

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Entwicklung einer statistischen Methode für die Ermittlung der erforderlichen Stichprobengröße zur Qualitätssicherung der Luftdichtheit von Gebäuden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Bednar
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Christoph Harreither

E 206/2
Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Martin Zingerle
Matr.Nr.: 1028159
Linde 14
39030 Niederrasen (IT)

Wien, Juni 2013

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben. Allen voran gilt meinen Betreuern Herrn Professor Thoma Bednar und Christoph Harreither für ihre Unterstützung und Anregungen ein herzliches Dankeschön. Ein großer Dank gebührt auch Herrn Harald Hofbauer, dem gesamten Institut sowie Astrid Lederer welche die zahlreichen Messungen unterstützt haben. Damit jedoch diese Studie erst durchgeführt werden konnte, war die Hilfsbereitschaft und das Interesse der Bewohner der untersuchten Gebäude notwendig. Für die zahlreiche Beteiligung möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich Herrn Rudolf Frühwirth, Experte für Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie, zukommen lassen, da seine entgegengebrachte Hilfsbereitschaft und sein großer Einsatz wesentlich zu den Ergebnissen dieser Arbeit beigetragen haben.

Die Diplomarbeit stellt den letzten Teil des Studiums dar und bietet daher eine gute Gelegenheit auch all jenen zu danken, die mich während der Zeit meines Studiums begleitet haben. Meinen Eltern, sowie meiner gesamten Familie möchte ich dafür danken, dass sie das Studium für mich erst möglich gemacht haben und mich über die Jahre stets unterstützt haben.

Auch meinem langjährigen Studienkollegen Franz möchte ich danken. Vieles haben wir gemeinsam erlebt und gemeistert und nun ist die Zeit gekommen, den eigenen Weg zu gehen. Es war eine tolle Zeit, Danke Franz.

Der größte Dank geht jedoch an meine Freundin Angelika, die mich nicht nur in schwierigen Zeiten stets ermutigt hat, sondern auch selbst über die lange Zeit des Studiums viel Kraft, Durchhaltevermögen und Geduld aufbringen musste. Einen ganz lieben Dank dafür und ich freue mich auf die weitere gemeinsame Zeit.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Verteilung der Luftwechselzahl einer Wohnsiedlung mit ähnlichen oder identischen Gebäuden/Wohneinheiten. Die wesentliche Fragestellung ist dabei die Ermittlung der nötigen Anzahl an Luftdichtheitsmessungen aus der Grundgesamtheit, um nach der Wahrscheinlichkeitstheorie die Einhaltung gesetzlich vorgegebener Grenzwerte der Luftwechselzahl mit einer gewissen Sicherheit zu gewährleisten. Die Ergebnisse einer durchgeführten Messreihe zur Luftdichtheit der Gebäude einer Kleingartenwohnanlage, sowie Referenzmessdaten weiterer Wohn- und Reihenhaussiedlung dienen als Grundlage zur Lösung der Fragestellung. Unter Annahme lognormalverteilter, sowie alternativ gammaverteilter Luftwechselzahlen, kann simulativ die erforderliche Stichprobengröße ermittelt werden. Grundlage des Berechnungsmodells ist dabei ein Bayes'scher Ansatz unter Benützung der suffizienten Statistiken der Stichprobe. Durch errechnen statistischer Kennzahlen aus einer gemessenen Stichprobe und mit Hilfe der aus der Simulation hervorgehenden Diagramme kann die Fragestellung und somit die erforderliche Stichprobengröße ermittelt werden. Vorausblickend erlaubt das Berechnungsmodell auch die Implementierung in computerunterstützte Verfahrensweisen, wodurch sich die Wahrscheinlichkeitsberechnung nicht nur genauer, sondern auch anwendungsfreundlicher gestaltet.

Abstract

The present thesis deals with the distribution of air exchange rate of a residential area with similar or identical buildings/units. The main research question is to determine the required number of air tightness measurements of the population to ensure compliance with legally prescribed limits of air exchange rate on the probability theory. The results of a series of air tightness measurements in houses of a small garden apartment complex, as well as reference measurement data of other residential and row houses provide a basis for solving the problem. Assuming lognormal-distributed, and alternatively gamma distributed air change rates the required sample size can be assessed by simulation. Basis of the calculation model is a Bayesian approach by the use of the sufficient statistics sample properties. Calculated statistical figures from a measured sample and by using the resulting graphs from the simulation the main question and the required sample size can be determined. Presumably, the simulation model also allows an implementation in computer-based procedures. Hereby, the probability calculation will be more accurate, but also more application friendly.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Fragestellung.....	1
2	Grundlagen.....	2
2.1	Begriffsbestimmungen	2
2.1.1	Wichtige Begriffe zur Luftdichtheit	2
2.1.2	Wichtige Begriffe der Statistik.....	3
2.2	Normative und gesetzliche Regelungen zur Luft- und Winddichte	5
3	Differenzdruckverfahren zur Bestimmung der Luftdichtheit.....	8
3.1	Prüfverfahren	8
3.2	Gebäudevorbereitung.....	9
3.3	Messgeräte (Messfehler, Typen, Anwendung)	11
3.3.1	Messfehler	11
3.3.2	Luftfördereinrichtung & Druckmessgerät	14
3.3.3	Wärmebildkamera	15
3.3.4	Thermometer	16
3.3.5	Rauchröhrchen und Theaternebel	16
3.4	Ablauf der Luftdichtheitsmessung	17
3.5	Bewertung von Leckagen	19
3.5.1	Allgemeines	19
3.5.2	Fugen und Leckagen	19
3.5.3	Leckagefläche	20
3.6	Berechnung der Kennzahlen zur Luftdichtheit.....	23
4	Einfluss der Luftdichtheit auf Raumklima und Konstruktion.....	25
4.1	Lüftungswärmeverluste	25
4.2	Luftdichtheit und Feuchtigkeit	28
4.2.1	Zusammenhang zwischen Luftdichtheit und Luftfeuchtigkeit der Innenluft	28
4.2.2	Einflüsse der Luftdichtheit in der Abschätzung der Raumlufteuchtigkeit	30
4.3	Luftdichtheit und Schallschutz	35
4.4	Luftdichtheit und Brandschutz.....	36
4.5	Luftdichtheit und Behaglichkeit	37
4.5.1	Luftqualität	37

4.5.2	Zugluft.....	38
4.5.3	Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen.....	40
5	Messreihe zur Luftdichtheit in einer Wohnsiedlung	41
5.1	Beschreibung der Prüfobjekte	41
5.1.1	Allgemeines	41
5.1.2	Grundrisse	43
5.1.3	Konstruktionsdetails.....	51
5.2	Messaufbau	53
5.3	Messablauf	55
5.4	Beurteilung von Leckagen der Testgebäude	56
5.5	Messdatenauswertung.....	63
5.5.1	Berechnung der Kenngrößen für Luftdichtheit	63
5.5.2	Fehlerfortpflanzungsrechnung	66
5.5.3	Messergebnisse	68
6	Statistische Auswertung der gemessenen Luftwechselzahl	76
6.1	Allgemeines	76
6.2	Beschreibung und Beurteilung der Daten	76
6.2.1	Beschreibung der gemessenen Daten	76
6.2.2	Verteilungsfunktionen zur Luftwechselzahl	82
6.2.3	Referenzdaten zur Verteilung von Luftdichtheitszahlen	87
7	Berechnungsmodell zur Ermittlung der erforderlichen Stichprobengröße	88
7.1	Allgemeines	88
7.2	Einführung in die Anwendung des Modells	89
7.3	Statistische Vorgehensweise.....	91
7.4	Untersuchung variabler Parameter der Berechnung.....	95
7.4.1	Wahl der A-priori Verteilung	95
7.4.2	Verteilung der A-posteriori-Verteilung	97
7.4.3	Toleranzgrenzen für Fehlentscheidungen	98
7.5	Verwendung des Modells am Beispiel der untersuchten Wohnanlage.....	101
8	Zusammenfassung.....	103
9	Anhang.....	104

1 Einleitung und Fragestellung

Die vorliegende Arbeit befasst sich vorwiegend mit der Thematik der Luftdichtheit von Gebäuden, genauer mit der Luftdichtheit von Gebäuden gleichen Charakters. Darunter ist zu verstehen, dass die Gebäude derselben Bauweise, vergleichbarer geometrischer Eigenschaften sowie gleicher technischer Ausführung entsprechen. Einleitend wird allgemein auf gesetzliche Regelungen, sowie die normkonforme Luftdichtheitsmessung mittels Differenzdruckverfahren eingegangen. Um die Relevanz der Luftdichtheit von Gebäuden zu unterstreichen, wird deren Einfluss auf das Raumklima und die Konstruktion erörtert und teilweise durch gewonnene Erkenntnisse und gemessene Daten etwas näher beschrieben. Des Weiteren wird auch die praktische Umsetzung der durchgeführten Messreihe zur Luftdichtheit erörtert; dazu konnten in einer Wohnsiedlung in 34 Gebäuden umfassende Messungen zur Luftdichtheit durchgeführt werden. Aus den gemessenen Daten wurden alle wichtigen Kenngrößen der Luftdichtheit ermittelt und die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 5 dargestellt.

Auf Basis der gemessenen Daten zur Luftdichtheit wird zunächst eine Beurteilung der ermittelten Luftwechselzahl der Gebäude vorgenommen. Die Aufgabe hierbei ist es, geeignete Verteilungsfunktionen zu finden, welche die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit von Luftwechselzahlen in einer Siedlung möglichst gut beschreiben. Auf Basis dieser Verteilungen kann nun mithilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie die eigentliche Fragestellung bearbeitet werden. Die Kernaufgabe der Arbeit besteht darin, durch statistische Methoden und Berechnungsmodelle die Frage zu beantworten, wie viele Gebäude der Siedlung ein Bauphysiker messen muss, um mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit davon ausgehen zu können, dass auch alle restlichen Gebäude der Siedlung einen vorgegebenen Grenzwert der Luftdichtheit nicht überschreiten. Der Bauphysiker soll somit nur eine bestimmte Anzahl an Gebäuden (sogenannte Stichprobe), und nicht die gesamten Häuser/Wohnungen einer Siedlung/Wohnanlage auf ihre Luftdichtheit untersuchen müssen. Durch die Zusammenarbeit mit einem Experten der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung, Herrn Univ.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Frühwirth des Instituts für Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie der technischen Universität Wien, wurde die Möglichkeit geschaffen, die Fragestellung in hoher Qualität zu bearbeiten. Der Lösungsweg dieser Fragestellung ist umfangreich und wird von simulativen Methoden begleitet. Dabei wurde der Möglichkeit einer verallgemeinerten Anwendung des Modells, wodurch die Fragestellung für unterschiedliche Wohnsiedlungen gelöst werden kann, stets Beachtung geschenkt.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsbestimmungen

2.1.1 Wichtige Begriffe zur Luftdichtheit

Nettogrundfläche (A_F): Ist die Gesamtfläche aller Böden, die zum untersuchten Volumen gehören. Sie wird nach nationalen Regelungen berechnet. [ONO01]

Innenvolumen (V): absichtlich beheiztes, gekühltes oder mechanisch belüftetes Volumen in einem Gebäude oder Gebäudeteil, das Gegenstand der Messung ist, üblicherweise ohne Dachboden, Keller oder Anbauten. Es wird berechnet, indem die Nettogrundfläche mit der mittleren lichten Raumhöhe multipliziert wird. Das Volumen von Möbeln wird nicht abgezogen. [ONO01]

Gebäudehülle: Grenze, die das Innenvolumen, das Gegenstand der Messung ist, von der äußeren Umgebung oder anderen Gebäudeteilen trennt. Wände und Böden unter Erdniveau sind eingeschlossen. Die Stirnflächen der an die untersuchte Gebäudehülle angrenzenden Innenwände, Decken oder Böden werden nicht abgezogen. [ONO01]

Hüllfläche (A_E): Die analog zur Gebäudehülle berechnete Fläche.

Leckagestrom (V_L): Volumenstrom durch die Gebäudehülle, wobei hierbei die Luftströmungen durch Fugen, Risse und poröse Materialien oder eine Kombination davon zu verstehen ist. [ONO01]

Volumenbezogener Leckagestrom (n_{50}): Leckagestrom bei 50 Pa Druckdifferenz über der Gebäudehülle, bezogen auf das Innenvolumen. Auch als die so genannte **Luftwechselrate** oder **Luftwechselzahl** bekannt. [ONO01]

Luftdurchlässigkeit (q_{50}): Leckagestrom bei 50 Pa Druckdifferenz über der Gebäudehülle, bezogen auf die Hüllfläche. [ONO01]

Nettogrundflächenbezogener Leckagestrom (w_{50}): Leckagestrom bei 50 Pa über der Gebäudehülle, bezogen auf die Nettogrundfläche [ONO01]

2.1.2 Wichtige Begriffe der Statistik

Median: Ordnet man die Werte eines Datensatzes mit n Elementen nach der Größe ihres Wertes, so entspricht der Median bei einer ungeraden Anzahl von Werten jenem Wert an der $(n+1)/2$ -ten Stelle. Ist die Anzahl der Werte des Datensatzes gerade, entspricht der Mittelwert der beiden Werte an den Stellen $n/2$ und $n/2 + 1$ dem Median. [SHE06]

Grundgesamtheit: Ist die Menge aller Elemente, die in einer statistischen Untersuchung betrachtet werden. [SHE06] Will man die Luftdichtheit von Gebäuden einer Siedlung untersuchen, so stellen alle Gebäude, welche zu dieser Siedlung gehören, die Grundgesamtheit dar.

Stichprobe: Wird eine bestimmte Anzahl, oder ein Teil der Elemente der Grundgesamtheit untersucht, bezeichnet man dies als Stichprobe. Mit statistischen Methoden kann aus der Stichprobe ein Schätzwert für den Erwartungswert der gesuchten Größe berechnet werden, welcher ein Parameter der Grundgesamtheit ist. [CAS07] Werden beispielsweise 10 von 100 Gebäuden einer Siedlung auf ihre Luftdichtheit überprüft, so stellen die 10 untersuchten Gebäude eine Stichprobe dar.

Stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung: In der Wahrscheinlichkeitstheorie wird zwischen diskreter und stetiger Verteilung unterschieden. Hierbei erstreckt sich bei stetigen Verteilungen eine Zufallsvariable nicht über eine diskrete Menge, sondern über eine stetige Menge. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung hilft uns dabei, einen bestimmten Erwartungswert einer Zufallsvariable zu berechnen. Die Ableitung der Verteilungsfunktion ergibt dabei die Wahrscheinlichkeitsdichte. [CAS07] Bei den in dieser Arbeit behandelten Verteilungsfunktionen handelt es sich um stetige Verteilungen.

Konfidenzintervall: Es handelt sich hier um jenes Intervall, in dem sich ein gegebener Anteil an Werten innerhalb einer Verteilungsfunktion befindet. Wird dieser Anteil in Prozent ausgedrückt (z.B. 95 %), so spricht man häufig von Konfidenzniveau. Das Konfidenzniveau befindet sich dann an jener Stelle der Funktion bzw. gibt jenen Wert an, bei welchem ein gegebener Prozentsatz an Fällen aus der Grundgesamtheit zu erwarten ist. [MUR03]

Unterschreitungswahrscheinlichkeit: Ist analog zum Konfidenzniveau. In dieser Arbeit ist darunter jene Wahrscheinlichkeit bzw. relative Anzahl an Gebäuden einer Grundgesamtheit zu verstehen, welche einen vorgegebenen Grenzwert der Luftwechselzahl nicht überschreiten.

Log-Likelihood-Funktion: Es handelt sich hierbei um eine Plausibilitätsfunktion, wobei man die Log-Likelihood-Funktion aus der logarithmierten Likelihood-Funktion erhält. Die Funktion findet Anwendung zur Schätzung des Wertes eines unbekanntes Parameters θ aus einer Stichprobenfunktion. Entsprechen die beobachteten Werte den geschätzten Werten, bzw. entspricht die Verteilung der beobachteten Werte der geschätzten Funktion, so ist der Wert der Log-Likelihood-Funktion maximal. [SHE06] Durch die Log-Likelihood-Funktion können somit Parameter einer Dichtefunktion geschätzt werden bzw. Aussagen über die Qualität der Anpassung einer Funktion an Messwerten getroffen werden.

Suffiziente Statistik: Auch bekannt als erschöpfende Statistik. Das Ziel der suffizienten Statistik ist es, möglichst viele Informationen bei der Schätzung von Parametern einer Stichprobe zu erlangen, welche auch in der Stichprobe selbst enthalten sind. Bei der Transformation von komplexen Datenvektoren in eine einfachere Form, wird versucht unter Berücksichtigung der Suffizienz alle wesentlichen Informationen der zu Grunde liegenden Verteilungsfunktion beizubehalten. [PRU00]

2.2 Normative und gesetzliche Regelungen zur Luft- und Winddichte

In Österreich ist, je nach Bundesland, die Luftdichtheit von Gebäuden nach der OIB Richtlinie 6 von 2007 oder 2011 einzuhalten. Die beiden Versionen unterscheiden sich hinsichtlich des Grenzwertes der Luftdichtheit nicht. Die Anforderung an die Luft- und Winddichte von Gebäuden ist in der OIB Richtlinie 6 von 2011 [OIB11] folgendermaßen festgehalten:

„Beim Neubau muss die Gebäudehülle luft- und winddicht ausgeführt sein, wobei die Luftwechselrate n_{50} – gemessen bei 50 Pascal Druckdifferenz zwischen innen und außen, gemittelt über Unter- und Überdruck und bei geschlossenen Ab- und Zuluftöffnungen (Verfahren A) – den Wert 3 pro Stunde nicht überschreiten darf. Wird eine mechanisch betriebene Lüftungsanlage mit oder ohne Wärmerückgewinnung eingebaut, darf die Luftwechselrate n_{50} den Wert 1,5 pro Stunde nicht überschreiten. Bei Wohngebäude mit einer Brutto-Grundfläche von nicht mehr als 400 m²-, Doppel- bzw. Reihenhäusern ist dieser Wert für jedes Haus, bei Wohngebäude mit einer Brutto-Grundfläche von mehr als 400 m² für jede Wohnung bzw. Wohneinheit einzuhalten. Ein Mitteln der einzelnen Wohnungen bzw. Wohneinheiten ist nicht zulässig. Der Wert ist auch für Treppenhäuser, die innerhalb der konditionierten Gebäudehülle liegen, inklusive der von diesen erschlossenen Wohnungen einzuhalten. Bei Nicht-Wohngebäuden der Gebäudekategorien 1 bis 12 gemäß Punkt 3.1.2 bezieht sich die Anforderung auf jeden Brandabschnitt. Bei Anwendung eines Prüfverfahrens ist die Luftwechselrate n_{50} gemäß ÖNORM EN 13829 (Verfahren A) zu ermitteln.“ [OIB11]

Neben den Anforderungen an die Luftwechselzahl, ist in der ÖNORM B 8110-2:2003 [ONO03] hinsichtlich der Vermeidung von Kondenswasser- und Schimmelbildung folgendes angegeben:

„Bauteile und Bauteilstöße (z.B. bei Fertigteil- und Leichtbauweise) müssen warmseitig dicht abgeschlossen sein – erforderlichenfalls durch spezielle konstruktive Maßnahmen -, um zu verhindern, dass Raumluft in die Baukonstruktion eindringt und Wasserdampfkondensation auftritt.“ [ONO03]

Dies bedeutet, dass die Luftwechselrate nicht nur aufgrund der durch hohe Luftwechsel auftretenden Wärmeverluste die genannten Grenzwerte unterschreiten muss, sondern ebenfalls die einzelnen Bauteile und Bauteilfugen luftdicht sein müssen, um Schäden an der Konstruktion zu vermeiden. Es ist daher beispielsweise nicht normkonform, wenn eine Luftwechselzahl von $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ zwar eingehalten werden kann, die Art der vorhandenen Leckagen jedoch Kondenswasserbildung zulässt und somit die Dauerhaftigkeit der Konstruktion nicht gewährleistet wird.

In Deutschland gelten die Richtlinien der EnEV 2009 [ENE13], die zum einen Anforderungen an außen liegende Fenster, Fenstertüren und Dachflächenfenster und zum anderen Anforderungen bei einem Nachweis der Luftdichtheit des gesamten Gebäudes vorsieht. Für Gebäude mit bis zu 2 Vollgeschossen ist eine Fugendurchlässigkeitsklasse von 2 einzuhalten, für Gebäude mit mehr als 2 Vollgeschossen eine Fugendurchlässigkeitsklasse von 3. Für das gesamte Gebäude gilt, analog zur OIB Richtlinie 6 [OIB11], eine zulässige Luftwechselrate von $n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$ für Gebäude mit raumluftechnischer Anlage und für Gebäude ohne raumluftechnischer Anlage ein Grenzwert von 3 h^{-1} . Außerdem ist ein Mindestluftwechsel zum Zwecke der Gesundheit und Beheizung einzuhalten. [ENE13]

In der deutschen Normreihe für Wärme- und Energieeinsparung in Gebäuden (DIN 4108-x) sind weitere Regelungen zur Luftdichtheit enthalten. Dabei sieht die DIN 4108-2:2011 [DIN11a] zu den Mindestanforderungen an den Wärmeschutz folgende Anforderungen an die Luftdichtheit von Außenbauteilen vor:

- Fugen der wärmeübertragenden Umfassungsfläche des Gebäudes sind nach dem Stand der Technik dauerhaft luftundurchlässig abzudichten.
- Der aus Messergebnissen abgeleitete Fugendurchlasskoeffizient von Bauteilanschlussfugen muss kleiner als $0,1 \text{ m}^3/\text{m h (daPa}^{2/3})$ sein.
- Für Fenster und Fenstertüren gelten die Anforderungen nach EN 12207:1999 [CEN99].
- Für Außentüren muss der Fugendurchlasskoeffizient kleiner als $2 \cdot 0,1 \text{ m}^3/\text{m h (daPa}^{2/3})$ sein, da eine Funktionsfuge vorliegt.
- Aus Gründen der Hygiene, der Begrenzung der Raumluftheuchte sowie gegebenenfalls der Zuführung von Verbrennungsluft ist auf einen ausreichenden Luftwechsel zu achten. Ein Mindestluftwechsel für Wohngebäude von $0,5 \text{ h}^{-1}$ ist daher vorgesehen und über den Tagesgang konstant anzusetzen, wenn weder die Bedingungen für erhöhte Tag- oder Nachtlüftung erfüllt sind.

Die hier genannten Anforderungen betreffen vor allem jene von Bauteilen und deren Anschlüsse, nicht aber Grenzwerte der Luftwechselrate von Gebäuden oder Wohneinheiten. Weiter spezifiziert werden die Anforderungen an die Luftdichtheit deshalb in der Norm DIN 4108-7:2011 [DIN11b], in jener neben Anforderungen an Gebäude auch Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie

Beispiele dazu enthalten sind. In der genannten Norm sind identisch zur OIB Richtlinie 6 [OIB11] sowie zur EnEV 2009 [ENE13] Grenzwerte zur Luftwechselrate von $1,5 \text{ h}^{-1}$ beziehungsweise $3,0 \text{ h}^{-1}$ festgehalten. Die Empfehlungen zur Abdichtung von Fugen und Anschlüssen werden in diesem Zusammenhang nicht weiter angeführt.

Oft von Bedeutung ist die Einhaltung einer bestimmten Luftwechselrate bei Gebäuden, welche einer Zertifizierung unterliegen. So fordern beispielsweise die Kriterien für Passivhäuser mit Wohnnutzung eine Luftwechselrate von $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$. [PAS12] Auch das Schweizer Qualitätslabel „MINERGIE“ gibt einen Grenzwert von $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$ als Kriterium für den Erhalt des Zertifikats vor. [MIN13] Das „RAL-Gütezeichen Niedrigenergie-Bauweise“ des Deutschen Instituts für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. fordert für zertifizierte Gebäude eine Luftwechselrate von nicht mehr als 1 h^{-1} . [FLI12a]

In Südtirol (IT) ist eine Zertifizierung von Gebäuden nach unterschiedlichen Energieeffizienzklassen (Gold, A - G) vorgesehen. Für Neubauten gilt bereits die Einhaltung der Energieeffizienzklasse B (Heizenergiebedarf $\leq 50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) und wird ab 2015 weiter auf Energieeffizienzklasse A (Heizenergiebedarf $\leq 30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) beschränkt. Hier sind klare Grenzwerte der Luftdichtheit in der Technischen Richtlinie Klimahaus [AUT11] angegeben, welche auch von der Landesregierung als gesetzliche Grundlage genannt wird. Die höchste zulässige Luftwechselrate ist dabei $2,0 \text{ h}^{-1}$ und es gelten je nach Energieeffizienzklasse der Gebäudehülle folgende Grenzwerte, beziehungsweise Zielwerte: [AUT11]

Klasse C > Grenzwert $n_{50,lim} = 2,0 \text{ h}^{-1} \pm 0,1$

Klasse B > Grenzwert $n_{50,lim} = 1,5 \text{ h}^{-1} \pm 0,1$

Klasse A > Zielwert $n_{50,lim} = 1,0 \text{ h}^{-1} \pm 0,1$

Klasse Gold > Zielwert $n_{50,lim} = 0,6 \text{ h}^{-1} \pm 0,1$

3 Differenzdruckverfahren zur Bestimmung der Luftdichtheit

3.1 Prüfverfahren

Grundsätzlich sind zwei verschiedenen Messverfahren unter Differenzdruck zu unterscheiden, die auch jeweils zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt (Baufortschritt) durchgeführt werden. Beide Verfahren lehnen sich an die normativen Regelungen der ÖNORM EN 13829 [ONO01].

VERFAHREN A: Dieses Verfahren beschreibt die Prüfung des Gebäudes im so genannten Nutzungszustand. Dies bedeutet die Prüfung erfolgt sobald sich das Gebäude im bezugsfertigen Zustand befindet, bzw. bereits bezogen wurde. Es dürfen hierbei keine Leckagen verklebt oder zusätzlich abgedichtet werden. Des Weiteren sollte der Zustand der Gebäudehülle dem Zustand während der Jahreszeit entsprechen, in der Heizung- oder Klimaanlage benutzt werden. Müssen bestimmte Luftdichtheitswerte gemäß Richtlinien eingehalten werden, ist dieses Verfahren als das Maßgebende zu betrachten. [ONO01]

VERFAHREN B: Hierbei versteht man die Prüfung der Gebäudehülle zur Überprüfung von Fehlstellen und Leckagen in den Außenwänden. Der Zeitpunkt der Messung sollte so gewählt sein, dass nachträgliche Änderungen und Korrekturen noch möglich sind. Während der Prüfung werden alle absichtlich vorhandenen Öffnungen geschlossen oder abgedichtet. [ONO01]

3.2 Gebäudevorbereitung

Da für diese Arbeit nur das Verfahren A angewandt wurde, wird weiterfolgend nur dieses Verfahren näher behandelt. Die Gebäudevorbereitung ist derzeit nur eher oberflächlich und ungenau in der gültigen Norm festgelegt. Folgende Punkte werden in ÖNORM EN 13829 [ONO01] angeführt:

- Alle absichtlich vorhandenen äußeren Öffnungen des zu untersuchenden Gebäudes oder Gebäudeteils werden geschlossen (Fenster, Türen, Kaminzug, ...)
- Bei Verfahren A werden keine weiteren Maßnahmen getroffen, um die Luftdichtheit zu verbessern.
- Der gesamte zu untersuchende Gebäudeteil muss so gestaltet werden, dass er sich bei Druckbeaufschlagung als eine Zone verhält
- Alle Türen (ausgeschlossen jene von Schränken und Einbauschränken) werden innerhalb des zu untersuchenden Gebäudeteils geöffnet.
- Die Zustände von Fenstern, Türen, opaken Wänden, Dach, Boden und Positionen von einstellbaren Öffnungen und alle Abdichtungen an absichtlich vorhandenen Öffnungen sind zu notieren.
- Wärmeerzeuger mit Raumlufverbund werden ausgeschaltet. Aus offenen Feuerstellen wird die Asche entfernt. Mechanische Lüftungs- und Klimaanlage werden ausgeschaltet.
- Die Luftdurchlässe von mechanischen Lüftungsanlageteilen werden abgedichtet. Andere Lüftungsöffnungen (z.B. Öffnungen für natürliche Lüftung) werden für die Zwecke von verfahren A geschlossen.

Zusätzlich zu den hier genannten Regelungen werden vermutlich weitere Vorbereitungsmaßnahmen in der neuen, aber noch nicht herausgegebenen Fassung der ÖNORM EN 13829 (Entwurf) folgen. Zu demselben Thema veröffentlichte der „Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V.“ ein Beiblatt zur EN 13829 [ONO01] in dem eine Liste zur Vorbereitung des Gebäudes enthalten ist. Diese ist in Tabelle 1 angeführt, es wird aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese NICHT Bestandteil der Norm ist.

Tabelle 1 : Checkliste für Abnahmemessung (Verfahren A) [FLI08]

<i>Bauteil / Öffnung / Einbau etc.</i>	<i>Bemerkung</i>
Außentüren	Tür zu, evtl. abschließen
Innentüren	Tür auf, evtl. sichern
Schranktüren	keine Maßnahmen
Bodenluke zum unbeheizten Spitzboden	Tür zu
Kellertür zum unbeheizten Keller / Kellerflur / Kellertreppenabgang	Tür auf, wenn Räume dahinter beheizt
Offener Kamin	Außer Betrieb, Asche weg, Zuluft zu
Kachelofen / Einbauofen / Beistellherd od. Ähnl.	Außer Betrieb, Asche weg, Zuluft zu
Raumluftabhängig betriebene (Gas-) Feuerstätten im beheizten Gebäudebereich	Außer Betrieb setzen, keine Maßnahmen
Kamin, Kachelofen, Einbauofen etc. die raumluftunabhängig betrieben werden	Außer Betrieb setzen, keine Maßnahmen
Raumluftunabhängig betriebene (Gas-) Feuerstätten im beheizten (z.B. Brennwertgeräte) Gebäudebereich	Außer Betrieb setzen, keine Maßnahmen
Klappen / Türen / Luken zu unbeheizten Gebäudebereichen (Garage, Abstellräume)	Tür zu, evtl. abschließen
Schlüssellöcher	keine Maßnahmen
Kanalentlüftungsventile im beheizten Gebäudebereich	Abdichten
Dunstabzugshaube	Außer Betrieb setzen, keine Maßnahmen
Erdwärmetauscher (Zuluft Lüftungsanlage)	Abdichten
Spaltlüftungsbeschläge an Fenstern / Dachflächenfenstern	Schließen, keine Maßnahmen
Zuluftelemente (mech. Abluftanlage)	Schließen, keine Maßnahmen
Zu-/ Abluftventile (Zu- / Abluft Lüftungsanlage)	Abdichten
Briefkastenklappen / -schlitze	Schließen, keine Maßnahmen
Katzenklappen	Schließen, keine Maßnahmen
Öffnung "Zuluft" im Heizungskeller / Öllager	keine Maßnahmen
Wäschetrockner im beheizten Gebäudeteil mit Abluft nach außen	Schließen, keine Maßnahmen
Wäscheschacht zum unbeheizten Gebäudeteil	Schließen, keine Maßnahmen
Zentrale Staubsaugeranlage	Schließen, keine Maßnahmen
Rolladengurtdurchführungen	keine Maßnahmen
Deckel von Schächten mit Pumpen / Installationen im beheizten Gebäudeteil	Schließen, keine Maßnahmen
Luken / Klappen zu Abseiten im Dachgeschoss	Schließen, keine Maßnahmen
Fehlender Fenstergriff	Abdichten, Vermerk im Protokoll
Leerrohre zu unbeheizten Gebäudebereichen (z.B. für nachträgliche Montage von Solaranlagen)	keine Maßnahmen
Im beheizten Gebäudeteil angeordnete Hinterlüftungsöffnung von Schornsteinen	keine Maßnahmen
Abgehängte Decke	keine Maßnahmen
Fenster in unbeheizten Räumen	Schließen

3.3 Messgeräte (Messfehler, Typen, Anwendung)

3.3.1 Messfehler

Bei Messungen können bestimmte Fehler nicht ausgeschlossen werden. Es ist notwendig alle möglichen Fehler, Abweichungen und deren Quelle zu erkennen und in der Berechnung möglichst zu berücksichtigen. Es kann jedoch nicht immer von Messfehlern gesprochen werden, denn meist handelt es sich nur um Abweichungen. Oft wird jedoch der Begriff Fehler, anstelle der Abweichung verwendet. Man spricht definitionsgemäß erst dann von Fehlern, wenn die Abweichung eine vorgegebene Grenze überschreitet. Somit ist nicht jede Abweichung auch automatisch ein Fehler, und kann durchaus zulässig sein. Fehler sind dadurch dennoch nicht auszuschließen. [RAI08]

Fehler und Abweichungen sind bei der Messung der Luftdichtheit mittels Differenzdruckverfahren besonders häufig anzutreffen. Deren Ursache kann in unterschiedlichster Form

- in den Messinstrumenten liegen (defekt, Toleranzen, nicht kalibriert)
- vom Prüfer ausgehen (falsches Ablesen, falsches Einbauen der Messinstrumente, Punkte in der Gebäudevorbereitung vergessen)
- von Einflüssen der Umgebung verursacht sein (hohe Windgeschwindigkeit, hohe Gebäude, große Temperaturdifferenzen)

Besonders hohen Beitrag leisten hier die herrschenden Umwelteinflüsse, welche die Genauigkeit der Messungen stark beeinträchtigen können. Generell sind jegliche Fehler möglich, welche auch in der Literatur angegeben werden. Hier unterscheidet man vier Arten von Fehlern, welche sich je nach ihrem Ursprung folgendermaßen gliedern:

- systematische Messfehler
- zufällige Messfehler
- grobe Messfehler
- methodische Messfehler

Systematische Fehler haben ihre Ursache in der Mess-Schaltung, dem Messverfahren, den Eigenschaften des Referenzmesspunktes und den Eigenschaften der verwendeten Messkomponenten. Fehler dieser Art zeigen immer eine Abweichung in eine Richtung und sind in der Regel korrigierbar. [HER12] Auftretende systematische Fehler in der Luftdichtheitsmessung sind jedoch meist sehr schwer zu erkennen, da die Umgebungsbedingungen bei jeder Messung variieren (z.B. Windgeschwindigkeit). Man spricht hier von unbekannt systematischen Abweichungen. In diesem Fall können systematische Abweichungen wie zufällige Abweichungen behandelt werden, jedoch kann hierdurch eine einseitige Verschiebung des Mittelwertes um den Wert der systematischen Abweichung bewirkt werden. [RAI08] Liegen hingegen Messfehler vor, welche beispielsweise aufgrund von falscher Gebäudevorbereitung auftreten, handelt es sich um systematische Fehler. Außerdem können systematische Fehler der Messgeräte durch kontinuierliche Wartung und Kalibrierung der Instrumente verringert werden.

Zufällige Fehler sind durch zufällige Einflüsse verursachte Abweichungen und können nur durch Messungen unter gleichen Bedingungen erkannt werden. Diese Fehler lassen sich durch statistische Methoden bestimmen und korrigieren, vorausgesetzt es ist eine ausreichend große Anzahl von Messungen vorhanden. [RAI08] Für Luftdichtheitsmessungen wäre es dabei notwendig, genau denselben Test, völlig unabhängig und mit anderen Geräten und Prüfern durchzuführen. Auch unter identischen Umwelteinflüssen. Nur so ist es möglich einen zufälligen Fehler zu erkennen. Dies bedeutet für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen, dass es sehr schwierig ist die tatsächlich auftretenden zufälligen Messfehler zu beurteilen, da die Gebäude nur einem Luftdichtheitstest unterzogen wurden. Außerdem machen es variierende Umwelteinflüsse schwierig, unter immer denselben Bedingungen zu messen. Daraus lässt sich schließen, dass die Windeinflüsse zufällige Messfehler verursachen. Aus diesem Grund ist für die Auswertung von Kennwerten der Luftdichtheit eine bestimmte Messunsicherheit zu berücksichtigen.

Unter *groben Fehler* versteht sich der so genannte Ausreißer einer Messreihe. In der Auswertung können solche Fehlerwerte durch das Filtern der Messwerte (zum Beispiel mit dem Medianfilter) ausgeschlossen werden. [HER12] Bei einem Blower-Door Test können derartige Fehler entstehen, wenn eine Öffnung nicht geschlossen wird, hohe Windgeschwindigkeiten herrschen, oder die Druckschläuche falsch angeschlossen werden. In der Regel können grobe Fehler bereits vor der Luftdichtheitsmessung schnell erkannt werden, sofern der Prüfer ausreichende Erfahrung besitzt, oder es bereits einen Vergleichswert zur Luftdichtheit des Gebäudes gibt. Für grobe Messfehler gilt bei der Messung der Luftdichtheit eines Gebäude, dass entweder die Messung

nach den Regeln der ÖNORM 13829 [ONO01] ungültig und nicht durchführbar (Beispiel natürliche Druckdifferenz, hohe Windgeschwindigkeit) ist, oder die Fehlerquelle kann vor der eigentlichen Messung erkannt und beseitigt werden.

Methodische Messfehler sind ähnlich zu den systematischen Fehlern, verfügen aber über eine zufällige Komponente. Diese Art von Fehlern lässt sich nur sehr schwer korrigieren. [HER12]

In der ÖNORM EN 13829 [ONO01] wird hinsichtlich der Messfehler bei Differenzdruckmessungen vorwiegend von Unsicherheiten gesprochen. Große Abweichungen bzw. Fehler werden daher durch bestimmte Grenzwerte in Bezug auf die herrschenden Umgebungsbedingungen ausgeschlossen. Für eine gültige Messung gilt daher [ONO01]:

- Das Produkt der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen in Kelvin und der Höhe der Gebäudehülle in Meter, ist kleiner als 500 mK beziehungsweise 250 mK.
- Der Mittelwert (30 Sekunden Messzeit) der natürlichen Druckdifferenz von Über- sowie Unterdruck beträgt nicht mehr als 5 Pa.
- Die Windgeschwindigkeit beträgt nicht mehr als 6 m/s und weniger gleich Stufe 3 der Beaufort-Skala (siehe Tabelle 2). Hierbei sei erwähnt, dass bei Überschreiten dieses Grenzwertes die Messung zwar durchgeführt werden darf, das Ergebnis jedoch mit dementsprechend großen Unsicherheiten behaftet ist.

Tabelle 2 : Windstärke nach Beaufort (Auszug) [ONO01]

Windstärke in Beaufort	Bezeichnung	Windgeschwindigkeit in m/s	Beschreibung
0	Still	> 0,45	Windstille; Rauch steigt senkrecht empor
1	Leiser Zug	0,45 bis 1,34	Windrichtung nur durch Zug von Rauch, nicht durch Windfahne angezeigt
2	Leichte Brise	1,8 bis 3,1	Wind im Gesicht fühlbar; Blätter säuseln; Windfahne bewegt sich
3	Schwache Brise	3,6 bis 5,4	Blätter und dünne Zweige bewegen sich; Wind streckt einen Wimpel
4	Mäßige Brise	5,8 bis 8	Hebt Staub und loses Papier; bewegt Zweige und dünne Äste
5	Frische Brise	8,5 bis 10,7	Kleine Laubbäume beginnen zu schwanken; auf Seen bilden sich Schaumköpfe
6	Starker Wind	11,2 bis 13,9	Starke Äste in Bewegung; Pfeifen in Telegraphenleitungen; Regenschirme schwierig zu benutzen

Um die Unsicherheiten einer Messung abzuschätzen, sollte daher eine Fehlerfortpflanzungsrechnung für jede Messung durchgeführt werden, worauf später noch genauer eingegangen wird. Große Auswirkung auf die Messunsicherheiten hat dabei die herrschende Windgeschwindigkeit während der Messung. Bei starkem Wind kann diese beispielsweise zu einer Gesamtunsicherheit von $\pm 40\%$ führen. [ONO01]

3.3.2 Luftfördereinrichtung & Druckmessgerät



Abb. 1 : Messgerät mit 3 Ventilatoren der Marke Minneapolis Blower-Door im eingebauten Zustand [BLO12]

Zur Erzeugung des Unter- bzw. Überdruckes im Gebäude werden in der Regel ein oder mehrere Ventilatoren mit integrierter Volumenstrommessung verwendet. Je nach Größe des Gebäudes wird das entsprechende Gerät mit passendem Messbereich (Beispielsweise $19 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $7200 \text{ m}^3/\text{h}$) verwendet. Zusätzlich können bei besonders großen Gebäuden oder Hallen auch bereits installierte Lüftungsgeräte zusätzlich verwendet werden. Das Lüftungsgerät wird in der Regel im Erdgeschoss in einem Fenster, einer Terrassentür oder der Haustür eingebaut. Es ist nach EN 13829 [ONO01] nicht genau festgelegt, dass die Luftfördereinrichtung in die kleinste Öffnung des Gebäudes eingebaut werden muss. Es wird aber darauf hingewiesen, dass die Wahl des Einbauortes bedacht sein soll, da oft an Türen oder Fenstern eine große Undichtheit festzustellen ist. Um die Luftfördereinrichtung zu steuern, ist eine Apparatur zur Regelung der Geschwindigkeit des Ventilators ebenfalls Bestandteil der Messeinrichtung. Auch notwendig ist das Druckdifferenzmessgerät, durch welches die Druckdifferenz zwischen innen und außen, sowie der Volumenstrom oder der Differenzdruck der Luftfördereinrichtung abgelesen werden kann.

Die Volumenstrom-Messeinrichtung (normalerweise in der Luftfördereinrichtung eingebaut) sollte eine Genauigkeit von $\pm 7\%$ aufweisen [ONO01]. Bei dem verwendeten Gerät von Minneapolis besitzt die Messeinrichtung je nach Volumenstrom eine Genauigkeit von $\pm 4\%$ bei $70\text{-}2700 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $\pm 5\%$ bei Blende C und D [ENE04]. Bei dem verwendeten Gerät ist die Saugseite des Gebläses als Messdüse ausgebildet. Somit kann der Volumenstrom durch den Differenzdruck zwischen Messdüse und der Saugseite des Gebläses sowie mithilfe von Umrechnungsformeln oder -tabellen bestimmt werden. Die Volumenstrom-Messeinrichtung sollte alle vier Jahre kalibriert und überprüft werden. [FLI12]

Das Druckdifferenzmessgerät hingegen muss eine Genauigkeit von ± 2 Pa aufweisen [ONO01]. Für das Druckmessgerät DG-3 ist dazu keine klare Genauigkeit angegeben. Je nach Windstärke soll die mittlere Ergebnisgenauigkeit des Leckagestroms bei 50 Pa zwischen 5 % und 6 % liegen [ENE04]. Die Kalibrierung sollte in Abständen von etwa zwei Jahren erfolgen [FLI12].

3.3.3 Wärmebildkamera

Die Thermographie ist im Zusammenhang mit der Luftdichtheitsmessung als Methode zur Leckageortung geeignet. Dabei werden im Allgemeinen nur qualitative Aussagen getroffen, sodass eine genaue Einstellung aller Parameter (Emissionsgrad, Hintergrundtemperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Abstand) der Wärmebildkamera nicht zwingend notwendig ist. Trotzdem sollten die Einstellungen überprüft, und bei starken Abweichungen



Abb. 2 : Wärmebildkamera NEC H2640 [ENE04]

korrigiert werden. Für eine schnelle und verlässliche Suche von Leckagen ist jedoch etwas Übung und Erfahrung im Umgang mit der Kamera erforderlich. Für die Messungen im Zusammenhang dieser Arbeit wurde das Gerät „H2640“ von NEC verwendet, welche in Abb. 2 dargestellt ist. Eine besonders hochwertige Wärmebildkamera mit einem Messbereich von -40°C bis max. 2000°C sowie einer großen Reihe von Einstellmöglichkeiten. Die Kamera erreicht eine Auflösung von 0,03 K, wobei eine derart hohe Auflösung zur Ortung von Leckagen nicht zwingend notwendig ist. Da die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft immer eher hoch war ($\Delta T \approx 15$ K), waren die Luftströmungen und somit auch die Leckagen gut erkennbar. Alternativ dazu, besteht auch die Möglichkeit der Leckageortung von außen, indem durch Überdruck die warme Innenluft nach außen gedrückt wird. Ist das Gebäude bereits fertiggestellt, kann bei gravierenden Schäden auch die Konstruktion, wie Vorsatzschalen oder Fassadenverkleidungen, teilweise abmontiert werden, wobei die Wind- und luftdichte Schicht nicht zerstört werden darf. [NAB09]

3.3.4 Thermometer



Abb. 3 : RTR53 Logger für Temperatur und Luftfeuchte

Um die Dichte der Luft berechnen zu können, und somit den Volumenstrom korrigieren zu können, bedarf es der Temperatur von Innen- und Außenluft. Im Falle der Testreihe wurde diese mittels des digitalen Loggers des Typs „RTR53“ von TandD gemessen (Abb. 3). Es befanden sich dazu über den gesamten Messzeitraum zwei fixe Logger im Außenbereich, von denen die Außentemperatur abgelesen werden konnte. Im Innenbereich wurde das Temperaturmessgerät für ca. 15 Minuten liegen gelassen, bevor die Temperatur abgelesen wurde. Das Thermometer erreicht eine Genauigkeit von $\pm 0,3$ K bei einer Auflösung von 0,1 K. Die geforderte Messgenauigkeit für das in der Messung verwendete Thermometer ist in der ÖNORM 13829 [ONO01] mit ± 1 K angegeben.

Der beschriebene Datenlogger misst neben der Temperatur auch die Luftfeuchtigkeit. Verwendet wurde dieses Gerät daher auch für die Messungen, welche unter Punkt 4.2.1 zur Beurteilung des Einflusses der Luftdichtheit auf die Raumluftfeuchte herangezogen wurden. Dazu wurde viertelstündlich jeweils ein Wert für die Lufttemperatur sowie –feuchtigkeit aufgezeichnet.

3.3.5 Rauchröhrchen und Theaternebel

Das Rauchröhrchen zählt zwar nicht direkt zu den Messgeräten, doch ist es für die Ortung und Beurteilung von Leckagen ein nützliches Werkzeug und wird daher hier mit den restlichen Messgeräten angeführt. Diese Glasröhrchen enthalten einen mineralischen Tragekörper mit rauchender Schwefelsäure. Wird das Röhrchen geöffnet und kommt die Schwefelsäure in Kontakt mit Umgebungsluft, bilden sich winzige Wassertröpfchen welche als feiner Nebel sichtbar werden. [FRA12] Bei Beobachtung der Bewegung des Rauches, kann eine Luftströmung erkannt und lokalisiert werden. Die Ortung von Leckagen kann auch mittels Theaternebel, erzeugt durch eine Rauchmaschine, erfolgen. Hierbei wird der im Raum produzierte Rauch durch Überdruck durch die Leckagen nach außen gedrückt. Von außen können somit undichte Stellen leichter geortet werden.

3.4 Ablauf der Luftdichtheitsmessung

Im ersten Schritt ist der Messzeitpunkt festzulegen. Dabei ist von Bedeutung ob, es sich um eine Messung des Verfahrens A oder des Verfahrens B handelt. Der Baufortschritt bzw. der Bauzustand des Gebäudes sollte demnach bekannt sein. Die Qualität einer Messung ist nur dann gegeben, wenn auch nach der Messung mit keinen zusätzlichen Leckagen mehr zu rechnen ist. Der Prüfer sollte vor der Messung wesentliche Kennzahlen des Gebäudes kennen (Innenvolumen, Nettogrundfläche, Hüllfläche), um grobe Messfehler erkennen und eventuell vermeiden zu können. [IFB11]

Sind alle Bedingungen für die Durchführung einer korrekten Messung gegeben (siehe Kapitel 3.3.1), ist vor der Messung die Windgeschwindigkeit zu protokollieren und die Innen- und Außentemperatur muss vor, während oder nach der Messung bestimmt werden. Nach dem Einbau des Gerätes kann mit der Messung begonnen werden. Vor und nach der Messung muss die natürliche Druckdifferenz, positiv sowie negativ, über einen Zeitraum von 30 Sekunden gemittelt und dokumentiert werden :

Δp_{01+} = gemittelte natürliche Druckdifferenz positiver Werte VOR der Messung

Δp_{01-} = gemittelte natürliche Druckdifferenz negativer Werte VOR der Messung

Δp_{02+} = gemittelte natürliche Druckdifferenz positiver Werte NACH der Messung

Δp_{02-} = gemittelte natürliche Druckdifferenz negativer Werte NACH der Messung

Die Messreihe setzt sich aus einer Unter- und Überdruckmessung zusammen. Dazu wird der Volumenstrom bei der erzeugten Druckdifferenz in Schritten von nicht mehr als 10 Pa gemessen. Die kleinste Druckdifferenz muss dabei 10 Pa bzw. 5 mal der Betrag der natürlichen Druckdifferenz betragen. Für Einfamilienhäuser und kleine Gebäude gilt, dass mindestens bis zu einer Druckdifferenz von 50 Pa gemessen wird, es kann auch bis zu ± 100 Pa gemessen werden. Nach derzeitigem Stand ist es unter Umständen auch zulässig, nur eine Messreihe (Über- oder Unterdruck) aufzunehmen. Für jede Messreihe müssen mindestens 5 Messpunkte in etwa gleicher Druckdifferenz zwischen den Punkten aufgenommen werden. [ONO01]

In der Abb. 4 ist der Ablauf einer Luftdichtheitsmessung nach EN 13829 [ONO01] schematisch dargestellt. Sie zeigt die wesentlichen Schritte, die einzuhaltenden Randbedingungen und die Verfahrensweise für eine Messung.

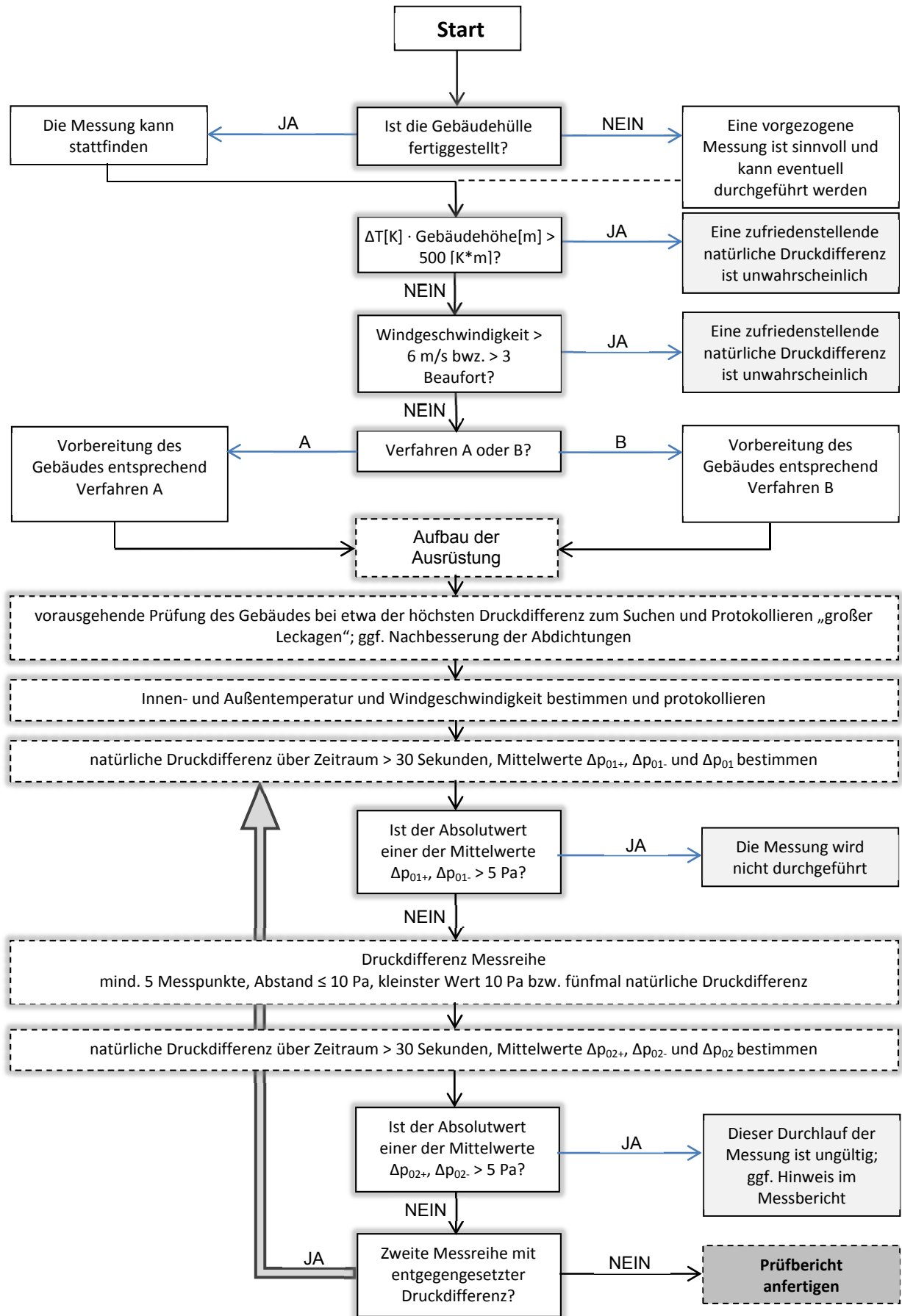


Abb. 4 : Ablauf der Luftdichtheitsmessung nach EN 13829 [IFB11]

3.5 Bewertung von Leckagen

3.5.1 Allgemeines

Leckagen in der Außenhülle eines Gebäudes müssen im Zuge einer Luftdichtheitsprüfung geortet und beurteilt werden. Dies kann durch verschiedene Methoden (Differenzthermographie, Anemometer, Rauchröhrchen, Theaternebel etc.) mithilfe der bereits genannten Messinstrumente erfolgen. Wird eine Luftundichtheit festgestellt, ist es wichtig diese im Hinblick auf die Gefährdung der Konstruktion oder Einflussnahme auf das Behaglichkeitsempfinden der Bewohner zu bewerten. So können Leckagen mit starken Luftströmungen durchaus Zugerscheinungen im bewohnten Bereich hervorrufen. Nicht zu vernachlässigen sind Leckagen kleiner Dimension. Nach [NUS12] können auch diese für konvektive Feuchteinträge in der Konstruktion verantwortlich sein und zu Feuchteschäden in der Konstruktion führen. Besonders kritisch zeigt sich dieses Problem bei Flachdächern mit beidseitig stark diffusionshemmenden Schichten, da für die eindringende Feuchtigkeit durch die Leckagen nicht ausreichende Trocknungsmöglichkeit besteht. Abhilfe schaffen können dabei innenseitig feuchteadaptive Dampfbremsen, die ermöglichen, dass die Konstruktion nach innen hin austrocknen kann.

3.5.2 Fugen und Leckagen

Undichte Stellen in der Außenhülle des Gebäudes können in verschiedenster Art und Weise auftreten. Die Luftdichtheit von Bauteilen wird im Wesentlichen von drei Leckagearten beeinflusst:

- Einbaufugen von Bauteilen und Anschluss an die luftdichte Ebene des angrenzenden Bauteils (Wandstöße, Haustechnische Durchdringungen, Einbaufugen von Fenstern und Türen, Kamine, Dachanschluss)
- Schließfugen oder sogenannte Funktionsfugen (Fuge zum Öffnen von Fenstern, Türen, Luken, Klappen)
- Leckagen innerhalb eines Bauelements (undichte Rahmenverbindung, Durchdringungen der Luftdichten Ebene durch Installationsleitungen oder Schrauben)

Zur Beurteilung dieser Leckagen gilt es, die Merkmale der Leckage und die Einflussfaktoren zu erörtern. Folgende Fragen dazu sind von Bedeutung:

- Wo im Gebäude befindet sich die Leckage?
- Welche Größe, Fläche und Form hat Sie?
- Luftgeschwindigkeit, mit der die Leckage bei vorgegebener Druckdifferenz durchströmt wird.
- Wie ist die hinter der Leckage liegende Konstruktion aufgebaut?
- Wie wird der betroffene Raum genutzt? (Temperatur, Feuchtigkeit, ...)
- Sind die Anforderungen an Regelwerke oder vertragliche Vereinbarungen eingehalten?

Besonderes Augenmerk sei bei der Beurteilung der Leckagen auf ihre langfristigen Auswirkung auf die Konstruktion gelegt. So können oft Leckagen im Hinblick auf die Energiebilanz des Gebäudes belanglos sein, trotzdem aber für die Dauerhaftigkeit der Konstruktion bedeutende Risiken mit sich bringen. [FLI12]

3.5.3 Leckagefläche

Um dem Leihen einen Eindruck zur Luftdichtheit eines Gebäudes zu geben, wird oft versucht, dies mittels einer Leckagefläche auszudrücken. Eine überschlagsmäßige Berechnung dieser Leckagefläche zeigt [SPE03], wobei der Volumenstrom bei 50 Pa mit 5,55 m/s dividiert wird. Der mathematische Ausdruck dazu lautet:

$$A_{eff} = \frac{\dot{V}_{50}}{5,55} \quad (1)$$

dabei ist:

A_{eff} effektive Leckagefläche [cm²]

\dot{V}_{50} Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz [m³/h]

Dabei rühren die 5,55 m/s daher, dass bei 50 Pa Druckdifferenz der Staudruck von Wind mit 9,1 m/s (Windstärke 5 nach Beaufort) simuliert wird und diese dann mit einer Durchflusszahl von $C_d = 0,61$ multipliziert wird. Diese Durchflusszahl ergibt sich für enge Rechteckquerschnitte von etwa 5mm, die als mittlere Fugendimension angenommen werden. [SPE03]

Von größerer Bedeutung und gerne angewandt wird die Leckagefläche in den USA und in Kanada. Die Messergebnisse werden dazu auf 4 bzw. 10 Pa extrapoliert und aus dem Volumenstrom eine effektive bzw. äquivalente Leckagefläche berechnet. Es ist aber zu berücksichtigen, dass durch die Extrapolation größere Ungenauigkeiten auftreten. Durch diese Kennzahlen kann mehr über die Eigenschaften des Gebäudes bei Verhältnissen während der Nutzung ausgesagt werden. Vorwiegend eingesetzt wird daher die Leckagefläche zur Berechnung der Infiltration und in Infiltrationsmodellen. [IWU95]

Durch den Zusammenhang von Leckagefläche und Volumenstrom ergibt sich für die Leckagefläche: [ORM94]

$$A = \frac{1}{C_d} \cdot \left(\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \dot{V}_L \quad (2)$$

dabei ist:

A	Leckagefläche [cm^2]
C_d	Durchflusszahl
ρ	Dichte der Luft [kg/m^3]
Δp	Druckdifferenz [Pa]
\dot{V}_L	Volumenstrom [m^3/h]

effektive Leckagefläche [m^2]: Die sogenannte Effective Leakage Area (ELA) ist die Querschnittsfläche einer strömungsgünstigen Öffnung in einer dünnen Platte (Durchflusszahl $C_d = 1$), durch die der gleiche Volumenstrom fließt, wie über die Gebäudehülle. [ORM94] Diese Kenngröße wurde von dem Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) für deren Infiltrationsmodell entwickelt. Dazu wird die Leckagefläche einer Düsenförmigen Öffnung, ähnlich der des Blower-Door Ventilators, bei einem Druckunterschied von 4 Pa angegeben. [BUI12] Durch einsetzen dieses Differenzdrucks in Gleichung (2) ergibt sich für die effektive Leckagefläche:

$$ELA (4 Pa) = 1,076 \cdot \dot{V}_4 \quad (3)$$

dabei ist:

$ELA (4 Pa)$ effektive Leckagefläche [cm^2]

\dot{V}_4 Volumenstrom bei 4 Pa Druckdifferenz [m^3/h]

äquivalente Leckagefläche [m^2]: Auch Equivalent Leakage Area (EqLA) genannt, stammt diese Kenngröße vom Canadian National Research Council und beschreibt analog zum ELA die Querschnittsfläche einer Öffnung, die jedoch scharfkantig ist (Durchflusszahl $C_d = 0,61$). Außerdem gilt in der Regel ein Bezugsdruck von 10 Pa. [BUI12] Auch diese Kenngröße wird für Infiltrationsmodelle herangezogen und wird durch Einsetzen des Differenzdruckes in Gleichung (2) berechnet mit:

$$EqLA (10 Pa) = 1,116 \cdot \dot{V}_{10} \quad (4)$$

dabei ist:

$EqLA (10 Pa)$ äquivalente Leckagefläche [cm^2]

\dot{V}_{10} Volumenstrom bei 10 Pa Druckdifferenz [m^3/h]

Nachdem mehrere verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung der Leckagefläche in der Literatur zu finden sind, stellt sich die Frage, welcher sich wofür eignet. Die überschlagsmäßige Berechnung von A_{eff} nach [SPE03] konnte in der Literatur nicht in Zusammenhang mit physikalischen Berechnungen gefunden werden und ist daher vermutlich nur für qualitative Aussagen geeignet.

Anders dazu werden ELA und EqLA zur Berechnung der Infiltration in diversen Berechnungsmodellen angewandt. Dazu empfiehlt [BUI12]: Bei Verwendung der Leckagefläche für die Berechnung von physikalischen Eigenschaften und Verhalten von Gebäuden, ist für die Leckagefläche die EqLA zu empfehlen. Dadurch kann das physikalische Verhalten von Gebäuden annähernd gut beschrieben werden. Dies zeigt ein Versuch, wenn ein beispielsweise kleines Fenster geöffnet wird und der Test wiederholt wird, so vergrößert sich die berechnete EqLA in etwa um die Fläche des kleinen Fensters im Vergleich zum der EqLA des ersten Tests.

3.6 Berechnung der Kennzahlen zur Luftdichtheit

Die Ermittlung der Kennzahlen zur Luftdichtheit eines Gebäudes aus den Messdaten erfolgt nach Punkt 6 der ÖNORM EN 13829 [ONO01], wo die einzelnen Schritte für die Berechnung der wesentlichen Kenngrößen zur Luftdichtheit von Gebäuden enthalten sind. Diese werden hier nicht eigens niedergeschrieben, es soll aber die Definition der wesentlichen Kenngrößen festgehalten werden:

- **Strömungskoeffizient** C_{env} [$m^3/(h \cdot Pa^n)$]: Er steht immer im Zusammenhang mit dem Strömungsexponenten n , woraus sich durch

$$\dot{V}_{env} = C_{env} \cdot (\Delta p)^n \quad (5)$$

der Volumenstrom durch die Gebäudehülle (\dot{V}_{env} [m^3/h]) bei einer bestimmten Druckdifferenz Δp [Pa] berechnen lässt.

- **Strömungsexponent** n , in Abhängigkeit von den Öffnungen (Form, Kanten, Größe, Verhältnis von Fläche zu Umfang, ...)
- **Leckagekoeffizient** C_L [$m^3/(h \cdot Pa^n)$]: ist durch folgende Gleichung definiert:

$$C_L = C_{env} \cdot \frac{\rho_i^{(1-n)}}{\rho_e} \quad (6)$$

Dabei ist:

C_{env} Strömungskoeffizient [$m^3/(h \cdot Pa^n)$]

ρ_i Dichte der Innenluft [kg/m^3]

ρ_e Dichte der Aussenluft [kg/m^3]

- **Leckagestrom bei 50 Pa n_{50} [h^{-1}]**: Auch Luftwechselrate oder Luftwechselzahl genannt. Stellt den am häufigsten herangezogenen Bezugswert für die Beschreibung der Luftdichtheit eines Gebäudes dar. Er gibt an, wie oft das Luftvolumen des Gebäudes (Innenvolumen V) bei einer Druckdifferenz von 50 Pa pro Stunde ausgetauscht wird und wird berechnet durch:

$$n_{50} = \frac{C_L \cdot 50[\text{Pa}]^n}{V} \quad (7)$$

Dabei ist:

C_L Leckagekoeffizient [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$]

n Strömungsexponent

V Innenvolumen [m^3]

- **Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]**: Beschreibt den Leckagestrom bei einer Druckdifferenz von 50 Pa über die Gebäudehülle. Der Wert wird folgendermaßen berechnet:

$$q_{50} = \frac{C_L \cdot 50[\text{Pa}]^n}{A_E} \quad (8)$$

Dabei ist:

C_L Leckagekoeffizient [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$]

n Strömungsexponent

A_E Hüllfläche [m^2]

- **Nettogrundflächenbezogener Leckagestrom bei 50 Pa w_{50} [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]**: Ist ein auf die Nettogrundfläche bezogener Leckagestrom bei einer Druckdifferenz von 50 Pa:

$$w_{50} = \frac{C_L \cdot 50[\text{Pa}]^n}{A_F} \quad (9)$$

Dabei ist:

C_L Leckagekoeffizient [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$]

n Strömungsexponent

A_F Nettogrundfläche [m^2]

4 Einfluss der Luftdichtheit auf Raumklima und Konstruktion

Eine unzureichende Luftdichtheit hat unterschiedlichste Auswirkungen auf das Gebäude und deren Bewohner. Es sind dabei nicht nur die Einflüsse auf den Heizwärmebedarf oder die Luftfeuchtigkeit und Feuchtigkeit in Konstruktionen des Gebäudes wesentlich, sondern auch die Einflüsse auf das Behaglichkeitsempfinden der Bewohner. Besonderen Einfluss nimmt die Luftdichtheit dabei auf kalte Oberflächentemperaturen, Schallschutz bzw. Lärmbelästigung und nicht zuletzt auch auf die Gesundheit, wie etwa durch Zugerscheinungen und schlechte Luftqualität.

In diesem Kapitel soll vor allem die Relevanz der Luftdichtheit von Gebäuden und Gebäudeteilen hervorgehoben werden. Es gilt die Einflüsse der Luftdichtheit auf den Wärmehaushalt, den Feuchtehaushalt, die Schalldämmung, den Brandschutz aufzuzeigen, sowie auf die Gefährdung ungünstiger Fugen und Leckagen auf die Konstruktion aufmerksam zu machen.

4.1 Lüftungswärmeverluste

Der Luftaustausch zwischen innen und außen über Fugen von Fenstern und Türen, sowie Bauteilfugen und Undichtheiten in der Konstruktion sind dafür verantwortlich, dass stets ein bestimmter Lüftungswärmeverlust stattfindet. Anders beschrieben geht es darum, dass die warme Raumluft durch kalte Außenluft ersetzt wird und wieder auf die gewünschte Raumtemperatur aufgewärmt werden muss. Eine Kennzahl der Luftdichtheit, der sogenannte Luftvolumenstrom \dot{V}_L , im Normalfall ermittelt durch einen Blower-Door-Test, ist dabei wesentlicher Bestandteil der Berechnung von Lüftungswärmeverlusten. Der Luftvolumenstrom infolge Infiltration ist definiert durch: [FIS08]

$$\dot{V}_L = n_{inf} \cdot V_R \quad (10)$$

dabei ist

\dot{V}_L Luftvolumenstrom [m^3/h]

n_{inf} Luftwechselzahl für Infiltrationsluftwechsel [h^{-1}]

V_R Raumluftvolumen [m^3]

Bei der Berechnung des Luftvolumenstroms infolge Infiltration ist jedoch darauf zu achten, dass es sich nicht direkt um die Luftwechselzahl bei 50 Pa Druckdifferenz (n_{50}) handelt, sondern der Rechenwert des sogenannten Infiltrationsluftwechsels (n_{inf}) anzunehmen ist. Dieser natürliche Luftwechsel entsteht durch die herrschende Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnerem und Außenluft. Die Druckdifferenz ist in der Regel nicht sehr hoch und ist vor allem abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und den auf das Gebäude wirkenden Winddruck. Umso höher ein Gebäude ist, desto größer ist auch die natürliche Druckdifferenz. Ebenso ist die Druckdifferenz bei niedrigen Außentemperaturen höher. Gebäude in sehr windigen Gebieten und stark ausgesetzt, ohne Abschirmung anderer Bauten oder Pflanzen, unterliegen ebenfalls höheren Druckdifferenzen. Weiter beeinflusst wird die Druckdifferenz von Art, Größe und Lage der Leckagen. Es ist also sehr schwierig, die tatsächliche Druckdifferenz und somit den Infiltrationsluftwechsel genau zu berechnen. Da die Einflussgrößen kaum stationär wirken, müssen dafür aufwendige Simulationen durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist es üblich, den Infiltrationsluftwechsel vereinfacht direkt von dem n_{50} -Wert abzuleiten. Es empfiehlt sich folgende Annahme: [ONO10]

$$\begin{aligned} n_{inf} &= 0,11 \text{ h}^{-1} && \text{wenn } n_{50} > 1,5 \text{ h}^{-1} \\ n_{inf} &= 0,07 \cdot n_{50} \text{ h}^{-1} && \text{wenn } 0,6 \text{ h}^{-1} \leq n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1} \\ n_{inf} &= 0,04 \text{ h}^{-1} && \text{wenn } n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1} \end{aligned}$$

Neben dem Volumenstrom aus natürlichen Umwelteinflüssen, ist auch die Fensterlüftung ausschlaggebend für den Lüftungswärmeverlust. Auch hier ist die tatsächliche Lüftungsrate zahlenmäßig nur schwer erfassbar, da der Nutzer entscheidet, wann und wie lange er ein Fenster öffnet, ob er es kippt oder ganz öffnet und welches Fenster mit welcher Größe er öffnet. In der Energieausweisberechnung beispielsweise kann aus diesem Grund der Luftvolumenstrom durch Annahme einer Luftwechselrate von $n_{FL} = 0,4 \text{ h}^{-1}$ angenommen werden. In diesem Fall bleibt der Infiltrationsluftwechsel jedoch unberücksichtigt. [RIC10]

Auch mechanische Lüftungsanlagen können für die Berechnung des Lüftungswärmeverlustes des Energieausweises mit einer Luftwechselrate von $n_{mech} = 0,4 \text{ h}^{-1}$ bzw. für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (mit η als effektiven Wärmebereitstellungsgrad eines Wärmetauschers) mit $n_{mech} \cdot (1-\eta)$ angenommen werden. Hier muss der Infiltrationsluftwechsel jedoch zusätzlich mit berücksichtigt werden. [RIC10] Für aufwendigere Berechnungen kann der Volumenstrom über die Lüftungsanlage unter Kenntnis ihrer Eigenschaften auch genau ermittelt werden.

Nachdem nun ein genäherter Luftvolumenstrom \dot{V}_L aus den genannten Werten für die Luftwechselzahl ermittelt werden kann, ist es in weiterer Folge auch möglich die daraus resultierenden Lüftungswärmeverluste zu berechnen. Der Lüftungswärmestrom, ob bezogen auf den Luftvolumenstrom mit geschlossenen Fenstern, oder den Luftvolumenstrom durch Fensterlüftung, wird ermittelt durch: [FIS08]

$$\Phi = \dot{V}_L \cdot c_p \cdot \rho_L \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (11)$$

dabei ist

Φ Lüftungswärmestrom [W]

\dot{V}_L Luftvolumenstrom [m^3/h]

c_p spezifische Wärmekapazität der Innenluft [$\text{J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$]

ρ_L Dichte der Innenluft [kg/m^3]

θ Lufttemperatur innen und außen [$^{\circ}\text{C}$]

Zur Veranschaulichung der prinzipiellen Auswirkungen von Leckagen auf die Lüftungswärmeverluste sind in Abb. 5 schematisch zwei Bauteile mit unterschiedlicher Bauteildicke dargestellt. Es wird nur die Konvektion durch die Spalte und nicht die Konvektion innerhalb eines Dämmstoffes betrachtet. Angegeben wird der Lüftungswärmeverlust zwischen 1 und 10 Pa. [HAU91]

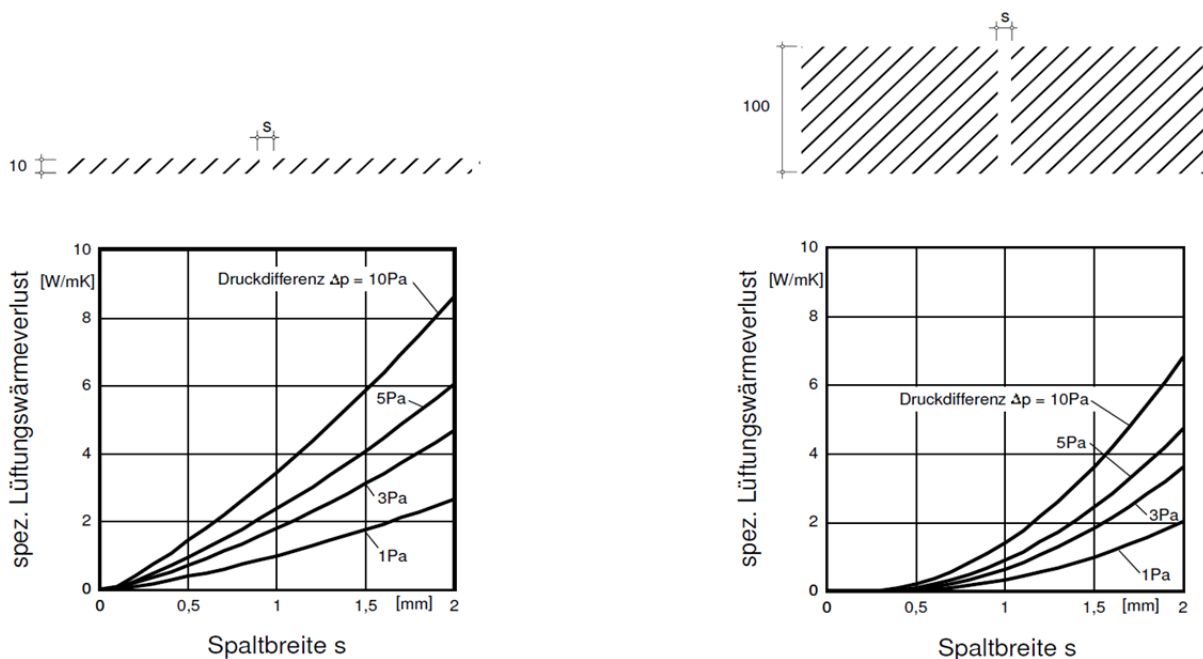


Abb. 5 : Abhängigkeit der spezifischen Lüftungswärmeverluste von der Spaltbreite und der wirksamen Druckdifferenz bei unterschiedlicher Bauteildicke [HAU91]

4.2 Luftdichtheit und Feuchtigkeit

Durch das Wohnen entstehen Geruchs- und Schadstoffe sowie Wasserdampf, wodurch das Lüften von Wohnräumen bei hoher Luftdichtheit zur unbedingten Notwendigkeit wird. Im Zuge der Studie wurde erkannt, dass Bewohner nicht immer ausreichende Sensibilität und Kenntnis darüber besitzen, wie wichtig richtiges Lüftungsverhalten sein kann. Diesem Problem kann eine kontrollierte Wohnraumlüftung durchaus Abhilfe schaffen und der Bewohner braucht dem richtigen Lüften weniger Beachtung zu schenken. Ist eine derartige Lüftungsanlage jedoch nicht vorhanden, ist der Bewohner selbst für die Verhältnisse und Qualität der Raumluft verantwortlich. Dadurch liegt es nahe, sich die Frage zu stellen, nicht nur Grenzwerte für die Luftdichtheit nach oben, sondern auch nach unten, einen sogenannten hygienischen Mindestluftwechsel, zu fordern. Umso kleiner ein Gebäude und umso größer die Anzahl der Bewohner, desto wichtiger wird diese Anforderung. In der Literatur sind häufig derartige Grenzen festgehalten und empfohlene Werte angegeben, aber nicht immer wird diesen auch ausreichend Beachtung in der Praxis geschenkt. An ausgewählten Beispielen der im Zuge dieser Arbeit gemessenen Gebäude, soll diese Tatsache und die daraus resultierende Problematik aufgezeigt werden.

4.2.1 Zusammenhang zwischen Luftdichtheit und Luftfeuchtigkeit der Innenluft

Die Gefahr von zu hoher Raumluftfeuchte darf keinesfalls unterschätzt werden. Der Mensch selbst, sowie durch viele seiner Tätigkeiten wie Kochen, Duschen, Waschen, aber auch Tiere und Pflanzen produzieren stets Feuchtigkeit. Diese produzierte Feuchtigkeit wird von der Umgebungsluft und den angrenzenden Baustoffen dieser Umgebung aufgenommen. Um hohe relative Raumluftfeuchte, aber auch hohem Feuchtegehalt der Baustoffe vorzubeugen, ist es notwendig diese Feuchtigkeit durch Lüften oder Lufttrocknung zu reduzieren. Problematisch gestaltet sich die Situation bei sehr hoher Raumluftfeuchte, da sich dadurch der Taupunkt (Lufttemperatur, bei jener der Sättigungspunkt überschritten wird) erhöht und somit bei bereits höheren Oberflächentemperaturen Teile des in der Raumluft enthaltenen Wasserdampfes in Form von Wasser austreten. Es kommt zur sogenannten Kondenswasserbildung. Sind Baustoffe dauerhaft von Feuchtigkeit beeinflusst, führt dies in weiterer Folge zu Schimmelbildung.

Die relative Raumluftheuchte hängt direkt mit der Luftdichtheit sowie dem Lüftungsverhalten der Bewohner oder der Lüftungsanlage zusammen. Umso stärker ein Luftaustausch zwischen Innen- und Außenluft stattfindet, desto geringer ist das Risiko von zu hoher Luftfeuchtigkeit der Raumlufte. Dies zeigt auch die Gleichung zur Abschätzung der mittleren absoluten Innenluftfeuchtigkeit: [ONO13]

$$u_i = u_e + \frac{P}{n \cdot V} \quad (12)$$

dabei ist

u_i absolute Innenluftfeuchtigkeit [kg/m³]

u_e absolute Außenluftfeuchtigkeit [kg/m³]

P Produktionsrate [kg/h]

n Luftwechselzahl [h⁻¹]

V Luftvolumen [m³]

Studien belegen, dass besonders bei Altbauwohnungen, in welchen ein Fensteraustausch stattgefunden hatte, der erforderliche Luftwechsel meist nicht mehr gewährleistet ist. Vielfach tritt durch diese Veränderung des Gebäudes das Problem der Schimmelpilzbildung auf. Verantwortlich dafür ist unter anderem ein zu geringer Luftaustausch, hohe Raumluftheuchte und in weiterer Folge Kondensatwasserbildung an kalten Oberflächen der Außenbauteile. Auch an dieser Stelle spielt die Luftdichtheit des Gebäudes eine wesentliche Rolle.

Eine wesentliche Bedeutung ist der Luftdichtheit auch bezüglich der Dauerhaftigkeit von Konstruktionen zuzusprechen. Besonders im Holzleichtbau, wo eine luftdichte Ebene durch eine diffusionshemmende Folie (sogenannte Dampfbremse) oder luftdichte Bauplatten Kondenswasserbildung in der Dämmstoffebene und tragenden Konstruktion vermeiden soll. Treten hier Leckagen in ungünstigem Maße auf, sind Schäden in der Konstruktion durch konvektiven Feuchtetransport durchaus wahrscheinlich. Durch die genannten wirkenden Antriebskräfte für die Luftströmungen (Druckdifferenz) ist das Einströmen von feuchter Innenluft in die Konstruktion durch die Leckagen nicht vermeidbar. Der Transportmechanismus der Diffusion spielt hierbei, vor allem bei dicken Bauteilen, nur eine nebensächliche Rolle, wie Abb. 6 verdeutlicht.

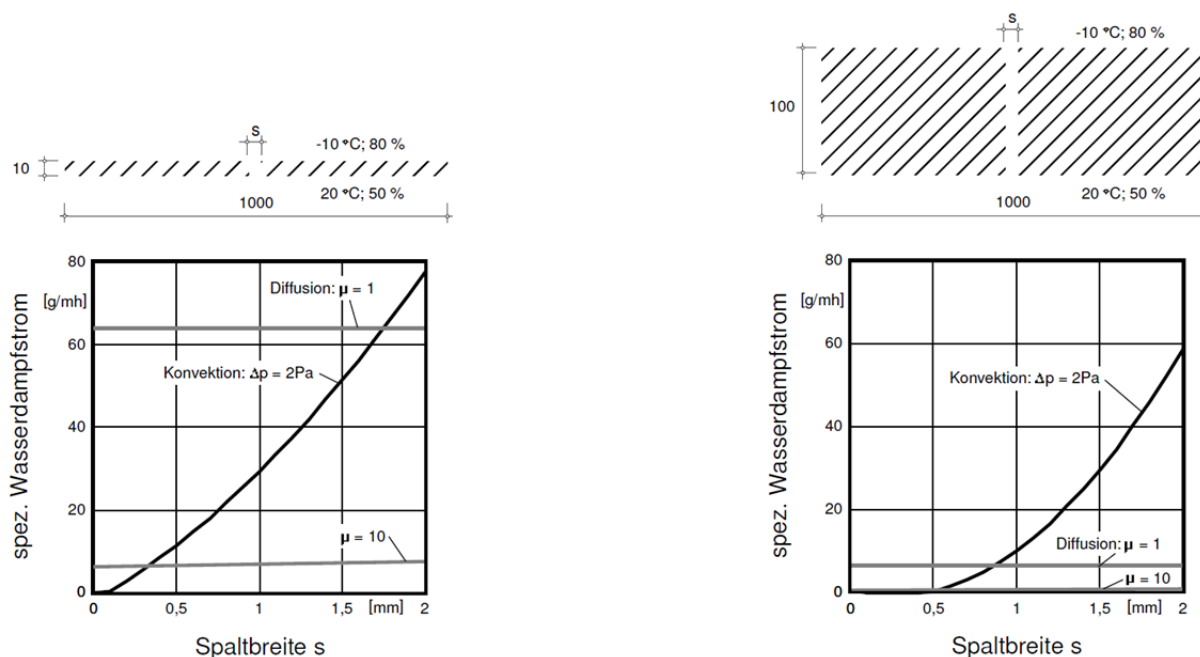


Abb. 6 : Vergleich der Transportmechanismen Konvektion und Diffusion [HAU91]

4.2.2 Einflüsse der Luftdichtheit in der Abschätzung der Raumluftfeuchtigkeit

Anhand der im vorigen Kapitel vorgestellten Berechnungsmethode zur Abschätzung der Raumluftfeuchtigkeit, soll der Einfluss der Luftdichtheit auch rechnerisch veranschaulicht werden. Dazu werden die Auswirkungen der Luftdichtheit auf die Luftfeuchtigkeit im Inneren des Gebäudes an zwei ausgewählten Beispielen durch den Vergleich von gemessenen und berechneten Daten aufgezeigt. Für diesen Vergleich werden die Ergebnisse der Luftdichtheitsmessung der zwei untersuchten Gebäude herangezogen. Es sind außerdem noch eine Reihe weiterer Annahmen nötig, die aus Fragebögen an die Bewohner und aus Temperatur- und Feuchtemessungen entnommen wurden, zu einem gewissen Teil aber auch nur abgeschätzt werden können. Die Ermittlung der Feuchtebelastung (Zähler der Gleichung 12), welche wesentlicher Bestandteil der Berechnung ist, wurde anhand der Fragebögen ermittelt. Der Wert der Luftwechselzahl multipliziert mit dem Raumvolumen, beziehungsweise der Nenner der Gleichung 12 setzt sich aus drei wesentlichen Teilen zusammen:

- *Luftwechsel durch Infiltration*: Für die Ermittlung der Druckdifferenz zwischen Außen und Gebäudeinneren wird Formel (13) nach [HEN07] angewandt und daraus mittels Leckagekoeffizient und Strömunsexponent nach Formel (5) der Volumenstrom durch Infiltration ermittelt.

$$\Delta p = 0,0215 \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot h \quad (13)$$

dabei ist

Δp natürliche Druckdifferenz [Pa]

θ_i Temperatur der Innenluft [°C]

θ_e Temperatur der Aussenluft [°C]

h Gebäudehöhe [m]

$$0,0215 = \frac{\rho_{air} \cdot g \cdot \beta}{2} \quad (14)$$

dabei ist

ρ_{air} Dichte der Luft 1,2 [kg/m³]

g Erdbeschleunigung 9,81 [m/s²]

β Volumenausdehnungskoeffizient von Luft 1/273,15 [K⁻¹]

- *Luftwechsel durch Wind*: Der Volumenstrom durch Wind wird ident zum Infiltrationsluftwechsel mit Formel (5) ermittelt. Der Wert der Druckdifferenz ist hier jedoch wesentlich schwieriger zu berechnen, da der Grad der Abschirmung (Windschutzfaktor) durch Zäune, Bäume und Ähnliches, die Windrichtung, die Geometrie des Gebäudes sowie Ausrichtung des Gebäudes und der Leckagen für den tatsächlich erzeugten Differenzdruck ausschlaggebend sind. Bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 3 m/s entspricht der Staudruck in etwa 5 Pa und es wird daher unter Berücksichtigung von Abschirmung und Geometrie des Gebäudes (Abminderungsfaktor = 0,54) eine durchschnittliche Druckdifferenz von $\Delta p_{Wind} = 2,7$ Pa angesetzt.

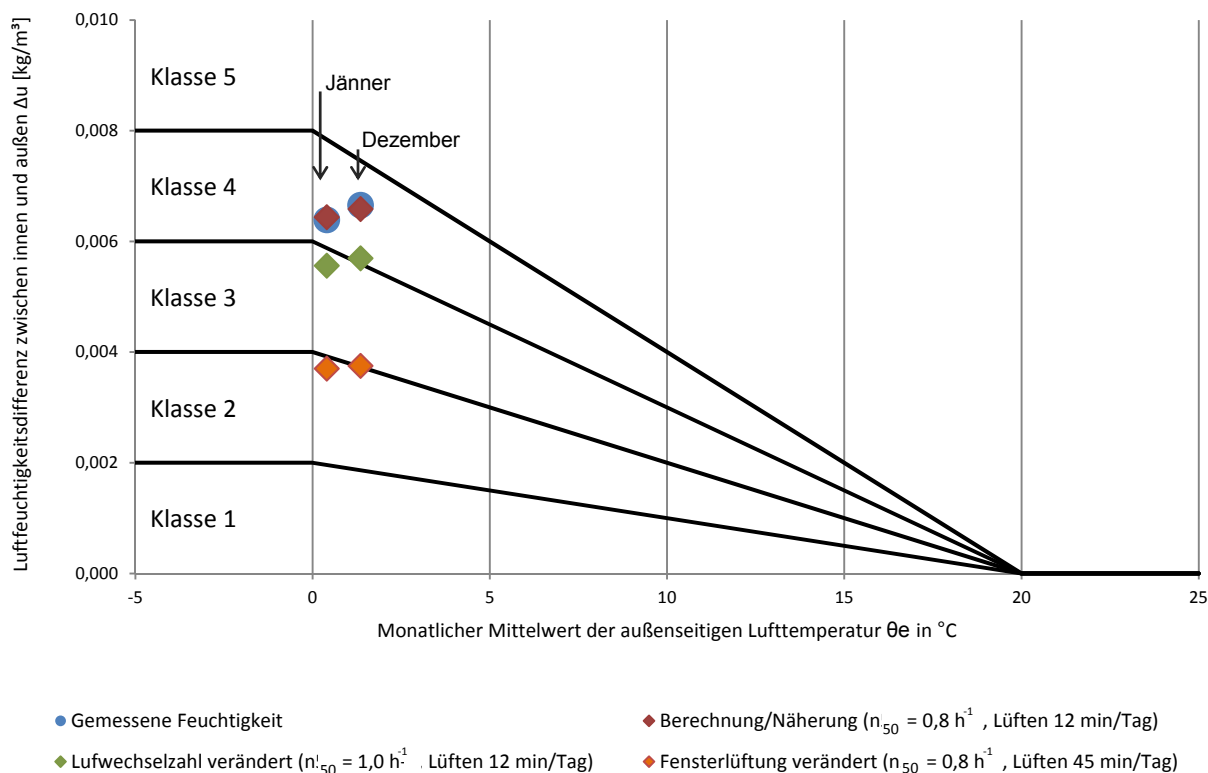
- *Luftwechsel durch Fensterlüftung*: Der Luftaustausch durch Fensterlüftung trägt einen wesentlichen Beitrag zur Feuchtereduktion der Raumluft bei. Für die Berechnung wird davon ausgegangen, dass zwei Fenster geöffnet werden wobei berücksichtigt wird, dass an kalten Tagen tendentiell kürzer gelüftet wird. Ist das Tagesmittel der Außenluft unter 0 °C, wird nur die Hälfte der Zeit gelüftet, bei einem Tagesmittel von unter 2 °C werden 75 % der Zeit angesetzt. Die Dauer der Fensterlüftung wird zunächst so angepasst, dass die Feuchtebelastung in etwa mit der Messung übereinstimmt. Umgekehrt wäre es daher möglich, bei bekannter Feuchtebelastung sowie berechneten Infiltrationsluftwechsel die effektive Lüftungszeit der Bewohner abzuschätzen. Auf Basis der durchgeführten Abschätzung zur Raumfeuchtebelastung, soll nun gezeigt werden, inwieweit

Fensterlüftung und Luftdichtheit des Gebäudes die absolute Luftfeuchtigkeit beeinflussen können. Dazu zeigt das Diagramm 1 und Diagramm 2 beispielhaft an einem Gebäude mit sehr hoher gemessener Luftfeuchtigkeit und einem Gebäude mit sehr niedriger gemessener Luftfeuchtigkeit, was die Veränderung der zwei genannten Parameter dabei bewirkt. Die Eingabewerte für die Berechnung sind dazu in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 : Berechnungsgrundlage der Beispiele zur Abschätzung der Feuchtebelastung

		Haus A	Haus B
Raumvolumen	[m ³]	195	273
Gebäudehöhe	[m]	5	5
n50 gemessen	[h ⁻¹]	0,81	0,85
Leckagekoeffizient	[m ³ /h*Pa ⁿ]	10	15
Strömungsexponent		0,7	0,7
Überprüfung			
Volumenstrom berechnet bei 50 Pa	[m ³ /h]	155	232
Volumenstrom gemessen bei 50 Pa	[m ³ /h]	158	233
Feuchteproduktion			
Feuchteproduktion Jänner	[g/Tag]	7200	8800
Feuchteproduktion Dezember	[g/Tag]	7200	7000
Fensterlüftung	[min/Tag]	12	45
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3	3
Staudruck Wind	[mBar]	0,06	0,06
Windabschirmung	[%]	54	54
Berechneter Volumentstrom			
V _{infiltration (Ø)}	[m ³ /Tag]	414	606
V _{Wind}	[m ³ /Tag]	387	580
V _{fenster,max}	[m ³ /Tag]	401	1502
V _{fenster,min}	[m ³ /Tag]	200	751

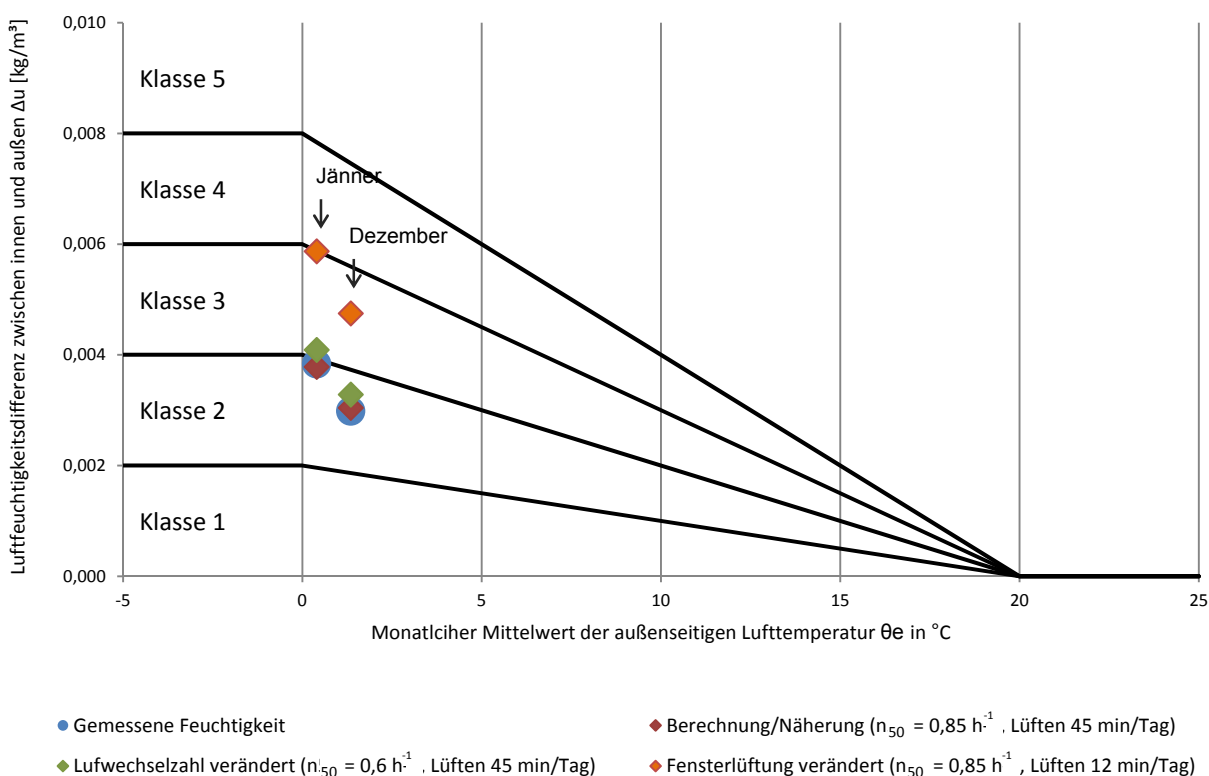
Diagramm 1 : Vergleich gemessener und berechneter absoluter Luftfeuchte von Haus A



Das Diagramm 1 zeigt die absolute Luftfeuchte von Haus A in Abhängigkeit vom Monatsmittel der Außenlufttemperatur. Diese Art der Darstellung für die Feuchtebelastung von Innenräumen stammt aus der ÖNORM EN ISO 13788 [ONO13]. Hierbei werden Gebäude je nach Feuchtebelastung in fünf Klassen eingeteilt, wobei Wohngebäude mit geringer Belegung zur Klasse 3, Wohngebäude mit starker Belegung zur Klasse 4 gezählt werden. Die untersuchten Gebäude weisen ein verhältnismäßig geringes Innenvolumen auf und fallen je nach Anzahl der Bewohner in die Klasse 3 oder Klasse 4. Für das hier dargestellte Gebäude ist gemäß der Klassifizierung eine sehr hohe Feuchtebelastung feststellbar. Auffallend ist, dass durch Verdoppelung der Lüftungszeit über die Fenster, die Feuchtebelastung deutlich verringert werden kann. Da in diesem Fall nicht ausreichend gelüftet wird, hat auch die Luftdichtheit des Gebäudes einen anteilmäßig großen Einfluss. Unter Annahme einer erhöhten Luftwechselzahl von $n_{50} = 1$, würde daher die Feuchtebelastung bedeutsam verringert werden. Das nachfolgende Diagramm 2 zeigt im Gegensatz dazu ein Gebäude mit sehr geringer Luftfeuchte. Obwohl die Feuchteproduktion und die Luftwechselzahl bei beiden der dargestellten Gebäuden in etwa gleich ist, hat das Haus B aus Diagramm 2 eine wesentlich geringere Luftfeuchte. Das lässt darauf schließen, dass das Lüftungsverhalten der Bewohner sehr konsequent und absolut ausreichend ist. Hier wird somit im exemplarischen Vergleich die Situation mit geringeren

Lüftungszeiten und mit verbesserter Luftdichtheit dargestellt, wodurch sich die Feuchtesituation verschlechtert. Sofort fällt auf, dass hier die Veränderung der Luftdichtheit keinen wesentlichen Einfluss mehr auf die Feuchtebelastung darstellt. Die Begründung liegt schlichtweg darin, dass durch den extrem hohen Anteil an Luftwechsel durch Fensterlüftung der Infiltrationsluftwechsel kaum zum tragen kommt.

Diagramm 2 : Vergleich gemessener und berechneter absoluter Luftfeuchte von Haus B



Der Vergleich dieser beiden Gebäude, sowie das Berechnen von „was wäre wenn – Situationen“ gibt Aufschluss über zwei wesentliche Tatsachen, welche vor allem kleine Gebäude mit hoher Luftdichtheit betreffen. Zum Einen zeigt der Vergleich, dass sich die Luftdichtheit des Gebäudes nicht zwingend in hohem Maße auf die Feuchtebelastung auswirken muss. Doch wie das Beispiel von Haus A zeigt, kann bei unzureichendem Lüftungsverhalten der Bewohner, schlussendlich durch eine „schlechtere“ Luftdichtheit und dem daraus resultierenden erhöhten Infiltrationsluftwechsel das Schimmelrisiko deutlich verringert werden. Zweitens stellt sich heraus, wie wesentlich der Nutzer durch korrektes Lüftungsverhalten die Feuchtebelastung beeinflussen kann. Bedenklich dabei sind aber auch die dadurch entstehenden Lüftungswärmeverluste, was den Einsatz einer kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung durchaus rechtfertigen kann.

4.3 Luftdichtheit und Schallschutz

Luftundichtigkeiten in Außenwänden, Anschluss- und Funktionsfugen, aber vor allem auch in Trennwänden von Wohnungseinheiten, sollen auch aufgrund der möglicherweise abgeminderten Schalldämmung vermieden werden. Oft entspricht die durch die Öffnung übertragene Schallleistung nicht dem Anteil der Öffnungsfläche, sondern ist infolge Resonanz- und Beugungserscheinungen oft erheblich größer. Besonders große Schallübertragungen treten in jenen Frequenzbereichen auf, in denen die Öffnungstiefen zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{2}$ der Wellenlänge liegen. Dies bedeutet, dass die

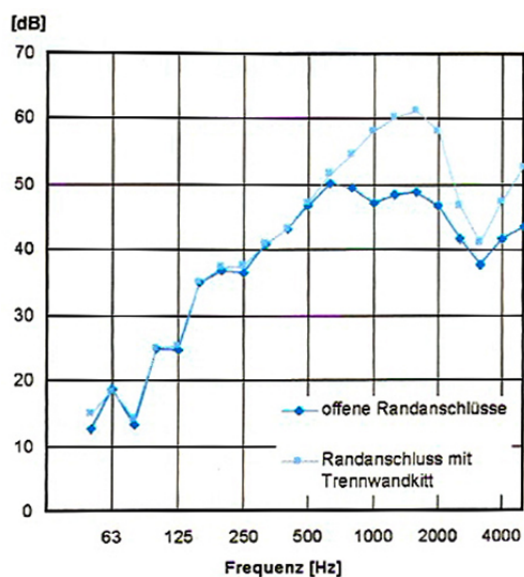


Abb. 7 : Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w einer einlagig beplankten Wand durch Abdichtungsmaßnahmen zur Luftdichtheit

Geomtrie von Fugen und Leckagen die tatsächliche Schallübertragung im bauakustischen Frequenzbereich stark beeinflusst. Daher ist nicht zwingend jede Leckage als problematisch anzusehen.[FAS03] Stimmt jedoch Größe und Lage der Leckage, können beispielsweise bei Metallständerwänden Schallschutz-Einbußen von bis zu 10 dB auftreten. Die Abb. 7 zeigt als Beispiel den Vergleich zweier Metallständerwände, wobei eine davon mit Trennwandkitt an den Randabschlüssen versehen wurde. Es ist eine merkliche Verbesserung des Schalldämm-Maßes im Bauakustischen besonders relevanten Bereich von ca. 500 Hz bis 2000 Hz erkennbar. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w verbessert sich dadurch um etwa 2 dB.

Beschrieben wird das Problem der Schallübertragung auch in [FAS03]. Hier wird besonders auf die Einflüsse von Undichtheiten der Fugen hingewiesen. Gemeint sind insbesondere Anschluss- und Funktionsfugen von Fenstern und Türen, welche durch unzureichende Abdichtungsmaßnahmen eine Reduktion des Schalldämm-Maßes in bestimmten Frequenzbereichen von bis zu etwa 10 dB bewirken können. Beispielsweise vermindert eine Fuge mit 0,2 cm Breite und 0,5 cm Länge, also eine Schlitzfläche von 1 cm^2 , das bewertete Schalldämm-Maß einer Tür um etwa 3 dB. Empfohlen wird daher die Verwendung von elastischen oder porösen Dichtungen mit Einhaltung eines bestimmten Anpressdruckes. Alternativ können mehrere aufeinanderfolgende Profildichtungen den Schallschutz weiter verbessern. Als besonders heikle Stelle wird die gerade bei Türen auftretende Fuge im

Bodenbereich zwischen Boden und Türblatt beschieben. Hier kann infolge des durch Raumkanten erhöhten Schalldruckpegels eine erhöhte Schalltransmission auftreten. Diesem Phänomen soll durch die Verwendung von Anschlagsschwellen, Höckerschwellen, Schleifdichtungen oder mechanischen Bodendichtungen (z.B. Absenkmechanismen) entgegengewirkt werden. Für die Luftdichtheit von Fugen bedeuten diese Maßnahmen gleichermaßen einer ordnungsgemäßen Ausführung.

4.4 Luftdichtheit und Brandschutz

Hinsichtlich Brandschutz, Brand- und Rauchausbreitung spielt die luftdichte Ausführung von Wand- und Deckenelementen, sowie von Durchdringungen dieser eine bedeutende Rolle. Da Leckagen stets einen Luftzug zulassen, führt dies im Brandfall zu einer schnelleren Brandausbreitung, ermöglicht rascheres Entzünden von Konstruktionen, sowie die Ausbreitung von giftigen Rauchgasen. Aus diesem Grund ist die luftdichte Ausführung von Bauteilen eine wesentliche Forderung an die Funktion von klassifizierten Brandschutzkonstruktionen. Auch bei der Feststellung von Feuerwiderstandsklassen wird die Luftdichtheit von Bauteilen mit berücksichtigt. [FLI12] Im Bezug auf den Brandschutz spielt weniger die Luftdichtheit der Außenbauteile (sogenannte luftdichte Ebene) die bedeutende Rolle, sondern die Vermeidung von Leckagen von Raumtrennwänden und Durchdringungen. Gerade hier soll die Weiterleitung von giftigen Rauchgasen unterbunden werden. [FIS08] beschreibt auch das Phänomen von konvektivem Heißgas-Eintrag in die Konstruktion, was ein erfrühtes Entzünden dieser zur Folge hat. In der Berechnung der Wärmebilanz im Brandfall, wirken sich Leckagen und Öffnungen eher positiv aus, da dadurch Wärme entweichen kann. Durch das Problem von Heißgas- oder sogar Flammeneintrag in die Konstruktion (vor allem kritisch im Holzleichtbau aufgrund der Entzündungsgefahr von weichen und porösen Dämmstoffen) ist jedoch eine luftdichte Ausführung wesentlich empfehlenswerter.

4.5 Luftdichtheit und Behaglichkeit

Behaglichkeit definiert sich als Zustand des Menschen, in dem er Wohlempfinden verspürt. In der Regel nimmt er behagliches Klima kaum bewusst wahr, erst wenn das Umgebungsklima von den behaglichen Werten abweicht, stellt sich ein Gefühl der Unbehaglichkeit ein. Viele Eigenschaften des Raumes beeinflussen dieses Behaglichkeitsempfinden. Zu diesen Einflüssen zählen unter anderem Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Luftqualität, Lärm oder Lichtverhältnisse. Ist der Mensch über längeren Zeitraum von Unbehaglichkeitsempfinden beeinflusst, kann unter Umständen das allgemein bekannte „Sick-Building-Syndrom“ auftreten. Es gilt daher, möglichst gute und für den Menschen angenehme Raumverhältnisse zu schaffen, um nicht nur angenehmes Wohnen und Arbeiten zu gewährleisten, sondern auch gesundheitlichen Schäden vorzubeugen. Drei der genannten Einflüsse stehen dabei in engerem Zusammenhang mit der Luftdichtheit eines Gebäudes. Zum einen kann bei Luftundichtheiten der Gebäudehülle die Temperatur der Raumumschließungsflächen gesenkt werden, zum anderen sind unangenehme Luftströmungen im Raum Folge größerer Leckagen und gegensätzlich dazu kann bei zu hoher Luftdichtheit die Luftqualität gemindert sein.

4.5.1 Luftqualität

Ausschlaggebend für die Luftqualität von Räumen ist nicht maßgeblich der Sauerstoffgehalt, sondern die durch die Atmung ansteigende Kohlendioxidkonzentration. Durch die Undichtheiten in der Gebäudehülle sinkt die Sauerstoffkonzentration der Raumluft in der Regel nicht unter 20 %, nur in gasdichten Räumen ist eine derart niedrige Sauerstoffkonzentration möglich, die gesundheitliche Beschwerden wie Atemnot oder Bewusstlosigkeit hervorrufen kann. Bei Gebäuden ist die Betrachtung der Kohlendioxidkonzentration daher bedeutsamer. Bei einem CO₂-Gehalt von über 0,15 % wird die Luft als nicht mehr frisch oder hygienisch einwandfrei empfunden. In weiterer Folge führt ein hoher CO₂-Gehalt zu Kopfschmerzen, Benommenheit und Leistungsverlust. Um diesem Problem vorzubeugen, ist ein ausreichender Luftwechsel erforderlich. Tabelle 4 zeigt den nötigen Außenluftvolumenstrom pro Person in Abhängigkeit von Aktivität und CO₂-Gehalt der Außenluft. In der Literatur wird dahingehend meist ein durchschnittlicher Frischluftbedarf von 20-30 m³/h pro Person angegeben.

Tabelle 4: Erforderliche Außenluftvolumenströme für die Einhaltung einer CO₂-Konzentration der Raumluft < 0,15 % [BAU08]

	Außenluftvolumenstrom pro Person m ³ /h		
	CO ₂ -Konzentration in der Außenluft		
	0,03 %	0,04 %	0,05 %
Aktivitätsstufe 1	13	14	15
Aktivitätsstufe 2	19	21	23
Aktivitätsstufe 3	25	27	30

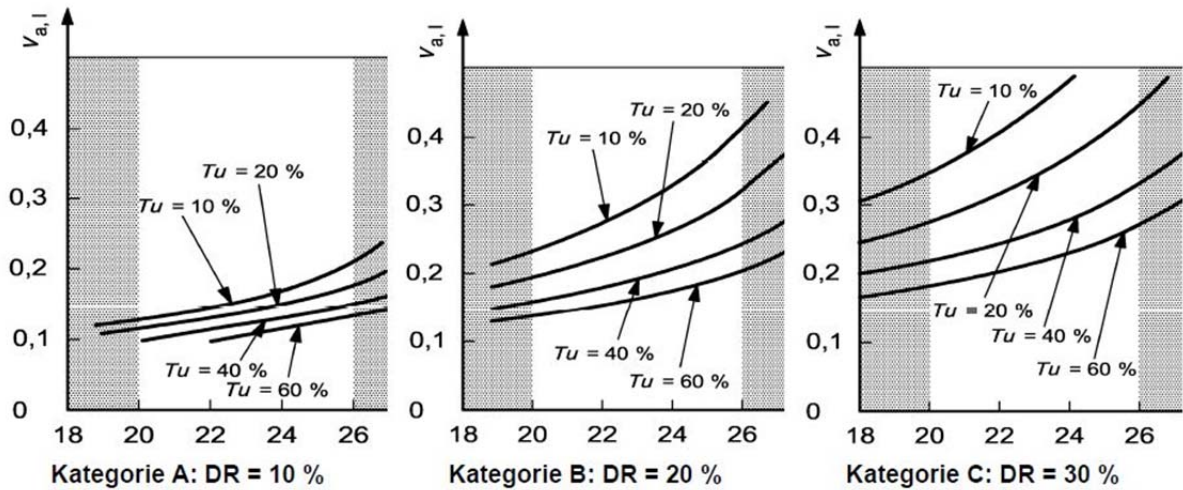
Kann durch natürlichen Luftwechsel (Infiltration, Fensterlüftung) kein ausreichender Außenluftvolumenstrom gewährleistet werden, sollte eine kontrollierte Wohnraumlüftung in Erwägung gezogen werden. Dies gilt vor allem für kleine Gebäude mit starker Belegung und hoher Luftdichtheit. Durch Fensterlüftung kann zwar eine ausreichende Frischluftzufuhr gewährleistet werden, betrachtet man jedoch die dadurch entstehenden Wärmeverluste, ist eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung vorteilhaft. Kommt eine Lüftungsanlage zur Anwendung, ist eine gute Luftqualität jedoch auch nur dann gewährleistet, wenn die Wartung und Reinigung der Anlage in regelmäßigen Abständen durchgeführt wird.

4.5.2 Zugluft

Luftbewegungen in Räumen, vor allem bei kalter Luft im warmen Raum, haben starken Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden des Menschen. Konkret sind damit sogenannte Zuglufterscheinungen gemeint, welche bei undichten Stellen der luftdichten Schicht auftreten können. Es handelt sich hierbei um eine lokale Abkühlung des menschlichen Körpers, die durch einströmende Kaltluft verursacht wird. Dabei werden Luftströmungen im Nackenbereich als besonders störend empfunden. Nach EN ISO 7730:2006-05 [ISO06] sollten die in Tabelle 5 oder Abb. 8 angegebenen Luftgeschwindigkeiten bei Temperaturen von 20 - 26 °C nicht überschritten werden.

Tabelle 5 : Höchstwerte der Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur [ONO08]

örtliche Lufttemperatur	maximale Luftgeschwindigkeit
20 °C	0,13 m/s
22 °C	0,15 m/s
24 °C	0,18 m/s
26 °C	0,22 m/s



Legende

- $t_{a,l}$ lokale Temperatur, °C
- $\bar{v}_{a,l}$ lokale mittlere Luftgeschwindigkeit, m/s
- Tu Intensität der Turbulenzen

Abb. 8: Höchstwerte der Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur und Intensität der Turbulenzen [ISO06]

Die Luftgeschwindigkeit kann nur effektiv mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass Luftgeschwindigkeiten in Räumen nicht einheitlich oder gleichförmig sind. Neben der sich ständig ändernden Grundströmung treten häufig auch Wirbelbewegungen auf. Jedoch umso höher die Temperatur, desto höhere Luftgeschwindigkeiten werden toleriert, ohne dass sich der Mensch unwohl fühlt. Ersichtlich wird das auch aus den beiden Grafiken in Abb. 9 und Abb. 10. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten treten in der Regel jedoch nur bei größeren Leckagen und erhöhten Windgeschwindigkeiten auf. Trotzdem gilt es, auf eine sorgfältig abgedichtete luftdichte Schicht zu achten, und auch kleine Leckagen zu vermeiden. [Bau08]

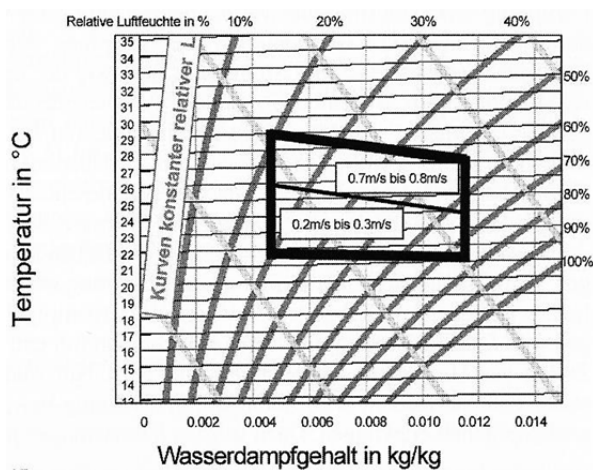


Abb. 9: Behaglichkeitsfeld für die Raumluftgeschwindigkeit im h-x-Diagramm [FIS08]

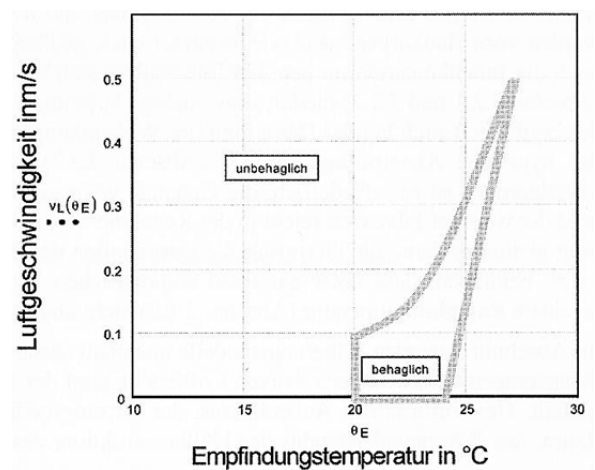


Abb. 10: Behaglichkeitsfeld für die Raumluftgeschwindigkeit und Empfindungstemperatur [FIS08]

4.5.3 Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen

Die Empfindungstemperatur des Menschen setzt sich gleichermaßen aus der Raumlufttemperatur sowie aus der Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen dieses Raumes zusammen. Dies bedeutet anders ausgedrückt: Umso niedriger die Temperatur der Oberflächen ist, desto höher muss die Temperatur der Raumluft sein, sodass der Mensch in dem Raum dieselbe Temperatur wahrnimmt. Das Phänomen kalter Oberflächentemperaturen steht hier in engem Zusammenhang mit der Luftdichtheit des Gebäudes. Kann kalte Außenluft bei nicht ordnungsgemäß abgedichteter winddichter Ebene in die Bauteile eindringen, so besteht die Gefahr, dass dadurch die Oberflächentemperaturen des Innenraumes abgekühlt werden. In weiterer Folge sind auch thermische Verluste damit verbunden. Es kommt zu einer Strahlungsasymmetrie im Raum und das Wohlbefinden des Bewohners wird gestört. An dieser Stelle sei auch nochmal auf das Risiko von Kondensat- und Schimmelbildung sowie Wärmeverlusten bei niedrigen Oberflächentemperaturen hingewiesen. [RIC10]

Inwieweit sich eine nicht ordnungsgemäß verbaute, oder nicht ausreichend abgedichtete winddichte Ebene auf die Oberflächentemperatur der inneren Raumumschließungsfläche auswirken kann, zeigt das Thermobild der Abb. 11. Man erkennt, dass bei geringer Außentemperatur und erhöhtem Windeinfluss bereits eine Temperaturdifferenz von etwa 6 Kelvin auftreten kann.

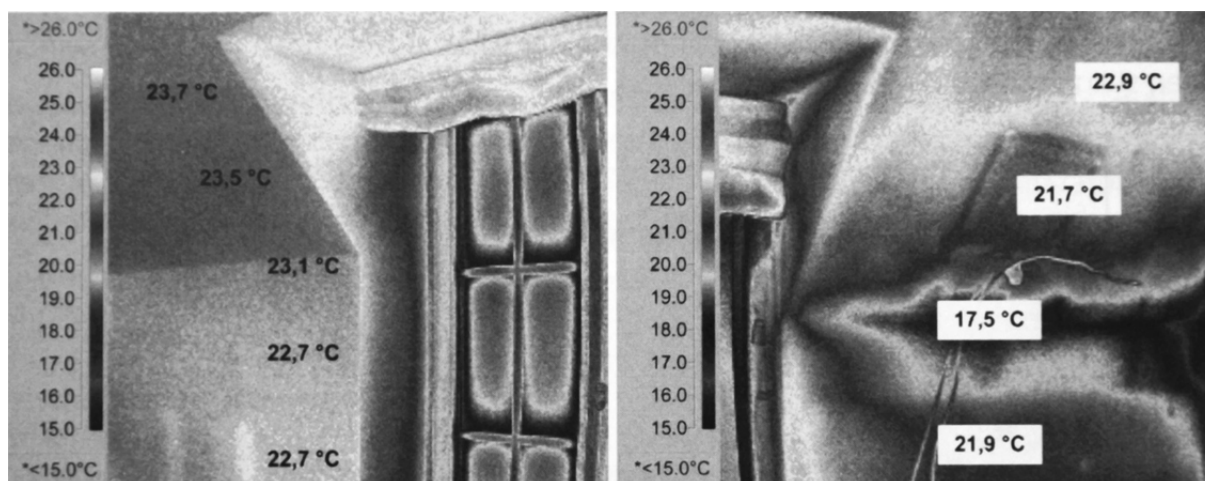


Abb. 11: Thermographieaufnahme der Oberflächen bei Windstille (links) und erhöhter Windgeschwindigkeit [RIC10]

5 Messreihe zur Luftdichtheit in einer Wohnsiedlung

Im nachfolgenden Kapitel werden die in der Praxis durchgeführten Luftdichtheitstests mittels Differenzdruckverfahren beschrieben. Die Messungen wurden in Anlehnung an die ÖNORM EN 13829:2001 [ONO01] durchgeführt. Außerdem wurde eine Fehlerfortpflanzungsrechnung durchgeführt, um die Unsicherheit der berechneten Kenngrößen zu beschreiben. Insgesamt wurden Messungen an 34 Häusern durchgeführt, wobei es sich um Gebäude einer Siedlung handelt, welche sich im Hinblick auf die Bauweise nicht unterscheiden. Sie sind sozusagen Gebäude gleichen Charakters. Die Ergebnisse dieser Messungen sind die Grundlage der nachfolgenden Kapitel zur statistischen Auswertung und Wahrscheinlichkeitsrechnung.

5.1 Beschreibung der Prüfobjekte

5.1.1 Allgemeines

Bei den gemessenen Gebäuden handelt es sich um Kleingartenwohnhäuser einer Siedlung, gebaut in Holzfertigteilbauweise mit Leichtbauelementen. Nach den österreichischen Richtlinien, wie unter Punkt 2.2 zu den normativen und gesetzlichen Regelungen zur Luft- und Winddichte beschrieben, gilt die Einhaltung eines Grenzwertes von $1,5 \text{ h}^{-1}$ oder 3 h^{-1} . Da in den Gebäuden keine kontrollierte Wohnraumlüftung vorgesehen ist, und auch kein bestimmter Grenzwert zu etwaiger Zertifizierung eingehalten werden muss, gilt ein Grenzwert von 3 h^{-1} . Aus Datenschutzgründen werden genauere Angaben zum Standort vorenthalten. Auch die Auswertung erfolgt anonym. Die Abb. 12 und Abb. 13 zeigen die Gebäude von außen, sowie deren Anordnung am Grundstück. Des Weiteren sind unter Punkt 5.1.2 exemplarisch die Grundrisse des Haustyps D mit Keller und des Typs A ohne Keller enthalten.



Abb. 12 : Außenansichten der Gebäude

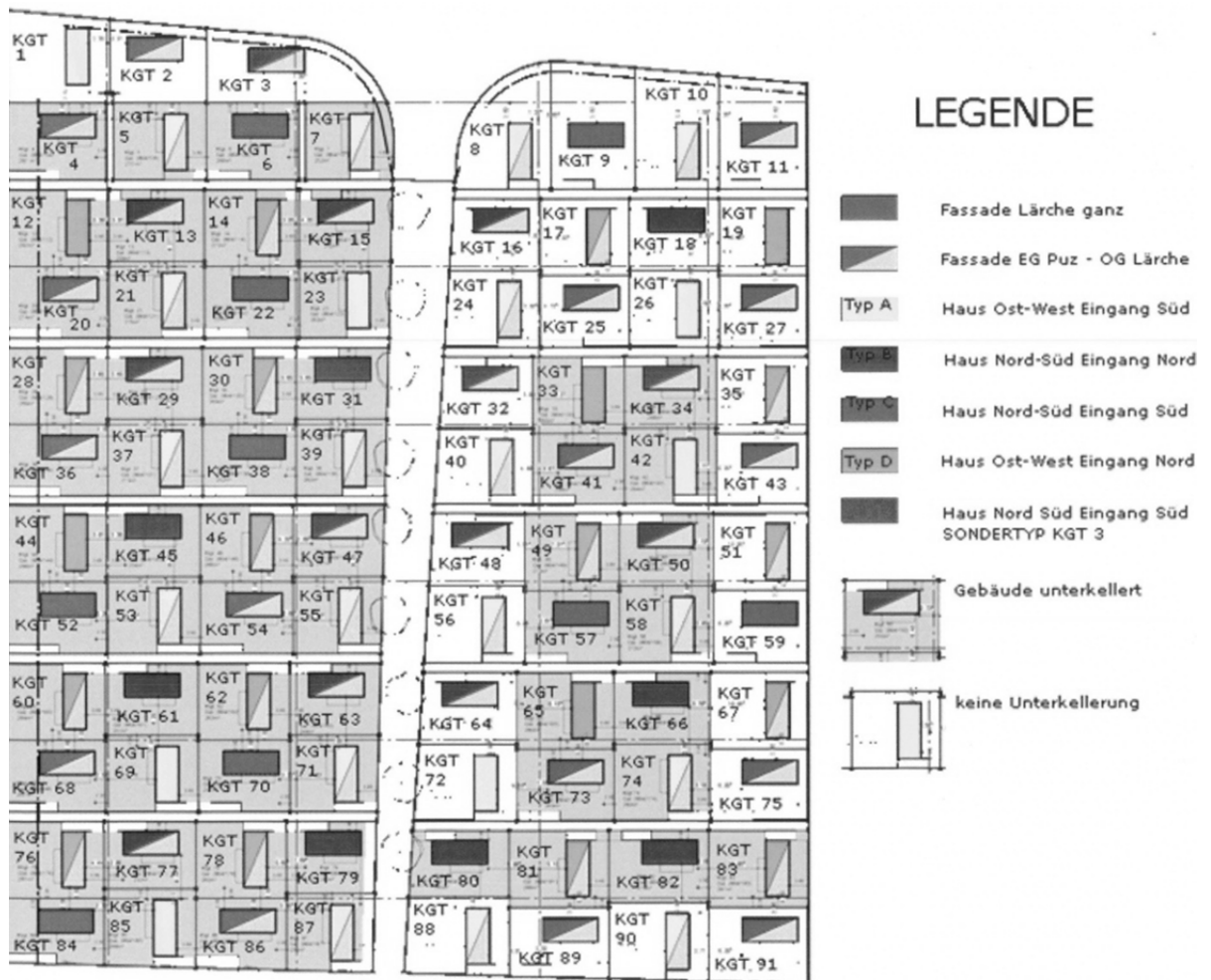


Abb. 13 : Anordnung und Typenbeschreibung der Gebäude (Quelle aus Datenschutzgründen vorenthalten)

5.1.2 Grundrisse

Die vier Grundtypen unterscheiden sich, wie bereits genannt, in ihrer Bauweise nicht. Zu differenzieren sind jedoch Gebäude mit und ohne Keller, sowie in ihrer Ausrichtung nach Ost-West oder Nord-Süd und Hauseingang Süden oder Norden. Demnach sprechen wir von vier Haustypen, wobei eine Ausführung mit Keller und eine Ausführung ohne Keller möglich ist. Also ist insgesamt zwischen acht Typen zu unterscheiden. Für die Berechnung der Kenngrößen für die Luftdichtheit ist vor allem das Innenvolumen, die Hüllfläche, sowie die Nettogrundfläche von Bedeutung. Daher muss diesbezüglich nur zwischen Gebäuden mit Keller und ohne Keller unterschieden werden. Ihre Ausrichtung ist für die Luftdichtheit vermutlich nicht relevant. Die Berechnung der geometrischen Kenngrößen erfolgt dazu für Typ mit Keller in Tabelle 6 und für Typ ohne Keller in Tabelle 7. Die Ergebnisse gelten dabei für alle Haustypen (A, B, C, D). In den Gebäuden des Sondertyps KGT 3 (siehe Abb. 6) sind keine Messungen durchgeführt worden, daher entfällt diese Berechnung.

Als Grundlage für die Ermittlung der Flächen und Volumen wurden hier die Pläne des Architekten herangezogen. Nettogrundfläche und Innenvolumen können in diesem Fall genau berechnet werden; es besteht aber auch die Möglichkeit zur Anwendung eines Abminderungsfaktors für die Bruttoflächen. Beachtet sei dabei aber, dass in diesem Fall eine höhere Unsicherheit für die Auswertung der Ergebnisse anzunehmen ist. Somit erhöht sich auch die Gesamtunsicherheit in der Auswertung der Kenngrößen für die Luftdichtheit. In der Regel wird das Innenvolumen berechnet, indem die Nettogrundfläche mit der mittleren Raumhöhe multipliziert wird. Das Volumen von Möbel wird dabei NICHT abgezogen. [ONO01]

Typ A, B, C, D mit Keller (im Beispiel Typ D)Nettogrundfläche $A_F = 128 \text{ m}^2$ Innenvolumen $V = 273 \text{ m}^3$ Hüllfläche $A_E = 289 \text{ m}^2$ Tabelle 6 : Nettogrundfläche, Innenvolumen und Hüllfläche der Gebäude **mit** Keller am Beispiel Typ D mit Keller.

	Nettogrundfläche [m ²]	Fläche Summe [m ²]	Raumhöhe [m]	Volumen [m ³]
Keller		42,69		
Kriechkeller	14,95		1,50	22,43
Keller1	18,75		2,00	37,50
Keller2	7,17		2,00	14,34
Abstellraum	1,82		2,00	3,64
EG		43,28		
Diele	3,39		2,10	7,12
Heizraum	2,17		2,10	4,56
Bad	1,43		2,10	3,00
Treppe	2,00		2,10	4,20
Küche	20,09		2,10	42,19
Wohnen	14,20		2,60	36,92
OG		42,42		
Bad	7,09		2,30	16,31
Gang	3,47		2,30	7,98
Zimmer1	11,26		2,30	25,90
Zimmer2	18,60		2,30	42,78
Treppe	2,00		2,30	4,60
SUMME	Nettogrundfläche: 128 m²		Innenvolumen: 273 m³	
	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Fläche [m ²]
Hüllfläche				
Lange Fassade 1	10,45	6,86		71,7
Lange Fassade 2	10,45	6,86		71,7
Kurze Fassade 1		6,86	4,20	28,8
Kurze Fassade 2		6,86	4,20	28,8
Dach	10,45		4,20	43,9
Fläche gegen Erdreich	10,45		4,20	43,9
SUMME				Hüllfläche: 289 m²

Typ A, B, C, D ohne Keller (im Beispiel Typ A)Nettogrundfläche $A_F = 86 \text{ m}^2$ Innenvolumen $V = 195 \text{ m}^3$ Hüllfläche $A_E = 121 \text{ m}^2$ Tabelle 7 : Nettogrundfläche, Innenvolumen und Hüllfläche der Gebäude **ohne** Keller am Beispiel Typ A ohne Keller.

	Nettogrundfläche [m ²]	Fläche Summe [m ²]	Raumhöhe [m]	Volumen [m ³]
EG		43,24		
Diele	3,39		2,10	7,12
Heizraum	2,17		2,10	4,56
Bad	1,43		2,10	3,00
Treppe	2,71		2,10	5,69
Küche	19,34		2,10	40,61
Wohnen	14,20		2,60	36,92
OG		42,42		
Bad	7,09		2,30	16,31
Gang	3,47		2,30	7,98
Zimmer1	11,26		2,30	25,90
Zimmer2	18,60		2,30	42,78
Treppe	2,00		2,30	4,60
SUMME	Nettogrundfläche: 86 m ²		Innenvolumen: 195 m ³	
	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Fläche [m ²]
Hüllfläche				
Lange Fassade 1	10,45	4,55		47,5
Lange Fassade 2	10,45	4,55		47,5
Kurze Fassade 1		4,55	4,20	19,1
Kurze Fassade 2		4,55	4,20	19,1
Dach	10,45		4,20	43,9
Fläche gegen Erdreich	10,45		4,20	43,9
SUMME	Hüllfläche: 221 m ²			

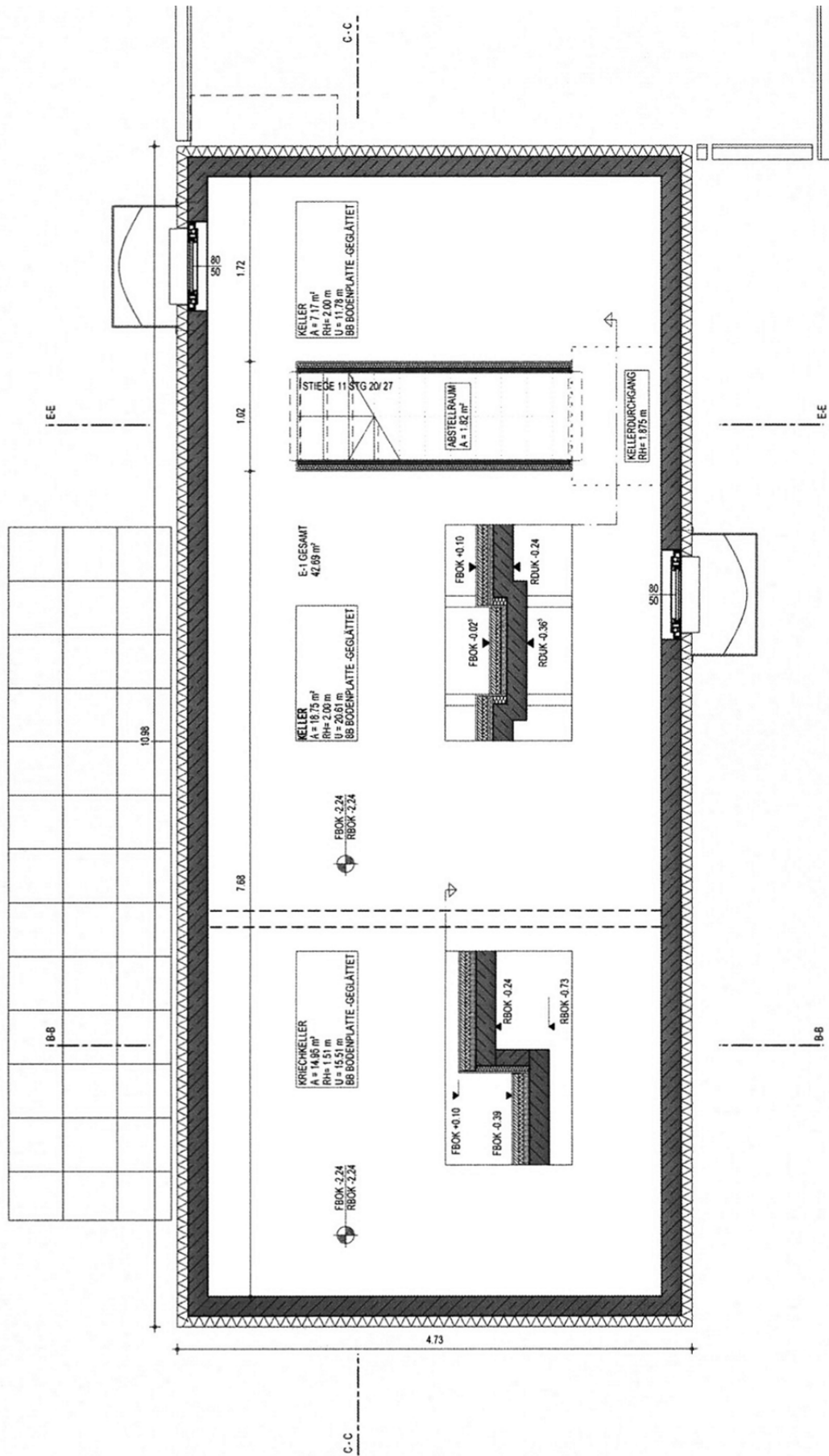


Abb. 14 : Grundriss Keller _ Typ D mit Keller

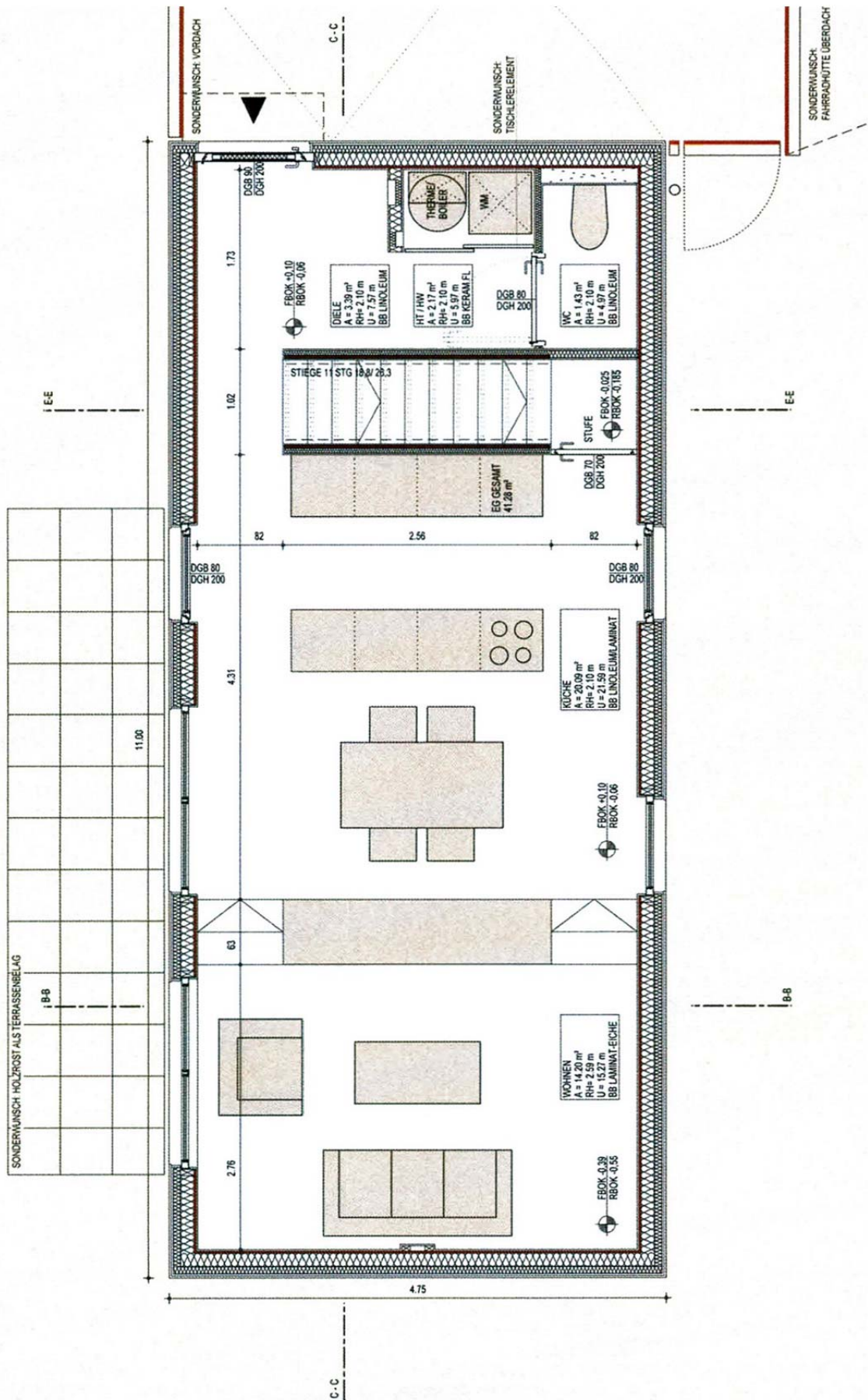


Abb. 15 : Grundriss Erdgeschoss_ Typ D mit Keller

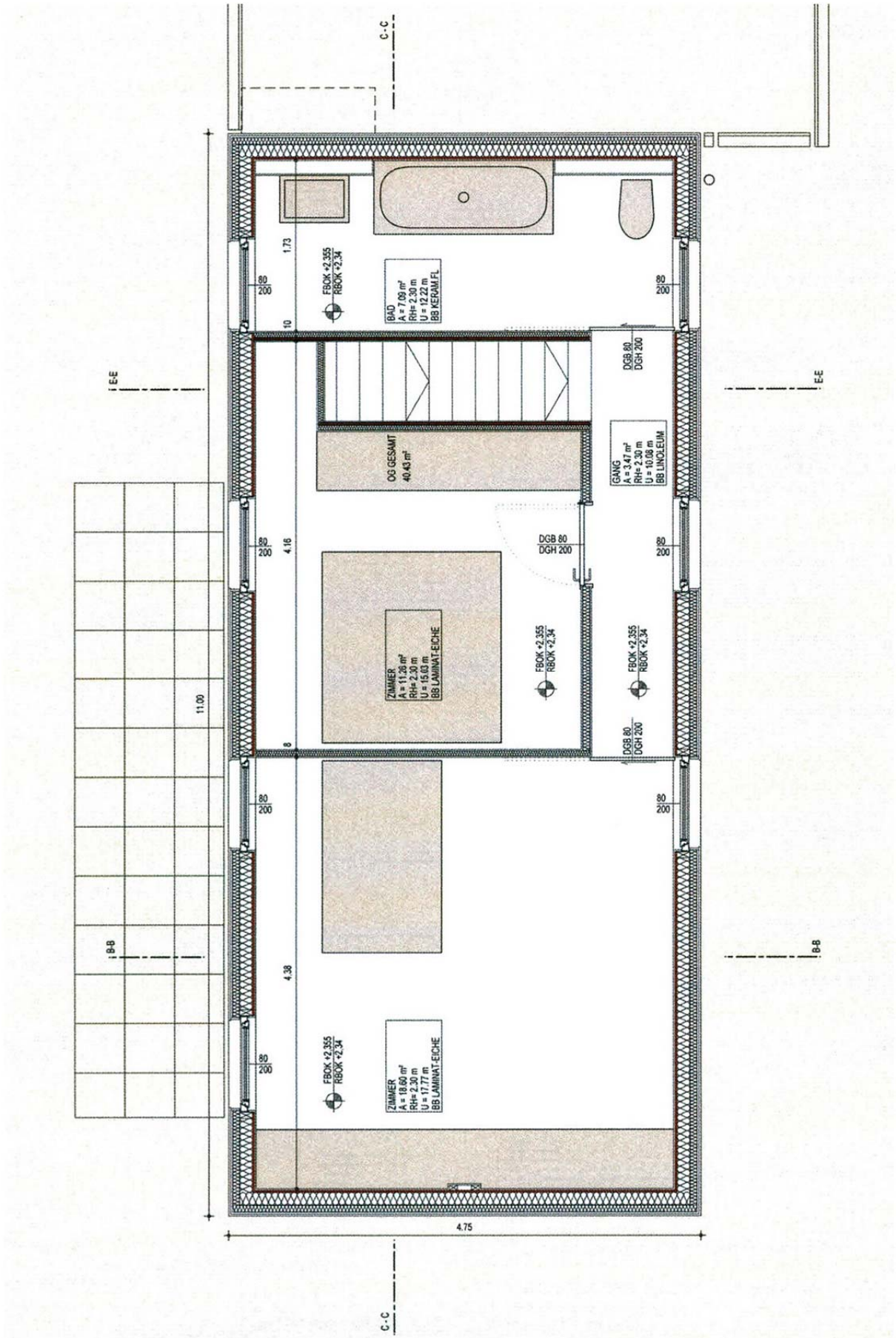


Abb. 16 : Grundriss Obergeschoss _ Typ D mit Keller

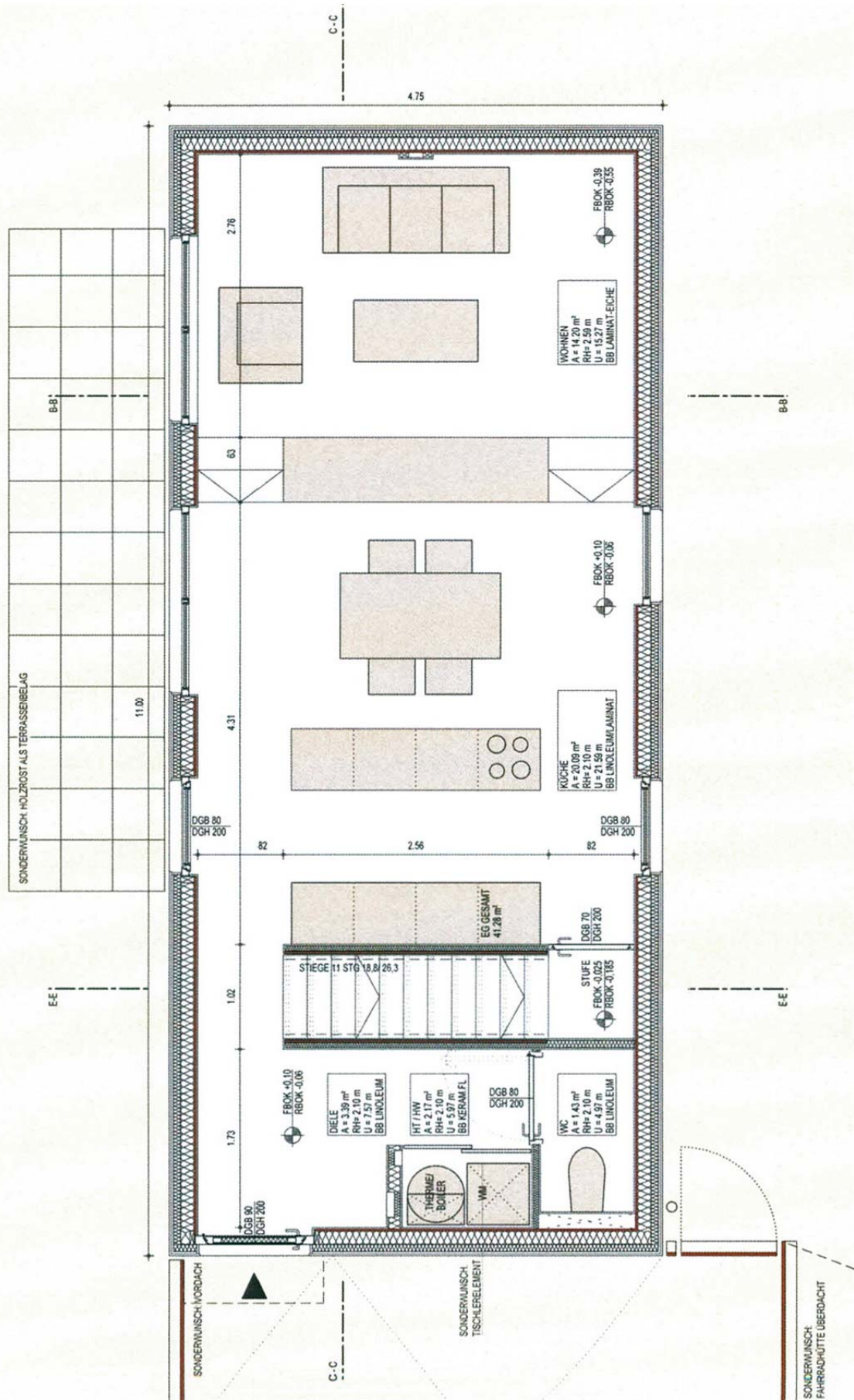


Abb. 17 : Grundriss Erdgeschoss _ Typ A ohne Keller

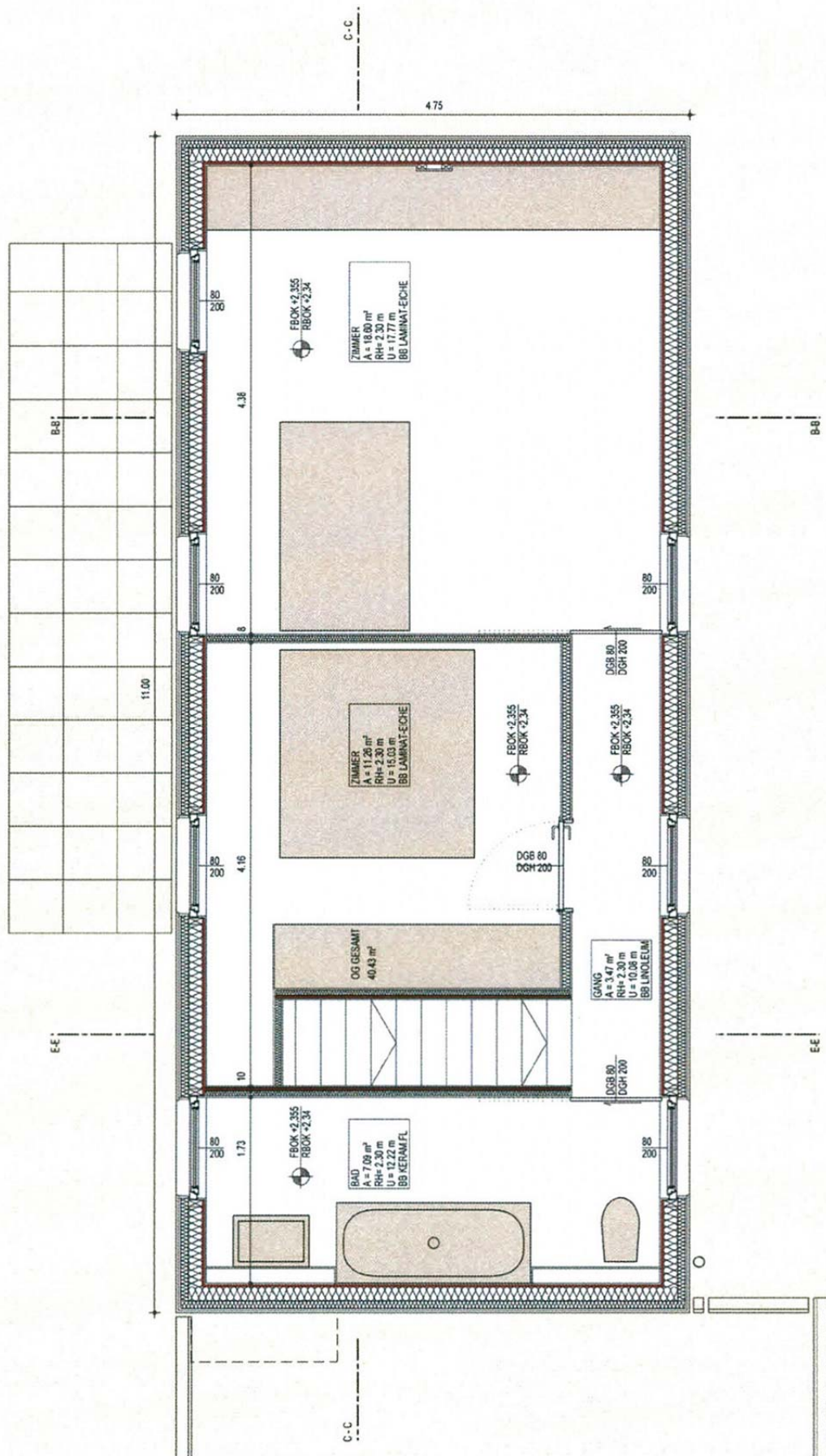


Abb. 18 : Grundriss Obergeschoss _ Typ A ohne Keller

5.1.3 Konstruktionsdetails

In jedem Prüfbericht sollten auch Angaben zur Konstruktion enthalten sein. So sollte mindestens die Bauweise, Bauform und wenn von Interesse auch Wand-, Decken-, und Dachaufbauten enthalten sein. Da die gewonnenen Messdaten auch mit weiterführenden Messungen vergleichbar sein sollen, sind Gebäudedaten, sowie die Details zur Konstruktion der Außenwand- und Dachelemente von wesentlicher Bedeutung. Dazu werden die Gebäudedaten in Tabelle 8 und Konstruktionsdetails in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 8 : Gebäudedaten, gültig für alle Gebäudetypen (Quelle aus Datenschutzgründen vorenthalten)

Gebäudeart:	Kleingartenwohnhaus
Baujahr:	2009
Bauweise:	Holzfertigteilbauweise (Skellettbauweise für Wände und Dach, Holzmassivbauweise für 1. Geschossdecke)
Dachform:	Flachdach, hinterlüftet
Energetischer Standard:	keine erhöhte Anforderungen
Anforderung an die Luftdichtheit:	$n_{50} < 3,0 \text{ h}^{-1}$
Lüftungskonzept:	Fensterlüftung (keine kontrollierte Wohnraumlüftung) Lüfter im Tages-WC im Erdgeschoss Lüfter im Bad im Obergeschoss (Luftfeuchtigkeit einstellbar)
Heizsystem:	Zentrale Versorgung je Gebäude, Gastherme Geräteaufstellung und Leitungsführung befindet sich innerhalb der luftdichten Hülle. Lüftungs- und Abgasrohr der Therme führt durch die Außenwand.

Tabelle 9 : Konstruktionsdetails, gültig für alle Gebäudetypen (Quelle aus Datenschutzgründen vorenthalten)

Dach (von außen nach innen)	5 mm	- Abdichtung (Foliendach)
	24 mm	- Schalung
	50 mm	- Hinterlüftung (dazw. Polsterlatten)
	24 mm	- Schalung
	160 mm	- Sparrenlage (im Gefälle) mit Zwischendämmung - Dampfbremse
	20 mm	- Lattung / Installationsebene
	12,5 mm	- GKF-Platte verputzt
Außenwand Holzoptik (von außen nach innen)	20 mm	- Schalung Lärche horizontal
	20 mm	- Hinterlüftung - Winddichtpapier
	12,5 mm	- GKF-Platte
	50 mm	- Lattung mit Zwischendämmung
	140 mm	- Holzständerkonstruktion mit Zwischendämmung - Dampfbremse
	12,5 mm	- GKF-Platte
Außenwand verputzt (von außen nach innen)	10 mm	- Außenputz
	40 mm	- Putzträgerplatte
	12,5 mm	- GKF-Platte
	140 mm	- Holzständerkonstruktion mit Zwischendämmung - Dampfbremse
	15 mm	- GKF-Platte
Wohnungseingangstür:	Hergestellt laut ÖNORM B 5338 (ohne Selbstschließer) Widerstandsklasse 2, einbruchhemmend, als glatte Vollholztüren innen sowie außen mit Holzstock. Klimakategorie C, innen lackiert, außen Grau.	
Tür- und Fensterelemente:	Holzfenster und Holzfenstertüren mit 2-Fach-Verglasung Außenjalousien vorhanden mit Kurbel händisch regelbar.	

5.2 Messaufbau

In den durchgeführten Messungen im Rahmen dieser Arbeit kam das Modell „Minneapolis BlowerDoor Modell 4“ mit dem Differenzdruckmessgerät DG-3 zum Einsatz. Es wurde jeweils im Erdgeschoss in der Hauseingangstür eingebaut. Da es sich bei den getesteten Gebäuden um ein sehr geringes Raumvolumen handelt, wurden dazu die Blenden C und D (Abb. 19) verwendet. Dadurch ist es durch die reduzierten Öffnungen der jeweiligen Blende möglich, einen geringeren Volumenstrom zu messen. Mittels Blende C kann im Bereich von ca. 55-280 m³/h, mittels Blende D von ca. 33-131 m³/h gemessen werden. [ENE04]



Abb. 19 : Blende C und D des Minneapolis Blower-Door Modell 4 [ENE04]

Zum Einbau des Ventilators in eine Öffnung wird eine Folie und ein Klemmrahmen aus Metall verwendet. Zunächst wird der Rahmen grob an die Abmessungen der Öffnung angepasst. Anschließend wird die Folie über den Rahmen gezogen und dann in der Tür verklemmt. Undichte Stellen werden zusätzlich abgeklebt. Ein Druckschlauch wird an der Folie an der dafür vorgesehene Stelle angesteckt und das andere Ende einige Meter vom Gebäude entfernt abgelegt. Dieses darf nicht von Gräsern, oder am Boden liegenden Gegenständen verdeckt sein. Jetzt erfolgt der Einbau des Ventilators in der Folie. Auch hier wird auf eine luftdichte Umhüllung geachtet. Nun können auch der Geschwindigkeitsregler des Ventilators und das Druckdifferenzmessgerät angeschlossen werden. Abb. 20 zeigt dazu, wie die Druckschläuche für das Model DG-3 anzuschließen sind.

Der rote Schlauch wird mit dem Input-Anschluss von Kanal B verbunden. Dieser Kanal wird verwendet um den Ventilator- und den Volumenstrom zu messen. Dementsprechend wird das andere Ende am Ventilator angeschlossen. Das Ende des Referenzanschlusses befindet sich immer im Unterdruckbereich.

Der grüne Schlauch wird am Referenz-Anschluss von Kanal A angeschlossen. Er misst den Außendruck in Referenz zum Gebäudedruck. Das andere Ende des grünen Schlauchs wird an der Folie mit jenem Anschluss verbunden, an dem ein Schlauch mit der Außenluft verbunden ist.

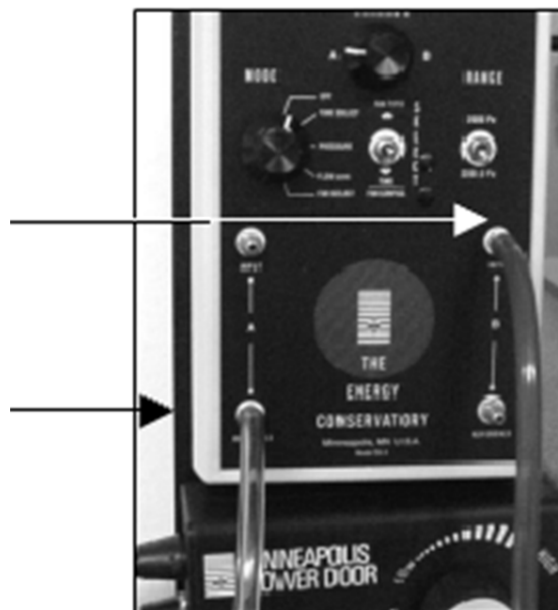


Abb. 20 : Anschluss der Messschläuche bei Unterdruckmessung am DG-3 [ENE04]

Bei der Durchführung der Überdruckmessung muss bei diesem Gerät der Ventilator umgedreht werden. Neuere Modelle erlauben mittels eines Schalters die Strömungsrichtung des Ventilators zu ändern. Zur korrekten Messung im Überdruck, muss zusätzlich ein Messschlauch einmal an dem zweiten Anschluss an der Folie (Außendruck) und bei dem Druckmessgerät unter dem roten Schlauch (Referenz-Anschluss Kanal B) angeschlossen werden. Der Ventilator- und der Volumenstrom kann für die Unter- sowie Überdruckmessung bei dementsprechendem Umschalten des Kanals abgelesen werden. Beispielsweise wird bei Kanal A und „Pressure“ der Gebäudedruck abgelesen und auf 50 Pa mit dem Ventilatorregler eingestellt. Am Kanal B kann dann unter „Pressure“ der Gebläsedruck bzw. unter „Flow“ der Volumenstrom bei 50 Pa abgelesen werden. Zu beachten ist, dass bei diesem Druckmessgerät die richtige Blende ausgewählt werden muss.

5.3 Messablauf

Der Ablauf der Messungen lehnt sich an das in Punkt 3.4 beschriebene Vorgehen. Als Ergänzung dazu sollen hier kurz die wichtigen Schritte, die speziell in dieser Testreihe durchgeführt wurden, in chronologischer Reihenfolge festgehalten werden.

Den ersten Schritt des Messablaufs stellt die Vorbereitung des Gebäudes für den Luftdichtheitstest dar. Dazu wurden alle nötigen Maßnahmen von Tabelle 1 für alle Gebäude gleichermaßen durchgeführt.

Nachdem die Messeinrichtung in der Hauseingangstür ordnungsgemäß eingebaut wurde, wird zunächst das Prüfprotokoll vorbereitet. Angaben zur Innen- und Außenlufttemperatur sowie Windstärke, Objektname, Datum, Prüfer usw. werden eingetragen. Anschließend wird die Messeinrichtung in Betrieb genommen und ein Unterdruck von 50 Pa erzeugt, um die geeignete Blende für den Ventilator zu finden und bei großen Abweichungen eventuelle ungewollte Öffnungen zu erkennen. Den nächsten Schritt stellt die Messung der natürlichen Druckdifferenz dar. Da es sich hier um ein manuelles Druckmessgerät handelt, kann der Mittelwert nur abgeschätzt werden. Nun folgt die Durchführung der Unterdruckmessung, bei möglichst vielen, aber mindestens fünf Druckdifferenzen. Begonnen wird dabei bei 10 Pa und der Druck wird schrittweise um jeweils 10 Pa erhöht. Die meisten Gebäude wurden bis zu einer Druckdifferenz von 70 – 80 Pa gemessen. Anschließend wird wiederum der Mittelwert der natürlichen Druckdifferenz ermittelt.

Da der Ventilator für die Überdruckmessung umgedreht werden muss, wird vorerst noch die Leckageortung bei Unterdruck von ca. 70 Pa durchgeführt. Dabei dienten die Thermobildkamera NEC H2640 sowie Rauchröhrchen und das Fühlen mit den Händen als Hilfsmittel. Die Leckagen werden durch Bilder und Notizen dokumentiert. Nach der Leckageortung wird der Ventilator umgedreht und der Druckmessschlauch für den Unterdruckbereich (Reference-Anschluss am Kanal B des Druckmessgerätes) mit dem Druckmessgerät und dem vorgesehenen Anschluss an der Folie verbunden. Die Überdruckmessung erfolgt nun analog zur Unterdruckmessung inklusive Mittelwertbildung der natürlichen Druckdifferenz vor und nach der Messung.

5.4 Beurteilung von Leckagen der Testgebäude

Die Testgebäude wurden im Prüfverfahren A nach [ONO01] getestet. Dies bedeutet, dass der Zustand des Gebäudes jenem während der Jahreszeit entspricht, in der Heizungs- und Klimaanlage benutzt werden. Außerdem waren die Gebäude seit bereits etwa 3 Jahren bezogen. Um Fehler in der luftdichten Schicht zu erkennen, werden Gebäude in der Regel nach Verfahren B geprüft, wobei der Prüfzeitpunkt so gewählt wird, dass Korrekturen an der luftdichten Schicht noch durchgeführt werden können, sprich das Gebäude ist noch nicht fertiggestellt. Bei der Prüfung nach dem Verfahren A ist zwar auch eine Leckageortung sinnvoll, jedoch können die Leckagen nicht immer richtig beurteilt werden. Der Grund dafür liegt darin, dass die strömende Luft von der eigentlichen Leckage in der luftdichten Ebene einen bestimmten Weg zurücklegt (z.B. hinter luftdichten Vorsatzschalen) und an einer anderen Stelle (z.B. Deckenanschluss der Vorsatzschale) austritt. Für den Prüfer ist die Strömung der Luft im Innenraum zwar feststellbar, jedoch kann die eigentliche Leckage nicht mehr genau geortet werden. Dabei Abhilfe schaffen könnte Theaternebel, der durch Überdruck im Gebäude nach außen gedrückt wird. Grundsätzlich und vor allem bei hinterlüfteten Holzfassaden ist aber auch hier die Ortung der eigentlichen Leckage sehr schwierig.

Die in den Testhäusern vorkommenden Leckagen sollen an dieser Stelle etwas genauer betrachtet werden, denn Art, Größe und Position von Leckagen können verschiedene Eigenschaften des Gebäudes beeinflussen. Eine bestimmte Relevanz ist den Leckagen auch im Hinblick auf die statistische Auswertung der Daten zuzuschreiben. Die Verteilung von Luftwechselzahlen kann je nach Bauart (Holzleichtbau, Massivbau, Holzmassivbau, Glasbau, ...) sehr unterschiedlich sein. Besonders im Holzleichtbau ist ein sorgfältiger Umgang von Bauteilstößen und Durchdringungen notwendig, um undichte Stellen in der Gebäudehülle zu vermeiden. Für nachfolgende Forschungsarbeiten ist es daher wichtig, die Eigenschaften von Leckagen der gemessenen Gebäude zu kennen, da anzunehmen ist, dass diese die Verteilung der Luftwechselzahl beeinflussen können.

Informativ wird vorerst noch die berechnete Leckagefläche der Testgebäude nach Punkt 3.5.3 angegeben. Diese bewegt sich zwischen:

$16,40 \text{ cm}^2 < A_{\text{eff}} < 41,40 \text{ cm}^2$	für die vereinfachte Berechnung nach Formel (1)
$18,80 \text{ cm}^2 < ELA_{4\text{Pa}} < 45,70 \text{ cm}^2$	für die effektiven Leckagefläche nach Formel (3)
$35,60 \text{ cm}^2 < EqLA_{10\text{Pa}} < 87,00 \text{ cm}^2$	für die äquivalenten Leckagefläche nach Formel (4)

a) *Leckage am Abflussrohr im Keller:* Es handelt sich hierbei um das Abflussrohr der WC's, das im Installationsschacht, welches vom Erdgeschoss bis zum Dach reicht, verläuft. Im Erdgeschoss führt das Rohr durch die Kellerdecke aus Stahlbeton in den Keller und von dort durch die Kellerwand in den angrenzenden Untergrund. Nach Angaben der Bewohner führt vom Installationsschacht ein Rohr für Satellitenkabel (ca. 5 cm Durchmesser) durch die Dachebene ins Freie und es ist zu vermuten, dass dieses die Ursache für die Luftströmungen im Installationsschacht sein könnte. Der Durchbruch wurde nicht eigens abgedichtet, daher ist ein meist eher starker Luftstrom spürbar.



Abb. 21 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Abflussrohr im Keller

b) *Leckage der Serviceöffnung für den Installationsschacht im Bad des OG:* Die Metalltür hat eine Abmessung von ca. 20 x 20 cm. Durch die bereits beschriebene Leckage im Installationsschacht sind im Bereich der Funktionsfuge der Tür mäßige Luftströmungen spürbar. Wird die Metalltür geöffnet, ist meist ein sehr starker Luftzug vorhanden.

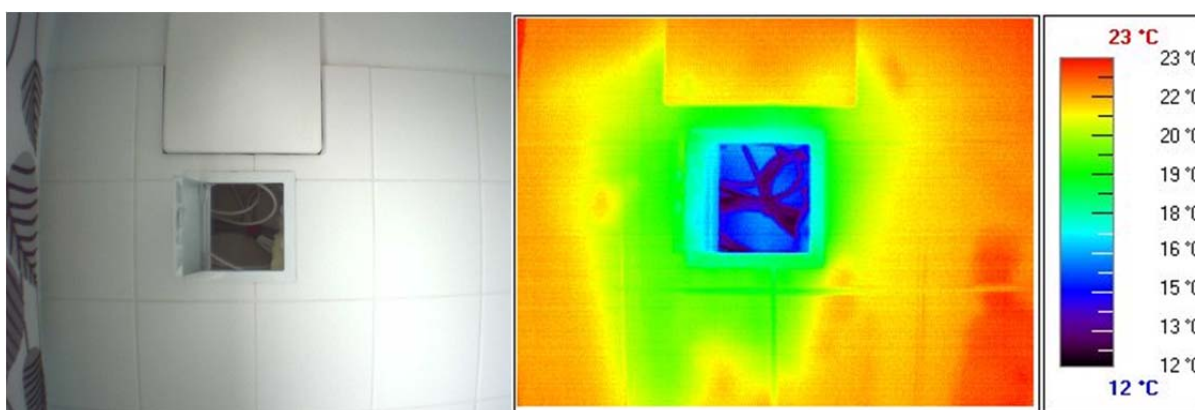


Abb. 22: Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage der Serviceöffnung (geöffnet) für den Installationsschacht im Bad des OG

c) *Leckage am Versorgungsrohr der Gastherme:* Die Gastherme befinden sich im EG nahe des Hauseinganges. Hier führt ein Rohr mit einem Durchmesser von 100 mm durch die Außenwand. Bei den meisten der gemessenen Gebäude ist eine geringe Luftströmung vorhanden. Es könnte sich hier um eine Durchdringung der luftdichten Schicht handeln, welche erst nachträglich von den Installateuren der Gastherme verursacht wurde. Da hier das nachträgliche Abdichten, bzw. Luftdichte verkleben der Diffusionsfolie mit dem Rohr, nur erschwert möglich ist, können derartige Leckagen in der Praxis nicht zur Gänze vermieden werden.

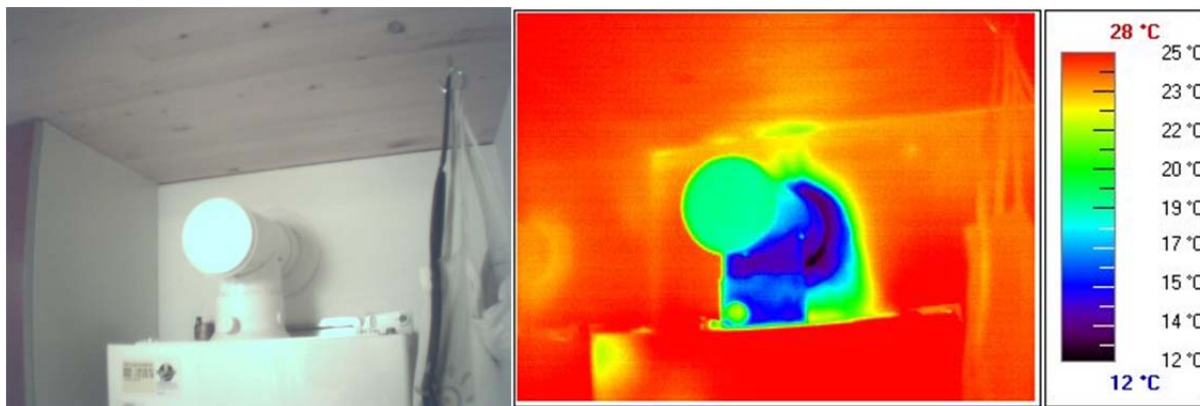


Abb. 23 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Versorgungsrohr der Gastherme

d) *Leckage an den Stoßfugen der Holzdecke des EG:* Die Stöße der Holzdecke sind mit einem Falz versehen, wodurch an diesen Stellen eine schlüssige Verbindung von Wand und Decke nicht gewährleistet werden kann. Es handelt sich hierbei um eine Leckage von ca. 1 cm² bis 5 cm², je nach Größe der Schwindfuge zwischen den Deckenelementen. In der Regel ist die winddichte Schicht der Wand mit jener der Decke zu verbinden, bzw. funktioniert die Luftdichte Schicht geschossübergreifend. Trotzdem waren in vielen der Messobjekte geringe Luftströmungen an diesen Stellen spürbar. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass Luft durch kleine Leckagen in der Wandfläche eintritt und sich hinter der Innenschale bis zur beschriebenen Leckage bewegt.

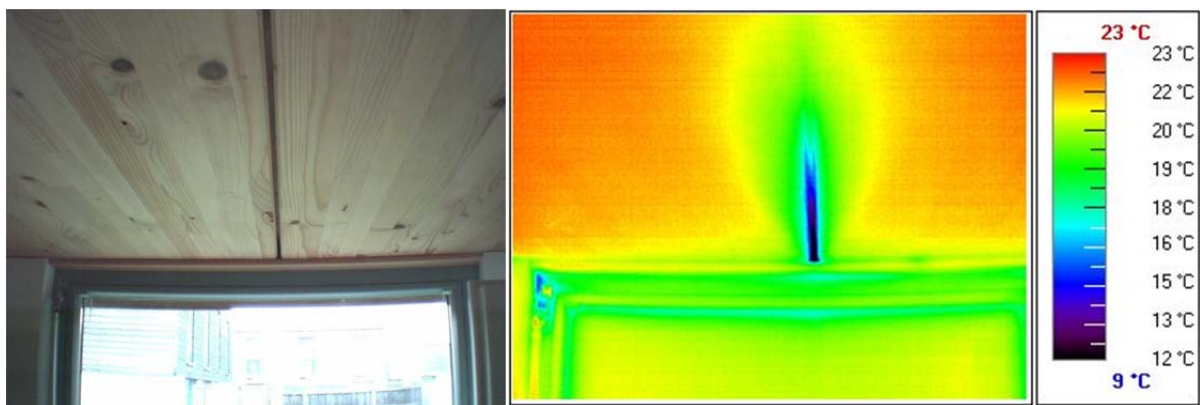


Abb. 24 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage an den Stoßfugen der Holzdecke im EG

e) *Leckage der Installationsdosen:* Häufig wiesen die Installationsdosen mit direkter Verbindung nach außen Luftströmungen auf. Ein Luftzug ist hierbei an zwei Installationsdosen neben der Hauseingangstür, manchmal auch an einer dreiteiligen Schalterreihe im Wohnzimmer spürbar. In der Praxis jedoch werden Kabelrohre nur bei besonderen Anforderungen an die Luftdichtheit (z.B. Passivhaus) komplett abgedichtet.

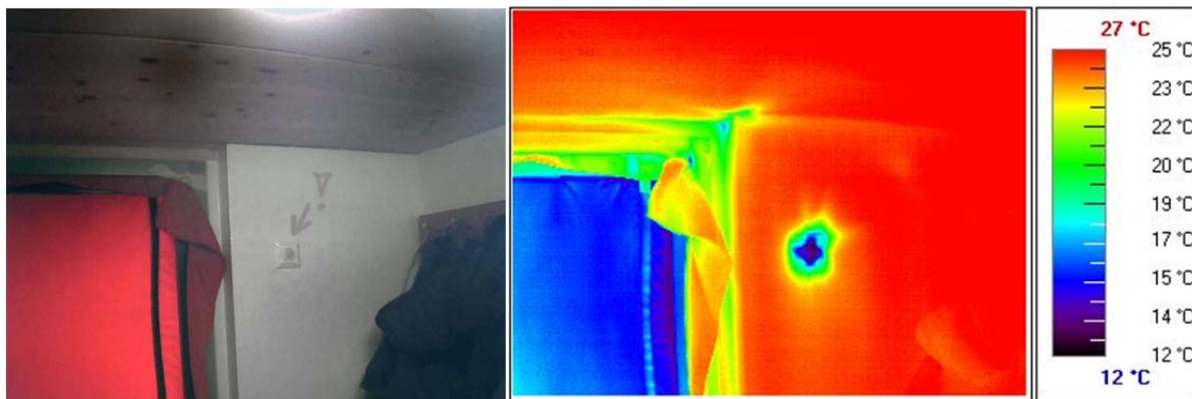


Abb. 25 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage der Installationsdosen

f) *Leckage am Fensterdurchbruch der manuellen Raffstore-Kurbel:* An den Gebäuden sind mehrere außenliegende Verschattungselemente angebracht. Als Steuerelement dieser reicht eine manuelle Drehkurbel durch den Terrassentürrahmen in das Innere des Gebäudes. Es ist nur eine sehr geringe Luftströmung wahrzunehmen und nicht weiter als kritisch bzw. stark beeinträchtigend auf die Luftdichtheit zu deklarieren.

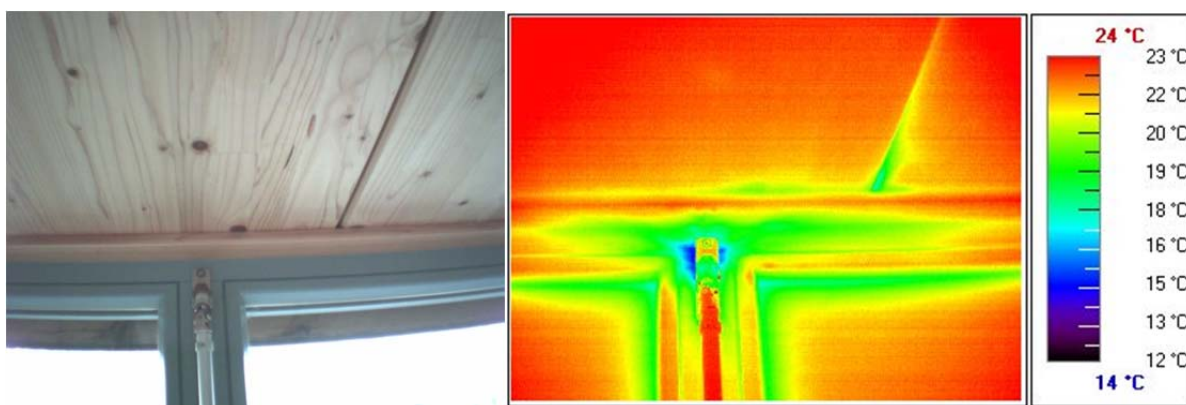


Abb. 26 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Fensterdurchbruch der manuellen Raffstore-Kurbel

g) *Leckage am Wand- Deckenstoß:* Im Erdgeschoss sowie auch im Obergeschoss sind bei einigen Häusern Luftströmungen spürbar. Häufiger treten diese im Erdgeschoss bei der Verbindungsfuge von Wand und Decke auf wo eine Brettstapeldecke auf die Außenwand aufgesetzt ist. Im Obergeschoss konnten mehrfach Setz- oder Schwindrisse in den Ecken festgestellt werden. Durch diese Risse ist ein Lufteintrag festzustellen. In beiden Fällen ist der wirkliche Ursprung der Luftundichtheit nicht genau feststellbar und kann sich an einer beliebigen Stelle der luftdichten Schicht von Wand oder Dach befinden.



Abb. 27 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Wand/Fenster – Deckenstoß im Obergeschoss

h) *Leckage an der Einbaufuge von Fenstern:* Mit einer spürbaren Luftströmung zwischen Fensterrahmen und Wandkonstruktion, handelt es sich hier um eine Leckage, die in den gemessenen Gebäuden nur sehr selten auftritt. Wenn diese festgestellt werden konnte, so trat die Leckage am häufigsten bei der Einbaufuge der Kellerfenster auf. In vereinzelt Fällen war diese auch bei den Fenstern der oberen Geschosse zu finden. Die Leckage tritt immer nur Stellenweise, und nicht über die gesamte Länge der Einbaufuge auf.

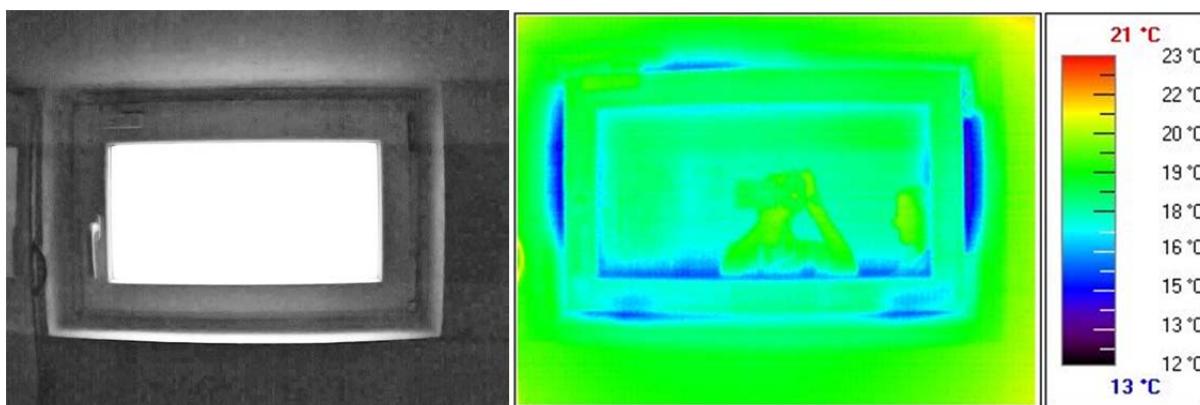
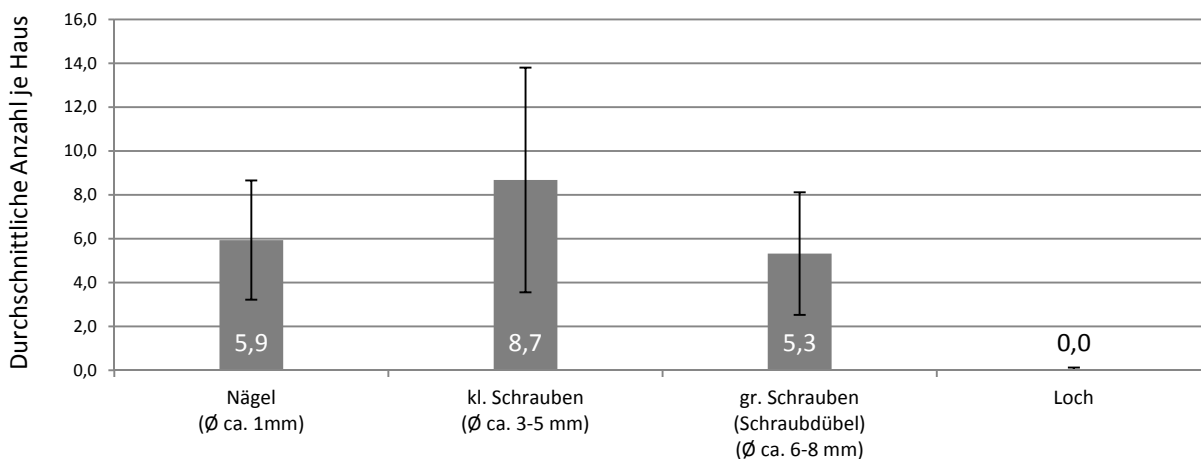


Abb. 28 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage an der Einbaufuge des Kellerfensters

Die Bewohner der Gebäude wurden vom Bauträger über die Auswirkungen von Löchern in der luftdichten Schicht informiert. Daher lautete der Appell, Durchdringungen der luftdichten Schicht durch Nägel, Schrauben oder Bohrungen zu vermeiden. Die meisten Bewohner haben tatsächlich bewusst darauf geachtet, was die Sinnhaftigkeit einer Sensibilisierung der Bewohner hinsichtlich ihres Verhaltens zur Vermeidung von Bauschäden durchaus bestätigt. Allgemein ist in diesem Zusammenhang jedoch sehr schwierig zu beurteilen, ob Schrauben die luftdichte Schicht beschädigt haben könnten. Man weiß aus den Plänen des Architekten, dass die Innenschale aus einer Lage Gipskartonplatten (12,5 mm) besteht. Unmittelbar dahinter soll sich eine Dampfbremse befinden. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass vor allem längere Schrauben die luftdichte Schicht beschädigen können. Es ist aber anzunehmen, dass derartig kleine Löcher keinen wesentlichen Einfluss auf die allgemeine Luftdichtheit des Gebäudes darstellen. Eine gewisse Relevanz hinsichtlich Feuchteschäden in der Konstruktion durch konvektive Feuchteinträge kann jedoch nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Die Diskussion zu diesem Thema ist in mehreren Veröffentlichungen bereits aufgegriffen worden. [NUS12] [FIS08]

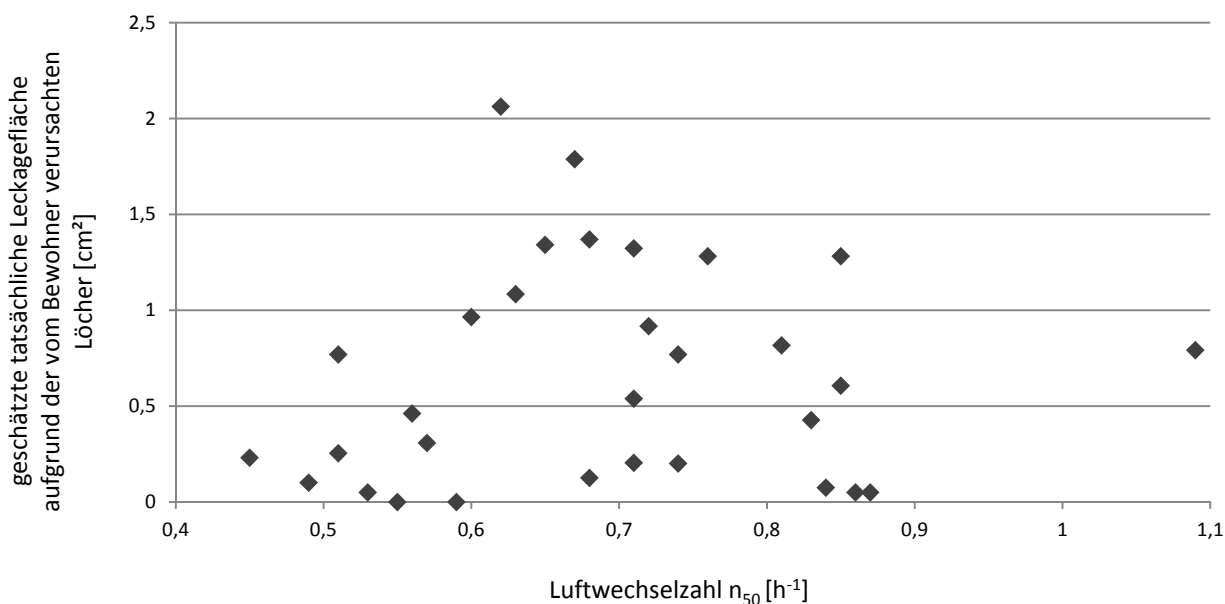
Um die Thematik der Leckagen abzuschließen, wird anhand der aufgenommenen Daten bezüglich kleiner Löcher in der luftdichten Schicht versucht, den tatsächlichen Zusammenhang zwischen kleinen Leckagen und Luftdichtheit aufzuzeigen. Dazu wurden in 31 Gebäuden alle Nägel und Schrauben, sowie vom Bewohner verursachte größere Bohrlöcher aufgenommen und ausgewertet. Das Diagramm 3 zeigt dazu die durchschnittliche Anzahl von Nägeln, kleinen Schrauben, Schraubdübeln und Löchern welche die Bewohner an der Innenschale der Außenwände angebracht, geschraubt oder gebohrt haben.

Diagramm 3 : Durchschnittliche Anzahl und Standardabweichung diverser Durchdringungen der Innenschale der Außenwand durch Befestigungsmittel und Bohrungen, vom Bewohner verursacht.



Um nun einen tatsächlichen Zusammenhang zu finden, wird aufgrund der vorhandenen Nägel, Schrauben und Schraubdübel sowie gebohrten Löcher eine wahrscheinliche Leckagefläche berechnet. Hierbei werden die Nägel nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass diese die luftdichte Schicht nicht beschädigen. Für die Schrauben wird in etwa 20 % ihres Querschnittes als Leckagefläche angesehen. Setzt man nun diese angenommene Leckagefläche in Bezug zur ermittelten Luftwechselzahl der Gebäude, ergibt sich eine Verteilung nach Diagramm 4. Es ist keine eindeutige Tendenz festzustellen, daher kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl von Befestigungsmitteln bzw. deren verursachte Leckagefläche die Luftdichtheit der Gebäude nicht ausschlaggebend beeinflussen.

Diagramm 4 : Zusammenhang zwischen Leckagefläche (aus Befestigungsmitteln und Bohrungen), und der gemessenen Luftwechselzahl n_{50} .



5.5 Messdatenauswertung

5.5.1 Berechnung der Kenngrößen für Luftdichtheit

Die erhaltenen Messdaten der Unter- sowie Überdruckmessung aller 34 Häuser wurden mit dem Berechnungstool der BlowerDoor GmbH ausgewertet. Das Tool berechnet die Kennwerte gemäß der ÖNORM EN 13829 [ONO01] analog zu den in Kapitel 3.6 angegebenen Gleichungen. Basis für die Berechnung sind die gemessenen Volumenströme. In Abb. 29 ist das Tabellenblatt zur Berechnung wichtiger Kenngrößen dargestellt. Es handelt sich hierbei nur um einen Auszug aus dem Berechnungstool. Dazu wurden die Eingabefelder mit weißem oder gelbem Hintergrund, vom Berechnungstool automatisch ausgegebene Zellenwerte mit grauem Hintergrund gekennzeichnet.

Innentemperatur:	22 °C	Gebäuedruckdifferenz:	1 Außenmessstelle
Außentemperatur:	1 °C	Windstärke:	2
Luftdruck (geogra.):	99566 Pa	Gebäudestandort:	B (teilweise exponiert)
		Messunsicherheit Wind:	2 %

Unterdruck					Überdruck				
Natürliche Druckdiff.	Dp01+	Dp01-	Dp02+	Dp02-	Natürliche Druckdiff.	Dp01+	Dp01-	Dp02+	Dp02-
***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Messreihen									
Reduzierblende	Gebäuedruck Dp _m	Gebälasedruck	Gebäuedruck Dp	Volumenstrom V _r	Reduzierblende	Gebäuedruck Dp _m	Gebälasedruck	Gebäuedruck Dp	Volumenstrom V _r
OABCDE	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(m³/h)	OABCDE	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(m³/h)
Dp01	1,0	-----	-----	-----	Dp01	0,5	-----	-----	-----
D	-10	13	-11	45	D	10	22	10	58
D	-20	36	-21	75	D	20	44	20	83
D	-30	80	-31	112	D	30	86	30	116
D	-40	106	-41	129	D	40	119	40	136
D	-50	149	-51	153	D	50	170	50	163
D	-60	202	-61	178	D	60	272	60	207
D	-70	248	-71	197	D	70	375	70	243
D	-80	300	-81	217	D	80	472	80	273
Dp02	1,0	-----	-----	-----	Dp02	0,5	-----	-----	-----

Korrelationskoeff. r: 0,998				Vertrauensintervall (95%)				Korrelationskoeff. r: 0,988				Vertrauensintervall (95%)			
C _{env}	(m³/(h Pa ⁿ))	6	max. 8	min. 5	C _{env}	(m³/(h Pa ⁿ))	10	max. 16	min. 7	C _L	(m³/(h Pa ⁿ))	10	max. 16	min. 7	
C _L	(m³/(h Pa ⁿ))	7	max. 8	min. 5	n	(-)	0,79	max. 0,84	min. 0,74	n	(-)	0,74	max. 0,85	min. 0,62	

Ergebnis, Kenngrößen					
V =	195 m³	A _F =	86 m²	A _E =	229 m²

	V̇ ₅₀	Unsicherheit	n ₅₀	Unsicherheit	w ₅₀	Unsicherheit	q ₅₀	Unsicherheit
	m³/h	%	1/h	%	m³/(m²h)	%	m³/(m²h)	%
Unterdruck	144	+/- 6 %	0,74	+/- 6 %	1,7	+/- 6 %	0,63	+/- 6 %
Überdruck	186	+/- 6 %	0,95	+/- 6 %	2,2	+/- 6 %	0,81	+/- 6 %
Mittelwert	165	+/- 6 %	0,84	+/- 6 %	1,9	+/- 6 %	0,72	+/- 6 %

Abb. 29 : Auszug: Berechnungsblatt der Blower-Door GmbH

Erläuterung der Felder mit Eingabeoption

Innen- und Außentemperatur: in diesen Feldern wird die gemessene Temperatur der Außenluft und die Lufttemperatur im Gebäudeinneren angegeben.

Windstärke: Die Windstärke kann im oberen Feld direkt aus einer Messung (in m/s) angegeben werden. Alternativ dazu ist es auch zulässig, die Windstärke nach Beaufort abzuschätzen.

Gebäudedruckdifferenz: Es besteht die Auswahl für „1 Außenmessstelle“ oder „4 Außenmessstellen“. Für die Testreihe wurde immer eine Außenmessstelle verwendet.

Gebäudestandort: Auswahlmöglichkeit zwischen „A (geschützt)“, „B (teilweise exponiert)“ und „C (exponiert)“. Die Gebäude der Testreihe sind als teilweise exponiert einzustufen.

Messunsicherheit Wind: Der Zellenwert wird automatisch durch Angabe der Windstärke errechnet. Dabei ergibt sich der jeweilige Prozentsatz nach Tabelle 10 : Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind (Auszug) [FLI02] der Fehlerfortpflanzungsrechnung (siehe Kapitel 5.5.2). Das Programm lässt jedoch die Option offen, die Messunsicherheit infolge Wind vom Prüfer zu ändern.

Natürliche Druckdifferenz: Bei computerunterstützten Messungen werden diese Felder automatisch mit dem Mittelwert der gemessenen natürlichen Druckdifferenzen vor und nach der Messung ausgefüllt. Bei manuellen Messungen ist es eher schwierig die positiven und negativen Mittelwerte genau zu ermitteln. Aus diesem Grund wird nur *ein* Mittelwert vor und nach jeder Messreihe abgeschätzt.

Reduzierblende: Angabe der jeweils verwendeten Blende (A, B, C, D). Für die in dieser Testreihe durchgeführten Messungen wurde meist die Blende C oder D verwendet.

Gebäudedruck: Angabe des herrschenden Gebäudedrucks für den jeweiligen Messpunkt. In der Regel wird der Gebäudedruck, wie in Kapitel 3.4 beschrieben nach den Anforderungen der ÖNORM EN 13829:2001 [ONO01] gewählt. Bei computerunterstützten Messungen werden die Felder automatisch ausgefüllt, können aber auch vorher festgelegt werden.

Gebläsedruck: Die Werte dieser Felder werden auch hier bei computerunterstützten Messungen automatisch eingetragen. Bei manuellen Messungen wird der abgelesene Gebläsedruck angegeben. Wird der Volumenstrom von dem Druckmessgerät abgelesen, so muss jener Wert für den Gebläsedruck eingegeben werden, sodass der abgelesene Volumenstrom mit jenem vom Programm berechneten Volumenstrom übereinstimmt.

Bezugsgrößen: Die Angabe von Innenvolumen V , Nettogrundfläche A_F und Hüllfläche A_E , erfolgt in einem weiteren Tabellenblatt und wird hier automatisch aus diesem übernommen.

Die Berechnung aller Kenngrößen der Luftdichtheit (Leckagekoeffizient, Volumenstrom von Unter- und Überdruck, Luftwechselrate n_{50} , Luftdurchlässigkeit q_{50} , nettogrundflächenbezogener Leckagestrom w_{50} , ...) wird wie unter Punkt 3.6 beschrieben und unter Berücksichtigung der eingegebenen Parametern (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Gebäudestandort, ...) durchgeführt.

Zusätzlich von Bedeutung bei der Auswertung der Messdaten ist deren Verlässlichkeit. Die Gesamtgenauigkeit der Daten hängt dabei von vielen Faktoren ab. Wie bereits in Punkt 3.3.1 beschrieben, sind Daten immer mit gewissen Fehlern behaftet. Um diesem Problem entgegenzuwirken und um die Genauigkeit der Daten abschätzen zu können, sieht die ÖNORM EN 13829 [ONO01] eine Fehlerfortpflanzungsrechnung vor. Diese Methode ist im Anhang C der genannten Norm näher beschrieben. Die im Berechnungstool durchgeführte Fehlerfortpflanzungsrechnung wird im nachfolgenden Kapitel 5.5.2 erläutert.

5.5.2 Fehlerfortpflanzungsrechnung

Das bereits genannte Berechnungstool der BlowerDoor GmbH, mit welchem die Auswertung der Messdaten durchgeführt wurde, enthält eine Fehlerfortpflanzungsrechnung welche auf einem Vorschlag eines Beiblattes der FLiB von 2002 [FLI02] basiert. Die aus dieser Fehlerrechnung ermittelte Gesamtunsicherheit hat jedoch keinen Einfluss auf die Erfüllung der Grenzwerte nach den jeweiligen Bestimmungen, ist aber für die statistische Auswertung der Daten nicht vernachlässigbar. Die Gesamtunsicherheit (Fehler h) der Luftdichtheitskennwerte n_{50} , q_{50} und w_{50} setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zum einen sind dies die Fehler f mit ihrem Ursprung in der Volumenstrommessung, zum anderen der Fehler g aus der Ermittlung der Bezugsgröße (Innenvolumen, Nettogrundfläche, Hüllfläche). [FLI02]

Zur Ermittlung der prozentuellen Unsicherheit gilt folgende vereinfachte Formel:

$$f = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2} \quad (15)$$

und

$$h = \sqrt{f^2 + g^2} \quad (16)$$

dabei ist:

a [%]: Fehler der Volumenstrommessung nach Herstellerangaben. Fehlerbereich: $a = 4\%$ bis 7% , für das Blower-Door Modell 4 gilt: $a = \pm 4\%$

b [%]: Fehler bei der Bestimmung des Gebäudedruckes (elektronische oder manuelle Druckmessgeräte) Fehlerbereich: $b = 1\%$ bis 5% , für das Blower-Door Modell 4 gilt: $b = \pm 3\%$

c [%]: Fehler aufgrund von Windeinflüssen. (siehe Tabelle 10 von Geißler „Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind“)
Fehlerbereich: $c = 0\%$ bis 11% bei Windstärke 3 nach Beaufort, dabei wird zwischen sehr geschützten (A), teilweise exponierten (B) und sehr exponierten (C) Gebäuden unterschieden.

d [%]: Fehler aufgrund des Barometrischen Druckes des Standortes. Fehlerbereich: $d = 2\%$ bei Angabe des barometrischen, absoluten Drucks, $d = 5\%$ bei Angabe der Standardbedingungen

e [%]: Fehler aufgrund fehlender Mittelwertbildung. Fehlerbereich: $e = 0\%$ bei Mittelwertbildung von Über- und Unterdruckmessung, so der Fall in der durchgeführten Testreihe, $e = 7\%$ wenn nur eine Messung (Unter- oder Überdruck) durchgeführt wird.

g [%]: Fehler aus der Ermittlung der Bezugsgrößen von Nettogrundfläche und Innenvolumen. Ist zusammengesetzt aus Maßtoleranzen zwischen Planmaßen und effektiven Maßen und Fehlerhafter Berechnung des Prüfers. Fehlerbereich: $g = 3\%$ bei genauer Berechnung, so der Fall in der durchgeführten Testreihe; $g = 6\%$ bei stichprobenhafter Kontrolle der Bezugsgrößen; $g = 12\%$ bei Abschätzung des Innenvolumens über das Bruttovolumen.

h [%]: Gesamtunsicherheit der abgeleiteten Kenngrößen für die Luftdichtheit n_{50} , q_{50} und w_{50} .

Möchte man für die durchgeführte Testreihe die Gesamtunsicherheit berechnen, so variiert lediglich der Parameter c für die Windgeschwindigkeit. Alle anderen Parameter sind für jede Messung identisch ($a = \pm 4\%$; $b = \pm 3\%$; $c = \pm 2\%$; $e = 0\%$; $g = \pm 3\%$). Die Berechnung nach Formel (15) und Formel (16) soll zwei beispielhafte Fälle mit Windstärke 2 und 3 nach Beaufort und teilweise exponiertem Gebäude (B) darstellen. Die prozentuelle Unsicherheit für die Windgeschwindigkeit (Wert c) wird aus Tabelle 10 entnommen.

Gesamtunsicherheit für Windstärke 2 nach Beaufort ($c = 2\%$)

$$h = \sqrt{4^2 + 3^2 + 2^2 + 2^2 + 0^2 + 3^2} = 6 \%$$

Gesamtunsicherheit für Windstärke 3 nach Beaufort ($c = 9\%$)

$$h = \sqrt{4^2 + 3^2 + 9^2 + 2^2 + 0^2 + 3^2} = 11 \%$$

Tabelle 10 : Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind (Auszug) [FLI02]

Geltungsbereich: Einfamilienhaus bzw. kleine Mehrfamilienhäuser bis 21/2 Geschosse (freistehende Häuser und Reihenhäuser). A: Sehr geschütztes Gebäude, B: Teilweise exponiertes Gebäude, C: Sehr exponiertes Gebäude							
Windstärke nach Beaufort [-]	Windgeschwindigkeit ¹⁾ [m/s]	Maximaler Messfehler infolge der Windströmung					
		[%] ²⁾			[%] ³⁾		
		A	B	C	A	B	C
0	kleiner als 0,45	0	0	0	0	0	0
1	0,45 bis 1,34	0	0	0	0	0	0
2	1,80 bis 3,10	1	2	3	0	1	2
3	3,60 bis 5,40	2	9	11	4	5	6
4	5,80 bis 8,00	8	24	27	5	20	23
5	8,50 bis 10,70	15	40	50	10	35	40

¹⁾ Meteorologische Windgeschwindigkeit (freies Gelände). Die vor Ort mit einem Anemometer gemessene Windgeschwindigkeit liegt bei ca. der Hälfte des angegebenen Wertes

²⁾ Eine Referenzdruckmessstelle, ca. 10 m vom Gebäude entfernt, vor direkter Anströmung geschützt (perforierte Schachtel, Schaumstoff).

³⁾ Vier um das Gebäude herum verteilte Messstellen mit Schläuchen gleicher Länge. Messstellen messen Staudruck.

5.5.3 Messergebnisse

Die Kenngrößen aus der Berechnung jeden Gebäudes sind tabellarisch in Tabelle 11 zusammengefasst und dienen, mit Ausnahme von zwei fehlerbehafteten Messungen, weiterfolgend als Grundlage für die statistische Auswertung der Daten. Für die Darstellung der berechneten Kenngrößen zur Luftdichtheit wurde eine bestimmte Ordnung festgelegt. Die Daten werden nach dem berechneten n_{50} -Wert aufsteigend geordnet und erhalten nach dieser Ordnung die jeweilige Messnummer. Somit werden bestimmte Kenngrößen leichter vergleichbar. In Diagramm 5 ist die Luftwechselzahl, mit Unterscheidung zwischen Gebäuden mit und ohne Keller grafisch dargestellt.

Die Abb. 30 und Abb. 31 zeigen die Anzahl der gemessenen Gebäude nach Typen und nach ihrer Ausführung mit Keller und ohne Keller. Es wurden dabei deutlich mehr Häuser mit Keller gemessen, was daran liegt, dass in der Siedlung auch wesentlich mehr Gebäude mit Keller gebaut wurden.

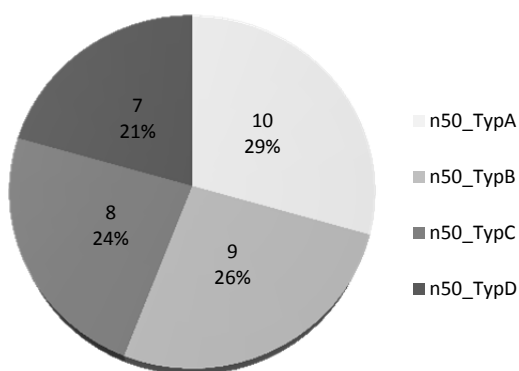


Abb. 30 : Anzahl gemessener Gebäude nach Typen

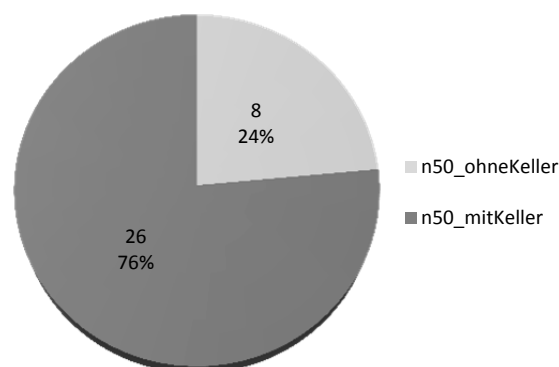


Abb. 31 : Anzahl gemessener Gebäude mit/ohne Keller

Tabelle 11 : Aus den gemessenen Daten ermittelte Kennwerte der Luftdichtheit

Messung Nr.	Unterdruck				Überdruck				Mittelwert			
	$C_{env,UD}$ [m ³ /(h·Pa ⁿ)]	n_{UD}	$\dot{V}_{50,UD}$ [m ³ /h]	$n_{50,UD}$ [h ⁻¹]	$C_{env,ÜD}$ [m ³ /(h·Pa ⁿ)]	$n_{ÜD}$	$\dot{V}_{50,ÜD}$ [m ³ /h]	$n_{50,ÜD}$ [h ⁻¹]	\dot{V}_{50} [m ³ /h]	q_{50} [m ³ /(h·m ²)]	w_{50}	n_{50} [h ⁻¹]
1	5	0,75	104	0,38	7	0,76	140	0,51	122	0,42	1,0	0,45
2 ¹⁾	6	0,67	87	0,45	8	0,65	96	0,49	91	0,41	1,1	0,47
3	7	0,73	117	0,43	11	0,66	152	0,56	134	0,46	1,0	0,49
4	8	0,69	127	0,46	9	0,71	148	0,54	137	0,48	1,1	0,5
5	3	0,94	111	0,41	12	0,67	166	0,61	139	0,48	1,1	0,51
6	5	0,81	118	0,43	8	0,78	160	0,59	139	0,48	1,1	0,51
7	5	0,79	121	0,44	9	0,77	170	0,62	145	0,5	1,1	0,53
8	2	0,99	116	0,43	10	0,74	186	0,68	151	0,52	1,2	0,55
9	5	0,82	126	0,46	16	0,63	181	0,66	153	0,53	1,2	0,56
10	7	0,75	136	0,50	7	0,81	173	0,64	155	0,54	1,2	0,57
11	5	0,86	135	0,50	9	0,79	188	0,69	162	0,56	1,3	0,59
12	10	0,70	138	0,51	9	0,87	188	0,69	163	0,56	1,3	0,60
13	6	0,80	139	0,51	11	0,74	199	0,73	169	0,59	1,3	0,62
14	5	0,83	138	0,51	17	0,63	205	0,75	172	0,59	1,3	0,63
15	6	0,83	153	0,56	6	0,89	199	0,73	176	0,61	1,4	0,65
16	4	0,87	113	0,58	8	0,75	147	0,75	130	0,59	1,5	0,67
17	7	0,77	152	0,56	10	0,79	218	0,80	185	0,64	1,4	0,68
18	8	0,78	165	0,60	11	0,76	205	0,75	185	0,64	1,4	0,68
19	9	0,66	125	0,64	4	0,91	153	0,79	139	0,63	1,6	0,71
20	7	0,81	163	0,60	17	0,67	223	0,82	193	0,67	1,5	0,71
21	5	0,90	160	0,59	14	0,72	230	0,84	195	0,67	1,5	0,71
22	9	0,78	178	0,65	15	0,69	215	0,79	196	0,68	1,5	0,72
23	9	0,77	186	0,68	10	0,80	220	0,80	203	0,7	1,6	0,74
24	12	0,71	189	0,69	8	0,83	213	0,78	201	0,7	1,6	0,74
25	9	0,78	188	0,69	16	0,67	223	0,82	206	0,71	1,6	0,75
26	6	0,78	136	0,70	6	0,85	161	0,83	149	0,67	1,7	0,76
27	9	0,70	146	0,75	6	0,86	170	0,87	158	0,72	1,8	0,81
28	8	0,79	183	0,67	26	0,60	271	0,99	227	0,79	1,8	0,83
29	9	0,76	184	0,67	25	0,62	276	1,00	230	0,8	1,8	0,84
30	6	0,81	139	0,71	10	0,77	190	0,98	165	0,75	1,9	0,85
31	8	0,81	202	0,74	23	0,62	263	0,96	233	0,8	1,8	0,85
32	6	0,79	144	0,75	10	0,74	186	0,97	165	0,74	1,9	0,86
33	10	0,78	203	0,74	12	0,80	275	1,00	239	0,83	1,9	0,87
34 ¹⁾	9	0,77	191	0,98	13	0,73	234	1,20	213	0,96	2,5	1,09

¹⁾ Fehlerbehaftete Messung und wird daher für die statistische Auswertung ausgeschlossen.

Symbolbeschreibung:

$C_{env...}$ Stömungskoeffizient [m³/(h·Paⁿ)]

$n_{50...}$ Luftwechselrate bei 50 Pa [h⁻¹]

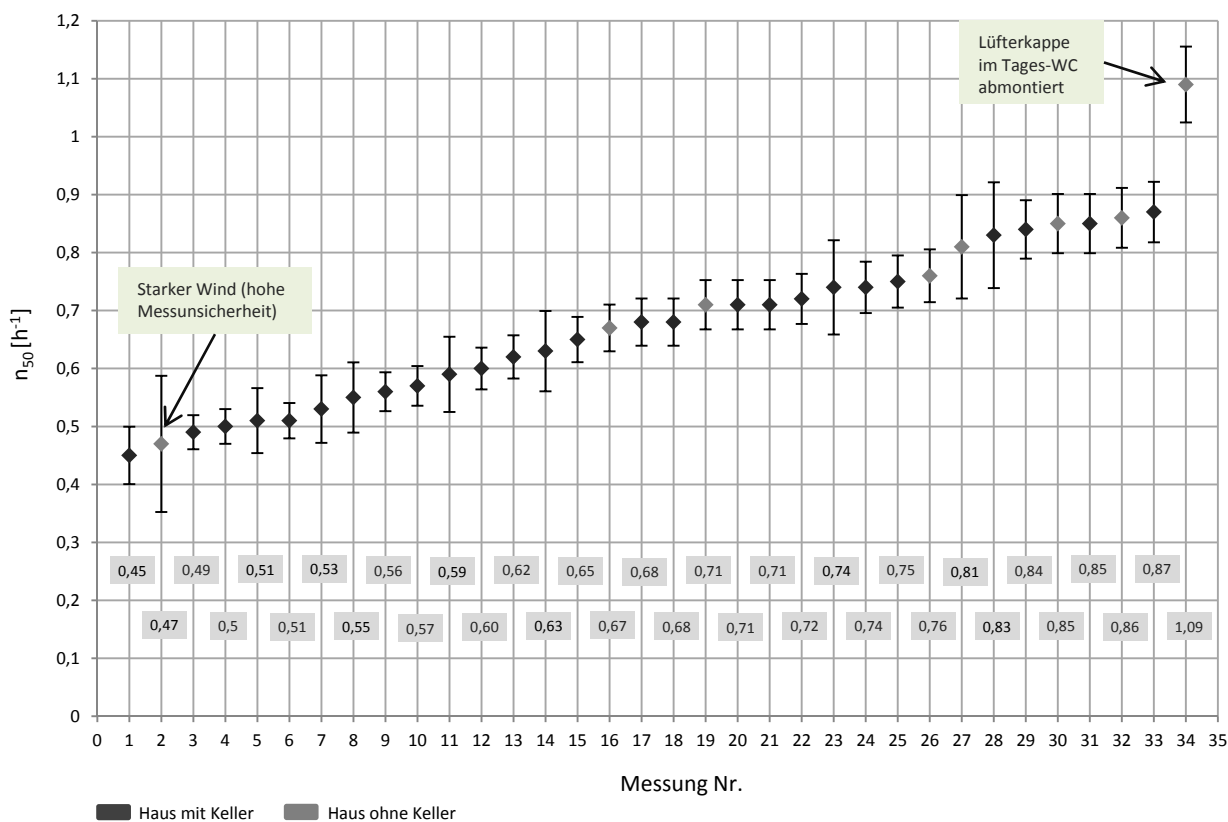
$n...$ Strömungsexponent

$q_{50...}$ Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa [m³/(h·m²)]

$\dot{V}_{50...}$ Volumenstrom bei 50 Pa [m³/h]

$w_{50...}$ nettogrundflächenbezogener Leckagestrom bei 50 Pa m³/(h·m²)

Diagramm 5 : Gemessene n_{50} - Werte mit Angabe des unteren und oberen Grenzwertes laut Fehlerfortpflanzungsrechnung



Das Diagramm 5 zeigt neben den errechneten n_{50} – Werten anhand des Berechnungsblatts der Blower-Door GmbH auch den jeweiligen möglichen Maximal- und Minimalwert aufgrund der berechneten Unsicherheit. Messung Nr. 2 zählt dabei mit einer Unsicherheit von 25 % zu einem Ausreißer. Durch den Umstand, dass bei der Messung dieses Gebäudes eher ungünstige Windverhältnisse (Windstärke 4 nach Beaufort) herrschten, waren sehr hohe Schwankungen von Gebäudedruck und Volumenstrom festzustellen. Es ist jedoch nicht unbedingt die hohe Messunsicherheit, welche den Ausschluss dieses Messwertes erfordert, sondern die zu geringe Korrelation der einzelnen Messpunkte der Messreihe. Ist der Korrelationskoeffizient (Genauigkeitswert) kleiner 0,98 ist die Messung als sehr ungenau einzustufen und sollte wiederholt werden. Da der Korrelationskoeffizient für genanntes Gebäude mit 0,89 deutlich niedriger als der geforderte Wert ist, kann diese Messung für die weitere statistische Auswertung nicht mit einbezogen werden. Die Abb. 32 zeigt die Leckagekurve des Hauses der Messung Nr. 2, wo deutlich erkennbar ist, wie stark die gemessenen Volumenströme von der berechneten Kurve abweichen. Die Leckagekurve ist in einer doppellogarithmierten Skala dargestellt.

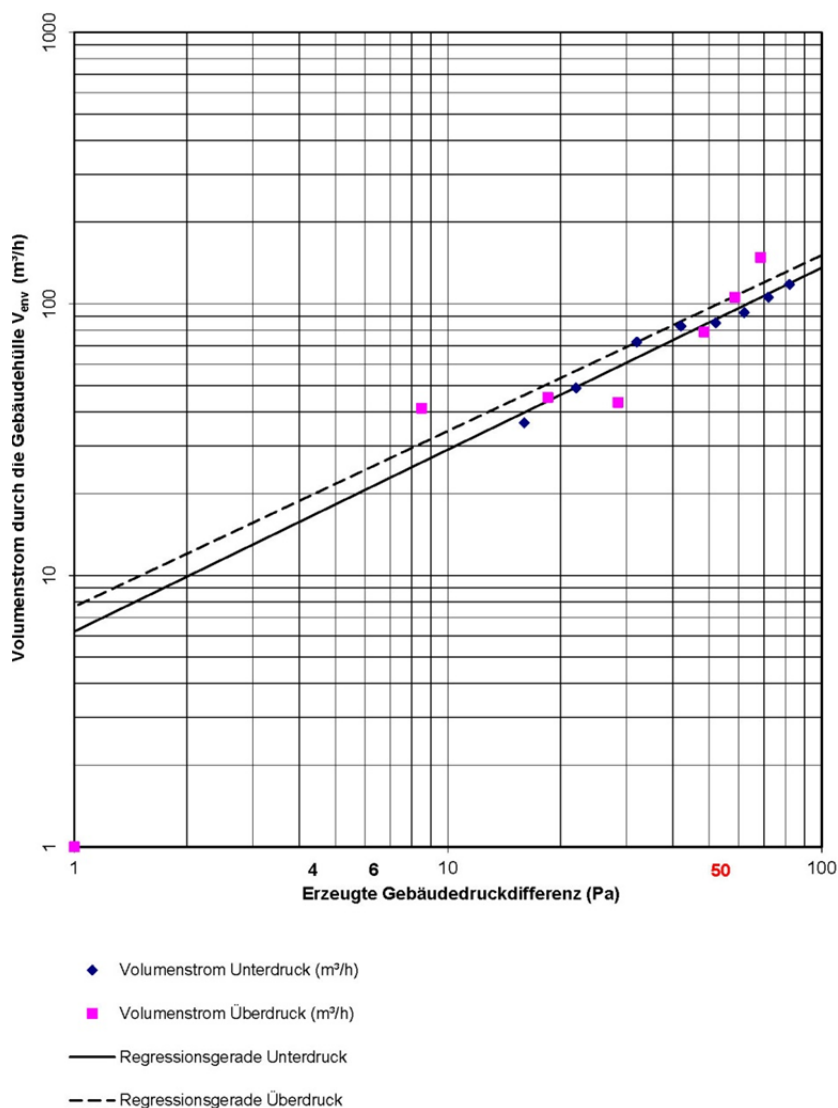


Abb. 32 : Leckagekurve der Messung Nr. 2 (doppeltlogarithmische Skala)

Einen weiteren Ausreißer stellt die Luftwechselzahl der Messung Nr. 34 dar. Mit einem n_{50} -Wert von $n_{50} = 1,09 \text{ h}^{-1}$ hebt sich dieser deutlich von den restlichen Messwerten ab. Die Ursache dafür liegt in der Lüftungsanlage der Tagestoilette im Erdgeschoss. Die sonst vorhandene Lüfterkappe, welche das Lüftungsgerät raumseitig abdeckt, wurde hier entfernt. In der Unterdruckmessung war an dieser Stelle ein vergleichsweise deutlich erhöhter Luftzug spürbar. Daher ist anzunehmen, dass aus diesem Grund auch ein erhöhter Volumenstrom gemessen wurde. Einerseits fehlte die Lüfterkappe und andererseits darf das Lüftungsgerät nicht komplett abgedichtet werden, darum konnte das Problem nicht unmittelbar behoben werden. Dieser Messwert sollte daher für die weitere statistische Auswertung nicht mit einbezogen werden und wird somit ausgeschlossen.

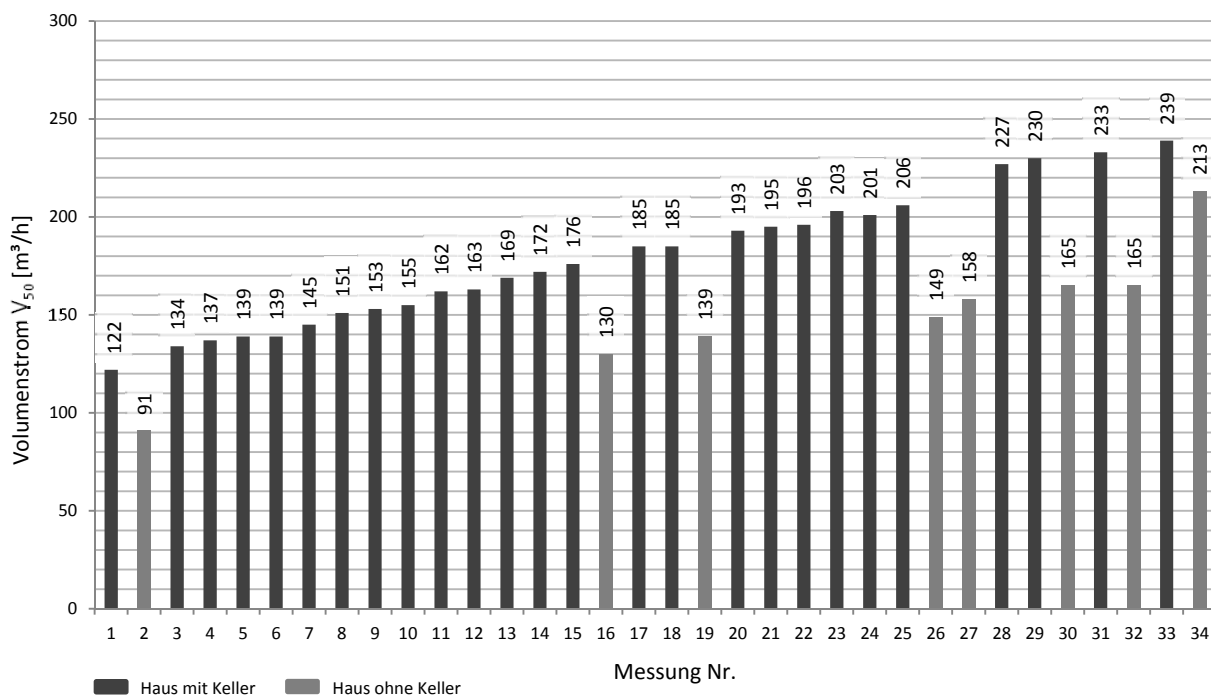
Da bei den gemessenen Gebäuden zwischen der Ausführung mit Keller und ohne Keller zu unterscheiden ist, ist eine Darstellung der gemessenen Volumenströme bei 50 Pa Druckdifferenz durchaus sinnvoll. Wird die Ordnung der Gebäude nach der Luftwechselzahl (n_{50} aufsteigend) beibehalten, so erkennt man, dass bei den Gebäuden mit Keller ein wesentlich höherer Volumenstrom gemessen wurde als bei jenen ohne Keller (siehe dazu Diagramm 6). Logisch betrachtet ist dieser wesentlich höhere Volumenstrom nicht lückenlos zu erklären. Die Hülle des Kellergeschosses weist in der Regel kaum bis keine Leckagen auf. Es stellte sich jedoch heraus, dass bei den meisten Testgebäuden mit Keller eine Leckage vorhanden ist, welche den deutlich höheren Volumenstrom begründet. Es handelt sich um die in Punkt 5.4 beschriebene Leckage a) am Abflussrohr, wodurch eine direkte Verbindung des Luftvolumens vom Keller und dem Installationsschacht, welcher zur Außenluft nicht luftdicht ausgeführt ist, besteht.

Da das Verhältnis von gemitteltem Volumenstrom der Gebäude ohne und mit Keller (Mittelwert V_{50} ohne Keller / Mittelwert V_{50} mit Keller) wesentlich größer als das Verhältnis deren Innenvolumen (Innenvolumen ohne Keller / Innenvolumen mit Keller) ist, ergab sich im Mittel für die Gebäude ohne Keller dennoch eine höhere Luftwechselzahl (siehe Diagramm 7).

An dieser Stelle wirft sich auch die Frage auf, aus welchem Grund bei den Gebäuden mit Keller dieser in die Messung mit einbezogen wurde. Es gibt dazu mehrere Gegebenheiten, die diese Entscheidung begründen sollen:

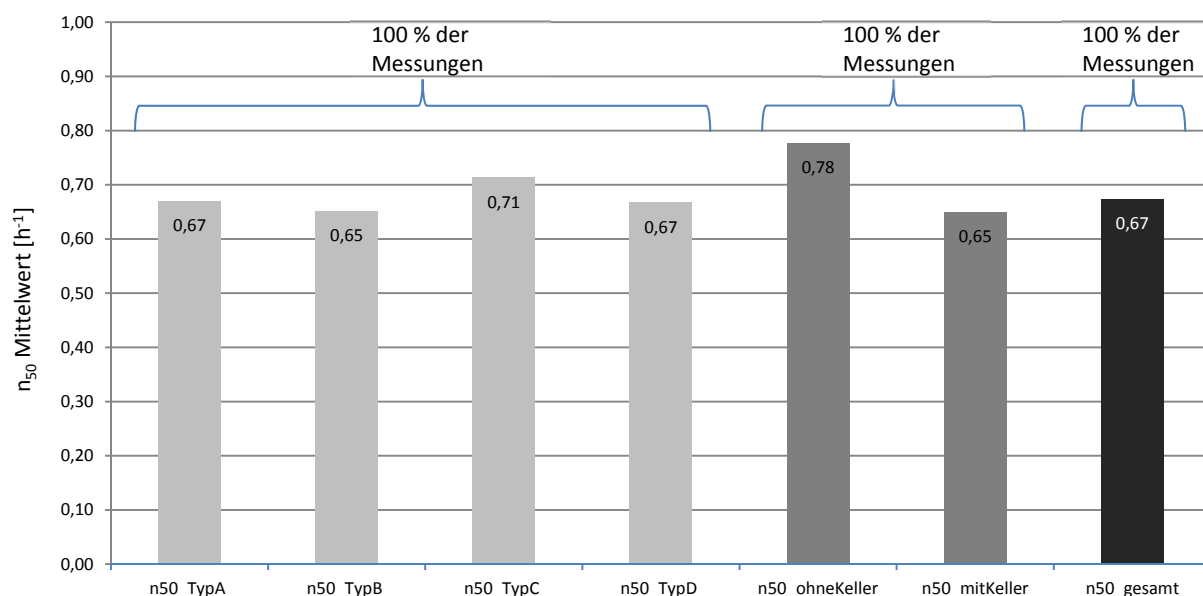
- Bei einigen der Gebäude mit Keller wird dieser mit beheizt, zählt demnach zum beheizten Innenvolumen und muss in die Messung mit einbezogen werden.
- Die Treppe in das Obergeschoss ist in den wenigstens Fällen als eine luftdichte Trennung von Raumvolumen des Kellers und der oberen Geschosse anzusehen. Den Keller nicht in die Luftdichtprüfung mit einzubeziehen ist daher schwierig.
- Da die Gebäude eine eher geringe Wohnfläche aufweisen, wird vielfach der Keller auch als Wohnraum genutzt (Spielraum, Arbeitsraum, Partyraum, usw.) und wird teilweise temporär beheizt. Somit zählt auch in diesem Fall der Keller zur bewohnten Fläche und muss in die Messung mit einbezogen werden.

Diagramm 6 : Berechneter Luftvolumenstrom aus den Messdaten bei 50 Pa mit Kennzeichnung des Gebäudetyps



Betrachtet man die Mittelwerte der einzelnen Gebäudetypen in Diagramm 7, unterscheiden sich diese nicht wesentlich. Dass der Mittelwert der Luftwechselzahl von Gebäudetyp C wertmäßig etwas höher ist, kann auf keinen ergründbaren Zusammenhang zurückgeführt werden. Es handelt sich vermutlich um eine zufällige Gegebenheit.

Diagramm 7 : Gemittelte Luftwechselzahl nach Gebäudetypen unter Ausschluss der ungültigen Messungen



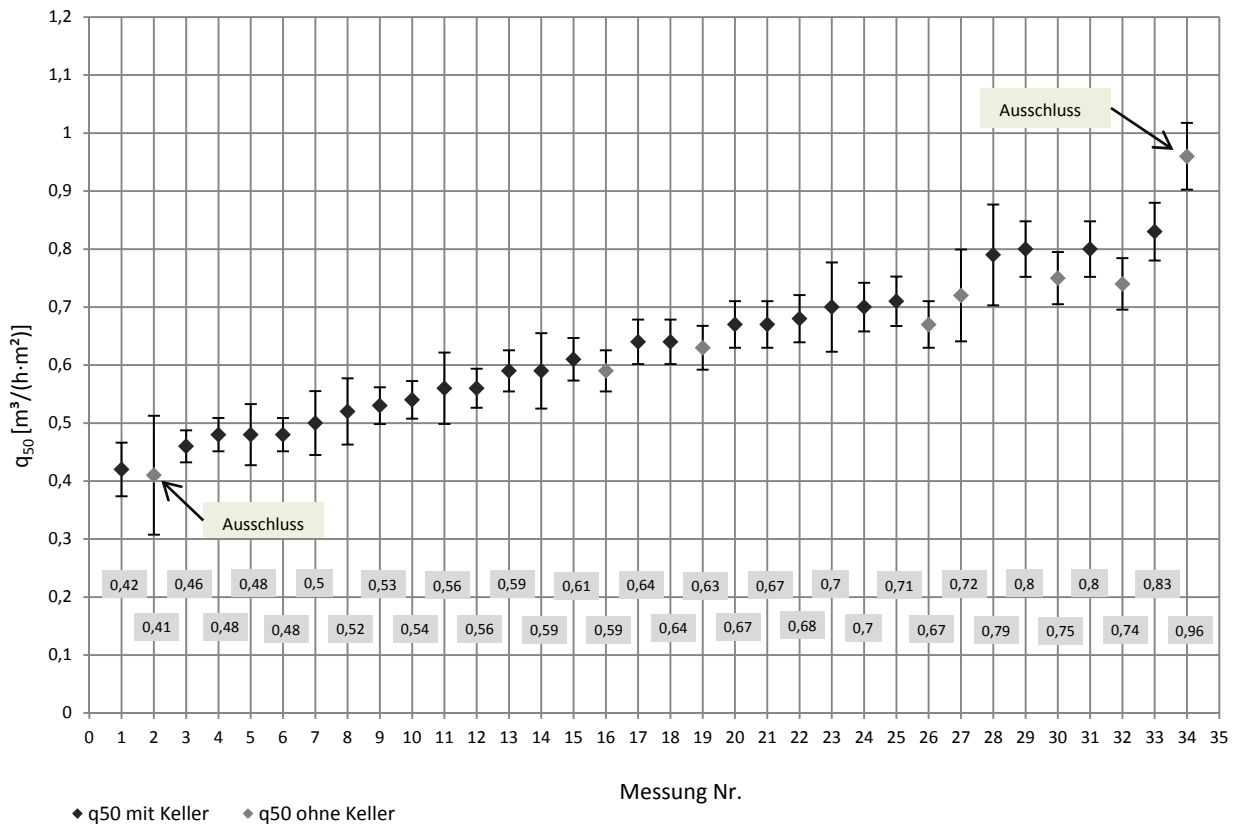
Aufgrund der Tatsache, dass die Luftwechselzahl (n_{50} -Wert) die Luftdichtheitseigenschaften eines Gebäudes nicht immer zur Gänze und ausreichend beschreibt, wurden zwei weitere Kenngrößen eingeführt. Zum einen ist dies die sogenannte Luftdurchlässigkeit q_{50} , welche das Verhältnis von Volumenstrom zur Hüllfläche des Gebäudes beschreibt, zum anderen der nettogrundflächenbezogene Leakagestrom w_{50} .

Hierbei gibt die Luftdurchlässigkeit Aufschluss über die Qualität der Gebäudehülle. Besonders bei sehr großen Gebäuden wie Industriegebäude oder Hallen wird eher die Luftdurchlässigkeit q_{50} zur Beschreibung der Luftdichtheit des Gebäudes herangezogen. Der Grund dafür liegt darin, dass die Luftwechselrate bei großen Gebäuden aufgrund des günstigen Verhältnisses von Oberfläche und Volumen meist sehr klein ausfällt. Deshalb wird bei Gebäuden mit einem Innenvolumen von mehr als 1500 m³ in Regel auch der auf die Hüllfläche bezogene Volumenstrom berechnet. Somit lässt die Angabe der Luftdurchlässigkeit auch bei derartigen Gebäuden eine ausreichende Beurteilung der Qualität der Luftdichten Hülle zu. [FLI12]

Der nettogrundflächenbezogene Leakagestrom hingegen wird eher selten angewandt. Die Angabe dieser Kenngröße gewinnt vor allem an Bedeutung, wenn die Raumhöhe deutlich von den standardmäßigen 2,60 Metern abweicht.

Das Diagramm 8 zeigt das Verhältnis von Volumenstrom zu Hüllfläche (q_{50} – Wert), wobei die Werte der Gebäude ohne Keller tendenziell kleiner wirken. Der Grund dafür liegt darin, dass das Verhältnis von Innenvolumen der Gebäude ohne und mit Keller (1 : 1,4) sowie das Verhältnis deren Hüllfläche (1 : 1,3) nicht identisch ist, die angegebenen Werte jedoch aufsteigend nach dem der Luftwechselzahl geordnet sind. Demnach ist dem geringeren Wert der Luftdurchlässigkeit q_{50} der Gebäude ohne Keller keine besondere Bedeutung zuzuschreiben, das Diagramm dient nur der Darstellung der ermittelten Luftdurchlässigkeit. Allgemein weisen jedoch die Gebäude ohne Keller eine durchschnittlich erhöhte Luftwechselrate (n_{50}) sowie eine erhöhte Luftdurchlässigkeit (q_{50}) auf. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Gebäude dieses Typs schlechter gebaut wurden, bzw. mehr Leckagen aufweisen, es liegt hauptsächlich in der Bezugnahme des Volumenstromes auf unterschiedliche geometrische Größen.

Diagramm 8 : Berechnete Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle aus den Messdaten bei 50 Pa mit Angabe der oberen und unteren Grenze laut Fehlerfortpflanzungsrechnung



6 Statistische Auswertung der gemessenen Luftwechselzahl

6.1 Allgemeines

Nach dem Sammeln der Daten, ist es notwendig, diese zusammenzufassen und zu beschreiben. Es handelt sich hierbei um die sogenannte beschreibende Statistik, die den ersten Teil dieses Kapitels umfasst. Erst wenn man die Eigenschaften einer Testreihe, wie etwa die Verteilung ihrer Daten, Mittelwert, Standardabweichung, usw., sowie die Randbedingungen in denen diese Eigenschaften auch als korrekt angenommen werden können kennt, ist es möglich verlässliche Wahrscheinlichkeitsmodelle zu entwickeln. Die sogenannte beurteilende Statistik hilft dabei, Schlussfolgerungen aus den gemessenen Daten zu ziehen. Ein bereits zu Beginn beschriebenes Ziel der Arbeit soll es sein, Wahrscheinlichkeitsmodelle zu finden, mit jenen man die Anzahl an erforderlichen Messungen ermittelt, sodass kein Gebäude aus der Grundgesamtheit einen angestrebten Grenzwert überschreitet. Für die gemessenen Daten lassen sich verschiedene Verteilungen ableiten, um die Luftwechselzahl der untersuchten Siedlung zu beschreiben. Ob diese Verteilungen auch allgemeine Gültigkeit aufweisen, folglich auch für andere Siedlungen die Luftwechselzahl gut beschreiben, soll einerseits durch Betrachtung von Referenzmessreihen diskutiert werden, andererseits muss diese Annahme durch weitere Messreihen in unterschiedlichen Siedlungen bestätigt werden.

6.2 Beschreibung und Beurteilung der Daten

6.2.1 Beschreibung der gemessenen Daten

Die unter diesem Punkt beschriebenen Daten, basieren auf die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Druckdifferenzmessungen. Vorgestellt wurden die Messdaten bereits in Kapitel 5.5 zur Auswertung der Messergebnisse. Nachdem zwei der insgesamt 34 Gebäude ausgeschlossen werden mussten, handelt es sich hier um die Ergebnisse der Messungen von 32 Gebäuden. Nun stellt sich für die weitere Bearbeitung der Daten die entscheidende Frage, wie mit den zwei unterschiedlichen Gebäudetypen (mit und ohne Keller) umgegangen werden soll. Es ist schwierig zu Beurteilen, ob alle Gebäude zusammen oder getrennt nach zwei Typen analysiert werden sollten. Die Gebäude entsprechen gleicher Bauweise, gleicher Außenwandfläche welche in direkter Verbindung zur Außenluft steht, trotzdem aber handelt es sich um Gebäude unterschiedlicher Art. Aufgrund der

Tatsache, dass die Messungen der Gebäude mit Keller und die Messungen der Gebäude ohne Keller offensichtlich nicht miteinander korrelieren, wird abschnittsweise auch eine getrennte Betrachtung der Daten vorgenommen. Dabei gehören 26 Gebäude zum Typ mit Keller und 6 Gebäude zum Typ ohne Keller.

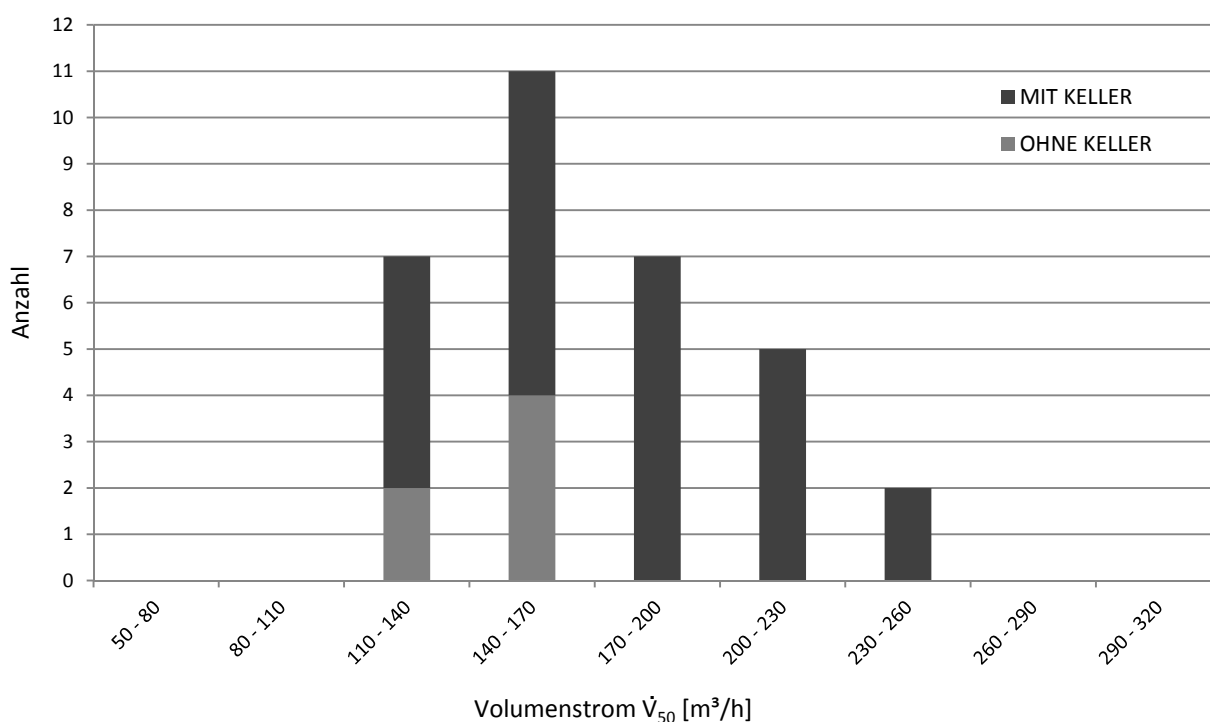
In der beschreibenden Statistik ist es meist üblich, verschiedene Kennzahlen, so genannte Lagemaße zu den Messdaten anzugeben. Dazu zählen der Mittelwert, der Median sowie der Modalwert. Um die Streubreite der Daten zu beschreiben benient man sich der Standardabweichung und der Varianz. Die Tabelle 12 zeigt dazu die wichtigsten Kenngrößen der Statistik der gemessenen Volumenströme sowie den daraus ermittelten Kennzahlen zur Luftdichtheit.

Tabelle 12 : Wesentliche Kennzahlen der Statistik (zusätzliche Differenzierung nach Gebäudetyp)

Kennzal Luftdichtheit	alle gemessenen Gebäude				Haus mit Keller				Haus ohne Keller			
	n ₅₀	q ₅₀	w ₅₀	V̇ ₅₀	n ₅₀	q ₅₀	w ₅₀	V̇ ₅₀	n ₅₀	q ₅₀	w ₅₀	V̇ ₅₀
Anzahl Gebäude	32	32	32	32	26	26	26	26	6	6	6	6
Mittelwert	0,67	0,63	1,45	172	0,65	0,61	1,38	177	0,78	0,68	1,73	151
Median	0,68	0,64	1,45	165	0,64	0,60	1,35	174	0,79	0,70	1,75	154
Modalwert	0,71	0,48	1,10	139	0,51	0,48	1,10	139	k.A.	k.A.	1,90	165
MIN	0,45	0,42	0,95	122	0,45	0,42	0,95	122	0,67	0,59	1,50	130
MAX	0,87	0,83	1,90	239	0,87	0,83	1,90	239	0,86	0,75	1,90	165
Standardabweichung	0,12	0,11	0,28	32	0,12	0,11	0,26	33	0,07	0,06	0,15	13
Varianz	0,01	0,01	0,08	1015	0,01	0,01	0,07	1080	0,00	0,00	0,02	172
25% - Quantil	0,57	0,54	1,20	148	0,55	0,52	1,20	152	0,72	0,64	1,20	142
75% - Quantil	0,75	0,70	1,63	195	0,74	0,70	1,58	200	0,84	0,74	1,88	163

Um die gemessenen Daten und die daraus berechneten Kenngrößen grafisch darzustellen, wird ein Häufigkeitsdiagramm erstellt. Das Diagramm 9 zeigt dabei die Häufigkeit gemessener Volumenströme, wobei die Werte der Gebäude mit Keller durch farbliche Kennzeichnung von jenen ohne Keller unterschieden werden. Die Klassenbreite beträgt hierbei 30 m³/h, wodurch sich fünf Klassen ergeben, um den gesamten Messbereich abzudecken. In der Regel sollen fünf bis zehn Klassen gebildet werden, da die Stichprobenanzahl mit 32 Gebäuden jedoch eher klein ist, sind mehr als fünf Klassen nicht sinnvoll. Die Intervallgrenzen sind so gewählt, dass möglichst gut eine Häufigkeitsverteilung erkennbar ist.

Diagramm 9: Histogramm zu den gemessenen Volumenströmen bei 50 Pa



Besonderes Augenmerk gilt der Luftwechselzahl, welche in der Praxis die meist maßgebende Kennzahl zur Beschreibung der Luftdichtheit eines Gebäudes darstellt. Besonders von Interesse ist dabei die Häufigkeitsverteilung. Das Diagramm 10 zeigt dazu die Häufigkeitsverteilung der Luftwechselzahl aller 32 Gebäude, mit Kennzeichnung der Gebäude mit Keller und ohne Keller. Vergleicht man die Häufigkeitsverteilung des Volumenstroms und der Luftwechselzahl, so sieht man auch hier wieder deutlich, dass sich die Luftwechselzahl der Gebäude ohne Keller in den oberen Bereich (zahlenmäßig größer) verschiebt. Dies spricht erneut dafür, die Luftwechselzahl der Gebäude mit und ohne Keller für die statistische Auswertung getrennt zu betrachten; dazu befindet sich im

Diagramm 11 die getrennte Darstellung der Häufigkeiten. Zudem wurden im Vergleich zu Diagramm 10 die Intervallgrenzen so verändert, dass eine Verteilung besser erkennbar ist. Die Klassenbreite beträgt nach wie vor $0,1 \text{ h}^{-1}$.

Diagramm 10 : Histogramm zur Luftwechselzahl n_{50}

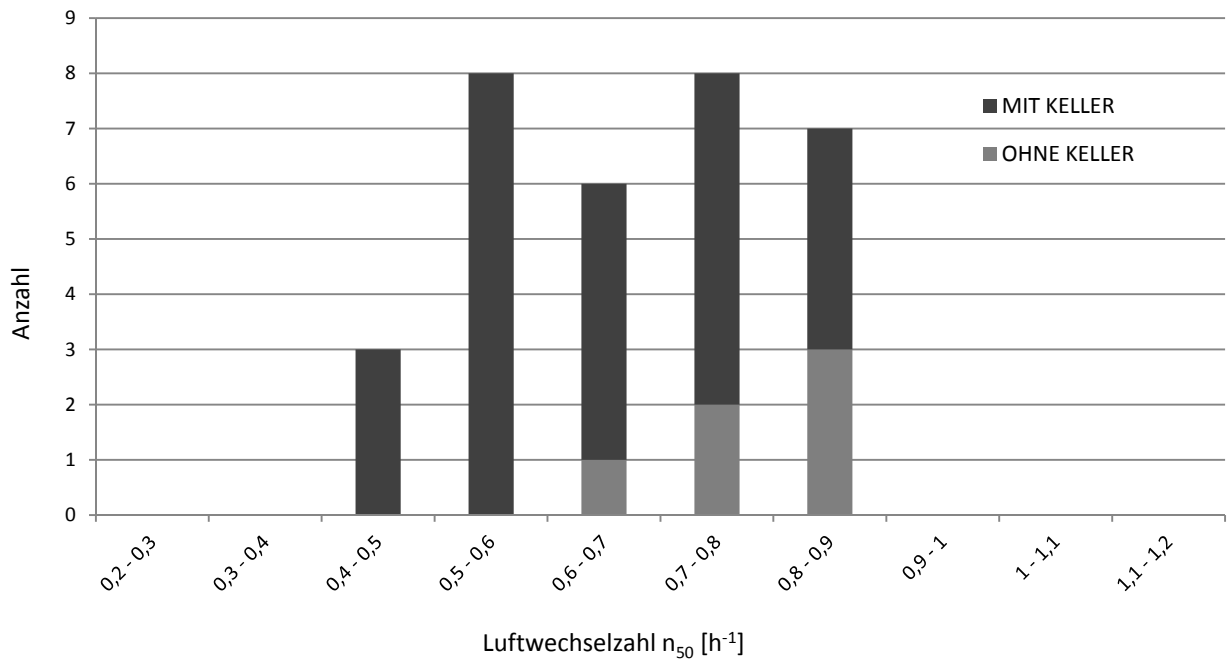
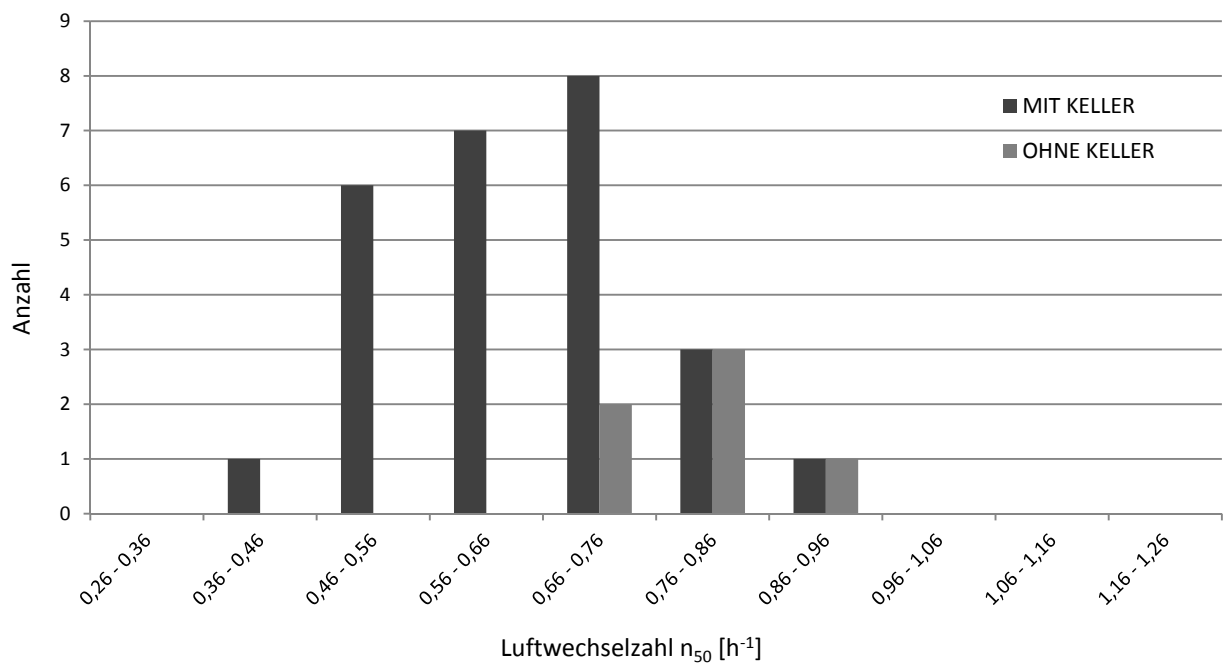
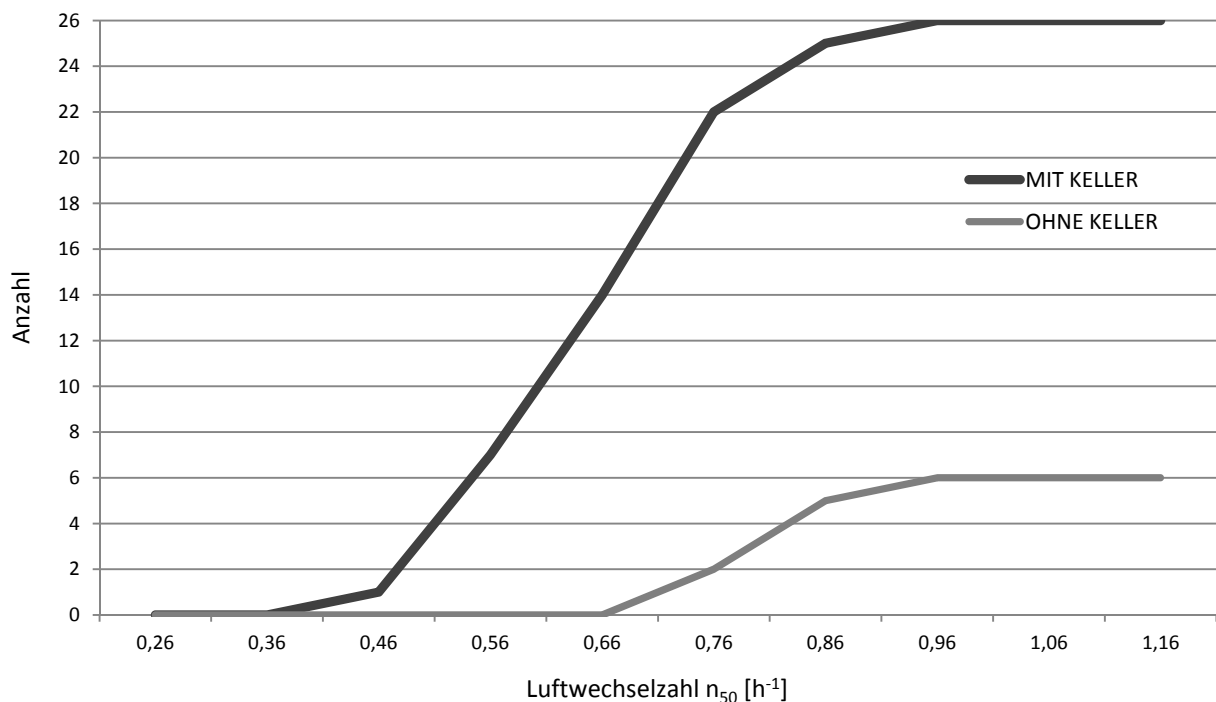


Diagramm 11 : Histogramm zur Luftwechselzahl n_{50} (getrennte Betrachtung nach Typ und modifizierte Intervallgrenzen)



Eine weitere Darstellungsmethode der Daten stellt ein kumulatives Häufigkeitsdiagramm, auch Summenkurve genannt, dar. Hierbei stellt die Anzahl von 26 die Gesamtheit der gemessenen Gebäude mit Keller, die Anzahl von 6 die Gesamtheit der gemessenen Gebäude ohne Keller dar. Die Klassenanzahl, sowie die Intervallgrenzen sind identisch zu Diagramm 11. Eine Summenkurve gibt vor allem Aufschluss darüber, wie viele der Daten unter bzw. über einem bestimmten Wert liegen. So kann beispielsweise abgelesen werden, dass der Großteil der Luftwechselzahlen der Gebäude mit Keller zwischen $0,46 \text{ h}^{-1}$ und $0,76 \text{ h}^{-1}$ liegen. Ist die Summenkurve flacher, bedeutet dies, dass die Luftwechselzahlen nur weniger Gebäude diesem Intervall zugeordnet sind und somit auch eine geringere Häufigkeit auftritt. Auch abgelesen werden kann, dass für 100 % der Gebäude, mit sowie ohne Keller, eine Luftwechselzahl kleiner $0,96 \text{ h}^{-1}$ ermittelt wurde, oder jeweils nur ein Gebäude über $0,86 \text{ h}^{-1}$ liegt. Da die Klassenbreite aufgrund der geringen Stichprobenanzahl jedoch eher groß gewählt werden musste, ($0,1 \text{ h}^{-1}$) können teilweise wichtige Informationen verloren gehen. Die Darstellung von Häufigkeiten nach Klassen ist zwar objektiv, kann unter Umständen jedoch zu einer Fehlinterpretation zur Verteilung der Daten verleiten. [SHE04]

Diagramm 12 : Summenkurve der Luftwechselzahl n_{50}



Zur Beschreibung der Symmetrie von gemessenen Daten ist ein Box-Plot meist hilfreich. Für die gemessenen Daten der 32 Gebäude ist ein Box-Plot des Volumenstroms (Abb. 33) sowie zum Vergleich jener für die Luftwechselzahl (Abb. 34) dargestellt. Im Box-Plot zum Volumenstrom ist deutlich sichtbar, dass der Großteil der Werte im unteren Bereich (näher zum Minimum) angesiedelt sind. Gleichzeitig deutet dies auch darauf hin, dass die Werte der beiden oberen Quartile eine größere Streuung aufweisen. Begründet werden kann diese Verteilung der Werte dadurch, dass bei jenen Gebäuden ohne Keller ein wesentlich geringerer Volumenstrom gemessen wurde und somit auch eine größere Anzahl an kleinen Werten auftritt. Durch die Bezugnahme des Volumenstromes auf die unterschiedlichen Innenvolumen der Gebäude mit und ohne Keller, verändert sich jedoch die Verteilung. Dies zeigt der Box-Plot der Abb. 34 zur Luftwechselzahl, wo die Werte dann relativ gleich verteilt sind. Dabei streuen die Daten jener Hälfte, die über dem Median liegen, etwas weniger als jene unter dem Median. Für die Werte des 1. Quartils (0-25 % der Werte) sowie jene über dem 3. Quartil (75-100 % der Werte) gilt in etwa die selbe Verteilung. Wäre die Anzahl von Werten der jeweiligen Quartilen gleich groß, würde es sich um eine Gleichverteilung (Uniformverteilung) handeln. Die Werte der Luftwechselzahl sind also nur annähernd gleichverteilt und es ist nicht genau erkenntbar welcher Verteilung diese unterliegen. Um statistische Wahrscheinlichkeitsberechnungen durchführen zu können, muss jedoch eine geeignete Verteilungsfunktion (wie zum Beispiel eine Normalverteilung) gefunden werden, welche mit geeigneter Software ermittelt werden kann. Auf diese Thematik wird nachfolgend unter Punkt 6.2.2 näher eingegangen.

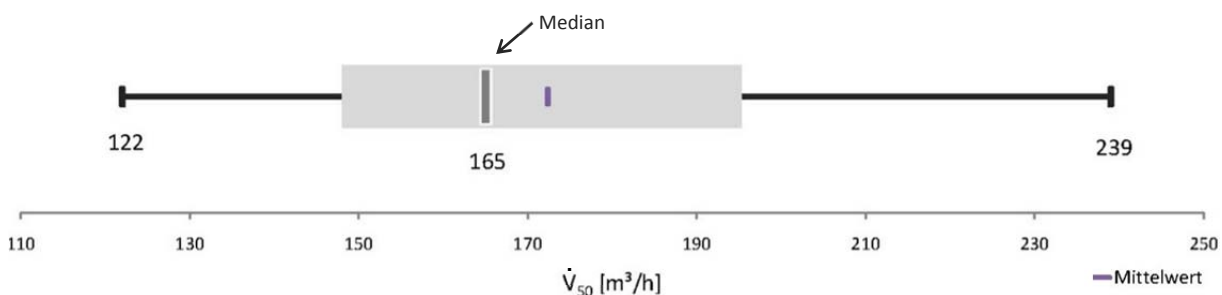


Abb. 33 : Box-Plot der gemessenen Volumenströme V_{50}

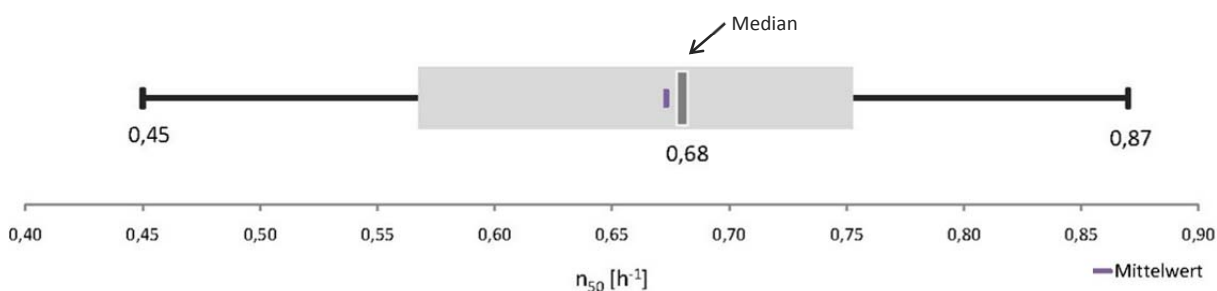


Abb. 34 : Box-Plot der Luftwechselzahl (n_{50} -Wert)

6.2.2 Verteilungsfunktionen zur Luftwechselzahl

Für die Berechnung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit in Bezug auf die Luftwechselzahl von Gebäuden gleichen Charakters, ist es notwendig, eine geeignete und typische Verteilung zur Beschreibung der Daten zu finden. An dieser Stelle wurde der Rat von Herrn Univ.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Frühwirth des Instituts für Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie der Technischen Universität Wien herangezogen. Die Empfehlung richtete sich dabei auf den Vergleich der drei folgenden Verteilungen, deren wesentliche Eigenschaften und mathematische Definition hier kurz beschrieben werden sollen:

- *Normalverteilung*: Es handelt sich hierbei um die am häufigsten verwendete Verteilungsfunktion stetiger Wahrscheinlichkeitsrechnung. Sie ist mathematisch relativ einfach und umfangreich beschrieben. Ihre Bedeutung beruht auf dem zentralen Grenzwertsatz, welcher besagt, dass eine Summe von n unabhängigen, identisch verteilten Zufallsvariablen mit endlicher Varianz im Grenzwert $n \rightarrow \infty$ normalverteilt ist. [MUR03] Die Normalverteilung oder oft auch Gauß'sche Glockenkurve genannt, ist bezüglich ihres Mittelwerts μ symmetrisch. Die Standardabweichung σ beschreibt dabei die Breite der Verteilung. [SHE06] Im ingenieurwissenschaftlichen Bereich lassen sich viele Messwerte mit der Normalverteilung gut beschreiben. So findet diese beispielsweise auch Anwendung in der Berechnung der Sicherheitsfaktoren in der Statik. Hier wird unter Einhaltung des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts die Versagenswahrscheinlichkeit unter Annahme normalverteilter Größen der Einwirkung und des Widerstands ermittelt.

- Dichtefunktion der Normalverteilung:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (17)$$

dabei ist:

μ Mittelwert

σ Standardabweichung

- *Lognormalverteilung* : Sie steht in enger Relation zur Normalverteilung. Ist X lognormalverteilt mit den Parametern μ und σ , so ist $\ln(X)$ normalverteilt mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ . Mit anderen Worten, beschreibt die Lognormalverteilung also die Verteilung einer Zufallsvariablen X , wenn $\ln(X)$ normalverteilt ist. Die Lognormalverteilung findet wie die

Gammaverteilung nur bei Daten mit positivem Träger Anwendung. Sie ist eine rechtsschiefe Verteilung und daher asymmetrisch. In der Praxis eignet sich die Lognormalverteilung zum Beispiel zur Beschreibung der Einkommensverteilung (viele Menschen verdienen wenig, nur wenige verdienen viel) oder Schadensmodellen von Versicherungen. Im Ingenieurbereich wird diese Verteilung gerne in der Wasserwirtschaft zur Ermittlung von Hochwasserrisiko, Niederschlagsmengen aber auch in der Statik im Bereich der Dauerhaftigkeit und Materialermüdung verwendet. [SCH01]

- Dichtefunktion der Lognormalverteilung:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(\ln(x)-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (18)$$

dabei ist:

μ Mittelwert von $\ln(x)$

σ Standardabweichung von $\ln(x)$

- *Gammaverteilung*: Diese Verteilung ist eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Menge der positiven reellen Zahlen. Ihre Eigenschaften sind bestimmt durch die zwei Parameter a und b , wobei sich die Dichte für große Werte von a immer mehr der Dichte der Normalverteilung annähert. [SHE06] In der Praxis findet man diese Verteilung oft bei Wartezeiten oder Reperaturzeiten. Im Ingenieurbereich werden augenblickliche Verkehrslasten und Straßenverkehrslasten als gammaverteilt angenommen. Ebenso dienen beispielsweise die Pearson-III-Verteilung aus der Familie der Gammaverteilungen für hochwasserstatistische Analysen. [ZIL02]

- Dichtefunktion der Gammaverteilung:

$$f(x) = \frac{1}{b^a \cdot \Gamma(a)} \cdot x^{a-1} \cdot e^{-\frac{x}{b}} \quad (19)$$

dabei ist:

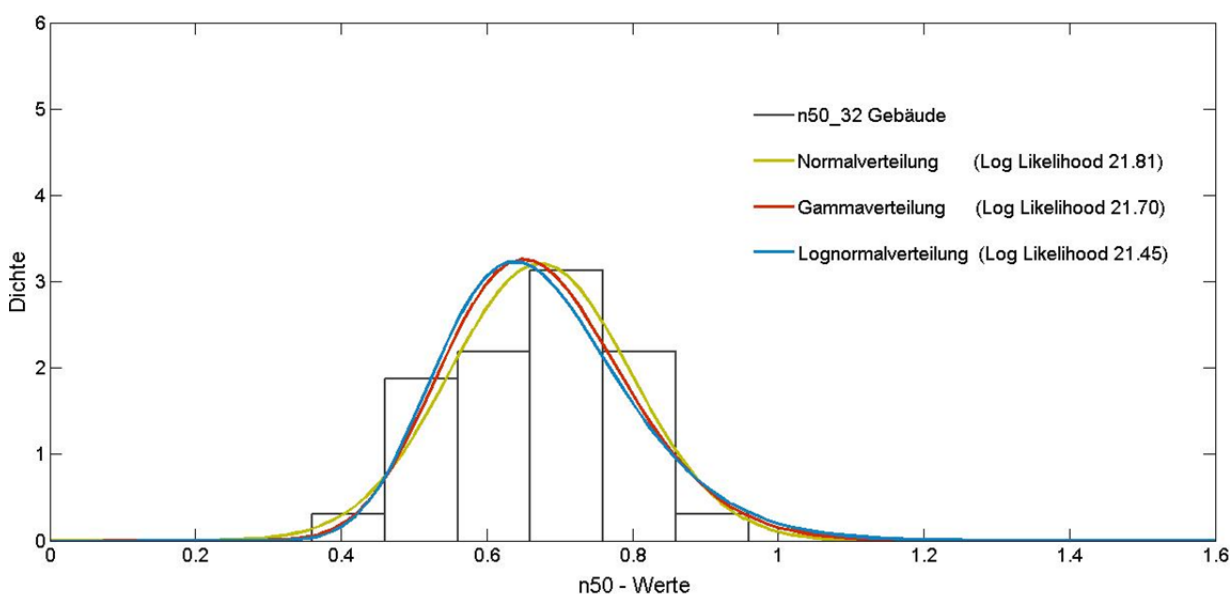
a Formparameter $a > 0$

b Skalenparameter $b > 0$

$\Gamma(a)$ Funktionswert der Gammafunktion

Um die hier vorgestellten Verteilungen für die gemessenen Daten zu berechnen, wurde das „Distribution Fitting Tool“ der Matlab-Software angewandt. Diese passt nicht nur verschiedene Verteilungen an die Daten an, sondern gibt auch deren Parameter sowie den Wert der Log-Likelihood-Funktion zurück. Dadurch ist es möglich, Aussagen über die Qualität der angepassten Verteilungen zu treffen. Diagramm 13 bis Diagramm 15 zeigen nun die angepassten Verteilungen. Dabei orientiert sich die Darstellung des Histogramms (Anzahl der Klassen, sowie Intervallgrenzen) an dem unter Punkt 6.2.1 vorgestellten Diagramm 11. Die Anpassung der Verteilungsfunktionen erfolgt dabei nur für die Luftwechselzahl n_{50} , da diese in der Praxis sowie in Richtlinien und Normen als die maßgebende Kennzahl zur Beschreibung der Luftdichtheit angewandt wird. Für jede der drei angepassten Verteilungen wird auch der Wert der Log-Likelihood-Funktion angegeben. Hierbei gilt: Umso größer der Wert ist, desto besser beschreibt die Dichtefunktion die Verteilung der zugrundeliegenden Werte.

Diagramm 13 : Verteilungsfunktionen für die Luftwechselzahl aller 32 gemessenen Gebäude



Im Diagramm 13 sind die Luftdichtheitswerte aller 32 Gebäude zusammengefasst. Laut dem angegebenen Wert der Log-Likelihood-Funktion ist hier die Normalverteilung als jene Verteilung mit der besten Anpassung anzusehen. Was zudem sofort auffällt, ist die geringe Abweichung der unterschiedlichen Verteilungsfunktionen. Alle drei liegen sehr nahe aneinander und unterscheiden sich kaum. Dasselbe gilt auch für Diagramm 14, wo die Schätzung der Gamma- und Lognormalverteilung sogar als gleich gut anzusehen ist. Aber auch hier ist die Normalverteilung als nur eine geringfügig schlechtere Anpassung anzusehen.

Diagramm 14 : Verteilungsfunktionen für die Luftwechselzahl der 26 Gebäude mit Keller

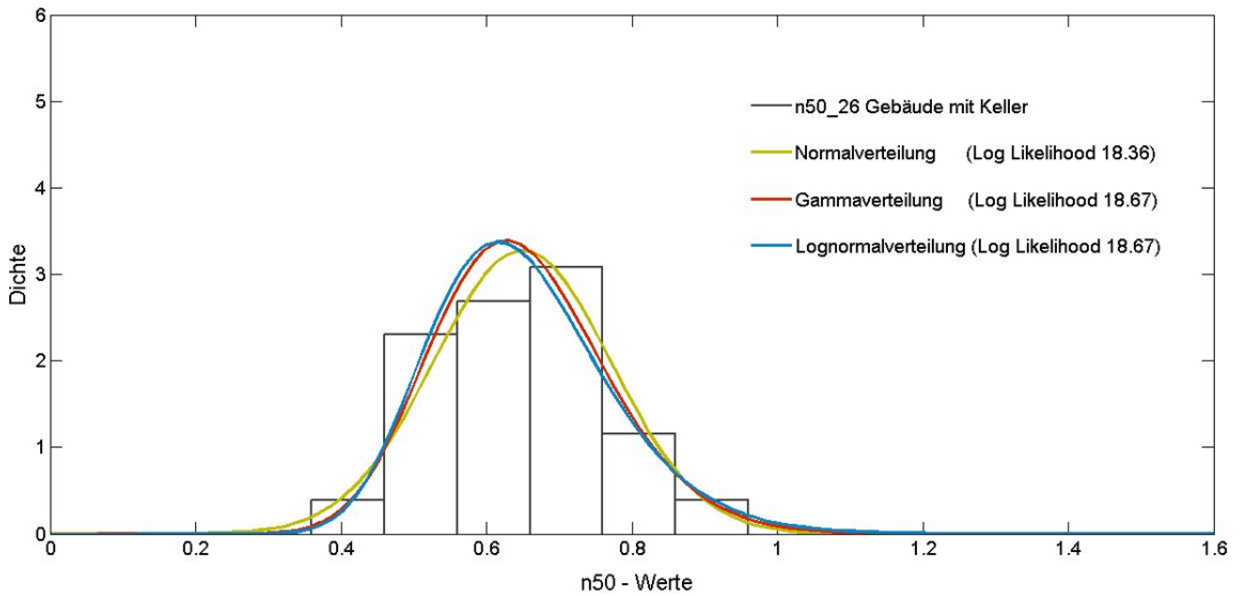
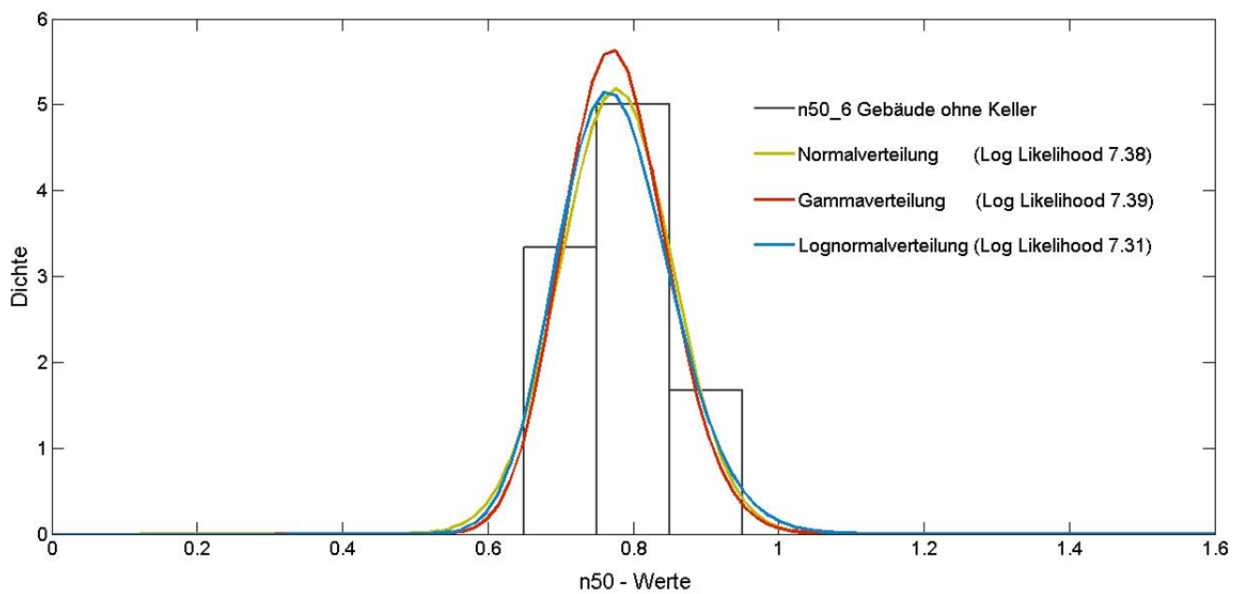


Diagramm 15 : Verteilungsfunktionen für die Luftwechselzahl der 6 Gebäude ohne Keller



Die in Diagramm 15 dargestellte Häufigkeitsverteilung bezieht sich auf die Gebäude ohne Keller. Da hier mit nur 6 Werten die Stichprobe sehr klein ist und somit nach den Regeln der Statistik keine ausreichende Grundlage zur Bestimmung der zugrundeliegenden Verteilung bietet, wird diesem Resultat keine größere Beachtung geschenkt. Trotzdem ist es interessant, dass sich auch bei kleinen Stichproben recht schnell eine gewisse Tendenz zu einer Verteilung ergibt. Versucht wurde dies auch mit 6 oder 8 zufällig gezogenen Stichproben von den Luftdichtheitswerten der Gebäude mit Keller, was meist ebenfalls eine recht gute Anpassung der Verteilungen ergab.

Um Wahrscheinlichkeiten berechnen zu können, bedarf es der aus der Verteilungs-Anpassung geschätzten Parameter der einzelnen Verteilungen. Diese sind der Tabelle 13 zu entnehmen.

Tabelle 13 : Ergebnisse der Anpassung von Verteilungen zur Luftwechselzahl

Normalverteilung

Grundlage	Mittelwert μ	Standardabweichung σ	Log-Likelihood
32 Gebäude	0,6731	0,1243	21,81
26 Gebäude mit Keller	0,6492	0,1218	18,36
6 Gebäude ohne Keller	0,7767	0,0769	7,38

Gammaverteilung

Grundlage	Parameter a	Parameter b	Log-Likelihood
32 Gebäude	29,3672	0,0229	21,7
26 Gebäude	29,5987	0,0219	18,67
6 Gebäude	120,1500	0,0065	7,39

Lognormalverteilung

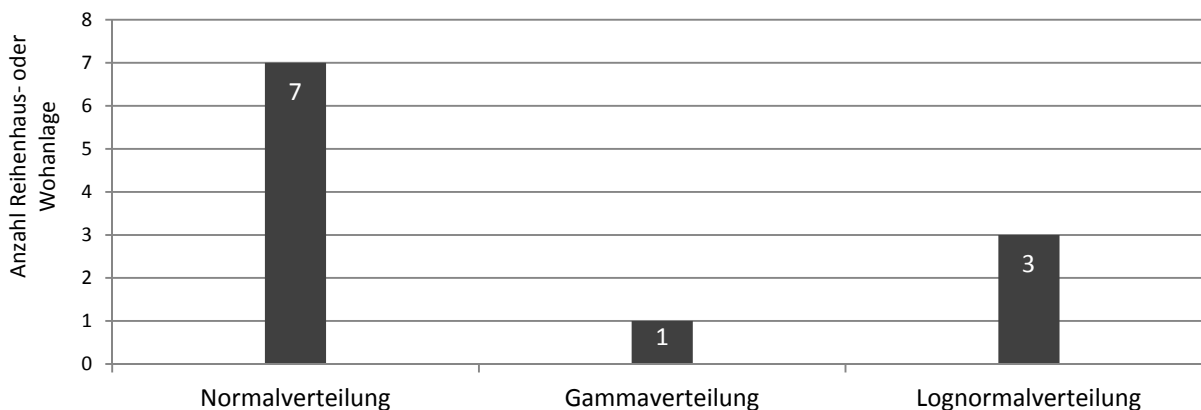
Grundlage	Mittelwert μ	Standardabweichung σ	Log-Likelihood
32 Gebäude	-0,4129	0,1899	21,47
26 Gebäude	-0,4489	0,1884	18,67
6 Gebäude	-0,2569	0,1005	7,31

Da es sich hier um nur eine Messreihe handelt, ist eine definitive Aussage zur Verteilungsfunktion nicht möglich. Daher sind unter folgendem Punkt 6.2.3 weitere Messreihen unterschiedlicher Reihenhuisanlagen und Wohnanlagen untersucht worden. Allein die Tatsache, dass bei der in dieser Arbeit untersuchten Siedlung unterschiedliche Verteilungen die jeweils beste Anpassung ergeben, kann durch keine Verteilung die Luftwechselzahl von Siedlungen eindeutig beschrieben werden. Jedoch ist durch jede der drei vorgestellten Verteilungen die Beschreibung dieser annähernd gut möglich ist.

6.2.3 Referenzdaten zur Verteilung von Luftdichtheitszahlen

Die in diesem Punkt ausgewerteten Luftwechselzahlen stammen aus Differenzdruckmessungen verschiedener Reihenhaus- und Wohnanlagen. Für die Luftwechselrate jener Anlagen, in welchen mehr als 8 Gebäude oder Wohneinheiten gemessen wurden, ist dazu eine Anpassung der in Punkt 6.2.2 vorgestellten Verteilungsfunktionen durchgeführt worden. Die Analyse dieser Referenzdaten dient dazu, eine geeignete Funktion zur Beschreibung der Verteilung von Luftdichtheitswerten (im Konkreten die Luftwechselrate n_{50}) zu finden. Da es sich um insgesamt acht Reihenhausanlagen und drei Wohnanlagen handelt, werden die jeweiligen Häufigkeitshistogramme sowie die Anpassung der Verteilungsfunktionen nicht einzeln dargestellt. Das Diagramm 16 zeigt die Häufigkeit jener Verteilung, die für die jeweilige Anlage die beste Anpassung (größter Wert der Log-Likelihood-Funktion) aufwies. Dabei geht die Normalverteilung als die deutlich am häufigsten herangezogene Verteilung hervor. Durch diese Tatsache wäre es durchaus begründet, die Luftdichtheitswerte bzw. die Luftwechselzahl von Siedlungen mit Gebäuden ähnlichen oder gleichen Charakters im Allgemeinen als normalverteilt anzunehmen. Wissenschaftlich betrachtet, muss man jedoch die Tatsache zur Kenntnis nehmen, dass keine Verteilung die Häufigkeitsverteilung der Luftwechselzahl eindeutig beschreibt. Dies ist nur dann möglich, wenn sich bei jeder Anlage die Häufigkeitsverteilung der Werte immer durch die selbe Verteilungsfunktion am besten beschreiben lässt. Daher handelt es sich bei der Annahme der Normalverteilung sowie auch der Gamma- und Lognormalverteilung nur um eine Näherung. Da die Luftwechselzahl nicht kleiner Null sein kann, wurden für die Modelle zur Wahrscheinlichkeitsberechnung die Gamma- und Lognormalverteilung herangezogen, da diese keine negativen Werte beinhalten.

Diagramm 16 : Häufigkeit angepasster Verteilungsfunktionen an die gemessenen Luftwechselzahlen von Messreihen in Reihenhaus- und Wohnanlagen



7 Berechnungsmodell zur Ermittlung der erforderlichen Stichprobengröße

7.1 Allgemeines

Die Fragestellung, welche durch das statistische Berechnungsmodell gelöst wird, ist die Ermittlung der erforderlichen Anzahl an Stichprobenwerten einer theoretisch unendlichen Grundgesamtheit von Gebäuden, um die Einhaltung eines vorgegebenen Grenzwertes der Luftwechselzahl sicherzustellen. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert aus der Grundgesamtheit den Grenzwert überschreitet auf ein Minimum reduziert. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit wird dazu mit 95 % festgelegt. Das Modell ist für unterschiedliche Grenzwerte sowie jede beliebige Wohnanlage oder Reihenhausanlage anwendbar, vorausgesetzt die Gebäude/Wohnungen sind in ihrer Bauweise ähnlich. Da jede Wohnanlage eine Verteilung mit unterschiedlichen Eigenschaften aufweist bzw. nur die Eigenschaften der Stichprobe bekannt sind, kann die Fragestellung nur durch simulative Verfahren gelöst werden. Daher werden im Berechnungsmodell mögliche Luftwechselzahlen simuliert und unter Verwendung des Bayes'schen Ansatzes, sowie unter Berücksichtigung der suffizienten Statistiken die Wahrscheinlichkeitsberechnung durchgeführt. Eine genauere Erklärung der statistischen Vorgehensweise erfolgt unter Punkt 7.3. Zur Lösung der Problemstellung wurde unter anderem die Expertise von Univ.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Frühwirth des Instituts für Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie der technischen Universität Wien in Anspruch genommen.

7.2 Einführung in die Anwendung des Modells

Die Anwendung des Berechnungsmodells muss für den Bauphysiker bzw. Luftdichtheitsprüfer möglichst einfach sein. Daher beschränkt sich der Output des Modells auf Grafiken, durch welche der Anwender ermitteln kann, ob die gemessene Stichprobe ausreichend groß ist, oder ob weitere Messungen erforderlich sind. Die Abb. 35 und Abb. 36 stellt dazu die ausgegebenen Grafiken der Berechnung am Beispiel der Stichprobengröße 6 für den Grenzwert 3 h^{-1} unter Annahme lognormalverteilter Luftwechselzahlen dar.

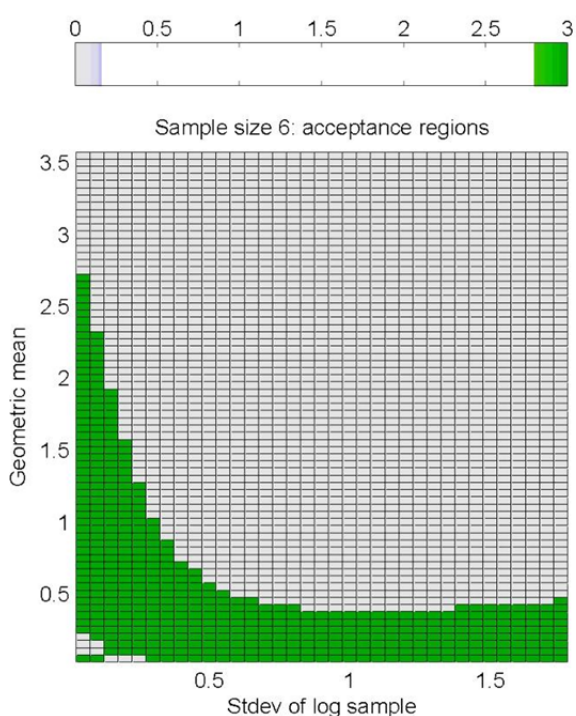


Abb. 35 : Beispiel des Akzeptanzbereichs für die Stichprobengröße 3 und den Grenzwert 3 h^{-1}

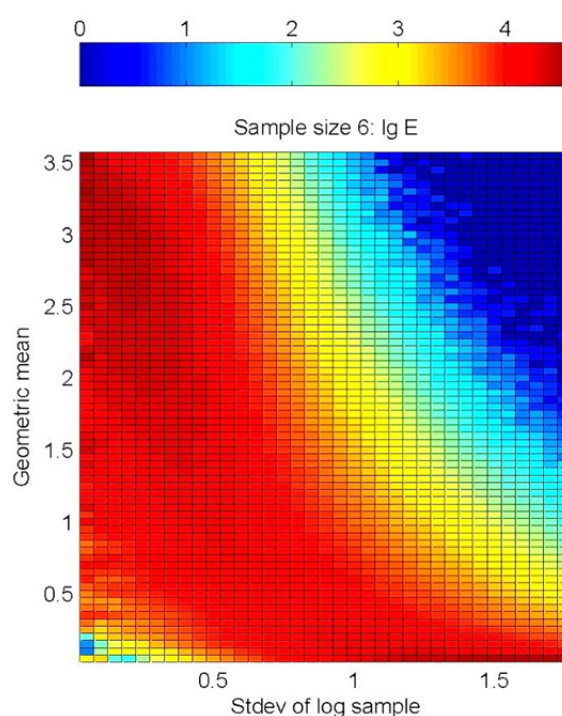


Abb. 36 : Beispiel der Auftrittshäufigkeit an simulierten Stichproben für die Stichprobengröße 3 und Grenzwert 3 h^{-1}

Die Abb. 35 zum Akzeptanzbereich zeigt die für den Anwender relevante Grafik, wobei die grün gekennzeichneten Felder („Bins“) jenen Bereich definieren, in dem die Entscheidung mit den Messungen aufzuhören akzeptiert wird. Dazu ermittelt der Anwender aus der gemessenen Stichprobe die Kenngrößen der beiden Skalen und sucht deren Schnittpunkt. Für jede Stichprobengröße und einzuhaltenden Grenzwert kann ein eigenes Diagramm simuliert werden. Liegt der Schnittpunkt im grauen Bereich, muss die Stichprobe um einen Messwert erweitert werden und wiederum der Schnittpunkt der beiden errechneten Kenngrößen dieser Stichprobe in der dafür vorgesehenen Grafik gesucht werden. Der Vorgang wird solange fortgesetzt, bis sich der Schnittpunkt im grünen Akzeptanzbereich des dazugehörigen Diagramms befindet.

Werden beispielsweise 6 Gebäude gemessen, wird aus den 6 Werten unter Annahme lognormalverteilter Werte das geometrische Mittel (μ_{geom}) sowie die Standardabweichung der logarithmierten Stichprobenwerte (σ_{log}) ermittelt. Unter Annahme gammaverteilter Werte setzen sich die beiden Kenngrößen aus dem geometrischen Mittel (μ_{geom}) und dem arithmetischen Mittel der Stichprobe zusammen. Die mathematischen Formeln zur Ermittlung dieser Kenngrößen lauten:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n (n_{50})_i / n \quad (20)$$

$$x_{log,i} = \ln(n_{50})_i \quad (21)$$

$$\bar{x}_{log} = \sum_{i=1}^n x_{log,i} / n \quad (22)$$

$$s_{log}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{log,i} - \bar{x}_{log})^2}{n - 1} \quad (23)$$

$$\sigma_{log} = \sqrt{s_{log}^2} \quad (24)$$

$$\mu_{geom} = e^{\bar{x}_{log}} \quad (25)$$

dabei ist:

\bar{x}	arithmetisches Mittel
n_{50}	ermittelte Lufwechselzahl bei 50 Pa Druckdifferenz
n	Stichprobengröße
s_{log}^2	Varianz der logarithmierten Stichprobe
σ_{log}	Standardabweichung der logarithmierten Stichprobe
μ_{geom}	geometrisches Mittel der Stichprobe

Hat man nun die beiden Kenngrößen ermittelt, werden diese in der jeweiligen Skala gesucht und miteinander verbunden. Liegt der Schnittpunkt der beiden Kenngrößen weit außerhalb des grünen Bereichs, ist es sehr unwahrscheinlich, dass die Einhaltung des Grenzwertes gewährleistet ist. In der Regel sind in diesem Fall in der Stichprobe bereits Werte über dem Grenzwert enthalten und die

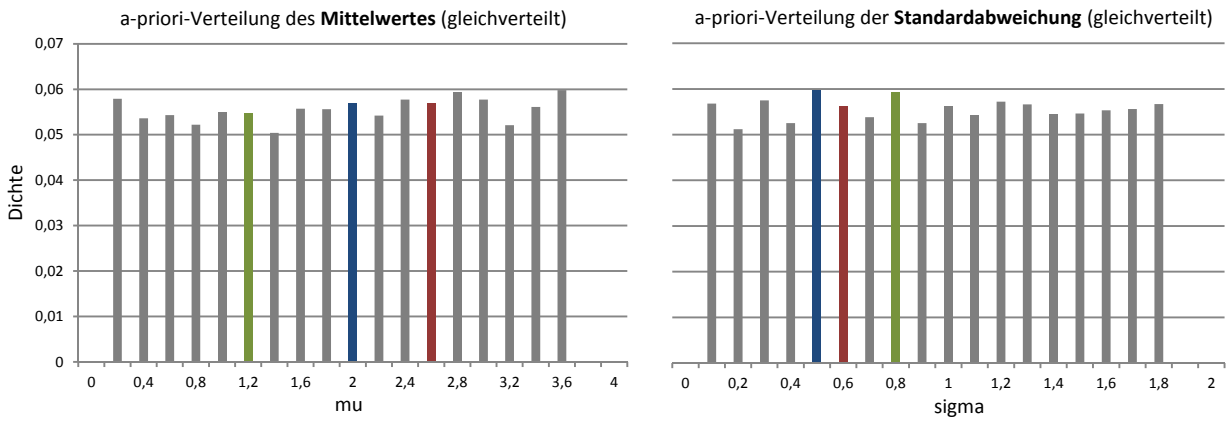
Gebäude haben die Anforderungen an die Luftdichtheit nicht erreicht. In diesem Fall ist die Luftdichtheit aller Gebäude der Siedlung zu verbessern und erst dann kann mit den Messungen neu begonnen werden bzw. ist es erforderlich alle Gebäude auf ihre Luftdichtheit zu überprüfen und bei all jenen die den Grenzwert überschreiten diese zu verbessern.

Das Diagramm der Abb. 36 zeigt die zum jeweiligen Schnittpunkt („Bin“) auftretende logarithmierte Häufigkeit an simulierten Stichproben; es hat vorwiegend informativen Charakter. Dadurch wird ersichtlich, wie verlässlich die Berechnung in dem jeweiligen „Bin“ ist. Wenn die Auftrittshäufigkeit hoch ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Berechnung des selben „Bins“ der „acceptance regions“ sehr genau ist. Bei geringer Auftrittshäufigkeit ist eine erhöhte Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung gegeben.

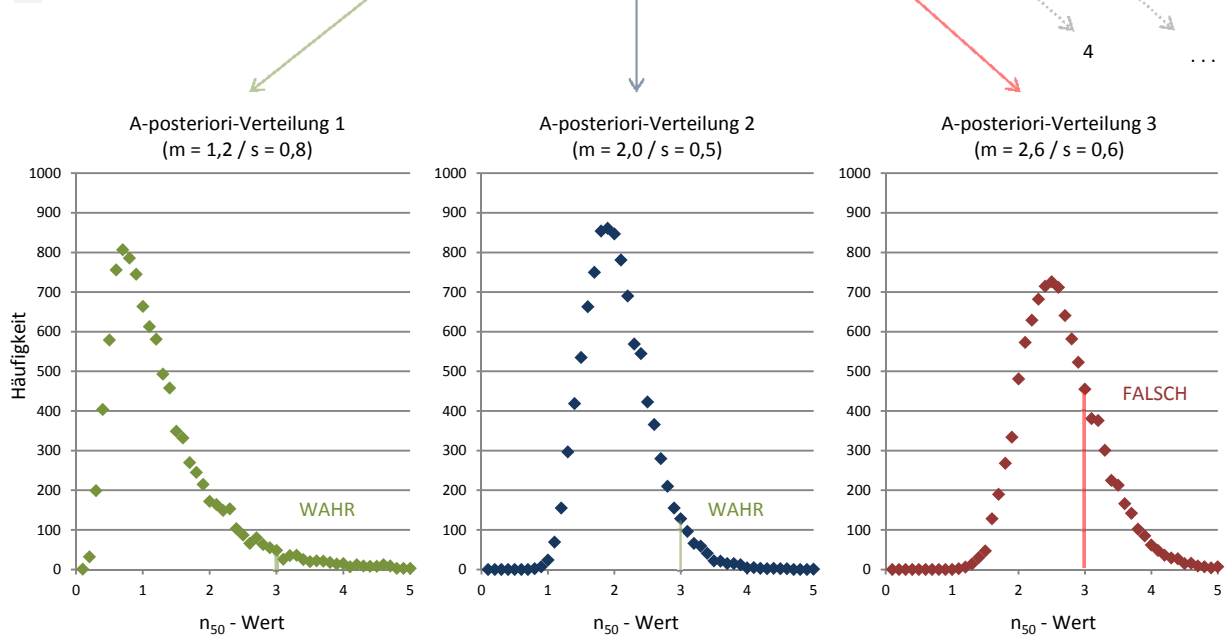
7.3 Statistische Vorgehensweise

Das in dem Berechnungsmodell verwendete statistische Verfahren basiert auf dem Bayes'schen Ansatz unter Berücksichtigung der suffizienten Statistiken. Durch diese Vorgehensweise wird ermöglicht, eine Vorhersage für ein Ereignis zu treffen, das mit einer bestimmten Sicherheit korrekt ist, wobei durch die Verwendung einer A-priori-Verteilung die Sicherheit der Vorhersage erhöht, bzw. das Risiko einer Fehlentscheidung minimiert wird. Aus den untersuchten Luftwechselzahlen verschiedener Wohnanlagen und Reihenhäuser konnte die Lognormal- bzw. alternativ die Gammaverteilung als geeignete Grundlage für das Berechnungsmodell festgestellt werden. Zum einen beinhalten die verwendeten Verteilungen keine negativen Werte, zum anderen erlauben diese Verteilungen möglichst viele Informationen der Stichprobe zu übernehmen. Um die statistische Vorgehensweise zu erläutern, wird diese grafisch dargestellt und in den folgenden fünf Schritten beschrieben:

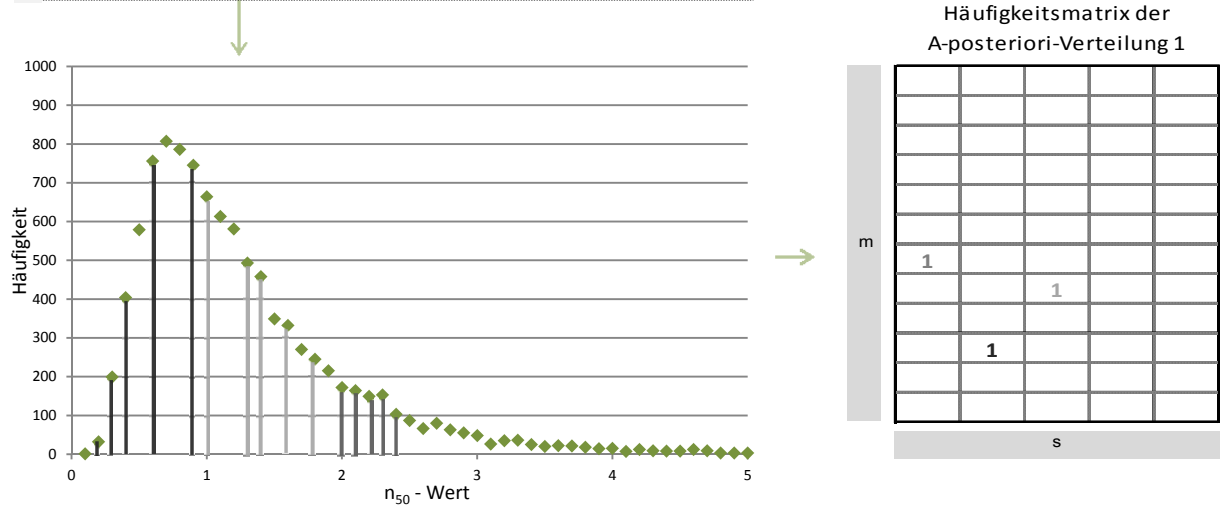
1 Festlegen der A-priori-Verteilungen



2 Ziehen von n_{draw} Wertepaaren aus den beiden A-priori-Verteilungen als Parameter der A-posteriori-Verteilungen. Berechnen der Unterschreitungswahrscheinlichkeit jeder A-posteriori-Verteilung (Wahr/Falsch)

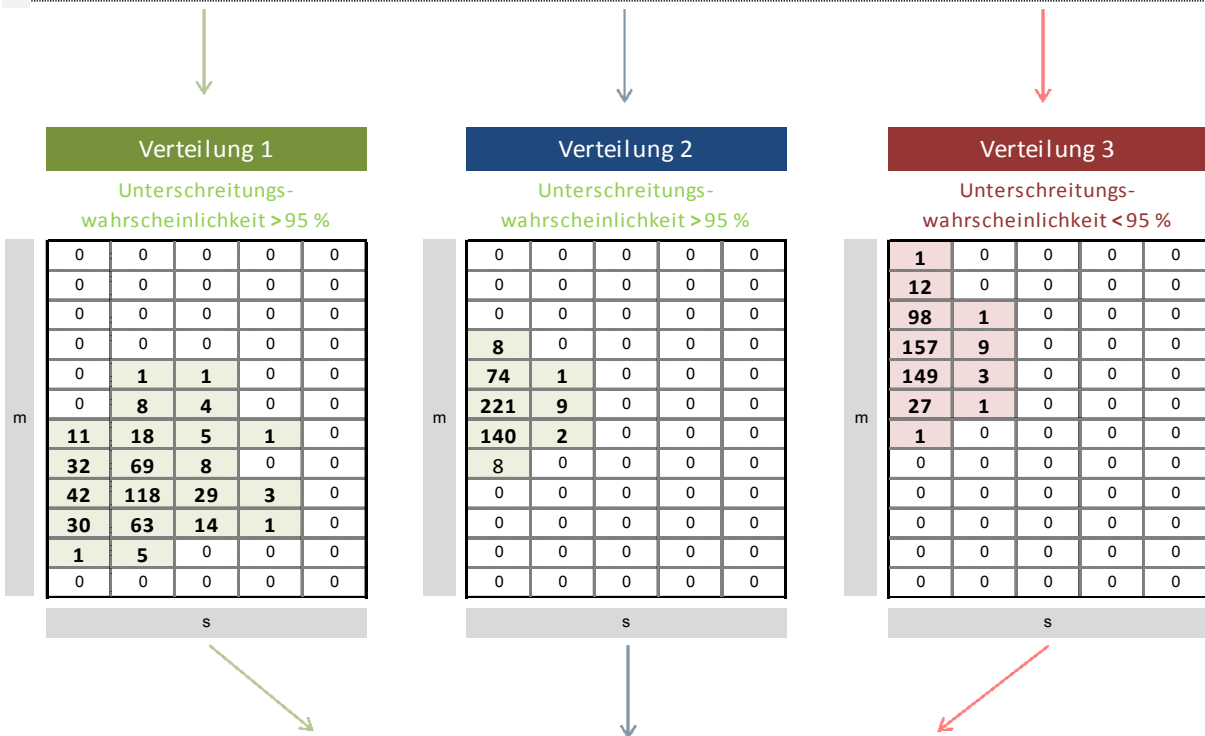


3 Ziehen von $n_{samples}$ Stichproben aus jeder A-posteriori-Verteilung und Berechnung deren Kenngrößen m und s



$m_1^1 \ s_1^1$ $m_2^1 \ s_2^1$ $m_3^1 \ s_3^1$...

4 Erstellen einer Zahlenmatrix für jede a-posteriori-Verteilung, welche die Information der Auftrittshäufigkeit der Kenngrößen aus den gezogenen Stichproben, sowie die der Unterschreitungswahrscheinlichkeit enthält.



5 Zusammenführen aller Zahlenmatrizen zu einem Histogramm und Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeit.

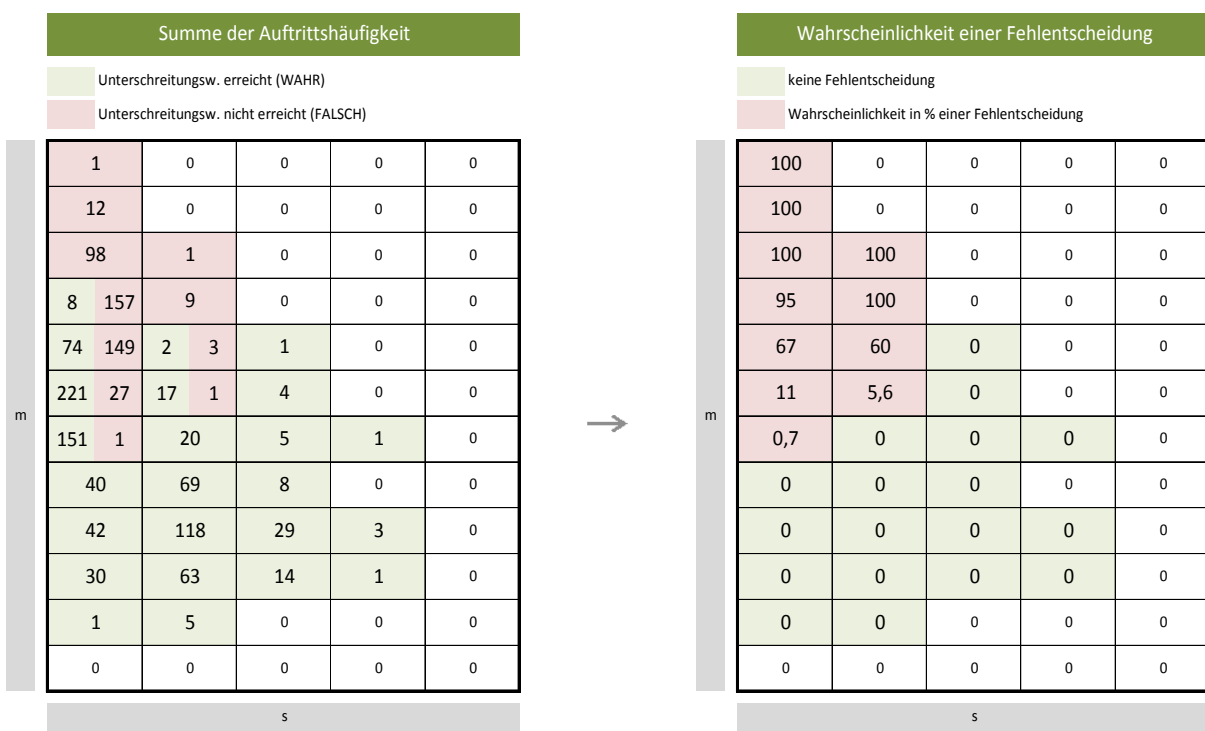


Abb. 37 : Grafische Erklärung der statistischen Vorgehensweise im Berechnungsmodell

Schritt 1: Dem Berechnungsprogramm wird eine sogenannte A-priori Verteilung für Mittelwert und Standardabweichung einer Stichprobe zugrundegelegt. Darunter ist zu verstehen, dass alle möglichen Werte des arithmetischen Mittels und der Standardabweichung von Stichproben, welche bei Messreihen zur Luftdichtheit auftreten können, mit einer bestimmten Auftrittswahrscheinlichkeit angegeben werden. Die Verteilung dieser beiden Parameter kann beispielsweise gleichverteilt sein, aber auch durch eine Verteilungsfunktion wie beispielsweise eine Gammaverteilung, Exponentialverteilung oder ähnliche Verteilungen beschrieben werden. Die A-priori-Verteilung kann aufgrund von Messungen ermittelt werden, sind diese jedoch unzureichend wird in der Regel versucht, die am besten geeignete Verteilung abzuschätzen.

Schritt 2: Hat man nun eine geeignete A-priori Verteilungen für den gewählten Grenzwert festgelegt, werden aus dieser eine große Anzahl ($n_{\text{draw}} > 10.000$ empfehlenswert) an Wertepaaren für Mittelwert und Standardabweichung gezogen. Für jedes Wertepaar wird nun eine lognormalverteilte bzw. alternativ eine gammaverteilte A-posteriori-Verteilung generiert. Für jede generierte A-posteriori-Verteilung wird die Unterschreitungswahrscheinlichkeit bzw. jener Anteil an Werten ermittelt, welcher unter dem Grenzwert liegt. Entspricht dieser Anteil mehr als 95 Prozent, wird diese Verteilung als gut deklariert (WAHR). Im umgekehrten Fall ist die Unterschreitungswahrscheinlichkeit nicht ausreichend (FALSCH). Für die weitere Berechnung wird der Vertrauensbereich (WAHR oder FALSCH) jeder A-posteriori-Verteilung gespeichert.

Schritt 3: Aus jeder generierten A-posteriori-Verteilung werden nun eine bestimmte Anzahl (z.B. $n_{\text{samples}}=2500$) an Stichproben der Größe n gezogen. Fasst man alle gezogenen Werte aller Stichproben zusammen, entspricht deren Verteilung der A-posteriori-Verteilung. Aus jeder gezogenen Stichprobe werden zwei Kenngrößen (m und s) ermittelt, welche das geometrische Mittel sowie die Standardabweichung der logarithmierten Stichprobe bei Annahme einer lognormalverteilten A-posteriori-Verteilung sind; wird mit gammaverteilten Werten simuliert, wird das geometrische und das arithmetische Mittel der Stichprobe berechnet.

Schritt 4: Die Auftrittshäufigkeit der berechneten Kenngrößenkombinationen von m und s der gezogenen Stichproben werden in einer Zahlenmatrix gespeichert. Das bedeutet: Für jede A-posteriori-Verteilung existiert eine Zahlenmatrix, welche die Information der Unterschreitungswahrscheinlichkeit, sowie die Häufigkeit der berechneten Kenngrößen aus den gezogenen Stichproben der A-posteriori-Verteilung enthält.

Schritt 5: Das Histogramm der „acceptance regions“ kann erstellt werden, wenn die Informationen der Zahlenmatrizen jeder A-posteriori-Verteilung in eine Matrix zusammengefasst wurden. Jeder „Bin“ dieser Matrix enthält die Häufigkeit aller simulierten Stichproben mit einem wahren Wert der Unterschreitungswahrscheinlichkeit, sowie die Häufigkeit aller Stichproben mit falschem Wert der Unterschreitungswahrscheinlichkeit. Bevor ein „Bin“ als akzeptiert (grün) oder nicht akzeptiert (grau) deklariert wird, wird die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung in dem jeweiligen „Bin“ berechnet. Dazu wird einerseits die allgemeine Anzahl an Einträgen überprüft, andererseits das Verhältnis von wahren und falschen Einträgen bestimmt. Sind in einem „Bin“ zu viele „falsche“ Einträge, wird dieser nicht akzeptiert.

7.4 Untersuchung variabler Parameter der Berechnung

In den folgenden Punkten wird eine genauere Betrachtung der variablen Eingangsgrößen der Berechnung vorgenommen, durch welche das Ergebnis der Simulation beeinflusst werden kann. Darunter ist vor allem der Toleranz von Fehlentscheidungen im Grenzbereich des Akzeptanzbereichs größere Bedeutung zuzusprechen. Weiters haben die Eigenschaften der A-priori-Verteilung Auswirkungen auf das Ergebnis, worauf unter Punkt 7.4.1 näher eingegangen wird. Allgemein ist es notwendig, die variablen Parameter durch weitere Versuchsreihen weiter zu definieren und für die Aufnahme der Thematik in der Norm für Luftdichtheitsmessung ÖNORM EN 13829 [ONO01] in Fachkreisen ausführlich zu diskutieren.

7.4.1 Wahl der A-priori Verteilung

Welche Eigenschaften die A-priori-Verteilungen tatsächlich besitzt, ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht genau feststellbar. Die Erkenntnisse aus den Messungen von nur wenigen Siedlungen reichen nicht aus, um endgültige Aussagen über die generelle Verteilung des Mittelwertes und der Standardabweichung von Messreihen in unterschiedlichen Siedlungen treffen zu können. Es ist davon auszugehen, dass diese je nach Bauart (Holzbauweise, Massivbauweise, usw.), je nach Region (Qualitätsstandards, Klimatische Bedingungen, ...), Anforderungen der Bauherren oder anderen Einflussfaktoren unterschiedlich sind. Außerdem muss für den jeweils gewählten Grenzwert auch eine dementsprechend geeignete a-priori Verteilungen zugrundeliegt werden. Es bedarf somit noch

weiterführender Messreihen, um verlässliche Aussagen zu den A-priori-Verteilungen treffen zu können. Die folgenden Abbildungen (Abb. 38 und Abb. 39) zeigen den Vergleich der Ergebnisse unter Annahme von gleich- und gammaverteilter A-priori-Verteilungen für die Stichprobengröße 4 bei einem Grenzwert 3 h^{-1} .

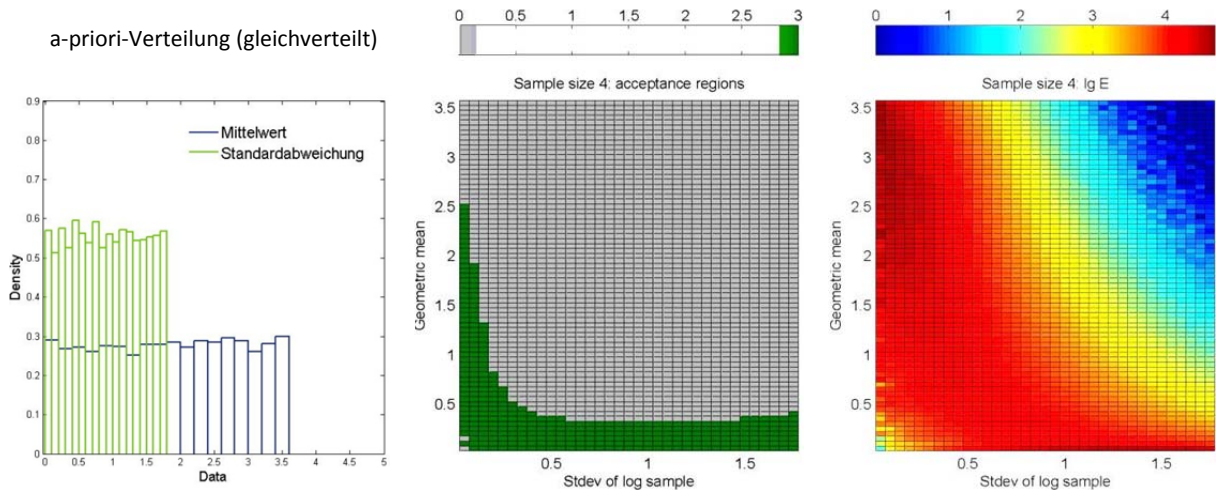


Abb. 38 : Ergebnis der Berechnung unter Annahme einer **gleichverteilten** A-priori-Verteilung für die Stichprobengröße 4 und den Grenzwert 3 h^{-1}

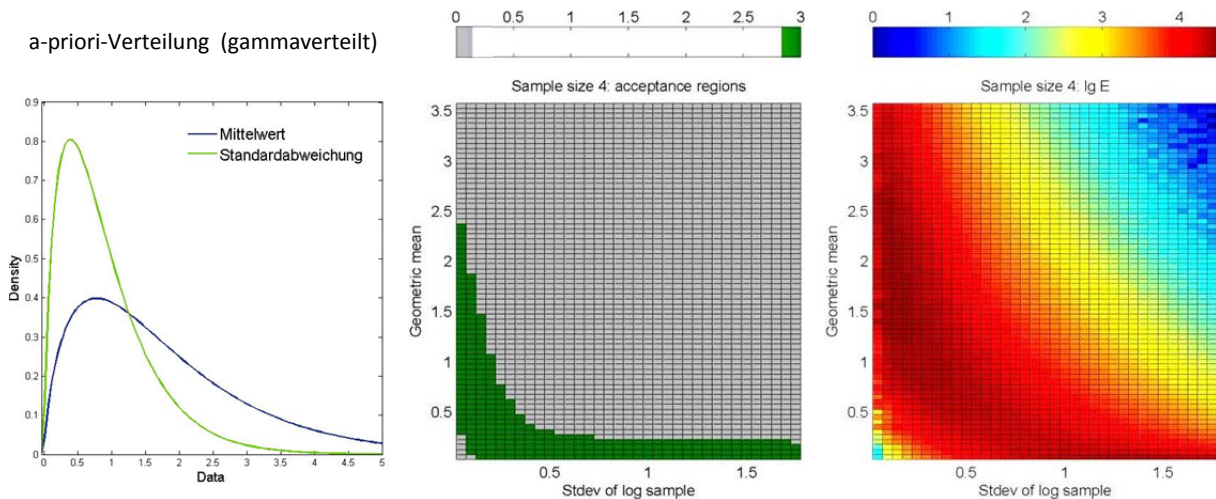


Abb. 39 : Ergebnis der Berechnung unter Annahme einer **gammaverteilten** A-priori-Verteilung für die Stichprobengröße 4 und den Grenzwert 3 h^{-1}

Für die in der Arbeit durchgeführten Berechnung wurde eine Gleichverteilung gewählt, mit dem Vorteil, dass jede beliebige Kombination von Mittelwert und Standardabweichung der Stichprobe in gleichem Maße berücksichtigt werden kann, das Ergebnis jedoch vor allem in den Grenzbereichen

(großer Mittelwert, große Standardabweichung) mehr Akzeptanz aufweist. Die Bereiche der in dieser Arbeit verwendeten Gleichverteilungen liegen dabei für den Mittelwert zwischen Null und einer oberen Grenze, je nach vorgegebenem Grenzwert (z.B. 20 Prozent über dem Grenzwert), für die Standardabweichung liegen die Grenzen ebenfalls zwischen Null und einer oberen Grenze je nach Grenzwert (z.B. Grenzwert $\cdot 1,2 \cdot 0,5$).

7.4.2 Verteilung der A-posteriori-Verteilung

Alternativ zur Annahme lognormalverteilter Luftwechselzahlen (A-posteriori-Verteilung) kann die Simulation unter Annahme gammaverteilter Werte durchgeführt werden. Da die Gammaverteilung die Verteilung der Luftwechselzahl der betrachteten Messreihen jedoch nicht ausreichend gut beschreibt, hat diese Variante mehr informativen Charakter. In der nachfolgenden Abb. 40 ist ein Beispiel für das Ergebnis der Berechnung für die Stichprobengröße 6, unter Annahme gammaverteilter Luftwechselzahlen dargestellt. Vergleicht man diese mit der in Punkt 7.2 dargestellten Abb. 35 welche das Ergebnis unter Annahme lognormalverteilter Werte (restlichen Parameter identisch) darstellt, ist erkennbar, dass in dieser Darstellung die Anzahl der akzeptierten „Bins“ wesentlich größer ist. Dies bedeutet nicht, dass bei lognormalverteilten Werten mehr akzeptiert wird, sondern durch die jeweilige verwendete Kenngröße (Standardabweichung der logarithmierten Stichprobe bei Lognormalverteilung, arithmetisches Mittel bei Gammaverteilung) unterschiedliche Informationen der Stichprobe herangezogen werden. Dadurch ist es unter Annahme gammaverteilter Werte schwieriger eine richtige Aussage über die Akzeptanz zu treffen, was in weiterer Folge bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung wesentlich größer ist.

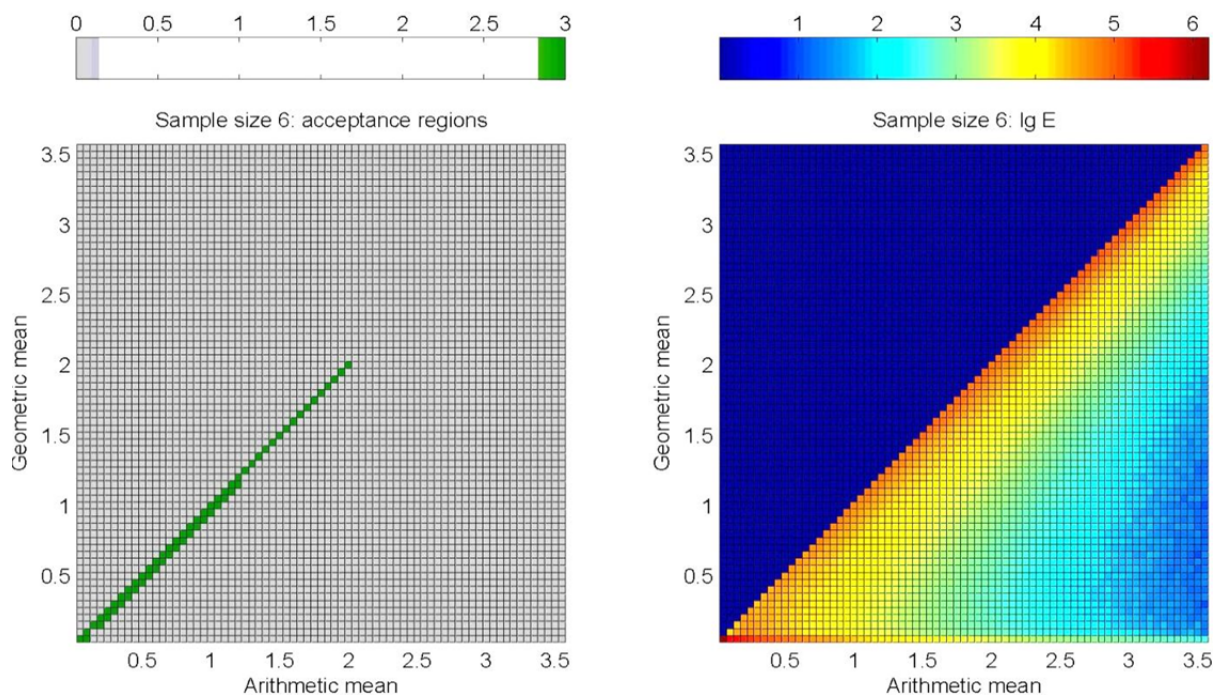


Abb. 40 : Ergebnis der Berechnung unter Annahme einer gammaverteilten A-posteriori-Verteilung für die Stichprobengröße 6 und den Grenzwert 3 h^{-1}

7.4.3 Toleranzgrenzen für Fehlentscheidungen

In den „Bins“ des Histogramms der „acceptance regions“ sind eine bestimmte Anzahl von Einträgen mit einem wahren und falschem Wert der Unterschreitungswahrscheinlichkeit vorhanden. Daher sind in jedem „Bin“ drei Entscheidungen bzw. Fehler möglich:

- kein Fehler: Die Entscheidung ist korrekt, die laut Diagramm getroffen wurde.
- Fehler 1. Art: Laut Diagramm befindet man sich im zulässigen Bereich (grün) und es sind daher keine zusätzlichen Messungen erforderlich. Tatsächlich aber handelt es sich um eine Fehlentscheidung da die Bedingungen (Grenzwert, Unterschreitungswahrscheinlichkeit) eigentlich nicht eingehalten sind.
- Fehler 2. Art: Dieser Fehler stellt den umgekehrten Fall von Fehler 1. Art. der Schnittpunkt der Kenngrößen befindet sich im Diagramm im ungültigen Bereich (grau), obwohl die geforderten Bedingungen erfüllt sind.

Es gilt daher, die möglichen Fehler zu untersuchen und zu begrenzen. Da der Fehler 1. Art als der schlechtere Fall anzusehen ist, muss dieser näher betrachtet werden. Dies bedeutet, die Anzahl an falschen Einträgen dürfen im Verhältnis zu den wahren Einträgen nur einen bestimmten Anteil betragen. Wird dieser Anteil begrenzt, erhöht sich hingegen die Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler 2. Art eintritt. Durch diese Analyse kann sichergestellt werden, dass in jedem „Bin“ die Wahrscheinlichkeit auf ein Minimum reduziert wird, dass aufgrund der Informationen aus einer gemessenen Stichprobe ein Gebäude den Grenzwert überschreitet. In den folgenden Abbildungen (Abb. 41 und Abb. 42) ist dazu ein Vergleich der Ergebnisse dargestellt, wo in der Berechnung die Wahrscheinlichkeit des Fehlers 1. Art auf 2, 5 und 10 Prozent begrenzt wurde.

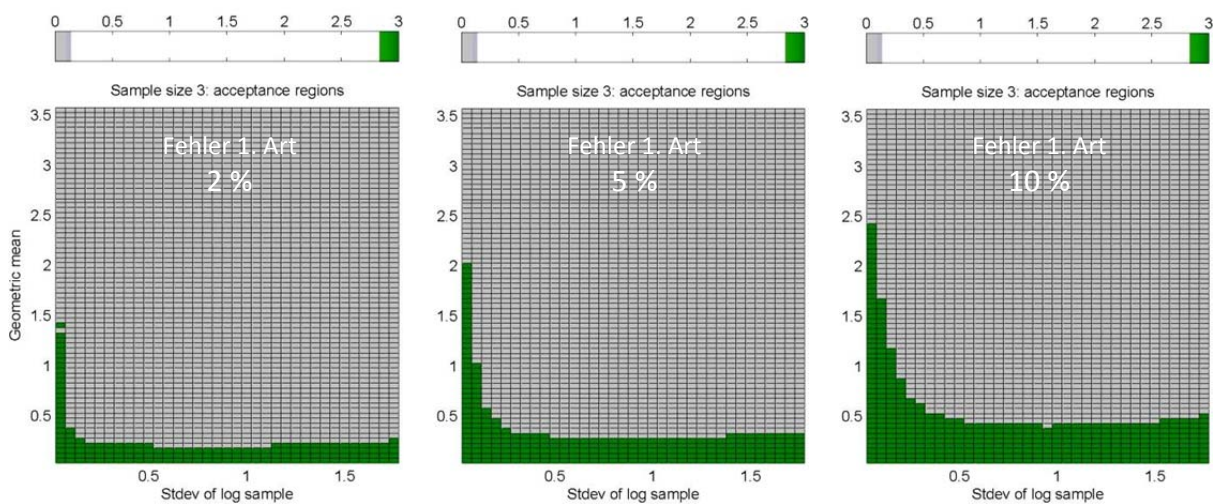


Abb. 41 : Vergleich unterschiedlicher Grenzen des Fehlers 1. Art bei Stichprobengröße 3 und Grenzwert $3 h^{-1}$

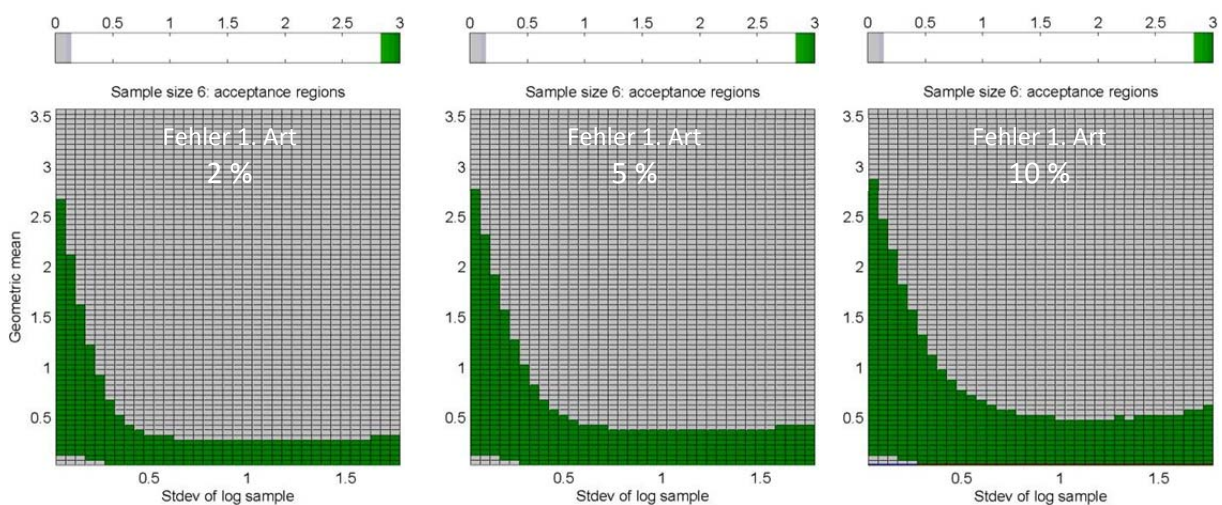


Abb. 42 : Vergleich unterschiedlicher Grenzen des Fehlers 1. Art bei Stichprobengröße 6 und Grenzwert $3 h^{-1}$

Wie aus den Abbildungen ersichtlich ist, hat die gewählte Grenze für einen Fehler 1. Art einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung. Es ist jedoch nicht zielführend, die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung auf ein Minimum (z.B. 2 %) zu begrenzen, da in diesem Fall meistens zu viele Messungen durchgeführt werden. Die Empfehlung liegt daher bei einer Grenze zwischen 5 und 10 Prozent. Die Begründung liegt vor allem darin, dass auch wenn eine Fehlentscheidung getroffen wird, dennoch nur ein geringer Prozentsatz an Werten über dem Grenzwert liegen kann. Es handelt sich hierbei vorwiegend um „Bins“ im Grenzbereich, was bedeutet, dass die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der falschen Einträge zum größten Teil nur knapp nicht erreicht wurden (im Schnitt geschätzte 90 %ige Unterschreitungswahrscheinlichkeit der falschen Einträge). Da es sich um zwei voneinander unabhängige Wahrscheinlichkeitsberechnungen handelt, werden diese multipliziert. Man nehme an, dass die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung bei beispielsweise 10 % liegt. Bei diesen 10 % der Fälle liegen laut der A-priori-Verteilung jedoch nur geschätzte 10 % der Werte über dem Grenzwert (anstatt der allgemein akzeptierten 5 %). Multipliziert man die Wahrscheinlichkeiten, bedeutet dies, dass die Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung des Grenzwertes in diesen „Bins“ um nur in etwa einen Prozent über der allgemein akzeptierten Wahrscheinlichkeit liegt. Eine dazu ausführlichere Analyse der Fehlerwahrscheinlichkeit ist empfehlenswert, konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde der Fehler 1. Art zunächst auf 5 % begrenzt.

Eine weitere Maßnahme, um Unsicherheiten der Berechnung zu minimieren, stellt das Ausschließen von „Bins“ im Akzeptanzbereich dar, in denen eine nur sehr geringe Auftrittshäufigkeit an Stichproben festgestellt wird. Diese Grenze ist jedoch in Abhängigkeit zu der Anzahl der simulierten Stichprobe sowie in Abhängigkeit zur gewählten A-priori-Verteilung unterschiedlich festzulegen. Ist die A-priori-Verteilung günstig gewählt, sodass in den Randzonen des Akzeptanzbereichs ausreichend Stichproben gezogen werden können, hat diese Maßnahme zur Fehlerbegrenzung jedoch kaum bis keinen Einfluss.

7.5 Anwendung des Modells am Beispiel der untersuchten Wohnanlage

Als Grundlage zur Ermittlung der nötigen Anzahl dienen die 26 gemessenen Luftwechselzahlen der Gebäude mit Keller. Um die Fragestellung möglichst genau zu beantworten, wird die relative Auftretshäufigkeit in % an den Schnittpunkten der Kenngrößen aus allen möglichen Kombinationen von Stichproben angegeben. Wird diese mit dem Diagramm für den Akzeptanzbereich aus der Simulation überlagert, so sollte der Bereich, in welchem der Schnittpunkt der beiden Kenngrößen auftreten kann, möglichst im Akzeptanzbereich (grün) liegen. Die Ergebnisse dazu werden im Diagramm 17 für den Grenzwert von 3 h^{-1} aufgezeigt. Da alle gemessenen Werte auch unter einem Grenzwert von $1,5 \text{ h}^{-1}$ liegen, ist zum Vergleich das Ergebnis dieser Berechnung im Diagramm 18 dargestellt. Die Fragestellung lässt sich somit mit der Aussage beantworten, dass 4 Gebäude der untersuchten Siedlung hätten gemessen werden müssen, um mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 95 % davon ausgehen zu können, dass auch alle übrigen Gebäude unter dem Grenzwert von 3 h^{-1} liegen. Für den Grenzwert von $1,5 \text{ h}^{-1}$ wäre eine Stichprobe mit höchstens 7 Messwerten erforderlich.

Diagramm 17 : Anwendung der Berechnungsmethode am Beispiel der gemessenen Luftwechselzahlen für den Grenzwert von 3 h^{-1}

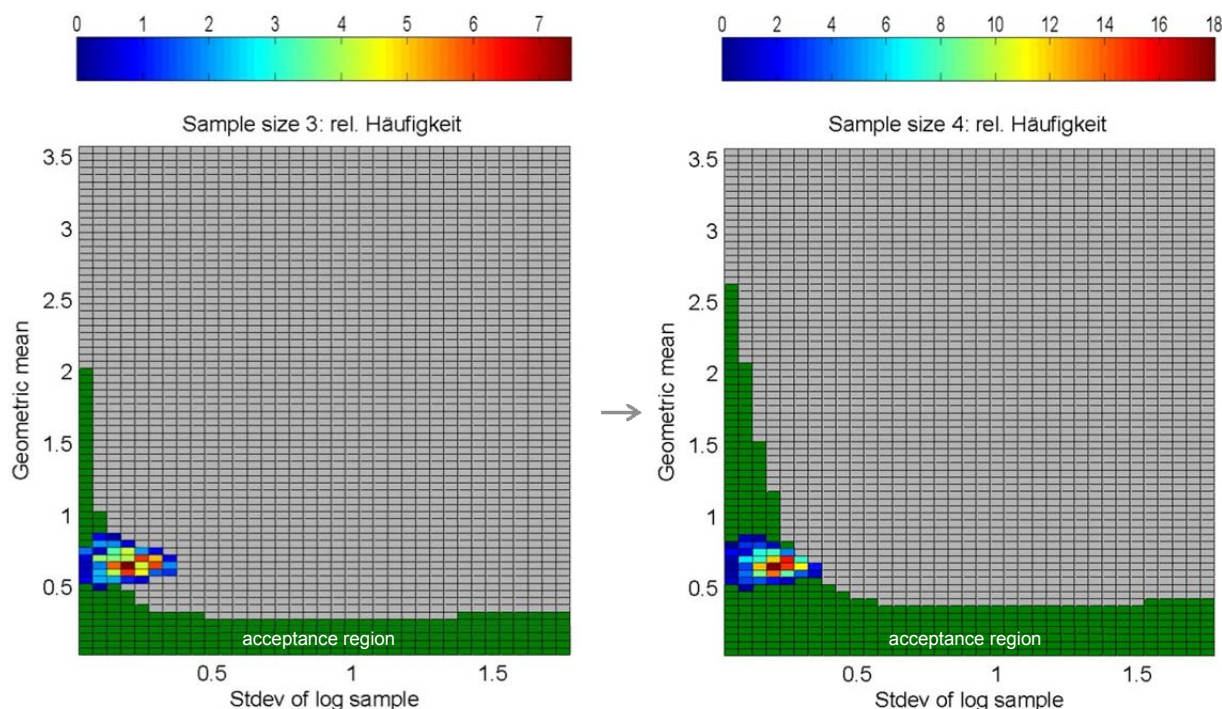
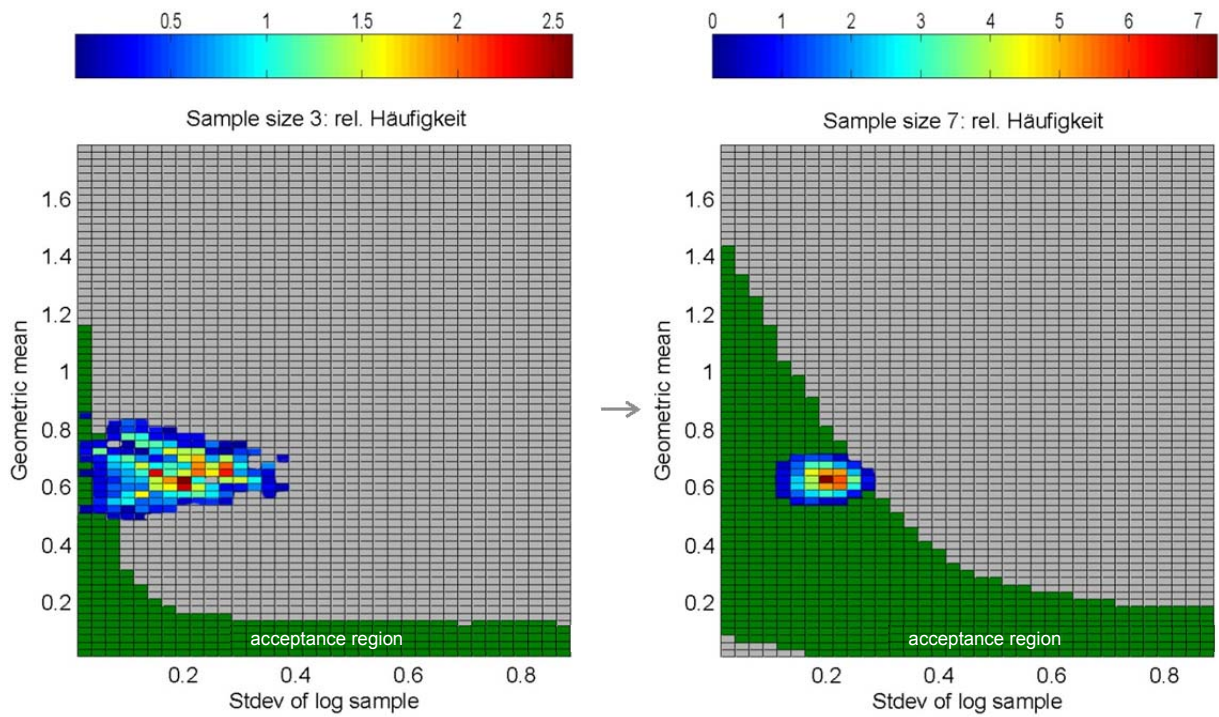


Diagramm 18 : Anwendung der Berechnungsmethode am Beispiel der gemessenen Luftwechselzahlen für den Grenzwert von $1,5 \text{ h}^{-1}$



8 Zusammenfassung

Durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Messreihe, konnte festgestellt werden, dass die Luftwechselzahl von Gebäuden in einer Siedlung, welche alle gleicher Bauweise und ähnlichen Charakters entsprechen, annähernd normalverteilt sind. Für statistische Methoden und Wahrscheinlichkeitsberechnungen ist es aber durchaus sinnvoll, von einer Gamma- oder Lognormalverteilung auszugehen, welche die Verteilung der Luftwechselzahl ähnlich gut beschreiben und durch ihre Eigenschaften (z.B. keine Werte kleiner Null) besser geeignet sind.

Auf Grundlage dieser Erkenntnis konnte in weiterer Folge durch interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Experten der Statistik die Fragestellung der Arbeit professionell gelöst werden. Mithilfe von Simulationsmodellen auf Basis des Bayes'schen Ansatzes und der Suffizientenstatistik ist es möglich die erforderliche Stichprobengröße zu ermitteln. Somit ist es in der Praxis nicht notwendig, die gesamten Gebäude einer Siedlung, sondern nur eine bestimmte Anzahl davon auf ihre Luftdichtheit zu untersuchen. Dies führt zum einen zu Kostenersparnissen, zum anderen soll es die ausführenden Firmen dazu motivieren, kontinuierliche und optimale Ausführungsqualität zu gewährleisten. Für die gemessenen Luftwechselzahlen der Testgebäude konnte dabei mithilfe der aus der Simulation hervorgehenden Diagramme eine erforderliche Stichprobengröße von 4 Messwerten zur Einhaltung des Grenzwertes der Luftwechselzahl von 3 h^{-1} ermittelt werden.

Die ausgearbeitete Berechnungsmethode erlaubt, in vorgestellter Art und Weise die nötige Anzahl an Messungen auch für jede beliebige Siedlung, unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten und unter Annahme verschiedener Verteilungen zu ermitteln. Vorausblickend auf die weitere Bearbeitung der Thematik, muss darauf hingewiesen werden, dass die variablen Parameter des Berechnungsmodells (A-priori-Verteilung, Fehlertoleranzen usw.) weiter definiert werden müssen. Fortführende Messreihen an unterschiedlichen Siedlungen können jedoch die bisher unklaren Fragen beantworten.

9 Anhang

9.1 Matlab Programmcode

Matlab Funktion "drawfromprior.m" zur Festlegung der a-priori-Verteilung

```
function x=drawfromprior(prior,ndraw);
switch prior(1)
case 1
    x=unifrnd(prior(2),prior(3),1,ndraw);
case 2
    x=gamrnd(prior(2),prior(3),1,ndraw);
case 3
    x=prior(2)*betarnd(prior(3),prior(4),1,ndraw);
case 4
    x=exprnd(prior(2),1,ndraw);
otherwise
    error('Unknown type of prior')
end
return
```

Matlab Funktion "histsd.m" zur Definition der Histogramme der Simulation
„mysim_suffstat“

```
function [N,BIN] = HISTC(X,EDGES)
%HISTD HISTC-type Histogram implemented as an .m function.
% See the HISTC mex description
% If you can't find HISTC, then see the hist2 help.
%
% N.B. It is always a better idea to use the
% HISTC mex (a much faster compiled C code) if you have it
% Then just replace the HISTD with HISTC in all calls
% contained in the hist2() .m function
%
% N.B. This is NOT a fool-proof version.
% It is a version for advanced users only,
% that use it with a smile & at own risk ;- )
% There is NO parameter check.
%
% Makes the hist2/histsd pair version-portable & stats-toolbox independent
% HISTD is meant to be functionally similar to HISTC
% but feel free to modify it (e.g. if BIN=0 is not what you want
% for out of range values.
%
% (c) Nedialko Krouchev 2006, Universite de Montreal, GRSNC
% Roughly based on HIST (c) MathWorks
% c:\matlab\toolbox\matlab\datafun\hist.m
```

```
[m,n] = size(X);

    xx = EDGES(:);
    minX = min(min(X));
    maxX = max(max(X));

BIN = zeros(m,n);

nbin = length(xx);
nn = zeros(1,nbin);
for i=1:nbin
    kk = find( X >= xx(i) );
    BIN(kk) = i; nn(i) = length( kk );
end

kk = find( X > xx(nbin) );
BIN(kk) = 0; nn(nbin+1) = length( kk );

N = -diff(nn);
```

**Matlab Funktion "hist2.m" zur Definition der Histogramme der Simulation
„mysim_suffstat“**

```
function [MN, xedges, yedges] = hist2(x, y, xedges, yedges)
% function MN = hist2(x, y, xedges, yedges)
%
% 2D histogram: Extract the number of joint events - (x,y) data value pairs
% that fall in each bin of the grid defined by xedges and yedges.
%
%# =====
%# Uses:
%#   [N,BIN] = HISTD(X,EDGES)
%# which returns
%#   1) N is a LENGTH(EDGES) vector, N(k) will count the value X(i) if
%#       EDGES(k) <= X(i) < EDGES(k+1). The last bin will count any values of
%#       X that match EDGES(end).
%#   2) an index matrix BIN.
%#       If X is a vector, N(K) = SUM(BIN==K).
%#       BIN is zero for out of range values.
%#       If X is an m-by-n matrix, then, for j=1:n, N(K,j) = SUM(BIN(:,j)==K); end
%# =====
%
% Please, see the notes to HISTD too.
% N.B. It is always a better idea to use the
% HISTC mex (a much faster compiled C code) if you have it
% Then just replace the HISTD with HISTC in all calls
% contained in the hist2() .m function
%
% (c) Nedialko Krouchev 2006, Universite de Montreal, GRSNC
```

```

if nargin ~= 4
    error ('The four input arguments are required!');
    return;
end
if any(size(x) ~= size(y))
    error ('The size of the two first input vectors should be same!');
    return;
end

[xn, xbin] = histd(x,xedges);
[yn, ybin] = histd(y,yedges);
xnbin = length(xedges);
ynbin = length(yedges);

%xbin, ybin are zero for out of range values
kkL = find( x<xedges(1) ); kkR = find( x>xedges(xnbin) );
if ~isempty( kkL ),
    xbin = xbin + 1; xnbin = xnbin + 1;
    xedges(2:xnbin) = xedges; xedges(1) = min(x);
end
xbin( kkL ) = 1;
if ~isempty( kkR ),
    xnbin = xnbin + 1; xedges(xnbin) = max(x);
end
xbin( kkR ) = xnbin;
kkL = find( y<yedges(1) ); kkR = find( y>yedges(ynbin) );
if ~isempty( kkL ), ybin = ybin + 1; ynbin = ynbin + 1;
    yedges(2:ynbin) = yedges; yedges(1) = min(y);
end
ybin( kkL ) = 1;
if ~isempty( kkR ), ynbin = ynbin + 1; yedges(ynbin) = max(y); end
ybin( kkR ) = ynbin;

xyBinEdges = 1:xnbin*ynbin;

%# =====
%# A more Elegant end-spiel:
%#
%# If x belongs to jBin=xbin(x), and y belongs to iBin=ybin(y),
%# Then (x,y) pairs belong "columnwise" to: ijBin = (jBin-1)*ynbin + iBin

xyBin = (xbin-1)*ynbin + ybin;

%# =====
MN = histd(xyBin,xyBinEdges);
MN = reshape( MN, ynbin, xnbin );
-

```


Matlab Quellcode "mysim_suffstat.m" zur Generierung von Stichproben aus einer a-priori-Verteilung

```

clear
samplesizes=3:3; % sample size
%samplesize=3;
rand('state',0);
randn('state',0); % define prior for sample mean M and sample standard deviation S
ndraw=20000; % number of draws from prior
nsamples=2500; % number of samples for each draw
% model
model='logn';
%model='gam';
%model='both';
switch model % histogram limits for two sufficient statistics
    case 'logn'
        min1=0;
        max1=1.5;
        name1='Geometric mean';
        min2=0;
        max2=3;
        name2='Stdev of log sample'
    case 'gam'
        min1=0;
        max1=1;
        name1='Geometric mean';
        min2=0;
        max2=1.5;
        name2='Arithmetic mean';
    otherwise
        error('Unknown model')
end

thresh=[1.5]; % threshold values
NEP=0.95; % non-exceedence probability

% histogram properties
binsize1=0.02;
binsize2=0.02;
bins1=round(max1/binsize1);
bins2=round(max2/binsize2);
lo1=0;
hi1=bins1*binsize1;
lo2=0;
hi2=bins2*binsize2;
edge1=linspace(lo1,hi1,bins1+1);
cent1=0.5*(edge1(1:end-1)+edge1(2:end));
edge2=linspace(lo2,hi2,bins2+1);
cent2=0.5*(edge2(1:end-1)+edge2(2:end));
for samplesize=samplesizes

% Draw M and S from priors
    disp(['Sample size=',num2str(samplesize)])
    priorM=[1 0 2];
    MM=drawfromprior(priorM,ndraw); % mean of model distribution
    priorS=[1 0 0.5];
    SS=drawfromprior(priorS,ndraw); % mean of model distribution
    C=cell(bins1,bins2);
    E=zeros(bins1,bins2);
    tic;
    for idraw=1:ndraw
        if mod(idraw,100)==0,idraw,toc,tic,end

```

```

    %if idraw==8,keyboard,end
    randn('state',100*idraw) % set random generator
    % this has the effect that the simulated samples are extensions of the
previous ones
M=MM(idraw);
S=SS(idraw);
switch model
    case 'logn'
        % compute corresponding dist parameters
        s2=log(1+S^2/M^2);
        s=sqrt(s2);
        m=log(M)-0.5*s2;
        P=logncdf(thresh,m,s); % unterschreitungsw.
        % simulate samples
        x=normrnd(m,s,nsamples,samplesize); % log sample
        % compute sufficient statistics
        S1=exp(mean(x,2)); % geometric mean
        S2=std(x,1,2); % std of log of sample
        belowthresh=P>NEP;
    case 'gam'
        % compute corresponding dist parameters
        b=S^2/M;
        a=M/b;
        P=gamcdf(thresh,a,b); % unterschreitungsw.
        % simulate samples
        x=gamrnd(a,b,nsamples,samplesize);
        % compute sufficient statistics
        S1=exp(mean(log(x),2)); % geometric mean
        S2=mean(x,2); % arithmetic mean
        belowthresh=P>NEP;
    otherwise
        error('Unknown model')
end
histmat=hist2(S2,S1,edge2,edge1);
% drop overflow
histmat=histmat(1:bins1,1:bins2);
%
[i,j]=find(histmat);
for k=1:length(i)
    C{i(k),j(k)}=[C{i(k),j(k)};[histmat(i(k),j(k)) idraw P belowthresh]];
end
E=E+histmat;
end
filename=['mysim_suffstat_',model,'_',num2str(samplesize),'.mat'];
save(filename)
myplot_suffstat
end

```

**Matlab Quellcode „myplot_suffstat.m“ zur Fehlerbegrenzung der Simulation
„mysim_suffstat“**

```

nt=length(thresh);
freqbelow=zeros(bins1,bins2,nt);
numbelow=zeros(bins1,bins2,nt);
% Determine cut such that rate of type 1 errors (ratel) is
% approximately equal to target rate (target1)
% Rate of type 2 errors is computed too
target1=0.05;
ratel=1;
tol=target1/50;
cut=0.5;
idir=1;
step=0.05;
niter=0;
maxiter=50;
OG=1;
UG=cut;
lastsign=1;

while abs(ratel-target1)>tol & niter<maxiter
    niter=niter+1;
    if ((sign(ratel-target1)~= lastsign )&&(niter~=1))
        idir=-idir;
        step=step/2;
        lastsign=sign(ratel-target1);
    end
    cut=cut+idir*step;
    for i=1:bins1
        for j=1:bins2
            t=C{i,j};
            if ~isempty(t)
                t1=t(:,1);
                t2=t(:,2);
                t3=t(:,3);
                t4=t(:,4);
                nn=sum(t(:,1));
                freqbelow(i,j)=dot(t1,t4)/nn;
                numbelow(i,j)=dot(t1,t4);
            end
        end
    end
    T=zeros(bins1,bins2);
    T(freqbelow>cut & E>1000)=thresh;
    % Determine error rates
    accept=find(T==thresh);
    K=0;
    N=0;
    for ibin=accept(:)'
        N=N+E(ibin);
        K=K+numbelow(ibin);
    end

    if (N>0)
        ratel=1-K/N;
    else
        ratel=0;
    end

    ratel
end

```

```

%%
cut
rate1
reject=find(T==0);
K=0;
N=0;
for ibin=reject(:)'
    N=N+E(ibin);
    K=K+numbelow(ibin);
end
rate2=K/N
%%
colormap jet
figure(100+samplesize)
clf
set(gcf,'position',[31 4 24 30])
set(gcf,'paperposition',[2 0 16 28])
subplot(2,1,1)
pcolor(cent2,cent1,T)
colorbar
xlabel(name2)
ylabel(name1)
title(['Sample size ',num2str(samplesize),': acceptance regions'])
subplot(2,1,2)
logE=log10(E);
logE(isinf(logE))=0;
pcolor(cent2,cent1,logE);
colorbar
xlabel(name2)
ylabel(name1)
title(['Sample size ',num2str(samplesize),': lg E'])
plotname=['myplot_suffstat_',model,'_Grenze',num2str(thresh),'_Fehler',num2str(target1),'_',num2str(samplesize),'.pdf'];
saveas(100+samplesize,plotname)
figure(200+samplesize)
clf
set(gcf,'units','centimeter')
set(gcf,'paperunits','centimeter')
set(gcf,'position',[21 4 30 15])
set(gcf,'paperposition',[0 0 24 12])
set(gcf,'papersize',[24 12])
subplot(1,2,1)
pcolor(cent2,cent1,T)
colorbar('location','northoutside')
xlabel(name2)
ylabel(name1)
title(['Sample size ',num2str(samplesize),': acceptance regions'])
subplot(1,2,2)
logE=log10(E);
logE(isinf(logE))=0;
pcolor(cent2,cent1,logE);
colorbar('location','northoutside')
xlabel(name2)
ylabel(name1)
title(['Sample size ',num2str(samplesize),': lg E'])
plotname=['talkplot_suffstat_',model,'_Grenze',num2str(thresh),'_Fehler',num2str(target1),'_',num2str(samplesize),'.pdf'];
saveas(200+samplesize,plotname)
Tname=['Tmatrix_suffstat_',num2str(target1*100),'_',model,'_Grenze',num2str(thresh),'_Fehler',num2str(target1),'_',num2str(samplesize),'.mat'];
save(Tname,'T','rate1','rate2','cut','target1','E','freqbelow')

```

Matlab Quellcode „n50_Kenngrößenermittlung.m“ zur Ermittlung aller Kenngrößenschnittpunkte der gemessenen n50-Werte und Eintragung der Auftrittswahrscheinlichkeit im Histogramm

```

clear all

n50 = xlsread('./n50.xlsx','n50 mit Keller');

e=10000
% Histogramm

%model='logn';
model='gam';
%model='both';
switch model % histogram limits for two sufficient statistics
    case 'logn'
        min1=0;
        max1=1.5;
        name1='Geometric mean';
        min2=0;
        max2=3;
        name2='Stdev of log sample';
    case 'gam'
        min1=0;
        max1=1;
        name1='Geometric mean';
        min2=0;
        max2=1.5;
        name2='Arithmetic mean';
    otherwise
        error('Unknown model')
end
%Set bin size
binsize1=0.02;
binsize2=0.02;

bins1=round(max1/binsize1);
bins2=round(max2/binsize2);
lo1=0;
hi1=bins1*binsize1;
lo2=0;
hi2=bins2*binsize2;
edge1=linspace(lo1,hi1,bins1+1);
cent1=0.5*(edge1(1:end-1)+edge1(2:end));
edge2=linspace(lo2,hi2,bins2+1);
cent2=0.5*(edge2(1:end-1)+edge2(2:end));

E=zeros(bins1,bins2);

for samplesize=3:8

    for e=1:e

        sample=datasample (n50,samplesize,'Replace',false);

        switch model
            case 'logn'
                logsample=log(sample);
                std_logsample=std(logsample);
                geom_mean=geomean(sample);
                histmat=hist2(std_logsample,geom_mean,edge2,edge1);
            case 'gam'
                geom_mean=geomean(sample);

```

```
        arit_mean=mean(sample);
        histmat=hist2(arit_mean,geom_mean,edge2,edge1);

    end

    histmat=histmat(1:bins1,1:bins2);

    E=E+histmat;

    end

figure(samplesize)
clf
set(gcf,'units','centimeter')
set(gcf,'paperunits','centimeter')
set(gcf,'position',[10 4 15 15])
set(gcf,'paperposition',[0 0 15 15])
set(gcf,'papersize',[15 15])
subplot(1,1,1)
proE=E/e*100;
pcolor(cent2,cent1,proE);
colorbar('location','northoutside')
xlabel(name2)
ylabel(name1)
title(['Sample size ',num2str(samplesize),': rel. Häufigkeit'])
filename=['Häufigkeit_',model,'_',num2str(e),'_',num2str(samplesize),'.mat'];
save(filename)

plotname=['Häufigkeit_',model,'_',num2str(e),'_',num2str(samplesize),'.pdf'];
saveas(samplesize,plotname);
end
```

9.2 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 : Messgerät mit 3 Ventilatoren der Marke Minneapolis Blower-Door im eingebauten Zustand [BLO12]	14
Abb. 2 : Wärmebildkamera NEC H2640 [ENE04]	15
Abb. 3 : RTR53 Logger für	16
Abb. 4 : Ablauf der Luftdichtheitsmessung nach EN 13829 [IFB11]	18
Abb. 5 : Abhängigkeit der spezifischen Lüftungswärmeverluste von der Spaltbreite und der wirksamen Druckdifferenz bei unterschiedlicher Bauteildicke [HAU91]	27
Abb. 6 : Vergleich der Transportmechanismen Konvektion und Diffusion [HAU91]	30
Abb. 7 : Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w einer einlagig beplankten Wand durch Abdichtungsmaßnahmen zur Luftdichtheit	35
Abb. 8 : Höchstwerte der Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur und Intensität der Turbulenzen [ISO06]	39
Abb. 9 : Behaglichkeitsfeld für die Raum- luftgeschwindigkeit im h-x-Diagramm [FIS08]	39
Abb. 10: Behaglichkeitsfeld für die Raum- luftgeschwindigkeit und Empfindungstemperatur [FIS08]	39
Abb. 11: Thermographieaufnahme der Oberflächen bei Windstille (links) und erhöhter Windgeschwindigkeit [RIC10]	40
Abb. 12 : Außenansichten der Gebäude	42
Abb. 13 : Anordnung und Typenbeschreibung der Gebäude (Quelle aus Datenschutzgründen vorenthalten)	42
Abb. 14 : Grundriss Keller _ Typ D mit Keller	46
Abb. 15 : Grundriss Erdgeschoss _ Typ D mit Keller	47
Abb. 16 : Grundriss Obergeschoss _ Typ D mit Keller	48
Abb. 17 : Grundriss Erdgeschoss _ Typ A ohne Keller	49
Abb. 18 : Grundriss Obergeschoss _ Typ A ohne Keller	50
Abb. 19 : Blende C und D des Minneapolis Blower-Door Modell 4 [ENE04]	53
Abb. 20 : Anschluss der Messschläuche bei Unterdruckmessung am DG-3 [ENE04]	54
Abb. 21 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Abflussrohr im Keller	57
Abb. 22: Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage der Serviceöffnung (geöffnet) für den Installationsschacht im Bad des OG	57
Abb. 23 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Versorgungsrohr der Gastherme	58
Abb. 24 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage an den Stoßfugen der Holzdecke im EG	58
Abb. 25 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage der Installationsdosen	59
Abb. 26 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Fensterdurchbruch der manuellen Raffstore-Kurbel	59
Abb. 27 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage am Wand/Fenster – Deckenstoß im Obergeschoss	60
Abb. 28 : Normalbild (links), Thermobild (rechts): Leckage an der Einbaufuge des Kellerfensters	60
Abb. 29 : Auszug: Berechnungsblatt der Blower-Door GmbH	63
Abb. 30 : Anzahl gemessener Gebäude nach Typen	68
Abb. 31 : Anzahl gemessener Gebäude mit/ohne Keller	68
Abb. 32 : Leckagekurve der Messung Nr. 2 (doppeltlogarithmische Darstellung)	71
Abb. 33 : Box-Plot der gemessenen Volumenströme V_{50}	81

Abb. 34 : Box-Plot der Luftwechselzahl (n_{50} -Wert)	81
Abb. 35 : Beispiel des Akzeptanzbereichs für die Stichprobengröße 3 und den Grenzwert 3 h^{-1}	89
Abb. 36 : Beispiel der Auftrittshäufigkeit an simulierten Stichproben für die Stichprobengröße 3 und Grenzwert 3 h^{-1}	89
Abb. 37 : Grafische Erklärung der statistischen Vorgehensweise im Berechnungsmodell	93
Abb. 38 : Ergebnis der Berechnung unter Annahme einer gleichverteilten a-priori-Verteilung für die Stichprobengröße 4 und den Grenzwert 3 h^{-1}	96
Abb. 39 : Ergebnis der Berechnung unter Annahme einer gammaverteilten a-priori-Verteilung für die Stichprobengröße 4 und den Grenzwert 3 h^{-1}	96
Abb. 40 : Ergebnis der Berechnung unter Annahme einer gammaverteilten A-posteriori-Verteilung für die Stichprobengröße 6 und den Grenzwert 3 h^{-1}	98
Abb. 41 : Vergleich unterschiedlicher Grenzen des Fehlers 1. Art bei Stichprobengröße 3 und Grenzwert 3 h^{-1}	99
Abb. 42 : Vergleich unterschiedlicher Grenzen des Fehlers 1. Art bei Stichprobengröße 6 und Grenzwert 3 h^{-1}	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Checkliste für Abnahmemessung (Verfahren A) [FLI08]	10
Tabelle 2 : Windstärke nach Beaufort (Auszug) [ONO01]	13
Tabelle 3 : Berechnungsgrundlage der Beispiele zur Abschätzung der Feuchtebelastung	32
Tabelle 4 : Erforderliche Außenluftvolumenströme für die Einhaltung einer CO_2 -Konzentration der Raumluft $< 0,15 \%$ [BAU08]	38
Tabelle 5 : Höchstwerte der Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur [ONO08]	38
Tabelle 6 : Nettogrundfläche, Innenvolumen und Hüllfläche der Gebäude mit Keller am Beispiel Typ D mit Keller	44
Tabelle 7 : Nettogrundfläche, Innenvolumen und Hüllfläche der Gebäude ohne Keller am Beispiel Typ A ohne Keller	45
Tabelle 8 : Gebäudedaten, gültig für alle Gebäudetypen (Quelle aus Datenschutzgründen vorenthalten)	51
Tabelle 9 : Konstruktionsdetails, gültig für alle Gebäudetypen (Quelle aus Datenschutzgründen vorenthalten)	52
Tabelle 10 : Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind (Auszug) [FLI02]	67
Tabelle 11 : Aus den gemessenen Daten ermittelte Kennwerte der Luftdichtheit	69
Tabelle 12 : Wesentliche Kennzahlen der Statistik (zusätzliche Differenzierung nach Gebäudetyp)	77
Tabelle 13 : Ergebnisse der Anpassung von Verteilungen zur Luftwechselzahl	86

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 : Vergleich gemessener und berechneter absoluter Luftfeuchte von Haus A	33
Diagramm 2 : Vergleich gemessener und berechneter absoluter Luftfeuchte von Haus B	34
Diagramm 3 : Durchschnittliche Anzahl und Standardabweichung diverser Durchdringungen der Innenschale der Außenwand durch Befestigungsmittel und Bohrungen, vom Bewohner verursacht.	61
Diagramm 4 : Zusammenhang zwischen Leckagefläche (aus Befestigungsmitteln und Bohrungen), und der gemessenen Luftwechselzahl n_{50}	62
Diagramm 5 : Gemessene n_{50} - Werte mit Angabe des unteren und oberen Grenzwertes laut Fehlerfortpflanzungsrechnung	70
Diagramm 6 : Berechneter Luftvolumenstrom aus den Messdaten bei 50 Pa mit Kennzeichnung des Gebäudetyps	73
Diagramm 7 : Gemittelte Luftwechselzahl nach Gebäudetypen unter Ausschluss der ungültigen Messungen	73
Diagramm 8 : Berechnete Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle aus den Messdaten bei 50 Pa mit Angabe der oberen und unteren Grenze laut Fehlerfortpflanzungsrechnung	75
Diagramm 9 : Häufigkeitshistogramm zu den gemessenen Volumenströmen bei 50 Pa.....	78
Diagramm 10 : Häufigkeitshistogramm zur Luftwechselzahl n_{50}	79
Diagramm 11 : Häufigkeitshistogramm zur Luftwechselzahl n_{50} (getrennte Betrachtung nach Typ und modifizierte Intervallgrößen)	79
Diagramm 12 : Summenkurve der Luftwechselzahl n_{50}	80
Diagramm 13 : Verteilungsfunktionen für die Luftwechselzahl aller 32 gemessenen Gebäude	84
Diagramm 14 : Verteilungsfunktionen für die Luftwechselzahl der 26 Gebäude mit Keller	85
Diagramm 15 : Verteilungsfunktionen für die Luftwechselzahl der 6 Gebäude ohne Keller	85
Diagramm 16 : Häufigkeit angepasster Verteilungsfunktionen an die gemessenen Luftwechselzahlen von Messreihen in Reihenhaus- und Wohnanlagen	87
Diagramm 17 : Anwendung der Berechnungsmethode am Beispiel der gemessenen Luftwechselzahlen für den Grenzwert von 3 h^{-1}	101
Diagramm 18 : Anwendung der Berechnungsmethode am Beispiel der gemessenen Luftwechselzahlen für den Grenzwert von $1,5 \text{ h}^{-1}$	102

Literatur

- [AUT11] Autonome Provinz Bozen – Südtirol : *Technische Richtlinie Klimahaus*, Version 1.3, Bozen, August 2011
- [BAU08] Baumgarth, Hörner, Reeker (Hrsg.) : *Handbuch der Klimatechnik – Band 1: Grundlagen*, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2008
- [BLO12] Blower-Door GmbH – Messsysteme für Luftdichtheit
WebLink: <http://www.blowerdoor.de/index.php?id=45&L=2>,
zuletzt überprüft am 10.05.2013
- [BUI12] Building Energy Solutions, Inc. :
WebLink: <http://www.buildingenergysolutions.com/pdfs/bdtest.pdf>
zuletzt überprüft am 10.05.2013
- [CAS07] Capary, Wichmann : *Auswertung von Messdaten – Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2007
- [CEN99] *EN 12207:1999* European Committee for Standardisation : *Fenster und Türen – Luftdurchlässigkeit – Klassifizierung*, Deutsche Fassung, November 1999
- [DIN11a] DIN 4108-2:2011, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Oktober 2011
- [DIN11b] DIN 4108-7:2011, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele*, Januar 2011
- [EBS10] ebs ATuSystemtechnik GmbH : *Infrared Thermography H2640 – Anleitung zur schnellen Inbetriebnahme*; August 2008
- [ENE04] The Energy Conservatory : *Minneapolis Blower Door – Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems*, Mai 2004
- [ENE13] EnEV-online
WebLink: http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/index.htm
zuletzt überprüft am 10.05.2013
- [FAS03] Fasold, Veres : *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis – Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*, 2. Auflage, Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen, Berlin 2003
- [FER11] Fernando Puente León, Uwe Kiencke : *Messtechnik – Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker*, Springer-Verlag, 2011
- [FIS08] Fischer, Jenisch, Stohrer, Homann, Freymuth, Richter, Häupl : *Lehrbuch der Bauphysik - Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima*, Vieweg + Taubner Verlag, Wiesbaden 2008
- [FLI08] Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V. : *Beiblatt zur EN 13829*, April 2008
- [FLI12a] Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V. : *Gebäude-Luftdichtheit – Band 1, 2. aktualisierte Auflage*, Berlin, Oktober 2012
- [FLI12b] Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V. : *Presseinformation*, 14. November 2012

- [FRA12] Fraunhofer : Weblink: www.baufachinformation.de/denkmalpflege/Prüfung-von-Luftbewegungen-mit-Hilfe-von-Rauchröhrchen/1988067185345
zuletzt überprüft am 10. 0.5.2013
- [HAU91] Hauser, Maas : *Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten*, Aachener Bausachverständigentage 1991, Bauverlag Wiesbaden, 1991
- [HEN07] Hens, Hugo: *Building Physics – Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst & Sohn, A Wiley Company, Berlin: 2007
- [HER12] E.Hering, G. Schönfelder (Hrsg.) : *Sensoren in Wissenschaft und Technik*, Vieweg+Tauber Verlag, 2012
- [IFB11] Institut für Bauvorsuchung e.V. : *Luftdichtheitsmessung in der Praxis – Für Neubauten und energetische Gebäudemodernisierung*, Rudolf Müller Verlag, 2011
- [ISO06] EN ISO 7730:2006-05 : *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, Mai 2006
- [IWU95] Institut Wohnen und Umwelt GmbH : *Luftdichtigkeit von Gebäuden – Luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden*, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 1. Auflage, August 1995
- [MIN13] MINERGIE Verband: *Richtlinie für Luftdurchlässigkeitsmessungen bei MINERGIE-A, MINERGIE-P und MINERGIE – Bauten*.
Weblink: http://www.minergie.ch/tl_files/download/Messanleitung_2011.pdf
zuletzt überprüft am 10.05.2013
- [MUR03] Murray R. Spiegel, Larry J. Stephens : *Statistik – Schaum`s Repetitorien*, mitp-Verlag, 1. Auflage, 2003
- [NAB09] Nabil A. Fouad, Torsten Richter : *Leitfaden Thermografie im Bauwesen – Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung*, Fraunhofer IRB Verlag, 3. unveränderte Auflage, 2009
- [NUS12] Bernd Nusser, Dissertation: *Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen –Systemanalysen und neue Ansätze zur Planung hygrysch robuster flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen unter Beachtung konvektiver Feuchteinträge und temporärer Beschattungssituationen*, Technische Universität Wien, März 2012
- [OIB11] OIB – Richtlinie 6. *Energieeinsparung und Wärmeschutz*. Österreichisches Institut für Bautechnik, Oktober 2011
- [ONO01] ÖNORM EN 13829:2001, *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren*, Januar 2001
- [ONO03] ÖNORM B 8110-2:2003 07 01 : *Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz*, Januar 2003
- [ONO08] ÖNORM EN 13779:2008 01 01 : *Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme*, Januar 2008
- [ONO10] ÖNORM B8110-6:2010 01 01 : *Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf*, Januar 2010

- [ONO13] ÖNORM ISO 13788:2013 04 01 : *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, 2013*
- [ORM94] Malcom Orme, Martin Liddament, Andrew Wilson: *An Analysis and Data Summary of AIVC's Numerical Database*, AIVC Technical Note 44. Coventry, Great Britain, März 1994
- [PAS12] Passivhaus Institut : „Zertifiziertes Passivhaus“ – *Zertifizierungskriterien für Passivhäuser mit Wohnnutzung*, Stand 18.04.2012
- [PRU00] Pruscha : *Vorlesungen über Mathematische Statistik*, Teubner Verlag, Stuttgart 2000
- [RAI08] Rainer Parthier : *Messtechnik – Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 4. Auflage 2008
- [RIC10] Riccabona, Bednar : *Baukonstruktionslehre 4 – Bauphysik*, MANZ Verlag Schulbuch GmbH, Wien 2010
- [SCH01] Scheid Stefanie Christina, *Diplomarbeit : Die verallgemeinerte Lognormalverteilung*, Universität Dortmund, Fachbereich Statistik, November 2001
- [SPE03] Herbert Specht : *Die effektive Leckagefläche – Erläuterungen zum Begriff: „effektive Leckagefläche“*, Juni 2003, Weblink: <http://www.luftdichtheit.de/leckageflaeche.htm>
zuletzt überprüft am 10.05.2013
- [ZIL02] Zilch, Diederichs, Katzenbach : *Handbuch für Ingenieure : Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit – Fachwissen in einer Hand*, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 2002