



Aml-basierte Regelung von Klimaanlage und Anwendung auf das Phänomen der „Trockenen Luft“

W. Kozak, D. Stein, C. Felsmann, B. Hensel, K. Kabitzsch, M. Rösler

**Forschung
Projekt F 2299**

W. Kozak
D. Stein
C. Felsmann
B. Hensel
K. Kabitzsch
M. Rösler

**Aml-basierte Regelung von Klimaanlage
und Anwendung auf das
Phänomen der „Trockenen Luft“**

Dortmund/Berlin/Dresden 2014

Diese Veröffentlichung ist der Zwischenbericht zum Projekt „Möglichkeiten und Grenzen einer Aml-basierten Regelung raumluftechnischer Anlagen und beispielhafte Anwendung auf das Phänomen ‚Trockene Luft‘“ – Projekt F 2299 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dipl.-Ing. Wojciech Kozak
Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann
Dr.-Ing. Markus Rösler
Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik
01062 Dresden

Dipl.-Inf. Denis Stein
Dipl.-Ing. Burkhard Hensel
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Kabitzsch
Technische Universität Dresden, Institut für Angewandte Informatik
01062 Dresden

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

Titelgrafik: Dr.-Ing. Ralf Gritzki
Technische Universität Dresden

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Telefon 0231 9071-0
Fax 0231 9071-2454
poststelle@buaa.bund.de
www.buaa.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Fax 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.

www.buaa.de/dok/5756236

ISBN 978-3-88261-033-8



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	5
Abstract	6
1 Einführende Bemerkungen	7
2 Regelungstechnische Zusammenhänge und Entwicklung eines Aml-Plattform-Konzepts	8
3 Grenzen der klassischen Klimaregelung	10
4 Modellierung des menschlichen Körpers und Dummy-Messungen der Verdunstungsrate der Haut	12
5 Detaillierte Gebäude- und Strömungssimulation	16
6 Schlussbemerkungen	19
Literaturverzeichnis	20

Aml-basierte Regelung von Klimaanlage und Anwendung auf das Phänomen der „Trockenen Luft“

Kurzreferat

Dieser Zwischenbericht fasst die Aktivitäten im Forschungsprojekt »Möglichkeiten und Grenzen einer Aml-basierten Regelung raumluftechnischer Anlagen und beispielhafte Anwendung auf das Phänomen „Trockene Luft“« zusammen. Zu Beginn stellt der Bericht verschiedene Aspekte gegenüber, um Beiträge zu ermitteln, die notwendig sind, um das Forschungsthema repräsentativ darzustellen. Vor diesem Hintergrund werden die messbaren Eigenschaften der Haut diskutiert und der Entwicklungsstand im Bereich Aml (Ambient Intelligence) aufgezeigt. Betrachtungen zur Regelung von RLT-Anlagen und Visionen einer Aml-Regelung schließen daran an.

Messungen zur Verdunstung an der Haut, nachempfunden durch speziell entworfene Probekörper und eine zugehörige Versuchseinrichtung, bilden einen weiteren Schwerpunkt des Berichtes. Diese Versuche waren notwendig, da die international recherchierte Datenlage keine gesicherten Erkenntnisse und Abhängigkeiten von raumluftechnischen Parametern zuließ. Als Ergebnis liegt eine Matrix zur Verdunstungsrate in Abhängigkeit der raumklimatischen Bedingungen vor.

Die Wirkungen von Lüftungssystemen wurden mit einem gezielt für die Aufgabenstellung weiterentwickelten Programm zur Gebäude- und Anlagensimulation berechnet. Die gewonnenen Daten zur raumklimatischen Situation wurden zunächst mit Hilfe eines Knoten- oder auch Zonenmodells dargestellt und dann mit einem detaillierten Feldmodell zur Strömungssimulation gekoppelt. Hier fließen Mess- und Berechnungsergebnisse in einem virtuellen Büro zusammen, die zeigen, dass die Strömung im Raum die Verdunstung an der Haut deutlich beeinflusst. Der Aufwand derartiger Berechnungen schränkt allerdings die wünschenswerte Variantenvielfalt deutlich ein. Die im Ergebnis aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Heizungs- und Lüftungssystem und lokalem Klima im Nahbereich von Personen geben daher weitere wichtige Anregungen zum Einsatz von Aml in der Klimatechnik, ohne jedoch einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Schlagwörter:

Aml-basierte Regelung, RLT-Anlagen, trockene Luft, relative Luftfeuchte, Hautfeuchtigkeit, Lidschlagfrequenz, Personenmodelle, Gebäudesimulation, Lokalisierung, Identifizierung, Raumlufströmung, Strömungssimulation (CFD)

Aml-based control of ventilation and air conditioning systems and exemplary application to the phenomenon of “dry air”

Abstract

This interim report covers all activities of the research project: Chances and limitations of Aml-based control of ventilation and air conditioning systems and exemplary application to the phenomenon of “dry air”. At first, an analysis of the kind of the contributions necessary to achieve a representative picture of the research topic at hand had been carried out. For this purpose, the measurable properties of the skin have been discussed and the state of the art of Aml (Ambient Intelligence) specified. The control of HVAC systems and visions of Aml control have also been thoroughly analyzed.

In addition to the requirements of an Aml-based humidity control the report specifically focuses on measurements of evaporation from the skin, that have been conducted on the specially designed test specimen in a dedicated test facility. These experiments were necessary because the data found during the comprehensive literature review did not account for the variation of the room air parameters. The measurements produced the matrix of the evaporation rates as a function of the local climatic conditions.

Furthermore, a building simulation program has been extended to take the human skin evaporation into account and used to carry out the needed calculations. Preliminary results have shown the indoor air quality and humidity calculated with the single node model. In the next stage this simplified model has been coupled with a detailed field model for flow simulation in order to account the air flow influence. The resulting virtual office has combined detailed air flow analysis with the thermal and hygrical simulation and the results of the evaporation experiments. This set up has been able to show that the flow in the room significantly affects the evaporation from the skin. The high expense of such calculations, however, significantly limits the number of calculations that can be carried out for the purpose of this study. The presented results offer valuable insights into the relationships between the heating and ventilation system and local climate in the vicinity of persons and provide important stimuli for the further development of Aml for HVAC systems but cannot and do not claim to represent the complete picture of the researched topic.

Key words:

Aml-based control, HVAC systems, dry air, relative humidity, moisture skin, eye blink frequency, humans, building simulation, localization, identification, indoor air flow, computational fluid dynamics (CFD)

1 Einführende Bemerkungen

Zur Optimierung des Raumklimas liegen umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen vor. Ziel ist es, ein behagliches und gesundheitlich zuträgliches Raumklima zu erzeugen. Dabei darf keine Gefährdung von Sicherheit und Gesundheit der Raumnutzer entstehen. Nicht optimal betriebene raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) können nicht nur zur Unbehaglichkeit bzw. Unzufriedenheit sondern auch zu einer gesundheitlichen Beeinträchtigung der Nutzer führen. Beides – Zufriedenheit und Nutzungssicherheit – muss von einer RLT-Anlage gewährleistet werden. Sind die komplexen objektiven Zusammenhänge zwischen Betrieb der RLT-Anlage, dem resultierenden Raumklima und möglichen negativen Auswirkungen auf die Gesundheit, z. B. dem Phänomen der „Trockenen Luft“, bekannt, so könnte mit einem auf Ambient Intelligence (Aml)-basierten Gebäudeautomatisationssystem gezielt darauf Einfluss genommen werden. Ambient Intelligence verkörpert eine „intelligente Umgebung“, die sensitiv und adaptiv auf die Anwesenheit von Menschen und Objekten reagieren soll und dabei dem Menschen vielfältige Dienste leistet. Ihr Einsatz ist für den Menschen in fast allen Lebenssituationen denk- und anwendbar.

Beschäftigte klagen oft in der kalten Jahreszeit über zu trockene Luft und damit verbundene Beschwerden (z. B. Hautprobleme, Reizungen der Augen, elektrische Aufladungen). Dabei wird häufig unzureichend betriebenen RLT-Anlagen die Schuld gegeben. Die Fachwelt diskutiert das Problem „Trockene Luft und ihre Auswirkungen auf Wohlbefinden und Gesundheit“ kontrovers. Zahlreiche Studien sprechen für und wider möglicher Auswirkungen von niedrigen relativen Luftfeuchten (Hahn, 2007). Dies ist vor allem durch die verschiedenen gleichzeitig einwirkenden Faktoren bedingt, denn auch Temperatur, Geschwindigkeit und Turbulenzgrad der Luft wirken sich auf die Feuchtigkeitsabgabe durch die Haut aus. Diese multifaktoriellen Wirkmechanismen in Verbindung mit der oft nur subjektiven Bewertung der beobachteten Wirkungen auf den Menschen können bei Betrachtung nur eines Faktors (z. B. Luftfeuchte) als Ursache für auftretende Probleme zu Fehlinterpretationen führen. Verschiedene Untersuchungen bestätigen die Notwendigkeit einer komplexen Betrachtung der genannten klimatischen Faktoren (Zeidler et al., 1999; Reske, 2002). Würde eine Aml-basierte Regelung von RLT-Anlagen dies berücksichtigen, könnte versucht werden die negativen Wirkungen zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Die gegenwärtige Situation zum Büroklima ist durch verschiedene Tendenzen gekennzeichnet. Zum einen gibt es Klimaanlageanlagen, die prinzipiell in der Lage sind, jedes gewünschte Klima zu erzeugen, aber durch wirtschaftliche Erwägungen und die Herausforderungen der effizienten Luftverteilung meist hinter ihren Möglichkeiten zurückbleiben. Zum anderen ist das trockene Büroklima im Winter bei Heizung und Fensterlüftung als bisher ungelöstes und kontrovers diskutiertes Thema bekannt. Deshalb ist es naheliegend, auch die Verbesserung raumklimatischer Bedingungen mit dem Einsatz von Aml in Verbindung zu bringen. Dazu gilt es, die komplexen Zusammenhänge von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Luftbewegung weiter zu erhellen bzw. der These nachzugehen, dass Luftgeschwindigkeit und Turbulenz einen ähnlichen Einfluss auf die Verdunstungsrate ausüben wie Temperatur und relative Luftfeuchte.

2 Regelungstechnische Zusammenhänge und Entwicklung eines Aml-Plattform-Konzepts

Die Verwendung einer persönlichen Aml-Regelung verlangt, dass das Regelungssystem die Nutzer erkennen, orten und ihre Präferenzen speichern und ihnen zuordnen kann. Dabei reicht es aus, die Anwesenheit der Nutzer zu erfassen und den Ort stationärer Arbeit zu kennen, z. B. den Schreibtisch, um die Aml-Regelung zu betreiben. Die Reaktion des Nutzers auf die Trockenheit der Luft kann mit Hilfe der Haut mit einem Blinzelerkennungssystem festgestellt werden. Die heutige Technik liefert bereits ambiente Sensorik, die sich mit der Messung dieser Parameter beschäftigt. Zur Realisierung einer ambienten, personalisierten Klimabeeinflussung am Arbeitsplatz, die präventiv Gesundheitsgefahren unterbindet, sind darüber hinaus folgende Elemente notwendig:

1. Sensoren zur
 - a. Erfassung des Raumklimas (u. a. Temperatur, Luftfeuchte)
 - b. Lokalisierung des Nutzers
 - c. Identifizierung des Nutzers
 - d. Erfassung des Befindens des Nutzers (optional)
2. Aktoren zur örtlichen Beeinflussung des Raumklimas
3. Eine flexible Plattform zur Verarbeitung (einschließlich der Regelung).

Im Gegensatz zur derzeit üblichen Ausstattung von Bürogebäuden wären somit deutlich mehr Sensoren notwendig, um ein ortsgenaueres, personalisiertes Klima zu ermöglichen. Flexible, dynamische Plattformen sind notwendig, um mit nur temporär verfügbaren, mobilen Sensoren, wie z. B. Temperatursensoren in Smartphones, arbeiten zu können. Für die Gestaltung eines an die individuellen Anforderungen der Nutzer angepassten Raumklimas, ohne jedoch komplizierte Bedien- und Eingabemöglichkeiten vorsehen zu müssen, sind geeignete Regelungs- und Steuerungsstrategien notwendig, wie beispielsweise modellbasierte prädiktive Steuerungen. Diese weisen folgende Vorteile auf:

1. Einsparung von Sensorik
2. Verbesserung der Steuerung/Regelung
3. Problemloser Umgang mit Mehrgrößensystemen
4. Flexible Reaktion auf einzelne Ausfälle von Sensoren und Aktoren.

Eine Voraussetzung dafür stellen die Ansätze zur Lokalisierung der Personen in Gebäuden dar. Ein Tracking von Personen, d. h., die zeitliche sowie räumliche (Nach-)Verfolgung, ist für die Gewährleistung eines personalisierten Klimas am Arbeitsplatz nicht notwendig. Die Kenntnis des Ortes stationärer Arbeit, z. B. Schreibtisch, ist ausreichend. Der Einsatz von Mobilgeräten neben bereits vorhandener Instrumentierung der Bürogebäude ist vielversprechend. Die Verbreitung und Akzeptanz von Smartphones steigt mehr und mehr an. Bei Einsatz bereits vorhandener Geräte entstehen kaum zusätzliche Kosten. Diese sind auch in bislang „unerschlossenen“ Bürogebäuden einsetzbar. Allerdings sind die damit erfassten Daten nicht von höchster Genauigkeit und das Gerät selbst nur als Sensor temporär verfügbar. Durch Kombination verschiedener, mitunter unpräziser und teilweise redundanter

Ansätze ist jedoch die Lokalisierung und Identifizierung von Personen in Bürogebäuden möglich.

Ein Überblick über eine mögliche Architektur der generischen Aml-Plattform, die den gestellten Anforderungen entspricht, wird in Abbildung 2.1 gegeben.

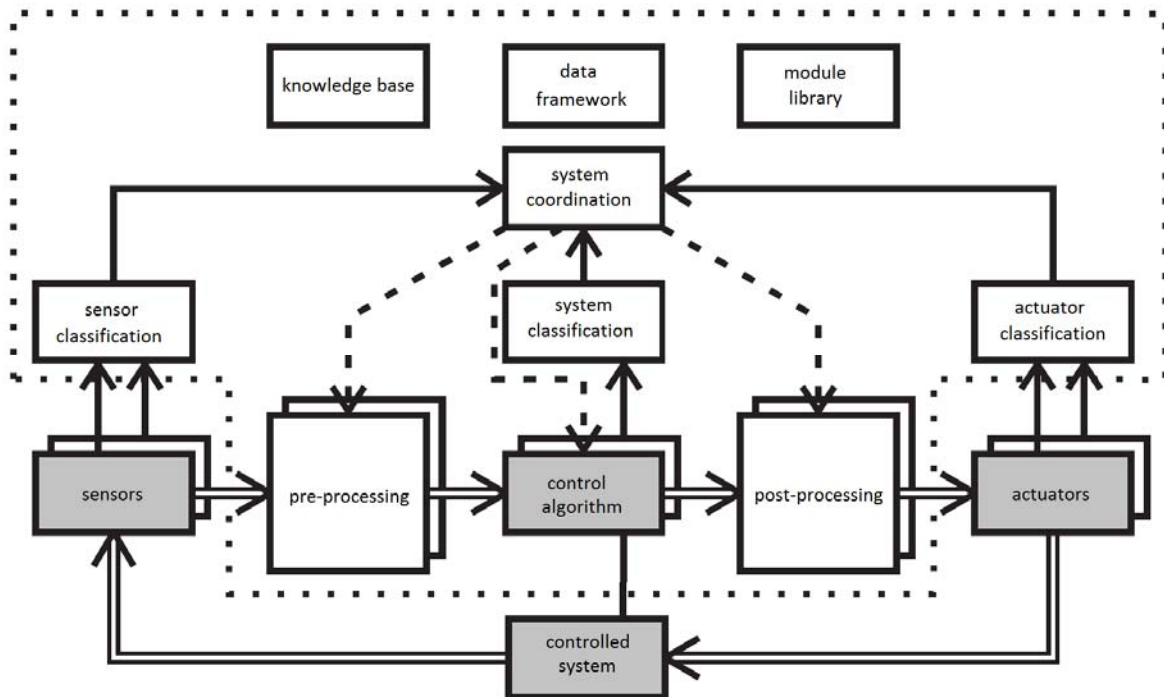


Abb. 2.1 Hauptkomponenten des visionären, modularen Aml-Plattform-Konzeptes (Quelle: STEIN et al., 2012)

Im Gegensatz zu bisherigen Regelungen werden verfügbare Sensoren und Aktoren dynamisch zur Laufzeit integriert. Die Auswahl der passenden Elemente könnte von einem Koordinator (Block „system coordination“ in Abbildung 2.1) zur Laufzeit übernommen werden. Selbst die beste Regelungsstrategie zur personalisierten Klimabeeinflussung am Arbeitsplatz ist jedoch wirkungslos, wenn keine adäquaten Sensorinformationen zu Anwesenheit und Identität oder nur ein einzelner Flächenheizkörper anstatt arbeitsplatznaher Luftauslässe im Großraumbüro vorhanden sind. Der Koordinator verarbeitet die Ausgaben der Klassifikatoren der Sensoren, Strecke und Aktoren („classification“-Blöcke). Die zugrundeliegende Klassifikation, die auf einem Ontologie-Modell (BASont (PLOENNIGS et al., 2012); Block „knowledge base“) basiert, wurde beispielhaft für Sensoren beschrieben. Daneben sind ein Daten-Framework zur Speicherung aktueller und historischer Daten als Grundlage für deren Vor- und Nachverarbeitung sowie ein Modul-Speicher (Block „module library“) mit vorgefertigten Steuerungs- und Verarbeitungsalgorithmen denkbar.

3 Grenzen der klassischen Klimaregelung

Das Phänomen „trockene Luft“ tritt in der Heizperiode je nach Randbedingung und Betriebsweise der Lüftung in unterschiedlicher Ausprägung auf. Für eine grobe Abschätzung wurden Testrechnungen mit einem Ein-Knoten-Modell für einen Einzelraum mit den Abmessungen in Länge, Breite und Höhe von 6,0 m x 5,0 m x 3,0 m ohne Luftbefeuchtung für verschiedene, in DIN EN 13779 Tabelle A.11 empfohlene Außenluftvolumenströme durchgeführt. Es wurde angenommen, dass sich zwei Personen im Raum aufhalten. Die Ergebnisse der Berechnungen sind für die personenbezogenen Außenluftvolumenströme 5 l/s, 10 l/s und 20 l/s in den Abbildungen 3.1 und 3.2 zu sehen. Das entspricht Außenluftwechseln für den Raum von 0,4/h, 0,8/h sowie 1,6/h. Die Abbildung 3.1 zeigt, dass die relative Feuchtigkeit mit steigendem Außenluftvolumenstrom pro Person fällt, wenn im Raum keine Befeuchtung vorhanden ist. Dabei bedeutet die summative Häufigkeit, dass z. B. bei einem Volumenstrom von 20 l/(s · Person) in 38 % der Nutzungszeit 30 % relative Luftfeuchte unterschritten werden. Um die relative Luftfeuchte längere Zeit in einen günstigen Bereich von über 30 % zu bringen, müsste der Volumenstrom deutlich reduziert werden. Bei 5 l/s würden 30 % nie unterschritten werden. Abbildung 3.2 macht aber deutlich, dass das Einhalten der relativen Luftfeuchte von über 30 % und entsprechend reduzierter Außenluftfrate mit einer deutlich verschlechterten Raumluftqualität einhergeht. Während bei 20 l/s die Luft immer die höchste Qualitätsstufe (IDA 1 nach DIN EN 13779, siehe Abb. 3.2) aufweist, würde dies bei 5 l/s in nur ca. 12 % der Nutzungszeit der Fall sein. Ohne aktive Luftbefeuchtung hat man in der kühlen Jahreszeit also nur die Wahl zwischen guter Luftqualität (d. h. niedriger CO₂-Konzentration) und trockener Luft oder schlechter Luftqualität und dafür aber günstigen höheren relativen Luftfeuchte.

Diese Einschätzung basiert, wie die zugrunde liegenden Berechnungen, auf dem Modell der idealen Durchmischung, d. h. für den ganzen Raum gibt es nur einen einheitlichen Raumluftzustand. Da dies nur eine Approximation ist, erfolgt in den weiteren Abschnitten eine schrittweise Detaillierung der Situation.

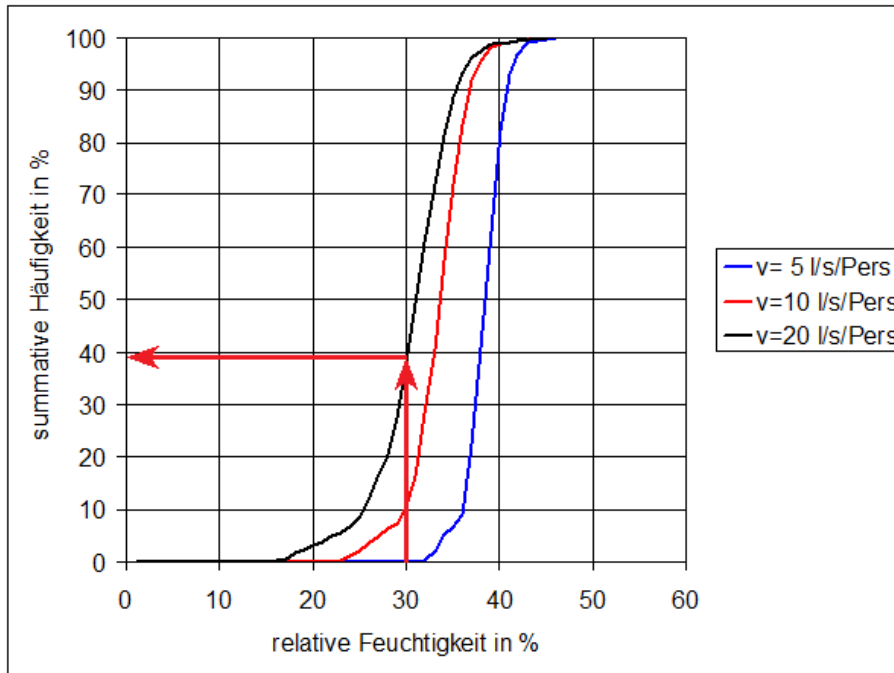


Abb. 3.1 Summative Häufigkeit der relativen Luftfeuchte im untersuchten Raum in der Nutzungszeit während der Heizperiode für verschiedene Außenluftvolumenströme pro Person und zwei Personen im Raum

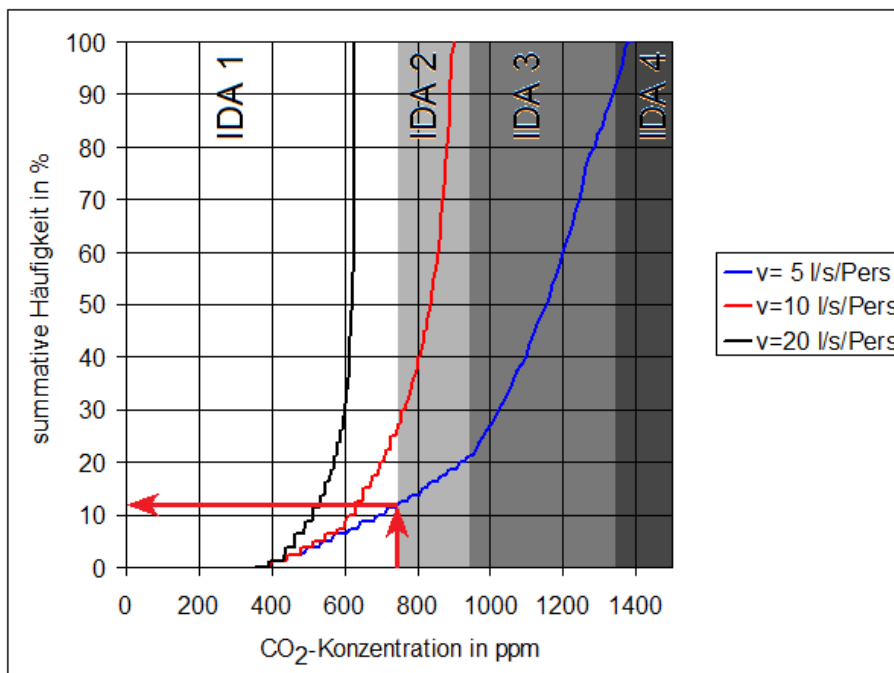


Abb. 3.2 Summative Häufigkeit der CO₂-Konzentration im untersuchten Raum in der Nutzungszeit während der Heizperiode für verschiedene Außenluftvolumenströme pro Person und zwei Personen im Raum und ihre Klassifikation in Kategorien der Luftqualität nach DIN EN 13779

4 Modellierung des menschlichen Körpers und Dummy-Messungen der Verdunstungsrate der Haut

Die detaillierte Untersuchung der Wirkung trockener Luft auf den menschlichen Körper ist mit Hilfe eines Rechenmodells des Menschen möglich. Die zu erwartenden Temperaturen der Körperoberflächen wurden anhand von Probandenmessungen ermittelt (siehe Abb. 4.1). Das Modell des menschlichen Körpers wird dann mit der Gebäude- und Raumluftströmungssimulation gekoppelt. Ziel der Berechnungen ist es letztlich, die Wechselwirkung von Lüftungs- und Heizungskonzept mit der unmittelbaren raumklimatischen Umgebung der Person zu untersuchen.

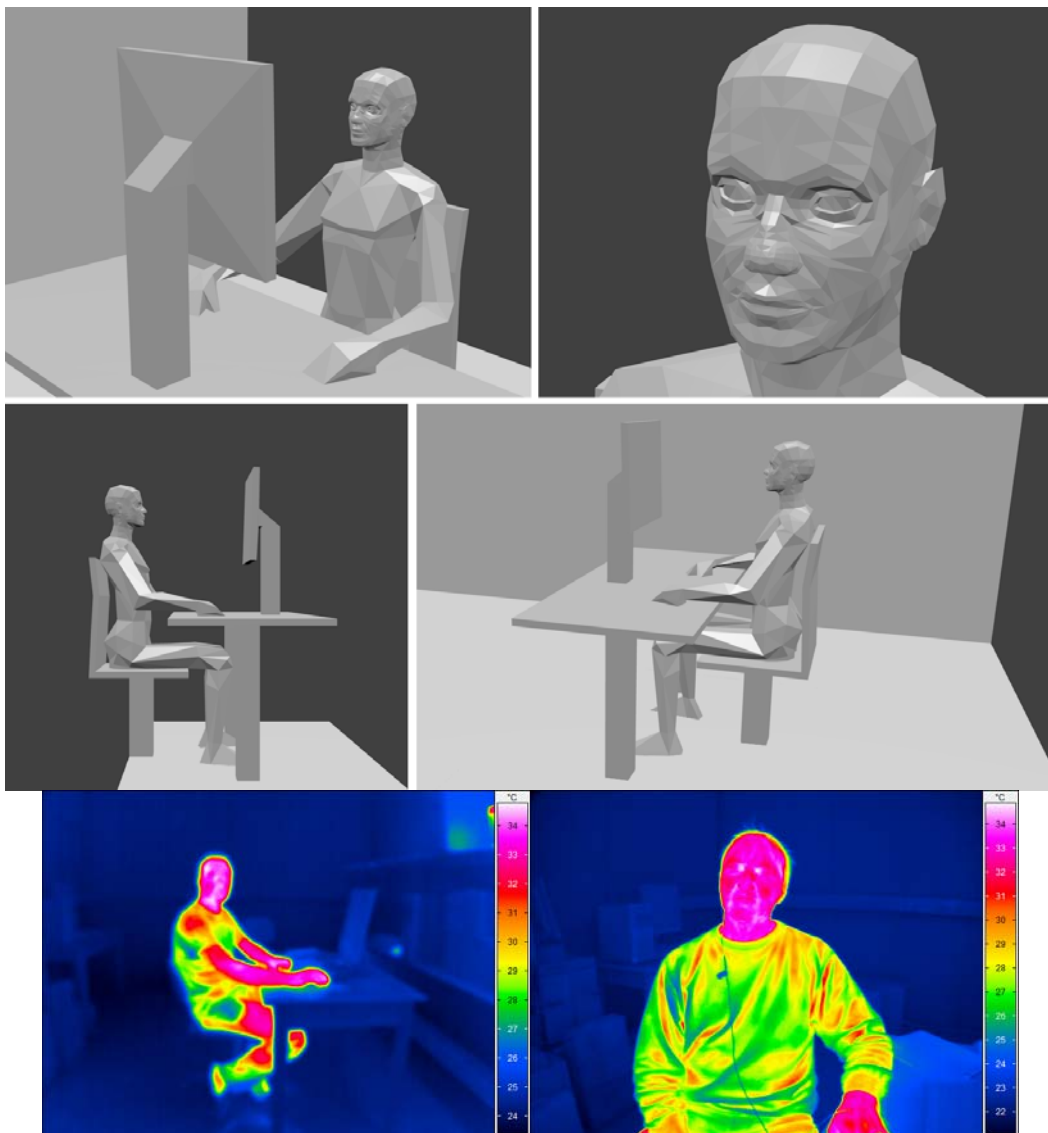


Abb. 4.1 Detailliertes Modell des menschlichen Körpers und die mit einer Thermokamera aufgenommenen Temperaturen der Körperoberflächen bei einem der Probanden

Vor Ausführung der Simulationsrechnungen war die experimentelle Ermittlung der zu erwartenden Verdunstungsraten der menschlichen Körperteile nötig, da diese nur ansatzweise bekannt sind. Die in der Literatur vorzufindenden Werte berücksichtigen nicht den Einfluss des Umgebungsluftzustandes auf die Verdunstungsrate des Menschen. Der Umgebungsluftzustand ist gekennzeichnet durch die Größen Lufttemperatur, relative Feuchtigkeit, Geschwindigkeit und Turbulenzgrad der Luft. Es wurde versucht, entsprechende Zusammenhänge experimentell zu ermitteln. Dies geschah in der Klimakammer des Technikums der BAuA in Dortmund mit speziell dafür entwickelten Probekörpern, siehe Abbildung 4.2.

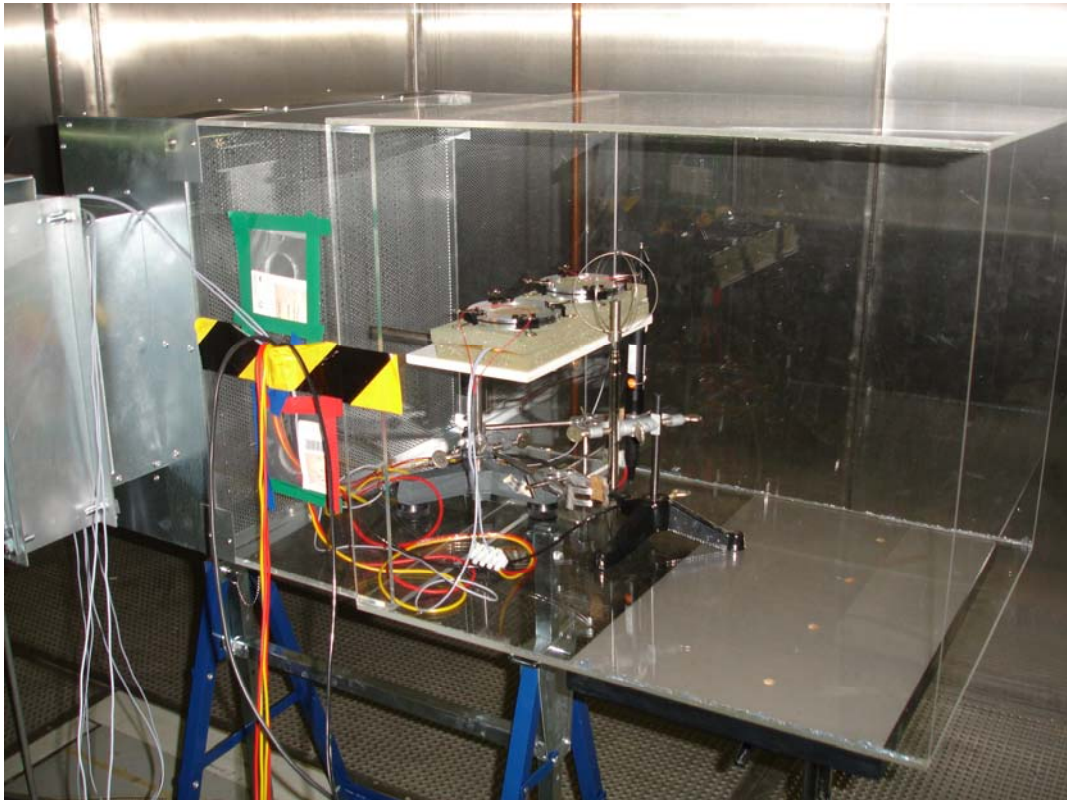


Abb. 4.2 Probekörper und Messtechnik zur Bestimmung der Verdunstungsrate in einem Strömungskanal innerhalb einer Klimakammer

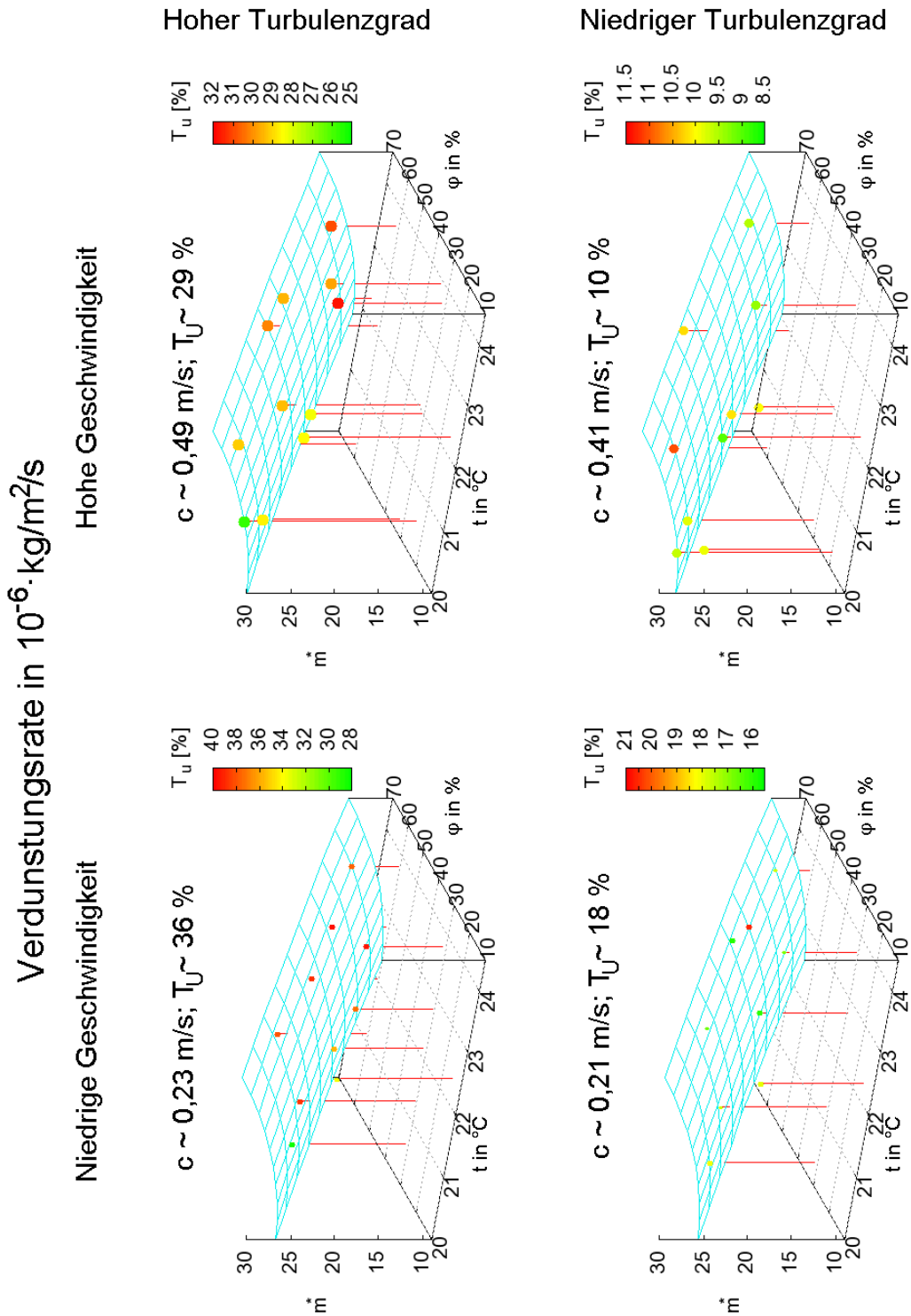


Abb. 4.3 Gemessene Verdunstungsraten und ihre Approximation mit Gleichung 4.1. Die Größe der Datenpunkte spiegelt die Geschwindigkeit der Luft wider. Die Diagramme decken vier Bereiche unterschiedlicher Luftgeschwindigkeit und Turbulenz ab. Die angegebenen Werte der Geschwindigkeit und des Turbulenzgrades bilden die Mittelwerte für die Daten aus dem jeweiligen Diagramm ab.

Die Ergebnisse sind der Abbildung 4.3 zu entnehmen. Sie zeigen die klare Abhängigkeit der Verdunstungsrate von Temperatur t , relativer Feuchtigkeit φ , Geschwindigkeit c und Turbulenzgrad T_u der Luft, die über eine Approximationsfunktion

$$\dot{m} = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot \varphi + b_3 \cdot c + b_4 \cdot T_u + b_5 \cdot t^2 + b_6 \cdot \varphi^2 \quad (4.1)$$

in die Berechnungen integriert wurde.

Die Hauptaussage der Messungen ist der Vergleich zwischen dem Einfluss der Temperatur und relativen Feuchtigkeit der Luft auf der einen und dem Turbulenzgrad und der Luftgeschwindigkeit auf der anderen Seite. Es wird an den Messergebnissen und der Approximationsgleichung sichtbar, dass der Einfluss der Temperatur und relativen Feuchtigkeit der Luft auf die Verdunstungsrate mehr als drei Mal größer ist als der Einfluss der Geschwindigkeit und des Turbulenzgrades der Luft. Das bedeutet, dass die Luftführung im Raum über Geschwindigkeit und Turbulenzgrad der Luft einen Einfluss auf die Verdunstungsrate hat, der in dem untersuchten Bereich etwa 30 % des Einflusses der Temperatur und Feuchtigkeit der Luft darstellt. Dabei fallen die absoluten Werte höher aus als in Probandenstudien. Während unter vergleichbaren Bedingungen bei Messungen an Probanden eine Verdunstungsrate von ca. $4 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ermittelt wurde (Mayrovitz et al., 2013), sind hier bei der Messung am Dummy ca. $16 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ermittelt worden, d. h., ein um das ca. 4fache höher liegender Wert.

5 Detaillierte Gebäude- und Strömungssimulation

Per Simulation können verschiedene Lüftungsszenarien und ihr Einfluss auf das menschliche Empfinden untersucht werden. Hierzu wurde ein repräsentativer Büroraum ausgewählt und Simulationen zum Raumklima durchgeführt.

Die Untersuchungen mit einem einfachen Knotenmodell (ohne Auflösung der Strömungsvorgänge) zeigten, dass ohne zusätzliche Befeuchtung das Aufrechterhalten eines hochwertigen Raumklimas und einer relativen Luftfeuchte von mindestens 30 % über den Großteil der Heizperiode nicht möglich ist (siehe [Kapitel 3](#)). Hierbei wird jedoch modellbedingt immer von idealer Durchmischung der Raumluft ausgegangen. Für eine der Realität nahe kommende Berechnung wurde ein CFD-Modell (Computational Fluid Dynamics) entwickelt, welches eine detaillierte Simulation der lokalen Luftparameter und des lokalen Komforts an einem Arbeitsplatz ermöglicht. Dazu fehlten jedoch die Ansätze über die Wasserverdunstungsrate der menschlichen Haut und der Augen. Diese sind im Laufe der oben erwähnten experimentellen Untersuchungen ermittelt worden. Für eine weitere Absicherung und Einordnung der Messergebnisse wurde die Literaturrecherche über die Verdunstungsraten der Haut ohne Schwitzen weitergeführt. Eine analoge Recherche erfolgte für die Augen. Die gefundenen Werte wurden in das Simulationsprogramm integriert. Die Verdunstungsrate der Augen zeigte sich wie erwartet unbedeutend klein für die gesamte Bilanz der Feuchteabgabe der Menschen und kann die sich an der Haut der untersuchten Menschen bildenden Luftzustände nicht sichtbar beeinflussen.

Eine detaillierte Analyse raumklimatischer Bedingungen ist mittels gekoppelter Gebäude- und Strömungssimulation für einen Büroraum mit Personenmodell möglich. Mit deren Hilfe konnte ein schlüssiges Modell der Wärme- und Feuchteabgabe des Menschen erstellt werden, das in Kombination mit einem CFD-Programm im Stande ist, die komplizierte Interaktion zwischen den simulierten Personen und ihrer Umgebung detailliert widerzuspiegeln. Es wurde schließlich eine gekoppelte Gebäude- und Strömungssituation in einem jeweils gleich belasteten Raum mit unterschiedlichen Heizungs- und Lüftungssystemen durchgeführt, die sich an der Unterscheidung in Quell- und Mischlüftung orientieren:

1. mit einer Fußbodenheizung (FBH) und Zufuhr der frischen Luft über einen Außenluftdurchlass (ALD) unterhalb des Fensters (siehe Abb. 5.1 links)
2. mit einer Luftheizung (LH) und Zufuhr der Heiz- und Frischluft über einen Drallauslass (Drall) in der Mitte der Raumdecke (siehe Abb. 5.1 rechts).

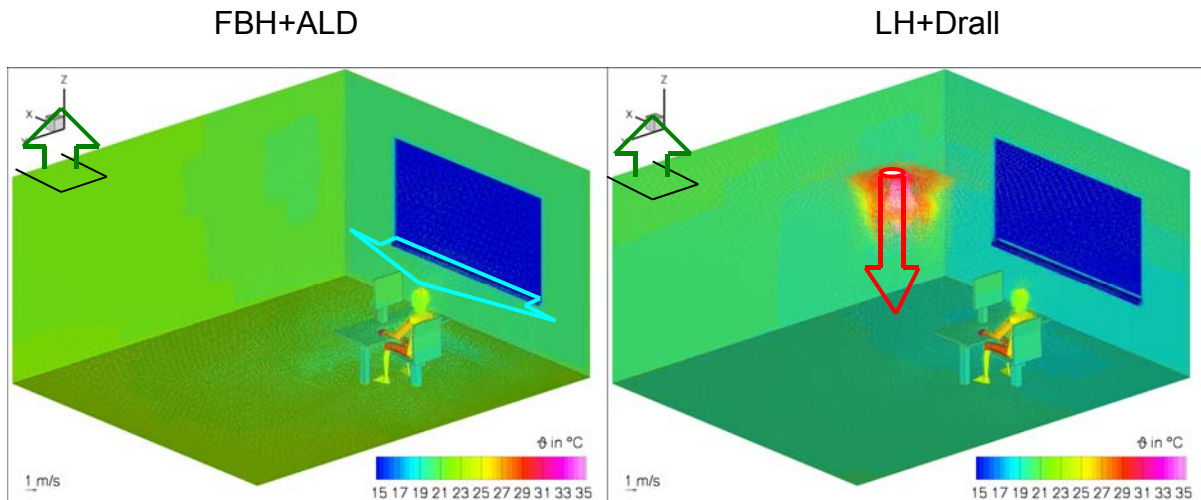


Abb. 5.1 Strömungs- und Temperaturbilder in den zwei untersuchten Heizungs- und Lüftungssystemen: links: Fußbodenheizung mit einem Außenluftdurchlass unter dem Außenfenster; rechts: Luftheizung über eine Drallzuluftöffnung in der Decke

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Annahme der Übertragbarkeit der Dummy-Versuche auf das Verdunstungsverhalten der menschlichen Haut die Verdunstungsrate des menschlichen Kopfes bei der temperaturgeführten Raumlüftung deutlich von der Art der Luftführung abhängig ist (siehe Abb. 5.2).

Die aufgezeigten Unterschiede zwischen der Fußbodenheizung mit ALD und einer Luftheizung bestätigen die Aussagen früherer Studien, obwohl die ausgewiesenen Unterschiede kleiner sind. Die Untersuchungen von ZEIDLER et al. (1999) und RESKE (2002) lassen darauf schließen, dass die Unterschiede in der Luftführung bei „reinen“ Misch- und Quelllüftungssystemen zu einer noch größeren Breite der Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade am menschlichen Körper führen können, als es in den gewählten Beispielen der Luftführung für einen Heizfall zu sehen war. Dies würde in entsprechend größeren Unterschieden in der Verdunstungsrate und in der damit verbundenen Wahrnehmung der Trockenheit der Luft resultieren. Dass dies in der Simulation nicht so stark wiedergespiegelt wird ist aber auch darauf zurückzuführen, dass die für den Heizfall ausgewählten Systeme nur teilweise die typischen Eigenschaften einer Quell- und Mischlüftung repräsentieren und die thermischen Lasten im Raum relativ gering ausfallen.

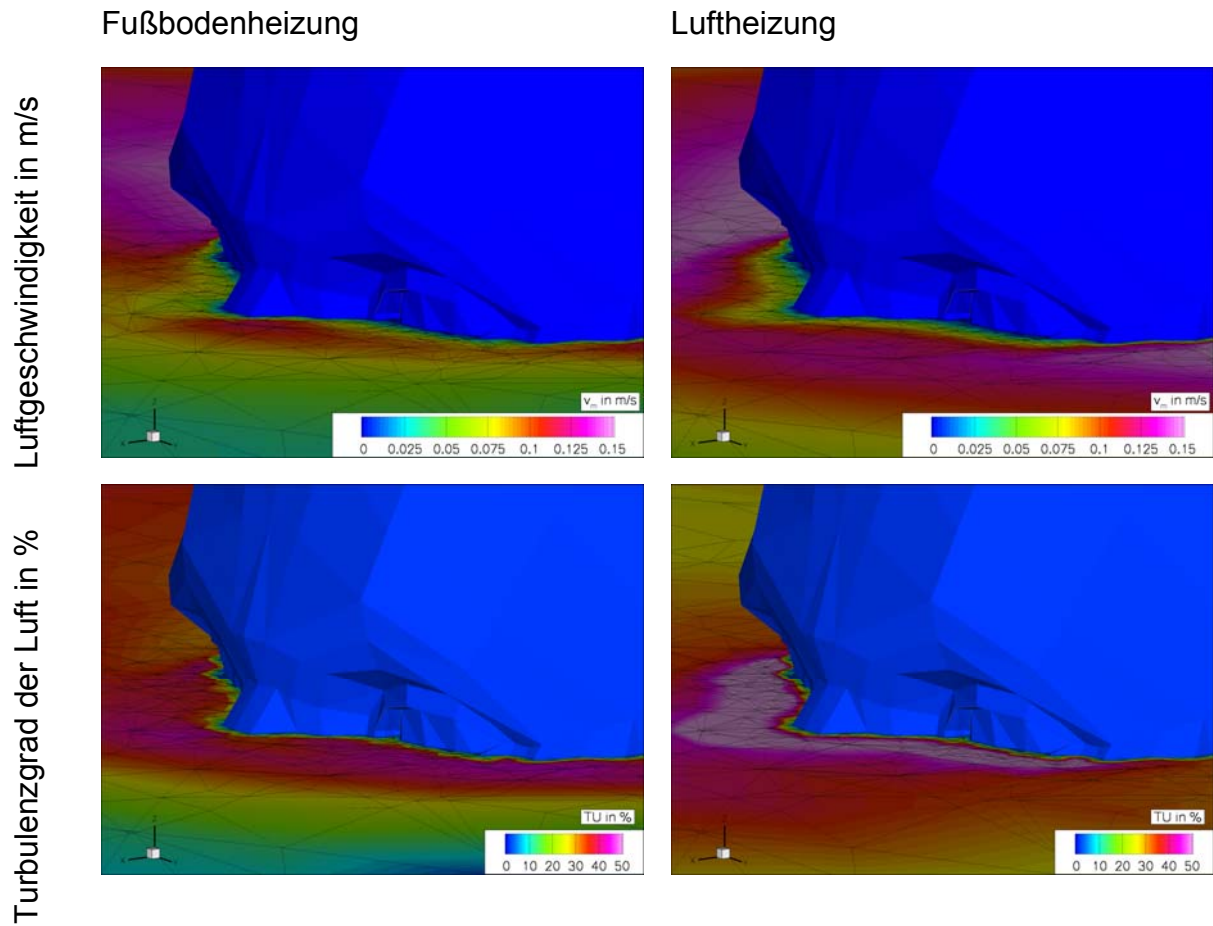


Abb. 5.2 Geschwindigkeit und Turbulenzgrad der Luft in der Nähe des Kopfes der modellierten Person für die zwei untersuchten Heizungs- bzw. Lüftungsarten an einem kalten Wintertag

6 Schlussbemerkungen

Zusammenfassend können folgende Aussagen getroffen werden:

1. Es existiert kein marktgängiges Aml-basiertes Regelungssystem für RLT-Anlagen.
2. Es gibt Sensoren und Komponenten, die zum Aufbau einer Aml-basierten Klimaregelung benutzt werden können. Es wurde eine beispielhafte Architektur eines solchen Systems entwickelt und vorgestellt. Dieser Vorschlag stellt eine innovative und visionäre Lösung dar, deren Realisierung noch weitere Entwicklungsarbeit benötigen würde.
3. Die Verdunstungsrate der Haut hängt im Allgemeinen nicht nur von Temperatur und relativer Feuchtigkeit der umgebenden Luft, sondern auch von deren Geschwindigkeit und Turbulenzgrad ab. Dieser Zusammenhang wurde experimentell untersucht und quantifiziert.
4. Die Beispielberechnungen haben belegt, dass sich die Art der Luftführung im Raum auf die Luftzustände nah der Haut des Menschen auswirkt. Dies bestätigt frühere Untersuchungen. Es besteht somit ein signifikanter Einfluss der Art und Weise der Luftführung auf das Auftreten des Problems der „Trockenen Luft“.
5. Die Aussagekraft der Messungen mit Probekörpern muss durch Probandenversuche verifiziert werden.
6. Es sind weitere Simulationsrechnungen mit einer Verfeinerung des Personenmodells und anderen Lüftungs-/Heizungs-Varianten nötig, um konkrete Empfehlungen zur Reduzierung der Auswirkungen des Phänomens der „Trockenen Luft“ geben zu können.

Literaturverzeichnis

von Hahn, N.: „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 67 (2007) Nr. 3 – März, S. 103 ff

Mayrovitz, Harvey N.; Bernal, Maria; Brlit, Frances; Desfor, Rebecca: Biophysical measures of skin tissue water: variations within and among anatomical sites and correlations between measures, Skin Research and Technology 2013, **19**: pp. 47–54f.

Ploennigs, J.; Hensel, B.; Dibowski, H; Kabitzsch, K.: BASont - A modular, adaptive Building Automation System Ontology, in Proceedings of the 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2012), Montréal, Canada, October 2012

Reske, M.: Einfluss der Raumströmung auf die lokale Feuchtigkeitsabgabe am Auge, Konferenzband Hermann-Rietschel-Colloquium 2002, S. 179-188, Buderus-Heiztechnik 2002.

Stein, D.; Lehmann, M.; Ploennigs, J.; Kabitzsch, K.: Sensors, models and platform for ambient control, in IECON - 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2012

Zeidler, O.; Kriegel, K.; Fitzner, K.: Unterschiede der Feuchtigkeitsübertragung einer Person in Quell- und Mischlüftung, KI Luft- und Kältetechnik, Jun 1999; No.6, pp.319-323

DIN EN 13779: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme, September 2007