

Lüftungseffektivität von Wohnungslüftungsanlagen (WLA) und ihr Potential zur Energieeinsparung

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde ei-
nes Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhand-
lung

vorgelegt von

Mohammad Reza Adili

aus Teheran

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Mitberichter:

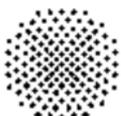
Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Friedrich

Tag der Einreichung:

13.06.2018

Tag der mündlichen Prüfung:

18.12.2018



Universität Stuttgart

IGE
2018

Institut für Gebäudeenergetik

ISBN – 978 – 3 – 9811996 – 8 – 0

D93

Universität Stuttgart, **IGE**
Institut für Gebäudeenergetik
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart

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

Stuttgart, Dezember 2018

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart. Sie wurde im Rahmen des Stipendienprogramms der Graduierten- und Forschungsschule „Effiziente Energienutzung“ Stuttgart (GREES) finanziert, wofür ich mich vielmals bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt für die Betreuung meiner Arbeit. Seine freundliche Unterstützung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit, seine ständige Bereitschaft zu fachlichen Diskussionen und außerfachlichen Gesprächen mit vielen wertvollen Ratschlägen und konstruktiven Anregungen haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Friedrich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen für sein Mitwirken in der Prüfungskommission und seine Unterstützung als Leiter der Graduierten- und Forschungsschule „Effiziente Energienutzung“ Stuttgart (GREES). Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos für seine konstruktiven Anregungen.

Herrn Dr.-Ing. Tobias Henzler danke ich ausdrücklich für zahlreiche konstruktive fachliche Diskussionen als Doktorandenmentor, ebenso für seine Hinweise zur schriftlichen Ausarbeitung, die eine wertvolle Hilfe geleistet haben.

Für die Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen sowie den Studierenden des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung und der HLK Stuttgart GmbH bedanken. Für fachliche Beratung und Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Christian Stäbler herzlich bedanken. Weiterhin danke ich Frau Martina Ellinger für die Unterstützung und Hilfe bei der Veröffentlichung der Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihre fortwährende liebevolle Unterstützung. Durch ihren steten Rückhalt, ihren Zuspruch und ihre Liebe haben sie in wesentlichem Maße zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Stuttgart, im Dezember 2018

Mohammad Reza Adili

Kurzfassung

Die verschärften Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) an die Luftdichtheit der Gebäudehülle führen zu einem zunehmenden Einsatz von Wohnungslüftungsanlagen zur Erfüllung der hygienischen und bauphysikalischen Anforderungen in Räumen. Bei diesen Anlagen werden die Auslegungsluftvolumenströme unter Annahme einer idealen Mischströmung im Raum bestimmt, wobei die Effektivität der Luftführung hierbei nicht betrachtet wird.

Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich der Lüftungseffektivität verschiedener Luftführungssysteme mit unterschiedlichen Luftdurchlässen und Positionen. Der betrachtete Raum ist ein typisches Wohnzimmer mit 20 m² Grundfläche. Die Strömungsvorgänge und die Schadstoffausbreitung im Raum werden anhand von numerischen Strömungssimulationen dreidimensional berechnet und die Lüftungseffektivität verschiedener Varianten ermittelt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich durch eine gezielte Luftführung im Raum eine verbesserte Lüftungseffektivität herstellen lässt. Hierzu ist je nach Art und Anbringung der Luftdurchlässe eine Lüftungseffektivität von bis zu 1,5 erzielbar.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden ausgewählte Varianten zusätzlich im Raumlüftungsströmungslabor experimentell untersucht. Die Lüftungseffektivität wird anhand des Spurengas-Messverfahrens bestimmt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen eine sehr gute quantitative und qualitative Übereinstimmung mit den Simulationen, so dass sich die numerischen Modelle als gut geeignet erweisen.

Mit einer Verbesserung der Lüftungseffektivität kann der hygienisch benötigte Mindestaußenluftvolumenstrom reduziert und somit das energetische Einsparpotential aufgezeigt werden. Hierfür werden thermisch-energetische Jahressimulationen zur Ermittlung des Heizwärme- bzw. Hilfsenergiebedarfs verschiedener Varianten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei einer Lüftungseffektivität von 1,5 und einem entsprechend reduzierten Außenluftvolumenstrom Einsparungen von etwa 20% beim Heizwärmebedarf erreichen lassen. Daneben kann etwa 34% des Hilfsenergiebedarfs eingespart werden.

Abstract

The stricter requirements of the German Energy Saving Ordinance (EnEV) on the airtightness of the building envelope lead to an increasing use of residential ventilation systems to fulfill the hygienic and physical building requirements in rooms. In these systems, the airflow rates are designed assuming an ideal mixing in the room. Hereby, the effectiveness of the air delivery is not considered.

The aim of this work is to compare the ventilation effectiveness of different air distribution systems with varying air diffusers and positions. The investigated space is a typical living room with a floor area of 20 m². The air flow pattern and the pollutant dispersion in the room are calculated three-dimensionally by using numerical flow simulations and the ventilation effectiveness of different cases is determined. The simulation results indicate that an optimized air distribution makes it possible to improve the ventilation effectiveness in the room. Depending on the type and position of the air diffusers, a ventilation effectiveness of up to 1.5 can be achieved.

To validate the simulation results, selected variants are investigated experimentally in the room air flow laboratory. The ventilation effectiveness is determined by the trace gas measurement method. The experimental results agree with the simulations, which proves that the numerical models are well-suited for determining the airflow in buildings.

With an improvement in the ventilation effectiveness, the required minimum outside air flow can be reduced which leads to energy savings. For this purpose, thermal-energetic building simulations are carried out to determine the heating and auxiliary energy demands of different variants. The results show that with a ventilation effectiveness of 1.5, heating demand savings of about 20% can be achieved. Additionally, about 34% of the auxiliary energy demand can be saved.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Die deutsche Klimaschutzpolitik	1
1.2 Handlungsfeld Gebäude	2
1.3 Lüftung und Wärmebedarf von Wohngebäuden	3
1.4 Stand der Forschung	5
1.5 Ziele der Arbeit	7
2 Grundlagen.....	9
2.1 Behaglichkeit im Raum.....	9
2.1.1 Thermische Behaglichkeit	10
2.1.2 Zugluftisiko.....	12
2.1.3 Vertikaler Lufttemperaturgradient.....	14
2.1.4 Innenraumluftqualität (ILQ)	14
2.2 Anforderungszone	16
2.3 Luftführung im Raum	17
2.3.1 Mischlüftung.....	17
2.3.2 Quelläftung.....	18
2.3.3 Verdrängungslüftung.....	19
2.4 Luftstrahl.....	19
2.5 Bestimmung der Lüftungsvolumenströme	21
2.6 Lüftungseffektivität.....	22
2.6.1 Alter der Luft	25
2.6.2 Luftaustauschwirkungsgrad	27
2.6.3 Lüftungswirksamkeit.....	28
2.7 Reduzierung der Luftströme	30

3	Maschinelle Wohnungslüftung - Stand der Technik.....	31
3.1	Konzepte der maschinellen Wohnungslüftung.....	31
3.1.1	Abluftsysteme	32
3.1.2	Zuluftsysteme.....	34
3.1.3	Zu-/Abluftsysteme	35
3.2	Systemkomponenten	36
4	Numerische Untersuchungen	38
4.1	Grundlagen der numerischen Methoden	38
4.1.1	Erhaltungsgleichungen.....	39
4.1.2	Turbulenzmodellierung.....	42
4.1.3	Wandbehandlung.....	44
4.2	Beschreibung des betrachteten Raums.....	45
4.3	Erstellen der Modellgeometrie	46
4.4	Erstellen und Überprüfung des Rechengitters	47
4.5	Beschreibung der Randbedingungen	48
4.6	Untersuchte Luftdurchlässe	50
4.6.1	Weitwurfdüse	51
4.6.2	Schnabeldüse	51
4.6.3	Tellerventil.....	52
4.6.4	Kombi-Quellluftdurchlass	52
4.6.5	Kombi-Schlitzdurchlass.....	53
4.6.6	Dezentrales Fassadenlüftungsgerät	53
4.7	Post-Processing der Simulationsergebnisse	53
4.8	Simulationsergebnisse für die Weitwurfdüse	54
4.9	Simulationsergebnisse für das Tellerventil	60
4.10	Simulationsergebnisse für die Schnabeldüse	66
4.11	Simulationsergebnisse für den Quellluftdurchlass	72

4.12	Simulationsergebnisse für den Schlitzdurchlass.....	78
4.13	Simulationsergebnisse für das Fassadengerät.....	84
5	Experimentelle Untersuchungen	91
5.1	Raumluftrömungslabor	91
5.2	Versuchsraum	91
5.3	Beschreibung des Messaufbaus.....	93
5.3.1	Temperaturmessung	93
5.3.2	Messung der Luftgeschwindigkeit	94
5.3.3	Messung des lokalen Durchschnittsalters der Luft	95
5.4	Spurengasmethode	95
5.4.1	Abklingverfahren	96
5.4.2	Anfahrverfahren	97
5.5	Experimentelle Ergebnisse mit Weitwurfdüse.....	99
5.6	Experimentelle Ergebnisse mit Tellerventil	101
5.7	Experimentelle Ergebnisse mit Schnabeldüse.....	104
5.8	Beurteilung der experimentellen Ergebnisse	106
6	Energieeinsparpotential	108
6.1	Lüftungskonzept	108
6.2	Aufbau des Simulationsmodells.....	108
6.3	Randbedingungen	109
6.4	Regelung der Wärmerückgewinnung	111
6.5	Simulationsergebnisse	112
6.5.1	Temperatur- und Leistungsverlauf	112
6.5.2	Energiebedarf	113
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	116
8	Literaturverzeichnis	120

9	Anhang.....	126
9.1	Typische Schritte im CFD-Simulationsprozess.....	126
9.2	Beschreibung des Simulationspaketes ANSYS.....	128
9.3	Gitterunabhängigkeitsprüfung.....	129
9.4	Einstellen des Löses 130	
9.4.1	Modelle	130
9.4.2	Materialeigenschaften.....	131
9.4.3	Randbedingungen.....	131
9.4.4	Lösung	131
9.5	Gitterqualität	133
9.5.1	Orthogonale Qualität.....	133
9.5.2	Aspect Ratio.....	134
9.5.3	Skewness.....	134
9.6	Orthogonale Qualität der Netzstruktur mit Weitwurfdüse.....	137
9.7	Skewness der Gitterstruktur mit Weitwurfdüse	138
9.8	Einstellungen für Flächen mit Wandfunktion.....	139
9.9	Übersicht der verwendeten Bauteile	139
9.10	Messtechnik.....	140