechend der Lufttemperatur eingefärbtes Geschwindigkeitsfeld.	42

<b>Abb. 4.9</b>	Vertikale und horizontale Schnittebenen der resultieren Geschwindigkeit in der Klimakammer mit Geschwindigkeitsvektoren (Farbe entspricht resultierender Geschwindigkeit).	42
<b>Abb. 4.10</b>	y-z-Schnittebenen der resultieren Geschwindigkeit in der Klimabox.	43
<b>Abb. 4.11</b>	x-y-Schnittebene des Turbulenzgrades der Raumluchtströmung in der Klimakammer im Kopfbereich der Probanden.	44
<b>Abb. 4.12</b>	x-y-Schnittebene des Turbulenzgrades der Raumluchtströmung in der Klimabox im Kopfbereich des Probanden.	44
<b>Abb. 4.13</b>	Simulierte Sensortemperaturen für Klimakammer und Klimabox an zwei Messpunkten, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C, rechts für 24 °C (grau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).	45
<b>Abb. 4.14</b>	Gemessene Sensortemperaturen ausgewählter Probandenversuche für Klimakammer und Klimabox an den Messpunkten, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C (3.5.2017), rechts für 24 °C (18.4.2017) (blau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).	46
<b>Abb. 4.15</b>	Simulierte relative Luftfeuchten an den Sensorpunkten für Klimakammer und Klimabox, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C, rechts für 24 °C (grau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).	46
<b>Abb. 4.16</b>	Relative Luftfeuchten an den Sensorpunkten ausgewählter Probandenversuche für Klimakammer und Klimabox, links für Temperaturen im Aufenthaltsbereich von 20 °C (5.5.2017), rechts für 24 °C (18.4.2017) (blau hinterlegte Bereiche sind Messpausen in der Box).	47
<b>Abb. 4.17</b>	Zusammenfassung aller Messdaten der Lufttemperaturen für die Sensoren in der Klimakammer (links) und in der Klimabox (rechts), Temperaturen im Aufenthaltsbereich 20 °C, Darstellung der Minimal-, der Maximal- und der Mittelwerte.	48
<b>Abb. 4.18</b>	Zusammenfassung aller Messdaten der Lufttemperaturen für die Sensoren in der Klimakammer (links) und in der Klimabox (rechts), Temperaturen im Aufenthaltsbereich 24 °C, Darstellung der Minimal-, der Maximal- und der Mittelwerte.	48
<b>Abb. 4.19</b>	Vergleich aller Messdaten (min, max, mittel) und der Simulationsergebnisse der Luftgeschwindigkeit für die Sensoren in der Klimakammer, links Temperaturen im Aufenthaltsbereich 20 °C, rechts 24 °C.	49
<b>Abb. 4.20</b>	Vergleich aller Messdaten (min, max, mittel) und der Simulationsergebnisse des Turbulenzgrades für die Sensoren in der Klimakammer, links Temperaturen im Aufenthaltsbereich 20 °C, rechts 24 °C.	49

- Abb. 4.21** Vergleich der Hauttemperatur der Hände zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur 20 °C, links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von 20 %, rechts bei 40 %. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien. 51
- Abb. 4.22** Vergleich der Hauttemperatur der Hände zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur 24 °C, links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von 20 %, rechts bei 40 %. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien. 51
- Abb. 4.23** Vergleich der Hauttemperatur des Kopfes zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010), links für die Umgebungstemperatur 20 °C, rechts für 24 °C, jeweils für beide relativen Luftfeuchtigkeiten der Umgebung. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien. 52
- Abb. 4.24** Vergleich der Verdunstungsrate der Hände in g/h/m<sup>2</sup> zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur 20 °C, links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von 20 %, rechts bei 40 %. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien. 52
- Abb. 4.25** Vergleich der Verdunstungsrate der Hände in g/h/m<sup>2</sup> zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) für die Umgebungstemperatur 24 °C, links bei relativer Luftfeuchte der Umgebung von 20 %, rechts bei 40 %. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien. 53
- Abb. 4.26** Vergleich der Verdunstungsrate des Kopfes in g/h/m<sup>2</sup> zwischen den Messdaten und dem Simulationsmodell nach (STREBLOW 2010) , links für die Umgebungstemperatur 20 °C, rechts für 24 °C, jeweils für beide relativen Luftfeuchtigkeiten der Umgebung. Messdaten sind als Punkte dargestellt (ebenfalls getrennt nach relativer Luftfeuchte), Simulationsergebnisse als Linien. 53
- Abb. 4.27** Geometrie des gewählten Büroraumes (Grundfläche 5 m x 6 m) für die Raumluftrömungsstudien bei verschiedenen Heizungs- und Lüftungssystemen, mit Kennzeichnung verschiedener Optionen für Zu- und Abluft (1 bis 7) und potentiellen Sensorpositionen (blaue Kugeln). 54
- Abb. 4.28** Resultierende Geschwindigkeit bei im x-z- Mittelschnitt bei Lüftung durch Drallluftdurchlässe (Nr. 2 in Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau nach EnEV09, schwere Bauweise. 55
- Abb. 4.29** Resultierende Geschwindigkeit im x-z- Mittelschnitt bei Quelllüftung (Luftdurchlässe Nr. 1 gemäß Abb. 4.27 aktiv), Wärmeschutzniveau nach EnEV09, schwere Bauweise. 56

<b>Abb. 4.30</b>	Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Heizkörperheizung (vgl. Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau: sanierter Altbau.	57
<b>Abb. 4.31</b>	Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Heizkörperheizung mit ALD zur Lüftung (Nr. 4 unten in Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau: sanierter Altbau.	58
<b>Abb. 4.32</b>	Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Fußbodenheizung und Drallluftdurchlässe in der Decke (Nr. 2 in Abb. 4.27) Wärmeschutzniveau EnEV09, leichte Bauweise, Glasfassade.	59
<b>Abb. 4.33</b>	Resultierende Geschwindigkeit im y-z- Mittelschnitt bei Betonkernaktivierung mit ALD zur Lüftung (Nr. 4 unten in Abb. 4.27), Wärmeschutzniveau EnEV09, schwere Bauweise.	60
<b>Abb. 5.1</b>	Untersuchte Klimabedingungen (grün/vorn: Versuchsserie 1, gelb/hinten: Versuchsserie 2).	62
<b>Abb. 5.2</b>	Beurteilung des Raumklimas aus der Sicht der dort beschäftigten Personen (aus: Bischof et. al., 2003)	65
<b>Abb. 5.3</b>	Zufriedenheit mit dem Raumklima der dort beschäftigten Personen (aus: BISCHOF et. al., 2003)	65
<b>Abb. 5.4</b>	Verbesserungspotenziale des Raumklimas aus der Sicht der dort beschäftigten Personen (aus: BISCHOF et. al., 2003, Mehrfachnennungen möglich).	66
<b>Abb. 6.1</b>	Layout der Versuchsanordnung (alle Abmessungen in cm).	68
<b>Abb. 6.2</b>	Layout der Versuchsanordnung mit Illustrationen.	69
<b>Abb. 6.3</b>	Versuchsplan während der Hauptversuche.	70
<b>Abb. 6.4</b>	Eingesetzte Messtechnik zur Erfassung der Wirkparameter. (Bildquelle: Institut ASER e.V.)	71
<b>Abb. 6.5</b>	Durchführung der Probandenversuche – Messung der Hautparameter. (Bildquelle: Institut ASER e.V.)	72
<b>Abb. 6.6</b>	Eingesetzte Fragebögen – hier: Fragen vor der Expositionsphase	73
<b>Abb. 6.7</b>	Eingesetzte Fragebögen – hier: Fragen im Anschluss an eine und Notizen während der Expositionsphasen	73
<b>Abb. 6.8</b>	Außenklimabedingungen während der Versuchsserien hier: Tagestiefsttemperaturen ( $\approx$ Nachttiefsttemperaturen). Datenquelle: AccuWeather.com	74
<b>Abb. 6.9</b>	Layout der Versuchsanordnung und ausgewählte Klimaparameter.	75
<b>Abb. 7.1</b>	Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün: $p < 0,01$ , gelb: $0,01 < p < 0,10$ ; orange: $p > 0,10$ ) hier: Versuchsserie 1 bei 20 % RH	78

- Abb. 7.2** Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten grün:  $p < 0,01$ , gelb:  $0,01 < p < 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Vergleich der Ergebnisse bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % (Versuchsserie 1, links) und 40 % (Versuchsserie 2, rechts). 79
- Abb. 7.3** Übersicht ausgewählter Ergebnisgrößen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24/20 °C) und relativer Luftfeuchte (20%/40%) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten grün:  $p < 0,01$ , gelb:  $0,01 < p < 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Vergleich der Ergebnisse bei Quelläftung (links) und Mischlüftung (rechts). 81
- Abb. 7.4** Zum Klimaempfinden – Vergleich der ermittelten und prognostizierten Werte – hier: betrachtete Mischlüftung bei 20 °C u 24 °C, jeweils 20 % RH. 82
- Abb. 7.5** Zum Klimaempfinden – Vergleich der ermittelten und prognostizierten Werte – hier: betrachtete Quelläftung bei 20 °C u 24 °C, jeweils 20 % RH. 83
- Abb. 7.6** Zum Zugluftempfinden. 86
- Abb. 7.7** Fragestellungen zu körperlichen Empfindungen 87
- Abb. 7.8** Übersicht der abgegebenen Voten - hier: Merkmal gereizte Augen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (20/24 °C) und Lüftungsart (Q/M) (grün: nicht vorhanden oder störend, blau: etwas bis sehr störend). 88
- Abb. 7.9** Übersicht der abgegebenen Voten - hier: Merkmal trockene Haut in Abhängigkeit von Raumtemperatur (20/24 °C) und Lüftungsart (Q/M) (grün: nicht vorhanden oder störend, blau: etwas bis sehr störend). 89
- Abb. 7.10** Übersicht zu Ergebnisgrößen körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p < 0,01$ , gelb:  $0,01 < p < 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Versuchsserie 1 (RH = 20 %). 90
- Abb. 7.11** Übersicht zu Ergebnisgrößen der Änderung körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p < 0,01$ , gelb:  $0,01 < p < 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Versuchsserie 1 (RH = 20 %). 91
- Abb. 7.12** Übersicht zu Ergebnisgrößen der Änderung körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p < 0,01$ , gelb:  $0,01 < p < 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Vergleich der Ergebnisse bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % (Versuchsserie 1, links) und 40 % (Versuchsserie 2, rechts). 92

**Abb. 7.13** Übersicht zu Ergebnisgrößen der Änderung körperlicher Empfindungen in Abhängigkeit von Raumtemperatur (24/20 °C) und Lüftungsart (Q/M) mit Färbung in Abhängigkeit von den ermittelten und angegebenen p-Werten (grün:  $p < 0,01$ , gelb:  $0,01 < p < 0,10$ ; orange:  $p > 0,10$ ) hier: Vergleich der Ergebnisse bei Quelllüftung (links) und Mischlüftung (rechts).

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 3.1</b>	Parameter und Rückgabewerte der Funktion "ami_interface_iterative".	22
<b>Tab. 3.2</b>	Mittelwerte der optimierten Zuluftparameter beim Dummy-Raummodell.	26
<b>Tab. 5.1</b>	Deskription der Variable Lufttemperatur im Raum nach verschiedenen Merkmalen (aus: BISCHOF et. al., 2003)	63
<b>Tab. 5.2</b>	Deskription der Variable relative Luftfeuchte im Raum nach verschiedenen Merkmalen (aus: Bischof et. al., 2003)	64
<b>Tab. 6.1</b>	Kleidungsstücke und Isolationswerte (vgl. DIN EN ISO 9920)	77
<b>Tab. 6.2</b>	Ermittelte mittlere Bekleidungsisolationen hier: Versuchsserie 1	77
<b>Tab. 7.1</b>	Vergleich der für die untersuchten Versuchsbedingungen ermittelten und prognostizierten Werte zum Klimaempfinden in einer Übersicht	83
<b>Tab. 7.2</b>	Mittleres Votum (MV) und Anteil Unzufriedener (PD) für die betrachteten Dimensionen des Klimaempfindens – hier: betrachtete Mischlüftung bei 20 °C u 24 °C, jeweils 20 % RH.	84
<b>Tab. 7.3</b>	Mittleres Votum (MV) und Anteil Unzufriedener (PD) für die betrachteten Dimensionen des Klimaempfindens – hier: betrachtete Quelllüftung bei 20 °C u 24 °C, jeweils 20 % RH	85

## Literaturverzeichnis

**Bernard, T.; Moghaddam, E. E.:** Nonlinear Model Predictive Control of a Glass forming Process based on a Finite Element Model. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich, Germany, October 4-6, 2006, pp. 960-965.

**Bischof, W.; Bullinger-Naber, M.; Kruppa, B.; Müller, B.H.; Schwab, R. (Hrsg.):** Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Büroräumen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003, ISSN 3-8167-6408-8

**Camacho, E. F.; Bodons, C.:** Model predictive control. 2nd edition, London, Springer, 2004.

**Collette, Y.; Siarry, P.:** Multiobjective Optimization. Principles and Case Studies. Springer, Berlin, 2003.

**Duby, R.; Hassan, M.; Li, C.; Charest, M.:** Finite element based model predictive control for active vibration suppression of a one-link flexible manipulator. ISA Transactions, 53, 2014, pp. 1609-1619.

**Derby, M. M., Pasch, R. M.:** Effects of low humidity on health, comfort & IEQ. ASHRAE Journal, Technical Feature Sept. 2017: 44-51.

**Hahn von, Nadja:** „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie, Innenraumluft 67, 2007

**Hellwig, R.T.; Nöske, I.; Brasche, S.; Gebhardt, Hj.; Levchuk, I.; Bischof, W.:** Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung F 2039, Dortmund/Berlin/Dresden, BAuA Eigenverlag, Dortmund, 2012, ISBN 978-3-88261-142-7

**Kozak, W.; Stein, D.; Felsmann, C.; Hensel, B.; Kabitzsch, K.; Rösler, M.:** Möglichkeiten und Grenzen einer Aml-basierten Regelung raumlufftechnischer Anlagen und beispielhafte Anwendung auf das Phänomen „Trockene Luft“, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Abschlussbericht zu Projekt F2299-1, 2014

**Kramer, S.C., Gritzki, R., Perschk, A., Rösler, M., Felsmann, C.:** Fully parallel, OpenGL-based computation of obstructed area-to-area view factors, Journal of Building Performance Simulation. 2014, DOI: 10.1080/19401493.2014.917700

**Levi, K., Dauskardt, R.H.:** Biomechanics of the Barrier Function of Human Stratum Corneum. in M. Lodén, H.I. Maibach “Treatment of Dry Skin Syndrome. The Art and Science of Moisturizers” Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012 ISBN 978-3-642-27605-7 DOI 10.1007/978-3-642-27606-4

**Loden, M., Maibach, H.I.:** Biomechanics of the Barrier Function of Human Stratum Corneum. in M. Lodén, H.I. Maibach “Treatment of Dry Skin Syndrome. The Art and Science of Moisturizers” Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012 ISBN 978-3-642-27605-7 DOI 10.1007/978-3-642-27606-4

**Pfluger, R., Feist, W., Tietjen, A., Neher, A.:** Physiological impairments of individuals at low indoor air humidity. Gefahrstoffe Reinhaltung Luft 73(3) 2013:107-108



**Proksch, E., Lachapelle, J.-M.:** The management of of dry skin with topical emollients- recent perspectives. Journal of the German Society of Dermatology JDDG, 2005 3:768-774.

**Proksch, E.:** The Role of Emollients in the Management of Diseases with Chronic Dry Skin. Skin Pharmacol Physiol 2008;21:75-80

**Proksch, E., Fölster-Holst, R., Bräutigam, M., Sepehrmanesh, M., Pfeiffer, S., Jensen, J.-M.:** Role of the epidermal barrier in atopic dermatitis. Journal of the German Society of Dermatology JDDG; 2009 7:899-910

**Proksch, E., Weidinger, S.:** Neue Erkenntnisse zur Pathogenese der empfindlichen Haut. Hautarzt 2011 62:900-905

**Schaefer, H., Redelmeier, T. E.:** Skin Barrier. Principles of Percutaneous Absorption. ISBN 3-8055-6326-4 Karger Verlag 1996

**Seifert, J., Gritzki, R., Persch, A., Rösler, M., Knorr, M., Wild, M., Russ, C.:** Co-Simulation am Beispiel eines Dialyseraumes. GI Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis 2/2017

**Stick, C., Proksch, E.:** The Influence of Climate on the Treatment of Dry Skin with Moisturizer in M. Lodén, H.I. Maibach "Treatment of Dry Skin Syndrome. The Art and Science of Moisturizers" Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012 ISBN 978-3-642-27605-7 DOI 10.1007/978-3-642-27606-4

**Streblow, R.:** Thermal Sensation and Comfort Model for Inhomogenous Indoor Environments. Diss. RWTH-Aachen, 2010.

**Stubbe, D., Franzke, U., Gritzki, R., Kandzia, C., Rösler, M., Felsmann, C.:** Einfluss der Sensorpositionierung im Raum auf den Energiebedarf heiz- und raumluftechnischer Anlagen. Abschlussbericht zum BMWi-Vorhaben 03ET1077A, 2015

**Wang, T.-F., Kasting, G.B., Nitsche, J.M.:** A Multiphase Microscopic Diffusion Model for Stratum Corneum Permeability. I. Formulation, Solution, and Illustrative Results for Representative Compounds. Journal of Pharmaceutical Sciences Vol. 95, No. 3, March 2006, DOI: 10.1002/jps.20509

**Wang, T.-F.:** Microscopic Models for the Structure and Permeability of the Stratum Corneum Barrier Layer of Skin. Diss. State University of NY at Buffalo, 2005.

**Wellers, M. H.:** Nichtlineare Modellgestützte Prädiktive Regelung auf Basis von Wiener- und Hammerstein-Modellen. VDI Verlag GmbH, 1999