

# Reproduzierbarkeit von Luftpichtigkeitsmessungen\*

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis zu seinem 60. Geburtstag gewidmet  
Achim Geißler, Kassel

Dr. Achim Geißler, Universität Gesamthochschule Kassel  
D-34109 Kassel

## Zusammenfassung

Die längerfristige Reproduzierbarkeit von Luftpichtigkeitsmessungen wird untersucht. Hierzu werden wiederholte Luftpichtigkeitsmessungen an 13 Gebäuden über den Zeitraum von ca. einem Jahr beschrieben. Es wird festgestellt, daß im Verlauf eines Jahres mit Schwankungen der Luftpichtigkeit der Gebäudehülle von bis zu 30% des Mittelwertes zu rechnen ist. Begleitende Materialfeuchtemessungen an den untersuchten Objekten lassen darauf schließen, daß die Veränderungen der Luftpichtigkeit auf Quell- und Schwindvorgänge zurückzuführen sind. In Übereinstimmung mit ähnlichen Studien in anderen Ländern werden im Winter/Frühjahr die größten und im Sommer/Herbst die geringsten Luftpichtigkeiten festgestellt.

## 1 Einführung

Die Luftpichtigkeit der Gebäudehülle gewinnt mit zunehmendem Dämmniveau an Bedeutung. In einzelnen Bundesländern wird bereits seit einigen Jahren bei Förderprogrammen ein Grenzwert für die Luftpichtigkeit der Gebäudehülle vorgegeben. Es ist damit zu rechnen, daß in der künftigen Energieeinsparverordnung (EnEV) ebenfalls Grenzwerte für die Luftpichtigkeit der Gebäudehülle vorgeschrieben werden. Künftig wird also mit einer Vielzahl von Luftpichtigkeitsmessungen zu rechnen sein.

Durch [1] sind Rahmenbedingungen für die Durchführung von Luftpichtigkeitsmessungen gegeben. Zu jeder Messung muß eine fundierte Fehlerabschätzung erfolgen. Ohne diese Fehlerabschätzung hat das Meßergebnis keinerlei Aussagekraft. Einige Randbedingungen von Luftpichtigkeitsmessungen, die u.U. Auswirkungen auf die Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit des Meßergebnisses haben, sind nur qualitativ zu beschreiben. Trotzdem sollten Größenordnungen des möglichen Einflusses bekannt sein. Derzeit wird in der Regel den Ergebnissen von Luftpichtigkeitsmessungen aus verschiedenen Gründen eine zu große Sicherheit zugeordnet.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit von Luftpichtigkeitsmessungen mit der Meßmethode 'Blower Door' untersucht. Hierbei wird die Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen unter dem Aspekt mögli-

cher jahreszeitlicher Schwankungen der Luftpichtigkeit von Gebäuden betrachtet.

In verschiedenen Ländern wurden im Rahmen einschlägiger Untersuchungen unterschiedliche Schwankungen der Luftpichtigkeit mit der Jahreszeit beobachtet. Diese Schwankungen betragen bis zu 30 % des Mittelwertes [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Für Deutschland liegen bislang keine Daten vor, die für die unterschiedlichen Bauarten die Möglichkeit einer solchen Schwankung ausschließen lassen. Für unterschiedliche Gebäudetypen, Fertighäuser und Holzskelettbauten, wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersucht, ob auch bei der in Deutschland üblichen Bauweise Abhängigkeiten der Luftpichtigkeit von der Jahreszeit vorhanden sind. Der mögliche Einfluß der Neubaufeuchte bzw. der Trocknung im ersten Jahr auf die zu erwartende Genauigkeit und der damit verbundenen Aussagekraft von Luftpichtigkeitsmessungen an Neubauten wird erörtert.

## 2 Literaturstudie

Mehrere Beiträge behandeln die Änderung der Luftpichtigkeit in den ersten Jahren des Bestehens eines Gebäudes bzw. jahreszeitliche Schwankungen. Die gefundenen Änderungen in der Luftpichtigkeit werden i.a. Trocknungsvorgängen zugeschrieben. Es soll hier ein zusammenfassender Überblick über die wesentlichen Arbeiten gegeben werden.

\* Die diesem Artikel zugrunde liegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten, über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. abgewickelten AiF Forschungsprojektes Nr. 10650 durchgeführt.

In [2] werden Meßergebnisse wiedergegeben, die auf eine erhebliche Zunahme der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle im Laufe der ersten Jahre nach Errichtung des Gebäudes hinweisen. Spätere Luftdichtheitsmessungen an diesen Gebäuden haben keine weitere Veränderung ergeben [2]. In [3] werden für vier Gebäude Meßwerte der Luftdichtheit über einen Zeitraum von viereinhalb Jahren angegeben. Auch hier wird in den ersten Jahren nach Errichtung der Gebäude eine deutliche Zunahme der Gesamtleckage festgestellt.

In [4] wird ein Jahressgang der Luftdichtheit eines Gebäudes gegeben. Der Jahressgang ist mit einer gewissen Erhöhung der Leckage überlagert, d.h. das untersuchte Gebäude zeigt sowohl einen 'Alterungseffekt' als auch eine von der Jahreszeit abhängige Luftdurchlässigkeit. Weiterhin wird in [4] eine Veröffentlichung von Fukushima [5] dahingehend zitiert, daß sich im Verlauf des ersten Jahres nach Errichtung die effektive Leckagefläche (ELA) von 9 Gebäuden um ca.  $100 \text{ cm}^2$  vergrößert hat.

In [6] sind Ergebnisse von Luftdichtheitsmessungen an zwei Gebäuden in Holzrahmenbauweise wiedergegeben. Die Luftdichtheitsmessungen an den Gebäuden wurden bei der beschriebenen Untersuchung über ein Jahr jeweils alle 14 Tage durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, daß die gemessene Luftdichtheit mit der Jahreszeit schwankt, die geringsten Leckagemengen konnten im späten Sommer bzw. im Herbst, die größten Leckagemengen im Winter und Frühling festgestellt werden. Der größte gemessene Wert lag ca. 20% über dem kleinsten.

Die in [7] beschriebene kanadische Untersuchung umfaßt 24 Gebäude, welche über einen Zeitraum von bis zu drei Jahren hinsichtlich Veränderungen der Luftdichtheit untersucht wurden. Die Gebäude wiesen konstruktive Unterschiede hinsichtlich der Ausbildung der Luftdichtheitsschicht auf. Zehn der Gebäude hatten als Luftdichtheitschicht Polyethylen(PE)-Folien, 14 der Gebäude waren mit einer frühen Variante des 'Airtight Drywall Approach (ADA)' abgedichtet. Dies entspricht in etwa dem Ansatz, die raumseitige Beplankung als luftdichtende Schicht zu verwenden. Es wird hierbei jedoch besonderes Augenmerk auf Anschlüsse und Durchdringungen gelegt, die den grundsätzlichen Erfolg der Abdichtung zunächst gewährleisten. Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, daß weder bei den mit PE-Folie abgedichteten Gebäuden noch bei den ADA-Gebäuden eine nennenswerte Änderung der Luftdurchlässigkeit festgestellt werden kann.

Alle 24 in [7] untersuchten Gebäude mußten den R2000-Qualitätsanforderungen entsprechen [8]. Hinsichtlich der Luftdichtheit bedeutet dies, daß der  $n_{50}$ -Wert kleiner  $1,5 \text{ h}^{-1}$  bzw. der  $NLA_{10}$ -Wert kleiner  $0,7 \text{ cm}^2/\text{m}^2$  sein muß. Nach dem Untersuchungszeitraum erfüllten alle Gebäude außer einem mit PE-Folien abgedichteten diese Dicht-

heitsanforderungen. Die absolut luftundurchlässigkeitste Konstruktion, welche in [7] untersucht wird, ist ein doppelschichtiger Wandaufbau mit PE-Folie als Luftdichtheitsschicht. Diese Gebäude erreichen beständige  $n_{50}$ -Werte kleiner  $0,5 \text{ h}^{-1}$ .

Persily gibt in [9] Daten, die ebenfalls auf eine Veränderung der Luftdichtheit über das Jahr schließen lassen. Die Größenordnung der beobachteten Veränderung beträgt ca. 25 % des Maximalwertes, die höchste Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle wird im frühen Frühjahr gemessen. Die Änderung der Luftdichtheit wird auf Feuchteänderungen im Material zurückgeführt.

In [10] werden sechs Gebäude vorgestellt, welche kurz nach Erstellung (1992) und nach ca. 3 1/2 Jahren (1996) einer Luftdichtheitsmessung unterzogen werden. Es handelt sich dabei um vier in massiver Bauweise (ein Firmengebäude, ein Kindergarten, ein Reihenhaus und ein freistehendes Einfamilienhaus) sowie zwei in Holzleichtbauweise (freistehende Einfamilienhäuser) erstellte Gebäude. Die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehüllen dieser Gebäude erhöht sich in dem genannten Zeitraum um 11 - 218%. Die beobachteten Verschlechterungen werden im wesentlichen auf Schwindvorgänge in Anschlußbereichen zurückgeführt. Genannt werden auch abgerissene dauerelastische Verfugungen.

### 3 Untersuchte Objekte

#### 3.1 Objektaalter

Die untersuchten Objekte setzen sich aus 'alten' Gebäuden (Gebäude, die zu Beginn der Untersuchungsperiode mehr als ein Jahr alt sind) und 'neuen' Gebäuden, (Gebäude, die zu Beginn der Untersuchungsperiode höchstens 6 Monate alt sind) zusammen.

Das Versuchsprogramm umfaßt insgesamt 6 'alte' sowie 7 'neue' Gebäude. Tabelle 1 gibt für alle Objekte das 'Ausgangsalter', die Anzahl durchgeführter Messungen, den Zeitraum, über den die Messungen verteilt sind sowie den mittleren Luftwechsel bei 50 Pa wieder. Aus unterschiedlichen Gründen kann die Luftdichtheitsmessung nicht bei allen Gebäuden tatsächlich wie ursprünglich geplant 12 mal wiederholt werden. Ein älteres Gebäude wird nach der 6. Messung durch einen Brandanschlag soweit beschädigt, daß weitere Messungen nicht möglich sind. Bei den neuen Gebäuden ist häufig der Fertigstellungstermin deutlich später, als bei Objektaquisition vorgesehen. Dadurch verzögert sich der Untersuchungsbeginn und die Anzahl Messungen wird durch die Projektlaufzeit begrenzt. Bei zwei Gebäuden beträgt der Abstand zwischen erster und letzter Messung mehr als 12 Monate, obwohl nicht jeden Monat eine Messung erfolgt.

## 4 Meßergebnisse

**Tabelle 1:** Untersuchte Objekte, Anzahl durchgeführter Messungen und mittlerer Luftwechsel bei 50 Pa ( $\bar{n}_{50}$ ). 'A' bedeutet alte, 'N' neue Gebäude.

Obj.	Alter bei 1. M. (ca.)	Anzahl Mess.	Zeitraum	$\bar{n}_{50}$
A1	3 Jahre	12	12 Monate	2,7
A2	3 Jahre	12	12 Monate	1,4
A3	1 1/2 Jahre	12	12 Monate	3,5
A4	7 Jahre	11	12 Monate	2,5
A5	7 Jahre	6	6 Monate	5,8 <sup>1)</sup>
A6	2 Jahre	11	13 Monate	3,9
N1	6 Monate	12	12 Monate	1,2
N2	2 Monate	12	12 Monate	1,7
N3	1 Monat	8	10 Monate	3,6
N4	6 Monate	11	16 Monate	1,0
N5	1 Monat	11	11 Monate	1,5
N6	1 Monat	7	10 Monate	2,3 <sup>2)</sup>
N7	1 Monat	7	8 Monate	2,6

1) Küchenabzug nicht abgeklebt.

2) inkl. Wintergarten.

### 3.2 Konstruktionsdetails

In Tabelle 2 sind die Konstruktionen der untersuchten Objekte hinsichtlich der für die Luftdichtheit wesentlichen Details grob zusammengestellt. Die Angaben aus Planungsunterlagen bzw. Angaben der Bauherren/Hersteller werden anhand einer einfachen Klassifizierung von Konstruktionsprinzipien und -materialien zusammengestellt. Hierbei wird zwischen der (Regel-) Fläche, Anschläßen und Durchdringungen unterschieden. Die Aufstellung kann nur die generellen, bei der Planung bzw. in Details vorgesehenen Prinzipien und nicht die meist vorhandenen Ausnahmen und Änderungen bei der Ausführung wiedergeben.

### 3.3 Feuchtemeßstellen

Bei allen untersuchten Objekten werden im Rahmen jeder Luftdichtheitsmessung an jeweils gleichen Stellen Materialfeuchtemessungen durchgeführt. In Tabelle 3 sind vier Kategorien festgelegt, anhand derer die Meßstellen beschrieben bzw. typisiert werden. Tabelle 4 gibt für alle Objekte jeweils Anzahl und Typ der Meßstellen wieder. Die Numerierung der Meßstellen entspricht hierbei der in den graphischen Darstellungen in den Bildern 1 und 2 angegebenen.

Es liegen bei den untersuchten Objekten unterschiedlich deutliche Veränderungen der ermittelten Luftdichtheit über den Untersuchungszeitraum vor. In den Fällen, in denen eine deutliche Änderung festgestellt werden kann, deckt sich die Charakteristik der Verläufe weitgehend mit den in der Literatur genannten Angaben. Im Spätsommer/Herbst wird die geringste, im Winter/Frühjahr die größte Luftdurchlässigkeit festgestellt. Die ermittelten Materialfeuchten zeigen bei diesen Objekten meist eine deutliche, gegenläufige Tendenz. In den Abbildungen 1 und 2 sind für alle untersuchten Objekte die Meßergebnisse wiedergegeben. Für jedes untersuchte Objekt sind zwei Graphiken abgebildet. Links jeweils die prozentuale Abweichung des Volumenstroms bei 50 Pa Druckdifferenz (dem Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung) von dem Mittelwert aus allen Messungen an dem Objekt über der Zeit. Rechts ist die Differenz der bei den einzelnen Messungen ermittelten Materialfeuchten von dem Mittelwert aus allen Feuchtemessungen an der jeweiligen Stelle über der Zeit aufgetragen.

Die Objekte A3, A4, N2 und N5 zeigen eine deutliche Veränderung der Luftdurchlässigkeit über das Jahr ('Jahreskurve'). Die Durchlässigkeit des Objekts A4 entspricht nach einem Jahr im Rahmen der Meßgenauigkeit wieder dem Ausgangswert, d.h. es scheint keine bleibende Änderung der Durchlässigkeit stattzufinden. Bei den Objekten A3 und N5 ist eine gewisse absolute Erhöhung der Durchlässigkeit von einigen % des Mittelwertes wahrscheinlich, bei dem Objekt N2 kann eine absolute Verschlechterung der Luftdichtheit um ca. 10 % des Mittelwertes als praktisch sicher angenommen werden. Die Feuchtemeßwerte bei diesen Objekten durchlaufen mit guter Übereinstimmung vergleichbare, gegenläufige Veränderungen.

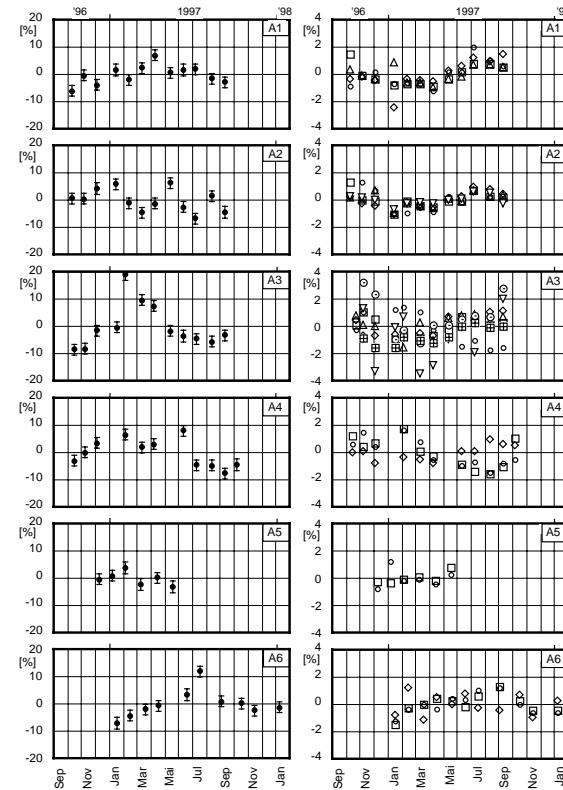
Die Meßwerte von den Objekten A1, A6 und N4 zeigen erkennbare, aber nicht ausgeprägte Verläufe der Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeit des Objektes A1 entspricht nach einem Jahr im Rahmen der Meßgenauigkeit wieder dem Ausgangswert. Die Materialfeuchtwerte zeigen einen phasenverschobenen bzw. der Luftdurchlässigkeit gegenüberliegenden Verlauf. Bei dem Objekt A6 scheint eine leichte Zunahme der absoluten Durchlässigkeit stattgefunden zu haben (wenige % des Mittelwertes). Bei diesem Objekt laufen die Materialfeuchtwerte interessanterweise phasengleich mit der beobachteten Änderung der Luftdichtheit. Insgesamt sind die Änderungen jedoch wenig ausgeprägt. Die große Differenz des Meßwerts vom Juli (Ausreißer nach oben) kann nicht begründet werden. Das Objekt N4 wird erst im Laufe der Untersuchung völlig fertiggestellt, die Durchlässigkeitswerte der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums zeigen auch keine einheitliche Tendenz. Die Werte der zweiten Periode wiederum deuten auf eine

Jahreskurve (oder eine leichte absolute Erhöhung der Durchlässigkeit) hin. Die Materialfeuchtwerte demgegenüber zeigen deutliche Schwankungen auf. Insgesamt scheint eine gewisse Austrocknung stattzufinden (Vergleich der Januar-Werte), im Sommer/Herbst wird diese jedoch von einer Befeuchtung überlagert.

Bei den Objekten A2, A5, N1, N3 sowie N6 kann kein eindeutiger Trend festgestellt werden. Die Luftdurchlässigkeit des Objektes A2 weist in kurzen Zeiträumen recht deutliche Änderungen auf. Die Materialfeuchtwerte zeigen einen deutlichen Jahresgang mit der zu erwartenden Phase. Beim Objekt A5 ist der Untersuchungszeitraum zu kurz. Dieses Gebäude erleidet nach der 6. Messung einen Brandschaden und kann daher nicht weiter untersucht werden. Das Objekt N1 ist von der Bauart vergleichbar mit den Objekten A1 und A2. Wie bei A2 zeigen die Meßwerte deutliche Veränderungen der Luftdurchlässigkeit innerhalb relativ kurzer Zeiträume. Die Materialfeuchtwerte streuen bei diesem Objekt auch stark, zeigen insgesamt aber einen erkennbaren Jahresgang auf. Eine Deutung der großen Schwankungen ist mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich. An dem Objekt N3 werden im Untersuchungszeitraum einige bauliche Änderungen bzw. Verbesserungen vorgenommen, die sich etwaigen Änderungen der Durchlässigkeit der Gebäudehülle überlagern. Die Materialfeuchtemeßwerte an dem Objekt N3 weisen demgegenüber einen deutlichen Trend, eine fast kontinuierliche Austrocknung im Untersuchungszeitraum, auf. Das Objekt N6 wird ebenfalls erst zu Beginn des Untersuchungszeitraums innen fertiggestellt, hierdurch findet vermutlich wieder eine Überlagerung von Effekten statt. Ab Fertigstellung (Sommer 1997) ist ein deutlicher Trend zu einer größeren Durchlässigkeit erkennbar. Die Materialfeuchtwerte zeigen im Gegesatz dazu vom Beginn des Untersuchungszeitraums an eine deutliche Austrocknung der Hölzer.

Der bei dem Objekt N7 ermittelte Verlauf kann aufgrund des zu kurzen Untersuchungszeitraums nicht eindeutig gewertet werden. Es kann sich hier sowohl um eine allgemeine Zunahme der Durchlässigkeit als auch um einen Jahresgang handeln. Die Materialfeuchtwerte zeigen eine deutliche, gegenläufige Tendenz zu den Luftdurchlässigkeitswerten. Ein gewisse Abflachung ist bei beiden Verläufen vorhanden, welches eher auf einen Jahresgang schließen lassen würde.

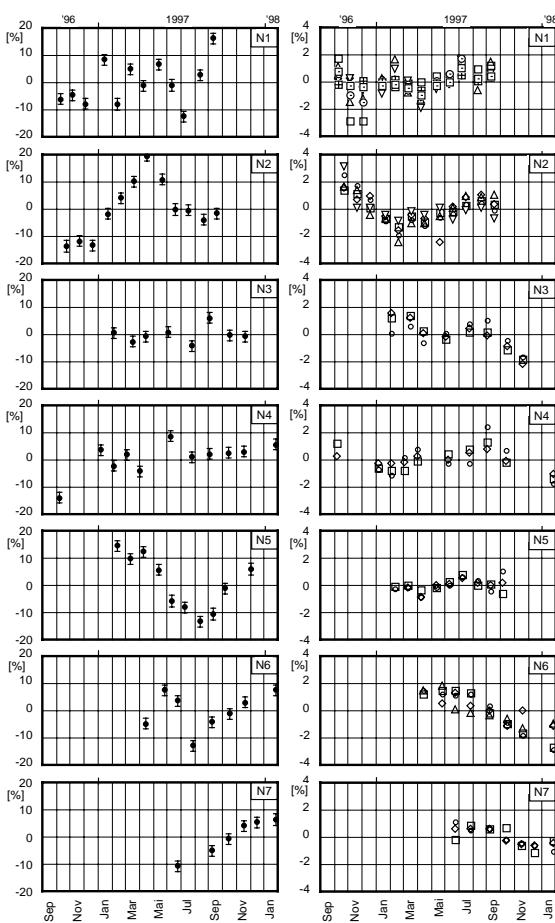
In Tabelle 5 sind für jedes Objekt die Standardfehler vom Mittelwert der bei 50 Pa Druckdifferenz geförderten Volumenströme, die vom Betrag größte Abweichung von diesem Mittelwert sowie die Spreizung der Werte, d.h. die Summe aus den Beträgen der größten positiven und größten negativen Abweichung des Volumenstroms bei 50 Pa Druckdifferenz angegeben. Der Mittelwert der Spreizungen beträgt  $19,6 \pm 2,2\%$ . Weiterhin ist das Datum der dieser Spreizung zugrundeliegende-



**Bild 1:** Überblick über alle Meßergebnisse der Messungen an den 'alten' Objekten. Links die prozentualen Abweichungen der Einzelmessungen von dem Mittelwert aus allen Messungen an dem jeweiligen Objekt, rechts die Abweichungen der Materialfeuchte in Gewichtsprozent von den Mittelwerten der jeweiligen Meßstelle.

den Messungen und der Abstand zwischen ihnen in Tagen gegeben. Ein Abstand von 182 Tagen entspricht in etwa einem halben Jahr. Bei sechs der 13 Objekte beträgt der Abstand zwischen den Extrema recht genau einem halben Jahr (A1, A2, A6, N2, N5 und N6). Dies deutet auf einen tatsächlich vorhandenen Jahresgang in der Luftdichtheit dieser Objekte hin, wobei sich die hier genannten Objekte nur zum Teil mit denjenigen decken, denen in vorangegangenen Abschnitt ein deutlicher Jahresgang zugewiesen wird.

In Abbildung 3 sind alle prozentualen Abweichungen der untersuchten Objekte im Überblick gegeben (Bild links). Im rechten Bild sind die Abweichungen Intervallweise (ca. 14-Tage-Intervalle) zusammengefaßt dargestellt. Die Fehlerbalken entsprechen jeweils der Standardabweichung des angegebenen Mittelwertes des jeweiligen Intervalls (in diesem Fall wird die Standardabweichung dem Standardfehler vorgezogen, da die zugrundeliegenden Werte nicht Meßergebnisse einer Größe sind, siehe auch [11]). In den Abbildungen 4 und 5 sind diese Darstellungen für alte und neue

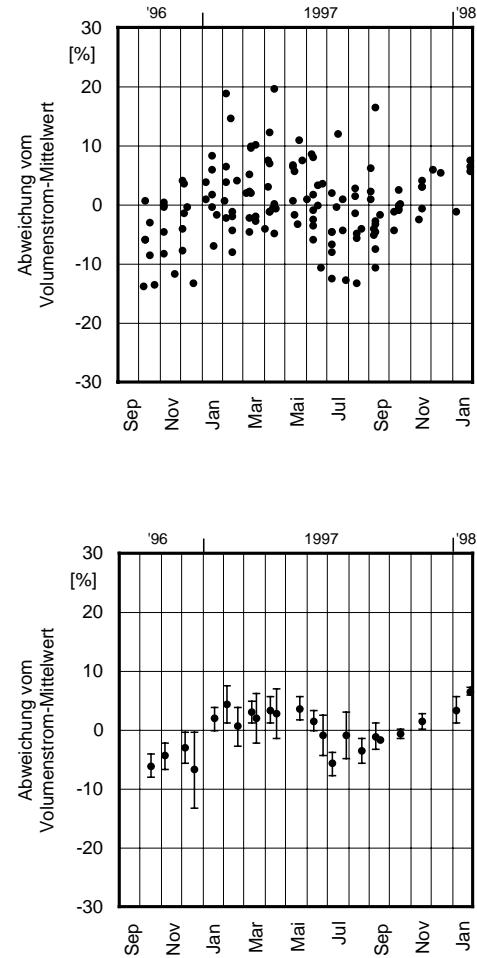


**Bild 2:** Überblick über die Meßergebnisse der Messungen an den 'neuen' Objekten. Links die prozentualen Abweichungen der Einzelmessungen von dem Mittelwert aus allen Messungen an dem jeweiligen Objekt, rechts die Abweichungen der Materialfeuchte in Gewichtsprozent von den Mittelwerten der jeweiligen Meßstelle.

Gebäude getrennt wiedergegeben.

Die Gesamtbetrachtung zeigt einen deutlichen Jahresgang in der mittleren Luftdurchlässigkeit und eine leichte mittlere Verschlechterung der Gebäudehülle nach einem Jahr. Die alten Objekte lassen in dieser Darstellung einen leichten Jahresgang der Luftdichtheit erkennen. Die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle hat sich im Mittel jedoch absolut gesehen nach einem Jahr nicht verändert. Bei den neuen Gebäuden ist anhand der gebildeten Mittelwerte ein deutlicher Jahresgang der Luftdurchlässigkeit zu erkennen. Auch die absolute Luftdurchlässigkeit nach einem Jahr ist im Mittel um ca. 5 - 10 % gestiegen (September-Werte).

Es ist also davon auszugehen, daß die die Luftdichtheit von Gebäuden in Holzbauart häufig von der Jahreszeit abhängig ist und sich über das Jahr deutlich ändern kann.

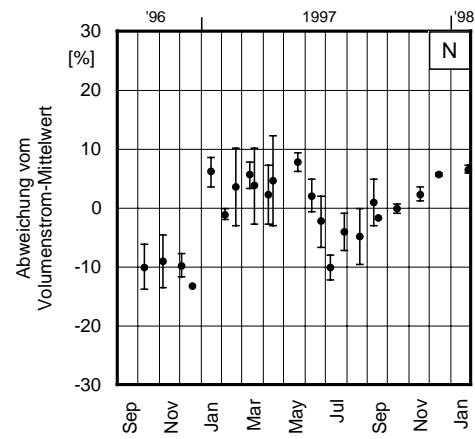
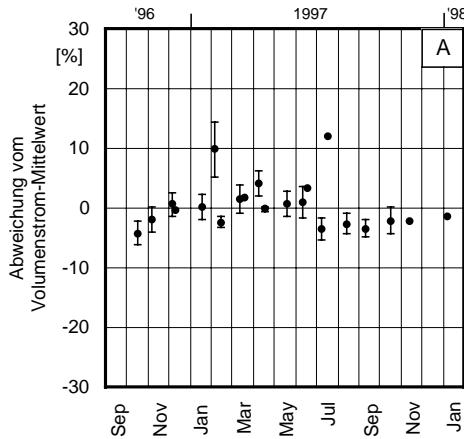
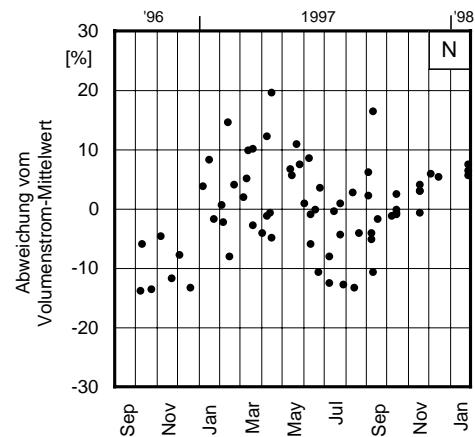
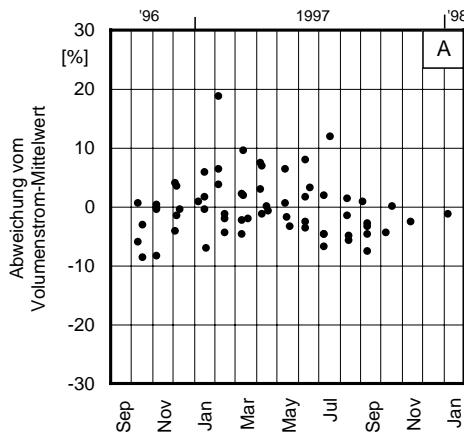


**Bild 3:** Überblick über die Meßergebnisse der Messungen aller Objekte. Im Bild rechts sind intervallweise gebildete Mittelwerte dargestellt. Die Intervalllänge beträgt jeweils ca. 14 Tage, die gezeigten Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Mittelwerte an.

## 5 Zusammenfassung

Die Luftpelldichtheit von 13 Objekten wird über Zeiträume von 5 bis 16 Monate regelmäßig gemessen. Bei vier Objekten ist eine deutliche 'Jahreskurve' zu erkennen. Bei einem dieser Objekte entspricht die Durchlässigkeit nach einem Jahr im Rahmen der Meßgenauigkeit wieder dem Ausgangswert. Bei zwei der Objekte ist eine gewisse absolute Erhöhung der Durchlässigkeit von einigen % des Mittelwertes wahrscheinlich, bei dem vierten Objekt kann eine absolute Verschlechterung der Luftpelldichtheit um ca. 10 % des Mittelwertes angenommen werden. Die Feuchtemeßwerte bei diesen Objekten durchlaufen mit guter Übereinstimmung vergleichbare, gegenläufige Veränderungen.

Die Meßwerte von drei Objekten zeigen erkennbare, aber nicht ausgeprägte Verläufe der Durchlässigkeit. Dabei entspricht die Durchlässigkeit eines Objektes nach einem Jahr im Rahmen



**Bild 4:** Überblick über die Meßergebnisse der Messungen aller älteren Objekte. Im Bild rechts sind intervallweise gebildete Mittelwerte dargestellt. Die Intervalllänge beträgt jeweils ca. 14 Tage, die gezeigten Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Mittelwerte an.

der Meßgenauigkeit wieder dem Ausgangswert. Bei einem zweiten Objekt scheint eine leichte Zunahme der absoluten Durchlässigkeit stattgefunden zu haben (wenige % des Mittelwertes). Das dritte Objekt wird erst im Laufe der Untersuchung völlig fertiggestellt, die Durchlässigkeitswerte der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums zeigen keine einheitliche Tendenz. Die Werte der zweiten Periode wiederum deuten auf eine Jahreskurve hin.

Bei fünf Objekten kann kein eindeutiger Trend in der Luftdurchlässigkeit festgestellt werden. Die Luftdurchlässigkeit dreier von der Bauart vergleichbaren Objekte zeigt deutliche Veränderungen der innerhalb relativ kurzer Zeiträume. Die Materialfeuchtwerte streuen bei diesen Objekten stark, zeigen insgesamt aber erkennbare Jahresgänge auf. Eine Deutung der großen Schwankungen ist mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich. An einem Objekt werden im Untersuchungszeitraum einige bauliche Ände-

**Bild 5:** Überblick über die Meßergebnisse der Messungen aller neuen Objekte. Im Bild rechts sind intervallweise gebildete Mittelwerte dargestellt. Die Intervalllänge beträgt jeweils ca. 14 Tage, die gezeigten Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Mittelwerte an.

rungen bzw. Verbesserungen vorgenommen, die sich etwaigen Änderungen der Durchlässigkeit der Gebäudehülle überlagern. Die Materialfeuchtemeßwerte weisen bei diesem Objekt einen deutlichen Trend, eine fast kontinuierliche Austrocknung im Untersuchungszeitraum, auf. Ein weiteres Objekt wird ebenfalls erst zu Beginn des Untersuchungszeitraums innen fertiggestellt. Auch hier findet vermutlich eine Überlagerung von Effekten statt. Ab Fertigstellung ist bei diesem Gebäude ein deutlicher Trend zu einer größeren Durchlässigkeit erkennbar. Die Materialfeuchtwerte zeigen im Gegensatz dazu vom Beginn des Untersuchungszeitraums an eine deutliche Austrocknung der Hölzer.

Bei einem Objekt kann es sich bei dem ermittelten Verlauf sowohl um eine allgemeine Zunahme der Durchlässigkeit als auch um einen Jahresgang handeln. Eine abschließende Beurteilung ist nicht möglich.

Zusammenfassend kann insgesamt davon ausgegangen werden, daß Luftpichtigkeitsmessungen mit der Blower Door-Methode derzeit i.d.R. eine langfristige Reproduzierbarkeit innerhalb einer 20-40% Schranke haben. Hierbei entfallen jeweils die Hälfte der Unsicherheit auf die Messung selbst und auf das Gebäude. Im Einzelfall (Messung bei starkem Wind, starke Austrocknung des Gebäudes, nicht-dauerhafte Detaillösungen der Luftpichtigkeitschicht) kann diese Unsicherheit deutlich größer werden. Die Interpretation der Ergebnisse von Luftpichtigkeitsmessungen und insbesondere mögliche Konsequenzen aus einer Messung müssen diese Unsicherheit berücksichtigen.

## Literatur

- [1] CEN/TC 89/AHG "Airtightness of buildings". *prEN WI 00089005:1998-05 Thermal performance of buildings – Determination of building airtightness – Fan pressurization method*, 1998.
- [2] Elmroth, A. und Logdberg, A. *Airtight houses and energy consumption*. Building Research and Practice (1981), 2, S. 102–116.
- [3] O'Sullivan, P. und Jones, P. *The ventilation performance of houses - a case study*. In 3rd AIC Conference, London, UK, Energy Efficient Domestic Ventilation Systems for Achieving Acceptable Indoor Air Quality (September 20-23 1982).
- [4] Yoshino, H. *Airtightness Standards for Residential Buildings in Japan*. In Proceedings of the 5th ASHRAE/DOE/BTECC Conference on the Thermal Performance of the Exterior Building Envelope (December 1992), S. 718–723.
- [5] Fukushima, A., Irie, Y., Suzuki, K. und Konishi, K. *Airtightness performance of houses and simple measurement method for airtightness*. Techn. ber., Report for Hokkaido branch meeting of Architectural Institute of Japan (in Japanese), 1990.
- [6] Kim, A. und Shaw, C. *Seasonal variation in airtightness of two detached houses*. In ASTM, Symposium on Measured Air Leakage Performance of Buildings (April 2-3 1984).
- [7] Proskiw, G. *Measured Airtightness of 24 Detached Houses over Periods of up to Three Years*. In Airflow Performance of Building Envelopes, Components, and Systems (1995), ASTM STP 1255, S. 248–265.
- [8] Canadian Home Builders' Association. *R-2000 Builder's Manual*. 150 Laurier Avenue West, Suite 200, Ottawa, Ontario K1P 5J4, 1994.
- [9] Persily, A. *Repeatability and Accuracy of Pressurization Testing*. In DOE/ASHRAE Conference 'Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings II', Las Vegas (1982).
- [10] Böhmer, H. *Nachmessung der Luftpichtigkeit an bewohnten Niedrigenergiehäusern*. In Messung der Luftpichtigkeit von Gebäuden – Theorie und Praxis (1997), 8. EUZ Baufachtagung, Energie und Umweltzentrum am Deister e.V.
- [11] Taylor, J. *An Introduction to Error Analysis – The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2 Ed. University Science Books, Sausalito, California, 1997.

**Tabelle 2:** Ausbildung der Luftdichtheitsschicht der untersuchten Objekte. Die Angaben sind Planungsunterlagen bzw. Aussagen der Bauherren/Hersteller entnommen.

	Inst.-E.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
	(Außen-)Putz Folie OSB-Platten Gipskarton-Platten Baupappe u. dgl.	x	x	x	x	x x	x	x	x	x	x	x x	x x	x
	verspachtelt Akryl, Silikon etc. Folie überlappt PU-Schaum Butyl-Kautschukband o.ä. Kompriband Baupappe u. dgl. Klebeband			x x	x x	x	x x x	x	x x x	x x x	x	x	x	x
	keine bes. Maßnahme PU-Schaum Akryl, Silikon etc. Baupappe u. dgl. Klebeband Kompriband Gummiprofil o.ä.	x x	x x	x	x	x	x x	x	x x	x x	x x	x x	x x	x x

**Tabelle 3:** Kategorisierung von gewählten Materialfeuchtemessstellen.

Kurzbez.	Bezeichnung
RL	Meßstelle an Holz mit direktem Raumluftkontakt
VE	Meßstelle an raumseitig verkleidetem Holz
VS	Meßstelle an raumseitig versiegeltem Holz (Lack etc.)
UL	Meßstelle an Holz mit relativ direktem Umgebungsluft-Kontakt (Abseitenbereich etc.)

**Tabelle 4:** Meßstellen, an denen im Rahmen der Wiederholungsmessungen jeweils die Materialfeuchte bestimmt wird. Beschreibung des 'Typs' der Meßstelle anhand der in Tabelle 3 angegebenen Kurzbezeichnungen.

Meßst.	Symb.		Objekt											
			Kategorie 'alte'						Kategorie 'neue'					
A1	A2	A3	A4	A5	A6	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7		
1	○	RL	RL	RL	VE	RL	RL	RL	VE	RL	VS			
2	□	RL	RL	VE	UL	RL	RL	RL	VE	RL	VS			
3	◊	RL	RL	VE	VE	VS	RL	RL	VE	RL	VE			
4	△	RL	RL	UL	UL	RL	VE	RL	VE	RL	RL			
5	▽	RL	RL	UL	UL	UL	VE	RL	VE	RL	RL			
6	○	田	田	田	田	田	田	田	田	田	田			
7	田	田	田	田	田	田	田	田	田	田	田			
8	□	田	田	田	田	田	田	田	田	田	田			

**Tabelle 5:** Ermittelte maximale prozentuale Abweichung des Volumenstroms vom Mittelwert, Differenz zwischen größtem und kleinstem gemessenen Volumenstrom in Prozent vom Mittelwert und zeitlicher Abstand zwischen den Extremwerte der untersuchten Objekte im Überblick.

Obj.	$\sigma_{\Delta}$	$ \Delta_{\max} $	Diff.	Datum min	Datum max	$\Delta t [d]$
A1	1,0	7,1	12,9	9-10-1996	9-4-1997	182
A2	1,2	6,6	13,1	9-7-1997	15-1-1997	175
A3	2,3	19,0	27,4	16-10-1996	5-2-1997	112
A4	1,5	8,1	15,5	11-9-1997	12-6-1997	91
A5	1,0	4,0	7,0	20-5-1997	4-2-1997	105
A6	1,5	12,1	19,0	17-1-1997	18-7-1997	182
N1	2,4	16,5	28,8	9-7-1997	10-9-1997	63
N2	3,0	19,7	33,2	24-10-1996	17-4-1997	175
N3	1,1	6,2	10,3	25-7-1997	3-9-1997	40
N4	2,0	13,8	22,6	8-10-1996	10-6-1997	245
N5	3,0	14,6	27,8	14-8-1997	12-2-1997	183
N6	2,7	12,7	20,5	29-7-1997	27-1-1998	182
N7	2,5	10,5	17,0	24-6-1997	27-1-1998	217