

Geduld vermeidet Messfehler

Dauer des Druckaufbaus bei der Luftdurchlässigkeitsmessung

BBSR-
Online-Publikation
40/2023

von

Joachim Zeller



Geduld vermeidet Messfehler

Dauer des Druckaufbaus bei der Luftdurchlässigkeitsmessung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.36

Projektlaufzeit: 04.2021 bis 05.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Guido Hagel
guido.hagel@bbr.bund.de

Autor

Ingenieurbüro Zeller, Biberach
Joachim Zeller
joachim.zeller@t-online.de

Redaktion

Ingenieurbüro Zeller, Biberach
Joachim Zeller

Stand

Mai 2023

Gestaltung

Ingenieurbüro Zeller, Biberach
Joachim Zeller

Bildnachweis

Titelbild: Joachim Zeller

Photo Porst Biberach, Manuela Maier GmbH: S. 96; Michael Wehrli, Marthalen, Schweiz: S.75; Joachim Zeller, Biberach: S. 15, 22, 24, 25, 25, 30, 31, 32, 33, 33, 36, 39, 40, 41, 52, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 61, 70, 72, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 78, 80, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Zeller, Joachim, 2023: Geduld vermeidet Messfehler: Dauer des Druckaufbaus bei der Luftdurchlässigkeitsmessung. BBSR-Online-Publikation 40/2023, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	9
Symbole und Indizes	11
1. Einführung	14
2. Fragestellung	15
2.1 Erklärung für die Dauer des Druckaufbaus	15
2.2 Stand von Forschung und Messpraxis	16
2.2.1 Forschung	16
2.2.2 Messpraxis	17
2.3 Forschungslücke	17
3. Ziele	18
3.1 Konkrete Projektziele	18
3.2 Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu	18
4. Forschungsdesign	19
4.1 Arbeitshypothesen	19
4.2 Methodischer Ansatz	19
4.3 Festlegungen	19
4.3.1 Grundversion	20
5. Projektbearbeitung	21
5.1 Ventilator Kennlinien	21
5.1.1 Explizite Messung von Kennlinien	21
5.1.2 Ermittlung von Kennlinien aus Messungen an Gebäuden	23
5.2 Berechnung der erforderlichen Messdauer	26
5.2.1 Grundlage: Leckagegleichung des Gebäudes	26
5.2.2 Maßgebliche Differentialgleichung unter Berücksichtigung der Ventilator Kennlinie	26
5.2.3 Näherungslösung	27
5.2.4 Erklärung für den Einfluss der Ventilator Kennlinie	31
5.2.5 Beispielrechnungen	31
5.2.6 Fazit	34
5.3 Abschätzung möglicher Messfehler	34
5.3.1 Genauigkeitsanforderungen für den Volumenstrom	34
5.3.2 Fehlerfortpflanzungsgesetz: Genauigkeitsanforderungen für den Differenzdruck	34
5.3.3 Test durch Auswertung vorliegender Gebäudemessungen mit einem Offset auf den Gebäudedruck	36
5.3.4 Einfluss der Ventilator Kennlinie auf den Fehler	37
5.3.5 Simulation des Messfehlers mittels eines berechneten Beispielgebäudes	37
5.3.6 Simulation des Messfehlers mittels realer Messkurven	40
5.4 Adiabatische oder isotherme Verhältnisse?	41
5.4.1 Problemstellung	41
5.4.2 Grundlagen	42
5.4.3 Herleitung der Differentialgleichungen	44
5.4.4 Näherungslösung	46

5.4.5	Spezialfälle	48
5.4.6	Abschätzung der Stärke des Wärmeübergangs	50
5.4.7	Beispielrechnung für die Grundversion	51
5.4.8	Beispielrechnungen von Varianten	53
5.4.9	Messfehler für eine große Zahl von berechneten Beispielen	60
5.5	Abschätzung des Einflusses sonstiger Parameter	62
5.5.1	Luftdruck	62
5.5.2	Innenvolumen	62
5.5.3	Volumen variabel	62
5.5.4	Lufttemperatur weicht von Standardbedingungen ab	65
5.5.5	Innen- und Außentemperatur verschieden	65
5.5.6	Druckdifferenz ortsabhängig	65
5.5.7	Druckdifferenz schwankt zeitlich	68
5.5.8	Mehrere Blower Doors	68
5.6	Messstrategie	68
5.6.1	Begriff "Messung"	68
5.6.2	Zielsetzung	68
5.6.3	Messausrüstung	68
5.6.4	Vorgehensweise	69
5.6.5	Wetterbedingungen	70
5.6.6	Vergleich verschiedener Ventilatoren	71
5.7	Suche nach Messobjekten	71
5.8	Messungen Niedrigenergie-Einfamilienhaus	71
5.9	Messungen Passivhaus-Bürogebäude	73
5.10	Messungen von sehr dichten Gebäuden	74
5.10.1	Passivhaus-Einfamilienhaus	74
5.10.2	CO ₂ -Box	74
5.11	Messdaten von Dritten	76
5.12	Auswertung der Messdaten	76
5.12.1	Allgemein	76
5.12.2	Druckabfall auf Null	79
5.12.3	Auswertung Messung CO ₂ -Box	81
5.13	Vergleich zwischen Messung und Theorie	82
5.13.1	Allgemein	82
5.13.2	Auswertung Messungen CO ₂ -Box	84
5.14	Vergleich zwischen Messung und Sieben-Sekunden-Regel	84
5.15	Beschreibung und Begründung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	87
6.	Ergebnisse	88
6.1	Empfehlungen für Messteams	88
6.1.1	Wartezeit bei beweglichen Luftdichtheitsschichten	88
6.1.2	Abschätzung der Wartezeit aufgrund der Dichteänderung	88
6.1.3	Gesamt-Wartezeit	89
6.1.4	Vorgehensweise bei der Messung	90
6.2	Ventilator Kennlinien	90
6.3	Übersicht über die Rechenverfahren	91
6.4	Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Differenzdrucks	91
6.5	Messfehler aufgrund unzureichender Wartezeit	92
6.6	Adiabatische oder isotherme Verhältnisse	92
6.7	Sonstige Parameter	93
6.8	Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen	93

6.8.1	Numerische Berechnung für adiabatische Verhältnisse	93
6.8.2	Rechnerische Abschätzung nach der Sieben-Sekunden-Regel	93
6.9	Bewertung und Ausblick	93
7.	Dank	95
8.	Autor	96
9.	Verzeichnisse	97
9.1	Literaturverzeichnis	97
9.2	Abbildungsverzeichnis	97
9.3	Tabellenverzeichnis	99

Kurzfassung

Bei der Luftdurchlässigkeitsmessung üblicher Häuser wird der erforderliche Differenzdruck an der Gebäudehülle, anders als oft von Laien erwartet, fast sofort erreicht. Aber bei sehr dichten Gebäuden und bei Gebäuden mit beweglichen Luftdichtheitsschichten kann es Minuten dauern, bis sich der Differenzdruck praktisch nicht mehr ändert. Aufgrund von windbedingten Druckschwankungen kann das Messteam nicht ohne weiteres erkennen, wann dieser Zustand erreicht ist. Deshalb ist ein wesentliches Ziel dieses Forschungsprojektes eine handhabbare Formel oder Tabelle, anhand derer während einer Messung die erforderliche Wartezeit ermittelt werden kann.

Die Ursache für die Dauer des Druckaufbaus ist die Kompressibilität der Luft. Um den Druck im Gebäude zu erhöhen oder zu verringern muss die Dichte der Luft erhöht oder verringert werden. Dazu muss der Ventilator der Blower Door Luft ins Gebäude oder aus dem Gebäude heraus fördern. Bei Gebäuden mit flexiblen Luftdichtheitsschichten muss der Ventilator außerdem das Volumen fördern, das durch eine Lageänderung der Luftdichtheitsschicht dazu kommt oder wegfällt.

Für dieses Projekt wird als Wartezeit die Zeit für eine Änderung des Drucks von 20 Pa auf 0,5 Pa Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck bei unveränderter Ventilatoreinstellung definiert. Der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Wartezeit wird durch die Herleitung und Lösung der maßgeblichen Differentialgleichungen untersucht. Messdaten des zeitlichen Druckverlaufs werden mit Berechnungen verglichen.

Neben der Netto-Luftwechselrate des Gebäudes gibt es weitere wesentliche Einflussfaktoren auf die Wartezeit: die Größe einer eventuellen Volumenänderung, z.B. durch die Wölbung einer Luftdichtheitsbahn, und die Steigung der Ventilatorkennlinie, bezogen auf den Leckagestrom. Weitere Einflussfaktoren auf die Wartezeit sind der Strömungsexponent und der Gleichgewichts-Differenzdruck.

Rechnerisch untersucht wird auch der Einfluss des Wärmeübergangs zwischen der Innenluft und den Oberflächen im Gebäude für unterschiedliche Randbedingungen. Sofern Luft und Oberflächen vor dem Verstellen des Gebläses die gleiche Temperatur haben, liegen danach zunächst annähernd adiabatische Verhältnisse vor. Im weiteren Verlauf nähert sich der Differenzdruck nur sehr langsam an den Gleichgewichtswert an. Für ein Beispiel mit einer Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von $0,1 \text{ h}^{-1}$ und einem Oberflächen-Volumen-Verhältnis von 1 m^{-1} ist die Wartezeit mit 85 s nur etwas länger als für adiabatische Verhältnisse ermittelt (71 s). Deutlich längere Wartezeiten ergeben sich aber, falls die Netto-Luftwechselrate kleiner ist und/oder das Oberflächen-Volumen-Verhältnis größer. Extrem lange Wartezeiten können auftreten, wenn Innenluft und Innenoberflächentemperatur zu Beginn der Messung verschieden sind.

Für adiabatische Verhältnisse und ein konstantes Luft-Volumen lässt sich eine e-Funktion als Näherungsformel für den zeitlichen Verlauf des Differenzdrucks angeben. Diese erlaubt es, mit wenig Aufwand Varianten zu berechnen. Der Vergleich zwischen der exakten Lösung der Differentialgleichung und der e-Funktion zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Auch die gemessenen Kurven stimmen im grundsätzlichen Verlauf mit der Theorie überein. Im Mittel über die rund 70 ausgewerteten Messungen liegt die gemessene Wartezeit aber 24 % über der berechneten. Darüber hinaus gibt es eine deutliche Streuung.

Für die Messpraxis ist die e-Funktion nicht geeignet, weil das Messteam die Steigung der Ventilatorkennlinie nicht kennt, und weil der Strömungsexponent erst nach Abschluss der Messreihe bei Unter- bzw. Überdruck bekannt ist. Daher bleibt für die Messpraxis die schon 2020 publizierte Sieben-Sekunden-Regel [Zeller 2020]: die Zahl 7 dividiert durch den Zahlenwert der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa in h^{-1} ergibt die Wartezeit aufgrund der Dichteänderung der Innenluft für jeden Messpunkt in s.

Im Zuge der Projektbearbeitung wurde die immense Bedeutung von flexiblen Luftdichtheitsschichten für die Dauer des Druckaufbaus deutlich: Für ein Beispiel wird gezeigt, dass sich die Wartezeit auf den 15fachen Wert erhöht, wenn das Volumen durch eine Druckänderung von 50 Pa um 5 % vergrößert oder verkleinert wird.

Analog zur 7s-Regel für die Dichteänderung lässt sich eine 20s-Regel für die Volumenänderung herleiten: Multipliziert man die in Promille angegebene Volumenänderung (bei einer Druckänderung von 50 Pa) mit 20 und dividiert durch den Zahlenwert der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa in h^{-1} , erhält man die Wartezeit aufgrund der Volumenänderung in s. Diese ist zu der Wartezeit aufgrund der Dichteänderung zu addieren.

Insgesamt gelang es, den Verlauf des Druckaufbaus besser zu verstehen. Insbesondere wurden die thermodynamischen Grundlagen aufgearbeitet. Für die Messpraxis stehen zwei Formeln zur Berechnung der Wartezeit zur Verfügung. Alternativ kann das Ergebnis dieser Formeln aus einer Tabelle abgelesen werden. Wie praktikabel diese Werkzeuge sind, muss die Zukunft zeigen. Sinnvoll wären weitere Überlegungen mit dem Ziel, die real erforderliche Wartezeit durch eine geeignete Steuerung des Ventilators von Hand oder per Software zu verringern, ohne dass die Messgenauigkeit schlechter wird.

Abstract

During an airtightness test of a usual house the target indoor-outdoor pressure difference is attained nearly at once. But the behaviour of very airtight buildings and of buildings with a flexible air barrier is different: it can take some minutes until the pressure difference practically does not vary any more. Because of pressure fluctuations induced by wind the operator is not able to recognise, when this state is achieved. Therefore, one aim of this research project is a simple equation or table that provides measuring staff with the necessary waiting time.

The reason for the duration of the pressure built up is the compressibility of the air. To increase or decrease the pressure inside the building it is necessary to increase or decrease the density of the air. Therefore the fan has to transport air into or out of the building. In case of buildings with a flexible air barrier also the additional volume by the flexing of the air barrier has to be filled by the fan.

For this project the waiting time is defined as the time for a pressure change from 20 Pa to 0.5 Pa deviation from the pressure difference under balanced conditions, while the fan adjustment is unchanged. To investigate the influence of different parameters on the waiting time, the relevant differential equations are set up and solved. Measuring data of the development of the pressure difference is compared with calculated curves of the pressure difference.

There are several essential parameters that are affecting the waiting time, beside the air flow rate at 50 Pa: the measure of a variation of the volume, e.g. because of the flexing of an air barrier, and the incline of the characteristic curve of the fan, divided by the air flow rate through the building envelope. Also, the air flow exponent and the target pressure difference are affecting the waiting time.

Also, the heat transfer between the indoor air and the indoor surfaces has an effect. For several different conditions the influence of the heat transfer is calculated. In case of no temperature difference between air and surfaces at the beginning, the pressure difference changes nearly according to adiabatic conditions first. After a while, the pressure difference converges more and more slowly towards the balance pressure difference. For an example with an air flow rate at 50 Pa of 0.1 h^{-1} and with a surface to volume ratio of 1 m^{-1} the waiting time is 85 s compared to 71 s for adiabatic conditions. For a lower value of the air flow rate and/or a higher value of the surface to volume ratio the waiting time is considerably longer. A very long waiting time may occur if there is a temperature difference between air and surfaces already at the beginning of the measurement.

For adiabatic conditions and a constant volume an exponential function may be stated which is an approximation for the development of the pressure difference with time. Different versions of buildings and conditions may be easily calculated with this exponential function. The exponential function is a good approximation for the accurate solution of the differential equation. Measured data in principle matches with the theory. But for 70 analysed measurements the waiting time is on average 24 % longer than calculated. Also, there is a significant variation.

For practical measurements the exponential function is unsuitable, because measurement staff does not know the incline of the characteristic curve of the fan and the air flow exponent is known only at the end of the whole set of measuring points. A simple rule, first published in [Zeller 2020], that is more or less on the safe side, may be used: Divide 7 by the air change rate at 50 Pa (in h^{-1}) to get the necessary waiting time caused by the change of density in seconds.

Flexible air barriers have a major influence on waiting time. This was one of the important results of this project. For an example building with a flexible air barrier the waiting time is 15 times as long as for the same building with a solid air barrier. In this example, the inside volume changes by 5 ‰ while the pressure changes by 50 Pa. Similar to the 7-seconds-rule for the change of density a 20-seconds-rule may be developed for the change of volume: Multiply 20 by the volume change, given in ‰ per 50 Pa, and divide by the air change rate at 50 Pa,

given in h^{-1} , to get the waiting time in seconds. The waiting time for the change of density and the waiting time for the change of volume have to be added.

This research project resulted in a better understanding of the development of indoor-outdoor pressure difference during the measurement of the airtightness. The thermodynamic basics for pressurisation tests are developed. For the measuring practice, 2 formulas are available to calculate the waiting time. The result of these formulas is also presented in a table. The practicability of these tools has to be tested in future. Further investigations would be useful to find a solution to reduce waiting time without losing measuring accuracy by regulating the fan manually or automatically.

Symbole und Indizes

Tabelle 1 Verwendete Symbole

Symbol	Größe	SI-Einheit	abweichende (übliche) Einheit
A	Fläche (hier: Oberfläche)	m ²	
a	Polytropenexponent	1	
C _L	Leckagekoeffizient, Strömungskoeffizient	m ³ /s/Pa ⁿ	m ³ /h/Pa ⁿ
c _p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/(kg K)	
c _v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	J/(kg K)	
e(x)	Fehler der Größe x	wie Größe x	
f _v	Faktor für Volumenänderung	1	
G	Abklingkonstante adiabatische Druckänderung	1/s	
H	Abklingkonstante isochore Temperaturänderung	1/s	
h	spezifische Enthalpie der Luft	J/kg	
k _L	spezifischer Leckagekoeffizient	1/s/Pa ⁿ	1/h/Pa ⁿ
m	Masse der Luft im Gebäude	kg	
m ₀	Masse der Luft im Gebäude vor Beginn der Messung	kg	
\dot{m}	Luft-Massenstrom ins Gebäude	kg/s	kg/h
\dot{m}_{bal}	Massenstrom im stationären Zustand	kg/s	kg/h
\dot{m}_F	vom Ventilator (fan) geförderter Massenstrom	kg/s	kg/h
\dot{m}_{F0}	vom Ventilator (fan) geförderter Massenstrom bei Druckdifferenz 0 Pa	kg/s	kg/h
n	Strömungsexponent	1	
n ₅₀	Luftwechselrate bei 50 Pa	1/s	1/h
n _L	Netto-Luftwechselrate	1/s	1/h
n _{L50}	Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa	1/s	1/h
n _{bal}	Netto-Luftwechselrate im stationären Zustand	1/s	1/h
p	Luftdruck	Pa	
q	spezifische Wärme	J/kg	
q	Volumenstrom, Leckagestrom	m ³ /s	m ³ /h
q _{bal}	Volumenstrom im stationären Zustand	m ³ /s	m ³ /h
q _F	vom Ventilator geförderter Volumenstrom	m ³ /s	m ³ /h
q _{F0}	Volumenstrom des Ventilators bei 0 Pa	m ³ /s	m ³ /h
R _s	spezifische Gaskonstante	J/(kg K)	

Symbol	Größe	SI-Einheit	abweichende (übliche) Einheit
S	Steigung der Ventilator Kennlinie	m ³ /s/Pa	m ³ /h/Pa
S _m	Steigung der Massenstrom-Ventilator Kennlinie	kg/s/Pa	kg/h/Pa
S ₀	relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Volumenstrom des Ventilators bei 0 Pa	1/Pa	%/Pa
S ₅₀	relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Volumenstrom <i>des Gebäudes</i> bei 50 Pa	1/Pa	%/Pa
S _{bal}	relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Volumenstrom beim Gleichgewichts-Differenzdruck	1/Pa	%/Pa
T	absolute Temperatur	K	°C
t	Zeit	s	min, h
t _{1/2}	Halbwertszeit	s	min, h
t _p	Wartezeit aufgrund der Dichteänderung	s	min, h
t _v	Wartezeit aufgrund der Volumenänderung	s	min, h
t _w	Wartezeit (Gesamt-)	s	min, h
V	Volumen	m ³	
W	Volumenänderung	m ³ /Pa	
w	relative Volumenänderung	1/Pa	‰/Pa
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)	
Δp	Differenzdruck (an der Gebäudehülle)	Pa	
Δp _{bal}	Gleichgewichts-Differenzdruck	Pa	
Δp*	Abweichung vom Gleichgewichts-Differenzdruck	Pa	
Δp* ₀	Anfangs-Abweichung vom Gleichgewichts-Differenzdruck	Pa	
ΔT	Temperaturdifferenz	K	
ΔT ₀	Anfangs-Temperaturdifferenz	K	
ΔV	Volumenänderung	m ³	
κ	Adiabatenkoeffizient	1	
λ	Eigenwert des Differentialgleichungssystems, Abklingkonstante	1/s	
ρ	Dichte der Luft	kg/m ³	
τ	Zeitkonstante	s	min, h

Tabelle 2 Indizes

Index	Bedeutung
0	zu Beginn der Messung bzw. bei 0 Pa Druckdifferenz
50	bei 50 Pa
bal	stationär; im Gleichgewicht (balance)
ext	außen (external)
F	Ventilator (fan)
i	Laufvariable
int	innen (internal)
L	Leckage
N	Norm
Δp	beim Differenzdruck Δp

1. Einführung

Luftdurchlässigkeitsmessungen von Gebäuden werden derzeit in großer Zahl durchgeführt. Dies liegt vor allem daran, dass der messtechnische Nachweis der geforderten Luftdichtheit zu einer Verringerung der im rechnerischen Nachweis nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) bzw. bisher nach Energieeinsparverordnung (EnEV) angesetzten Infiltrationswärmeverluste und somit zu einem günstigeren Ergebnis führt. Häufig werden Luftdurchlässigkeitsmessungen genutzt, um eine gewünschte Stufe der öffentlichen Förderung für energieeffiziente Gebäude zu erreichen.

Zunehmend wird auch die nach DIN V 18599-2 optional zulässige Möglichkeit genutzt, statt eines Standardwertes der Luftdurchlässigkeit das genaue Messergebnis für die Berechnung der Infiltrationswärmeverluste heranzuziehen. Die Messgenauigkeit ist bei Messungen zum Nachweis der Einhaltung eines Grenzwertes meist wenig relevant, es sei denn, das Messergebnis liegt nahe am Grenzwert. Anders verhält es sich, wenn das genaue Messergebnis in die berechnete Energiebilanz einfließt. In diesem Fall kommt es auf die Messgenauigkeit an.

Das hier vorgestellte Projekt hat einen Aspekt aus dem Bereich der Messgenauigkeit zum Thema: Bei der Luftdurchlässigkeitsmessung eines sehr dichten Gebäudes oder eines Gebäudes mit flexibler Luftdichtheitsschicht dauert es erfahrungsgemäß lange, bis sich nach dem Verstellen der Ventilatorzahl jeweils der endgültige Differenzdruck zwischen innen und außen einstellt. Eine erforderliche Wartezeit von mehreren Minuten je Messpunkt kommt durchaus vor.

Dies birgt die Gefahr von systematischen Messfehlern, sofern nach dem Verstellen des Ventilators für den nächsten Messpunkt der Volumenstrom und der Gebäudedruck zu früh aufgenommen werden, also für einen noch nicht stationären Zustand. Diese Gefahr besteht insbesondere dann, wenn Messungen in einem Automatikmodus durchgeführt werden, wie es bei heutigen Blower Doors üblich ist.

Aber auch bei einer manuellen Messung kann die Person, die die Messung durchführt, nicht ohne Weiteres erkennen, wann ein Zustand erreicht ist, zu dem sich die Druckdifferenz nur noch unwesentlich ändert. Dies gilt verstärkt bei windbedingten Druckschwankungen. Es stellt sich daher die Frage, ob sich die erforderliche Wartezeit berechnen lässt.

Relevant ist die Dauer des Druckaufbaus bei der Messung einerseits bei besonders energieeffizienten Gebäuden, z.B. bei Passivhäusern, andererseits bei Lagerhallen, in denen während der Nutzung eine Inertgasatmosphäre zur Brandvermeidung aufrechterhalten wird. In solchen Lagerhallen können aufgrund des kleinen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses besonders niedrige Werte der Luftwechselrate bei 50 Pa erreicht werden.

So hatte schon im Jahr 2002 eine baubegleitende Messung eines solchen Hochregallagers mit Brandvermeidungsanlage eine Luftwechselrate bei 50 Pa von $0,048 \text{ h}^{-1}$ ergeben. Eine systematische Untersuchung der Wartezeit hatte damals nicht stattgefunden. Nach heutiger Kenntnis beträgt die erforderliche Wartezeit in diesem Fall rund zweieinhalb Minuten je Messpunkt.

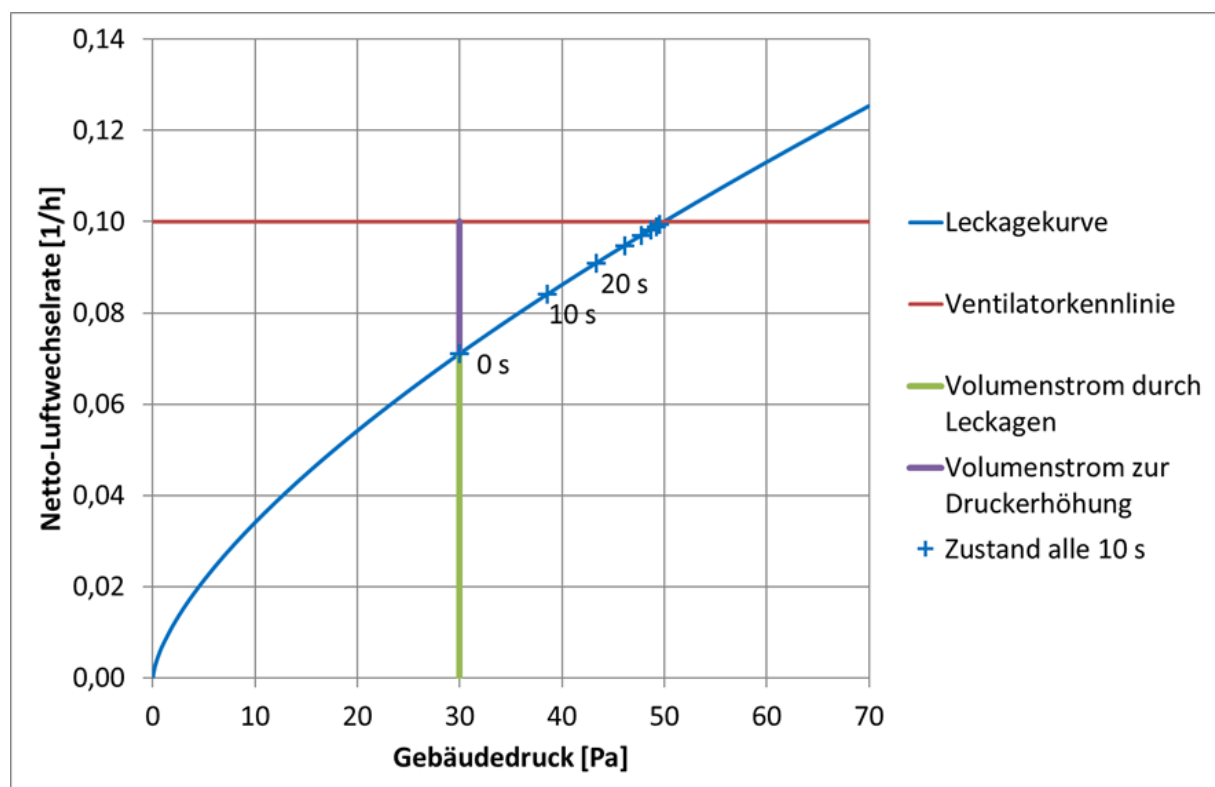
Das Titelfoto aus dem Jahr 2003 zeigt eine weitere Messung mit zwei Blower Doors in diesem Hochregallager. Anders als üblich wurden die Messeinrichtungen in diesem Fall von außen und nicht von innen bedient, weil der Boden im Gebäude rund 5 m tiefer liegt als der außen. Die Fluchttüren, in die die Blower Doors eingebaut sind, sind von innen nur über fest installierte Leitern zu erreichen.

2. Fragestellung

2.1 Erklärung für die Dauer des Druckaufbaus

Der Grund für die langsame Annäherung an die endgültige Druckdifferenz ist die Kompressibilität der Luft. Um beispielsweise den Druck im Gebäude zu erhöhen, muss mit dem Gebläse Luft ins Gebäude gefördert werden, so dass sich die Dichte der Luft im Gebäude und damit der Luftdruck erhöht. Die Druckerhöhung im Gebäude führt zu einer Druckdifferenz an der Gebäudehülle und dazu, dass durch Gebäudeundichtheiten Innenluft nach außen strömt. Ein Teil der vom Ventilator zugeführten Luft strömt also wieder nach außen und dient nicht der Druckerhöhung. Deshalb erfolgt die Annäherung an den „endgültigen“ Innendruck immer langsamer, also asymptotisch.

Abbildung 1 Leckagekennlinie eines Gebäudes und idealisierte Ventilator-kennlinie



Die Verhältnisse sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die blaue Kurve ist die Leckagekurve des Gebäudes, die rote horizontale Gerade stellt die Kennlinie eines idealisierten Ventilators mit konstantem Volumenstrom dar. Der Ventilator ist so eingestellt, dass im Gleichgewichtszustand ein Differenzdruck von 50 Pa herrscht (Schnittpunkt von Leckagekurve und Ventilator-kennlinie). Beträgt der momentane Differenzdruck an der Gebäudehülle beispielsweise 30 Pa, dann strömt bei einem Gebäude mit einer Netto-Luftwechselrate von $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$ ein Volumenstrom entsprechend der Netto-Luftwechselrate von $0,07 \text{ h}^{-1}$ durch die Gebäudehülle (in der Grafik grün). Nur $0,03 \text{ h}^{-1}$ bleiben für die Druckerhöhung. Nach 10 s wird eine Druckdifferenz von 38,6 Pa erreicht. Erst nach 70 s beträgt der Gebäudedifferenzdruck 49,5 Pa und liegt damit nahe am endgültigen Wert.

2.2 Stand von Forschung und Messpraxis

2.2.1 Forschung

Die lange Dauer des Druckaufbaus bei dichten Gebäuden war bei einigen Messteams schon lange bekannt. Die Tatsache schien plausibel, wurde aber nicht weiter hinterfragt, bis Stefanie Rolfsmeier, Blower Door GmbH, Anfang 2019 die Frage aufwarf, ob man die notwendige Wartezeit nicht berechnen könne. Der Autor stellte im Auftrag der Blower Door GmbH die maßgeblichen Gleichungen zusammen und berechnete wenige Beispiele für einen idealisierten Ventilator mit konstantem Volumenstrom. Dabei wurden isotherme Verhältnisse angenommen.

Stefanie Rolfsmeier trug die Ergebnisse im Mai 2019 bei einem Vortrag über ihre praktischen Erfahrungen bei der Messung sehr dichter Gebäude auf dem BuildAir-Symposium vor [Rolfsmeier 2019]. Eine Kurzfassung ihres Vortrags präsentierte sie im selben Jahr bei der AIVC Konferenz. In der Folge gab es eine kurze internationale Diskussion per E-Mail. International schien man an den Ergebnissen interessiert zu sein, aber bislang sind keine weiteren Arbeiten zu diesem Thema bekannt geworden.

Gary Nelson, The Energy Conservatory (TEC), Minneapolis, USA, warf die Frage auf, ob man es nicht eher mit adiabatischen als mit isothermen Verhältnissen zu tun habe. Der Autor erstellte eine erste rechnerische Abschätzung und diskutierte diese Frage mit Jürgen Schnieders, Passivhaus Institut. Neue Berechnungen unter der Annahme adiabatischer Verhältnisse wurden in der „Bauphysik“ veröffentlicht [Zeller 2020]. Dabei wurde weiterhin ein idealisierter Ventilator mit konstantem Volumenstrom angesetzt.

Die wesentlichen Ergebnisse zu diesem Zeitpunkt waren:

Maßgebliche Differentialgleichung:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot \left[\frac{q_F}{V} - \frac{n_{L50}}{(50Pa)^n} \Delta p^n \right]$$

(1)

mit¹

Δp	Differenzdruck an der Gebäudehülle [Pa]
p	(absoluter) Luftdruck [Pa]
κ	Adiabatenkoeffizient [1]
q_F	Volumenstrom des Ventilators (fan) [m ³ /s]
V	Luftvolumen des Gebäudes [m ³]
n_{L50}	Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa [h ⁻¹]
n	Strömungsexponent [1]

Empfehlung für Messteams: Sieben-Sekunden-Regel

„Jede Messung beginnt damit, dass bei etwa 50 Pa Unterdruck Leckagen gesucht werden. Am Ende der Leckagesuche, nachdem ausreichend Zeit verstrichen ist, werden der Volumenstrom und der Gebäudedifferenzdruck gemessen, um daraus einen ersten Wert für die Luftwechselrate bei 50 Pa zu berechnen. Dividiert man die Zahl 7 durch den Zahlenwert der Luftwechselrate bei 50 Pa, erhält man die erforderliche Wartezeit t_w in Sekunden.“ [Zeller 2020]

¹ Während die Symbole in [Zeller 2020] an die alte Messnorm DIN EN 13829 angelehnt sind, werden in diesem Forschungsbericht, auch in Gleichung (1), die Variablen der aktuellen DIN EN ISO 9972 verwendet.

2.2.2 Messpraxis

In dem vom Fachverband Luftdichteit im Bauwesen e.V. (FLiB) herausgegebenen FLiB-Buch Band 1 wird ab der 2. Auflage in einem Abschnitt „Hinweise für Messdienstleister“ die Empfehlung ausgesprochen, Messreihen nicht der Reihe nach von kleinen zu großen Drücken oder umgekehrt aufzunehmen, sondern abwechselnd die Gebläsespannung zu erhöhen und abzusenken. Streuende Messwerte weisen dann auf eine unzureichende Wartezeit hin (vgl. 5.3). Diese Empfehlung betrifft einerseits Gebäude mit einer kleinen Luftwechslrate bei 50 Pa, andererseits solche mit beweglichen Luftdichtheitsschichten. [Zeller 2012]

Es ist davon auszugehen, dass das Thema Dauer des Druckaufbaus auch bei den Schulungen zur Messung großer Gebäude angesprochen wird. Nicht bekannt ist, welcher Anteil der Messteams Schulungen besucht und/oder die einschlägige Literatur liest.

2.3 Forschungslücke

Was die Theorie angeht, waren zu Beginn des hier dokumentierten Forschungsprojektes drei wesentliche Fragen offen:

1. Der Volumenstrom des Ventilators q_F ist keine Konstante, sondern vom Gegendruck abhängig. Von vornherein klar ist, dass der Volumenstrom mit steigendem Differenzdruck sinkt, und dass diese fallende Kennlinie die Dauer des Druckaufbaus verkürzt. Unklar war der typische Verlauf der Ventilator Kennlinien von Blower Doors und wie groß der Einfluss auf die Dauer des Druckaufbaus ist (vgl. 5.1 und 5.2).
2. Die zweite offene Frage war die des Einflusses eines Wärmeübergangs von der Innenluft zu den inneren Oberflächen. Die Annahme adiabatischer Verhältnisse bedeutet, einen solchen Wärmeübergang zu vernachlässigen. Im Rahmen des Projektes war deshalb zu klären, unter welchen Randbedingungen die adiabatische Näherung ausreichend ist, und welche Dauer des Druckaufbaus in anderen Fällen resultiert (vgl. 5.4).
3. Wie groß sind die systematischen Messfehler in den Fällen, in denen die erforderliche Messdauer nicht eingehalten wird (vgl. 5.3 und 5.4.9).

Während der Projektbearbeitung wurde eine weitere Frage aufgeworfen:

4. Wie wirkt sich die bei einer flexiblen Luftdichtheitsbahn stattfindende Volumenänderung auf die Dauer der Messung aus?

Weiterhin bestand der Wunsch, die theoretischen Überlegungen messtechnisch zu überprüfen (vgl. 5.6 bis 5.14). Bei den Vorüberlegungen zu einem Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Verläufen des Differenzdrucks wurde klar, dass es eine große Zahl von Parametern gibt, die bei einer realen Messung anders sein können, als die Annahmen für die Berechnungen. Daher sollte deren Einfluss auch rechnerisch hergeleitet werden (vgl. 5.5).

3. Ziele

3.1 Konkrete Projektziele

Das Motiv für dieses Projekt ist nicht nur der Wunsch, die Zusammenhänge zu verstehen. Vielmehr sollen die Forschungsarbeiten einen Nutzen für den Messalltag bringen. Das entscheidende Ziel ist daher, die Sieben-Sekunden-Regel zu hinterfragen und nach Möglichkeit eine genauere Formel zur Berechnung der erforderlichen Wartezeit anzugeben. Gegebenenfalls sollte zusätzlich oder alternativ zur Formel eine Tabelle erstellt werden, mit deren Hilfe die erforderliche Wartezeit während einer Messung ermittelt werden kann.

3.2 Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Die Gründe für luftdichtes Bauen sind vielfältig, unter anderem die Vermeidung unnötiger Lüftungswärmeverluste, das Vermeiden bestimmter Bauschäden und der Komfort. Die messtechnische Prüfung der Luftdichtheit dient der Qualitätssicherung und somit den gleichen Zielen.

Eine genaue quantitative Messung sagt wenig über die Bauschadensanfälligkeit oder das Zugluftrisiko aus, aber die Infiltrationswärmeverluste lassen sich anhand des Messergebnisses gut abschätzen. Insofern ist das übergeordnete Ziel für dieses Projekt die Energieeffizienz von Gebäuden und somit der Klimaschutz. Konkret wird dies über das Gebäudeenergiegesetz (GEG).

Relevant für den Nachweis nach GEG ist die Messgenauigkeit deshalb, weil nach DIN V 18599-2 der Messwert der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa (n_{L50}) für die Berechnung des Infiltrationsvolumenstroms herangezogen werden darf, um auf diese Weise eine geringere Infiltration als auf Basis der Standardwerte zu erreichen. Insbesondere zum Erreichen eines besseren Effizienzhausstandards für die KfW-Förderung wird diese Möglichkeit genutzt.

Darüber hinaus ist die Luftdichtheit und somit auch deren Messgenauigkeit besonders wichtig bei Gebäuden, meist Lagerhallen, in denen eine Anlage zur Reduktion des Sauerstoffgehaltes eingesetzt wird, beispielsweise um die Entstehung eines Brandes zu verhindern, oder um Lebensmittel vor schnellem Verderben zu schützen. Der Stickstoffgenerator einer solchen Anlage benötigt Druckluft. Je undichter das Gebäude ist, umso mehr Stickstoff muss eingebracht werden und umso größer ist die Laufzeit und damit der Stromverbrauch der Kompressoren.

4. Forschungsdesign

4.1 Arbeitshypothesen

1. Die Kennlinien der Ventilatoren lassen sich zumindest lokal als Geraden beschreiben. Die Dauer des Druckaufbaus erfolgt bei realen Ventilatoren etwas schneller als bei einem idealisierten Ventilator mit horizontaler Kennlinie.
2. Die bei realen Messungen ermittelte Dauer des Druckaufbaus entspricht im Rahmen der Messgenauigkeit den theoretisch hergeleiteten Ergebnissen.
3. Der typische Messfehler bei unzureichender Wartezeit liegt bei 20 % des Leckagestroms. Sein Vorzeichen hängt von der Reihenfolge ab, in der die Messpunkte angefahren werden.
4. Bei größeren Werten der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa liegen eher adiabatische, bei kleineren eher isotherme Verhältnisse vor. Experimentell lässt sich die Frage wegen des Einflusses der Temperaturdifferenz innen – außen nicht mit Sicherheit klären.

4.2 Methodischer Ansatz

Die Dauer des Druckaufbaus wird berechnet, indem die maßgeblichen Differentialgleichungen aufgestellt und numerisch gelöst werden.

Darüberhinaus werden die Gleichungen analysiert, um die Zusammenhänge zu verstehen. Durch eine geeignete Näherung werden die Differentialgleichungen so umformuliert, dass sie geschlossen lösbar sind. Eine Gleichung zur Berechnung der Wartezeit wird abgeleitet.

Zur messtechnischen Aufzeichnung des Druckaufbaus werden Messungen in Gebäuden durchgeführt, die eine Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von nicht mehr als $0,6 \text{ h}^{-1}$ aufweisen.

Zum Vergleich zwischen Messung und Berechnung werden Berechnungen mit den Anfangsbedingungen aufgestellt, die sich bei der jeweiligen Messung ergeben haben.

4.3 Festlegungen

Bei den Gleichungen in diesem Bericht handelt es sich um Größengleichungen. Sie gelten auch als Zahlengleichungen, sofern alle Größen in SI-Einheiten angegeben werden.

Formelzeichen werden im Bericht zumindest beim ersten Vorkommen erklärt. Symbole, die in der Messnorm DIN EN ISO 9972 vorkommen, werden von dort übernommen. Eine Übersicht über alle Symbole und Indizes ist in Tabelle 1 und Tabelle 2 zu finden.

Bis 2015 waren die Definitionen des Innenvolumens V und der Luftwechselrate bei 50 Pa n_{50} nach der europäischen Norm EN 13829 und der internationalen ISO 9972 identisch. Leider wurden bei ISO die Definition des Innenvolumens V und damit die Definition der Luftwechselrate bei 50 Pa n_{50} mit der Ausgabe 2015 der ISO 9972 geändert: Das Volumen wird jetzt aus „Gesamtinnenmaßen“ ermittelt. Zwischendecken und Innenwände sind damit im Innenvolumen V enthalten. Das Volumen nach der neuen Definition ist also größer als das nach der alten, der Wert der Luftwechselrate bei 50 Pa fällt damit kleiner aus, als nach der alten Norm.

In Deutschland entschied man sich, die herkömmliche Bezugsgröße beizubehalten. Deshalb wurde in einem nationalen Anhang der DIN EN ISO 9972 die Bezugsgröße „Luftvolumen V_L “ definiert, die sich auf Innenmaße bezieht, und aus der die „Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa n_{L50} “ abgeleitet wird.

In Anlehnung an den nationalen Anhang der Norm werden in dieser Arbeit der Begriff „Netto-Luftwechselrate“ und das Symbol „ n_{L50} “ verwendet. Das Volumen wird der Einfachheit halber mit V , ohne Index, bezeichnet.

Wie bei der Abbildung von Ergebnissen von Luftdurchlässigkeitsmessungen üblich wird in Grafiken von Leckagekurven in diesem Bericht der Differenzdruck als unabhängige Variable, der Volumenstrom als abhängige dargestellt, also gerade spiegelbildlich zur Darstellung von Ventilator- und Anlagenkennlinien in der Lüftungstechnik.

4.3.1 Grundversion

Für die Berechnung von Varianten in Abhängigkeit von einem Parameter wurde eine „Grundversion“ festgelegt. Parameter, die im jeweiligen Abschnitt nicht explizit angegeben sind, entsprechen der Grundversion:

Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$

Strömungsexponent $n = 0,67$

Gleichgewichtsdifferenzdruck $\Delta p_{\text{bal}} = 50 \text{ Pa}$

Anfangsdifferenzdruck $\Delta p_0 = 70 \text{ Pa}$

Steigung der Ventilator-kennlinie $S = 0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{Pa}$

Luftdruck außen $p_0 = 101325 \text{ Pa}$

Außen- und Innentemperatur $T_{\text{ext}} = T_{\text{int}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Zustandsänderung: adiabatisch

5. Projektbearbeitung

5.1 Ventilator Kennlinien

5.1.1 Explizite Messung von Kennlinien

Vier Hersteller bzw. Importeure von Blower Doors wurden nach beispielhaften Kennlinien für ihre Geräte gefragt. Zwei schickten gemessene Kennlinien, ein Hersteller stellte ein Leihgerät zur Verfügung. Ein Hersteller hatte Rückfragen. Nach deren Beantwortung kam keine weitere Antwort.

Insgesamt liegen Kennlinien von 3 Geräten von 2 Herstellern vor:

1. Minneapolis BlowerDoor Model 4.1
The Energy Conservatory (TEC), Minneapolis, Gary Nelson stellte folgende Messdaten zur Verfügung:
 - offener Ventilator, Maximum ,
 - offener Ventilator, mittlere Geschwindigkeit,
 - Blende (Ring) B, Maximum,
 - Blende B, mittlere Geschwindigkeit.Die Blower Door GmbH, Springe, Stefanie Rolfmeier stellte folgende Messdaten zur Verfügung:
 - offener Ventilator, Maximum ,
 - Blende B, mittlere Geschwindigkeit.
2. Minneapolis Duct Blaster
The Energy Conservatory (TEC), Minneapolis, Gary Nelson stellte folgende Messdaten zur Verfügung:
 - offener Ventilator, Maximum ,
 - offener Ventilator, mittlere Geschwindigkeit,
 - Blende (Ring) 2, Maximum,
 - Blende 2, mittlere Geschwindigkeit.
3. Wöhler BC 600 Blower Check
Die Wöhler Technik GmbH, Bad Wünnenberg, Johannes Lötfering, stellte die Messausrüstung zur Verfügung. Der Autor ermittelte folgende Kennlinien:
 - Unterdruck, Maximum,
 - Unterdruck, mittlere Geschwindigkeit (60%),
 - Überdruck, Maximum,
 - Überdruck, mittlere Geschwindigkeit (60%).

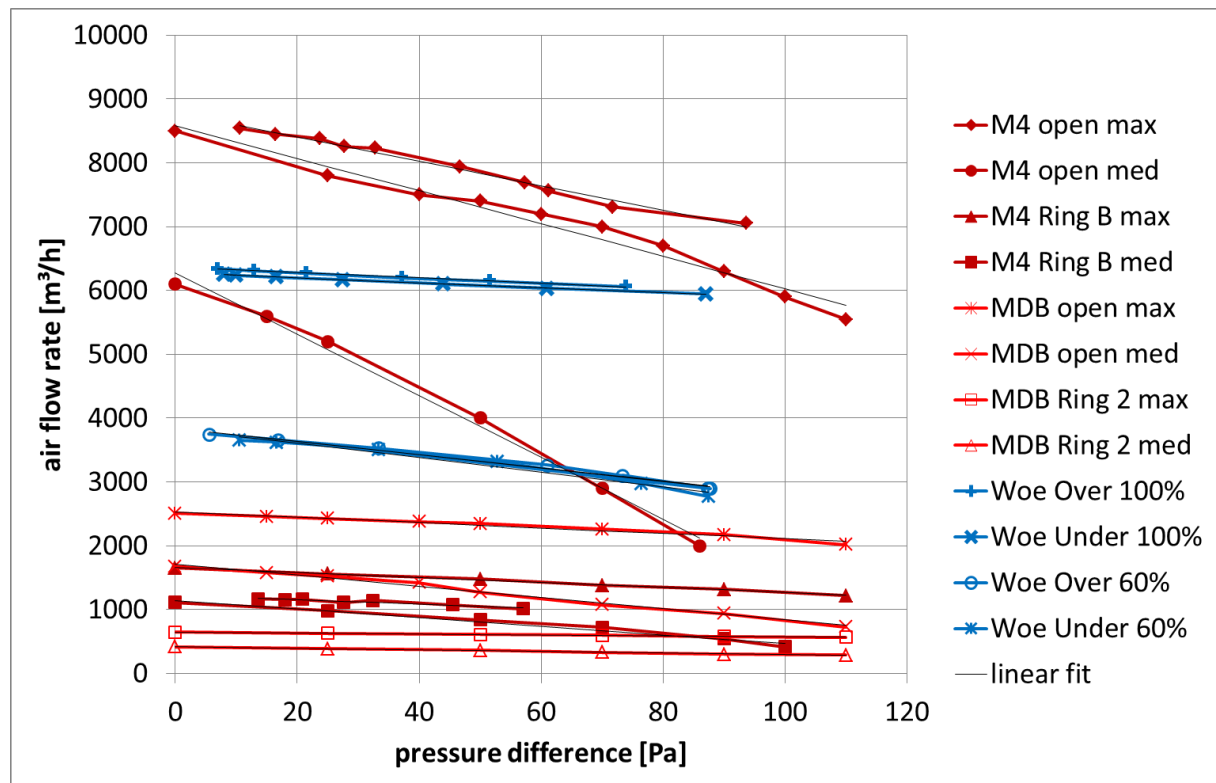
Zur Ermittlung der Kennlinien wurde die BC 600 in eine Außentür des Kellers eines Einfamilienhauses eingebaut und mit einer festen Einstellung betrieben. Um verschiedene Volumenströme zu erhalten, wurde eine unterschiedliche Anzahl von feststellbaren Kippfenstern unterschiedlich weit geöffnet. Volumenstrom und Differenzdruck wurden jeweils mit der Blower Door BC 600 selbst gemessen.

Die vorliegenden Kennlinien sind in Abbildung 2 wiedergegeben. Die Grafik zeigt die Messpunkte, für jede Kennlinie durch Linien verbunden. Jeweils eine dünne schwarze Linie zeigt zu jeder Kennlinie die nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung ermittelte lineare Näherung.

Die gemessenen Kennlinien stellen Beispiele dar: tatsächlich gibt es bei jedem Gerät für jede Blende (zur Einstellung des Messbereichs) und für jede Einstellung des Ventilators eine Kennlinie. Etwas anders sind die Verhältnisse bei der BC 600 von Wöhler: Der Messbereich wird nur über den Ventilator eingestellt, Blenden werden nicht verwendet. Anders als die anderen Geräte wird die BC 600 für die Überdruckmessung nicht umgedreht, sondern der Ventilator läuft in die entgegengesetzte Richtung. Somit gibt es Kennlinien für Über- und Unterdruck (in Abbildung 2 mit „Over“ und „Under“ gekennzeichnet).

Abbildung 2 Vergleich der vorliegenden Ventilator Kennlinien

Dargestellt ist der Volumenstrom über dem Differenzdruck. Die Abkürzungen in der Legende bedeuten: M4 = Minneapolis model 4, MDB = Minneapolis Duct Blaster, Woe = Wöhler BC 600.



Die meisten Kennlinien sind wenig gekrümmt, so dass die lineare Näherung adäquat erscheint. Eine Ausnahme ist die Kennlinie für Minneapolis Model 4 bei offenem Gebläse und halber Geschwindigkeit (rote Punkte, M4 open med). Hier erscheint eine quadratische Näherung passender. Vergleichsrechnungen für die erforderliche Wartezeit zeigten aber einen nur sehr kleinen Unterschied zwischen der linearen und der quadratischen Näherung.

Daher wird für die Fragestellung dieses Projektes, d.h. die erforderliche Wartezeit bei der Messung, grundsätzlich eine lineare Näherung verwendet.

Maßgeblich für die Wartezeit ist die Steigung der Ventilator Kennlinie (vgl. 5.2): Bei zwei Ventilatoren und gleichem Volumenstrom im stationären Zustand einer Messung erfolgt die Annäherung mit dem Ventilator schneller, der die steilere (abfallende) Kennlinie aufweist. Vergleicht man zwei Ventilatoren mit gleicher Steigung der Kennlinie (in $\text{m}^3/\text{h}/\text{Pa}$ bzw. $\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}$), dann erfolgt die Annäherung an den stationären Zustand bei einem großen Volumenstrom langsamer als bei einem kleinen. Die Steigung muss auf den Volumenstrom bezogen werden.

Die lineare Näherung einer Ventilator Kennlinie lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$q_F = q_{F0} + S \cdot \Delta p \quad (2)$$

bzw.

$$q_F = q_{bal} + S \cdot (\Delta p - \Delta p_{bal})$$

wobei

$$q_{bal} = q_{F0} + S \cdot \Delta p_{bal}$$

mit

q_F	Volumenstrom des Ventilators (fan) [m ³ /s]
q_{F0}	Volumenstrom des Ventilators bei 0 Pa [m ³ /s]
S	Steigung der Ventilator Kennlinie (negativer Wert) [m ³ /s/Pa]
Δp	Differenzdruck [Pa]
q_{bal}	Volumenstrom im stationären Zustand [m ³ /s]
Δp_{bal}	Gleichgewichts-Differenzdruck [Pa]

Für den Vergleich verschiedener Kennlinien von Ventilatoren ist es hilfreich, die Steigung auf den Volumenstrom bei 0 Pa zu beziehen:

$$s_0 := \frac{S}{q_{F0}}$$

mit

s_0	relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Volumenstrom bei 0 Pa (negativer Wert) [1/Pa]
-------	--

Für die hier untersuchten Ventilatoren und Blenden liegen die Ergebnisse der relativen Steigung s_0 im Bereich von -0,06 %/Pa (Wöhler, Unterdruck, max) bis -0,8 %/Pa (Minneapolis Model 4, offen, halb).

Für die Berechnung der Wartezeit ist es günstiger, die Steigung auf den Volumenstrom beim jeweiligen Gleichgewichts-Differenzdruck zu beziehen:

$$s_{bal} := \frac{S}{q_{bal}}$$

$$q_F = q_{bal} (1 + s_{bal} \cdot (\Delta p - \Delta p_{bal})) \quad (3)$$

mit

s_{bal}	relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Volumenstrom im stationären Zustand (negativer Wert) [1/Pa]
-----------	--

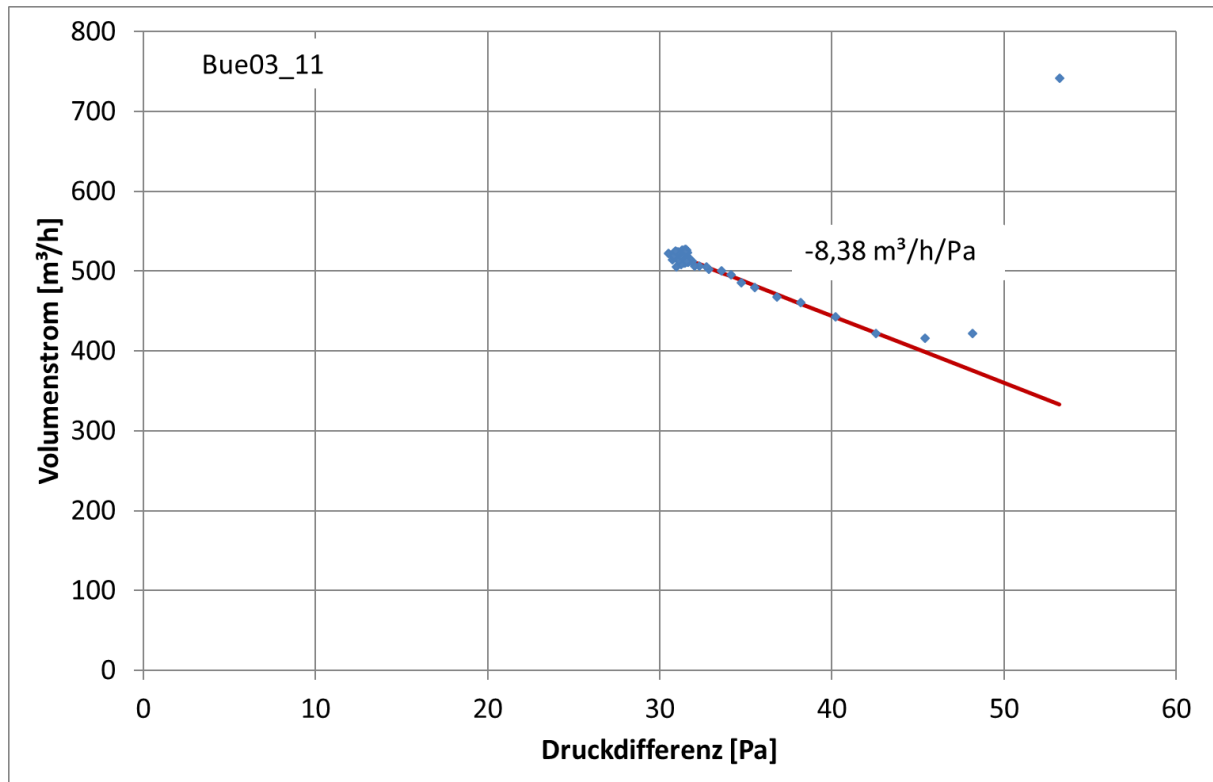
5.1.2 Ermittlung von Kennlinien aus Messungen an Gebäuden

Bei den in den Kapiteln 5.8 bis 5.10 beschriebenen Messungen mit den Geräten Minneapolis Blower Door Model 4.1, Minneapolis Duct Blaster und Retrotec Model 3300 wurde jeweils der Differenzdruck an der Gebäudehülle und der Differenzdruck am Gebläse aufgezeichnet. Aus dem Differenzdruck am Gebläse und der verwendeten Blende ergibt sich der jeweils vom Ventilator geförderte Volumenstrom. Dadurch liegen rund 70 Messungen von Ventilator Kennlinien für unterschiedliche Einstellungen der Gebläse vor. Eine ähnliche Auswertung für das Gerät von Wöhler ist nicht möglich, weil dieses keine Möglichkeit zur kontinuierlichen Erfassung des Volumenstroms bietet.

Ein Beispiel für eine solche Auswertung zeigt Abbildung 3. Bei dieser Messung war das Gebläse so verstellt worden, dass der Differenzdruck an der Gebäudehülle von 60 Pa auf 32 Pa sank. Vermutlich aufgrund der mechanischen Trägheit des Ventilators dauert es eine kurze Zeit, bis dieser nach dem Verstellen auf der neuen Kennlinie läuft. Daher wurden die ersten Messpunkte mit noch höheren Volumenströmen jeweils von der Auswertung ausgenommen – im Beispiel waren dies die ersten drei (rechts in der Abbildung).

Abbildung 3 Beispiel für die Ermittlung einer Ventilator Kennlinie aus Messdaten eines Gebäudes

Die ersten 3 Messpunkte bei 53 Pa, 48 Pa und 45 Pa wurden nicht in die Auswertung einbezogen.



Für einen Ventilator und eine Blende gibt es aufgrund der variablen Antriebsspannung jeweils eine Schar von Kennlinien. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 4 wiedergegeben. Die Kennlinien verlaufen relativ flach. Die Werte der absoluten Steigung liegen hier im Bereich von $-0,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pa}$ bis $-11 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pa}$ und variieren somit um den Faktor 12.

Die für die Wartezeit relevanten Werte der relativen Steigung für diese Blende sind in Abbildung 5 zu sehen.

Die Auswertung aller Messungen an realen Gebäuden ergibt Werte der relativen Steigung s_0 von $-0,12 \text{ %}/\text{Pa}$ bis $-6,5 \text{ %}/\text{Pa}$. Der Mittelwert liegt bei $-0,7 \text{ %}/\text{Pa}$.

Da alle auswertbaren Messungen in insgesamt fünf Gebäuden durchgeführt wurden, sind die Ergebnisse nicht repräsentativ. Insbesondere wurden manche Blenden der Ventilatoren bei diesen Gebäuden nie benötigt.

Abbildung 4 Kennlinienschar für einen Ventilator und eine Blende

Die Messungen wurden an 2 Messterminen im gleichen Gebäude durchgeführt.

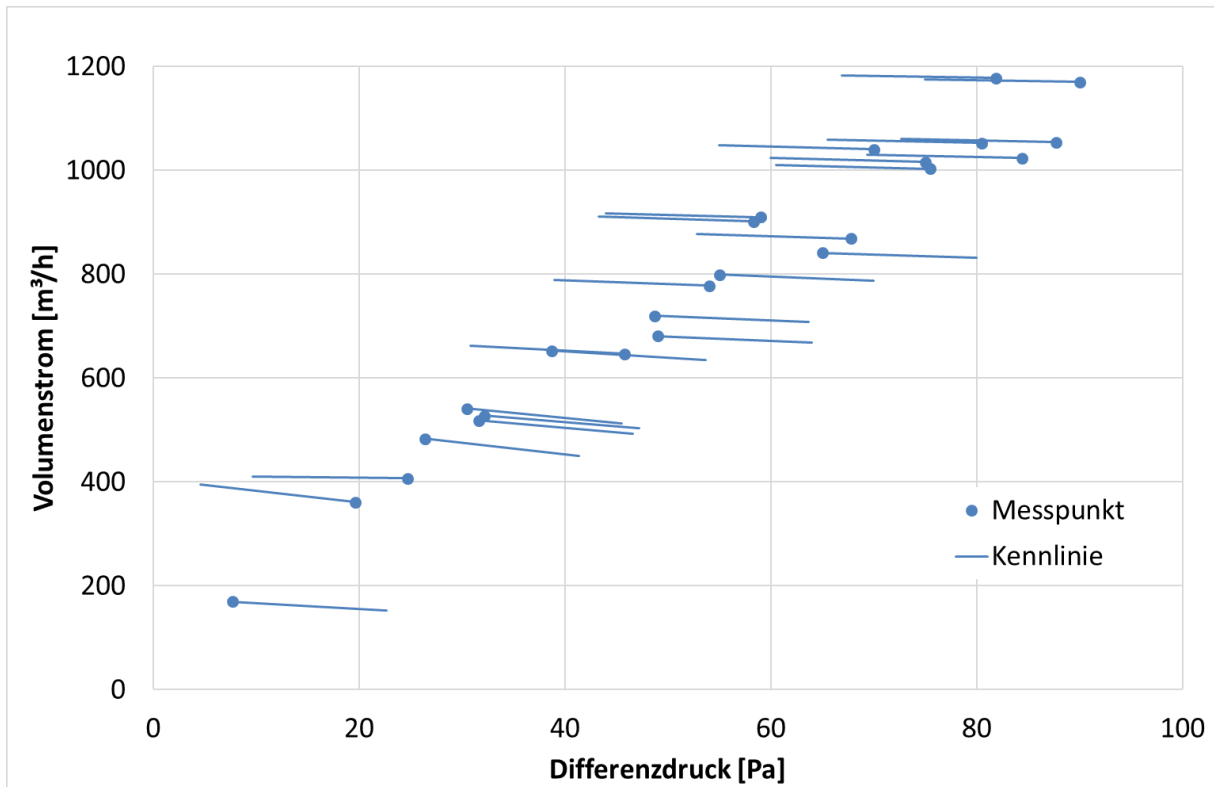
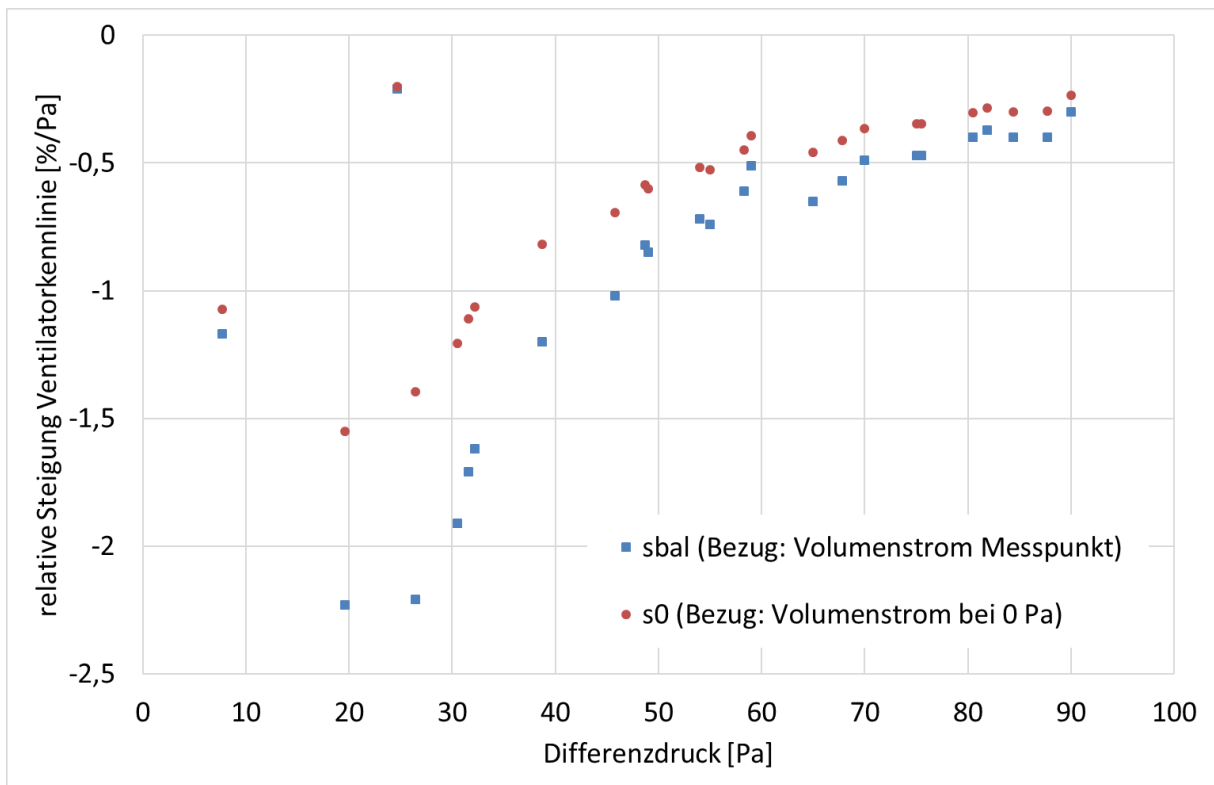


Abbildung 5 Relative Steigung für die Kennlinienschar aus der vorherigen Abbildung



5.2 Berechnung der erforderlichen Messdauer

5.2.1 Grundlage: Leckagegleichung des Gebäudes

Der Zusammenhang zwischen dem Differenzdruck an der Gebäudehülle und dem Volumenstrom durch Leckagen lässt sich durch die Leckagegleichung beschreiben [Charlesworth 1988]:

$$q(\Delta p) = q_{\Delta p} = C_L \cdot \Delta p^n \quad (4)$$

Bezieht man den Volumenstrom auf das Luftvolumen im Gebäude, erhält man:

$$n_{\Delta p} = \frac{C_L}{V} \cdot \Delta p^n$$

Für die Luftwechselraten bei verschiedenen Druckdifferenzen gilt:

$$\frac{n_{\Delta p 1}}{\Delta p_1^n} = \frac{n_{\Delta p 2}}{\Delta p_2^n} = \frac{n_{L50}}{(50 \text{ Pa})^n} \quad (5)$$

mit

$q_{\Delta p}$	Volumenstrom beim Differenzdruck Δp [m^3/s]
C_L	Leckagekoeffizient [$\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}^n$]
Δp	Differenzdruck [Pa]
n	Strömungsexponent [1]
$n_{\Delta p}$	Netto-Luftwechselrate beim Differenzdruck Δp [1/s]
V	Luftvolumen [m^3]
n_{L50}	Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa [1/s]

5.2.2 Maßgebliche Differentialgleichung unter Berücksichtigung der Ventilator Kennlinie

Die in [Zeller 2020] hergeleitete Gleichung (1) für einen idealisierten Ventilator mit konstantem Volumenstrom und unter Standardbedingungen innen und außen gilt auch für einen realen Ventilator. Zu beachten ist, dass der vom Ventilator geförderte Volumenstrom q_F beim realen Ventilator nicht konstant, sondern von der Druckdifferenz abhängig ist:

$$q_F = f(\Delta p)$$

Die triviale Lösung für Differentialgleichung (1) lautet:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = 0$$

Das heißt, der Druck ändert sich nicht. Dies ist der stationäre Zustand in dem ein Messpunkt erfasst werden kann. Der Differenzdruck für diesen Zustand wird als „Gleichgewichts-Differenzdruck“ benannt.

Im stationären Zustand folgt aus (1):

$$q_F(\Delta p_{bal}) = V \cdot \frac{n_{L50}}{(50 \text{ Pa})^n} \cdot \Delta p_{bal}^n =: q_{bal} \quad (6)$$

mit

Δp_{bal} Gleichgewichts-Differenzdruck [Pa]

q_{bal} Volumenstrom im stationären Zustand [m^3/s]

Definition Netto-Luftwechselrate im stationären Zustand n_{bal} :

$$n_{bal} := \frac{q_{bal}}{V}$$

Mit dieser Definition, (5) und (6) ergibt sich aus (1):

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[\frac{q_F(\Delta p)}{q_{bal}} - \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{bal}} \right)^n \right] \quad (7)$$

Die Näherungsgleichung für die Ventilator Kennlinie (3) eingesetzt ergibt:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[1 + s_{bal} \cdot (\Delta p - \Delta p_{bal}) - \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{bal}} \right)^n \right] \quad (8)$$

Lösungen für den zeitlichen Verlauf des Differenzdrucks an der Gebäudehülle erhält man also durch Lösung der Differentialgleichung (8).

Um die Abhängigkeit von der Luftwechselrate bei 50 Pa zu sehen, kann diese Gleichung auch umgeschrieben werden. Dazu wird eingesetzt:

$$n_{bal} = \frac{q_{bal}}{q_{50}} \cdot n_{L50} = \left(\frac{\Delta p_{bal}}{50 \text{ Pa}} \right)^n \cdot n_{L50}$$

Aus (7) wird dann:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{q_{bal}}{q_{50}} \cdot \frac{q_F(\Delta p)}{q_{bal}} - \left(\frac{\Delta p_{bal}}{50 \text{ Pa}} \right)^n \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{bal}} \right)^n \right]$$

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{q_F(\Delta p)}{q_{50}} - \left(\frac{\Delta p}{50 \text{ Pa}} \right)^n \right] \quad (9)$$

In dieser Form der Gleichung ist zu sehen, dass die Änderungsgeschwindigkeit des Differenzdrucks proportional zur Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa, n_{L50} , ist.

5.2.3 Näherungslösung

Definition Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck Δp^* :

$$\Delta p^* := \Delta p - \Delta p_{bal} \quad (10)$$

Die Druckabhängigkeit des Leckagestroms lässt sich durch eine Taylorreihenentwicklung beschreiben. Bricht man diese nach dem linearen Glied ab, erhält man:

$$\Delta p^n \approx \Delta p_{bal}^n + \Delta p^* \cdot n \cdot \Delta p_{bal}^{n-1} \quad (11)$$

Eingesetzt in (8) ergibt:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta p}{dt} &\approx p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[1 + s_{bal} \cdot \Delta p^* - \frac{\Delta p_{bal}^n + \Delta p^* \cdot n \cdot \Delta p_{bal}^{n-1}}{\Delta p_{bal}^n} \right] \\ \frac{d\Delta p^*}{dt} = \frac{d\Delta p}{dt} &\approx p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[1 + s_{bal} \cdot \Delta p^* - 1 - \frac{\Delta p^* \cdot n}{\Delta p_{bal}} \right] \\ \frac{d\Delta p^*}{dt} &\approx p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right] \cdot \Delta p^* \end{aligned} \quad (12)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist eine e-Funktion:

$$\Delta p^*(t) = \Delta p^*(0) \cdot e^{p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right] \cdot t} \quad (13)$$

$$\Delta p(t) = \Delta p_{bal} + \Delta p^*(0) \cdot e^{p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right] \cdot t} \quad (14)$$

Der zeitliche Verlauf der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck Δp^* entspricht dem Verhalten eines RC-Gliedes in der Elektrotechnik, der Schadstoffverdünnung in der Lüftungstechnik bzw. der Zerfallskurve eines radioaktiven Elements.

Es gilt:

$$\tau = - \frac{1}{p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right]} \quad (15)$$

$$t_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau \approx 0,69 \cdot \tau$$

$$t_p = \ln 40 \cdot \tau \approx 3,7 \cdot \tau$$

mit

τ	Zeitkonstante [s]
n_{bal}	Netto-Luftwechselrate im stationären Zustand [s^{-1}]
$t_{1/2}$	Halbwertszeit (s)
t_p	Wartezeit aufgrund der Dichteänderung [s]

Die Wartezeit ist dabei als die Dauer der Druckänderung von 20 Pa auf 0,5 Pa Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck definiert, analog zu Zeller 2020. Sie entspricht also einer Änderung der Abweichung um den Faktor 1/40.

Eine Berechnung der Wartezeit t_p für beliebige Parameter ist also auch ohne numerische Lösung der maßgeblichen Differentialgleichung nach der folgenden Formel möglich:

$$t_p = - \frac{\ln 40}{p \cdot \kappa \cdot n_{bal} \left[s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right]} \quad (16)$$

Diese Formel ist allerdings kaum geeignet, um bei einer realen Messung die Wartezeit auszurechnen, weil weder der Strömungsexponent n noch die für die jeweilige Einstellung des Ventilators maßgebliche Steigung der Ventilatorkennlinie s_{bal} bekannt sind. Man kann damit aber z.B. nach einer kompletten Messung prüfen, ob die Wartezeiten ausreichend waren. Auch kann man damit die Abhängigkeiten von verschiedenen Parametern relativ schnell ermitteln.

Analog zu oben lässt sich auch die Näherungslösung so beschreiben, dass die Abhängigkeit von der Luftwechselrate bei 50 Pa zu sehen ist. Dazu wird (11) in (9) eingesetzt:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta p}{dt} &\approx p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{q_F(\Delta p)}{q_{50}} - \frac{\Delta p_{bal}^n + \Delta p^* \cdot n \cdot \Delta p_{bal}^{n-1}}{(50Pa)^n} \right] \\ \frac{d\Delta p}{dt} &\approx p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{q_{bal} + S \cdot \Delta p^*}{q_{50}} - \frac{q_{bal}}{q_{50}} - \frac{\Delta p^* \cdot n \cdot \Delta p_{bal}^{n-1}}{(50Pa)^n} \right] \\ \frac{d\Delta p}{dt} &\approx p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right] \cdot \Delta p^* \end{aligned} \quad (17)$$

Die Lösungsfunktion lautet analog zu (13):

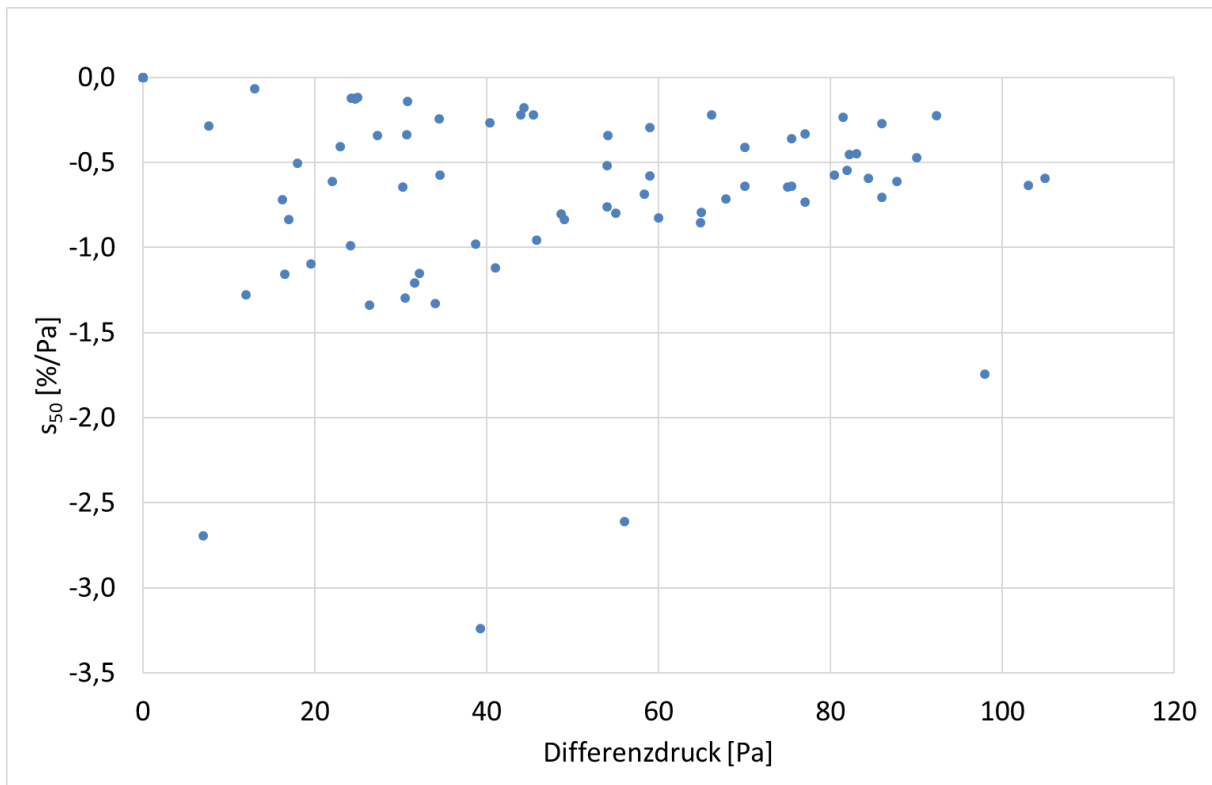
$$\Delta p^*(t) = \Delta p^*(0) \cdot e^{p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right] t} \quad (18)$$

Alternativ lässt sich die Wartezeit folgendermaßen beschreiben:

$$t_p = - \frac{\ln 40}{p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right]} \quad (19)$$

Die Steigung der Ventilatorkennlinie S ist nie positiv. Somit ist der Ausdruck in der eckigen Klammer der Gleichungen (12), (15), (16) und (19) immer negativ. Die Wartezeit ist umso größer, je kleiner der Betrag des Ausdrucks in der eckigen Klammer ist. Der ungünstigste Fall ist somit eine Steigung von $S=0$. Kürzere Wartezeiten ergeben sich für Fälle, in denen S kleiner Null ist.

Abbildung 6 Relative Steigung der Ventilator Kennlinie für die ausgewerteten Messungen



Durch Auswertung der in den Kapiteln 5.8 bis 5.10 beschriebenen Messungen wurde der typische Wertebereich für den Quotienten S/q_{50} ermittelt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6. Das Maximum beträgt $-0,07 \text{ %/Pa}$, das Minimum $-3,2 \text{ %/Pa}$, der Mittelwert liegt bei $-0,7 \text{ %/Pa}$. Für die Untersuchung von Varianten wurden deshalb die Werte $-0,1 \text{ %/Pa}$ und -1 %/Pa gewählt.

Hinweis: Der Volumenstrom q_{50} liegt nicht auf der Ventilator Kennlinie, sofern es sich nicht um die Kennlinie für die Messung bei 50 Pa handelt. Die Quotient S/q_{50} ist daher keine Kenngröße der Ventilator Kennlinie.

Trotzdem wird zur Vereinfachung der Darstellungen ein entsprechendes Symbol definiert:

$$s_{50} := \frac{S}{q_{50}}$$

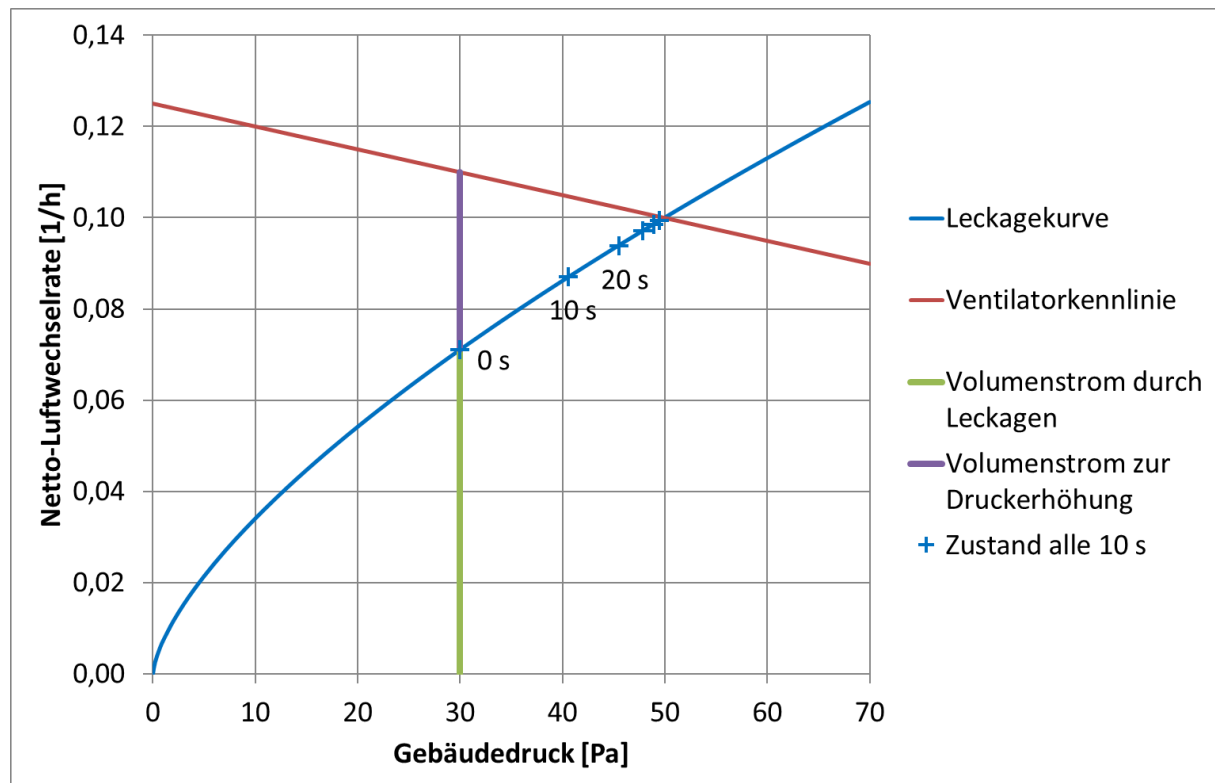
mit

s_{50} relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Leakagestrom des Gebäudes bei 50 Pa [1/Pa]

5.2.4 Erklärung für den Einfluss der Ventilator Kennlinie

Der Effekt der Steigung der Ventilator Kennlinie soll anhand von Abbildung 7 erklärt werden. Die Grafik entspricht weitgehend Abbildung 1. Beide Grafiken beruhen auf einem Gebäude entsprechend der Grundversion (4.3.1). Im Unterschied zu Abbildung 1 ist hier ein realistischer Ventilator mit einer relativen Steigung der Kennlinie von $s_{50} = -0,5 \text{ \%/Pa}$ rechnerisch angesetzt. Wie man sieht, steht beispielsweise bei einem Differenzdruck von 30 Pa eine Luftwechselrate von $0,04 \text{ h}^{-1}$ zur Druckerhöhung zur Verfügung (violetter Balken), also mehr als beim Beispiel in Abbildung 1. Dementsprechend erfolgt die Druckänderung schneller: nach 10 s sind hier schon 40,6 Pa erreicht im Vergleich zu 38,6 Pa bei der horizontalen Kennlinie nach Abbildung 1. Die Wartezeit wird durch die Steigung der Ventilator Kennlinie von 70 s auf 50 s verkürzt.

Abbildung 7 Leckagekurve eines Gebäudes und realistische Ventilator Kennlinie



5.2.5 Beispielrechnungen

Durch Beispielrechnungen wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die Wartezeit ermittelt. Zunächst wurden Varianten für eine horizontale Ventilator Kennlinie berechnet, dann welche mit fallender Kennlinie.

Für die Grundversion mit einer Netto-Luftwechselrate von $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$, einen idealisierten Ventilator mit $S = 0$ und für Strömungskoeffizienten n von 0,5 bis 1 wurden nach (19) Wartezeiten berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Punkte stellen die Berechnungsergebnisse dar. Für einzelne Messpunkte, z.B. für $n = 0,5$ und $\Delta p = 50 \text{ Pa}$, wurden außerdem die Wartezeiten durch numerische Lösung von (8) bzw. (9) berechnet, jeweils für steigenden und fallenden Differenzdruck. Die Ergebnisse sind ebenfalls als Punkte eingezeichnet. Der jeweils obere Punkt mit der längeren Wartezeit gilt dabei für fallenden Differenzdruck, der untere für steigenden. Man sieht, dass die Abweichungen zwischen der Näherungsgleichung und der genauen Berechnung gering sind. Der Unterschied zwischen Annäherung von unten und von oben ist allerdings nur mit der exakten Lösung zu ermitteln.

Abbildung 8 zeigt, dass die Wartezeit mit steigendem Differenzdruck an der Gebäudehülle und mit fallendem Strömungsexponenten steigt. Die Wartezeit für den ungünstigsten, allerdings auch selten vorkommenden Fall mit $n = 0,5$ und $\Delta p = 100\text{Pa}$ beträgt rund 130 s, die nicht dargestellte Wartezeit für die Grundversion mit $n = 0,67$ und $\Delta p = 50\text{Pa}$ dagegen nur 70 s.

Die Wartezeit nach der in 2.2 zitierten 7s-Regel ist in den Abbildungen als rot gestrichelte horizontale Linie dargestellt. Sie beträgt hier 70 s.

Bei realen Messungen werden Druckdifferenzen von minimal 10 Pa bis maximal 100 Pa eingestellt. Die Punkte bei 5 Pa wurden in die Grafik aufgenommen, damit der grundsätzliche Verlauf der Kurven besser sichtbar wird.

Abbildung 8 Wartezeit in Abhängigkeit vom Differenzdruck für eine Steigung der Ventilator Kennlinie von $S = 0$

Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$. Parameter: Strömungsexponent n

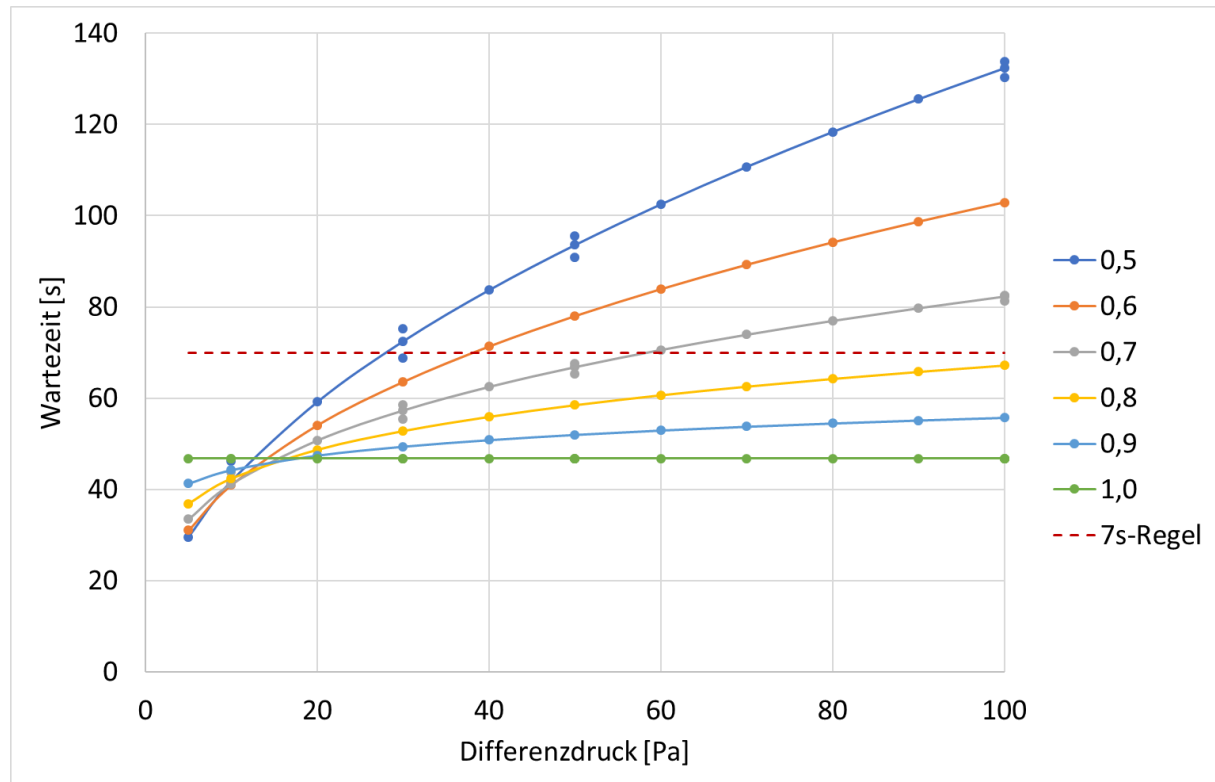


Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Wartezeiten für eine Steigung der Ventilator Kennlinien von $s_{50} = -0,1 \text{ %/Pa}$ bzw. -1 %/Pa . Für die flacheren Kennlinien in Abbildung 9 ergeben sich nur geringfügig kürzere Wartezeiten gegenüber dem idealisierten Ventilator in Abbildung 8. Bei einer Steigung von $s_{50} = -1 \text{ %/Pa}$ sind die Wartezeiten dagegen deutlich verkürzt (Abbildung 10).

Abbildung 9 Wartezeit in Abhängigkeit vom Differenzdruck für eine Steigung der Ventilator Kennlinie von $s_{50} = -0,1 \text{ \%}/\text{Pa}$

Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$. Parameter: Strömungsexponent n

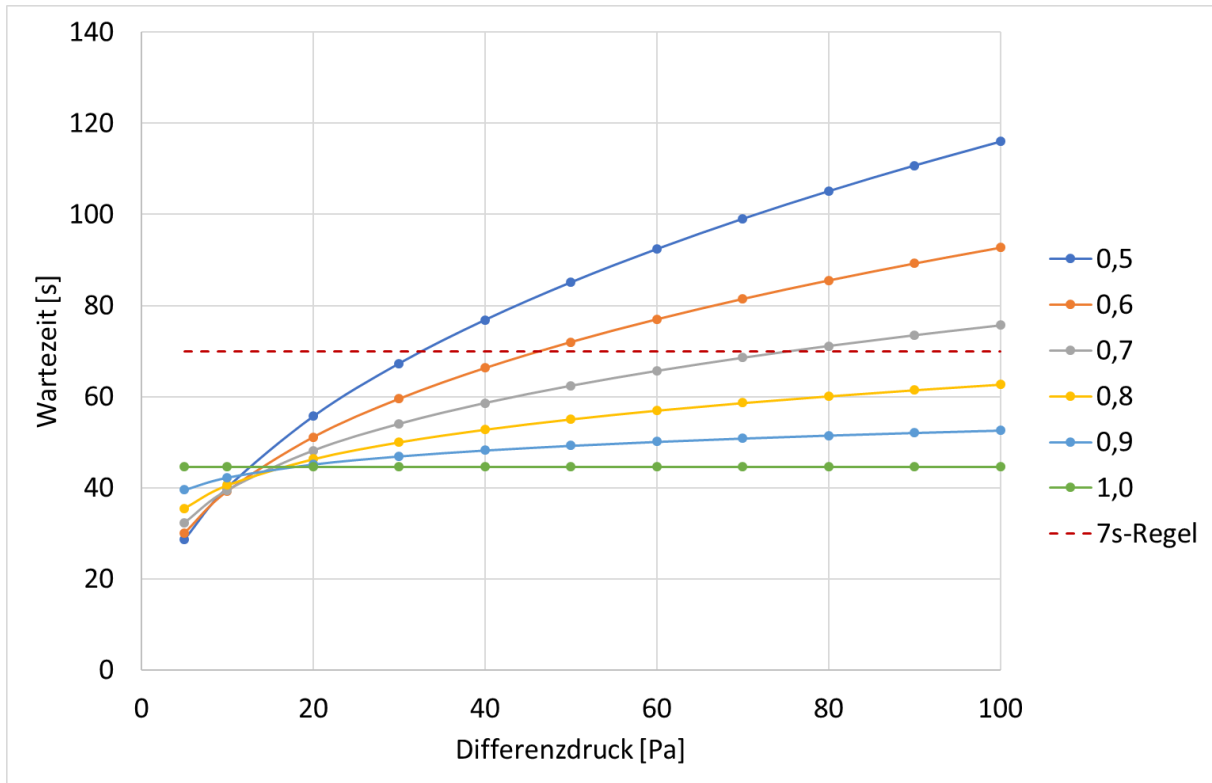
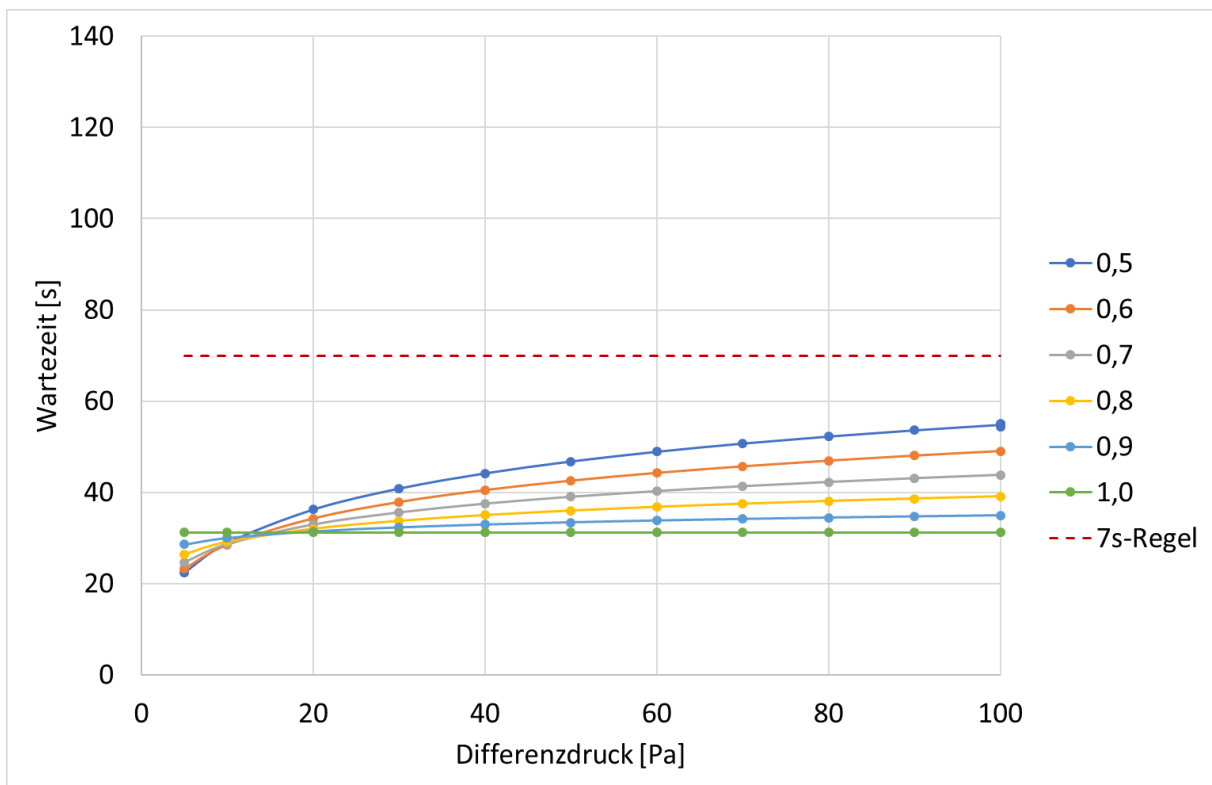


Abbildung 10 Wartezeit für eine Steigung der Ventilator Kennlinie von $s_{50} = -1 \text{ \%}/\text{Pa}$

Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$. Parameter: Strömungsexponent n



5.2.6 Fazit

Die Näherung des zeitlichen Verlaufs des Differenzdrucks durch eine e-Funktion führt zu Formel (19), mit der sich die Wartezeit berechnen lässt.

Bei näherer Betrachtung wird offensichtlich, dass die Wartezeit unter anderem vom Strömungsexponenten des Gebäudes abhängt, d.h. von einem Parameter, der erst nach der Aufnahme der gesamten Messreihe vorliegt. Auch die Steigung der Ventilator Kennlinie ist normalerweise vor der Messung nicht bekannt. Gleichung (19) ist daher in der Messpraxis allenfalls geeignet, um nach einer Messung zu prüfen, ob die Wartezeit ausreichend war.

Eine praxistauglichere Formel soll auf Basis der Auswertung der Messungen aufgestellt werden.

5.3 Abschätzung möglicher Messfehler

5.3.1 Genauigkeitsanforderungen für den Volumenstrom

Die aktuelle Messnorm DIN EN ISO 9972 fordert für das Differenzdruckmessgerät eine Genauigkeit von ± 1 Pa. Da eine unzureichende Wartezeit keinen statistischen, sondern einen systematischen Fehler verursacht, sollte der durch die Wartezeit verursachte Fehler kleiner sein. In [Zeller 2020] wurde die Wartezeit so definiert, dass der Betrag der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck maximal 0,5 Pa beträgt. Diese eher vorsichtige Festlegung soll in den folgenden Abschnitten hinterfragt werden.

Zunächst soll aus den Genauigkeitsanforderungen der Messnorm eine Anforderung an die durch die Wartezeit zu erreichende Genauigkeit hergeleitet werden.

Für die Volumenstrommessung fordert DIN EN ISO 9972 eine Genauigkeit des Messgerätes von ± 7 % des jeweiligen Messwertes. Manche Geräte haben nach Herstellerangaben sogar eine Genauigkeit von ± 5 %. Auch wird international in Fachkreisen darüber diskutiert, die Genauigkeitsanforderung der Norm auf ± 5 % zu verschärfen. Der Fehler durch die Wartezeit sollte diesen Fehler nur unwesentlich vergrößern.

Der Fehler durch die Wartezeit sollte bei einem Messgerät nach Norm kleiner als ± 5 % des gemessenen Volumenstroms sein, bzw. bei einem Messgerät mit einer Genauigkeit von ± 5 % nicht größer als $\pm 3,5$ %.

5.3.2 Fehlerfortpflanzungsgesetz: Genauigkeitsanforderungen für den Differenzdruck

Eine unzureichende Wartezeit führt zunächst zu einem Fehler beim Differenzdruck. Dieser kann in einen entsprechenden Fehler des Volumenstroms umgerechnet werden, so dass ein Vergleich auch mit der Genauigkeitsanforderung der Norm an die Volumenstrommessung möglich ist.

Die Leckage-Kennlinie eines Gebäudes lässt sich nach (4) beschreiben:

$$q(\Delta p) = C_L \cdot \Delta p^n \quad (20)$$

Der Fehler der Differenzdruckmessung wirkt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz auf den Fehler des Volumenstroms aus. Das Minuszeichen in den folgenden Gleichungen wurde eingesetzt, weil bei zu frühem Ablesen beispielsweise einem zu kleinen Wert des Differenzdrucks ein zu großer Wert des Volumenstroms zugeordnet wird.

$$e(q) = - \frac{dq(\Delta p)}{d\Delta p} \cdot e(\Delta p)$$

$$e(q) = -C_L \cdot n \cdot \Delta p^{n-1} \cdot e(\Delta p)$$

$$\frac{e(q)}{q} = -\frac{C_L \cdot n \cdot \Delta p^{n-1}}{C_L \cdot \Delta p^n} \cdot e(\Delta p)$$

$$\frac{e(q)}{q} = -n \cdot \frac{e(\Delta p)}{\Delta p}$$

(21)

mit

e(q) Fehler des Volumenstroms [m³/s]

e(Δp) Fehler des Differenzdrucks [Pa]

Der relative Fehler des Differenzdrucks verursacht also einen umso größeren relativen Fehler des Volumenstroms, je größer der Strömungsexponent n ist. Theoretisch kann dieser maximal den Wert 1 annehmen, bei realen Messungen liegen die Werte aber meist darunter.

Unter der Annahme eines Strömungsexponenten von 0,9 und mit dem Ziel eines maximalen Fehlers des Volumenstroms von ±3,5 %, darf der Fehler der Druckmessung demnach maximal ±3,9 % betragen. Dies entspricht bei einem Differenzdruck von 50 Pa einem maximalen Fehler von ±1,9 Pa.²

Luftdurchlässigkeitsmessungen werden für einen Differenzdruck von 50 Pa ausgewertet. Daher wirken sich die Messpunkte um 50 Pa besonders stark auf das Ergebnis aus. In Tabelle 3 ist der relative Fehler des Volumenstroms nach (21) für einen Messpunkt bei 50 Pa in Abhängigkeit vom Fehler des Differenzdrucks und vom Strömungsexponenten angegeben. Werte unter 3,5 % sind grün hinterlegt, Werte über 5 % rot, die dazwischen gelb.

Tabelle 3 Relativer Fehler des Volumenstroms allein aufgrund des Fehlers des Differenzdrucks

Fehler beim Druck		Strömungsexponent						
		0,5	0,6	0,67	0,7	0,8	0,9	1
Pa	%							
0,5	1,0%	0,5%	0,6%	0,7%	0,7%	0,8%	0,9%	1,0%
1	2,0%	1,0%	1,2%	1,3%	1,4%	1,6%	1,8%	2,0%
2	4,0%	2,0%	2,4%	2,7%	2,8%	3,2%	3,6%	4,0%
3	6,0%	3,0%	3,6%	4,0%	4,2%	4,8%	5,4%	6,0%
4	8,0%	4,0%	4,8%	5,4%	5,6%	6,4%	7,2%	8,0%
5	10,0%	5,0%	6,0%	6,7%	7,0%	8,0%	9,0%	10,0%

Diese Fehlerangaben gelten allerdings nur für Ventilator Kennlinien mit einer Steigung von annähernd 0,0 %, wie im übernächsten Abschnitt dargelegt wird. Zuvor wird geprüft, inwieweit diese Abschätzung anhand eines Messpunktes bei 50 Pa auf die gesamte Messreihe für ein Gebäude übertragbar ist.

² Dieser Wert ist größer als die Genauigkeitsanforderung der Norm an die Differenzdruckmessung (±1 Pa). Man erkennt daran, dass die Genauigkeitsanforderung der Norm an die Differenzdruckmessung im Vergleich zur Anforderung an die Volumenstrommessung unnötig streng ist.

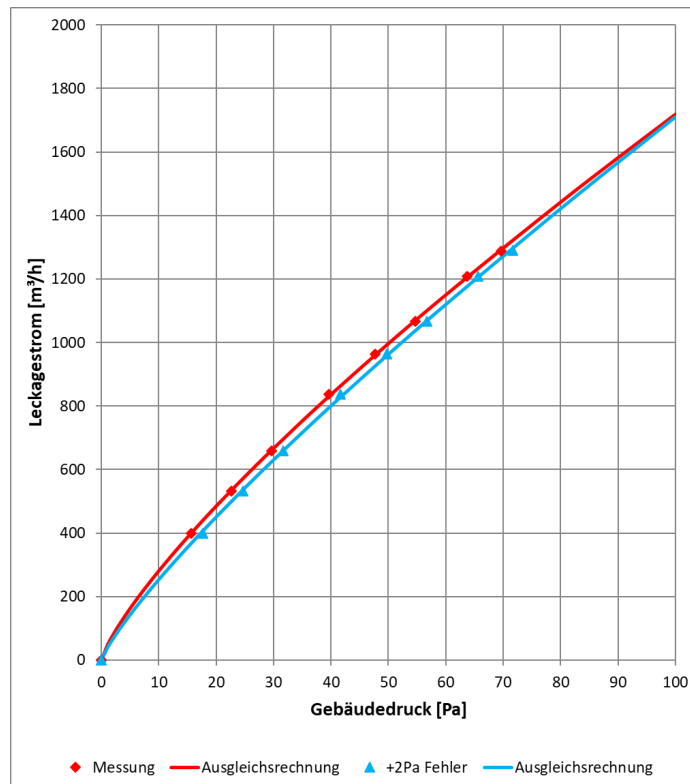
5.3.3 Test durch Auswertung vorliegender Gebäudemessungen mit einem Offset auf den Gebäuedruck

Die Aussage des letzten Abschnitts, wonach ein Fehler von $\pm 1,9$ Pa umgerechnet einen Fehler des Volumenstroms von maximal $\pm 3,5$ % ergibt, gilt für einen einzelnen Messpunkt bei 50 Pa. In diesem Abschnitt wird anhand von einzelnen Beispielen überprüft, ob diese Abschätzung auf die gesamte Messreihe einer Luftdurchlässigkeitsmessung übertragbar ist. Dazu wird ermittelt, welcher Fehler sich für den durch Ausgleichsrechnung ermittelten Volumenstrom bei 50 Pa ergibt, wenn alle Messpunkte einen Fehler von +2 Pa bzw. -2 Pa aufweisen.

Für Luftdurchlässigkeitsmessungen in drei Gebäuden, die in der Vergangenheit unabhängig von diesem Forschungsprojekt durchgeführt worden waren, wurde untersucht, wie sich ein Offset von +2 Pa bzw. -2 Pa bei allen Messpunkten auf das Ergebnis für das Gebäude auswirkt. Die Auswertung wurde jeweils für Unter- und Überdruck durchgeführt.

Im Mittel über diese insgesamt zwölf Auswertungen stimmt der Fehler durch den Druck-Offset gut mit dem nach (21) bzw. Tabelle 3 abgeschätzten Fehler überein. In einzelnen Fällen gab es Abweichungen, die Differenzen lagen unter 1 % des Messwerts.

Abbildung 11 Vergleich zwischen Messergebnissen und Ergebnissen bei einem Offset von 2 Pa



Als Beispiel ist in Abbildung 11 die Auswertung einer Unterdruckmessung eines kleinen Bürogebäudes wiedergegeben. Dargestellt sind die Messwerte (rote Rauten) und die daraus berechnete Gebäudekennlinie (rot) im Vergleich zu den um jeweils 2 Pa erhöhten Werten (blaue Dreiecke) und die so berechnete Gebäudekennlinie (blau). Der Offset würde einer zu frühen Messung bei fallender Druckdifferenz entsprechen.

Die reale Messkurve weist einen Strömungsexponenten von $n = 0,79$ auf. Die Abschätzung nach (21) ergibt einen Fehler des Volumenstroms und der Luftwechselrate bei 50 Pa von -3,1 %. Der Vergleich der Werte der blauen und der roten Kurve bei 50 Pa ergibt einen Fehler von -3,4 %.

Insgesamt erscheint die Abschätzung nach (21) bzw. Tabelle 3 geeignet, sofern nur der Einfluss eines Fehlers des Differenzdrucks zu berücksichtigen ist.

5.3.4 Einfluss der Ventilatorkennlinie auf den Fehler

Für die Berechnung in 5.3.2 war eine idealisierte, d.h. horizontale Ventilatorkennlinie angenommen worden. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich eine reale, d.h. fallende Ventilatorkennlinie auf den Fehler aufgrund einer unzureichenden Wartezeit auswirkt.

Wird der Ventilator größer gestellt und ein Messwert aufgenommen, bevor der Gleichgewichtsdifferenzdruck erreicht ist, wird ein zu kleiner Wert für den Differenzdruck und ein zu großer für den Volumenstrom gemessen. Der Fehler der Volumenstrommessung ist dabei umso größer, je steiler die Kennlinie des Ventilators verläuft.

Der zusätzliche Fehler der Volumenstrommessung lässt sich direkt aus der Steigung der Ventilatorkennlinie berechnen. Insgesamt ergibt sich:

$$\frac{e(q)}{q} = -n \cdot \frac{e(\Delta p)}{\Delta p} + s_{bal} \cdot e(\Delta p) \quad (22)$$

Für eine eher steile Ventilatorkennlinie mit $s_{bal} = -2 \text{ %/Pa}$ sind Berechnungsergebnisse für einen Messpunkt bei 50 Pa in Tabelle 4 wiedergegeben. Die Tabelle zeigt, dass für eine steile Ventilatorkennlinie die Fehlergrenze von 0,5 Pa durchaus angemessen ist.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Steigung der Ventilatorkennlinie einerseits die Wartezeit verringert (vgl. 5.2), andererseits den Fehler durch zu frühes Ablesen vergrößert.

Tabelle 4 Relativer Fehler des Volumenstroms aufgrund der Fehler des Differenzdrucks und des Volumenstroms für $s_{bal} = 2 \text{ %/Pa}$

Fehler beim Druck		Strömungsexponent						
		0,5	0,6	0,67	0,7	0,8	0,9	1
Pa	%							
0,5	1,0%	1,5%	1,6%	1,7%	1,7%	1,8%	1,9%	2,0%
1	2,0%	3,0%	3,2%	3,3%	3,4%	3,6%	3,8%	4,0%
2	4,0%	6,0%	6,4%	6,7%	6,8%	7,2%	7,6%	8,0%
3	6,0%	9,0%	9,6%	10,0%	10,2%	10,8%	11,4%	12,0%
4	8,0%	12,0%	12,8%	13,4%	13,6%	14,4%	15,2%	16,0%
5	10,0%	15,0%	16,0%	16,7%	17,0%	18,0%	19,0%	20,0%

5.3.5 Simulation des Messfehlers mittels eines berechneten Beispielgebäudes

Für ein Beispielgebäude wurden die Messpunkte einer idealisierten Messung berechnet. Dazu wurde für Messpunkte von 10 Pa bis 70 Pa jeweils der Volumenstrom nach der Formel für die Gebäudekennlinie (4) bzw. (20) berechnet. Folgende Annahmen liegen der Modellrechnung zu Grunde:

Gebäudevolumen 1000 m^3
 Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$

Strömungsexponent	$n = 0,67$
relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Leckagestrom bei 50 Pa	$s_{50} = -0,1 \text{ \%}/\text{Pa}$
Anfangsabweichung des Differenzdrucks: Ablesezeit	jeweils $\Delta p^* = -10 \text{ Pa}$ jeweils 15 s entsprechend 21% der 7s-Regel

Zur Simulation einer unzureichenden Wartezeit wurden mit der Näherung durch eine Exponentialfunktion nach (14) der Differenzdruck und der Volumenstrom nach jeweils 15 s, d.h. nach 21 % des Wertes nach der 7s-Regel, ermittelt. Zum Vergleich: Die Wartezeit nach der Näherungsformel (16) liegt zwischen 38 s bei 10 Pa und 73 s für den Messwert bei 70 Pa.

Für die so gewonnenen fehlerhaften Messpunkte wurde die Ausgleichsrechnung nach DIN EN ISO 9972, Abschnitt NC.2, durchgeführt und das Ergebnis mit dem exakten Ergebnis verglichen.

Abbildung 12 zeigt den Vergleich zwischen den exakten Werten der Gebäudekennlinie (rote Rauten) und den fehlerhaften Werten durch zu frühes Ablesen (blaue Dreiecke). Wegen der flachen Ventilator Kennlinie sind in erster Linie die Werte des Gebäudedrucks fehlerhaft, während die Abweichungen der Volumenströme sehr klein sind. Für den Volumenstrom bei 50 Pa bzw. die Luftwechselrate bei 50 Pa resultiert ein Fehler von +6,3 %.

Abbildung 12 Einfluss einer unzureichenden Wartezeit für $s_{50} = -0,1 \text{ \%}/\text{Pa}$

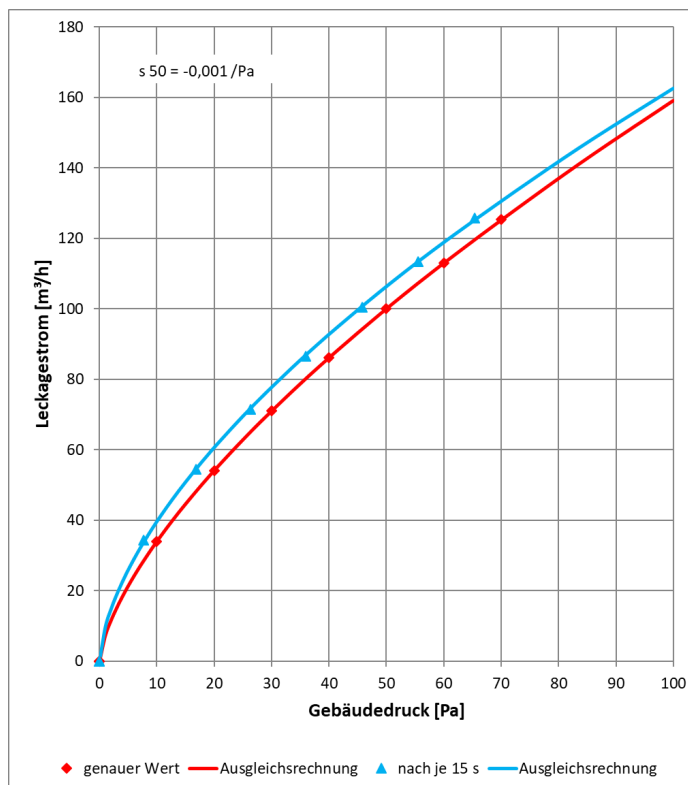
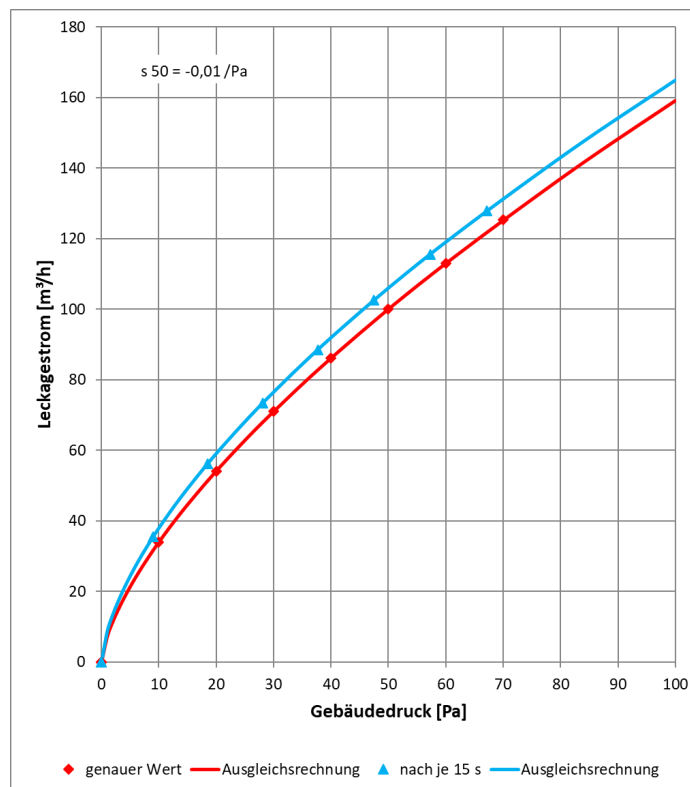


Abbildung 13 Einfluss einer unzureichenden Wartezeit für $s_{50} = -1 \text{ \%}/\text{Pa}$ 

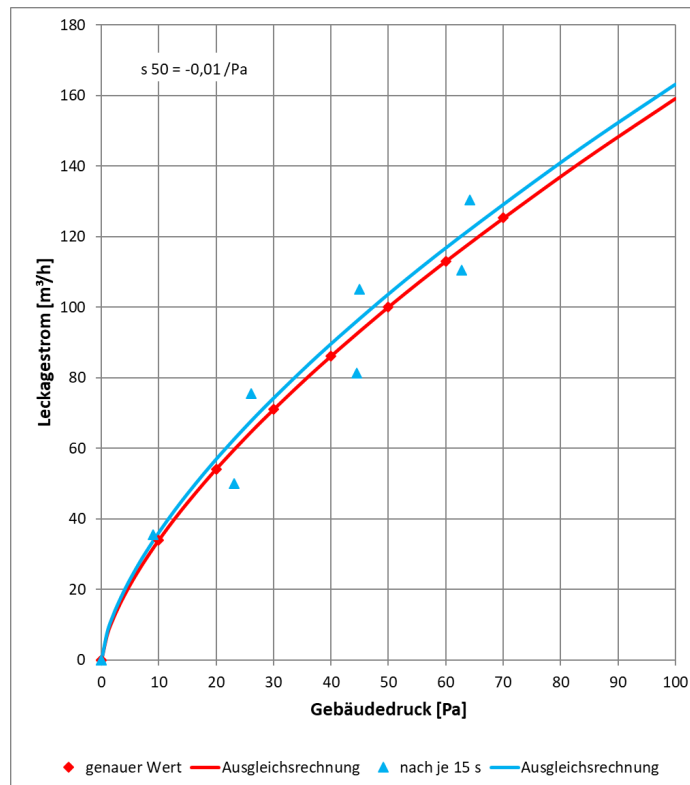
Anders verhält es sich im Falle einer eher steilen Ventilatorcharakteristik mit $s_{50} = 1 \text{ \%}/\text{Pa}$ (Abbildung 13). Hier weichen auch die Volumenströme bei den einzelnen Datenpunkten von den exakten Werten ab. Die Abweichungen der Werte für den Differenzdruck sind kleiner als beim ersten Beispiel, weil die Wartezeiten mit 23 s (bei 10 Pa) bis 45 s (bei 70 Pa) kleiner sind. Der resultierende Fehler für die Luftwechselrate bei 50 Pa beträgt bei diesem Beispiel +6,0 %.

Wie zu erwarten, führt eine unzureichende Wartezeit zu einem zu hohen Ergebnis für die Luftwechselrate bei 50 Pa. Wird der Ventilator zu Beginn der Messreihe auf den höchsten Wert eingestellt, und danach der Volumenstrom jeweils verkleinert, führt eine unzureichende Wartezeit zu einem zu kleinen Wert für die Luftwechselrate bei 50 Pa.

Eine sinnvolle Messstrategie besteht darin, die Messpunkte nicht monoton steigend oder fallend einzustellen, sondern beide Vorzeichen der Änderung anzuwenden. Für eine weitere Beispielrechnung wurde angenommen, dass der Gebäuedruck nacheinander auf die Werte 10, 30, 50, 70, 60, 40 und 20 Pa eingestellt wird. Auch in diesem Beispiel wird wieder eine Ablesezeit von 15 s angenommen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 14.

Im Vergleich zu Abbildung 13 fällt auf, dass die Datenpunkte stark streuen. Wie zu erwarten, liegen die Werte bei Erhöhung des Drucks oberhalb des korrekten Wertes, bei Verringerung des Drucks unterhalb. Die Fehler sind bei den meisten Datenpunkten (außer bei 10 Pa und 60 Pa) größer als in der vorherigen Abbildung. Das liegt daran, dass die Ventilatoreinstellung bei den meisten Schritten um 20 Pa und nicht nur um 10 Pa verstellt wurde. Trotz der größeren Einzelfehler ist der Fehler der Ausgleichskurve kleiner als beim vorhergehenden Beispiel. Der Fehler der Luftwechselrate bei 50 Pa beträgt hier +3,7 %.

Abbildung 14 Teilweise Erhöhung und teilweise Verringerung der Volumenströme



Der eigentliche Vorteil der hier simulierten Vorgehensweise liegt aber nicht nur im geringeren Gesamtfehler, sondern darin, dass die streuenden Datenpunkte während der Messung als Hinweis auf die unzureichende Wartezeit zu erkennen sind.

Anders als bei den hier vorgestellten Berechnungen ist es bei realen Messungen natürlich nicht möglich, ohne Nachregeln des Ventilators gezielt bestimmte Werte des Differenzdrucks anzufahren. Insofern ist das berechnete Beispiel sehr theoretisch. Trotzdem ist die grundsätzliche Vorgehensweise, die Drücke nicht von jedem Messpunkt zum nächsten zu erhöhen, sondern teilweise auch abzusenken, auch bei realen Messungen möglich.

Die Berechnungen in diesem Kapitel basieren auf der Annahme adiabatischer Verhältnisse. Weitere Berechnungen unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs zwischen Innenluft und Innenoberflächen werden am Ende des folgenden Kapitels unter 5.4.9 dargestellt. Zuvor wird im folgenden Abschnitt der Fehler anhand von Messdaten simuliert.

5.3.6 Simulation des Messfehlers mittels realer Messkurven

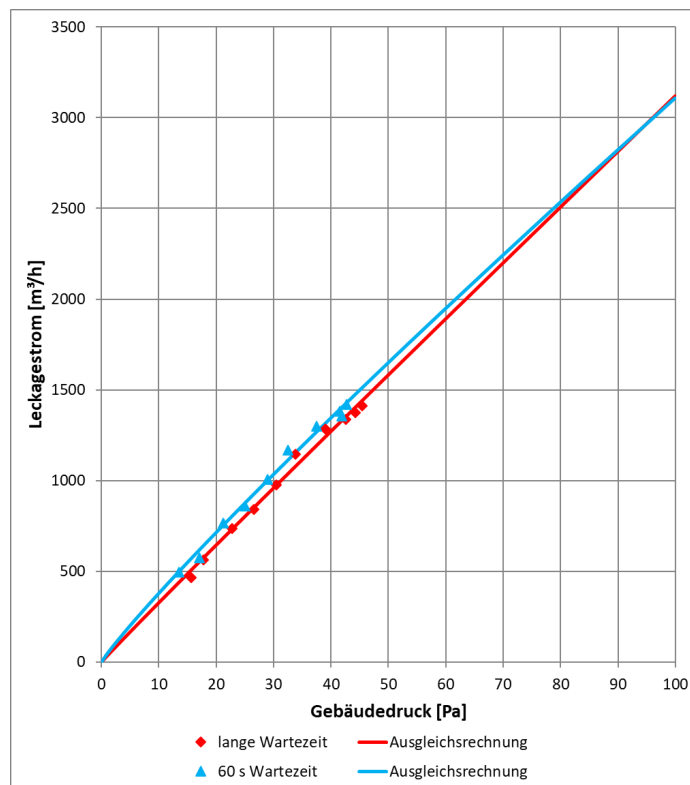
Für eine weitere Variante, den Fehler durch eine unzureichende Wartezeit zu ermitteln, wurden die Messdaten der in Abschnitt 5.11 beschriebenen Lagerhalle herangezogen. Die Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa beträgt bei dieser Halle $n_{L50} = 0,034 \text{ h}^{-1}$. Die Wartezeit nach der 7s-Regel beträgt demnach 206 s. Die Simulation war insofern einfach möglich, als bei der Messung der Ventilator von einem Messpunkt zum nächsten nicht einfach größer oder kleiner gestellt worden war. Vielmehr wurde der Ventilator nach jedem Messpunkt auf eine kleine Stufe gestellt, und dann wieder auf einen neuen Wert erhöht.

Die Auswertung erfolgte für eine angenommene Druckänderung um jeweils 10 Pa. Für jeden Messpunkt der Luftdurchlässigkeitsmessung wurde ab dem Erreichen einer Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck

von -10 Pa eine Zeitspanne von 60 s gewartet und anschließend für jeweils 10 s die Messdaten für Differenzdruck und Volumenstrom gemittelt. Die so gewonnenen Ergebnisse sind in Abbildung 15 als blaue Dreiecke dargestellt. Zum Vergleich sind die aus der Messung nach ausreichend langer Wartezeit ermittelten Messdaten (rote Rauten) ebenfalls abgebildet.

Die Ablesezeit von gemittelt 65 s ab einer Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck von -10 Pa entspricht umgerechnet auf eine Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck von -20 Pa einer Ablesezeit von 80 s, entsprechend 39 % des Wertes nach der 7s-Regel. Zum Vergleich: die Auswertung der Messdaten nach der exponentiellen Näherung nach (19) ergibt eine erforderliche Wartezeit von 107 s bis 136 s, im Mittel 126 s. Der resultierende Fehler der Luftwechselrate bei 50 Pa beträgt +4,3 %.

Abbildung 15 Vergleich von Messdaten für ausreichende und zu kurze Wartezeit



5.4 Adiabatische oder isotherme Verhältnisse?

5.4.1 Problemstellung

Die Dauer des Druckaufbaus hängt auch vom Wärmeübergang der Luft im Gebäude zu den Oberflächen im Gebäude ab.

Adiabatische Verhältnisse liegen vor, wenn es praktisch keinen Wärmeübergang zwischen Innenluft und Oberflächen gibt. Eine Erhöhung des Gebäudedrucks bewirkt eine Erhöhung der Lufttemperatur. Es gelten die Poissonschen Gleichungen. Der Zusammenhang zwischen Temperaturen und Drücken ist wie folgt:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (23)$$

mit

T_i Lufttemperatur [K]

p_i Luftdruck [Pa]

$\kappa=1,4$ Adiabatenkoeffizient (Isentropenexponent) für zweiatomige Gase [1]

Eine Erhöhung des Drucks um 50 Pa bewirkt daher eine Temperaturerhöhung um 0,04 K. Der Wärmeübergang zwischen Luft und den Oberflächen im untersuchten Volumen wirkt dieser Temperaturänderung entgegen. Annähernd adiabatische Verhältnisse liegen vor, wenn der Wärmeübergang so klein ist, dass innerhalb der Messzeit keine relevante Angleichung der Lufttemperatur an die Oberflächentemperatur erfolgt.

Isotherme Verhältnisse liegen vor, wenn sich die Temperatur der Innenluft nicht ändert. Der Adiabatenkoeffizient κ wird durch die Zahl 1 ersetzt. Isotherme Verhältnisse erwartet man, wenn es so viele Oberflächen im Raum gibt, dass sich die Lufttemperatur während der Messung nur unwesentlich ändert.

Zu klären ist, wann in der Messpraxis adiabatische bzw. isotherme Verhältnisse vorliegen, bzw. inwieweit reale Verhältnisse von den idealisierten Verhältnissen abweichen.

5.4.2 Grundlagen

Um die sich ändernde Luftmasse im Gebäude vorläufig nicht berücksichtigen zu müssen, werden zunächst Gleichungen für die spezifischen, d.h. auf die Luftmasse bezogenen Größen aufgestellt.

Beispiel:

$$v := \frac{V}{m}$$

Für die spezifische innere Energie u und die spezifische Enthalpie h eines idealen Gases gilt ohne Reibungsarbeit:

$$du = dq - p dv \tag{24}$$

$$du = c_v dT \tag{25}$$

$$dh = dq + v dp \tag{26}$$

$$dh = c_p dT \tag{27}$$

mit

v spezifisches Volumen [m^3/kg]

V Volumen [m^3]

m Masse [kg]

u spezifische innere Energie der Luft [J/kg]

q spezifische zugeführte Wärme [J/kg]

p Luftdruck [Pa]

c_v spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [J/(kg K)]

T Lufttemperatur [K]

h spezifische Enthalpie der Luft [J/kg]

c_p spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/(kg K)]

Die Enthalpieänderung kann aus der Änderung der inneren Energie berechnet werden. Aus (25) und (27) folgt:

$$dh = \frac{c_p}{c_v} du$$

$$dh = \kappa \cdot du \quad (28)$$

Für den Wärmeübergang zwischen Luft und Oberflächen gilt:

$$m \frac{dq}{dt} = -\alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (29)$$

mit

t	Zeit [s]
m	Masse der Luft im Gebäude [kg]
α	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]
A	Fläche der Oberflächen [m ²]
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Luft und Oberflächen [K]

Für den Massenstrom ins Gebäude gilt:

$$\dot{m} = \dot{m}_F(\Delta p) - k_L \cdot m_0 \cdot (\Delta p)^n \quad (30)$$

wobei

$$k_L := \frac{C_L}{V}$$

Näherung für den Massenstrom des Ventilators:

$$\dot{m}_F(\Delta p) = \dot{m}_{F0} + S_m \cdot \Delta p \quad (31)$$

mit

\dot{m}	Massenstrom ins Gebäude [m ³ /s]
$\dot{m}_F(\Delta p)$	vom Ventilator geförderter Massenstrom, differenzdruckabhängig [m ³ /s]
k_L	spezifischer Leckagekoeffizient [1/s/(Pa) ⁿ]
C_L	Leckagekoeffizient des Gebäudes [m ³ /s/(Pa) ⁿ]
V	Luftvolumen des Gebäudes [m ³]
m_0	Masse der Luft im Gebäude bei Differenzdruck 0 Pa [kg]
Δp	Differenzdruck [Pa]
n	Strömungsexponent [1]
\dot{m}_{F0}	vom Ventilator geförderter Massenstrom bei Differenzdruck 0 Pa [m ³ /s]
S_m	Steigung der Massenstrom-Ventilator Kennlinie [(kg/s)/Pa]

5.4.3 Herleitung der Differentialgleichungen

Zunächst wird die Änderung des Drucks im Gebäude dp/dt in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ΔT und der Druckdifferenz Δp berechnet:

Aus (26) folgt:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{v} \left(\frac{dh}{dt} - \frac{dq}{dt} \right)$$

(28) eingesetzt ergibt:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{v} \left(\kappa \cdot \frac{du}{dt} - \frac{dq}{dt} \right)$$

(24) eingesetzt ergibt:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{v} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dq}{dt} - p \frac{dv}{dt} \right) - \frac{dq}{dt} \right]$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{v} \left[-\kappa \cdot p \frac{dv}{dt} + (\kappa - 1) \frac{dq}{dt} \right]$$

Setzt man (29) ein und formt die Gleichung um, ergibt sich:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{m}{V} \left[-\kappa \cdot p \frac{d}{dt} \left(\frac{V}{m} \right) + (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{m} \cdot \Delta T \right) \right] \quad (32)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{m}{V} \cdot \kappa \cdot p \frac{-V}{m^2} \frac{dm}{dt} + \frac{m}{V} (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{m} \cdot \Delta T \right)$$

$$\frac{dp}{dt} = \kappa \cdot p \frac{\dot{m}}{m} + (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right)$$

Die Ableitung des Drucks ist gleich der Ableitung des Differenzdrucks zwischen innen und außen, sofern der Luftdruck außen konstant bleibt. Setzt man außerdem den Massenstrom ins Gebäude nach (30) und (31) ein, ergibt sich:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \frac{dp}{dt} = \frac{\kappa \cdot p}{m} [\dot{m}_{F0} + S_m \cdot \Delta p - k_L m_0 (\Delta p)^n] + (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right)$$

Da der absolute Luftdruck im Gebäude p fast proportional zur Luftmasse im Gebäude m ist, gilt:

$$\frac{p}{m} \approx \frac{p_0}{m_0}$$

somit

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \kappa \cdot p_0 \left(\frac{\dot{m}_{F0}}{m_0} + \frac{S_m}{m_0} \cdot \Delta p - k_L (\Delta p)^n \right) + (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right) \quad (33)$$

Analog wird die Temperaturänderung der Innenluft dT/dt in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ΔT und der Druckdifferenz Δp berechnet:

Aus (24) und (25) folgt:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_V} \left(-p \frac{dv}{dt} + \frac{dq}{dt} \right)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_V} \left[p \frac{V}{m^2} \dot{m} - \alpha \cdot \frac{A}{m} \cdot \Delta T \right]$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot c_V} \left[p \frac{\dot{m}}{m} - \alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right]$$

Da sich die Dichte der Innenluft nur unwesentlich ändert, gilt:

$$\rho \approx \rho_0$$

somit

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho_0 \cdot c_V} \left[p \frac{\dot{m}}{m} - \alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right]$$

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho_0 \cdot c_V} \left[p_0 \left(\frac{\dot{m}_{F0}}{m_0} + \frac{S_m}{m_0} \cdot \Delta p - k_L (\Delta p)^n \right) - \alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right]$$

(34)

mit

ρ Dichte der Innenluft [kg/m³]

ρ_0 Dichte der Innenluft zu Beginn der Messung [kg/m³]

(33) und (34) stellen ein System von Differentialgleichungen dar, mit denen die Änderung von Δp und ΔT in Abhängigkeit von Δp und ΔT beschrieben werden. Dieses Gleichungssystem kann numerisch gelöst werden. Für diese Arbeit wurde dazu das Runge-Kutta-Verfahren 2. Ordnung verwendet.

Als triviale Lösung ergibt sich der stationäre Zustand, in dem sich Differenzdruck und Lufttemperatur nicht ändern:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = 0$$

$$\frac{d\Delta T}{dt} = 0$$

Im stationären Zustand ist einerseits die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Oberflächen Null, andererseits ist die Summe aller Massenströme Null. Wie in 5.2.2 wird der Differenzdruck im stationären Zustand mit Δp_{bal} bezeichnet:

$$\Delta T = 0$$

$$\frac{\dot{m}_{F0}}{m_0} + \frac{S_m}{m_0} \cdot \Delta p_{bal} - k_L (\Delta p_{bal})^n = 0$$

mit

Δp_{bal} Gleichgewichts-Differenzdruck [Pa]

5.4.4 Näherungslösung

Analog zu der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Näherung für den Fall adiabatischer Verhältnisse kann auch für das Gleichungssystem (33) und (34) eine Näherungslösung angegeben werden. Dazu wird die Definition der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck Δp^* nach (10) und die Näherung für die Leckagegleichung nach der Taylorreihenentwicklung (11) verwendet:

$$\Delta p^* := \Delta p - \Delta p_{bal}$$

$$\Delta p^n \approx \Delta p_{bal}^n + \Delta p^* \cdot n \cdot \Delta p_{bal}^{n-1}$$

(33) wird damit zu:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta p^*}{dt} = \frac{d\Delta p}{dt} &= \kappa \cdot p_0 \left[\frac{\dot{m}_{bal}}{m_0} + \frac{S_m}{m_0} \cdot \Delta p^* - k_L (\Delta p_{bal}^n + \Delta p^* \cdot n \cdot \Delta p_{bal}^{n-1}) \right] + (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right) \\ \frac{d\Delta p^*}{dt} &= \kappa \cdot p_0 \left[n_{bal} + \frac{S_m}{m_0} \cdot \Delta p^* - n_{bal} - k_L \cdot \Delta p^* \cdot n \cdot \frac{\Delta p_{bal}^n}{\Delta p_{bal}} \right] + (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{V} \cdot \Delta T \right) \\ \frac{d\Delta p^*}{dt} &= \kappa \cdot p_0 \cdot n_{bal} \left(s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right) \cdot \Delta p^* + (\kappa - 1) \left(-\alpha \cdot \frac{A}{V} \right) \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (35)$$

Analog wird (34) zu:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{1}{\rho_0 \cdot c_V} \cdot p_0 \cdot n_{bal} \left(s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right) \cdot \Delta p^* + \frac{1}{\rho_0 \cdot c_V} \left(-\alpha \cdot \frac{A}{V} \right) \cdot \Delta T \quad (36)$$

mit

Δp^*	Abweichung vom Gleichgewichts-Differenzdruck [Pa]
\dot{m}_{bal}	Massenstrom im stationären Zustand [kg/s]
n_{bal}	Luftwechselrate im stationären Zustand [1/s]
s_{bal}	relative Steigung der Ventilator Kennlinie bezogen auf den Massenstrom beim Gleichgewichts-Differenzdruck [1/Pa]

Zur besseren Übersichtlichkeit der nachfolgenden Gleichungen werden Abkürzungen verwendet:

$$G := -\kappa \cdot p_0 \cdot n_{bal} \left(s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right) \quad (37)$$

$$H := \frac{\alpha}{\rho_0 \cdot c_V} \cdot \frac{A}{V} \quad (38)$$

mit

G	Abklingkonstante adiabatische Druckänderung [1/s]
H	Abklingkonstante isochore Temperaturänderung [1/s]

G ist der Kehrwert der Zeitkonstanten τ für die adiabatische Näherung der Druckänderung (vgl. Gleichung (3) in Abschnitt 5.2.3). Analog dazu ist H der Kehrwert der Zeitkonstanten für die Angleichung der Lufttemperatur an die Oberflächentemperatur für den isochoren Fall (Volumen konstant).

Die Gleichungen (35) und (36) werden damit zu:

$$\frac{d\Delta p^*}{dt} = -G \cdot \Delta p^* - (\kappa - 1) \cdot \rho_0 \cdot c_V \cdot H \cdot \Delta T \quad (39)$$

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -\frac{G}{\kappa \cdot \rho_0 \cdot c_V} \cdot \Delta p^* - H \cdot \Delta T \quad (40)$$

Die Gleichungen (35) und (36) bzw. (39) und (40) stellen ein homogenes lineares System von Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten dar [Walter1976]. Lösungen haben die Form:

$$\Delta p^*(t) = \Delta p^*_{0,1} \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + \Delta p^*_{0,2} \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} \quad (41)$$

$$\Delta T(t) = \Delta T_{0,1} \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + \Delta T_{0,2} \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} \quad (42)$$

mit

$\Delta p^*_{0,i}$ konstanter Faktor [Pa]

λ_i Eigenwert des Differentialgleichungssystems, Abklingkonstante [1/s]

$\Delta T_{0,i}$ konstanter Faktor [K]

Für die Eigenwerte λ gilt in Matrixschreibweise:

$$\begin{vmatrix} -G - \lambda & -(\kappa - 1) \cdot \rho_0 \cdot c_V \cdot H \\ \frac{G}{\kappa \cdot \rho_0 \cdot c_V} & -H - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Daraus folgt:

$$(-G - \lambda) \cdot (-H - \lambda) - \left(-\frac{G}{\kappa \cdot \rho_0 \cdot c_V} \right) \cdot (-(\kappa - 1) \cdot \rho_0 \cdot c_V \cdot H) = 0$$

$$\lambda^2 + \lambda(G + H) + G \cdot H - \frac{(\kappa - 1)}{\kappa} \cdot G \cdot H = 0$$

$$\lambda^2 + \lambda(G + H) + \frac{1}{\kappa} \cdot G \cdot H = 0$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2}(G + H) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(G + H)^2 - \frac{1}{\kappa} \cdot G \cdot H}$$

(43)

Die Eigenwerte λ_1 und λ_2 sind immer negativ. Für sie gilt:

$$\lambda_1 + \lambda_2 = -(G + H)$$

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 = \frac{1}{\kappa} G \cdot H$$

(44)

Zu jedem der beiden Eigenwerte existieren Eigenvektoren, d.h. Lösungen des Differentialgleichungssystems, bei denen in (41) und (42) jeweils nur ein Summand auftritt. Bei diesen Lösungen bleibt das Verhältnis $\Delta T/\Delta p^*$ im zeitlichen Verlauf konstant. Diese Lösungen können z.B. aus (39) und (41) berechnet werden:

$$\frac{d\Delta p^*}{dt} = -G \cdot \Delta p^* - (\kappa - 1) \cdot \rho_0 \cdot c_V \cdot H \cdot \Delta T = \lambda_i \cdot \Delta p^*$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta p^*} = \frac{-\lambda_i - G}{(\kappa - 1) \cdot \rho_0 \cdot c_V \cdot H} =: c_i$$

(45)

mit

c_i Verhältnis der Temperaturdifferenz zur Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck [K/Pa]

Die Lösung des Anfangswertproblems bei vorgegebenen Werten für Δp^*_0 und ΔT_0 ergibt sich aus (45) und den folgenden Zusammenhängen:

$$\Delta p^*_{0,1} + \Delta p^*_{0,2} = \Delta p^*_0$$

$$\Delta T_{0,1} + \Delta T_{0,2} = \Delta T_0$$

Daraus folgt:

$$\Delta p^*_{0,1} = \frac{\Delta T_0 - c_2 \cdot \Delta p^*_0}{c_1 - c_2}$$

$$\Delta p^*_{0,2} = \Delta p^*_0 - \Delta p^*_{0,1}$$

$$\Delta T_{0,1} = c_1 \cdot \Delta p^*_{0,1}$$

$$\Delta T_{0,2} = c_2 \cdot \Delta p^*_{0,2}$$

mit

Δp^*_0 Anfangs-Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck [Pa]

ΔT_0 Anfangswert der Temperaturdifferenz [K]

5.4.5 Spezialfälle

$G \gg H$

Ist die Abklingkonstante für die Druckänderung G wesentlich größer als die für die Temperaturänderung H , wird (43) zu:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2}(G + H) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(G + H)^2 - \frac{1}{\kappa} \cdot G \cdot H}$$

$$\lambda_1 \approx -\frac{1}{2}(G) - \sqrt{\frac{1}{4}(G)^2} = -G = \kappa \cdot p_0 \cdot n_{bal} \left(s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right)$$

Aus (44) folgt:

$$\lambda_2 = \frac{G \cdot H}{\lambda_1 \cdot \kappa} = -\frac{1}{\kappa} H = -\frac{\alpha}{\rho_0 \cdot c_v \cdot \kappa} \cdot \frac{A}{V} = -\frac{\alpha}{\rho_0 \cdot c_p} \cdot \frac{A}{V}$$

Der erste Eigenwert λ_1 entspricht somit der Abklingkonstanten für die adiabatische Druckänderung G , der zweite dem Wert für die isobare Temperaturänderung. Dieser Fall trifft für große Werte der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa zu.

H >> G

Dieser Fall gilt für extrem kleine Werte der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa, dürfte also wenig praxisrelevant sein. Die analoge Berechnung zu oben ergibt:

$$\lambda_1 \approx -\frac{1}{2}(H) - \sqrt{\frac{1}{4}(H)^2} = -H$$

$$\lambda_2 = \frac{G \cdot H}{\lambda_1 \cdot \kappa} = -\frac{1}{\kappa} G = p_0 \cdot n_{bal} \left(s_{bal} - \frac{n}{\Delta p_{bal}} \right)$$

Der erste Eigenwert λ_1 entspricht somit der Abklingkonstanten für die isochore Temperaturänderung H , der zweite Eigenwert λ_2 entspricht der Abklingkonstanten für die isotherme Druckänderung.

G = H

Hier gilt nach (43):

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2}(G + G) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(G + G)^2 - \frac{1}{\kappa} \cdot G \cdot G}$$

$$\lambda_{1,2} = -G \pm \sqrt{G^2 - \frac{1}{\kappa} \cdot G^2}$$

$$\lambda_{1,2} = -\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{\kappa}} \right) \cdot G$$

$$\lambda_1 \approx -1,535 G$$

$$\lambda_2 \approx -0,465 G$$

Beispiel:

Oberflächen-Volumenverhältnis	$A/V = 2,5 \text{ m}^{-1}$
Abklingkonstante	$H = 0,0073 \text{ s}^{-1}$
Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa	$n_{L50} = 0,014 \text{ h}^{-1}$
Abklingkonstante	$G = 0,0074 \text{ s}^{-1}$
Eigenwerte	$-0,011 \text{ s}^{-1}$
	$-0,0034 \text{ s}^{-1}$
Wartezeit	883 s

Die sonstigen Parameter entsprechen der Grundversion.

5.4.6 Abschätzung der Stärke des Wärmeübergangs

Die in den Gleichungen (33) und (34) enthaltene maßgebliche Größe für den Wärmeübergang ist das Produkt aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α und dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis A/V . Beide Werte können für ein reales Gebäude nicht problemlos angegeben werden.

Der Wärmeübergangskoeffizient hängt vor allem von der Luftbewegung im Gebäude ab. Gerade bei einem sehr dichten Gebäude ist diese trotz des laufenden Gebläses eher schwach. Für die rechnerischen Abschätzungen in diesem Projekt wird deshalb der eher niedrige Wert von $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ angesetzt.

Maßgeblich für das Oberflächen-Volumen-Verhältnis sind alle an Innenluft angrenzenden Oberflächen, also Innenoberflächen der Außenbauteile, Oberflächen von Innenwänden und Zwischendecken, aber auch die Oberflächen von Möbeln, gelagerten Gegenständen, Maschinen usw. Gesondert zu betrachten sind Oberflächen, die nur schwach an die Raumluft angekoppelt sind, z.B. die Innenoberflächen von Möbeln, die Oberflächen von porösen, luftgefüllten Materialien (z.B. Schalldämmmaterial in Leichtbau-Innenwänden). Diese Oberflächen dürfen nicht ohne Weiteres zur gesamten Oberfläche addiert werden, weil nur die Luft im entsprechenden Möbelstück bzw. die in der entsprechenden Leichtbauwand ihre Temperatur an diese Oberflächen angleicht.

Für das Niedrigenergiehaus (vgl. 5.8) wurde versucht, das maßgebliche Oberflächen-Volumen-Verhältnis zu berechnen. Die Innenoberflächen der Außenbauteile ergeben einen Beitrag zu A/V von etwa $1,0 \text{ m}^{-1}$, die Innenbauteile einen Beitrag von $1,2 \text{ m}^{-1}$ und die Einrichtungsgegenstände einen Beitrag von etwa $0,3 \text{ m}^{-1}$. Hinzu kommt, dass gut 10 % des Luftvolumens im Inneren von Leichtbauwänden, Installationsebene und Möbeln liegen. Der Beitrag dieser Hohlräume zu einem äquivalenten Oberflächen-Volumen-Verhältnis wurde mit $0,2 \text{ m}^{-1}$ bis $0,6 \text{ m}^{-1}$ geschätzt. A/V beträgt somit insgesamt rund $2,4 \text{ m}^{-1}$ bis $3,0 \text{ m}^{-1}$.

Die analoge Berechnung für die CO_2 -Box ergab aufgrund der Außenbauteile $A/V = 0,63 \text{ m}^{-1}$. Dazu kommt, dass die Box vor der Messung nicht ganz geleert worden war, sondern dass auf dem Boden eine rund 30 cm dicke Schüttung aus Betonschotter lag. Der Beitrag der Hohlräume dazwischen zu einem äquivalenten Oberflächen-Volumenverhältnis wurde zu $0,3 \text{ m}^{-1}$ geschätzt, so dass sich insgesamt ein Rechenwert von $A/V = 0,93 \text{ m}^{-1}$ ergibt.

5.4.7 Beispielrechnung für die Grundversion

Für die Berechnungen werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Temperatur aller Oberflächen im Gebäude gleich und konstant, entsprechend einer unendlich großen Wärmekapazität der Oberflächen,
- zu Beginn der Messung für den jeweiligen Messpunkt keine Temperaturdifferenz zwischen Innenluft und den Oberflächen.

Zunächst wird ein Gebäude entsprechend der in 4.3 definierten Grundversion betrachtet. Zusätzlich werden folgende Parameter angenommen:

Dichte der Luft $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 2,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

Oberflächen-Volumenverhältnis $A/V = 1 \text{ m}^{-1}$

Anfangstemperaturdifferenz $\Delta T_0 = 0 \text{ K}$

Die Grafiken Abbildung 16 bis Abbildung 18 zeigen jeweils den nach dem Gleichungssystem (33) und (34) berechneten zeitlichen Verlauf (violette, lang gestrichelte Linie) im Vergleich zum Verlauf für adiabatische Verhältnisse (rot gestrichelt) bzw. für isotherme Verhältnisse (blaue Punkte). Ebenfalls dargestellt ist das jeweilige Ergebnis der Näherungsrechnung nach 5.4.4 (dünne schwarze Linie).

Mit Berücksichtigung des Wärmeübergangs zwischen der Innenluft und den Oberflächen (violett, lang gestrichelt) verläuft der Differenzdruck an der Gebäudehülle zunächst fast gleich wie bei der adiabatischen Variante (Abbildung 16). Mit zunehmender Zeit nähert sich der Differenzdruck aber langsamer an den Gleichgewichtszustand an – sogar langsamer, als bei der isothermen Variante.

Besser sind die Verhältnisse in Abbildung 17 zu erkennen. Dort ist als Ordinate die Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck in einer logarithmischen Skala dargestellt. Die Kurven für adiabatische und isotherme Verhältnisse sind annähernd Geraden. Die mit Berücksichtigung des Wärmeübergangs berechnete Kurve (violett, lang gestrichelt) verläuft links in der Grafik annähernd entlang der Geraden für adiabatische Verhältnisse, rechts im Bild ist sie eine nur leicht fallende Gerade.

Die Erklärung dafür liefert der in Abbildung 18 dargestellte zeitliche Verlauf der Temperaturdifferenz. Zu Beginn der Messung wird eine Temperaturdifferenz von Null angesetzt. Durch das Sinken des Luftdrucks im Gebäude sinkt auch die Innentemperatur – die Temperaturdifferenz wird negativ. Mit steigendem Betrag der Temperaturdifferenz nimmt die Wärmeübertragung von den Oberflächen zur Innenluft zu – die Innentemperatur fällt immer langsamer. Nach 64 s erreicht sie ein Minimum (violetter Kreis links in den Grafiken). Im weiteren Verlauf steigt die Temperaturdifferenz zunächst immer stärker, danach immer weniger. Der Wendepunkt dazwischen ist in den Grafiken ebenfalls mit einem violetten Kreis markiert. Nach dem Wendepunkt erfolgt die Angleichung an den Gleichgewichtszustand extrem langsam (Abbildung 17, violetter Kreis rechts).

Alle drei Grafiken zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen der Näherung und der numerischen Lösung der Differentialgleichungen. Die wesentlichen Parameter der Näherungsrechnung für die Grundversion sind:

$$G = 0,0528 \text{ s}^{-1}$$

$$H = 0,0029 \text{ s}^{-1}$$

$$H/k = 0,0021 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_1 = -0,0537 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_2 = -0,0020 \text{ s}^{-1}$$

Die Abklingkonstante für die adiabatische Druckänderung G ist hier rund 18 mal so groß wie die Abklingkonstante für die isochore Temperaturänderung H . Damit ist der Spezialfall $G \gg H$ nach 5.4.5 einigermaßen gegeben. Dementsprechend liegen die beiden Eigenwerte λ_i nahe an den Werten G und H/k .

Abbildung 16 Zeitlicher Verlauf des Differenzdrucks für die Grundversion

Dargestellt ist der Differenzdruck zwischen innen und außen.

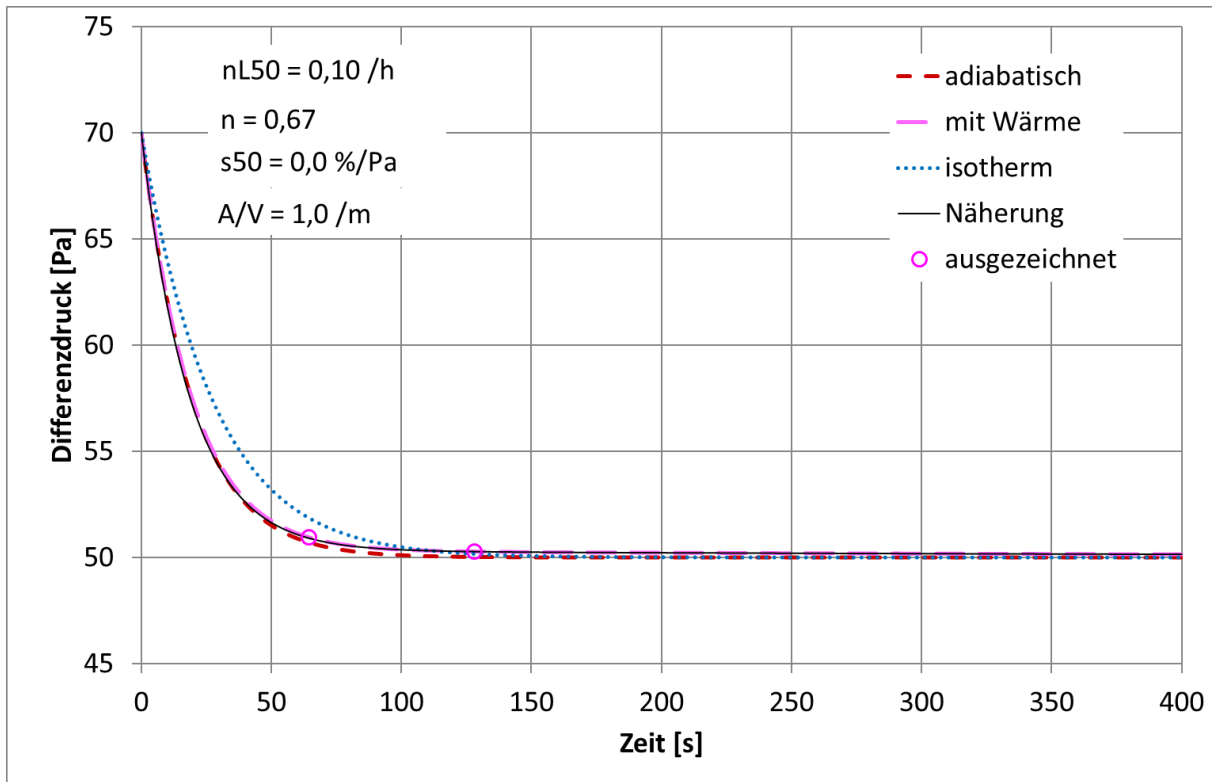


Abbildung 17 Zeitlicher Verlauf der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck im logarithmischen Maßstab

Dargestellt ist die Differenz zwischen dem Differenzdruck (Abbildung 16) und dem Gleichgewichtsdifferenzdruck (50 Pa).

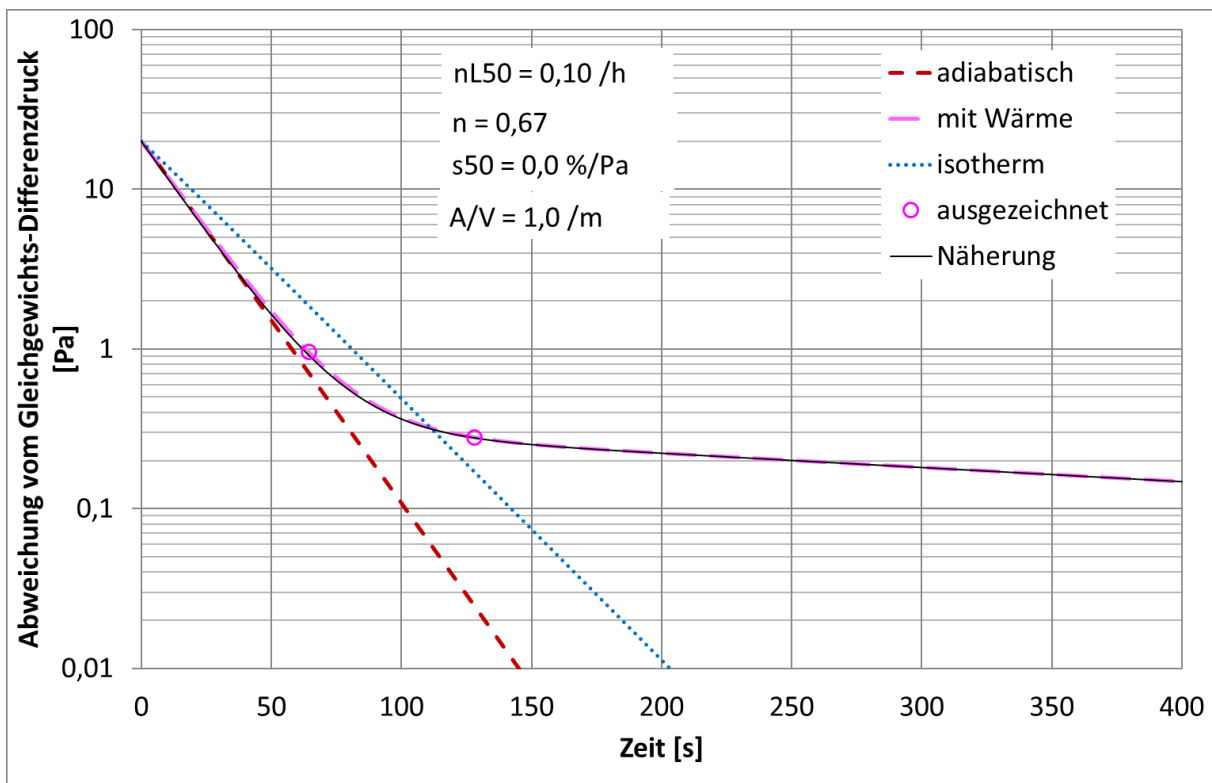
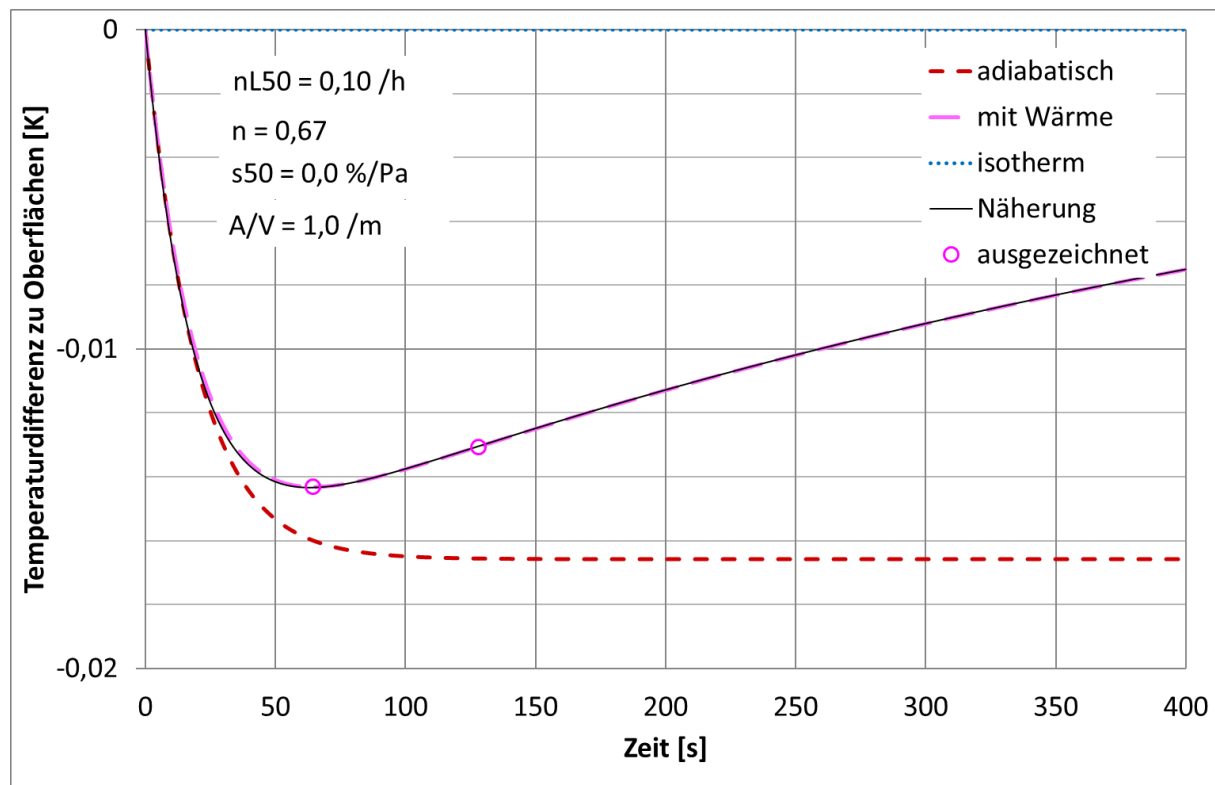


Abbildung 18 Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenz für die Grundversion

Dargestellt ist die Differenz zwischen der Innenlufttemperatur und der Oberflächentemperatur.



Die Wartezeit bis zu einer Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck von 0,5 Pa beträgt bei der Variante mit Wärmeübergang 85 s (in den Grafiken nicht markiert) und liegt somit zwischen den Werten von 71 s für adiabatische Verhältnisse und 100 s für isotherme Verhältnisse. Die rechts in den Grafiken zu sehende, extrem langsame Angleichung des Differenzdrucks an den Gleichgewichtsdifferenzdruck ist bei diesem Beispiel also wenig relevant. Das liegt daran, dass die Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck am Wendepunkt der Temperaturkurve mit 0,28 Pa (Abbildung 17, pinkfarbener Kreis rechts) schon deutlich unter dem Zielwert von 0,5 Pa liegt. Bei anderen Beispielen kann das anders sein. Durch weitere Beispielrechnungen soll deshalb geklärt werden, in welchen Fällen besonders große Wartezeiten entstehen.

5.4.8 Beispielrechnungen von Varianten

Ausgehend von der Grundversion wurde für die weiteren Berechnungen jeweils ein Parameter variiert, die anderen entsprechen der Grundversion.

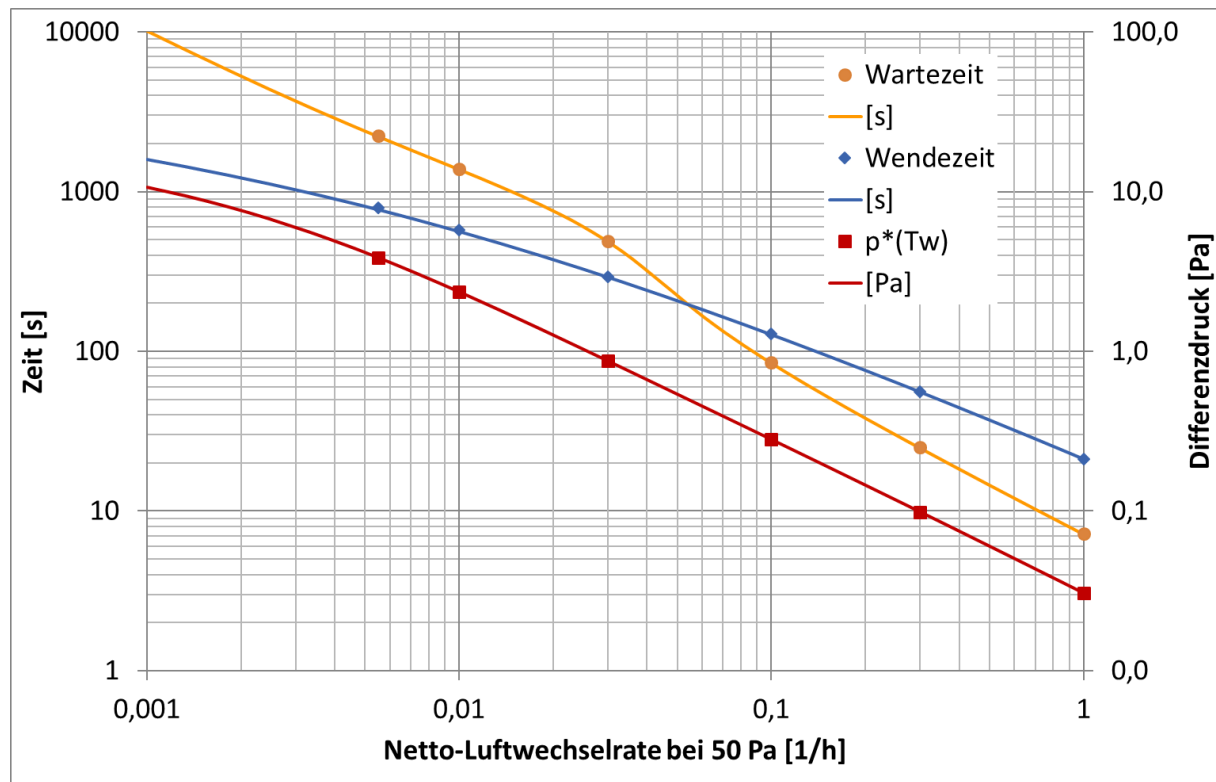
Die Ergebnisse sind in den Grafiken ab Abbildung 19 wiedergegeben. Die berechneten Werte der Wartezeit sind jeweils mit orangefarbenen Punkten dargestellt. Blaue Rauten zeigen die Dauer bis zum Wendepunkt des Temperaturverlaufs (in der Legende mit „Wendezeit“ bezeichnet). Durch rote Quadrate wird die Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck am Wendepunkt des Temperaturverlaufs $p^*(T_w)$ dargestellt. Für diese in Pa angegebenen Drücke gilt jeweils die Skala rechts in den Grafiken.

Während die Punkte die Ergebnisse der numerischen Lösung der Differentialgleichungen wiedergeben, sind die durchgezogenen Linien in der jeweiligen Farbe der Punkte Berechnungsergebnisse der unter 5.4.4 beschriebenen Näherungslösung. Die geringen Abweichungen zwischen den Punkten und den Linien zeigen die Eignung der Näherungslösung.

Die **Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa** ist der Parameter, dessen Wert am stärksten variieren kann. Daher ist dessen Einfluss auf die Wartezeit besonders wichtig. Berechnungsergebnisse für Werte der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von $0,0055 \text{ h}^{-1}$ bis 1 h^{-1} zeigt Abbildung 19 in doppelt-logarithmischer Darstellung.

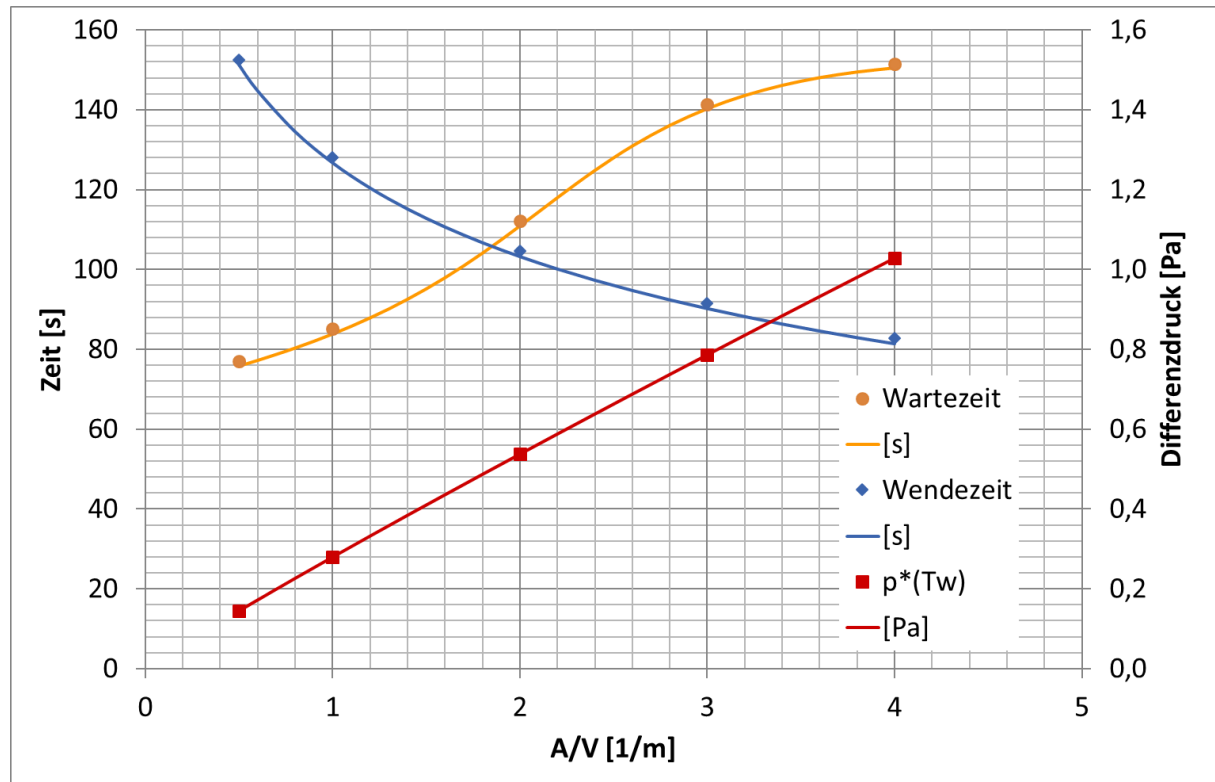
Die Verhältnisse sind für extrem dichte Gebäude ungünstiger als die Berechnungen für adiabatische Zustandsänderungen zunächst ergeben haben, wonach Wartezeit und Netto-Luftwechselrate umgekehrt proportional zu einander wären. Aus der Wartezeit von 85 s bei $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$ wäre eine Wartezeit von 850 s entsprechend 14 Minuten für $n_{L50} = 0,01 \text{ h}^{-1}$ zu erwarten. Tatsächlich ergibt die Berechnung unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs einen Wert von 1390 s entsprechend 23 Minuten.

Abbildung 19 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa



Die Abhängigkeit vom **Oberflächen-Volumenverhältnis** zeigt Abbildung 20. Je größer die Oberfläche im Verhältnis zum Luftvolumen im Gebäude, umso länger ist die erforderliche Wartezeit. Bei $A/V = 3 \text{ m}^{-1}$ ist sie rund doppelt so lang wie unter adiabatischen Verhältnissen.

Abbildung 20 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit vom Oberflächen-Volumen-Verhältnis A/V



Die Abhängigkeit der Wartezeit vom **Strömungsexponenten** n ist in Abbildung 21 dargestellt. Ähnlich wie bei der Berechnung unter Vernachlässigung des Wärmeübergangs (Abbildung 8) ist die Wartezeit bei kleinerem Strömungsexponenten größer.

In der Grafik ist auch zu erkennen, dass der Fehler der Näherungsrechnung (durchgezogene Linien) mit zunehmendem Strömungsexponenten kleiner ausfällt. Für $n = 1$ gibt es keinen Unterschied zwischen den Ergebnissen beider Berechnungsmethoden.

Abbildung 21 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit vom Strömungsexponenten n

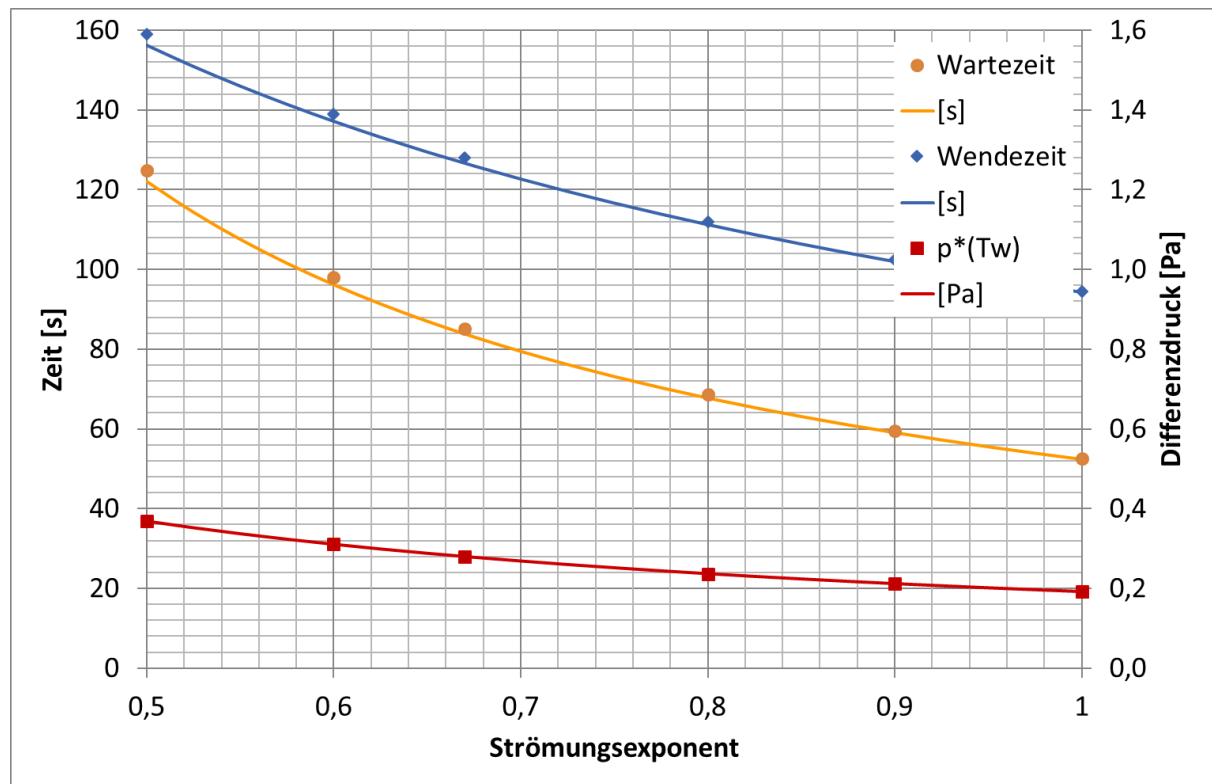
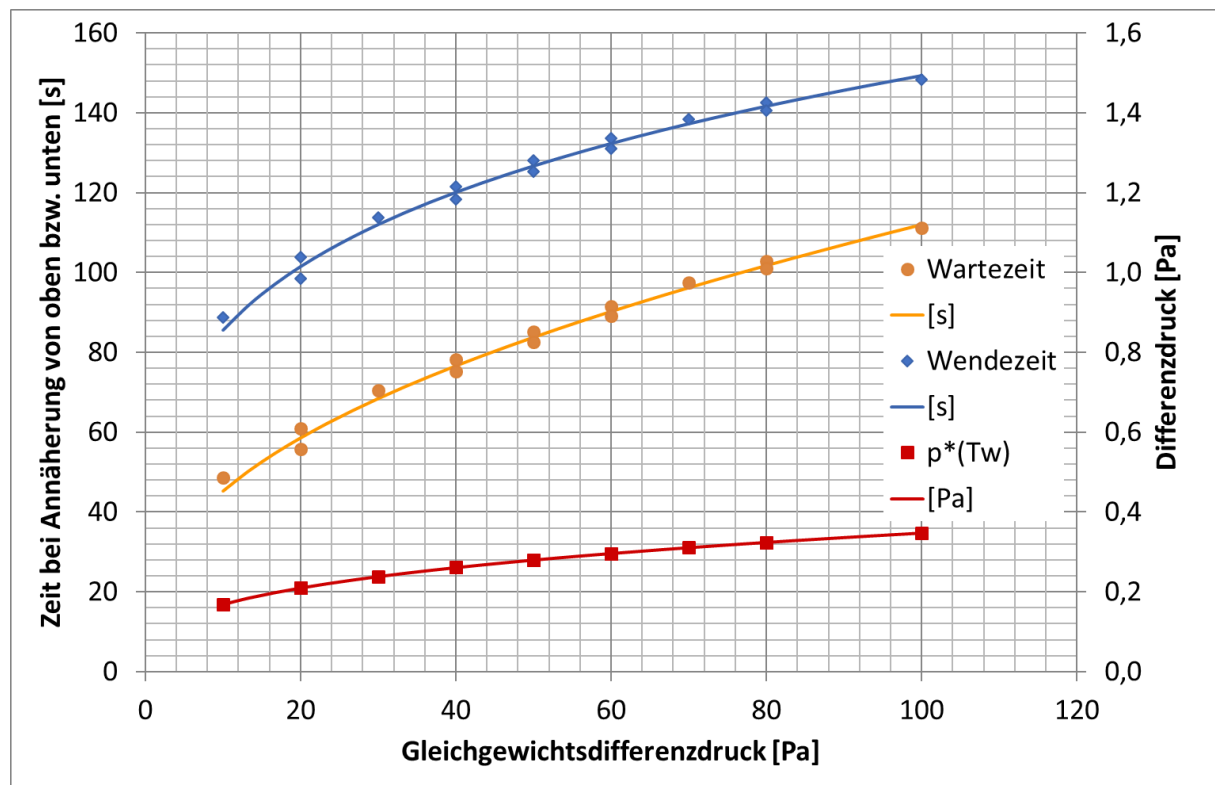


Abbildung 22 zeigt die Abhängigkeit vom **Gleichgewichtsdifferenzdruck** Δp_{bal} . Während für alle anderen Grafiken des Variantenvergleichs nur jeweils die Annäherung an den Gleichgewichtsdifferenzdruck von oben numerisch berechnet wurde, wurde hier auch das Vorzeichen der Anfangsabweichung variiert. Die jeweils höheren Werte gelten für die Annäherung von oben, die kleineren Werte für die Annäherung von unten. Da die Richtung der Annäherung beim Näherungsverfahren keine Rolle spielt, gibt es hier nur eine Kurve, die zwischen den numerisch berechneten Punkten liegt.

Der Differenzdruck am Wendepunkt der Temperaturkurve (rote Quadrate) ist nicht vom Vorzeichen der Anfangsabweichung abhängig.

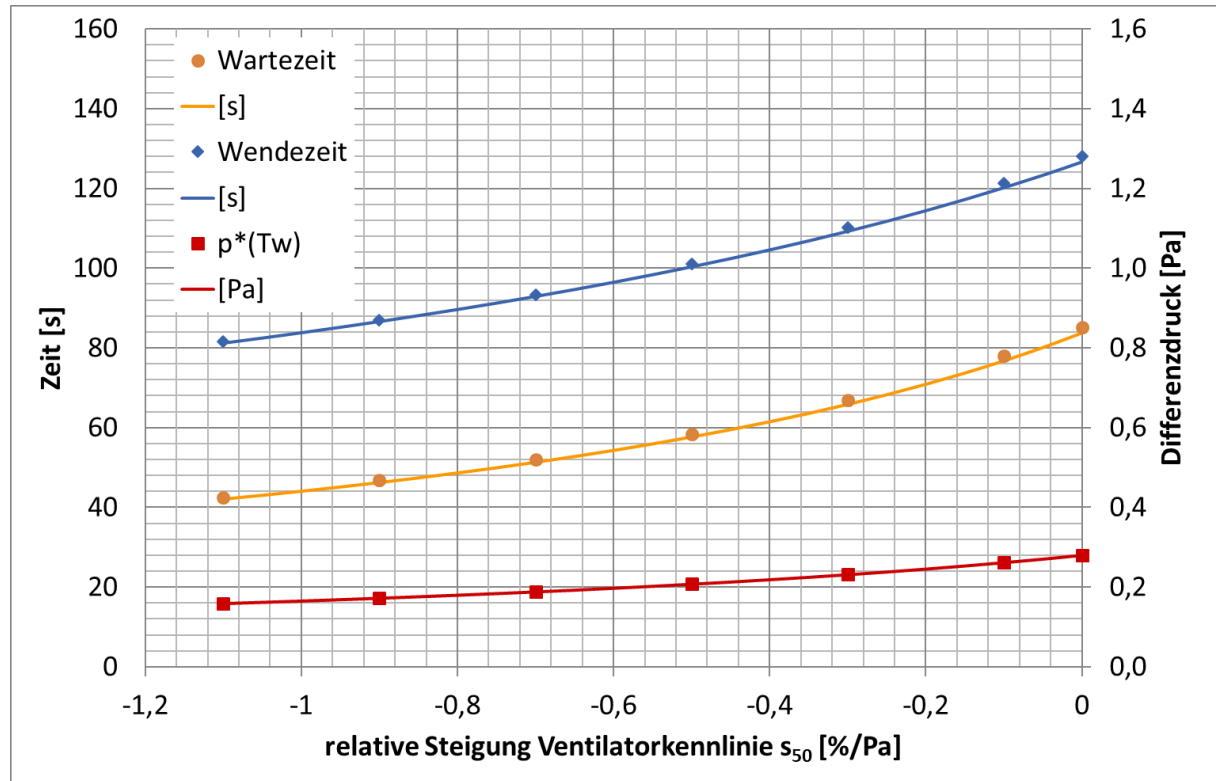
Abbildung 22 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit vom Gleichgewichtsdifferenzdruck Δp_{bal}



Der Einfluss der **Ventilator Kennlinie** ist in Abbildung 23 wiedergegeben. Analog zu den Ergebnissen ohne Berücksichtigung des Wärmeübergangs (Abbildung 8 bis Abbildung 10) wird die Wartezeit umso kürzer, je steiler die Ventilator Kennlinie verläuft.

Abbildung 23 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit von der relativen Steigung der Ventilator Kennlinie

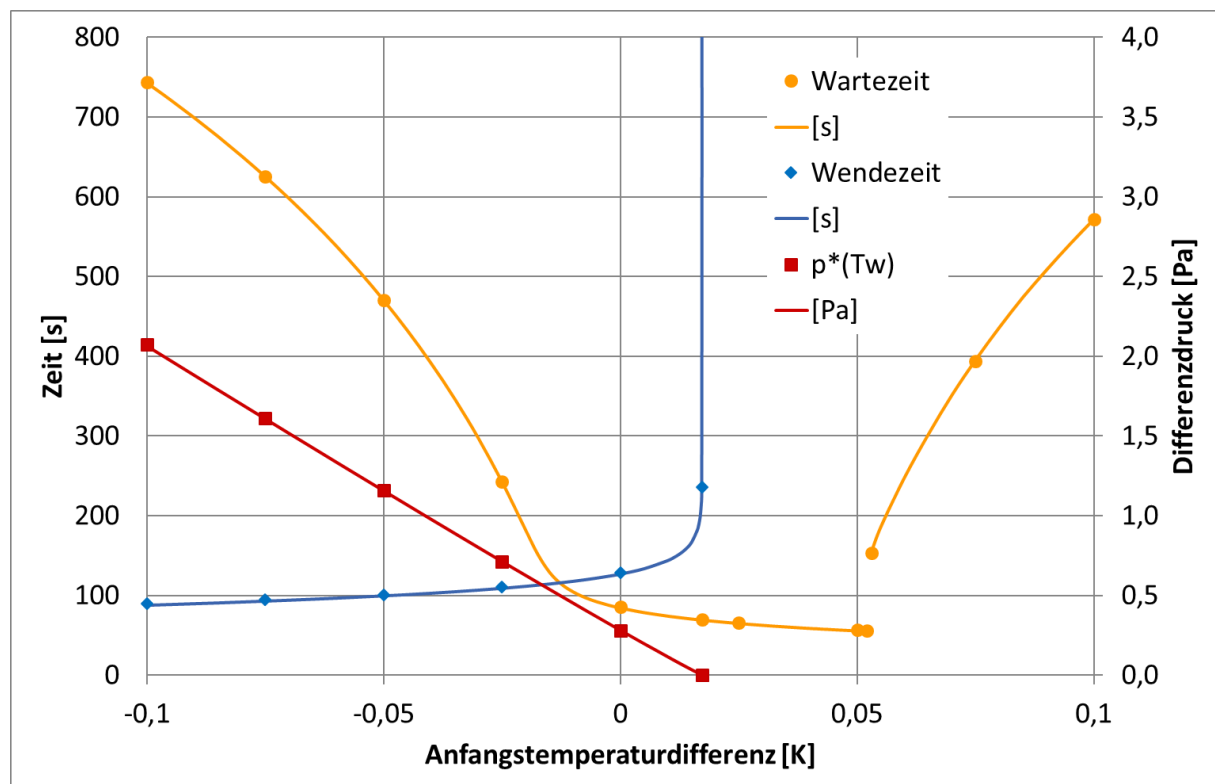
s_{50}



Weitere Varianten der Grundversion wurden unter der Annahme berechnet, dass zu Beginn der Messung eine **Temperaturdifferenz** zwischen der Innenluft und den Oberflächen im Gebäude besteht. Abbildung 24 zeigt, dass eine anfängliche Temperaturdifferenz die Wartezeit erheblich verlängern kann: Liegt die Lufttemperatur zu Beginn um $1/10$ K unter der Oberflächentemperatur ($\Delta T_0 = -0,1$ K), dauert es 743 s entsprechend gut zwölf Minuten, bis sich der Differenzdruck von anfangs 70,0 Pa bis 50,5 Pa geändert hat (gelber Punkt links oben). Die hier angenommene Anfangstemperaturdifferenz von $-0,1$ K ist groß im Vergleich zu der Temperaturänderung durch die Druckänderung, die in der Grundversion nach Abbildung 18 am Tiefpunkt der Temperaturkurve $-0,014$ K beträgt. Die lange Wartezeit für die hier gezeigte Variante liegt daran, dass sich die Innentemperatur über sehr lange Zeit ändert, und dass damit auch eine Änderung des Differenzdrucks verbunden ist.

Für viele Fälle ist die Definition der Wartezeit über eine Änderung der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck von 20 Pa auf 0,5 Pa unnötig streng. Die Annäherung von 20 Pa auf 2 Pa beispielsweise erfolgt in diesem Beispiel wesentlich schneller, nämlich in rund 90 s (ohne Bild).

Abbildung 24 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit von der Anfangstemperaturdifferenz zwischen Innenluft und Oberflächen ΔT_0



In Abbildung 24 fällt auf, dass es bei einer Anfangstemperaturdifferenz von $+0,0173$ K und mehr keine „Wendezeit“ (blaue Rauten) gibt, also keinen Wendepunkt im Temperaturverlauf. In diesen Fällen sinkt die Lufttemperatur stetig bis zur Oberflächentemperatur. Bei größeren Werten der Anfangstemperaturdifferenz fällt der Innendruck zwischenzeitlich auf Werte unterhalb des Gleichgewichtswertes ab und nähert sich dem Gleichgewicht von unten.

Die kürzeste Wartezeit (gelbe Punkte) von 54,6 s ergibt sich bei einer Anfangstemperaturdifferenz von $+0,052$ K. Ist die Lufttemperatur zu Beginn geringfügig höher, beträgt die Wartezeit 155 s. Dieser Sprung im Verlauf der Wartezeit kommt dadurch zustande, dass der Differenzdruck um mehr als 2 Pa unter den

Gleichgewichtsdifferenzdruck sinkt, so dass bis zur Annäherung von unten auf die maximale Abweichung vom Zielwert gewartet werden muss.

Die Überlegungen zum Einfluss einer anfänglichen Temperaturdifferenz zwischen Luft und Oberflächen und die Tatsache, dass die Angleichung der Luft- an die Oberflächentemperatur sehr langsam erfolgt, wirft die Frage nach Messfehlern durch Temperaturunterschiede innerhalb des Gebäudes und durch Temperaturänderungen während der Messung auf. Es wäre sinnvoll, diese Fragen zu untersuchen, aber dies würde den Rahmen des hier dargestellten Forschungsprojektes überschreiten.

5.4.9 Messfehler für eine große Zahl von berechneten Beispielen

Die Tatsache, dass bei Werten der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa unter $0,1 \text{ h}^{-1}$ die Wartezeit noch stärker ansteigt, als nach der adiabatischen Näherung zu erwarten war (Abbildung 19), wirft die Frage nach der Höhe des Messfehlers auf. Um diese zu klären, wurden 4058 Zufalls-Beispiele nach der Monte-Carlo-Methode kreiert. Für jedes dieser Beispiele wurde die Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck nach Ablauf der Wartezeit nach der 7s-Regel berechnet. Für diese Berechnung wurde die Näherungsformel (41) verwendet. Aus der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck wurde der Fehler beim Volumenstrom nach (22) berechnet.

Folgende Parameter wurden variiert:

- Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von $0,001 \text{ h}^{-1}$ bis 1 h^{-1} logarithmisch gleichverteilt
- Strömungsexponent von 0,5 bis 1 gleichverteilt
- Druckanstieg bzw. -abfall gleichverteilt
- Steigung der Ventilator Kennlinie von 0 % bis -2 % gleichverteilt
- A/V von $0,5 \text{ m}^{-1}$ bis 4 m^{-1} gleichverteilt

Folgende Parameter blieben unverändert:

- Gleichgewichtsdifferenzdruck 50 Pa
- Betrag der Anfangsdruckabweichung 20 Pa
- Anfangstemperaturdifferenz zwischen Innenluft und Oberflächen 0 K

Die berechneten relativen Fehler sind in Abbildung 25 in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa dargestellt. Die Verteilungen der positiven Fehler (Erhöhung des Differenzdrucks) und der negativen (Verringerung des Differenzdrucks) sind gleich. Der maximale Betrag des Fehlers liegt bei 3 % und entspricht damit der in 5.3.1 hergeleiteten Anforderung von maximal 3,5 %.³

Der Betrag des Fehlers liegt bei einer Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von 1 h^{-1} zwischen 0 % und 1,2 %. Mit sinkender Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa wird der Betrag des Fehlers größer. Bei $0,1 \text{ h}^{-1}$ liegt er zwischen 0,2 % und 2 %, bei $0,01 \text{ h}^{-1}$ zwischen 0,4 % und 3 %. Bei noch kleineren Werten von n_{L50} steigt der Fehler nicht weiter an, es treten sogar wieder kleinere Fehler unter 0,2 % auf. Die Druckänderung erfolgt hier näherungsweise isotherm (vgl. 5.4.5).

³ Eine Verkürzung der Wartezeit entsprechend einer 6s-Regel würde zu maximalen Fehlern über 3,5 % führen.

Abbildung 25 Relativer Fehler der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa bei einer Wartezeit nach der 7s-Regel

Positive Fehler entstehen bei der Annäherung an den Gleichgewichtsdifferenzdruck von unten, negative bei der Annäherung von oben.

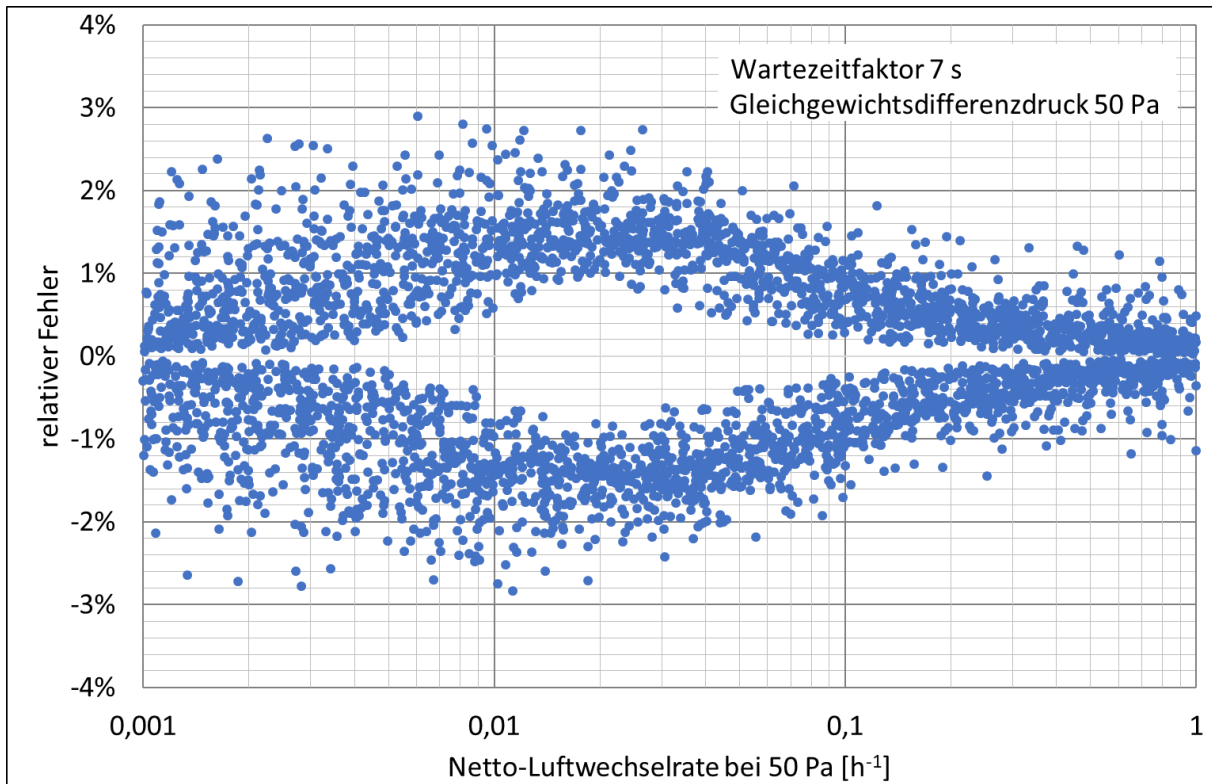
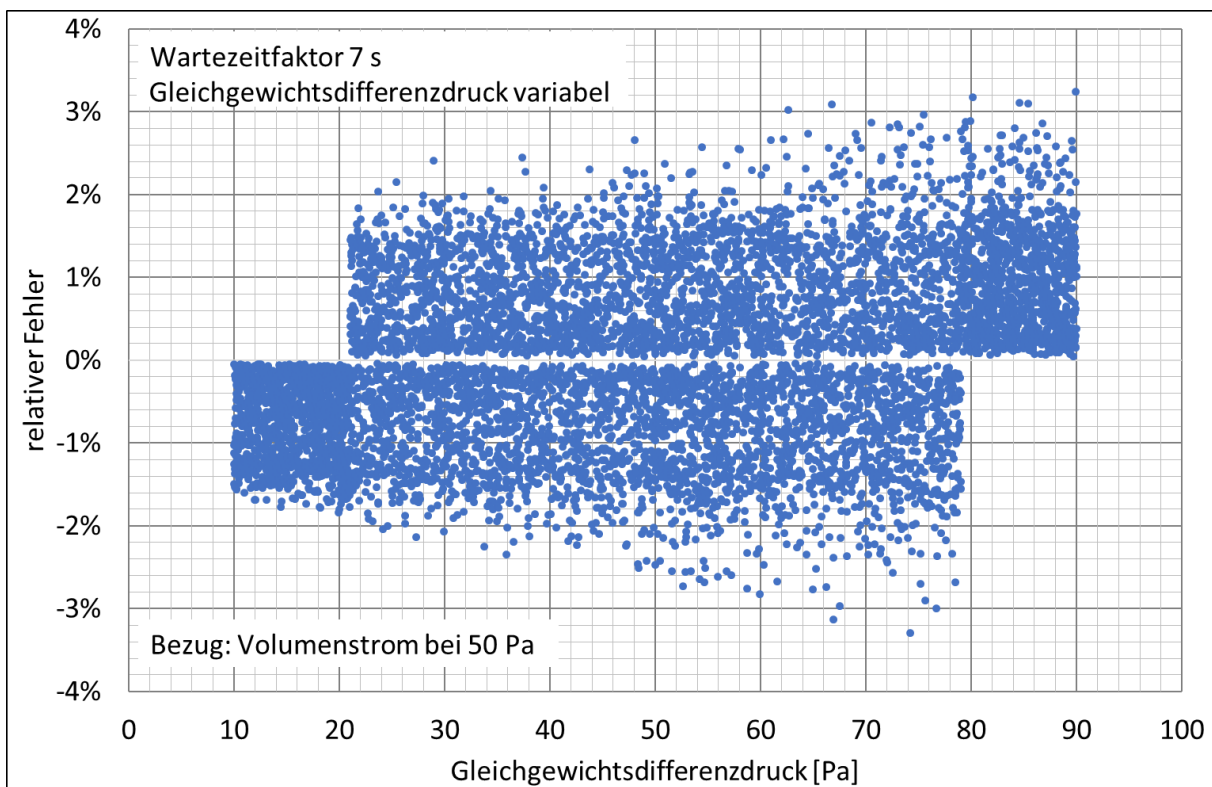


Abbildung 26 Relativer Fehler des Volumenstroms bezogen auf den Volumenstrom bei 50 Pa

Für diese Grafik wurde auch der Gleichgewichtsdifferenzdruck variiert.



Für die Beispiele in Abbildung 25 betrug der Gleichgewichtsdifferenzdruck 50 Pa. Für eine weitere Untersuchung wurde auch der Gleichgewichtsdifferenzdruck variiert, gleichverteilt von 10 Pa bis 90 Pa. Die Ergebnisse für 8110 Berechnungen zeigt Abbildung 26. Als relativer Fehler wird hier der Quotient aus dem Fehler des Volumenstroms und dem Volumenstrom bei 50 Pa bezeichnet.

Bei höheren Drücken treten sehr selten auch Beträge des Fehlers von etwas mehr als 3 % auf. Dies liegt daran, dass der Fehler nicht auf den Volumenstrom im jeweiligen Messpunkt, sondern auf den Volumenstrom bei 50 Pa bezogen wurde.

Insgesamt scheint die 7s-Regel für die Wartezeit angemessen zu sein.

5.5 Abschätzung des Einflusses sonstiger Parameter

Nachfolgend werden die Parameter aufgeführt, die bei einer Messung unter realen Bedingungen anders sind als bei der bislang betrachteten Messung unter Standardbedingungen innen und außen. Für jeden Parameter wird untersucht, inwieweit er sich auf die Dauer der Messung auswirkt.

5.5.1 Luftdruck

Der Luftdruck kann sich vom Standardwert unterscheiden: $p \neq 1013 \text{ hPa}$.

In Gleichung (1) ist dies schon berücksichtigt, indem statt dem Standardwert für den Luftdruck der tatsächliche Luftdruck p eingesetzt wurde. Bei kleinerem Luftdruck, z.B. im Gebirge, ist die erforderliche Wartezeit länger als bei größerem, z.B. im Tiefland. In 1000 m Höhe beträgt der Luftdruck im Mittel 899 hPa. Die Wartezeit ist dort um 13 % länger als auf Meereshöhe. Streng genommen müsste allerdings auch noch die Dichteabhängigkeit des Volumenstroms durch die Gebäudehülle berücksichtigt werden.

5.5.2 Innenvolumen

Das reale Innenvolumen kann sich vom Innenvolumen nach der Messnorm DIN EN ISO 9972 unterscheiden: $V \neq V_{\text{ISO 9972}}$

Für die Dauer einer Messung ist das Volumen der Luft innerhalb der luftundurchlässigen Gebäudehülle maßgeblich. Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Luftvolumen und dem nach Norm berechneten Wert lassen sich im konkreten Fall berechnen.

Sofern nicht das Volumen V nach Abschnitt 6.1.1 der DIN EN ISO 9972, sondern das Luftvolumen V_L nach Abschnitt NA 8.2 herangezogen wird, werden die Unterschiede meist klein ausfallen.

5.5.3 Volumen variabel

Bestehen Luftdichtheitsschichten aus flexiblen Materialien, kann sich das Volumen mit dem Differenzdruck zwischen innen und außen ändern. Für die folgenden Berechnungen wird angenommen, dass sich das Volumen linear mit dem Differenzdruck ändert, bzw. dass die Druckabhängigkeit der Volumenänderung zumindest stückweise als linear angesehen werden kann. Das Volumen lässt sich dann folgendermaßen beschreiben:

$$V = V_0 + \Delta V(\Delta p) = V_0 + W \cdot \Delta p$$

$$V = V_0(1 + w \cdot \Delta p)$$

mit

V	Volumen [m ³]
V ₀	Volumen bei Differenzdruck 0 Pa [m ³]
W	Volumenänderung [m ³ /Pa]
w	relative Volumenänderung [1/Pa]

Die maßgebliche Differentialgleichung (1) lässt sich um den Term für die Volumenänderung ergänzen:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot \left[\frac{q_F - dV/dt}{V_0} - \frac{n_{1,50}}{(50Pa)^n} \Delta p^n \right]$$

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot \left[\frac{q_F}{V_0} - w \cdot \frac{d\Delta p}{dt} - \frac{n_{1,50}}{(50Pa)^n} \Delta p^n \right]$$

$$\frac{d\Delta p}{dt} (1 + p \cdot \kappa \cdot w) = p \cdot \kappa \cdot \left[\frac{q_F}{V_0} - \frac{n_{1,50}}{(50Pa)^n} \Delta p^n \right]$$

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \frac{p \cdot \kappa}{1 + p \cdot \kappa \cdot w} \left[\frac{q_F}{V_0} - \frac{n_{1,50}}{(50Pa)^n} \Delta p^n \right]$$

(46)

Gegenüber der ursprünglichen Differentialgleichung (1) ist der Term im Nenner dazugekommen. Die Wartezeit verlängert sich um diesen Faktor f_V :

$$f_V = 1 + p \cdot \kappa \cdot w$$

(47)

mit

f_V	Faktor für Volumenänderung [1]
-------	--------------------------------

Dass ein variables Volumen einen erheblichen Einfluss auf die Wartezeit hat, zeigt ein Beispiel: Wird in einem Supermarkt mit einer Höhe von 4 m die Luftdichtungsfolie in der Decke bei einem Überdruck von 50 Pa um im Mittel 2 cm nach oben gedrückt, ergibt sich:

$$w = \frac{0,02m}{4m \cdot 50Pa} = 0,0001 \frac{1}{Pa}$$

$$f_V = 1 + 0,0001 \frac{1}{Pa} \cdot 101325Pa \cdot 1,4 = 1 + 14 = 15$$

Verglichen mit einem gleich dichten Gebäude mit starrer Luftdichtheitsschicht muss bei diesem Supermarkt also 15-mal so lange gewartet werden, bis ein quasi stationärer Zustand erreicht ist und ein Messwert abgelesen werden darf.

Analog zu Gleichung (18) kann auch die Lösung von Gleichung (46) durch eine e-Funktion angenähert werden:

$$\Delta p^*(t) = \Delta p^*(0) \cdot e^{\frac{p \cdot \kappa \cdot n_{L50}}{1+p \cdot \kappa \cdot w} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right] t} \quad (48)$$

Analog zu (19) ergibt sich die Wartezeit daraus:

$$t_w = - \frac{(1 + p \cdot \kappa \cdot w) \cdot \ln 40}{p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right]} \quad (49)$$

Diese Wartezeit lässt sich aufspalten in die Wartezeit aufgrund der Dichteänderung t_ρ entsprechend Gleichung (19) und die Wartezeit aufgrund der Volumenänderung t_v :

$$t_w = t_\rho + t_v$$

mit

$$t_\rho = \frac{-\ln 40}{p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right]}$$

$$t_v = \frac{-p \cdot \kappa \cdot w \cdot \ln 40}{p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right]}$$

$$t_v = \frac{\Delta V(\Delta p)}{V_0 \cdot \Delta p} \cdot \frac{-\ln 40}{n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right]}$$

Schon die Abschätzung der Volumenänderung ΔV ist in der Messpraxis schwierig. Noch schwieriger ist es, deren Druckabhängigkeit einzuschätzen.

Für die Messpraxis wird vorgeschlagen, die Volumenänderung ΔV vorsichtig abzuschätzen, also eher zu überschätzen, als zu unterschätzen, und diese Volumenänderung auf einen Differenzdruck von 50 Pa zu beziehen. Die Wartezeit aufgrund der Volumenänderung ergibt sich dann:

$$t_v = \frac{\Delta V(\Delta p)}{V \cdot 50Pa} \cdot \frac{-\ln 40}{n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right]}$$

Eine einfache Formel erhält man, indem analog zur Herleitung der 7s-Regel folgende Annahmen getroffen werden:

$$\begin{aligned} S &= 0 \\ \Delta p_{bal} &= 50 \text{ Pa} \\ n &= 0,67 \end{aligned}$$

Damit folgt:

$$t_v = \frac{\Delta V(50Pa)}{V \cdot 50Pa} \cdot \frac{-\ln 40}{n_{L50} \left[-\frac{2/3}{(50Pa)^{1-n} \cdot (50Pa)^n} \right]}$$

$$t_v = \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{\ln 40 \cdot 3/2 \cdot 50Pa}{n_{L50} \cdot 50Pa}$$

$$t_v \approx 20000 \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{n_{L50}} \frac{s}{h}$$
(50)

Hinweis: Im letzten Rechenschritt ist die Umrechnung der Netto-Luftwechselrate pro Stunde auf den Wert je Sekunde enthalten. (50) gilt also als Zahlengleichung, wenn n_{L50} wie gewohnt in h^{-1} eingesetzt wird.

Um „handlichere“ Zahlenwerte zu erhalten, empfiehlt es sich, die relative Volumenänderung $\Delta V/V$ in Promille bzw. in l/m^3 anzugeben. Der Faktor in Gleichung (50) beträgt dann 20 statt 20000.

Für die relative Volumenänderung $\Delta V/V = 0,35 \text{ ‰}$ ist die Wartezeit aufgrund der Volumenänderung t_v gleich groß wie die Wartezeit aufgrund der Dichteänderung t_p . Ist die relative Volumenänderung kleiner als $0,05 \text{ ‰}$, ist die Wartezeit t_v kleiner als 15 % der Wartezeit t_p und damit vernachlässigbar.

5.5.4 Lufttemperatur weicht von Standardbedingungen ab

Theoretisch möglich ist der Fall, dass Innen- und Außentemperatur gleich sind, aber nicht dem Standardwert entsprechen: $T_{int} = T_{ext} \neq 20 \text{ °C}$

Da die Temperatur in den maßgeblichen Gleichungen nicht vorkommt, kann man davon ausgehen, dass sich diese nicht auf die Wartezeit auswirkt.

5.5.5 Innen- und Außentemperatur verschieden

Die Lufttemperaturen innen und außen können verschieden sein: $T_{int} \neq T_{ext}$

Sowohl bei der Herleitung der Differentialgleichung (1) für den zeitlichen Verlauf des Differenzdrucks unter adiabatischen Bedingungen, als auch bei der Herleitung des Gleichungssystems (33) und (34) unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs, wurden gleiche Temperaturen innen und außen angenommen. Es ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Temperaturen zu anderen Ergebnissen führen. Dieses Problem sollte bei zukünftigen Untersuchungen geklärt werden.

Vorüberlegungen dazu werfen die Frage auf, ob die in den Messnormen DIN EN 13829 und DIN EN ISO 9972 beschriebene Dichtekorrektur der Messdaten überhaupt richtig ist. Diese Frage zu klären erscheint wichtig, ist aber aufwendig und war im Rahmen dieses Projektes nicht mehr zu leisten.

5.5.6 Druckdifferenz ortsabhängig

Aufgrund von Wind und Thermik ist die Druckdifferenz nicht überall an der Gebäudehülle gleich. Auch ohne Gebläse stellt sich eine Druckdifferenz ein, die natürliche Druckdifferenz. Auswirkungen der Thermik auf das Messergebnis der Luftdurchlässigkeitsmessung von Hochhäusern wurden vom Passivhaus Institut theoretisch untersucht [Peper, Schnieders 2019].

Die Auswirkungen der natürlichen Druckdifferenz auf die erforderliche Wartezeit wurden im Rahmen der vorliegenden Studie durch Modellrechnungen untersucht. In Anlehnung an das in DIN EN 15242 bzw. der Nachfolgenorm DIN EN 16798-7 beschriebene Rechenverfahren für In- und Exfiltrationsvolumenströme kann der Volumenstrom durch eine Undichtheit folgendermaßen beschrieben werden:

$$q_i(\Delta p_i + \Delta p) = \text{sign}(\Delta p_i + \Delta p) \cdot C_i \cdot |\Delta p_i + \Delta p|^{n_i} \quad (51)$$

mit

i	Laufvariable
q_i	Volumenstrom durch die Undichtheit i
Δp_i	natürliche Druckdifferenz an der Undichtheit i
Δp	(mit dem Ventilator) erzeugte Druckdifferenz
C_i	Strömungskoeffizient der Undichtheit i
n_i	Strömungsexponent der Undichtheit i

In der Realität ergeben sich die Druckdifferenzen zwischen verschiedenen Undichtheiten $\Delta p_i - \Delta p_j$ aus den Winddruckbeiwerten und der Windgeschwindigkeit einerseits und aus den Höhenunterschieden und der Temperaturdifferenz innen – außen andererseits. Ohne Ventilator stellt sich der Druck im Gebäude so ein, dass die Summe des einströmenden Massenstroms gleich der Summe des ausströmenden ist. Vernachlässigt man die Dichteunterschiede zwischen innen und außen bzw. betrachtet nur windbedingte Druckdifferenzen, dann gilt auch für die Volumenströme: Die Summe aller ein- und ausströmenden Volumenströme ist Null:

$$\sum_i q_i(\Delta p_i + 0) = \sum_i \text{sign}(\Delta p_i) \cdot C_i \cdot |\Delta p_i|^{n_i} = 0 \quad (52)$$

Wird mit dem Ventilator eine Druckdifferenz an der Gebäudehülle erzeugt, dann verändern sich die Druckdifferenzen an allen Undichtheiten gleichermaßen und der Gesamtvolumenstrom durch die Gebäudehülle ergibt sich zu:

$$q(\Delta p) = \sum_i q_i(\Delta p_i + \Delta p) = \sum_i \text{sign}(\Delta p_i + \Delta p) \cdot C_i \cdot |\Delta p_i + \Delta p|^{n_i} \quad (53)$$

Aus der Differentialgleichung zur Beschreibung des Druckverlaufs (1) wird dann:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = p \cdot \kappa \cdot \left[\frac{q_F(\Delta p)}{V} - \sum_i \text{sign}(\Delta p_i + \Delta p) \cdot C_i \cdot |\Delta p_i + \Delta p|^{n_i} \right] \quad (54)$$

Für die Modellrechnungen wurden zwölf Beispiele mit zwei oder mehr Undichtheiten erstellt. Jede Undichtheit ist charakterisiert durch die natürliche Druckdifferenz Δp_i , den Strömungskoeffizient C_i und den Strömungskoeffizienten n_i . Als Randbedingung gilt Gleichung (52). Als weitere Randbedingung wurde für das jeweilige Beispielgebäude ohne natürliche Druckdifferenzen eine Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von $n_{L50} = 0,1 \text{ h}^{-1}$ festgelegt um die Beispiele einfacher vergleichen zu können. Bei Beispielen, bei denen nicht alle Strömungsexponenten n_i den gleichen Wert haben, lässt sich allerdings die Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa nicht ohne weiteres angeben. Sie wurde folgendermaßen ermittelt:

Für die 8 Werte des Gebäudedrucks von 10 Pa bis 80 Pa in Zehnerschritten wurde der Volumenstrom für den Fall von Windstille und ohne Temperaturdifferenz innen – außen berechnet:

$$q(\Delta p) = \sum_i C_i \cdot \Delta p^{n_i} \quad (55)$$

Die so erhaltenen Wertepaare von Gebäudedruck und Volumenstrom wurden wie Messpunkte einer Luftdurchlässigkeitsmessung behandelt und entsprechend dem nationalen Anhang NC.2 der DIN EN ISO 9972 ausgewertet.

Jede Modellrechnung erfolgte in 7 Schritten:

1. Festlegung des Modells durch Definition der Undichtheiten wie vorstehend beschrieben. Dabei wurde als Betrag der jeweiligen natürlichen Druckdifferenz Δp_i entsprechend der Messnorm ein Maximalwert von 5 Pa angesetzt.
2. Berechnung der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa n_{L50} ohne natürliche Druckdifferenz, d.h. für alle i : $\Delta p_i = 0$ durch Näherungsrechnung wie vorstehend beschrieben.
3. Analoge Berechnung der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa n_{L50} unter Berücksichtigung der in Schritt 1. definierten Werte der natürlichen Druckdifferenz.
4. Berechnung der Wartezeit durch numerische Lösung der Differentialgleichung (1) für das Ergebnis von Schritt 2.
5. Berechnung der Wartezeit durch numerische Lösung der Differentialgleichung (1) für das Ergebnis von Schritt 3.
6. Berechnung der Wartezeit durch numerische Lösung der Differentialgleichung (54) für das Ergebnis von Schritt 3.
7. Vergleich der Wartezeiten aus den Schritten 5 und 6.

Die Unterschiede der Wartezeiten beim Druckanstieg von 30 Pa auf 50 Pa lagen bei maximal 1,5 %. Dieses Beispiel wird nachfolgend beschrieben:

Gebäudemodell:

Luft-Volumen $V = 10.000 \text{ m}^3$
 Undichtheit 1: $\Delta p_1 = -0,17 \text{ Pa}$
 $C_1 = 88,7 \text{ m}^3/\text{h}$
 $n_1 = 0,5$ (d.h. vollständig turbulente Strömung)
 Undichtheit 2: $\Delta p_2 = 5 \text{ Pa}$
 $C_2 = 7,3 \text{ m}^3/\text{h}$
 $n_2 = 1$ (d.h. vollständig laminare Strömung)

Die daraus resultierenden Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5 wiedergegeben.

Fazit: Bei Beträgen der natürlichen Druckdifferenzen von nicht mehr als 5 Pa ist der Einfluss auf die Wartezeit vernachlässigbar.

Tabelle 5 Berechnungsergebnisse ohne und mit natürlicher Druckdifferenz

Schritt Nr.	Beschreibung	Symbol	Einheit	ohne natürliche Druckdifferenz	mit natürlicher Druckdifferenz	
2. und 3.	Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa	n_{L50}	h^{-1}	0,1000	0,1038	
	Strömungsexponent	n		0,670	0,642	
4. bis 6.	Berechnung nach Differentialgleichung			(1)	(1)	(54)
	Wartezeit	t_p	s	68,4	68,7	67,7
7.	relative Differenz					- 1,5 %

5.5.7 Druckdifferenz schwankt zeitlich

Windbedingt treten Schwankungen der Druckdifferenzen an der Gebäudehülle auf. Es sind kaum Untersuchungen der Auswirkungen auf das Messergebnis der Luftdurchlässigkeitsmessung bekannt. Allerdings werden in der in DIN EN ISO 9972 beschriebenen Fehlerrechnung windbedingte Druckschwankungen berücksichtigt.

Eine Untersuchung der Auswirkungen auf die Messdauer war nicht vorgesehen.

5.5.8 Mehrere Blower Doors

Für die Messung großer Volumenströme werden üblicherweise mehrere Blower Doors parallel betrieben (siehe Foto der Titelseite). Somit wird die Messdauer nicht von der Kennlinie eines Ventilators bestimmt, sondern von der Kennlinie der Gesamtheit aller Gebläse.

Deren absolute Steigung entspricht der Summe der Steigungen der einzelnen Ventilatoren. Bezogen auf den Gesamtvolumenstrom aller Gebläse liegt die relative Steigung der Gesamtheit im gleichen Bereich wie die relativen Steigungen der Einzelgeräte. Eine weitere Betrachtung des Parallelbetriebs mehrerer Ventilatoren erübrigt sich also.

5.6 Messstrategie

5.6.1 Begriff "Messung"

Im Zusammenhang mit der Luftdurchlässigkeitsmessung eines Gebäudes besteht „eine Messung“ aus der Aufnahme der Gebäudekennlinie, in der Regel sowohl für Unterdruck, als auch für Überdruck. Für jede der Kennlinien werden in der Regel fünf oder mehr „Messpunkte“ des Volumenstroms bei unterschiedlichen Druckdifferenzen aufgenommen.

„Eine Messung“ im Zusammenhang mit dem zeitlichen Verlauf des Druckaufbaus entspricht dagegen einem „Messpunkt“ der Gebäudemessung: Für eine Einstellung des Ventilators wird eine Vielzahl von „Messpunkten“ der Gebäudedruckdifferenz und des Volumenstroms in Abhängigkeit von der Zeit erfasst.

Somit ergeben sich aus einer Gebäudemessung rund 10 oder mehr Messungen des zeitlichen Verlaufs des Differenzdrucks an der Gebäudehülle.

5.6.2 Zielsetzung

Ziel der Messungen ist ein Vergleich mit der Theorie zum zeitlichen Verlauf des Differenzdrucks.

5.6.3 Messausrüstung

In einem sehr dichten Gebäude mit einer erforderlichen Wartezeit von mehreren Minuten würde eine Blower Door für die Messung ausreichen. Der zeitliche Verlauf des Differenzdrucks könnte von Hand notiert werden. Bei Gebäuden mit einer Wartezeit von unter einer Minute ist zusätzlich ein Datalogger zur Aufnahme des zeitlichen Verlaufs des Gebäude-Differenzdrucks erforderlich. Wünschenswert ist außerdem die elektronische Erfassung des zeitlichen Verlaufs des vom Ventilator geförderten Volumenstroms, weil damit auch der maßgebliche Teil der Kennlinie des Ventilators erfasst werden kann.

Für die meisten der nachfolgend aufgeführten Messungen wurde eine Minneapolis Blower Door Model 4.1 (Hersteller: TEC) mit dem zugehörigen Zweikanal-Druckmessgerät DG 700 bzw. DG 1000 verwendet. In

Verbindung mit einem Notebook und der Software TECLOG wurden der Gebäudedruck und der Gebläsedruck, aus dem der Volumenstrom berechnet werden kann, kontinuierlich aufgezeichnet.

Für einzelne Messungen wurde die Retrotec Blower Door 3000 SR verwendet. Statt des Druckmessgeräts Retrotec DM 32 wurde das Minneapolis DG 700 bzw. DG 1000 in Verbindung mit Notebook und TECLOG verwendet. Auch hier konnte der Volumenstrom anhand des aufgezeichneten Gebläsedrucks mit aufgezeichnet werden.

Die Messung in der CO₂-Box erfolgte mit einem Minneapolis Duct Blaster in Verbindung mit einem DG 1000 (Hersteller: TEC).

Auch mit dem Gerät Wöhler BC 600 wurde eine Messung durchgeführt. Bei diesem Gerät ist der Differenzdrucksensor im Gerät integriert, er hat aber keine Schnittstelle zum Notebook. Der Volumenstrom wird in der Software des Herstellers aus der Ventilatorzahl und der Gebäudedruckdifferenz berechnet. Zur Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs des Gebäudedrucks wurde ein Kanal des DG 700 verwendet, das zusätzlich zur eigentlichen Messausrüstung installiert war. Der Volumenstrom konnte nicht aufgezeichnet werden, weil das BC 600 über keine geeignete Schnittstelle verfügt.

Innen- und Außentemperatur wurden jeweils von Hand mit einem Thermometer aufgenommen. Beim Gerät von Wöhler wird der absolute Luftdruck gemessen und in der Software angezeigt. Bei der Verwendung der anderen Geräte wurde der aus der geographischen Höhe berechnete mittlere Luftdruck verwendet.

5.6.4 Vorgehensweise

Für die Messung des zeitlichen Verlaufs des Differenzdrucks über der Gebäudehülle wurde jeweils der vorher ausgeschaltete oder schon laufende Ventilator schnell verstellt und danach der Verlauf des Differenzdrucks beobachtet. In der Regel wurden eher große Änderungen des Differenzdrucks (z.B. von 0 auf 70 Pa) vorgenommen, weil die größeren Druckunterschiede einen genaueren Vergleich zwischen Messung und Rechnung erlauben. Nach Möglichkeit wurden bei jeder Gebäudemessung mindestens folgende Messungen des Druckverlaufs durchgeführt (vgl. Abbildung 27):

1. Druckerhöhung bei Unterdruck
2. Druckabsenkung bei Unterdruck
3. Druckabfall von Unterdruck auf 0 Pa
4. Druckerhöhung bei Überdruck
5. Druckabsenkung bei Überdruck
6. Druckabfall von Überdruck auf 0 Pa

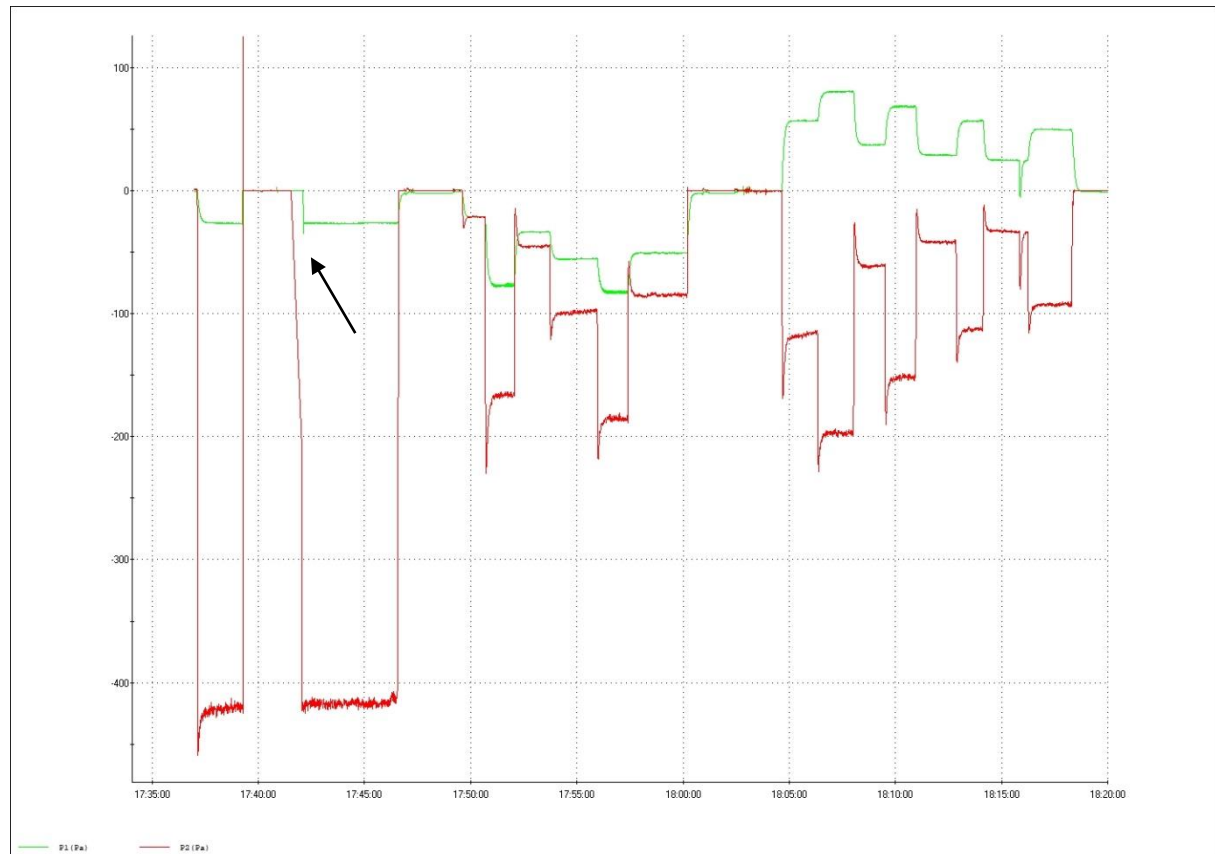
Die Varianten 3. bzw. 6. – der Druckabfall auf 0 Pa – haben für die Messpraxis keine Relevanz. Wird der Ventilator bei einer praktischen Messung ausgeschaltet, fällt der Differenzdruck schnell auf 0 Pa ab, weil die Öffnung des Ventilators als zusätzliche „Leckage“ wirkt. Diese Messung ist aber für den Vergleich zwischen Theorie und Praxis interessant, weil der Ventilator keine Rolle spielt und sich die Ventilator Kennlinie nicht auswirkt. Erforderlich ist für die Messung des Druckabfalls auf 0 Pa, dass die Ventilatoröffnung schnell dicht verschlossen wird. Dies gelang mit den Abdeckungen aus luftdichtem Gewebe, die sonst für die Messung der natürlichen Druckdifferenz verwendet werden, nicht ohne weiteres. Daher wurde nach dem Anbringen der Abdeckung der dann (noch) herrschende Differenzdruck abgelesen und notiert, und die Auswertung erst ab diesem Wert vorgenommen.

Bei der Auswertung stellten sich allerdings gerade bei den Messungen des Druckabfalls auf 0 Pa große Abweichungen zwischen Messung und Rechnung heraus. Diese Frage wurde dann wegen der fehlenden Praxisrelevanz nicht weiterverfolgt.

Abbildung 27 Screenshot aus dem Datenerfassungsprogramm TECLOG

Die Grafik zeigt den zeitlichen Verlauf des Gebäudedifferenzdrucks (grün, Unterdruck negativ, Überdruck positiv) und des Gebläsedifferenzdrucks (rot, alle Werte negativ).

Für den zweiten Druckanstieg bei Unterdruck (Pfeil) wurde bei laufendem Gebläse eine offene Terrassentür geschlossen.



Beim Wöhler-Gerät lässt sich der Ventilator nicht schnell verstellen. Es gibt keinen Drehzahlsteller am Gerät. Die Bedienung erfolgt über eine auf dem Notebook installierte App. Wird darüber die Ventilator Drehzahl verstellt, verstellt die Software diese nur allmählich. Für die Messungen bei Druckerhöhung (1. und 4.) wurde deshalb zunächst der Ventilator bei geöffnetem Fenster auf den gewünschten Wert eingestellt und dann das Fenster geschlossen und der Druckanstieg mit dem separat installierten DG 700 gemessen. Druckverläufe bei der Druckabsenkung auf einen Wert größer 0 Pa (2. und 5.) konnten bei diesem Gerät nicht aufgezeichnet werden.

Bei der Auswertung stellte sich allerdings heraus, dass der Druckaufbau bei Unterdruck bei diesen Messungen viel schneller erfolgt war, als theoretisch zu erwarten ist. Die Erklärung: Beim Schließen eines Fensters wird Luft von innen nach außen bewegt. Dieser zusätzliche Volumenstrom in nicht bekannter Höhe bewirkt ein schnelleres Ansteigen des Betrags des Unterdrucks. Daher wurden diese Messungen in der Auswertung nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für den zweiten Druckanstieg bei Unterdruck in Abbildung 27 (Pfeil). Die Bewegung der Terrassentür hat dort sogar einen Druckstoß erzeugt, der größer war, als der vom Ventilator erzeugte Unterdruck.

5.6.5 Wetterbedingungen

Es wurden Messtermine bei kleinen Windgeschwindigkeiten angestrebt.

Im Passivhaus-Bürogebäude (vgl. 5.9) sollten einerseits Messungen bei geringen Temperaturunterschieden zwischen innen und außen und andererseits bei großen Temperaturunterschieden durchgeführt werden. Aufgrund des milden Winters 2021/2022 lag die „große“ Temperaturdifferenz bei 18,5 K.

5.6.6 Vergleich verschiedener Ventilatoren

Für einen Messtermin im Niedrigenergie-Einfamilienhaus wurden drei Blower Doors gleichzeitig in drei verschiedenen Außentüren installiert. Jeweils zwei Ventilatoren wurden abgedichtet, während mit dem dritten zeitliche Verläufe der Druckdifferenz ermittelt wurden. Auf diese Weise ist ein direkter Vergleich der drei Ventilatoren möglich.

5.7 Suche nach Messobjekten

Im Frühsommer 2021 wurden verschiedene Obstanbaubetriebe im nahegelegenen Bodenseegebiet angerufen in der Vermutung, dass diese für die Lagerung von Obst unter Schutzgasatmosphäre dichte Hallen betreiben, die am Ende des Sommers, kurz vor der neuen Ernte, leer sind und für eine Messung zur Verfügung gestellt werden könnten. In den Gesprächen stellte sich heraus, dass diese Lagerräume wahrscheinlich weniger geeignet sind, weil sie nicht so groß sind wie vermutet, und weil die für die Durchfahrt mit Gabelstaplern geeigneten Tore zu groß sind für den einfachen Einbau einer Blower Door. Auch reagierte die Mehrheit der Angerufenen eher ablehnend.

Für den Newsletter des Fachverbandes Luftdichtheit im Bauwesen (FLiB) e.V. wurde ein Artikel über das Forschungsprojekt geschrieben, in dem Kolleginnen und Kollegen um Hinweise auf geeignete Messobjekte gebeten wurden. Der Newsletter erschien am 30.09.2021. Rückmeldungen gab es leider nicht.

Mündliche Anfragen bei befreundeten Kollegen führten zum Hinweis auf ein Passivhaus-Einfamilienhaus mit einer Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von $0,1 \text{ h}^{-1}$. Dort konnte eine Messung durchgeführt werden (vgl. 5.10.1).

Telefonische Anfragen bei zwei Niederlassungen einer Firma, die die Technik für Brandvermeidungsanlagen durch Inertgasatmosphären anbietet, schienen zunächst erfolgversprechend. Letzten Endes wurde aber auch auf weitere Nachfrage kein geeignetes Gebäude benannt.

Durch Zufall ergab sich im Frühsommer 2022 ein Hinweis auf ein sehr dichtes Objekt in der Nähe von Winterthur. Für die „CO₂-Box“ der Firma Toggenburger hatte eine Messung im Mai 2022 eine Luftwechselrate bei 50 Pa von $0,05 \text{ h}^{-1}$ ergeben. Eine der Besonderheiten an diesem quaderförmigen Objekt ist, dass eine Seite aus einer starken Plane besteht, die sich bei Druckbeaufschlagung wölbt. Von vornherein war klar, dass die Dauer des Druckaufbaus in diesem Fall maßgeblich davon bestimmt wird, dass das Volumen mit zunehmendem Überdruck größer wird. Nach Abstimmung mit Kollegen wurde entschieden, die Messung durchzuführen, zumal variable Volumina auch bei anderen Objekten vorkommen, z.B. wenn sich eine Luftdichtungsfolie im Dach bei Überdruck nach oben wölbt. Eine Beschreibung der „CO₂-Box“ folgt in Abschnitt 5.10.2.

5.8 Messungen Niedrigenergie-Einfamilienhaus

In einem Einfamilienhaus mit $n_{L50} \approx 0,6 \text{ h}^{-1}$ wurden an zwei Terminen Gebäude-Messungen durchgeführt (Abbildung 28 und Abbildung 29):

- 01. und 03.06.2021: $T_{\text{ext}} = 23\text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 25\text{ °C}$, Windstärke 1 bft, Minneapolis Blower Door Model 4.1, DG 700
- 05.10.2021: $T_{\text{ext}} = 12\text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 21\text{ °C}$, Windstärke 1 bft, Minneapolis Blower Door Model 4.1, DG 700
- 05.10.2021: $T_{\text{ext}} = 12\text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 21\text{ °C}$, Windstärke 1 bft, Retrotec Blower Door 3000 SR, DG 700
- 05.10.2021: $T_{\text{ext}} = 12\text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 21\text{ °C}$, Windstärke 1 bft, Wöhler BC 600 Blower Check, DG 700

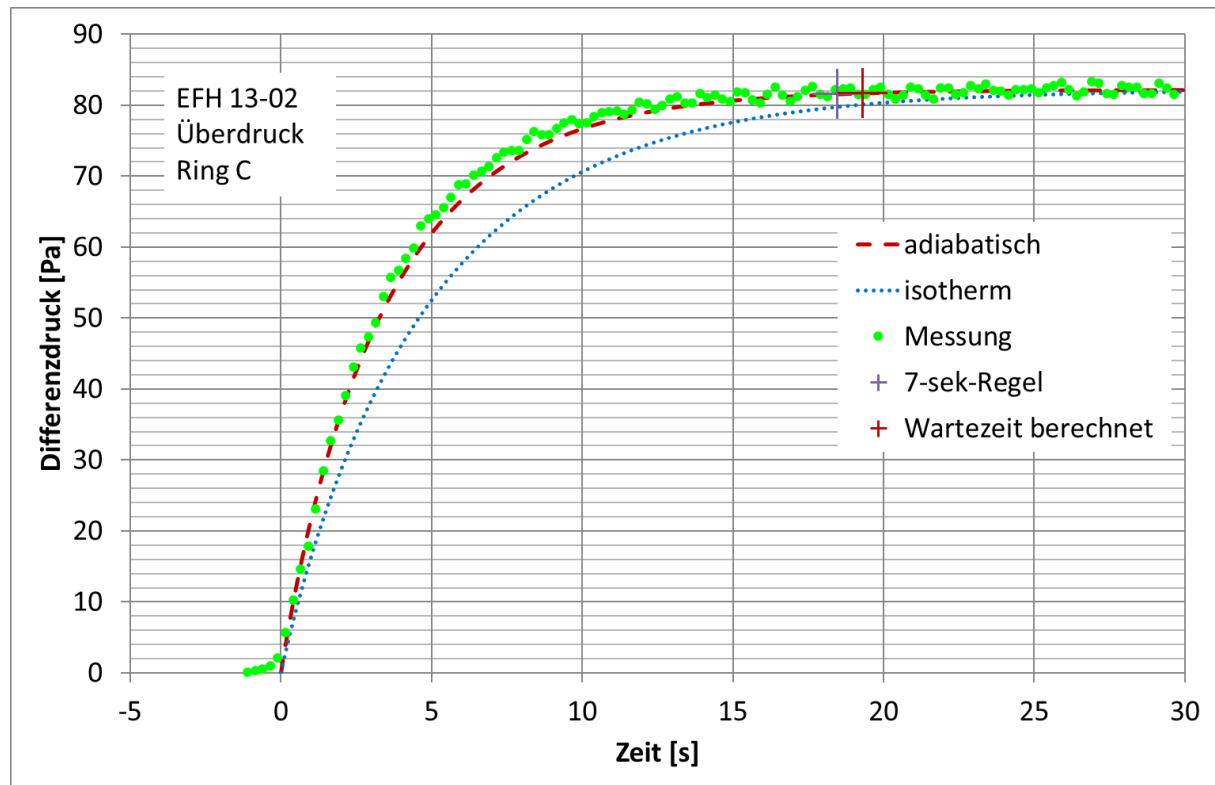
Abbildung 28 Minneapolis Blower Door Model 4.1 (links) und Retrotec 3000 SR (rechts) auf der Nordseite des Hauses



Abbildung 29 Wöhler BC 600 auf der Südseite des Hauses



Abbildung 30 Gemessener Verlauf des Differenzdrucks im Vergleich zu Berechnungen ohne Berücksichtigung der Ventilatorcharakteristik an einem Beispiel für das Niedrigenergie-Einfamilienhaus



Mit ersten Auswertungen der Messungen wurde sofort begonnen, noch ohne Berücksichtigung der Ventilatorcharakteristik. Ein Beispiel zeigt Abbildung 30. Die gemessene Kurve (grüne Punkte) stimmt relativ genau mit der berechneten Kurve unter der Annahme adiabatischer Verhältnisse (rot gestrichelte Linie) überein. Genauer betrachtet erfolgt in diesem Beispiel die Annäherung an den Gleichgewichtsdifferenzdruck nach der Messung aber etwas schneller als nach der einfachen Theorie. Das liegt an der Steigung der Ventilatorcharakteristik. Nicht betrachtet werden die ersten Messpunkte, während der Ventilator anläuft.

In der Grafik ist als rotes Kreuz der nach der adiabatischen Näherung berechnete Zeitpunkt eingezeichnet, zu dem die Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck weniger als 0,5 Pa beträgt (Wartezeit berechnet). Das violette Kreuz zeigt die Wartezeit nach der in [Zeller 2020] publizierte Sieben-Sekunden-Regel, hier gerechnet ab dem Zeitpunkt (5 s), ab dem die Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck 20 Pa beträgt. Die berechnete Wartezeit ist hier länger als die nach der 7s-Regel, weil der untersuchte Messpunkt mit 80 Pa deutlich oberhalb von 50 Pa liegt, dem Wert, aus dem die 7s-Regel abgeleitet wurde.

5.9 Messungen Passivhaus-Bürogebäude

In einem Passivhaus-Bürogebäude mit $n_{L50} = 0,27 \text{ h}^{-1}$ wurde an zwei Terminen je eine Gebäude-Messung durchgeführt:

- 28.08.2021: $T_{\text{ext}} = 15 \text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 22 \text{ °C}$, Windstärke 1 bft, Minneapolis Blower Door Model 4.1, DG 700
- 08.01.2022: $T_{\text{ext}} = 2,5 \text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 21 \text{ °C}$, Windstärke 1 bft, Minneapolis Blower Door Model 4.1, DG 1000

5.10 Messungen von sehr dichten Gebäuden

5.10.1 Passivhaus-Einfamilienhaus

In einem Passivhaus-Einfamilienhaus mit $n_{L50} \approx 0,15 \text{ h}^{-1}$ wurde an einem Termin eine Gebäude-Messung durchgeführt:

- 17.08.2021: $T_{\text{ext}} = 21 \text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 25 \text{ °C}$, Windstärke 1 bft, Retrotec Blower Door Model 3000 SR, DG 700

Auch hier wurden erste Auswertungen frühzeitig, noch ohne Berücksichtigung der Ventilator Kennlinie begonnen.

5.10.2 CO₂-Box

In der CO₂-Box der Firma Toggenburger mit $n_{L50} = 0,09 \text{ h}^{-1}$ wurde an einem Termin eine Gebäude-Messung durchgeführt:

- 18.08.2022: $T_{\text{ext}} = 22,5 \text{ °C}$, $T_{\text{int}} = 23 \text{ °C}$, Windstärke 0 bft, Minneapolis Duct Blaster, DG 1000

Bei der CO₂-Box handelt es sich um einen quaderförmigen Kiesbunker mit einem Volumen von 1000 m³. Vier Seiten sind betoniert (unten, hinten, seitlich). Die Decke über der Box besteht aus einer Holzbalkendecke mit einer oberseitig aufgeklebten Luftdichtungsbahn. Die Vorderseite besteht aus einer stabilen Plane. Zur Nutzung wird die Box mit Betonschotter, d.h. zerkleinertem Recycling-Beton befüllt. Anschließend wird sie mit der Plane verschlossen und CO₂ eingeblasen. Das CO₂ wird durch chemische Reaktion mit noch nicht abgebindenen Resten des Zements gebunden.

Bei der Messung war die Box nicht befüllt. Die Messung konnte nur bei Überdruck durchgeführt werden, weil bei Unterdruck die Unterseite der Plane aus dem der Beschwerung dienenden Kies auf der Außenseite herausgezogen würde.

Abbildung 31 CO₂-Box



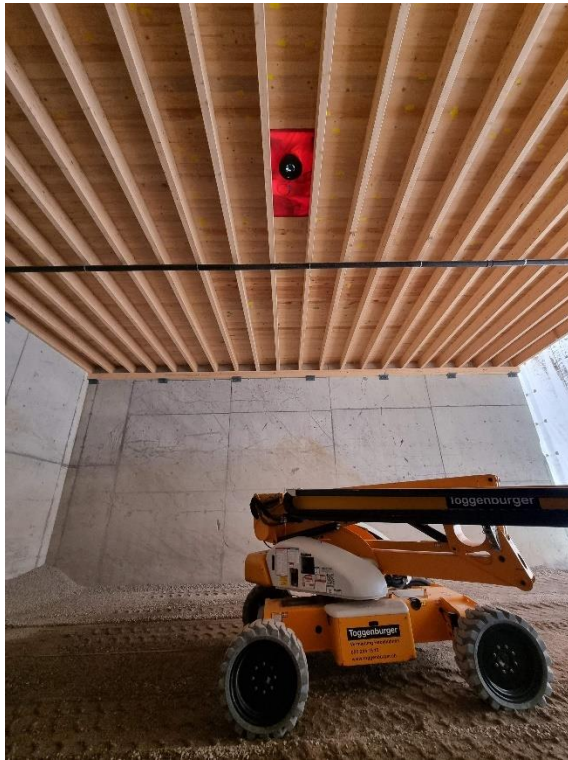
Abbildung 32 Innenansicht der CO₂-Box mit dem in eine Deckenöffnung eingebauten Duct Blaster

Foto: Michael Wehrli, Marthalen, Schweiz

Abbildung 33 Blick auf die Decke der CO₂-Box während der Messung

Kurz nach Beginn der Messung wurde der Notebook-Ständer nahe an den Rand der Holzbalkendecke gestellt, weil sich herausgestellt hatte, dass Schritte auf der Decke abseits des Randbereichs zu Schwankungen der Druckmesswerte führen.



Abbildung 34 Die aus einer Plane bestehende Vorderseite der CO₂-Box wölbt sich bei Überdruck

An der horizontalen Latte am oberen Bildrand ist das Lot aufgehängt, mit dessen Hilfe die Lage der Ausbuchtung in der Mitte der Plane gemessen wird.



Eine Besonderheit der CO₂-Box im Hinblick auf die Wartezeit ist die aus einer Plane bestehende Vorderseite. Die Plane wölbt sich bei Überdruck nach außen, so dass das Luftvolumen größer wird. Dies führt zu einer erheblichen Verlängerung der Wartezeit. Um die Volumenvergrößerung abschätzen zu können, wurde einerseits mit einem Lot, andererseits mit einem Laser-Entfernungsmesser die Größe der Ausbuchtung der Plane bei jedem Messpunkt der Gebäudekennlinie gemessen.

5.11 Messdaten von Dritten

Von der Blower Door GmbH, Stefanie Rolfmeier, wurden Messdaten eines Hochregallagers mit $n_{L50} = 0,014 \text{ h}^{-1}$ und die Daten einer Messung bei Überdruck in einer anderen großen Lagerhalle mit $n_{L50} = 0,034 \text{ h}^{-1}$ zur Verfügung gestellt. In beiden Fällen waren der Gebäude-Differenzdruck und der Gebläse-Differenzdruck während der gesamten Messreihe kontinuierlich aufgezeichnet worden. Somit war eine Auswertung zur Ermittlung der erforderlichen Messdauer möglich.

5.12 Auswertung der Messdaten

5.12.1 Allgemein

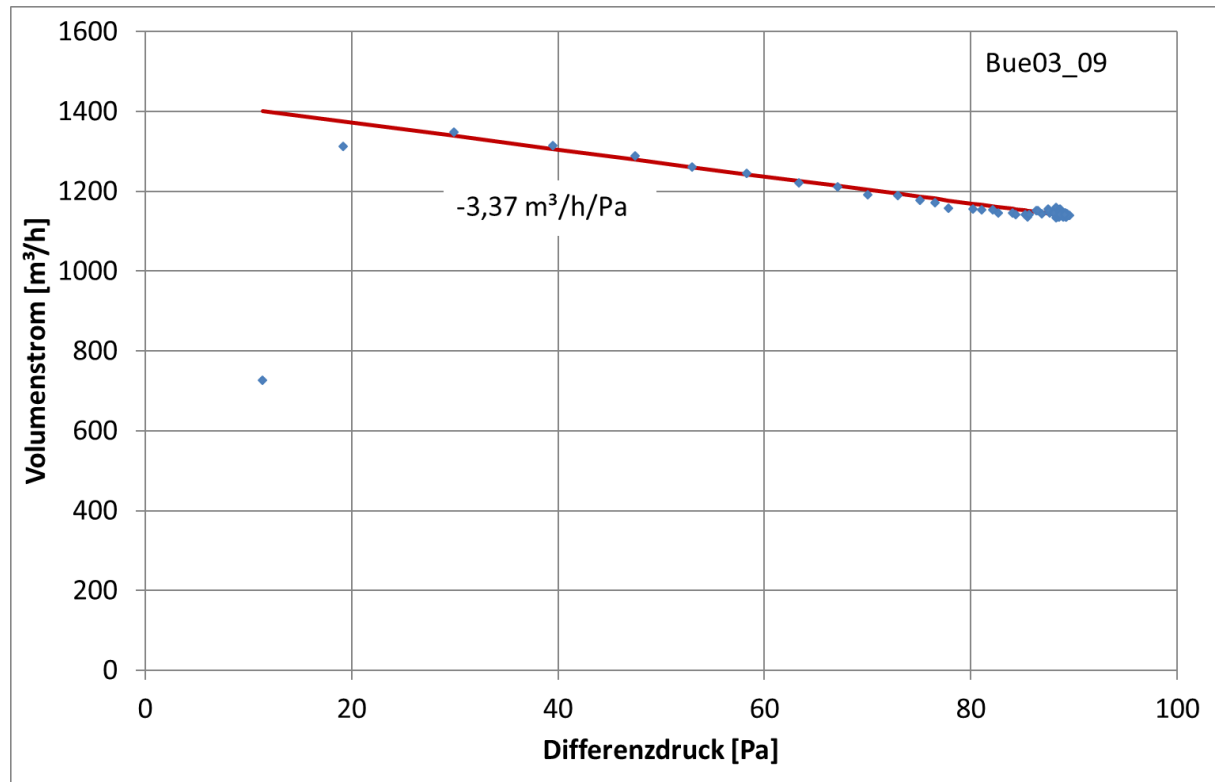
Für die Auswertungen wurden folgende Parameter verwendet:

- Luftdruck berechnet aus der geographischen Höhe des Gebäudestandorts
- Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa entsprechend den Messergebnissen mit der jeweiligen Blower Door und der jeweiligen Blende beim jeweiligen Termin

Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit Excel. Für den Vergleich mit der Theorie war es erforderlich, zunächst aus den Messdaten die Steigung der jeweiligen Ventilator Kennlinie zu ermitteln. Diese ergab sich aus

den gleichzeitig gemessenen Werten von Volumenstrom und Differenzdruck (Abbildung 35), indem die Näherungsgerade nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung berechnet wurde. Die ersten Messpunkte während des Anlaufens des Ventilators wurden dabei nicht in die Auswertung einbezogen.

Abbildung 35 Kennlinie des Ventilators bei einer der Messungen



Für jede Messreihe wurde die entsprechende Differentialgleichung nach (8) bzw. (9) numerisch für den Fall adiabatischer Verhältnisse gelöst. Der Ergebnisse von Messung und Berechnungen wurden grafisch dargestellt (Beispiel: Abbildung 36).

Die numerische Lösung der Differentialgleichung ist in den Grafiken als dunkelrote durchgezogene Linie („Theorie“) dargestellt. Die Näherung durch eine Exponentialfunktion nach (14) ist zum Vergleich als orange gestrichelte Linie wiedergegeben („Näh. Theorie“). Die sichtbare Differenz bei diesem Beispiel kommt dadurch zustande, dass der Gebäudedruck über den großen Bereich von 12 Pa bis 90 Pa verändert wurde. Als durchgezogene blaue Linie ist das Berechnungsergebnis für den Fall einer horizontalen Ventilator Kennlinie eingezeichnet („ $q(p) = \text{const}$ “).

Die grünen Punkte sind die Messpunkte. Die Annäherung an den Gleichgewichtszustand erfolgt bei diesem Beispiel nach der Messung deutlich langsamer als nach der Theorie. Die relativ gute Übereinstimmung mit der Berechnung für einen konstanten Volumenstrom ist Zufall.

Um die gemessene Wartezeit trotz der statistischen Schwankungen der Messwerte sinnvoll ermitteln zu können, wurde die Näherungsgleichung nach (14) für die Messwerte, ebenfalls nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung, berechnet (grüne durchgezogene Linie „Näh. Messung“).

Die Wartezeit, d.h. bei diesem Beispiel die Dauer für die Druckerhöhung von 70 Pa auf 89,5 Pa, ergibt sich aus der Berechnung zu 19,3 s, aus der Auswertung der Messung zu 24,9 s.

Abbildung 36 Vergleich zwischen Messung und Berechnung

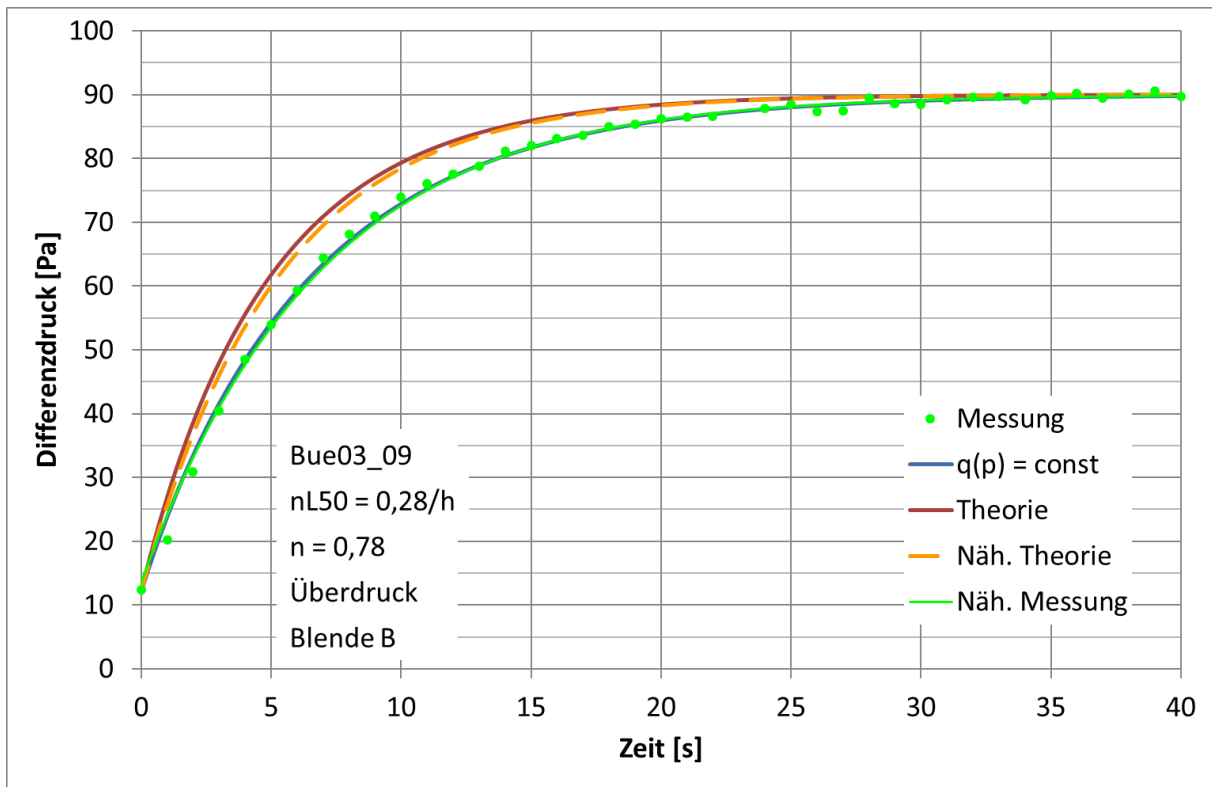


Abbildung 37 Vergleich zwischen Messung und Berechnung in logarithmischer Darstellung

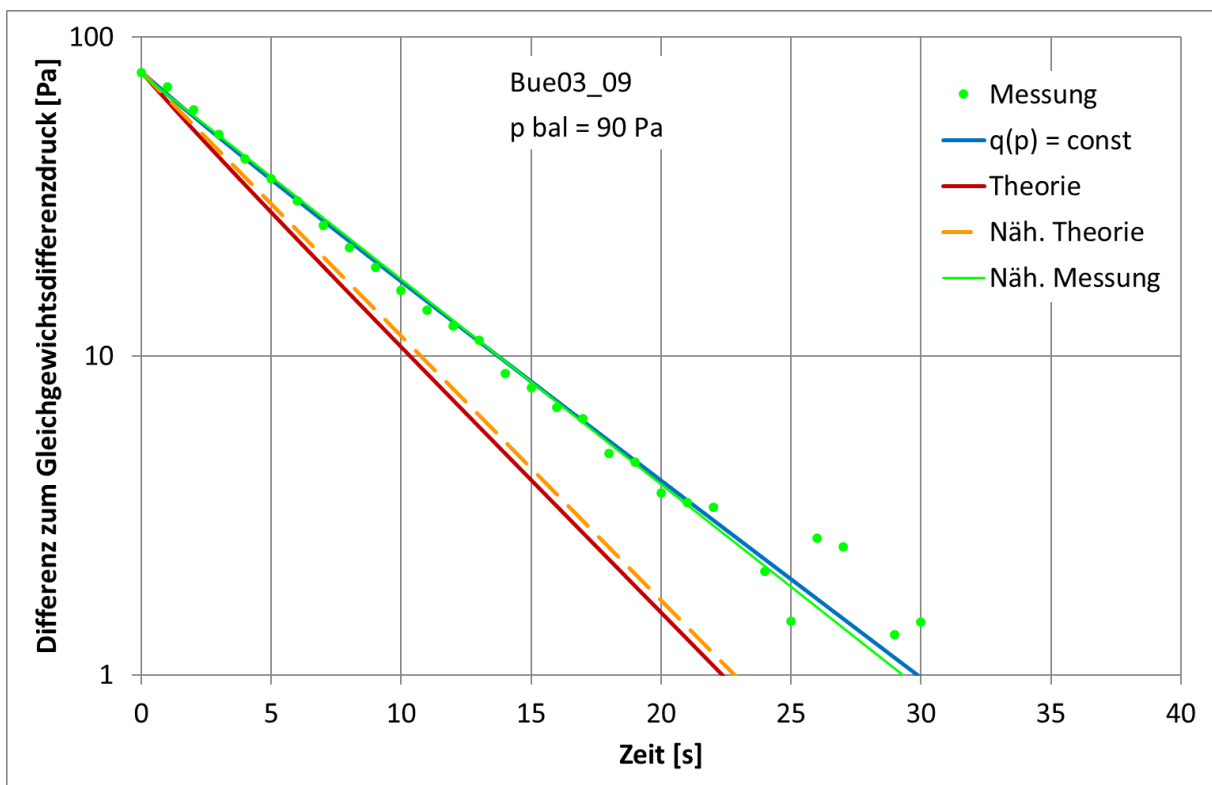


Abbildung 37 zeigt die gleiche Messung in logarithmischer Darstellung. Statt dem Gebäude-Differenzdruck ist als Ordinate der Betrag der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck in einer logarithmischen Skala aufgetragen. Die in Abbildung 36 dargestellten Näherungen durch eine Exponentialfunktion werden in dieser Darstellung zu Geraden. Die anderen Kurven liegen nahe an einer Geraden, was zeigt, dass der Näherungsansatz sinnvoll ist.

Die anscheinend größere Streuung der Messwerte um die Ausgleichsgerade bei kleineren Abweichungen vom Gleichgewichtsdifferenzdruck kommt durch die logarithmische Skala zustande.

Die Ergebnisse aller ausgewerteten Messungen werden in 5.13 dargestellt.

5.12.2 Druckabfall auf Null

Obwohl dieser Fall für die Messpraxis irrelevant ist, erschien vor Projektbeginn der Vergleich zwischen Messung und Rechnung für den Druckabfall auf null, d.h. für das ausgeschaltete Gebläse besonders attraktiv: einerseits spielt hierbei die Ventilator Kennlinie keine Rolle, andererseits lässt sich die Differentialgleichung für die Druckänderung (1) in diesem Fall geschlossen lösen:

$$\Delta p = \left[\Delta p_0^{1-n} - p \cdot \kappa \cdot \frac{n_{L50}}{(50Pa)^n} \cdot (1-n) \cdot t \right]^{\frac{1}{1-n}}$$

Für diesen Fall wird der Gleichgewichtsdifferenzdruck von 0 Pa tatsächlich nach endlicher Zeit erreicht:

$$t(\Delta p = 0) = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\Delta p_0}{p} \cdot \left(\frac{50Pa}{\Delta p_0} \right)^n \cdot \frac{1}{1-n} \cdot \frac{1}{n_{L50}}$$

Diese Gleichungen gelten für $n < 1$. Für den Sonderfall $n = 1$, also für laminare Strömung, wird der Gleichgewichtszustand wie in den Fällen mit Ventilator asymptotisch angenähert.

Ein Beispiel für den Vergleich von Messung und Rechnung beim Druckabfall auf null zeigt Abbildung 38 in linearer und Abbildung 39 in logarithmischer Darstellung.

Laut Messung erfolgt die Druckänderung sehr viel langsamer als nach der Theorie erwartet. Die logarithmische Darstellung zeigt, dass die Messpunkte einer e-Funktion folgen bzw. zumindest nahe daran liegen. Möglicherweise hängen die Unterschiede zwischen Messung und Rechnung damit zusammen, dass bei kleinen Differenzdrücken in vielen Strömungspfaden die turbulente Strömung laminar wird. Auch könnte die an verschiedenen Leckagen unterschiedliche natürliche Druckdifferenz eine Rolle spielen.

Wegen der fehlenden Relevanz für die Messpraxis wurde das Thema nicht weiterverfolgt.

Abbildung 38 Vergleich zwischen Messung und Berechnung für den Druckabfall gegen Null

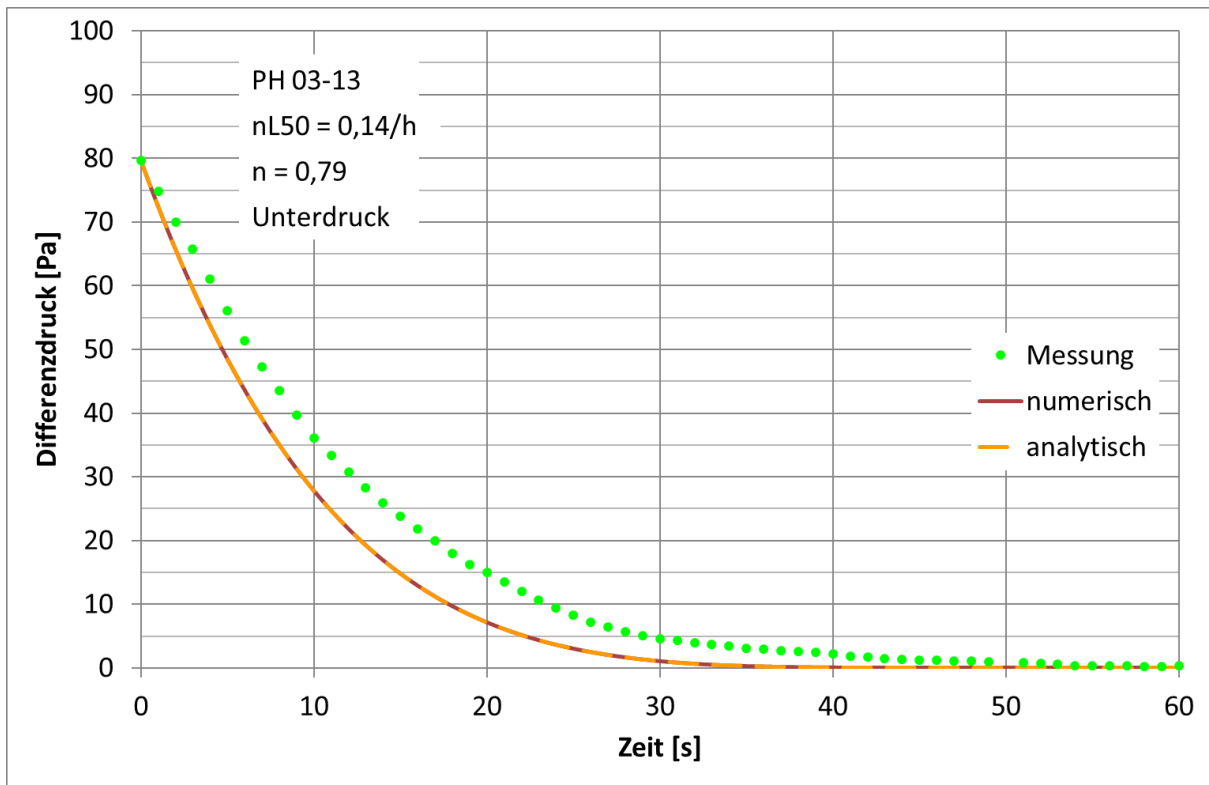
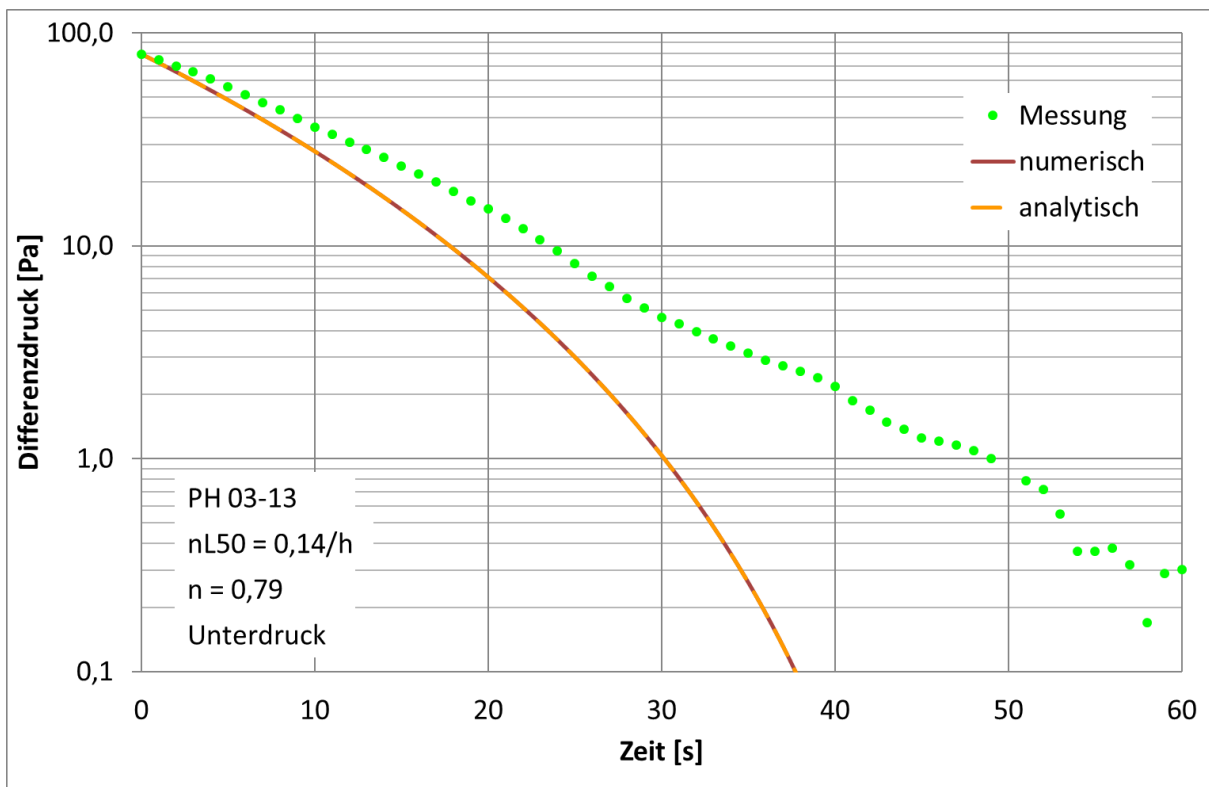


Abbildung 39 Vergleich zwischen Messung und Berechnung für den Druckabfall gegen Null in logarithmischer Darstellung

Die Messbedingungen waren hier sehr günstig, die Druckschwankungen sind hier extrem gering.



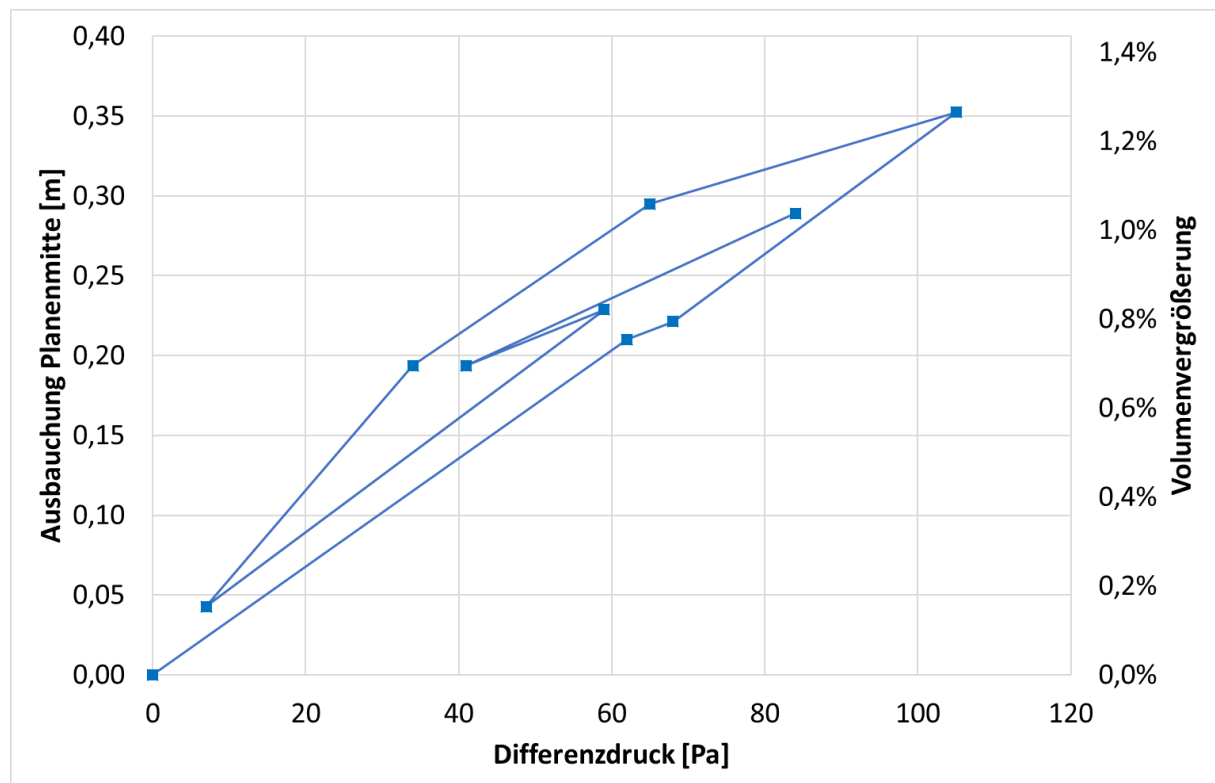
5.12.3 Auswertung Messung CO₂-Box

Bei der CO₂-Box war das Volumen aufgrund der flexiblen Plane auf der Vorderseite variabel. Um den Einfluss der Volumenänderung auf die Dauer des Druckaufbaus rechnerisch abschätzen zu können, musste die Volumenänderung ermittelt werden. Dazu wurde vor Ort für jeden stationären Zustand von Druck und Volumenstrom die Ausbauchung in der Mitte der Plane gemessen (vgl. 5.10). Aus der maximalen Ausbauchung in der Mitte wurde mittels eines einfachen geometrischen Modells die mittlere Ausbauchung abgeschätzt. Die relative Volumenänderung zwischen zwei stationären Zuständen ergibt sich aus der Änderung der mittleren Ausbauchung.

In Abbildung 40 sind die so gewonnenen Messwerte und die daraus abgeschätzte Volumenvergrößerung gegenüber dem ursprünglichen Volumen aufgetragen. Die Messpunkte sind in der Reihenfolge der Messungen miteinander verbunden, beginnend mit 0 Pa, 0 m. Die Steigung der Verbindungslinien entspricht jeweils dem Wert der relativen Volumenänderung w in %/Pa. Die Messkurve weist eine Hysterese auf: die Ausbauchung bei rund 60 Pa beträgt nach dem Druckanstieg zu Beginn rund 20 cm, nach einem Druckabfall knapp 30 cm. Die Erklärung könnte eine plastische Verformung der Plane sein. Auch könnte beim ersten Druckanstieg der untere Rand der Plane etwas unter der Kiesbeschwerung herausgezogen worden sein.

Aus dem jeweiligen Wert der relativen Volumenänderung w wurde jeweils der Faktor f_v nach Gleichung (47) berechnet. Die weitere Auswertung erfolgte wie oben beschrieben.

Abbildung 40 Ausbauchung der Plane der CO₂-Box und daraus berechnete Volumenvergrößerung in Abhängigkeit vom Differenzdruck



Versuchsweise wurden die Auswertungen nicht mit dem jeweiligen Wert der Volumenänderung w , sondern mit einem mittleren Wert für alle Messungen an der Box durchgeführt. Die Abweichungen zwischen gemessener Dauer des Druckaufbaus und der Berechnung wurden dadurch aber größer. Man kann also davon ausgehen, dass die in Abbildung 40 erkennbare Hysterese nicht durch Messfehler zustande kommt.

5.13 Vergleich zwischen Messung und Theorie

5.13.1 Allgemein

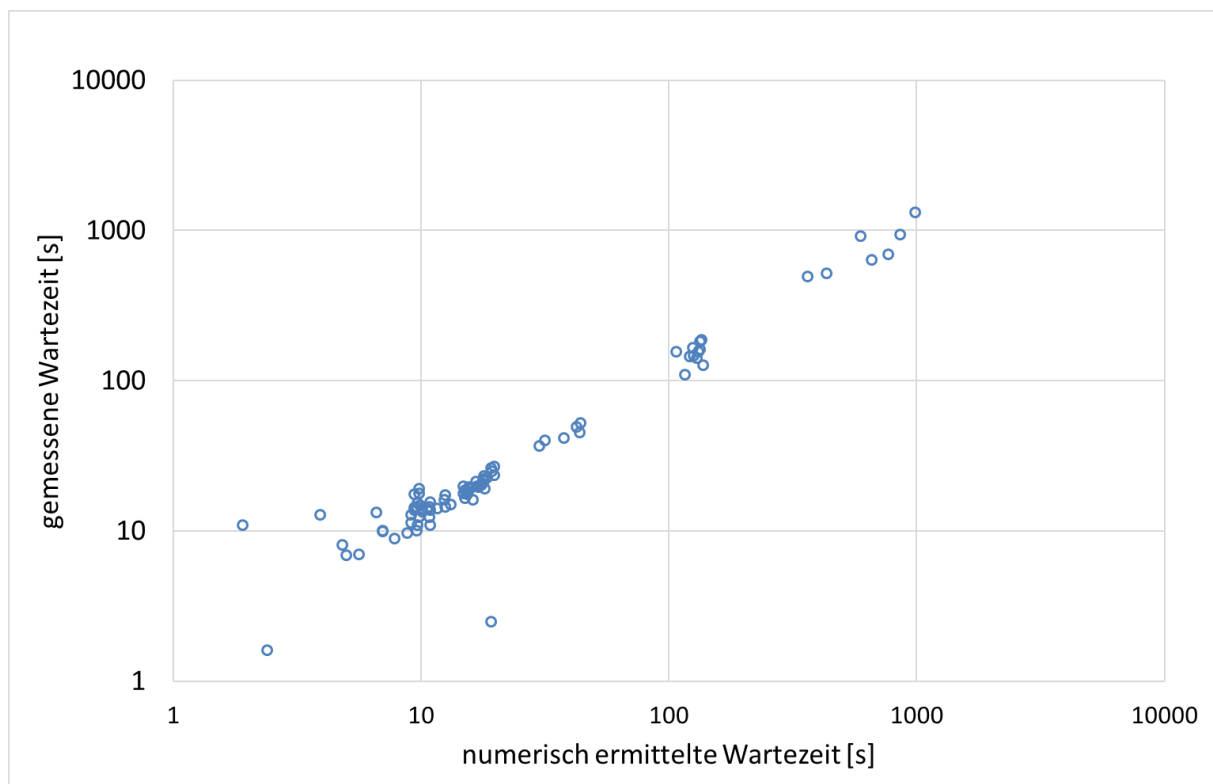
In Abbildung 41 sind die aus den Messwerten ermittelten Werte der Wartezeit in Abhängigkeit von den Werten dargestellt, die sich durch numerische Lösung der Differentialgleichung (8) bzw. (9) ergeben. Beide Achsen sind logarithmisch skaliert. Bei völliger Übereinstimmung zwischen Theorie und Messung würden alle Werte auf der Diagonalen liegen. Man sieht, dass die Werte nahe der Diagonalen liegen, dass es aber durchaus Abweichungen gibt.

Auffällig ist der Punkt bei einem Rechenwert von 19 s und einem Messwert von 2,5 s. Es handelt sich dabei um eine Unterdruckmessung, für die bei laufendem Gebläse eine offene Terrassentür geschlossen wurde. Der zusätzliche Volumenstrom durch die Bewegung des Türblatts bewirkte den schnellen Druckaufbau. Bei den weiteren Auswertungen blieben solche Messwerte unberücksichtigt.

Auffällig nach oben weichen die Punkte bei einem Rechenwert von 1,9 s und einem Messwert von 11 s sowie bei 3,9 s und 13 s ab. Sie stammen von Messungen, bei denen der Druckabfall gegen 0 beobachtet wurde. Auch solche Messungen des Druckabfalls gegen 0 wurden nicht weiter betrachtet, weil sie in der Messpraxis nicht vorkommen.

Abbildung 41 Vergleich der gemessenen Werte der Wartezeit mit den numerisch ermittelten Werten

Wegen des großen Wertebereichs wurden beide Achsen logarithmisch skaliert.

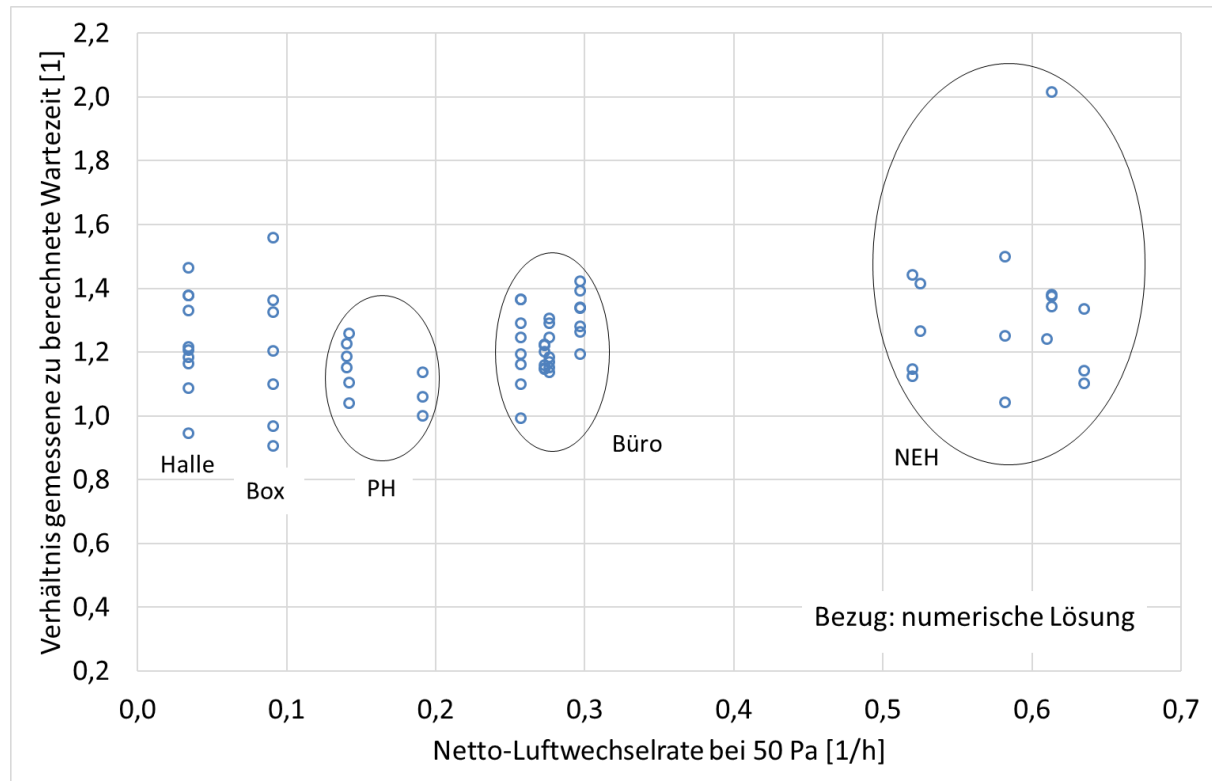


Kleinere Abweichungen sind besser zu erkennen in der Darstellung Abbildung 42. Dort ist für jede Messung der Quotient aus Messwert und Rechenwert aufgetragen. Bei guter Übereinstimmung liegen die Werte nahe bei 1. Dargestellt sind die Ergebnisse von über 70 „regulären“ Messungen, d.h. solchen, bei denen nicht von vornherein eine Abweichung zwischen Messung und Rechnung zu erwarten ist.

Man erkennt, dass die meisten Punkte oberhalb von 1 liegen – die gemessene Wartezeit ist also meistens größer als die numerisch ermittelte. Der Mittelwert des Verhältnisses Messung zu Rechnung beträgt 1,24, d.h. die gemessene Dauer ist im Mittel 24 % länger als die berechnete.

Eine Erklärung dafür liefert der Wärmeübergang zwischen Innenluft und den inneren Oberflächen (vgl. 5.4). Dieser ist in Differentialgleichung (9) nicht berücksichtigt – die Gleichung wurde unter der Annahme adiabatischer Verhältnisse aufgestellt.

Abbildung 42 Verhältnis der gemessenen zu den berechneten Werten der Wartezeit in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa.



Bei der Auswertung der Messungen an der CO₂-Box wurde das variable Volumen durch den vorderen Abschluss mit einer Plane bei den berechneten Werten berücksichtigt. Die Messung der Volumenänderung war allerdings relativ ungenau – dies erklärt die starke Streuung der Werte in der Abbildung. Bei den anderen Messobjekten wurde rechnerisch keine Volumenänderung berücksichtigt. Es ist aber möglich, dass auch dort, beispielsweise durch Luftdichtheitsschichten aus Bahnen, kleine Volumenänderungen stattfanden. Auch diese würden bewirken, dass die gemessene Wartezeit länger als die berechnete ist.

Ein Extrembeispiel ist der Punkt bei $n_{L50} = 0,61 \text{ h}^{-1}$ und einem Wartezeitverhältnis von 2,02. Es handelt sich dabei um den ersten Messpunkt nach einem Wechsel von Unterdruck zu (nur) 22 Pa Überdruck. Bei dieser Messung waren im Niedrigenergiehaus gleichzeitig drei Blower Doors eingebaut. Es war zusätzliche Luft erforderlich, um die Ausbauchung der Planen nach außen zu bewirken. Dies verlängerte die Dauer des Druckaufbaus bei der ersten Überdruckmessung. Ähnlich verhält es sich bei dem Punkt mit $n_{L50} = 0,58 \text{ h}^{-1}$ und einem Wartezeitverhältnis von 1,5. Der relative Unterschied zwischen Rechnung und Messung ist hier weniger groß, weil das Gebläse mit dem Volumenstrom für einen Gleichgewichtsdifferenzdruck von 75 Pa lief.

In der Grafik nicht dargestellt sind die Ergebnisse der Messungen, bei denen der Druckaufbau nach dem Schließen eines Fensters beobachtet wurde und nicht die Ergebnisse für den Druckabfall auf null.

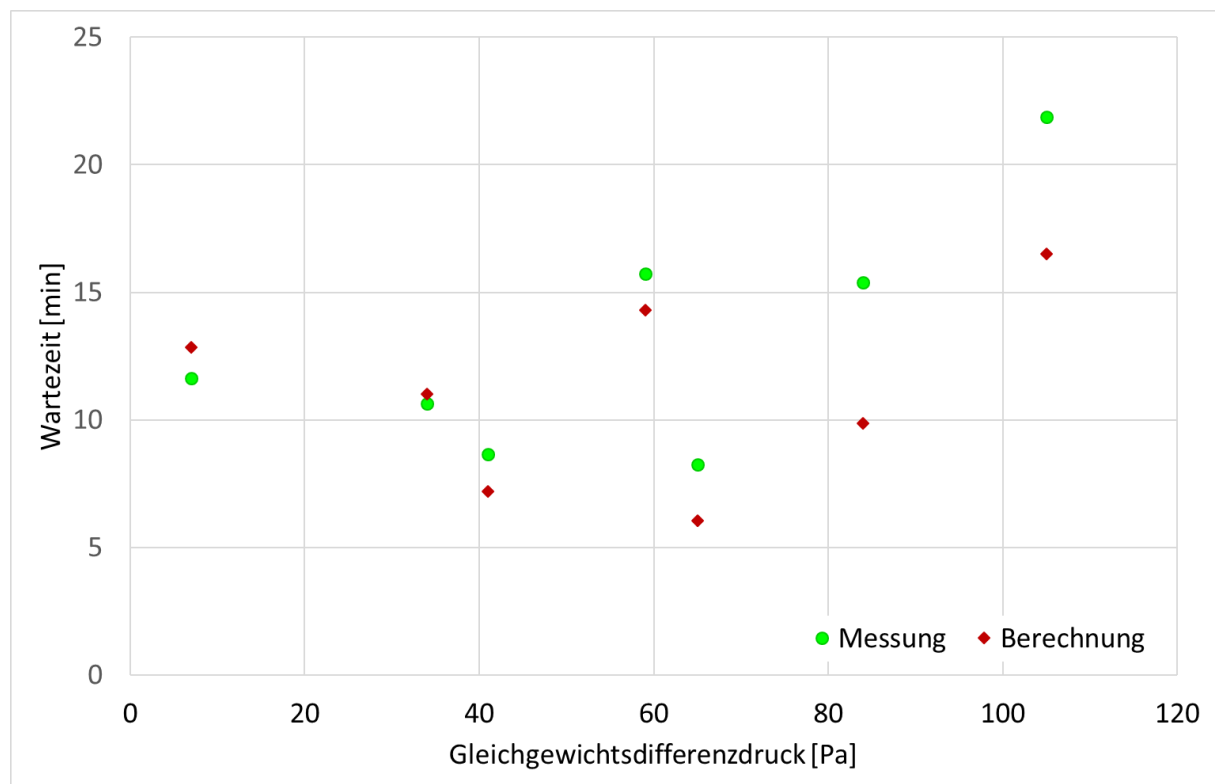
5.13.2 Auswertung Messungen CO₂-Box

In Abbildung 43 sind gemessene und berechnete Werte der Wartezeit für die Messungen an der CO₂-Box in Abhängigkeit vom Differenzdruck dargestellt. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung sind teilweise relativ groß. Eine Ursache dafür dürfte die Messunsicherheit bei der Ermittlung des zusätzlichen Volumens sein: Die Ausbuchtung der Plane änderte sich von einer Messung zur nächsten um jeweils 3 bis 30 cm bei einer Messunsicherheit der Längenmessung von schätzungsweise ± 5 mm.

Im Mittel liegen die gemessenen Werte um 19 % über den berechneten.

Die Wartezeiten für die Messpunkte bei 65 Pa und 59 Pa liegen relativ weit auseinander, obwohl man hier ähnliche Ergebnisse erwarten würde. Das gilt sowohl für die Berechnung, als auch für die Messung. Die Ursache ist die im Zusammenhang mit Abbildung 40 angesprochene Hysterese der Ausbauchung der Plane.

Abbildung 43 Gemessene und berechnete Werte der Wartezeit bei variablem Volumen



5.14 Vergleich zwischen Messung und Sieben-Sekunden-Regel

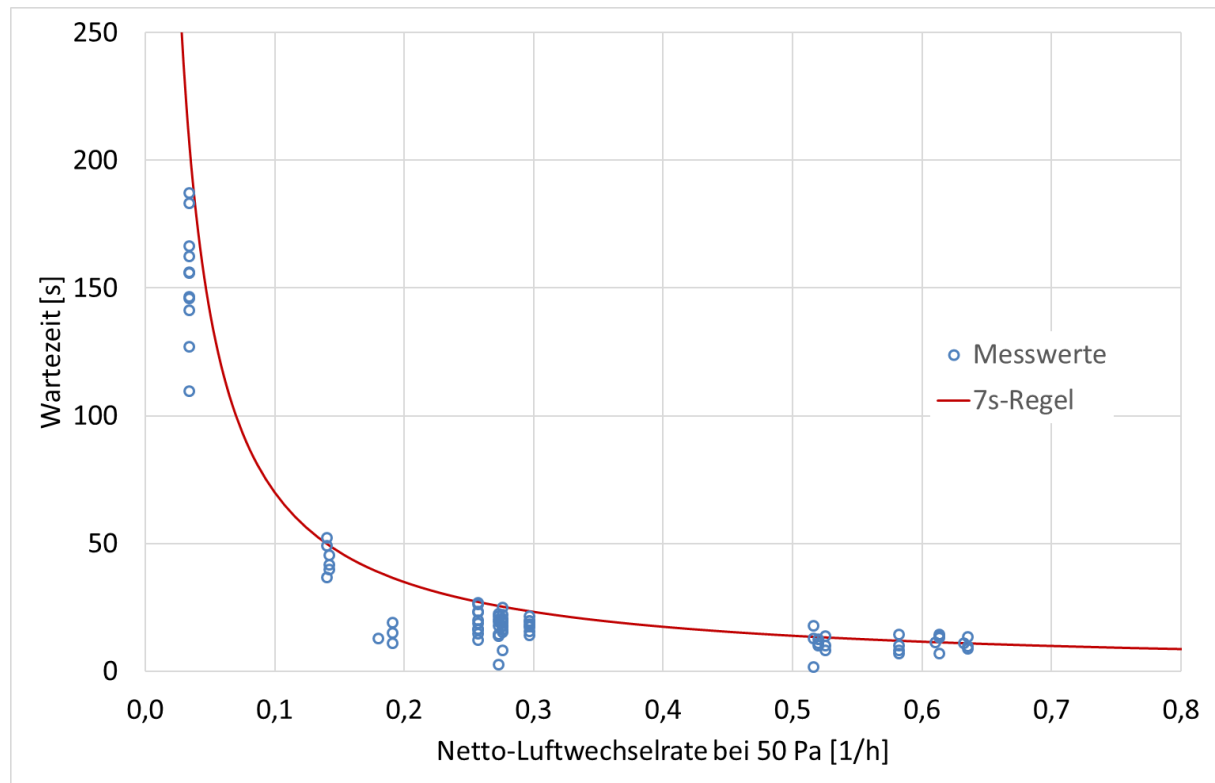
Für die Messpraxis sind die Gleichungen zur Berechnung der Wartezeit wenig hilfreich. Auch die Näherung durch eine Exponentialfunktion ist nicht anwendbar, weil wichtige Parameter wie der Strömungsexponent und die Steigung der jeweiligen Ventilator Kennlinie zum Zeitpunkt der Messung nicht bzw. noch nicht bekannt sind. Eine einfache Formel zur Abschätzung der erforderlichen Wartezeit wurde in [Zeller 2020] vorgeschlagen: Man dividiert die Zahl 7 durch den Zahlenwert der Netto-Luftwechselrate (in h⁻¹) um die Wartezeit in Sekunden zu erhalten. Die Netto-Luftwechselrate ist während der quantitativen Messung ungefähr bekannt, weil zuvor eine Vorprüfung zur Suche nach großen Undichtheiten bei 50 Pa Unterdruck durchgeführt wird.

In Abbildung 44 ist die Wartezeit nach der 7s-Regel in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate als rote Linie dargestellt. Blaue Kreise stehen für Messwerte der Wartezeit. Gut zu erkennen ist, dass die Wartezeit

näherungsweise umgekehrt proportional zur Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa ist. Die 7s-Regel liegt einigermaßen auf der sicheren Seite – fast immer ist die gemessene Wartezeit kleiner als der Wert nach der 7s-Regel. Allerdings führt die 7s-Regel oft zu einer unnötig langen Wartezeit.

Nicht in der Grafik zu sehen sind die Werte für die Messungen an der CO₂-Box. Sie liegen im Bereich von 500 s bis 1300 s und sind damit außerhalb des Wertebereichs in der Grafik. Wegen der beweglichen Plane als Abdichtung auf der Vorderseite betragen die Messwerte hier auch ein Vielfaches des Wertes nach der 7s-Regel von 77 s.

Abbildung 44 Gemessene und abgeschätzte Werte der Wartezeit in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa



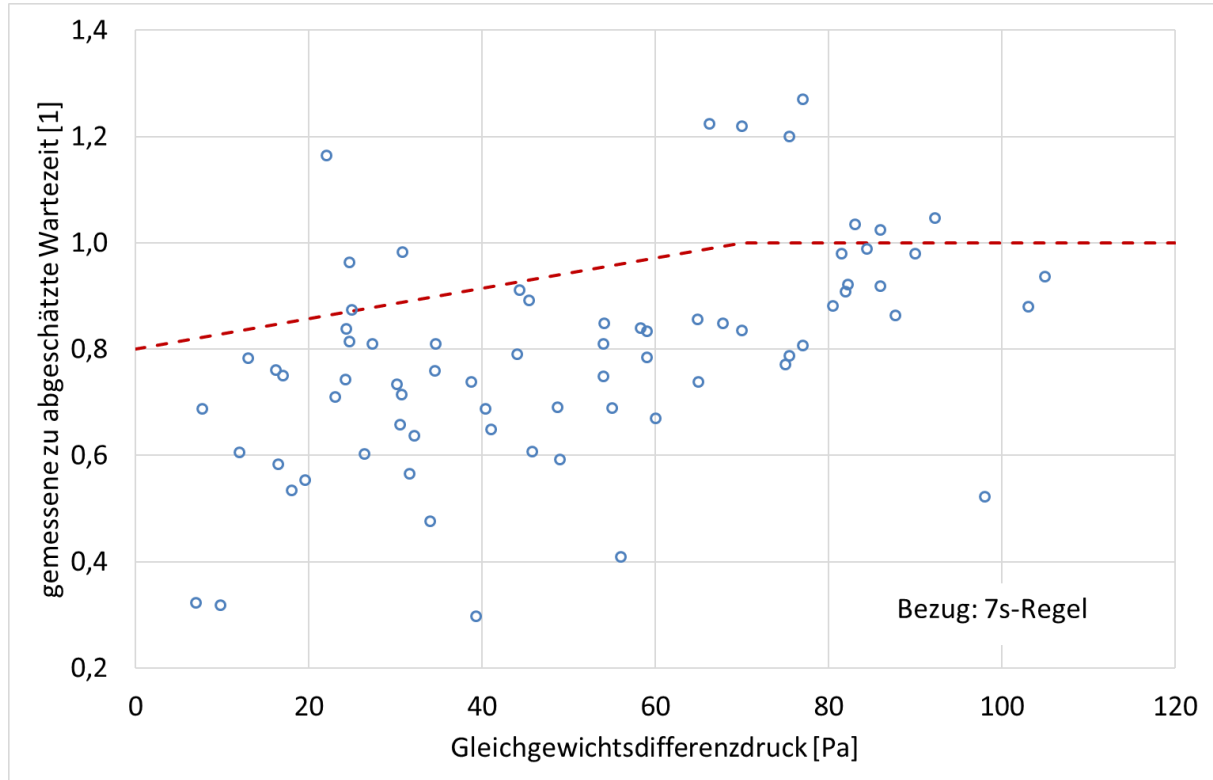
Ein weiterer Parameter, der sich neben der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa auf die Wartezeit auswirkt, könnte vor Ort während der Messung ebenfalls herangezogen werden: der jeweilige Gleichgewichtsdifferenzdruck. Nach dem Verstellen des Gebläses weiß man zwar nicht genau welcher Gleichgewichtsdifferenzdruck sich einstellen wird, aber mit etwas Erfahrung und insbesondere nachdem schon einzelne Messpunkte der Leckagekurve aufgenommen wurden, lässt sich ungefähr einschätzen, wie das Gebläse eingestellt werden muss, um einen bestimmten Gleichgewichtsdifferenzdruck zu erhalten.

Daher ist es interessant, den Einfluss des Gleichgewichtsdifferenzdrucks nicht nur theoretisch (vgl. (19)), sondern auch anhand der Messwerte zu untersuchen. Abbildung 45 zeigt die Abhängigkeit der Messergebnisse vom Gleichgewichtsdifferenzdruck. Als Ordinate ist der Quotient aus der gemessenen Wartezeit und dem nach der 7s-Regel abgeschätzten Wert aufgetragen. Wie zu erwarten, steigt der Wert mit zunehmendem Differenzdruck etwas an. Die meisten Werte sind unter 1, die 7s-Regel liegt also eher auf der sicheren Seite.

Die meisten Werte sind kleiner als 1, weil bei der Herleitung der 7s-Regel die Steigung der Ventilator Kennlinie nicht berücksichtigt ist, die eine Verkürzung der Dauer des Druckaufbaus bewirkt. Die starke Streuung der Werte in der Abbildung ist darauf zurückzuführen, dass die Werte für die relative Steigung der

Ventilator Kennlinie stark variieren. Die kleinsten Werte in Abbildung 45 sind auf steile Ventilator Kennlinien zurückzuführen.

Abbildung 45 Verhältnis der gemessenen zu der nach der 7s-Regel abgeschätzten Wartezeit in Abhängigkeit vom Gleichgewichtsdifferenzdruck.



Die fünf Werte über 1,1 stammen aus Messungen im Niedrigenergiehaus. Die Ventilator Kennlinien waren bei diesen Messungen annähernd horizontal. Eine Erklärung für die deutliche Überschreitung der 7s-Regel wurde aber nur im Fall des Punktes bei 22 Pa gefunden. Es handelt sich um den oben erwähnten ersten Messpunkt einer Messreihe bei Überdruck. Messungenauigkeiten der Wartezeit aufgrund der kurzen Dauer von nur wenigen Sekunden könnten in den anderen Fällen eine Rolle spielen.

Die nach Gleichung (19) bzw. Abbildung 8 bis Abbildung 10 zu erwartende Erhöhung der gemessenen Wartezeit mit steigendem Gleichgewichtsdifferenzdruck ist in Abbildung 45 erkennbar. Die Steigung ist aber wegen dem Einfluss der Ventilator Kennlinien und wegen der eher großen Strömungsexponenten nicht sehr groß.

Es wäre also möglich, in einer Formel für die erforderliche Wartezeit auch den Gleichgewichtsdifferenzdruck zu berücksichtigen. In Abbildung 45 ist ein Vorschlag dazu als rot gestrichelte Linie eingezeichnet. Der Effekt ist aber nicht sehr groß: Für einen Messpunkt bei 20 Pa beispielsweise könnte die Wartezeit gegenüber der 7s-Regel um 14 % verringert werden. Beim jeweils ersten Messpunkt einer Messreihe sollte allerdings die Wartezeit nicht verkleinert werden, um die erforderliche Zeit für das Ausbauchen der Plane der Blower Door zu berücksichtigen.

Die Formel für die Wartezeit entsprechend Abbildung 45 lautet für Werte des Gleichgewichtsdifferenzdrucks unter 70 Pa:

$$t_p = \left(5,6 \frac{s}{h} + 0,02 \frac{s}{h \cdot Pa} \cdot \Delta p_{bal} \right) \cdot \frac{1}{n_{L50}} \quad (56)$$

mit:

t_p	Wartezeit [s]
Δp_{bal}	Gleichgewichtsdifferenzdruck [Pa]
n_{L50}	Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa, hier in [h^{-1}]

Für Werte des Gleichgewichtsdifferenzdrucks über 70 Pa kann die 7s-Regel beibehalten werden:

$$t_p = 7 \frac{s}{h} \cdot \frac{1}{n_{L50}}$$

Grundsätzlich könnte Formel (56) auch oberhalb von 70 Pa angewandt werden. Die Begrenzung der Wartezeit nach oben wird aber vorgeschlagen, um das Aufnehmen von Messpunkten bei höheren Differenzdrücken, die die Messgenauigkeit verbessern, nicht unattraktiv zu machen.

5.15 Beschreibung und Begründung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Während der Projektlaufzeit wurde kein Hochregallager mit Inertgasatmosphäre gefunden, das als Messobjekt hätte herangezogen werden können. Stattdessen konnten Messungen in der CO₂-Box (vgl. 5.10) durchgeführt werden. Dieses Objekt war mit einer Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa von 0,09 h⁻¹ sehr dicht und insbesondere dichter als die anderen eigenen Messobjekte, es war aber weniger dicht, als ein Hochregallager, wie vorgesehen.

Die Besonderheit bei der CO₂-Box ist das variable Volumen durch den vorderen Abschluss mit einer Plane. Die Wartezeit wird dadurch erheblich verlängert. Es lassen sich Schlussfolgerungen für andere Objekte mit beweglicher Hüllfläche ziehen, was in der ursprünglichen Planung nicht vorgesehen war, für die Messpraxis aber durchaus relevant ist.

Für die Auswertung der Messungen der CO₂-Box war es erforderlich, den Einfluss einer beweglichen Luftdichtheitsbahn auf den Verlauf des Differenzdrucks theoretisch herzuleiten. Diese Herleitung wird in 5.5.3 beschrieben, einschließlich einer geschlossen lösbaren Näherungsgleichung.

Wie vorgesehen, wurde der Einfluss einer großen Zahl von Parametern untersucht (5.5). Offen bleibt allerdings weiterhin der Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenluft (5.5.5).

Erfreulicherweise war es möglich, zu der im Allgemeinen nur numerisch lösbaren Differentialgleichung für adiabatische Verhältnisse (1) die geschlossen lösbare Näherungsgleichung (14) anzugeben, die es erlaubt, mit einfachen Mitteln eine große Zahl von Varianten zu rechnen. Analog gibt es auch für das Differentialgleichungssystem (33) und (34), das auch den Wärmeübergang zwischen Innenluft und Oberflächen berücksichtigt, eine geschlossen lösbare Näherungsgleichung (41).

6. Ergebnisse

6.1 Empfehlungen für Messteams

Der ursprüngliche Anstoß für dieses Forschungsprojekt kam aus der Messpraxis. 2019 stellte Stefanie Rolfsmeier von der Blower Door GmbH dem Autor die Frage, ob man die erforderliche Wartezeit nicht berechnen könne. Deshalb sollen die Empfehlungen für Messteams am Anfang dieses Kapitels mit den Ergebnissen stehen.

6.1.1 Wartezeit bei beweglichen Luftdichtheitsschichten

Bewegliche Luftdichtheitsschichten, also beispielsweise Folien, haben einen erheblichen Einfluss auf die erforderliche Wartezeit. Das Beispiel in Abschnitt 5.5.3 zeigt, dass eine bewegliche Folie im Dach eines eingeschossigen Gebäudes eine Verlängerung der Wartezeit um den Faktor 15 zur Folge haben kann.

Es empfiehlt sich daher, vor einer Messung das Zusatzvolumen abzuschätzen, das durch die veränderliche Lage der Folie entsteht, und dieses mit dem Luftvolumen des Gebäudes zu vergleichen. In der Regel ist die Volumenänderung sehr klein, daher ist es praktisch, das Verhältnis in Promille bzw. in Liter pro Kubikmeter anzugeben. Beträgt die relative Volumenänderung $\Delta V/V$ weniger als 0,05 ‰, ist ihr Einfluss vernachlässigbar. Zu berücksichtigen bleibt dann noch die Wartezeit aufgrund der Dichteänderung (siehe unten).

Bei größeren Werten von $\Delta V/V$ wird die Wartezeit t_v aufgrund der Volumenänderung abgeschätzt:

$$t_v \approx 20 \frac{s}{h \text{ ‰}} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{n_{L50}} \quad (57)$$

mit

t_v	Wartezeit aufgrund der Volumenänderung [s]
$\Delta V/V$	relative Volumenänderung, geschätzt für eine Druckänderung von 50 Pa [‰]
n_{L50}	Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa [h^{-1}]

In der Realität wird die Volumenänderung oft nicht gleichmäßig mit steigendem Druck stattfinden. Beispielsweise wird sich eine durchhängend verlegte Folie schon bei kleinen Differenzdrücken durchwölben. Es wird daher empfohlen, die Messung nicht mit dem kleinsten Differenzdruck zu beginnen, sondern als ersten Messpunkt einen eher hohen Differenzdruck zu wählen, weil dann ein größerer Volumenstrom zum Füllen des Zusatzvolumens zur Verfügung steht.

Bei sehr kleinen Volumenströmen muss ggf. auch das bewegliche Tuch der Blower Door berücksichtigt werden. Beim Einbau in eine Türöffnung ergibt sich bei Überdruck und einer Durchwölbung von 15 cm in der Mitte der Plane ein Zusatzvolumen von gut 150 l. Zwischen den Messreihen bei Unter- und Überdruck müssen also rund 300 l Luft ins Gebäude geblasen werden, nur um die Lage des Tuchs zu verändern. Fördert der Ventilator beispielsweise 100 m³/h entsprechend 28 l/s, dann dauert die Lageänderung allein 11 s.

6.1.2 Abschätzung der Wartezeit aufgrund der Dichteänderung

Die wegen der Dichteänderung erforderliche Wartezeit t_p in Sekunden erhält man, indem man die Zahl 7 durch den Zahlenwert der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa n_{L50} (in h^{-1}) dividiert:

$$t_p = 7 \frac{s}{h} \cdot \frac{1}{n_{L50}} \quad (58)$$

Geringfügig kürzere Wartezeiten bei Messpunkten unterhalb von 70 Pa sind nach Gleichung (56) möglich.

6.1.3 Gesamt-Wartezeit

Die gesamte Wartezeit t_w ist die Summe aus dem Wert für die Volumenänderung aus Gleichung (57) und dem Wert für die Dichteänderung nach (58):

$$t_w = t_v + t_p \quad (59)$$

Diese Wartezeit t_w muss für jeden Messpunkt der Luftdurchlässigkeitsmessung zwischen dem Verstellen des Ventilators und dem Ablesen von Gebäudedifferenzdruck und Volumenstrom gewartet werden.

Tabelle 6 Wartezeit t_w in Minuten und Sekunden

in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa [h^{-1}] und der relativen Volumenänderung [l/m^3]

		relative Volumenänderung $\Delta V/V$ [l/m^3]									
		0	0,05	0,1	0,5	1	2	5	10	20	50
Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa n_{L50} [$1/h$]	10	< 5s	< 5s	< 5s	< 5s	< 5s	< 5s	00:11	00:21	00:41	01:41
	5	< 5s	< 5s	< 5s	< 5s	00:05	00:09	00:21	00:41	01:21	03:21
	3	< 5s	< 5s	< 5s	00:06	00:09	00:16	00:36	01:09	02:16	05:36
	2	< 5s	< 5s	< 5s	00:09	00:14	00:23	00:53	01:43	03:24	08:24
	1	00:07	00:08	00:09	00:17	00:27	00:47	01:47	03:27	06:47	16:47
	0,5	00:14	00:16	00:18	00:34	00:54	01:34	03:34	06:54	13:34	33:34
	0,3	00:23	00:27	00:30	00:57	01:30	02:37	05:57	11:30	22:37	55:57
	0,2	00:35	00:40	00:45	01:25	02:15	03:55	08:55	17:15	33:55	> 1h
	0,1	01:10	01:20	01:30	02:50	04:30	07:50	17:50	34:30	> 1h	> 1h
	0,05	02:20	02:40	03:00	05:40	09:00	15:40	35:40	> 1h	> 1h	> 1h
	0,03	03:53	04:27	05:00	09:27	15:00	26:07	59:27	> 1h	> 1h	> 1h
	0,02	05:50	06:40	07:30	14:10	22:30	39:10	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h
	0,01	11:40	13:20	15:00	28:20	45:00	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h
	0,005	23:20	26:40	30:00	56:40	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h
0,003	38:53	44:27	50:00	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h	> 1h	

Die Wartezeit in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa und der relativen Volumenänderung kann auch aus Tabelle 6 in Minuten und Sekunden entnommen werden. Die Netto-Luftwechselrate ist in h^{-1}

angegeben, die relative Volumenänderung in Promille bzw. l/m^3 . Die Spalte ganz links enthält die Werte für ein unveränderliches Volumen.

Bei Zwischenwerten von n_{L50} bzw. $\Delta V/V$ soll in der Tabelle der jeweils nächst größere Wert der Wartezeit gewählt werden.

Grün hinterlegt ist in der Tabelle der Bereich links oben, bei dem die Wartezeit weniger als 5 s beträgt und somit (vermutlich) problemlos eine Messung mit einem Automatikprogramm durchgeführt werden kann. Der rot hinterlegte Bereich rechts unten markiert Verhältnisse, bei denen die Wartezeit für jeden Messpunkt mehr als eine Stunde beträgt. Für solche Messaufgaben sind ggf. andere Messverfahren als die Messung nach dem Differenzdruckverfahren erforderlich.

6.1.4 Vorgehensweise bei der Messung

Am Ende der Vorprüfung bzw. der Leckagesuche werden der Volumenstrom und der Gebäudedifferenzdruck gemessen, um daraus einen ungefähren Wert für die Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa zu berechnen. Daraus wird nach den Gleichungen (57) bis (59) oder nach Tabelle 6 die erforderliche Wartezeit t_w ermittelt, die bei jedem Messpunkt eingehalten werden muss. Liegt t_w bei 5 s oder weniger, kann die Messung mit dem Automatikprogramm durchgeführt werden. In anderen Fällen wird das manuelle Einstellen des Ventilators und folgende Vorgehensweise empfohlen:

Als jeweils ersten Messpunkt einer Messreihe bei Unter- bzw. Überdruck wählt man einen eher hohen Betrag des Gebäudedifferenzdrucks, so dass ein eher großer Volumenstrom zum Leeren bzw. Füllen eines eventuellen „Totvolumens“ z.B. durch durchhängende oder schlaff hängende Folien, zur Verfügung steht. Für weitere erste Messpunkte werden Druck- bzw. Volumenstromänderungen in großen Schritten vorgenommen. Anschließend werden gewünschte Zwischenwerte ergänzt. Wichtig ist dabei, dass die Messpunkte teilweise von oben, teilweise von unten angefahren werden. Sollte die Leckagekurve eine systematische Abweichung der Messpunkte von der Ausgleichskurve entsprechend dem Vorzeichen der Volumenstromänderung zeigen, dann war die Wartezeit nicht ausreichend (vgl. Abbildung 14).

Eine naheliegende Idee zur Beschleunigung von Messungen ist es, zwischen den Messpunkten den Volumenstrom kräftig zu erhöhen, bzw. durch kurzfristiges Öffnen einer geeigneten Öffnung den Druck schnell bis in die Nähe des nächsten Wertes abzusenken. Tatsächlich wurde bei der Messung an der CO₂-Box der Überdruck in der Box zunächst ohne Blende am Ventilator auf rund 50 Pa gebracht. Anschließend wurde die passende Blende 3 am Ventilator angebracht und der Druck weiter auf den ersten gemessenen Wert erhöht. Eine solche Vorgehensweise ist natürlich möglich, sofern im Anschluss trotzdem ausreichend lange gewartet wird. Es ist nicht ohne Weiteres klar, wie lange in diesem Fall „ausreichend“ ist. Durch Einstellen der „erwarteten“ Werte für Differenzdruck und Volumenstrom und unzureichend langes Warten würden die „erwarteten“ Werte reproduziert, die aber durchaus falsch sein können.

Grundsätzlich wird empfohlen, bei der Messung auf Ungewöhnliches zu achten um darauf reagieren zu können. Zumindest sollten Notizen darüber aufgezeichnet werden. Ggf. muss im Einzelfall die Wartezeit gegenüber den obigen Berechnungen weiter erhöht werden.

6.2 Ventilator Kennlinien

Die Hypothese aus 4.1, wonach sich die Ventilator Kennlinien (stückweise) als Geraden beschreiben lassen, konnte bestätigt werden. Auch die Erwartung, dass der Druckaufbau bei realen Ventilatoren schneller erfolgt, als beim idealisierten, wurde bestätigt. Eine steilere Kennlinie führt dazu, dass eine vorgegebene maximale Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck schneller erreicht wird. Wegen der Steilheit der Kennlinie besteht aber bei einer bestimmten Druckabweichung auch eine nicht zu vernachlässigende Abweichung des

Volumenstroms vom Wert im Gleichgewicht. Dies führt dazu, dass die für einen maximalen Gesamtfehler erforderliche Wartezeit nur geringfügig mit der Steilheit der Kennlinie kleiner wird.

Die Bandbreite der maßgeblichen relativen Steigungen der Kennlinien ist relativ groß. Insbesondere kommen auch Werte nahe 0 vor, bei denen die erforderliche Wartezeit nicht verringert wird.

6.3 Übersicht über die Rechenverfahren

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Algorithmen für den zeitlichen Verlauf der Druckdifferenz an der Gebäudehülle hergeleitet. Eine Übersicht zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7 Übersicht über die Rechenverfahren

Alle Verfahren gelten ohne Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft und berücksichtigen die Steigung der Ventilator Kennlinie. Die Näherungen (B, D und F) unterscheiden nicht zwischen Differenzdruckerhöhung und -verringering.

Verfahren	Gleichung(en), Lösung	Anmerkungen	Ermittlung Wartezeit
A Differentialgleichung (adiabatisch)	(1) bzw. (9), numerisch	gilt für adiabatische Verhältnisse und ohne Volumenänderung; Sonderfall von C und E	numerisch
B Näherung zu A	(14), explizit	gilt für adiabatische Verhältnisse und ohne Volumenänderung; Sonderfall von D und F	explizit: Gleichung (19)
C Differentialgleichungssystem	(33) und (34), numerisch	Wärmeübergang zwischen Innenluft und Innenoberflächen wird berücksichtigt, keine Volumenänderung	numerisch
D Näherung zu C	(41), explizit	wie C	numerische Nullstellensuche
E Differentialgleichung (mit Volumenänderung)	(46), numerisch	gilt für adiabatische Verhältnisse mit Volumenänderung	numerisch
F Näherung zu E	(48), explizit	wie E	explizit: Gleichung (49)

Die Verfahren A, C und E sind Differentialgleichungen bzw. ein System aus zwei Differentialgleichungen, die im Allgemeinen nur numerisch lösbar sind. Die Verfahren B, D und F sind explizite Funktionen, die jeweils eine gute Näherung dazu liefern. Eine explizite Funktion zur Berechnung der Wartezeit existiert für die Näherungsverfahren B und F.

6.4 Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Differenzdrucks

Die Differentialgleichung (1) bzw. (9) zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Differenzdrucks lässt sich vereinfachen, indem nicht nur die Ventilator Kennlinie, sondern auch die Leckagekurve des Gebäudes lokal

durch eine Gerade, die Tangente der Leckagekurve, angenähert wird. Die vereinfachte Gleichung lässt sich geschlossen lösen. Für den Verlauf des Differenzdrucks ergibt sich dann Gleichung (13):

$$\Delta p^*(t) = \Delta p^*(0) \cdot e^{p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50 Pa)^n} \right] t}$$

Die Dauer der Druckänderung von 20 Pa Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck bis zu 0,5 Pa Abweichung beträgt nach Gleichung (19):

$$t_p = - \frac{\ln 40}{p \cdot \kappa \cdot n_{L50} \left[\frac{S}{q_{50}} - \frac{n}{\Delta p_{bal}^{1-n} \cdot (50 Pa)^n} \right]}$$

mit

Δp^*	Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck [Pa]
$\Delta p^*(0)$	Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck zu Beginn [Pa]
p	Luftdruck [Pa]
κ	Adiabatenkoeffizient [1]
n_{L50}	Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa [1/s]
S	Steigung der Ventilator Kennlinie [$m^3/s/Pa$]
q_{50}	Leckagestrom des Gebäudes bei 50 Pa [m^3/s]
n	Strömungsexponent [1]
Δp_{bal}	Gleichgewichtsdifferenzdruck [Pa]
t_p	Wartezeit aufgrund der Dichteänderung [s]

Wesentliche Größen für diese Berechnung, nämlich S und n , sind allerdings dem Messteam normalerweise nicht bekannt.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes wurde klar, dass bei beweglichen Luftdichtheitsschichten die Dauer des Druckaufbaus noch erheblich länger ist (vgl. 6.7).

6.5 Messfehler aufgrund unzureichender Wartezeit

Ein Messfehler in Höhe von 20 % des Leckagestroms, wie in einer der Hypothesen aus 4.1 befürchtet, dürfte eher untypisch sein, sofern das Messteam realisiert, dass eine längere Wartezeit erforderlich ist. Die durchgeführten Simulationen ergaben Fehler in der Größenordnung von einigen Prozent. Im Einzelfall sind aber auch größere Fehler möglich.

6.6 Adiabatische oder isotherme Verhältnisse

Wie erwartet (vgl. 4.1), liegen bei größeren Werten der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa annähernd adiabatische Verhältnisse vor. Abweichend von den Erwartungen verlängert sich die Dauer des Druckaufbaus bei kleineren Werten der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa nicht nur entsprechend isothermen Verhältnissen. Vielmehr verläuft die Annäherung an den Gleichgewichtsdifferenzdruck in solchen Fällen gegen Ende der Wartezeit extrem langsam.

Eine sehr lange Dauer des Druckaufbaus tritt nicht nur bei extrem dichten Gebäuden auf, sondern auch bei größeren Werten des Verhältnisses innere Oberflächen zu Volumen. Kritisch sind außerdem die Fälle, bei denen zu Beginn der Messung eine Temperaturdifferenz zwischen Innenluft und Oberflächen herrscht.

6.7 Sonstige Parameter

Von den vielen Parametern, die bei einer realen Messung anders sein können als im Rechenmodell, hat sich eine mögliche Volumenänderung als entscheidend herausgestellt. Eine genaue Untersuchung dieses Themas war ursprünglich nicht vorgesehen. Zwischenzeitlich ist klar, dass die Dauer des Druckaufbaus aufgrund von flexiblen Luftdichtheitsschichten um ein Vielfaches größer sein kann, als die Dauer aufgrund der Dichteänderung. Dieses Ergebnis ist auch in die oben genannten Empfehlungen für Messteams eingeflossen.

6.8 Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen

6.8.1 Numerische Berechnung für adiabatische Verhältnisse

Die ursprüngliche Hypothese einer weitgehenden Übereinstimmung von Messung und Berechnung (vgl. 4.1) war nicht zutreffend. Messungen und Berechnungen stimmen zwar einigermaßen überein, aber im Einzelfall wurden große Abweichungen festgestellt. Darüberhinaus war die gemessene Dauer im Schnitt um 24 % größer als die berechnete. Als Ursache kommt der in der Berechnung nicht berücksichtigte Wärmeübergang zwischen Innenluft und Oberflächen in Betracht, also die Abweichung von adiabatischen Verhältnissen. Außerdem ist es zumindest bei den Objekten, die der Autor nicht genau kennt, möglich, dass bewegliche Luftdichtheitsschichten die Dauer der Druckänderung vergrößert haben.

6.8.2 Rechnerische Abschätzung nach der Sieben-Sekunden-Regel

Die 7s-Regel war von vornherein eher vorsichtig definiert worden. Dementsprechend liegen die gemessenen Werte der erforderlichen Wartezeit im Mittel bei 80 % der abgeschätzten. Es gibt aber auch Überschreitungen um bis zu knapp 30 %.

Insgesamt erscheint die 7s-Regel weiterhin sinnvoll. Sie muss aber im Falle von beweglichen Luftdichtheitsschichten um die Wartezeit verlängert werden, die für die Volumenänderung erforderlich ist. Bei Werten der Druckdifferenz von weniger als 70 Pa könnte die Wartezeit sogar noch etwas verringert werden. Ob diese fast vernachlässigbare Verkürzung der Messdauer in der Praxis genutzt werden würde, erscheint fraglich.

6.9 Bewertung und Ausblick

Die Ziele des Forschungsprojektes wurden erreicht. Es gelang, die messtechnische Fragestellung nach der erforderlichen Wartezeit bei der Messung sehr dichter Gebäude mittels thermodynamischer Berechnungen theoretisch zu lösen. Außerdem wurde eine handhabbare Formel und daraus abgeleitet eine Tabelle zur Ermittlung der erforderlichen Wartezeit hergeleitet. Diese Werkzeuge sollten in den nächsten Jahren in der Messpraxis erprobt werden.

Einige Fragen wurden nicht erschöpfend geklärt. Dazu gehört der Einfluss des Wärmeübergangs zwischen Innenluft und Oberflächen in der Praxis. Ein Problem dabei ist, dass die Größe des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses in der Messpraxis nicht zur Verfügung steht und auch bei guter Kenntnis des Objektes nur mit Aufwand und dennoch großen Unsicherheiten zu ermitteln ist. Eine weitere Klärung wäre hier interessant.

Eine andere, theoretisch und empirisch zu bearbeitende Fragestellung ist die nach der Dichtekorrektur bei der Auswertung von Luftdurchlässigkeitsmessungen. In der Messnorm geht man von isothermen Verhältnissen aus, d.h. es wird unterstellt, dass der ins Gebäude einströmende und der aus dem Gebäude ausströmende

Massenstrom gleich groß sind. Die Überlegungen in Abschnitt 5.4 lassen vermuten, dass diese Annahme nicht oder nicht vollständig zutrifft.

Bei den durchgeführten Messungen entstanden Zweifel an der Genauigkeit der Messeinrichtungen: Einerseits ergaben sich relativ große Unterschiede zwischen den Ergebnissen mit verschiedenen Geräten und Blenden. Andererseits fiel auf, dass im Automatikmodus unplausible Leckagekurven ermittelt wurden. Beide Fragestellungen sollten geklärt werden.

Mit Hilfe der hier beschriebenen Theorie sollte es möglich sein, einen Algorithmus zur Verkürzung der Wartezeit zu entwickeln. Die Idee ist, mit einem besonders großen Volumenstrom bzw. einer zusätzlichen Öffnung eine schnelle Annäherung an den nächsten Messpunkt zu erreichen, und dann den Ventilator auf den voraussichtlich „passenden“ nächsten Zustand einzustellen. Im Anschluss wird aber trotzdem eine gewisse Wartezeit erforderlich sein, um zu verhindern, dass nur prognostizierte Werte für Differenzdruck und Volumenstrom reproduziert werden.

7. Dank

Ich danke allen, die mich bei diesem Forschungsprojekt auf die eine oder andere Art unterstützt haben. Ein paar davon möchte ich namentlich nennen:

Für die Möglichkeit, in ihrem Gebäude Messungen durchführen zu können, danke ich herzlich:

- ebök GmbH, Tübingen, Matthias Laidig,
- Kai Feseker, Freier Architekt, Ravensburg, und Familie Vogel,
- Toggenburger AG, Winterthur, Benjamin Rentsch.

Vielen Dank für das Verleihen von Messausrüstung:

- ebök GmbH, Tübingen, Matthias Laidig,
- Wöhler Technik GmbH, Bad Wünnenberg.

Vielen Dank für die zeitlich aufgelösten Messdaten von zwei sehr dichten Hallen:

- Blower Door GmbH, Springe, Stefanie Rolfsmeier und Paul Simons.

Für die Messdaten von Ventilator Kennlinien danke ich:

- Blower Door GmbH, Springe, Stefanie Rolfsmeier,
- TEC, Minneapolis, USA, Gary Nelson.

Gerade als Freiberufler bin ich dankbar für die vielen ergiebigen Fachgespräche mit Kolleginnen und Kollegen aus anderen Büros und Firmen. Vielen Dank für Eure Anregungen:

- Stefanie Rolfsmeier, Blower Door GmbH, Springe,
- Thomas Kirtschig, früher ebök GmbH, Tübingen, jetzt Kampa GmbH, Aalen,
- Jürgen Schnieders, Passivhaus Institut, Darmstadt,
- Julian Bock, Mainz.

Danke, Michael Wehrli, Marthalen, Schweiz, für die angenehme Zusammenarbeit bei der Messung an der CO₂-Box.

8. Autor



Dipl.-Phys. Joachim Zeller

Diplom in Physik 1986, Diplomarbeit über die Messung von Luftwechselraten. Seither freiberuflich tätig auf dem Gebiet Energieeffizienz von Gebäuden und Anlagen. Wesentliche Arbeitsgebiete: energetische Optimierung, Qualitätssicherung, Monitoring, Luftdichtheitsplanung, Luftdurchlässigkeitsmessungen. Stellvertretender Obmann des DIN-Ausschusses Luftdichtheit.

9. Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

Charlesworth, Peter S., 1988: Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques - An Applications Guide. Coventry, Great Britain, AIVC

DIN EN 13829:2001-02: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert) – Deutsche Fassung EN 13829:2000

DIN EN 15242:2007-09: Lüftung von Gebäuden - Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration - Deutsche Fassung EN 15242:2007

DIN EN 16798-7:2017-11: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 7: Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration (Modul M5-5); Deutsche Fassung EN 16798-7:2017

DIN EN ISO 9972:2018-12 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2015) – Deutsche Fassung EN ISO 9972:2015

DIN V 18599-2:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen

Peper, Søren; **Schnieders**, Jürgen; 2019: Luftdichtheits-Messung von Hochhäusern. Darmstadt: Passivhaus Institut. Zugriff: https://passipedia.de/_media/picopen/anleitung_blowerdoormessung_hochhaus_phi_1.5.pdf [abgerufen am 01.04.2022]

Rolfsmeier, Stefanie, 2019: Herausforderung sehr dichte Gebäude und Wohnungen zu messen. Reader 11th International BuildAir-Symposium. Springe-Eldagsen: Energie- und Umweltzentrum am Deister GmbH

Walter, Wolfgang, 1976: Gewöhnliche Differentialgleichungen. Eine Einführung. 2. Auflage Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag

Zeller, Joachim, **Dorschky**, Sigrid, **Borsch-Laaks**, Robert, **Feist**, Wolfgang, 1995. Luftdichtigkeit von Gebäuden – Luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden. Darmstadt, Institut Wohnen und Umwelt

Zeller, Joachim, 2012: Messung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. In: FLiB Buch Band 1, 2. Aufl. Berlin, Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V. (FLiB)

Zeller, Joachim, 2020: Dauer des Druckaufbaus bei Luftdichtheitsprüfungen sehr dichter Gebäude. In: Bauphysik 42, H. 3, S. 109-115

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Leckagekennlinie eines Gebäudes und idealisierte Ventilator-kennlinie	15
Abbildung 2 Vergleich der vorliegenden Ventilator-kennlinien	22
Abbildung 3 Beispiel für die Ermittlung einer Ventilator-kennlinie aus Messdaten eines Gebäudes	24
Abbildung 4 Kennlinienschar für einen Ventilator und eine Blende	25
Abbildung 5 Relative Steigung für die Kennlinienschar aus der vorherigen Abbildung	25

Abbildung 6 Relative Steigung der Ventilator Kennlinie für die ausgewerteten Messungen	30
Abbildung 7 Leckagekurve eines Gebäudes und realistische Ventilator Kennlinie	31
Abbildung 8 Wartezeit in Abhängigkeit vom Differenzdruck für eine Steigung der Ventilator Kennlinie von $S = 0$	32
Abbildung 9 Wartezeit in Abhängigkeit vom Differenzdruck für eine Steigung der Ventilator Kennlinie von $s_{50} = -0,1 \text{ \%}/\text{Pa}$	33
Abbildung 10 Wartezeit für eine Steigung der Ventilator Kennlinie von $s_{50} = -1 \text{ \%}/\text{Pa}$	33
Abbildung 11 Vergleich zwischen Messergebnissen und Ergebnissen bei einem Offset von 2 Pa	36
Abbildung 12 Einfluss einer unzureichenden Wartezeit für $s_{50} = -0,1 \text{ \%}/\text{Pa}$	38
Abbildung 13 Einfluss einer unzureichenden Wartezeit für $s_{50} = -1 \text{ \%}/\text{Pa}$	39
Abbildung 14 Teilweise Erhöhung und teilweise Verringerung der Volumenströme	40
Abbildung 15 Vergleich von Messdaten für ausreichende und zu kurze Wartezeit	41
Abbildung 16 Zeitlicher Verlauf des Differenzdrucks für die Grundversion	52
Abbildung 17 Zeitlicher Verlauf der Abweichung vom Gleichgewichtsdifferenzdruck im logarithmischen Maßstab	52
Abbildung 18 Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenz für die Grundversion	53
Abbildung 19 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa	54
Abbildung 20 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit vom Oberflächen-Volumen-Verhältnis A/V	55
Abbildung 21 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit vom Strömungsexponenten n	56
Abbildung 22 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit vom Gleichgewichtsdifferenzdruck Δp_{bal}	57
Abbildung 23 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit von der relativen Steigung der Ventilator Kennlinie s_{50}	58
Abbildung 24 Wartezeit und andere Parameter in Abhängigkeit von der Anfangstemperaturdifferenz zwischen Innenluft und Oberflächen ΔT_0	59
Abbildung 25 Relativer Fehler der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa bei einer Wartezeit nach der 7s-Regel	61
Abbildung 26 Relativer Fehler des Volumenstroms bezogen auf den Volumenstrom bei 50 Pa	61
Abbildung 27 Screenshot aus dem Datenerfassungsprogramm TECLOG	70
Abbildung 28 Minneapolis Blower Door Model 4.1 (links) und Retrotec 3000 SR (rechts) auf der Nordseite des Hauses	72
Abbildung 29 Wöhler BC 600 auf der Südseite des Hauses	72
Abbildung 30 Gemessener Verlauf des Differenzdrucks im Vergleich zu Berechnungen ohne Berücksichtigung der Ventilator Kennlinie an einem Beispiel für das Niedrigenergie-Einfamilienhaus	73
Abbildung 31 CO ₂ -Box	74
Abbildung 32 Innenansicht der CO ₂ -Box mit dem in eine Deckenöffnung eingebauten Duct Blaster	75
Abbildung 33 Blick auf die Decke der CO ₂ -Box während der Messung	75

Abbildung 34 Die aus einer Plane bestehende Vorderseite der CO ₂ -Box wölbt sich bei Überdruck	76
Abbildung 35 Kennlinie des Ventilators bei einer der Messungen	77
Abbildung 36 Vergleich zwischen Messung und Berechnung	78
Abbildung 37 Vergleich zwischen Messung und Berechnung in logarithmischer Darstellung	78
Abbildung 38 Vergleich zwischen Messung und Berechnung für den Druckabfall gegen Null	80
Abbildung 39 Vergleich zwischen Messung und Berechnung für den Druckabfall gegen Null in logarithmischer Darstellung	80
Abbildung 40 Ausbauchung der Plane der CO ₂ -Box und daraus berechnete Volumenvergrößerung in Abhängigkeit vom Differenzdruck	81
Abbildung 41 Vergleich der gemessenen Werte der Wartezeit mit den numerisch ermittelten Werten	82
Abbildung 42 Verhältnis der gemessenen zu den berechneten Werten der Wartezeit in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa.	83
Abbildung 43 Gemessene und berechnete Werte der Wartezeit bei variablem Volumen	84
Abbildung 44 Gemessene und abgeschätzte Werte der Wartezeit in Abhängigkeit von der Netto-Luftwechselrate bei 50 Pa	85
Abbildung 45 Verhältnis der gemessenen zu der nach der 7s-Regel abgeschätzten Wartezeit in Abhängigkeit vom Gleichgewichtsdifferenzdruck.	86

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Verwendete Symbole	11
Tabelle 2 Indizes	13
Tabelle 3 Relativer Fehler des Volumenstroms allein aufgrund des Fehlers des Differenzdrucks	35
Tabelle 4 Relativer Fehler des Volumenstroms aufgrund der Fehler des Differenzdrucks und des Volumenstroms für $s_{\text{bal}} = 2 \text{ \%/Pa}$	37
Tabelle 5 Berechnungsergebnisse ohne und mit natürlicher Druckdifferenz	67
Tabelle 6 Wartezeit t_w in Minuten und Sekunden	89
Tabelle 7 Übersicht über die Rechenverfahren	91