

Impact of Occupant Behavior on the Energy Efficiency Measures for Residential Buildings in Hot and Humid Climates

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Yuanchen Wang

aus Harbin (China)

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Mitberichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller (RWTH Aachen)

Tag der Einreichung:

09.10.2023

Tag der mündlichen Prüfung:

21.12.2023



Universität Stuttgart



Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung

ISBN – 978 – 3 – 9823067 – 2 – 8

D93

Universität Stuttgart, **IGTE**
Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 62085
Fax.: 0711 / 685 - 52085

Stuttgart, Dezember 2023

Preface

This dissertation was developed during my time as an academic employee at the Institute for Building Energetics, Thermotechnology and Energy Storage (IGTE) at the University of Stuttgart.

Special thanks go to Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos for his academic supervision of my work and his constant willingness to engage in professional discussions. His valuable insights, the trust placed in me, and the freedom given during the development of this work significantly contributed to its success.

I would like to express my gratitude to Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller for his interest in this work and for kindly agreeing to be my co-examiner, as well as to Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt for his support and encouragement.

Sincere thanks are also extended to Dr.-Ing. Tobias Henzler, who supported me as my mentor in the preparation of this thesis and provided valuable advice during the manuscript review. My thanks also go to Prof. Dr. Dirk Schwede, who led the CAMaRSEC project that provided an important foundation for my research, as well as Ms. Martina Ellinger for her longstanding support of my work at IGTE and her assistance with the publication of this dissertation.

I would also like to thank all colleagues and students at IGTE and HLK Stuttgart GmbH for their support and pleasant cooperation, as well as colleagues from Hanoi University of Civil Engineering for their contribution to this work.

Finally, I extend my special thanks to my family for their unwavering support throughout my educational journey. You have given me strength for my work.

Stuttgart, December 2023

Yuanchen Wang

Abstract

This work investigates the impact of occupant behavior on the effectiveness of energy efficiency measures for mixed-mode residential buildings in hot and humid climates. These buildings employ a hybrid approach to space conditioning that combines operable windows and mechanical cooling. A comprehensive modeling methodology is developed to predict the interactions between occupants and buildings, including occupancy, split air conditioner (AC) operation, and window and door operation. The proposed methodology is applied in a case study conducted in Hanoi, Vietnam. Based on the lifestyle characteristics of the local people, an integrated occupant behavior model is developed in MATLAB and coupled with a calibrated apartment model built in the thermal-energetic simulation program TRNSYS. Four occupant behavior styles with different occupancy schedules, AC use intensities, and ventilation habits are extracted from representative households in 49 surveyed apartments.

Five selected energy efficiency measures are evaluated comparatively using deterministic simulations under design conditions and stochastic simulations with different behavior styles. The selected measures are: reducing the solar heat gain through solar control glass (SCG), optimizing ventilation through a demand-controlled ventilation system (DCV), improving the thermal performance of the building envelope through a wall thermal insulation and solar control glass (TIS/SCG), a combination of a demand-controlled ventilation system and solar control glass (DCV/SCG), as well as a combination of wall thermal insulation system, demand-controlled ventilation system, and solar control glass (TIS/DCV/SCG).

The comparisons indicate that the evaluation of energy efficiency measures is closely related to the occupant behavior style adopted and differs significantly from the results using simplified deterministic simulations based on design standards. Among the selected measures, the combination TIS/DCV/SCG shows the highest energy savings in space cooling under design conditions. Implementing this measure in a typical apartment in Hanoi with a floor area of 85 m² is expected to reduce the annual AC electrical energy use by 677 kWh/a (about 25%). However, the predictions considering representative occupant behavior styles show that only up to a quarter of the expected energy savings can be achieved by this combined measure.

Additionally, not all measures provide energy benefits for the occupant behavior styles studied. For example, using a demand-controlled ventilation system leads to increased AC energy use but improves the indoor climate compared to variants with insufficient or excessive ventilation.

This work reveals the significant impact of occupant behavior on AC energy use and the indoor environment. Therefore, it is necessary to consider diverse occupant behaviors in developing and evaluating energy efficiency measures for buildings. The proposed modeling methods can make a significant contribution to this.

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht den Einfluss des Nutzerverhaltens auf die Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen für Mixed-Mode-Wohngebäude in heißen und feuchten Klimazonen. Bei diesen Gebäuden wird ein hybrider Ansatz zur Raumklimatisierung verwendet, bei dem bedienbare Fenster und mechanische Kühlung kombiniert werden. Es wird eine umfassende Modellierungsmethodik entwickelt, um die Interaktionen zwischen Bewohnern und Gebäuden vorherzusagen, einschließlich der Belegung, des Betriebs von Split-Klimageräten sowie der Fenster- und Türbedienung. Die vorgeschlagene Methodik wird in einer Fallstudie in Hanoi, Vietnam angewendet. Basierend auf den Lebensstilvermerkmale der lokalen Bevölkerung wird ein integriertes Nutzerverhaltensmodell in MATLAB entwickelt und mit einem kalibrierten Apartmentmodell, das in dem thermisch-energetischen Simulationsprogramm TRNSYS erstellt wird, gekoppelt. Vier repräsentative Nutzerverhaltensstile mit unterschiedlichen Belegungsplänen, Nutzungsintensitäten von Split-Klimageräten und Lüftungsgewohnheiten werden aus 49 untersuchten Wohnungen extrahiert.

Fünf ausgewählte Energieeffizienzmaßnahmen werden vergleichend mit deterministischen Simulationen unter Auslegungsbedingungen und stochastischen Simulationen mit verschiedenen Nutzerverhaltensstilen bewertet. Die ausgewählten Maßnahmen sind: Reduzierung des solaren Wärmegewinns durch Sonnenschutzverglasung (SCG), Optimierung der Lüftung durch ein bedarfsgeregeltes Lüftungssystem (DCV), Verbesserung des thermischen Verhaltens der Gebäudehülle durch ein Wärmedämmsystem und Sonnenschutzverglasung (TIS/SCG), Kombination aus bedarfsgeregeltem Lüftungssystem und Sonnenschutzverglasung (DCV/SCG) sowie Kombination aus Wärmedämmsystem, bedarfsgeregeltem Lüftungssystem und Sonnenschutzverglasung (TIS/DCV/SCG).

Die Vergleiche zeigen, dass die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wesentlich mit dem verwendeten Nutzerverhaltensstil zusammenhängt und sich signifikant von den Ergebnissen vereinfachter deterministischer Simulationen auf der Grundlage von Auslegungsstandards unterscheidet. Unter den ausgewählten Maßnahmen zeigt die Kombination TIS/DCV/SCG bei Auslegungsbedingungen die höchsten Energieeinsparungen für die Raumkühlung. Die Umsetzung dieser Maßnahme in einer typischen Wohnung in Hanoi mit einer Grundfläche von 85 m² lässt eine Reduzierung des jährlichen elektrischen Energieaufwands für Klimatisierung um 677 kWh/a (ca. 25%) erwarten. Die Vorhersagen unter Berücksichtigung repräsentativer Nutzerverhaltensstilen zeigen jedoch, dass durch diese Maßnahmenkombination nur bis zu einem Viertel der erwarteten Energieeinsparungen erzielt werden können. Die deterministischen Simulationen unter Auslegungsbedingungen überschätzen signifikant das Energieeinsparungspotential von Maßnahmen.

Darüber hinaus bieten nicht alle Maßnahmen energetische Vorteile für die untersuchten Nutzerverhaltensstile. So führt der Einsatz eines bedarfsgeregelten Lüftungssystems zu einem erhöhten Energieaufwand für die Klimatisierung, verbessert jedoch das Innenraumklima gegenüber Varianten mit unzureichender oder übermäßiger Belüftung.

Diese Arbeit zeigt die signifikante Auswirkung des Nutzerverhaltens auf den Energieaufwand für die Klimatisierung sowie das Raumklima. Es ist daher notwendig, unterschiedliche Nutzerverhaltensweisen bei der Entwicklung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen für Gebäude zu berücksichtigen. Die vorgeschlagenen Modellierungsmethoden können dazu einen wesentlichen Beitrag leisten.

Contents

Nomenclature	VIII
1 Introduction	1
2 State of the Art	3
2.1 Occupancy modeling.....	3
2.1.1 Static occupancy schedule.....	3
2.1.2 Stochastic occupancy modeling.....	3
2.1.3 Occupancy data collection.....	5
2.1.4 Drawbacks and limitations.....	6
2.2 Behavior modeling.....	6
2.2.1 Deterministic behavior modeling.....	6
2.2.2 Stochastic behavior modeling.....	7
2.2.3 Behavioral and environmental data collection.....	9
2.2.4 Drawbacks and limitations.....	11
2.3 Energy efficiency measures.....	12
2.3.1 Exterior wall insulation.....	12
2.3.2 Solar control glass.....	12
2.3.3 Fixed solar shading.....	13
2.3.4 Dynamic solar shading.....	14
2.3.5 Hybrid ventilation strategy.....	15
3 Fundamentals	16
3.1 Stochastic simulation.....	16
3.1.1 Bernoulli event.....	16
3.1.2 Inverse transform sampling.....	16
3.2 Thermal comfort.....	17
3.2.1 Mechanically conditioned spaces.....	17
3.2.2 Occupant-controlled naturally conditioned spaces.....	18
3.3 Indoor air quality.....	21
3.4 Split AC system.....	22
3.5 Multizone building modeling with TRNSYS.....	24
3.5.1 Thermal zone and airnode.....	24
3.5.2 Coupling with the airflow model COMIS.....	25
3.5.3 Airflow network.....	25
3.5.4 Driving forces.....	28
3.5.5 Pollutant model.....	29
4 Methodology	30
4.1 Research workflow.....	30
4.2 Data collection.....	32

4.2.1	Case study introduction.....	32
4.2.2	Weather data	34
4.2.3	Indoor environmental data.....	34
4.2.4	AC operation data	35
4.2.5	Occupancy data	37
4.2.6	Thermal comfort survey.....	42
4.3	Modeling and simulation of occupancy.....	44
4.3.1	Occupancy characteristics	44
4.3.2	Apartment occupancy state.....	45
4.3.3	Number of occupants	47
4.3.4	Location of occupants	49
4.3.5	Movement of occupants	49
4.4	Modeling and simulation of split AC usage behavior	50
4.4.1	Split AC usage characteristics.....	50
4.4.2	AC turn-on trigger.....	50
4.4.3	AC event duration	52
4.4.4	Simulation workflow	53
4.5	Modeling and simulation of window and door operation	55
4.5.1	Window and door operation characteristics.....	55
4.5.2	Trigger-based window and door operation modeling method	55
4.6	Simulation-based multi-aspect evaluation	58
4.6.1	Evaluation of energy-saving potential.....	58
4.6.2	Evaluation of thermal comfort.....	58
4.6.3	Evaluation of indoor air quality	60
5	Modeling and Validation	61
5.1	Overview of models.....	61
5.2	BPS model.....	61
5.2.1	Occupant behavior interface	61
5.2.2	CHTC calculation module.....	62
5.2.3	Weather data processor	63
5.2.4	Split AC Model	63
5.2.5	Multizone apartment model	63
5.2.6	CO ₂ generation rates for occupants	64
5.2.7	Internal heat and moisture gains	64
5.3	Representative households.....	65
5.3.1	AC use intensity	65
5.3.2	Monthly electricity consumption.....	67
5.3.3	Household composition and occupancy schedule	68
5.3.4	Window and door operation	69
5.4	Model validation	70

5.4.1	AC operation model validation.....	70
5.4.2	Occupancy model validation	71
5.4.3	BPS model validation	73
5.4.4	Coupled model validation	76
6	Developing Energy Efficiency Measures.....	77
6.1	Deterministic simulations under design conditions	77
6.1.1	Occupancy-related settings.....	78
6.1.2	Indoor climate-related settings	78
6.1.3	Ventilation-related settings	78
6.1.4	CO ₂ generation and internal gains.....	78
6.1.5	Shading.....	78
6.1.6	Material properties	79
6.1.7	Weather data	79
6.2	Baseline analysis under design conditions	79
6.2.1	Cooling energy demand	79
6.2.2	Indoor environmental conditions.....	80
6.3	Description of measures.....	81
6.3.1	Thermal Insulation System.....	81
6.3.2	Solar Control Glass.....	81
6.3.3	External Fixed Shading	81
6.3.4	Automated Shading System.....	82
6.3.5	Demand-Controlled Ventilation.....	82
6.4	Evaluation of measures under design conditions.....	83
6.4.1	Reduction in cooling energy demand	83
6.4.2	Impact on the indoor environment.....	84
6.4.3	Selection of measures.....	85
7	Assessing the Impact of Occupant Behavior.....	87
7.1	Stochastic simulations with representative OB styles	87
7.1.1	Representative OB styles.....	87
7.1.2	Occupancy-related settings.....	88
7.1.3	AC-related settings.....	88
7.1.4	Ventilation-related settings	88
7.1.5	Repeated simulations.....	88
7.2	Baseline analysis under different OB styles.....	89
7.2.1	AC electrical energy use and heat gain analysis	89
7.2.2	Exceedance probability of thermal environment	91
7.2.3	IAQ and ventilation.....	92
7.3	Evaluation of measures under different OB styles	94
7.3.1	Energy-saving potential.....	94
7.3.2	Mitigation of overheating risk.....	96

7.3.3	Mitigation of overcooling risk	97
7.3.4	Improvement of IAQ	98
8	Summary and Outlook	100
9	Bibliography.....	106
10	Appendix	119
10.1	Technical specifications of measurement equipment	119
10.1.1	Weather station.....	119
10.1.2	IAQ data logger.....	119
10.1.3	Comfort measuring kit.....	119
10.2	Model components.....	120
10.2.1	Weather data processor	120
10.2.2	Split AC Model	120
10.3	Estimated AC energy use based on energy bills	120
10.4	Construction material and window properties	121
10.4.1	Layout and wall codes.....	121
10.4.2	Wall surfaces	121
10.4.3	Interior building components	122
10.4.4	Exterior building components	124
10.5	Parameters related to airflow network	125
10.6	AC performance data	126
10.7	Internal heat gains.....	128
10.8	Probability tables.....	129
10.8.1	AC turn-on probability tables	129
10.8.2	AC Event Duration ECDF Tables	132
10.9	Apartment occupancy rate	138