

Janine Günther

## **Comfort-Oriented Thermal Modeling and Operational Strategies for Shared Office Spaces**

Band 49

**Berichte aus dem  
Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart**



# Comfort-Oriented Thermal Modeling and Operational Strategies for Shared Office Spaces

Von der Fakultät  
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der  
Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
Janine Günther  
geboren in München

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Rudibert King

Tag der mündlichen Prüfung: 8. Juli 2020

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2020



Berichte aus dem  
Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart

Band 49

**Janine Günther**

**Comfort-Oriented Thermal Modeling and Operational  
Strategies for Shared Office Spaces**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Düren 2020

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7532-8

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart in enger Zusammenarbeit mit der Robert Bosch (South East Asia) Pte Ltd in Singapur.

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken, die mich in dieser interessanten, aber auch herausfordernden Zeit begleitet, unterstützt und ermutigt haben. Ich danke daher dem Institutsdirektor, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, für die Ermöglichung dieser Arbeit sowie das entgegengebrachte Vertrauen. Weiterhin gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Rudibert King für die freundliche Übernahme des Mitberichts und die angenehme Kommunikation.

Die mit meinem Projekt einhergehende Zusammenarbeit mit der Forschungsabteilung in Singapur bot mir eine einzigartige Chance meine Arbeit mit wertvollen interkulturellen Erfahrungen zu verbinden. Daher geht ein großes Dankeschön an Falco Sengebusch, Dr.-Ing. Kai Oertel und Dr.-Ing. Markus Kneifel, die diese Kooperation möglich gemacht haben.

Insbesondere möchte ich allen Kolleginnen und -kollegen danken, durch die die Zeit am Institut und in Singapur zu einer einzigartigen Erfahrung wurde. Vielen Dank für die vielen lustigen Momente und Erlebnisse und vor allem für die anregenden Diskussionen. Ich freue mich, dass mir neben den unvergesslichen Erinnerungen auch wunderbare Freundschaften erhalten bleiben.

Ganz besonderer Dank gilt außerdem meinen Korrekturlesern für das wertvolle Feedback, meinen Bürokolleginnen und -kollegen für den guten Austausch und das stets vertrauensvolle Verhältnis sowie allen Diskussionspartnern, die mir besonders auf der Zielgeraden mit Rat und Tat zur Seite standen.

Auch meiner Familie danke ich für das uneingeschränkte Vertrauen, den beständigen Rückhalt und ihre Unterstützung. Besonders dankbar bin ich Martin, der mich in jederlei Hinsicht bestärkt und ermutigt hat. Vielen Dank für dein Verständnis und die Bereitschaft dieses Abenteuer mit mir zu bestreiten.

Leinfelden, Juli 2020

Janine Günther



# Abstract

People spend up to 90 % of their lifetime in buildings. The design and operation of buildings therefore have a significant impact on our quality of life. Thermal indoor conditions are particularly important in order to create a pleasant atmosphere, which makes air-conditioning to the central objective of building operation also referred to as building control. Two main questions arise from this objective: What does thermal comfort mean and how can it be achieved by appropriate control strategies? Common control approaches address these questions by the use of standardized temperature set-points for the whole building. The compliance with this target temperature is usually monitored by few sensors, where one measurement value represents the conditions of a large thermal zone. In reality, this control strategy often entails discomfort due to notable but unconsidered spatial temperature differences, e. g. by means of solar loads, as well as the very subjective thermal expectations. Consequently, this thesis forms the basis for an optimized building control strategy that aims for an improved comfort level to the satisfaction of all users that is able to quantify and evaluate spatial conditions based on the air-conditioning operation and at the same time accounts for the comfort requirements of individual occupants.

The spatial thermal conditions are the result of complex flow effects which are mainly driven by the air-conditioning system, the position and size of the windows as well as internal loads. Accurate representations of these effects by means of computational fluid dynamics simulations are computationally expensive and therefore not suited for control design. Hence, simplified data-driven models for the prediction of the stationary temperature field are developed in the first part of this thesis. A key difficulty for the selection of a suitable modeling approach is the limited data base. The available input parameters are restricted to commonly accessible sensor data consisting of discrete temperature measurements and the operational mode of the air-conditioning system. Under these prerequisites, a Gaussian Process regression model is derived which improves the prediction of the temperature field by up to 60 % compared to the standard assumption of well-mixed conditions. The predictive ability is even further improved by an optimized sensor setup. Two optimal placement approaches are compared which either focus on the reduction of the prediction error or the variance of the model. Compared to other modeling approaches with a similar degree of detail, the derived data-driven approach provides more detailed information about the spatial thermal conditions with significantly smaller computational or implementation effort which makes it applicable to real-time control concepts. Moreover, this data-

---

based approach enables an online model adaptation to constantly changing conditions commonly occurring in office buildings, for example changes of the floor plan.

The second part of this thesis focuses on the definition of individual thermal comfort. Although well-established models exist for the design and operation of building air-conditioning systems, most of them are not suitable for predicting the personal comfort sensation. Comparing these models with the collected user feedback results in an unsatisfactory individual predictability. Therefore, alternative models are investigated and derived which lead to a better accordance. The main challenge originates from the high uncertainty of the user data that are collected during the daily working routine. The low system excitation of the everyday operation limits the data quality so that the developed comfort model structure and the identification process must ensure physically feasible prediction models. Polynomial basis functions serve as easily interpretable trial functions which are reduced using combinational feature selection and LASSO regression to avoid overfitting. The resulting well generalizing model characteristic is particularly important for the subsequent integration in optimization-based control concepts. The best model structure for the considered test group is a linear basis function in combination with a Gaussian process model which depends on the parameters air temperature, fan level, humidity, outside temperature, and daytime. This personalized approach improves the individual prediction accuracy by over 50 % compared to standard models.

Based on the personal comfort models, control strategies are deduced for optimizing the individual thermal comfort. Apart from temperature control, additional ceiling fans are installed for the local actuation of air movement. In a first approach, the comfort models are used to define an optimal combination of temperature and air velocity for the entire user group. The personalized models are constantly adapted during the operation to account for individual and group-related changes. Thus, modifications are always included in the comfort optimization. The complementary cooling effect by increased air velocities incorporates an energy saving potential of approx. 20 % while enhancing the individual comfort. Since changing occupancy causes dynamical variations of the comfort requirements, concepts for a reasonable consideration of these variations are devised. The proposed concept demonstrates an improvement of the average comfort level by additional 6 %. Eventually, all results are combined to extend the temperature and air velocity optimization to a model predictive control strategy that makes use of the underlying room dynamic. This allows to account for coupling effects between the comfort factors in the control concept which yields a further improvement of the overall thermal comfort.

# Kurzfassung

Menschen verbringen bis zu 90 % ihrer Lebenszeit in geschlossenen Räumen. Dementsprechend haben die Auslegung, das Design und der Betrieb von Gebäuden einen entscheidenden Einfluss auf unsere Lebensqualität. Insbesondere die thermischen Raumbedingungen tragen entscheidend zu einer angenehmen Atmosphäre bei, sodass eine komfortable Klimatisierung zum zentralen Ziel der Gebäuderegulierung wird. Aus diesem Ziel ergeben sich vor allem zwei Fragestellungen: Was bedeutet thermischer Komfort für den Einzelnen und wie kann dieser durch geeignete Regelungskonzepte sichergestellt werden? Üblicherweise angewandte Regelstrategien adressieren diese Fragen, indem sie gebäudeübergreifend standardisierte Temperaturvorgaben zugrunde legen. Die Einhaltung dieser Vorgaben wird dann über wenige Sensoren überwacht, wobei ein Messwert meist eine verhältnismäßig große thermische Zone repräsentiert. Diese Regelstrategie führt allerdings häufig zu Diskomfort, da die tatsächlichen, örtlich verteilten Bedingungen stark vom gemessenen Referenzwert abweichen können, z. B. durch solare Einflüsse, und auch die subjektive thermische Wahrnehmung der Nutzer große Unterschiede aufweist. Daher wird in dieser Arbeit die Basis für eine komfortoptimierte Regelstrategie gelegt, die zum einen in der Lage ist, die örtlich verteilten Einflüsse des Klimasystems miteinzubeziehen und zum anderen individuelle Komfortanforderungen berücksichtigt.

Die örtlich verteilten thermischen Bedingungen im Raum sind das Resultat komplexer Strömungseffekte, die hauptsächlich durch das Belüftungssystem, die Lage und Größe der Fenster aber auch interne Lasten beeinflusst werden. Da die Simulation dieser Effekte sehr rechenaufwendig ist, werden im ersten Teil der Arbeit Modelle entwickelt, die eine vereinfachte Prädiktion der stationären Temperaturverteilung ermöglichen. Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Auswahl eines passenden Modellansatzes liegt in der limitierten Datenbasis, da sich die verfügbaren Eingangsparameter auf üblicherweise verfügbare Sensormessungen beschränken, d.h. diskrete Temperaturwerte sowie der Betriebszustand des Belüftungssystems. Unter diesen Voraussetzungen wird ein Gaußprozessmodell entwickelt, welches die Prädiktion der örtlich verteilten Temperatur um bis zu 60 % verbessert gegenüber der Standardannahme einer homogenen Temperaturverteilung. Durch eine optimierte Sensorplatzierung kann der Prädiktionsfehler weiter reduziert werden, wofür zwei Ansätze untersucht werden, die sich auf Fehler- bzw. Varianzminimierung fokussieren. Im Vergleich zu Modellen mit ähnlichem Detaillierungsgrad erlaubt der vorgestellte datengetriebene Ansatz detailliertere Informationen über die verteilten thermischen Bedingungen im Raum zu erhalten jedoch mit deutlich geringerem Implementierungs- und Instandhaltungsaufwand. Außerdem

---

ermöglicht die datenbasierte Herangehensweise eine Adaption des Modells während der Betriebszeit, da Änderungen der Raumaufteilung oder Ausstattung besonders in Bürogebäuden keine Seltenheit sind.

Der zweite Teil der Arbeit konzentriert sich auf die Definition von individuellem thermischen Komfort. Auch wenn es bereits etablierte Komfortmodelle für die Auslegung und den Betrieb der Gebäudeklimatisierung gibt, sind diese für die Bestimmung der persönlichen Bedürfnisse meist ungeeignet. Der Abgleich dieser Modelle mit den vorliegenden Nutzerdaten ergibt eine unzureichende individuelle Prädizierbarkeit. Daher werden alternative Modellierungsansätze untersucht und abgeleitet, die zu einer besseren Übereinstimmung führen. Die größte Herausforderung ergibt sich dabei aus der hohen Unsicherheit der unter alltäglichen Arbeitsbedingungen gesammelten Nutzerdaten. Die geringe Systemanregung im Tagesbetrieb limitiert die Datenqualität, weshalb die Komfortmodellstruktur und der Identifikationsprozess mit dem Ziel entwickelt werden robuste Komfortvorhersagen zu treffen. Als Ansatzfunktionen werden verschiedene leicht interpretierbare Polynomansätze verglichen, die mit Hilfe von kombinatorischer Merkmalsauswahl sowie LASSO-Regression reduziert werden um Überanpassung zu vermeiden, sodass sich nur physikalisch sinnvolle Schätzmodelle ergeben. Die daraus resultierende, gut generalisierende Modellcharakteristik ist besonders relevant für die spätere Integration in optimierungsbasierte Regelungskonzepte. Als beste Ansatzstruktur ergibt sich für die betrachteten Nutzerdaten eine lineare Basisfunktion in Kombination mit einem Gaußprozessmodell, welches von den Parametern Lufttemperatur, Ventilatorstufe, Feuchtigkeit, Außentemperatur und Tageszeit abhängt. Dieser personalisierte Ansatz verbessert die individuelle Vorhersagegenauigkeit gegenüber einem Standardansatz um über 50 %.

Basierend auf den personalisierten Komfortmodellen werden anschließend Regelungsstrategien abgeleitet, die den individuellen Komfort optimieren. Dabei werden, neben der Temperaturregelung, Deckenventilatoren eingesetzt, die einen lokalen Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit haben. In einem ersten Ansatz werden die Komfortmodelle genutzt um eine optimale Kombination aus Temperatur und Luftgeschwindigkeit für die gesamte Nutzergruppe zu bestimmen. Die personalisierten Nutzermodelle werden während der Laufzeit adaptiert, sodass personen- sowie gruppenbezogene Veränderungen stets für die Komfortoptimierung berücksichtigt werden. Der zusätzliche Kühlungseffekt durch erhöhte Luftgeschwindigkeiten ermöglicht eine Energieeinsparung von ca. 20 % bei verbessertem individuellem Komfort. Da wechselnde Belegungsprofile eine dynamische Veränderung der Komfortanforderungen verursachen, werden zudem Konzepte entwickelt, die eine sinnvolle Berücksichtigung dieser ermöglichen, wodurch das durchschnittliche Komfortlevel um weitere 6 % gesteigert werden kann. Abschließend wird die Optimierung der Lufttemperatur und -geschwindigkeit auf ein modellprädiktives Regelungskonzept erweitert, welches auch die Raumdynamik mitberücksichtigt. Dadurch können Kopplungseffekte zwischen den Komfortfaktoren in die Regelstrategie miteinbezogen werden, wodurch eine zusätzliche Verbesserung des thermischen Komforts erreicht wird.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	State of the Art . . . . .	2
1.1.1	Modeling of the Room Conditions . . . . .	5
1.1.2	Thermal Comfort Modeling . . . . .	7
1.1.3	Comfort-Based Control . . . . .	8
1.1.4	Elevated Air Velocities . . . . .	9
1.2	Objective and Outline . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Temperature Field Prediction</b>	<b>13</b>
2.1	CFD Simulation Setup . . . . .	14
2.2	Data-Based Modeling of Temperature Field . . . . .	16
2.2.1	Gaussian Process Model . . . . .	18
2.2.2	Selection of Kernel Function and Model Input Definition . . . . .	21
2.2.3	Analysis of Different GP Mean Definitions . . . . .	30
2.3	Optimal Sensor Placement . . . . .	31
2.3.1	Optimal Sensor Placement based on MSE . . . . .	32
2.3.2	Maximizing Mutual Information . . . . .	35
2.3.3	Comparison of MSE and MI criterion . . . . .	38
2.4	Conclusion . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Personal Thermal Comfort Modeling</b>	<b>43</b>
3.1	Test-Bed . . . . .	44
3.2	PMV Calculation . . . . .	46
3.3	Evaluation of PMV Calculation . . . . .	48
3.4	Modeling Individual Thermal Comfort . . . . .	53
3.4.1	Impact of PMV Comfort Factors . . . . .	53
3.4.2	Standard Effective Temperature = Better Comfort Reference? . . . . .	56
3.4.3	Correlation Analysis . . . . .	58
3.4.4	Model Structure . . . . .	61
3.4.5	Relevance Analysis of Comfort Factors and Feature Selection . . . . .	63
3.4.6	Hybrid Comfort Model . . . . .	80
3.5	Conclusion . . . . .	84
<b>4</b>	<b>Adaptive Thermal Comfort Control</b>	<b>85</b>
4.1	Simulation Model . . . . .	87

4.2	Feedforward Comfort Control . . . . .	91
4.2.1	Disturbance-Independent Optimization . . . . .	95
4.2.2	Disturbance-Dependent Optimization . . . . .	99
4.2.3	Development of Individual Comfort over the Test Period . . . . .	104
4.2.4	Influence of Occupancy . . . . .	105
4.3	Model Predictive Control for Optimizing Personal Comfort . . . . .	110
4.3.1	Control Objective . . . . .	112
4.3.2	State and Input Constraints . . . . .	112
4.3.3	Comfort-Based Optimal Control and Nonlinear MPC (NMPC) Scheme . . . . .	115
4.3.4	Comfort-Based Linear MPC (LMPC) Scheme . . . . .	116
4.3.5	Impact of Sampling Time on Comfort-Optimizing Control . . . . .	122
4.3.6	Influence of the Prediction Horizon on MPC Performance . . . . .	126
4.3.7	Simulative Comparison of MPC and Feedforward Control Performance . . . . .	129
4.3.8	Potential Assessment for Thermal Sensation Based Seating . . . . .	132
4.4	Conclusion . . . . .	133
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>137</b>
<b>A</b>	<b>Appendix - Temperature Field Prediction</b>	<b>143</b>
A.1	Derivation of Posterior Distribution for GP Model . . . . .	143
A.2	CFD Simulation Setups . . . . .	145
A.3	Greedy Optimization Algorithms for Sensor Placement . . . . .	147
<b>B</b>	<b>Appendix - Personal Thermal Comfort Modeling</b>	<b>149</b>
B.1	Sensor Specifications . . . . .	149
B.2	Voting Data . . . . .	149
B.3	PMV Calculation . . . . .	152
B.4	Mean Radiant Temperature in the Test-Bed . . . . .	153
B.5	Cross-Correlation between Comfort Predictors . . . . .	154
B.6	Combinatorics of Comfort Factors without Predefined Predictors . . . . .	155
<b>C</b>	<b>Appendix - Adaptive Thermal Comfort Control</b>	<b>159</b>
C.1	Effect of Rate Constraint for the Feedforward Control Algorithm . . . . .	159
	<b>Acronyms</b>	<b>161</b>
	<b>List of Symbols</b>	<b>163</b>
	<b>List of Figures</b>	<b>167</b>
	<b>List of Tables</b>	<b>171</b>

**Bibliography**

**173**