

Benedikt Kölsch

**Investigation of an Improved
Acoustical Method for
Determining Airtightness
of Building Envelopes**

Investigation of an Improved Acoustical Method for Determining Airtightness of Building Envelopes

Untersuchung eines verbesserten akustischen Verfahrens zur Bestimmung der Luftdichtheit von Gebäudehüllen

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Benedikt Kölsch

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Hoffschmidt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems

Tag der mündlichen Prüfung: 31.03.2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Berichte aus dem Bauwesen

Benedikt Kölsch

**Investigation of an Improved Acoustical Method for
Determining Airtightness of Building Envelopes**

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

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 978-3-8440-8583-9

ISSN 0945-067X

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

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

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Unintended air infiltration in buildings is responsible for 30 to 50 % of the building stock energy demand. The fan pressurization method, also known as the blower-door test, is the most frequently used and standardized measurement method to evaluate a buildings' airtightness and determine the airflow through a building or a building element. While detection and quantification of individual leaks with smoke tracers or infrared thermography are challenging, time-consuming, and depend on the respective operator's experience, acoustic methods have the potential to localize and quantify leaks in building envelopes without the need for pressure or temperature difference between in and outside of the examined building.

In this thesis, two acoustic methods, coherence measurements and beamforming, are introduced to this field of application to estimate the leakage size and location of individual leaks in building elements. This work aims at finding if different leak sizes can be quantified and detected using these acoustic measurement methods. For an estimation of leakage size, acoustic and airflow measurements are compared in a laboratory test apparatus. Test walls representing a single characteristic air leakage path in the building envelope at a model scale and separate two chambers with speaker and microphones. Various types of wall structures with different slit geometry, wall thickness, and insulation materials are tested. The acoustic measurements are performed with a sound source placed in one chamber and ultrasonic microphones located in both chambers. The results of these measurements are compared to the airflow through the test wall measured using a flow nozzle. The results from laboratory measurements indicate a linear trend between acoustic coherence and leak size in the investigated range of several mm². Although the acoustic measurement uncertainty is still significant ($\approx \pm 50\%$), the acoustic method shows the potential to give an order of magnitude of leak sizes.

The findings are validated in a real building setup using various reproducible leaks constructed with cable ties wedged in a window gasket. The acoustic and airflow measurements in the building show results similar to the laboratory measurements. Further, the acoustic beamforming method ("acoustic camera") using a microphone array to detect leak locations and visualize them shows promising results. The same constructed leaks in a window gasket are detected. With decreasing leak size and sound pressure, detection frequency increases.

The thesis concludes that acoustic methods have the potential to detect and quantify the leaks in building envelopes without test preparations as for common methods.

Zusammenfassung

Ungewünschte Luft-Infiltration in Gebäuden ist für 30 bis 50 % des Energiebedarfs des Gebäudebestands verantwortlich. Der Blower-Door-Test ist die am häufigsten verwendete und standardisierte Messmethode zur Beurteilung der Luftdichtheit von Gebäuden und zur Bestimmung des Luftstroms durch ein Gebäude. Während die Detektion und Quantifizierung einzelner Leckagen mit Rauchgas oder Infrarot-Thermografie anspruchsvoll, zeitaufwendig und von der Erfahrung des jeweiligen Bedieners abhängig sind, haben akustische Methoden das Potenzial, Leckagen in der Gebäudehülle zu lokalisieren und zu quantifizieren, ohne dass eine Druck- oder Temperaturdifferenz zur Umgebung des Gebäudes erforderlich ist.

In dieser Arbeit werden zwei akustische Methoden (Kohärenzmessungen und Beamforming) in dieses Anwendungsgebiet eingeführt, um Leckgrößen und die Lage einzelner Lecks in Gebäudehüllen abzuschätzen. Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob mit diesen akustischen Messverfahren unterschiedliche Leckgrößen detektiert und quantifiziert werden können. Zur Abschätzung der Leckgröße werden akustische und Differenzdruck-Messungen in einem Laborversuchsaufbau verglichen. Die Testwand repräsentiert einen modellhaften charakteristischen Luftleckagepfad in der Gebäudehülle und trennt zwei Kammern mit Lautsprecher und Mikrofonen. Getestet wurden verschiedene Wandaufbauten mit unterschiedlichen Schlitzgeometrien, Wandstärken und Dämmmaterialien. Die akustischen Messungen wurden mit einer Schallquelle in einer Kammer und Ultraschallmikrofonen in beiden Kammern durchgeführt und die Signalkohärenz ausgewertet. Die Ergebnisse der Kohärenz der akustischen Messungen wurden mit Differenzdruck-Messungen durch diese Testwand verglichen und zeigen einen linearen Trend der akustischen Kohärenz mit der Leckgröße im untersuchten Bereich weniger mm^2 . Obwohl die Streuung der Messwerte noch signifikant ist ($\approx \pm 50\%$), zeigt die akustische Methode das Potenzial, Größen von Lecks abzuschätzen. Die Ergebnisse wurden an einem realen Gebäude unter Verwendung reproduzierbarer Lecks validiert, die mit Kabelbindern in einer Fensterdichtung erzeugt wurden. Die Messungen im Gebäude zeigen dabei mit den Labormessungen vergleichbare Ergebnisse. Zudem zeigten Messungen mit einem Mikrofonarray vielversprechende Resultate, die Leckagen in der Gebäudehülle zu erkennen und zu visualisieren. Dieselben sechs erzeugten Lecks in einer Fensterdichtung wurden detektiert. Mit abnehmender Größe der Leckage und des Schalldrucks nimmt die Frequenz der Detektion zu. Diese Arbeit zeigt, dass akustische Methoden das Potenzial haben, Lecks in der Gebäudehülle zu detektieren und ihre Größe abzuschätzen, ohne aufwändige Vorbereitungen zu treffen.

Contents

List of Figures	XI
List of Tables	XV
Nomenclature	XVII
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Objectives and Scope	4
2 State of the Art	7
2.1 Building Construction and Airtightness	7
2.1.1 Thermal Performance of Buildings	9
2.1.2 Factors Influencing Airtightness of a Building	10
2.1.3 Indicators for Building Air Permeability	13
2.1.4 Requirements on Air Tightness	14
2.1.5 Calculation of Building Airtightness	15
2.2 Measuring Methods of Building Airtightness	19
2.2.1 Pressurization Methods	19
2.2.2 Thermographic Method	22
2.2.3 Tracer Gas Methods	24
2.2.4 Acoustic Methods	26
3 Theory of Acoustics and Signal Processing	29
3.1 Acoustic Fundamentals	29
3.1.1 Characteristics of Sound	29
3.1.2 Sound Measurement	32
3.2 Signal Processing	33
3.2.1 Fourier Series and Transform	33
3.2.2 Auto- and Cross-Correlation	36
3.2.3 Convolution	37
3.2.4 Hilbert-Huang Transform	38

3.2.5	Bandwidth Analysis	41
3.2.6	Frequency Sweeps	42
4	Preliminary Laboratory Acoustic Investigations	47
4.1	Experimental Setup	47
4.1.1	Test Apparatus	47
4.1.2	Measurement Equipment	48
4.2	Linear Sweep Measurements	48
4.2.1	Methodology	48
4.2.2	Results and Discussion	50
4.3	Impulse Response Measurements	58
4.3.1	Methodology	59
4.3.2	Results and Discussion	62
4.4	Summary	67
5	Laboratory Comparison of Airflow and Acoustic Measurements	69
5.1	Methodology	69
5.1.1	Laboratory Test Box	69
5.1.2	Investigated Wall Structures	70
5.1.3	Pressure Difference and Airflow Measurements	71
5.1.4	Acoustic Measurements	73
5.2	Results and Discussion	74
5.2.1	Pressure Difference and Airflow Measurements	74
5.2.2	Acoustic Measurements	75
5.3	Summary	82
6	Improving Air Leakage Prediction of Fan Pressurization Measurements	83
6.1	Methodology	84
6.1.1	Test Site and Measurement Equipment	84
6.1.2	Regression Methods	86
6.1.3	Probability Density Functions	88
6.2	Results and Discussion	90
6.2.1	Pressure Exponent and Flow Coefficient	90
6.2.2	Airflow Rate and Equivalent Leakage Area	95
6.3	Summary	99
7	Real Building Application	101
7.1	Methodology	101
7.1.1	Test Site and Investigated Leaks	101
7.1.2	Pressure Difference and Airflow Measurements	102

7.1.3	Tracer Gas Measurements	103
7.1.4	Acoustic Measurements	104
7.2	Results and Discussion	105
7.2.1	Pressure Difference and Airflow Measurements	105
7.2.2	Air Change Rate Measurements with Tracer Gas Method	107
7.2.3	Acoustic Measurements	107
7.3	Summary	114
8	Acoustic Detection and Localization of Leaks in Building Envelopes	117
8.1	Fundamentals	117
8.1.1	Delay-and-Sum Beamforming	119
8.1.2	Microphone Array Sensitivity	120
8.2	Methodology	122
8.2.1	Measurement Equipment and Experimental Setup	122
8.2.2	Array Directivity	123
8.2.3	Testing Procedure	124
8.3	Results and Discussion	125
8.3.1	External Sound Source Reduction	125
8.3.2	Building Façade Measurements	129
8.4	Summary	131
9	Summary, Conclusions and Future Perspective	137
9.1	Summary and Conclusions	137
9.2	Future Perspective	139
	Acknowledgments	141
	Publications and Student Theses	143
	Bibliography	147