

# **Thermische Behaglichkeit und Raumluftqualität bei Verminderung des Außenluftstroms und Einsatz von Raumentstoffern**

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

vorgelegt von

**Bing Gu**

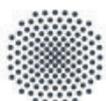
aus Tianjin China

Hauptberichter:  
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Mitberichter:  
Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Tag der Einreichung:  
17.07.2019

Tag der mündlichen Prüfung:  
27.11.2020



**Universität Stuttgart**



**Institut für Gebäudeenergetik,  
Thermotechnik und Energiespeicherung**

ISBN 978 – 3 – 9811996 – 9 – 7

D93

Universität Stuttgart, **IGTE**

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

Pfaffenwaldring 35

70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 62085

Fax.: 0711 / 685 - 52085

Stuttgart, November 2020

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart und später bei der Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH. Das gesamte Konzept der Arbeit lässt sich zurückführen auf ein von der Trox-Stiftung gefördertes Forschungsvorhaben zum Thema Verbesserung der Raumluftqualität durch Entstoffer und von der FG HLK Stuttgart mbH geförderte experimentelle Untersuchungen zur maschinellen Lüftung mit reduzierten Außenluftströmen. Beiden Förderern möchte ich danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich besonders für die Anregung zu dieser Arbeit, die wissenschaftliche Betreuung und die stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion. Seine Impulse und letztlich auch seine Geduld haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos danke ich für sein Interesse an der Arbeit, seine konstruktive Kritik und die Übernahme des Mitberichts.

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Jörg Schmid von der HLK Stuttgart GmbH, der stets zur fachlichen Diskussion meiner Arbeit bereit war, mir konstruktive Vorschläge gegeben und mich sprachlich unterstützt hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen Herren Dipl.-Ing. Christian Stäbler und Dr.-Ing. Christoph Beck von der HLK Stuttgart GmbH sowie bei meinen ehemaligen Kollegen vom Institut für Gebäudeenergetik Herrn Nenad Dobrikovic und Herrn Thomas Plotz für ihre tatkräftige Unterstützung bei den Labor-Untersuchungen.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Eltern sowie meiner Schwester und ihrer Familie in China, die mich aus der Ferne immer unterstützt und motiviert haben.

Stuttgart, im November 2020

Bing Gu

## Kurzfassung

Es ist Stand der Technik, Stofflasten durch die Zufuhr von Außenluft und die gleichzeitige Abfuhr stoffbelasteter Raumluft abzuführen. Könnte man Stofflasten ohne oder mit wesentlich kleineren Luftströmen als heute üblich abführen? – Dann müssten Raumentstoffer (kurz: Entstoffer), analog zu Heizkörpern bei der Heizlast oder Kühldecken bei der Kühllast die Abfuhr der Stofflast übernehmen.

Können die Anforderungen an die Raumluftqualität mit einem solchen Konzept erfüllt werden? Welchen Einfluss hat es auf die Behaglichkeit der Personen im Raum?

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen in einem Versuchsraum im Maßstab 1:1 dienen dazu, Vergleichswerte für die Überprüfung weiterführender numerischer Untersuchungen bereitzustellen. Mit numerischen Untersuchungen werden die oben genannten Fragen nach Raumluftqualität und Behaglichkeit bei kleinen Außen- und Zuluftströmen untersucht.

Bei Raumströmungen sind die Strömungsgeschwindigkeiten klein. Wegen des vergleichsweise großen Einflusses wandnaher Strömungsvorgänge kommt den bei numerischen Untersuchungen eingesetzten Turbulenz- und Wandströmungsmodellen eine besondere Bedeutung zu. Es wird die Eignung zweier im Vorfeld grundsätzlich als geeignet erscheinender Turbulenzmodelle eingehend untersucht. Im Vergleich zum RNG  $k - \varepsilon$  EWT-Turbulenzmodell erweist sich das low Re  $k - \varepsilon$  YS-Turbulenzmodell als besser geeignet. Es wird deshalb für die weiterführenden Untersuchungen zur Raumluftqualität und Raumbehaglichkeit verwendet.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass die Luftqualität bei geeigneter Anordnung des Entstoffers im Raum trotz reduziertem Außenluftstrom deutlich verbessert werden kann. Die Beurteilung der Behaglichkeit fällt sogar leicht zugunsten des Einsatzes von Entstoffern in Verbindung mit reduziertem Außenluftstrom aus.

Der Einsatz von Raumentstoffern ist also ein geeignetes Mittel, um in Kombination mit – gegenüber üblichen Werten – deutlich reduzierten Außenluft- und Zuluftströmen die Anforderungen an Raumluftqualität einerseits und Behaglichkeit andererseits in Büro- und Wohnräumen sicherzustellen. Damit ist auch eine Einsparung von Energie möglich.

## Abstract

The available/current technology for ensuring the indoor air quality is purging the loads of pollutants by supplying outside air and removing the polluted air. Is it possible to purge polluted air without airflow or with airflow rates considerably lower than usual today? Then, air purifiers, analogous to radiators for heating loads and cooled ceilings for cooling loads, would have to take over purging the loads pollutants.

Can the demands for the indoor air quality be fulfilled with such a concept? What are the impacts on the comfort of people in the room?

The experimental investigations within the scope of this work, which are undertaken in full-scale model in laboratory, are basically intended to provide comparable values for validating further numerical investigations. The questions concerning indoor air quality at small outside and supply airflow rates then can be investigated by numerical investigations.

Room airflows usually bear little velocities. Because of the large influence of the near wall flow processes by way of comparison, the turbulence models and near wall treatment models used in numerical investigations have special significance. Two turbulence models that appeared to be suitable in advance are investigated more closely. Compared to the RNG  $k - \varepsilon$  EWT turbulence model, the low Re  $k - \varepsilon$  YS turbulence model seems to fit better and therefore is chosen to further investigate the possibility of improving indoor air quality and indoor comfort.

The performed investigations present obviously improved indoor air quality in spite of reducing the outside airflow rates by well arranging of the air purifier in the room. The differences in assessment of comfort even fall slightly in favour of the use of air purifiers combined with reduced outside airflow rates.

The application of air purifiers is suitable as well for fulfilling requirements of indoor air quality in both offices and residential buildings on the one hand, and of comfort, on the other hand, in combination with noticeably reduced outside and supply airflow rates, compared to usual values. So energy saving is possible, too.

## Inhalt

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Forschung im Hinblick auf Entstoffer .....	4
3	Grundlagen .....	10
3.1	Thermische Behaglichkeit, Raumluftqualität und erforderlicher Außenluftstrom .....	10
3.1.1	Thermische Behaglichkeit .....	10
3.1.2	Raumluftqualität und erforderlicher Außenluftstrom .....	13
3.2	Luftführung und Erfassung der Stofflasten .....	15
3.3	Bedeutung von Luftstrahlen für die Raumströmung .....	18
3.3.1	Wandstrahlen – isotherm .....	19
3.3.2	Wandstrahlen – anisotherm .....	21
3.4	Entstoffer zur Reinigung der Luft von Stofflasten im Raum .....	24
3.4.1	Einsatz von Entstoffern im Raum .....	24
3.4.2	Ermitteln der Konzentration der Stofflasten im Raum bei Einsatz von Entstoffern .....	24
3.5	Messungen der Raumluftströmung .....	25
4	Bedeutung von Turbulenzmodellen für rechnerische Untersuchungen .....	28
4.1	Überblick der Methoden der numerischen Strömungsmodellierung .....	28
4.2	$k - \varepsilon$ -Turbulenzmodelle und deren Behandlung wandnaher Strömungen .....	30
4.2.1	Ausgewählte $k - \varepsilon$ -Turbulenzmodelle .....	31
4.2.2	Behandlung wandnaher Strömungen durch $k - \varepsilon$ -Turbulenzmodelle .....	35
5	Vergleich und Überprüfung der ausgewählten $k - \varepsilon$ -Turbulenzmodelle .....	41
5.1	Experimentelle Untersuchungen .....	43
5.1.1	Randbedingungen der experimentellen Untersuchungen .....	43
5.1.2	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen .....	46

5.2	Numerische Untersuchungen .....	53
5.2.1	Randbedingungen der numerischen Untersuchungen im belegten Raum.....	53
5.2.2	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen im belegten Raum .....	54
5.2.3	Modellierung und Randbedingungen des leeren Raums	78
5.2.4	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen im leeren Raum .....	79
5.3	Vergleich zwischen den experimentellen und den numerischen Untersuchungen.....	91
5.3.1	Vergleich der Ergebnisse für den belegten Raum .....	91
5.3.2	Vergleich der Ergebnisse für den leeren Raum .....	98
5.4	Zusammenfassung bezüglich der ausgewählten $k - \varepsilon$ Turbulenzmodelle .....	101
6	Bewertung der Raumluftqualität und der thermischen Behaglichkeit beim Einsatz von Raumentoffern .....	104
6.1	Weitere Randbedingungen für Untersuchungen der Raumluftqualität und der thermischen Behaglichkeit .....	104
6.2	Beurteilung der Raumluftqualität .....	104
6.2.1	Zuluftstrom von 30 m <sup>3</sup> /h .....	106
6.2.2	Zuluftstrom von 10 m <sup>3</sup> /h (Entstoffer nicht in Betrieb / Entstoffer in Betrieb) .....	108
6.3	Beurteilung der thermischen Behaglichkeit .....	111
6.3.1	PMV und PPD.....	111
6.3.2	Luft- und operative Temperaturen .....	117
6.3.3	Temperaturgradienten .....	119
6.3.4	Luftfeuchtigkeit im Raum .....	121
6.3.5	Zugluft.....	122
6.3.6	Warmer / kalter Fußboden .....	124
6.3.7	Asymmetrie der Strahlung(stemperaturen) .....	126
7	Zusammenfassung .....	129
8	Literaturverzeichnis.....	133
9	Anhang .....	138

9.1	Sondereinrichtungen des Versuchsaufbaus – Bypass-System für den Fall mit 10 m <sup>3</sup> /h Zuluftstrom .....	138
9.2	Anordnung und Konstruktion der Einrichtungsgegenstände ...	139
9.3	Aufbau des Messstativs und verwendete Messgeräte .....	142
9.4	Sicherstellung der Messqualität.....	145
9.4.1	Einfluss der Strahlung auf Temperatursensoren.....	145
9.4.2	Überprüfen der temperierten Raumumschließungsflächen.....	146
9.4.3	Schwankungen der Temperaturmesswerte .....	147
9.4.4	Schwankungen der Luftgeschwindigkeiten und deren Messunsicherheit.....	148
9.4.5	Störungen der Raumluchtströmung beim Betreten des Raums .....	151
9.4.6	Zusätzliche Wärmequellen.....	155
9.4.7	Nebelversuche .....	155
9.4.8	Undichtigkeit des Labors.....	156
9.4.9	Sonstige Einflüsse bei den Messungen .....	156
9.5	Messwerte der Experimente.....	157
9.6	Ergänzungen zu Untersuchungen der Raumströmungen im belegten Raum.....	161
9.6.1	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen .....	161
9.6.2	Vergleich der Ergebnisse für den belegten Raum .....	169
9.6.3	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen im belegten Raum .....	181
9.6.4	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen im leeren Raum .....	209
9.7	Ergänzungen zur Beurteilung der Raumluchtqualität und der thermischen Behaglichkeit .....	225
9.7.1	Beurteilung der Raumluchtqualität.....	225
9.7.2	Behaglichkeitsbeurteilung nach DIN EN ISO 7730 .....	230