



Zur Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten bei Passivhäusern Feldmessungen



Endbericht

IEA SHC TASK 28 / ECBES ANNEX 38

**Dipl.-Ing. Søren Peper
Dipl.-Phys. Oliver Kah
Dr. Wolfgang Feist**

Juni 2005

Zur Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten bei Passivhäusern

Feldmessungen

Endbericht

IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38

**Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen
Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar
Housing' der Internationalen Energie Agentur IEA**

Subtask D: Monitoring und Evaluierung

<p>Autoren:</p> <p>Dipl.-Ing. Søren Peper Dipl.-Phys. Oliver Kah Dr. Wolfgang Feist</p> <p>Herausgeber:</p> <p>Passivhaus Institut Rheinstraße 44/46 D-64283 Darmstadt</p> <p>Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: info@passiv.de internet: www.passiv.de</p> <p>Darmstadt Juni 2005</p>	<p>Dieser Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojekts IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38 als nationale Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar Housing' der Internationalen Energieagentur IEA</p> <p>Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Forschungsarbeiten im Subtask D: Monitoring und Evaluierung, darin der Unterpunkt „Wiederholung von Luftdichtheitsmessungen in sehr lange bestehenden Gebäuden“</p> <p>Die Nationalen Forschungsarbeiten wurden teilweise finanziert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH (BEO).</p> <p>Danksagung: Unser besonderer Dank geht an die beteiligten Architekten und Bauträger und insbesondere an alle Bewohner, welche die Nachmessungen ermöglicht haben.</p>
--	---

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zusammenfassung: Dauerhaftigkeit bei der Luftdichtheit	2
2	Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten	4
2.1	Literaturbasis zur Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit	5
2.1.1	Schweden	5
2.1.2	England	6
2.1.3	Dänemark	8
2.1.4	Japan	9
2.1.5	Kanada	9
2.1.6	Deutschland	10
2.1.7	Resümee Literaturstudie	13
2.2	Dichtstoffe und Klebemittel	14
3	Nachmessungen	15
3.1	Reihenhäuser Darmstadt-Kranichstein (Massivbau)	16
3.1.1	Nachmessung	18
3.1.2	Quantitative Messergebnisse	24
3.2	Einfamilienhäuser Bretten (Holzleichtbau)	25
3.2.1	Nachmessung	30
3.2.2	Quantitative Messergebnisse	35
3.3	Siedlung Lindlar / Hohkeppel (Holzleichtbau)	36
3.3.1	Nachmessungen	41
3.3.2	Quantitative Messergebnisse	44
3.4	Einfamilienhäuser Bamberg und Stegaurach (Holzleichtbau)	46
3.4.1	Nachmessung	48
3.4.2	Quantitative Messergebnisse	54
3.5	Passivhaus-Siedlung Hannover-Kronsberg (Mischbau)	55
3.5.1	Nachmessungen	59
3.5.2	Quantitative Messergebnisse	63
3.6	Reihenhäuser Rheinmünster und Bühl (Massiv mit Betonschalungssteinen)	64
3.6.1	Nachmessungen	66
3.6.2	Quantitative Messergebnisse	71
4	Zusammenfassende Beurteilung Luftdichtheitskonzepte	72
5	Literatur	75
6	Anhang	79

1 Einleitung und Zusammenfassung: Dauerhaftigkeit bei der Luftdichtheit

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle ist für das schadenfreie und energiesparende Bauen eine zwingende Voraussetzung, was in zahlreichen Publikationen belegt ist. Dabei muss erwartet werden, dass die geforderte bzw. realisierte Luftdichtheit über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes bestehen bleibt. Aussagen zur Dauerhaftigkeit, speziell für die Klasse von sehr gut luftdichten Gebäude ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$) liegen bisher allerdings nicht vor. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Forschungsprojektes der Internationalen Energie Agentur „IEA Task 28, Annex 38“ bei insgesamt 17 Passivhäusern Luftdichtheits-Nachmessungen durchgeführt. Damit konnte die Dauerhaftigkeit der realisierten Konzepte nach 1,4 bis 10,5 Jahren überprüft werden. Es wurden Reihen- und Einzelhäuser in unterschiedlichen Bauweisen (Massiv-, Leicht- und Mischbauweise) an acht Standorten untersucht.

Eine vorangestellte Literaturrecherche und Auswertung gibt einen Überblick über die wenigen bisher publizierten Untersuchungen zu Gebäuden bei nicht so guten Luftdichtheitswerten, welche sich u.a. auch mit der Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit beschäftigen. Bis auf deutliche Verschlechterungen im ersten Jahr bei einigen Holzhäusern mit – aus heutiger Sicht – mangelhaften Luftdichtheitskonzepten, zeigen die in diesem Punkt bewertbaren Gebäude aus der Literatur überwiegend etwa gleichbleibende Messwerte.

Bei den für diese Studie durchgeführten Messungen wurden Passivhäuser ausgewählt, von denen gut dokumentierte Erstmessungen vorlagen. So konnten bei den Nachmessungen insbesondere die bei den Erstmessungen gefundenen Leckagen überprüft werden.

Für 16 der 17 Gebäude wurden – für die hohen Passivhausanforderungen mit dem Grenzwert $n_{50} = 0,6 \text{ 1/h}$ – gute bis sehr gute Nachmessergebnisse festgestellt. Als Mittelwert dieser 16 Passivhäuser hat sich bei den Nachmessungen ein n_{50} -Wert von 0,42 1/h ergeben. Die Ausnahme stellt ein Gebäude dar, bei dem die Hauptleckagen die Qualität der anderen Verbindungen überlagern. Hier hat sich ein n_{50} -Wert von 1,2 1/h ergeben und es kann keine Aussage über die Langzeitstabilität gemacht werden. Von den anderen 16 Objekten kann festgestellt werden, dass die Veränderungen zwischen Erst- und Nachmessung fast immer innerhalb der Messgenauigkeit liegen bzw. bei 5 Gebäuden sogar eine deutliche Verbesserung der Messwerte aufgrund von Nachbesserungen, die auf den ersten Drucktest gefolgt waren, vorliegen.

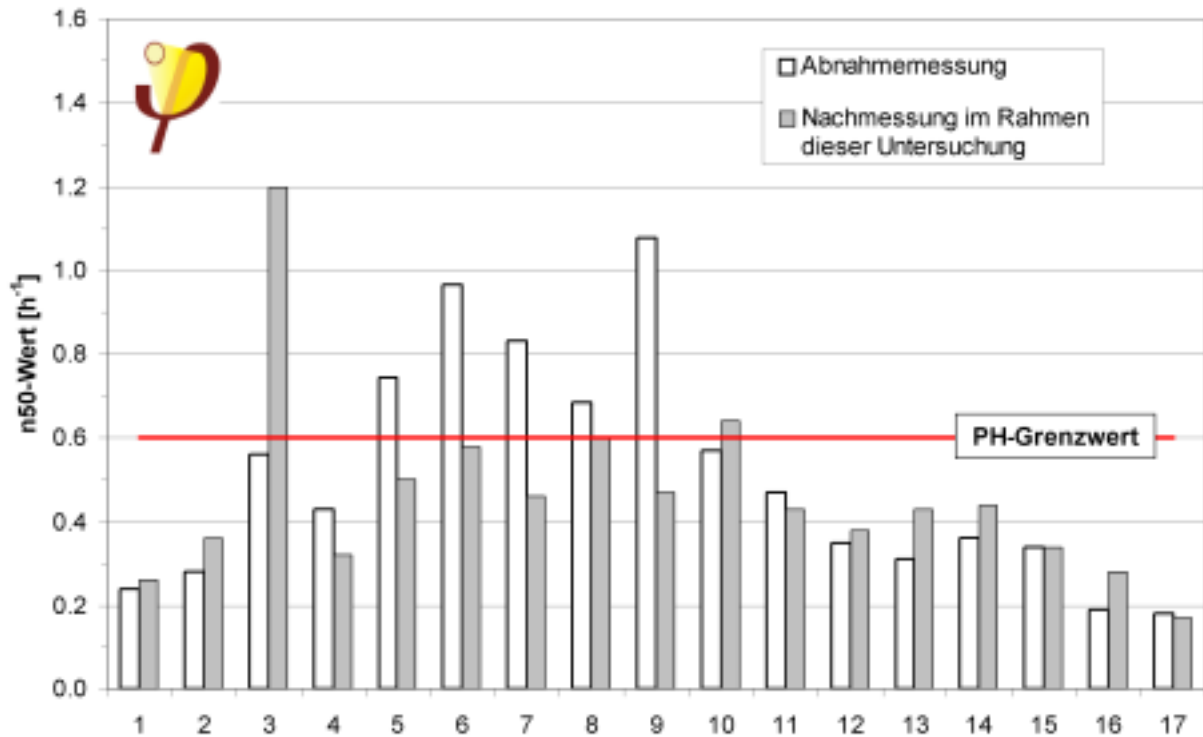


Abbildung 1: Übersicht über die Messergebnisse der Luftdichtheitsmessungen der 17 untersuchten Gebäude (Abnahme- und Nachmessungen im Rahmen dieser Untersuchung).

Für die Dauerhaftigkeit der Luftdichtheitskonzepte zeigt sich nach diesen Messungen ein sehr positives Bild. Die von den jeweiligen Planern und Architekten gewählten Konzepte und Verbindungen sind auf jeden Fall für den Zeitraum zwischen Abnahme- und Nachmessung als erfolgreich zu bewerten. Dabei sind alle Bauweisen gleichmaßen positiv einzustufen. Es hat sich gezeigt, dass nicht die Bauweisen, sondern vielmehr die Planungsqualität für die erfolgreiche Umsetzung der hohen Luftdichtheit entscheidend ist. Selbstredend muss natürlich die Planung am Objekt auch entsprechend sorgfältig umgesetzt werden. Eben genau an diesem Punkt zeigt sich dann auch, ob die Planungen gut umsetzbare Konzepte enthalten hat.

Bei allen untersuchten Objekten ist nicht davon auszugehen, dass sich in den nächsten Jahren eine nennenswerte Verschlechterung der Luftdichtheit einstellen wird. Dafür liegen bei diesen Objekten Planungen und Ausführungen zugrunde, welche geeignete Produkte verwenden und diese nach anerkannten Qualitätsvorgaben einsetzen. Die zu erwartenden Bewegungen von Elementen am Bau sind nach den jeweils verstrichenen Zeitabständen bereits weitgehend eingetreten. Nach den vorliegenden Ergebnissen kann daher davon ausgegangen werden, dass die Luftdichtheit in der hier untersuchten Klasse von sehr gut luftdichten Gebäuden ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$) dauerhaft Bestand hat. Eine in einigen Literaturstellen beschriebene Verschlechterung während der ersten beiden Jahre kann bei den untersuchten Passivhäuser nicht gefunden werden.

2 Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten

Die Bedeutung der Luftdichtheit der Gebäudehülle für das schadenfreie und energiesparende Bauen ist in zahlreichen Publikationen bereits belegt worden [Feist 1995], [Zeller u.a. 1995], [Geißler/Hauser 1996], [Schnieders/Such 1998], [Peper 1999], [Peper 1999a], [Peper 2000], [Schnieders 2001] sowie [RWE 2004]. In der Normung wird die luftdichte Gebäudehülle seit langem gefordert [DIN 4108-2] und [DIN 4108-7].

Im Vordergrund für die Forderung nach einer luftdichten Gebäudehülle stehen die Bauschadensfreiheit des Gebäudes (insbesondere der Schutz vor Tauwasserausfall in der Wandkonstruktion) und der erhöhte Komfort für die Nutzer (Zugluffreiheit, Vermeidung von „Kaltluftseen“). Daneben ist die Heizenergieeinsparung durch bessere Luftdichtheit von Bedeutung. Dieser Einfluss wird in Abbildung 2 verdeutlicht: bei dem gleichen, ansonsten unveränderten Beispiel-Gebäude erhöht sich der Heizenergiebedarf „nur“ durch die Verschlechterung der Luftdichtheit erheblich.

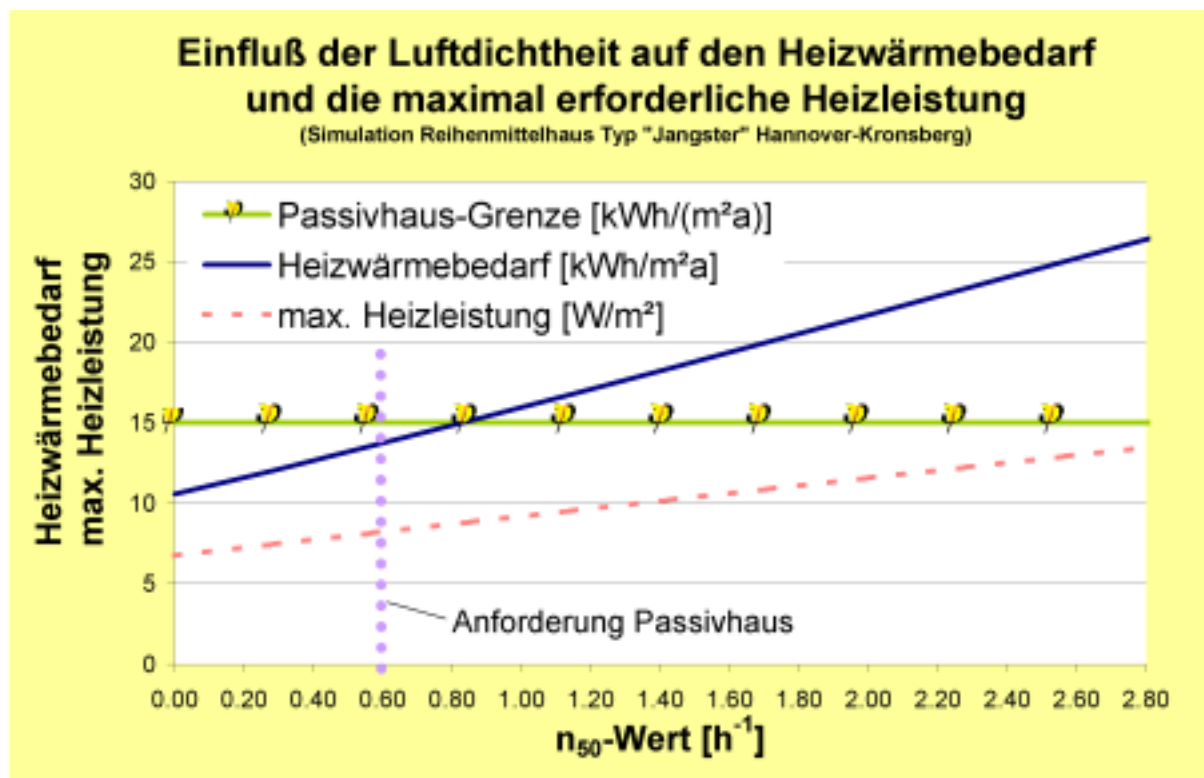


Abbildung 2: Einfluss der Luftdichtheit auf Heizwärmebedarf und max. Heizleistung am Beispiel eines Reihenmittel-Hauses (nach [Schnieders 1998]).

Dass sich reproduzierbar sehr gute Messergebnisse für die Luftdichtheit bei Passivhäusern mit konsequent geplanten Luftdichtheitskonzepten ergeben, belegt die Aufstellung in Abbildung 3 aus [Peper 2000]. Dabei handelt es sich durchweg nicht um Gebäude mit aufwendigen handwerklichen Nachdichtarbeiten.

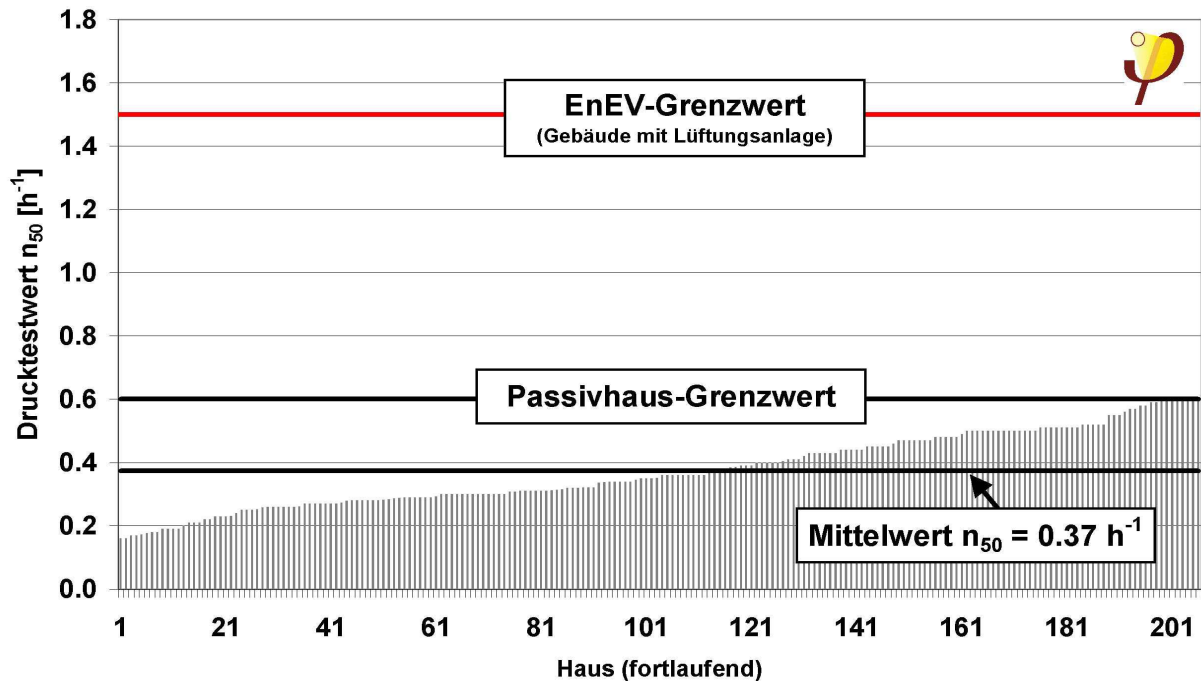


Abbildung 3: Aufsteigend sortierte Drucktestergebnisse (alles Erstmessungen) v on 206 Passivhäusern (nach [Peper 2000]).

2.1 Literaturbasis zur Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit

Die Luftdichtheit einer Gebäudehülle muss über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes sichergestellt werden. Das Ergebnis des Blower Door Tests nach Fertigstellung der Gebäudehülle stellt strenggenommen nur eine Momentaufnahme dar. Speziell über die Dauerhaftigkeit der Luftdichtheitskonzepte bzw. der ausgeführten Abdichtungen sind allerdings nur wenige Untersuchungen dokumentiert. Einige der Arbeiten beschäftigen sich nur ganz am Rande mit der Frage der Dauerhaftigkeit, im Kern wird dort z.B. die jahreszeitliche Schwankung der Luftdichtheit untersucht. Keine der Veröffentlichungen beschäftigt sich mit Untersuchungen von Gebäuden mit Luftdichtheitswerten deutlich unter $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ oder mit Passivhäusern und deren Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit.

Im folgenden werden die in der Literatur verfügbaren Untersuchungen nach Ländern geordnet kurz analysiert.

2.1.1 Schweden

Eine frühe dokumentierte Untersuchung zur Gebäudeluftdichtheit, die unter anderem auch auf die Dauerhaftigkeit mittels Luftdichtheits-Nachmessungen eingeht, wurde 1977 bis 1980 an fünf Gebäuden durchgeführt [Elmroth/Logdberg 1981]. Es handelt sich um Einfamilienhäuser etwa 40 km östlich von Stockholm mit relativ guter Luftdichtheit zwischen $n_{50} = 1,0$ und $1,6 \text{ h}^{-1}$. In Abbildung 4 ist zu erkennen, dass die ersten Messungen der Häuser (1977) deutlich niedrigere Luftdichtheitswerte zeigen

als die zwei, bzw. drei Jahre später. Die Autoren geben hier als Grund an, dass die Holzkonstruktion vermutlich im ersten Jahr ausgetrocknet sind und dies zur Verschlechterung der Luftdichtheit geführt hat. Zwischen den Zweit- und Dritt-Messungen beurteilen sie die Messwerte als gleichbleibend im Rahmen der Messgenauigkeit. Sie folgern, dass die Luftdichtheit nach dem Austrocknen über einen langen Zeitraum konstant bleibt.

Mit einem besseren – mit den heute verfügbaren Materialien und Verfahren realisierten – Luftdichtheitskonzept würde die Verringerung der Holzfeuchte vermutlich keinen oder nur einen minimalen Einfluss auf die Veränderung der Luftdichtheit haben. Holzwerkstoffe, welche starken Trocknungs- und Schwindvorgängen unterliegen, sind ohne zusätzliche Maßnahmen nicht geeignet um luftdichte Anschlüsse zu gewährleisten.

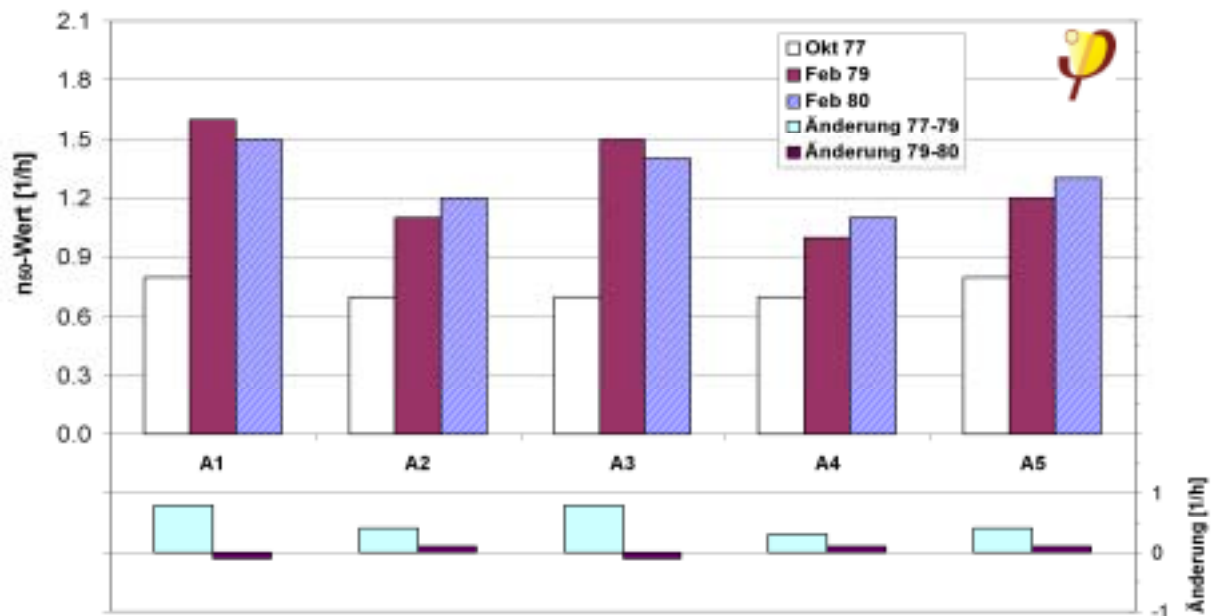


Abbildung 4: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen an fünf schwedischen Häusern (nach [Elmroth/Logdberg 1981]).

2.1.2 England

Eine frühe Untersuchung aus England aus dem Jahre 1978 bis 1982 beschäftigt sich mit der natürlichen Infiltration von massiven Reihenhäusern und den damit verbundenen Energieverlusten [O'Sullivan/Jones 1982]. Vier der dabei untersuchten Wohngebäude wurden im Untersuchungszeitraum vier mal bei 50 Pa Differenzdruck (mit „Conventional pressurization techniques“) auf ihre Luftdichtheit überprüft. Dabei wurden keine n_{50} -Werte und keine Hausvolumina sondern nur die jeweiligen Leckagevolumenströme angegeben. Eine grobe Abschätzung der n_{50} -Werte kann bei freier Lüftung über die Formel

$$n_{inf} = n_{50} * e$$

mit $e = 0,07$ vorgenommen werden. Daraus ergibt sich ein Bandbreite recht hoher n_{50} -Werte von etwa 5 bis 8 h^{-1} , im Mittel 6 h^{-1} . Diese Werte zeigen, dass kein besonders strenges Luftdichtheitskonzept vorgelegen hat!

Die Leckagevolumenströme werden hier dargestellt, da deren Änderung über die Zeit ebenfalls Aussagen zur alterungsbedingten Veränderung der Luftdichtheit zulassen. In Abbildung 5 zeigt sich die deutliche Verschlechterung der Luftdichtheit bei allen Häusern nach der ersten Messung 1978 bei allen nachfolgenden Messungen. Bei Haus 1 ist die Entwicklung am stärksten: Der Leckagevolumenstrom erhöht sich um mehr als 100 %. In der Untersuchung wird als Ursache für die starke Verschlechterung nach dem ersten Jahr die Holztrocknung als Hauptursache angegeben. Bei den Folgemessungen sind die Änderung bei allen Gebäuden wesentlich geringer. Die Schwankungen der Leckagevolumenströme liegen zwischen -360 und $+540 \text{ m}^3/\text{h}$, was Änderungen zwischen -11 und $+23$ % entspricht.

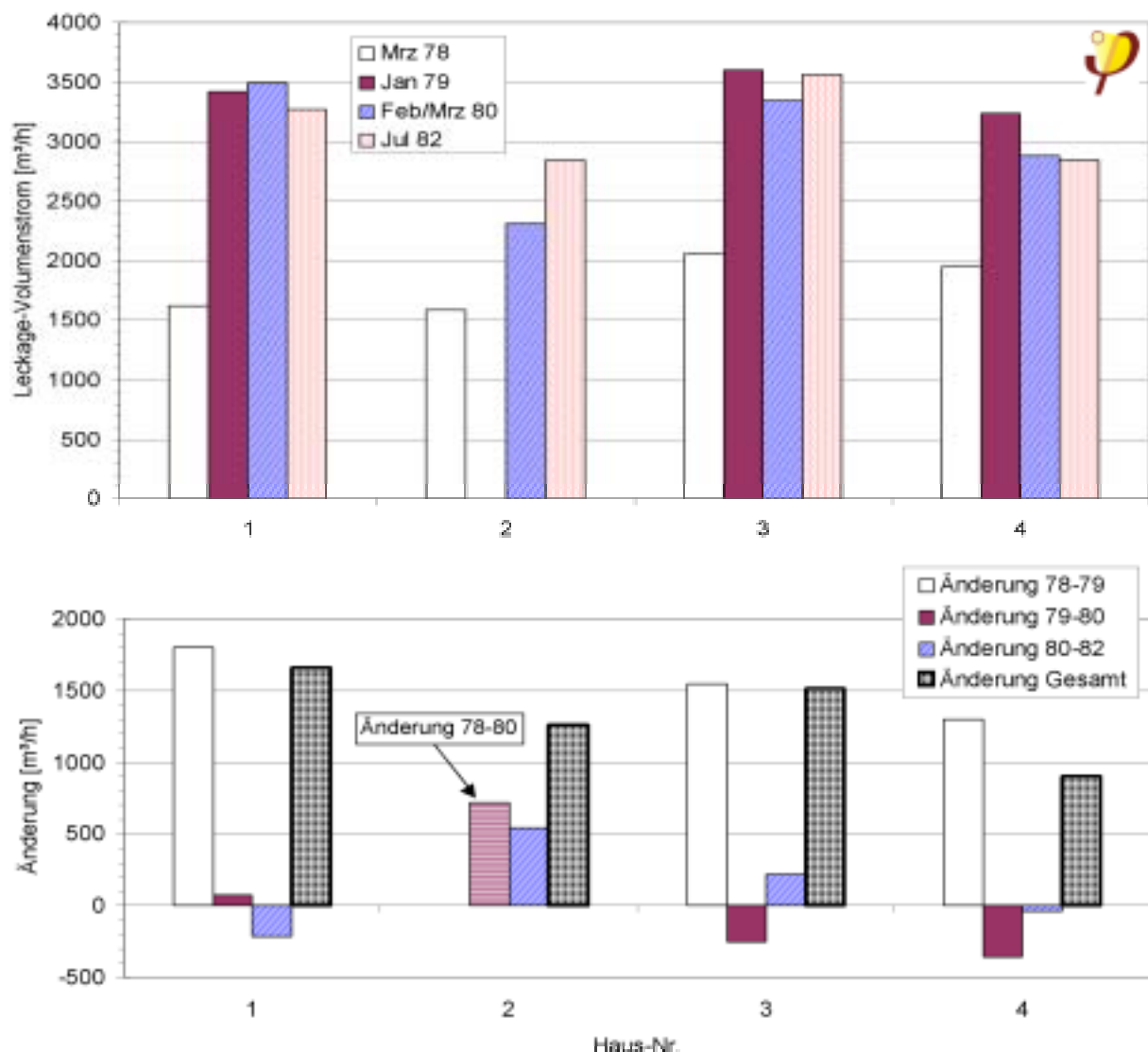


Abbildung 5: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen an vier englischen Gebäuden (nach [O'Sullivan/Jones 1982]). **ACHTUNG:** Es sind abweichend zu den anderen Darstellungen KEINE n_{50} -Werte sondern direkt die Leckage-Volumenströme dargestellt!

2.1.3 Dänemark

In Dänemark wurde eine Untersuchung zur Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitsmaßnahmen 1980/1982 an sechs Niedrigenergiehäusern (NEH) durchgeführt [Saxhof/ Nielsen 1982]. Dabei handelt es sich um 6 freistehende unterschiedliche Einfamilienhäuser in Massiv- und Leichtbauweise (Objekt A-F in Abbildung 6). Gebäuden B und F sind aus vorgefertigten Elementen montiert worden. Die Luftdichtheit wurde zuerst 1980, zwischen zwei bis fünf Jahren nach Erstellung der Gebäude, gemessen. Die Nachmessungen wurden 1982 durchgeführt. Dabei lagen die Messergebnisse der Erstmessungen zwischen $n_{50} = 0,26$ und $3,2 \text{ h}^{-1}$, die der Nachmessung nach 2 Jahren zwischen $0,17$ und $3,8 \text{ h}^{-1}$.

Es handelt sich bei 5 der 6 NEH mit n_{50} -Werten unter bzw. um $1,5 \text{ h}^{-1}$ um bereits recht gute Messergebnisse. Die Schwankungen zwischen Erst- und Zweitmessungen liegen bei $-0,1$ bis $+0,9 \text{ h}^{-1}$, es gibt also Verschlechterungen sowie leichte Verbesserungen der Messwerte. Allerdings ist Gebäude C mit der deutlichen Verschlechterung nicht wirklich aussagekräftig: Es wurde 1981 baulich verändert (Es wurde ein neues Treppenhaus mit einer undichten Tür angebaut). Betrachtet man die restlichen fünf Gebäude (Veränderung zwischen $-0,1$ bis $+0,2 \text{ h}^{-1}$) kann keine systematische alterungsbedingte Veränderung der Luftdichtheit festgestellt werden. Die Autoren geben als Gründe für die Veränderungen die unterschiedlichen Messabläufe (bei den Erstmessungen waren drei der Häuser nur mit Unterdruck geprüft worden) und konstruktive Veränderungen an. Von dieser Aussage stellt Haus F eine Ausnahme dar: Hier lag die Änderung hauptsächlich in einer neuen Leckage eines Fensters begründet. An den Abdichtungen der restlichen Gebäudehülle konnten ebenfalls keine nennenswerten Veränderungen festgestellt werden.

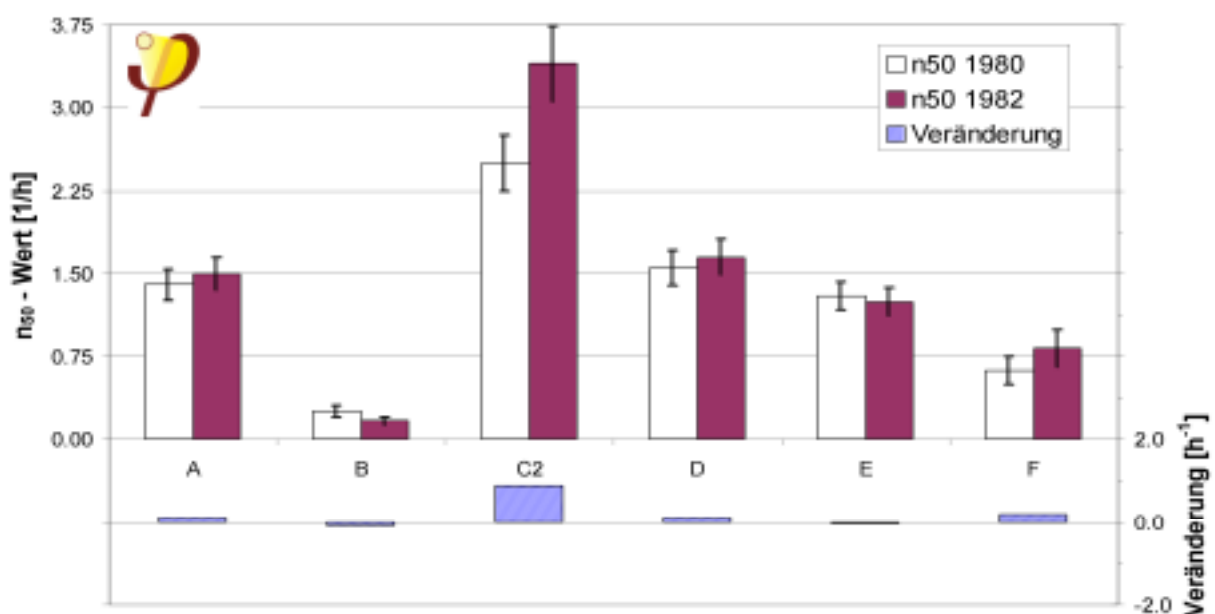


Abbildung 6: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen an sechs dänischen Niedrigenergie-Einfamilienhäusern (nach [Saxhof/Nielsen 1982]).

Die Messgenauigkeiten sind pauschal mit 10 % bzw. etwa 20 bis 25 % bei den beiden sehr dichten Gebäuden angegeben. Die Ergebnisse in Abbildung 6 zeigen, dass die Änderungen der Messwerte – außer bei Haus C2 – alle im Schwankungsbereich der angegebenen Messgenauigkeit liegen.

2.1.4 Japan

In [Yoshino 1992] ist von August 1988 bis zum Juni 1990 (23 Monate) ein Haus in Japan insgesamt 10 mal im Abstand von einem bis vier Monaten auf die Luftdichtheit untersucht worden. In der Abhandlung gibt es keine weitere Information zum Gebäude, dem Abdichtungskonzept, den Messungen oder den Leckagen. Die jahreszeitliche Schwankung der Luftdichtheit scheint von einer gewissen Verschlechterung der Luftdichtheit überlagert zu sein. Klare Erkenntnisse über die Ursachen dafür werden nicht gegeben. Aus diesem Grund kann die Untersuchung bezüglich der Dauerhaftigkeit nicht eindeutig ausgewertet werden.

2.1.5 Kanada

In Kanada wurde in der Zeit von 1986 bis 1990 24 freistehende Einfamilienhäuser in Holzbauweise auf die saisonale Schwankung der Luftdichtheit und auf möglichen Verschlechterungen derselben untersucht [Proskiw 1993]. Ein Teil der Gebäude ist mit PE-Folien abgedichtet, der andere Teil mit einem „Airtight Drywall Approach (ADA)“. Einem System, welches vergleichbar ist mit der Abdichtung durch raumseitige harte Holzwerkstoffplatten (OSB). Von 23 der 24 Häusern liegen auswertbare Messdaten vor. Die Gebäude wurden in bis zu monatlichen Messungen zwischen 1,6 und 3 Jahre – im Mittel 2,6 Jahre – untersucht. Die Werte der Erstmessungen lagen zwischen $0,36$ und $1,67 \text{ h}^{-1}$, die der letzten Messungen zwischen $0,4$ und $1,77 \text{ h}^{-1}$. Die n_{50} -Werte aller Häuser lagen – mit einer Ausnahme – unter dem dort gültigen Grenzwert von $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$. Die Veränderungen der n_{50} -Werte betragen $-0,28$ bis zu $+0,3 \text{ h}^{-1}$. Der Autor nennt als Ergebnis der Studie zum Bereich der Dauerhaftigkeit, dass keine signifikanten Veränderungen der Luftdichtheit beider Luftdichtheitsysteme festgestellt werden konnten.

Für die Untersuchung zur jahreszeitlichen Schwankung der Luftdichtheit von zwei Gebäuden in Holzbauweise von Andrew Kim und Chia Shaw [Kim/Shaw 1986] wurden über ein Jahr alle zwei Wochen Luftdichtheitstests durchgeführt. Bezüglich der Dauerhaftigkeit können bei diesem kurzen Zeitraum keine belastbaren Aussagen getroffen werden. Die Messwerte lagen bei beiden Häusern nach einem Jahr mit leichter Verbesserung jeweils in den gleichen Größenordnungen.

Der jahreszeitliche Einfluss auf die Luftdichtheit ist bei dem undichteren Gebäude ($n_{50} \approx 7,8 \text{ h}^{-1}$) stärker als bei dem dichteren Gebäude ($n_{50} \approx 2,9 \text{ h}^{-1}$). Es ist zu vermuten, dass bei deutlich dichteren Gebäuden wie Passivhäuser, der jahreszeitliche Einfluss verschwindend gering wird.

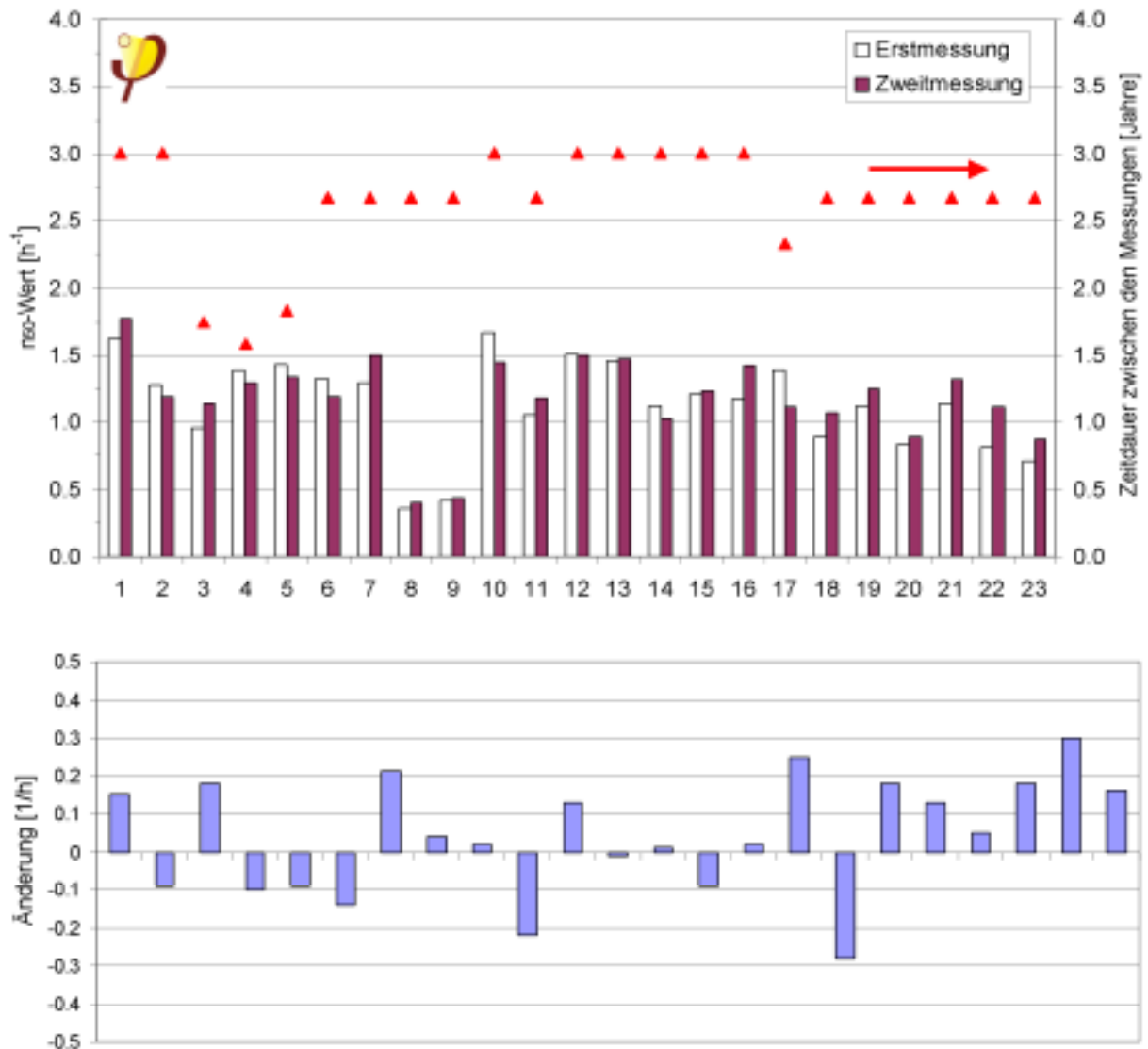


Abbildung 7: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen an 23 freistehenden Einzelhäusern in Kanada [nach [Proskiw 1993]].

2.1.6 Deutschland

In Deutschland wurden zwei Untersuchungen über verschiedene Niedrigenergiehäuser veröffentlicht, welche sich unter anderem auch mit der Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit befassen. Eine weitere Untersuchung befasst sich mit der Reproduzierbarkeit der Luftdichtheitsmessungen und der jahreszeitlichen Schwankung der Luftdichtheitswerte. Andere vorliegende Untersuchungen aus Deutschland wie z.B. [Geißler/ Hauser 1996] machen bezüglich der Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit keine Aussagen.

Untersuchung Niedersachsen

In Niedersachsen wurden 1992 und 1996 – wie in Dänemark – 6 Niedrigenergiehäuser auf die Veränderung der Luftdichtheit untersucht. Dabei handelt es sich um

vier Wohngebäude, einen Kindergarten und ein Fimengebäude. In [Böhmer 1998] werden die Messergebnisse der Erstmessung (1992) mit n_{50} -Werten zwischen $0,66$ und $2,3 \text{ h}^{-1}$ und die der Zweitmessung (1996) zwischen $0,89$ und $3,52 \text{ h}^{-1}$ angegeben. Es lagen 4 der 6 Gebäude bei der Erstmessung deutlich unter dem nach der EnEV seit 2002 gültigen Grenzwert für Häuser mit Lüftungsanlagen von $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$. Die Veränderungen nach etwa 4 Jahren betragen $0,09$ bis $1,44 \text{ h}^{-1}$. Es handelt sich dabei durchgehend um eine Verschlechterungen der Messwerte. In dem Bericht [Böhmer 1998] werden allerdings keine Messgenauigkeiten angegeben. Es ist daher nicht möglich, alle Veränderungen der Luftdichtheitsmessung eindeutig mit einer Verschlechterung der luftdichten Ebene zu begründen. Die Veränderungen bei drei der Häuser könnten gut auch innerhalb der Schwankung der üblichen Messgenauigkeit liegen. Nach [Geißler 2001] beträgt diese bereits ohne Windeinfluss $\pm 10\text{-}15 \%$ und kann sich bei stärkeren Windanströmung auch mehr als verdoppeln.

In der Untersuchung werden als Hauptursache für die Verschlechterungen Schwindvorgänge an Holzbauteilen, durchlässige Dichtungen und Risse oder Fugen genannt. Viele der Mängel wurden als reparabel bei nachträglichen Abdichtungsmaßnahmen eingestuft [Böhmer 1998]. Es zeigt sich mit der Untersuchung, dass unsachgemäße Anschlüsse und kein Materialversagen zu den Verschlechterungen geführt haben.

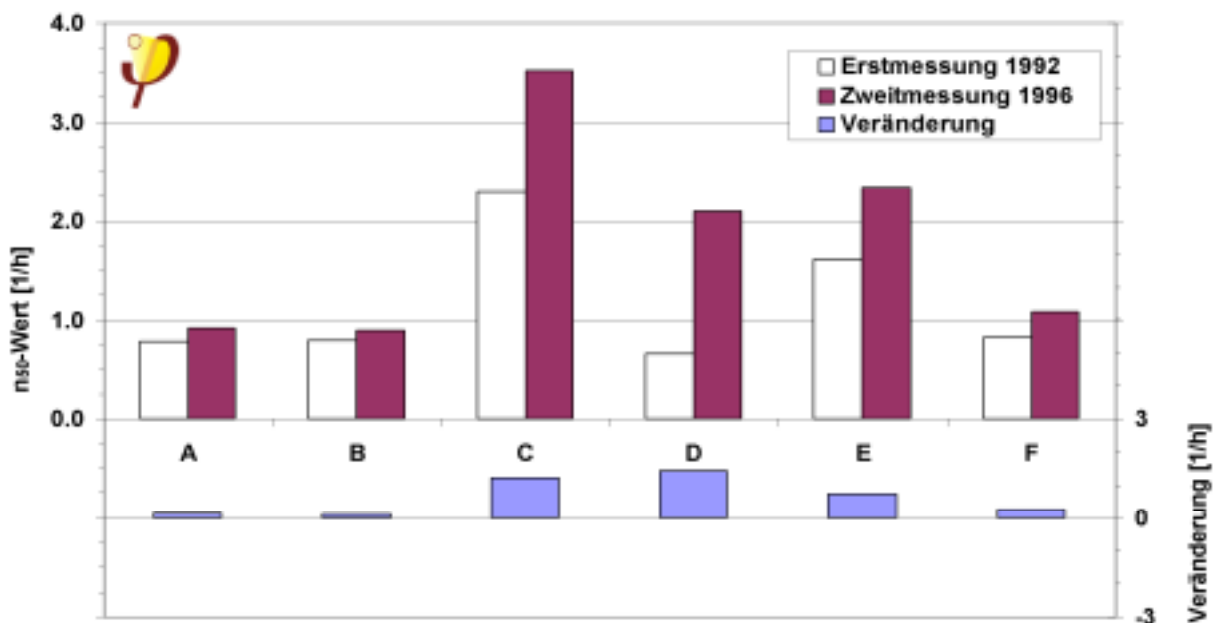


Abbildung 8: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen an sechs Niedrigenergiehäusern in Niedersachsen (nach [Böhmer 1998]).

Massivbauten Bochum

In Bochum-Werne wurden im August 1996 zweizeilig neun Reihenhäuser in Massivbauweise (Ziegel) fertiggestellt und bezogen. Die Gebäude wurden in einem Messprogramm über 2 Heizperioden vermessen. In dem Abschlussbericht der Messbegleitung [Kluttig/Erhorn 1998] sind unter anderem auch die Ergebnisse der Luft-

dichtheits-Abnahmemessungen (nur Unterdruck-Messwerte nach [Beckert 2005]) aller Gebäude aus dem Jahre 1996 dokumentiert. Die Gebäudedichtheit lag bei n_{50} -Werten zwischen $0,8$ und $1,3 \text{ h}^{-1}$.

In einer weiteren Untersuchung [Kluttig/Beckert/Erhom 1999] wurde die Luftdichtheit in einer Nachmessung nach drei Jahren Nutzung nochmals überprüft (Über- und Unterdruck). Die im November 1999 festgestellten Werte lagen in der Bandbreite zwischen $0,6$ und $1,6 \text{ h}^{-1}$, es gab Veränderungen zwischen $-0,3$ bis $+0,4 \text{ h}^{-1}$. Wegen der Vergleichbarkeit werden dabei hier nur die Unterdruckmessungen herangezogen. Bei sechs der Häuser haben sich die Messwerte leicht verschlechtert, bei dreien sind die Werte leicht verbessert. Der Mittelwert aller Häuser hat sich von $1,0$ auf $1,1 \text{ h}^{-1}$ etwas erhöht. Messgenauigkeiten zu den Blower Door Messungen sind in den Berichten nicht explizit angegeben. Als Leckagen wurden bei der Nachmessung Anschlüsse der Dachfensterrahmen an die Außenwand, die Dachluken und teilweise die Leitungsschächte im Badezimmer ermittelt [Kluttig/Beckert/Erhorn 1999].

Die positiven und negativen Veränderungen der Luftdichtheit weisen darauf hin, dass bei diesen baugleichen Gebäuden kein Problem mit der Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit besteht. Die maximale Verschlechterung bei Haus 9 um 44% ($0,4 \text{ h}^{-1}$) hat ihre Ursache vermutlich in den festgestellten Einzelleckagen und nicht in einem generellen Defekt des gesamten Luftdichtheits-Systems.

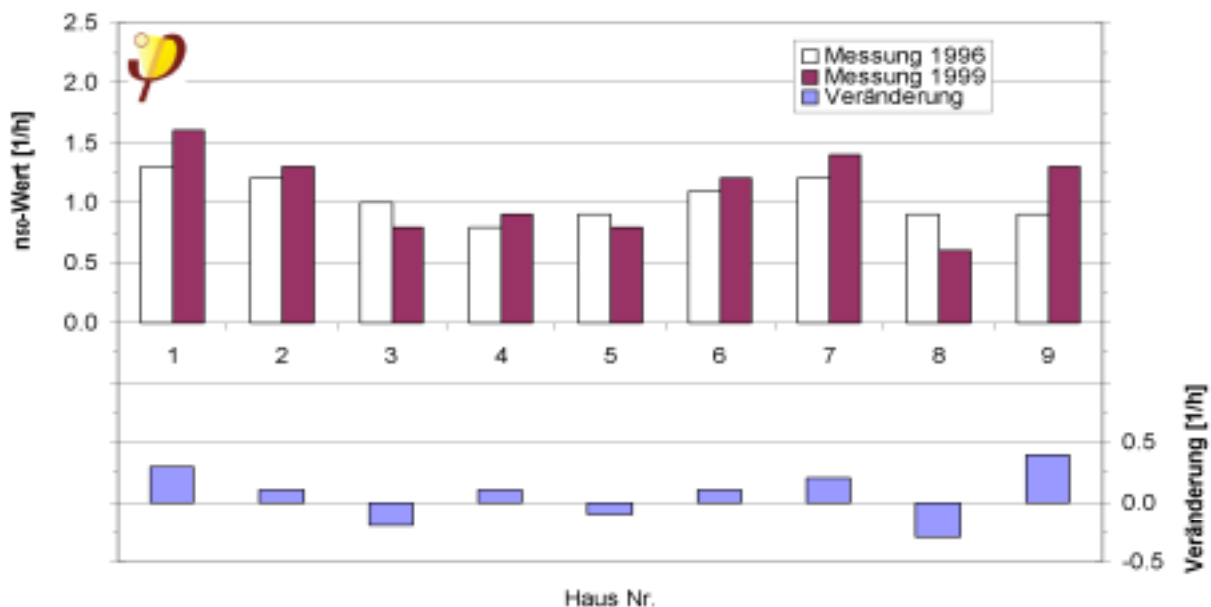


Abbildung 9: Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen an neun Niedrigenergiehäusern in Ziegelbauweise in Bochum-Werne (nach [Kluttig/Erhorn 1998] und [Kluttig/Beckert/Erhorn 1999]). Es sind nur die Unterdruckmessergebnisse aufgeführt.

Reproduzierbarkeit und jahreszeitliche Schwankung

Die erste systematische Untersuchung in Deutschland zur Reproduzierbarkeit von Luftdichtheitsmessungen, insbesondere dem Einfluss der jahreszeitlichen Schwankungen wurden 1998 veröffentlicht [Geißler 1998]. Es wurden 13 Gebäude über den Zeitraum von ca. einem Jahr untersucht. Dabei handelte es sich um 6 „alte“ (1,5 bis 7 Jahre) und 7 „neue“ (1 bis 6 Monate) Holzhäuser. Die n_{50} -Werte der Gebäude lagen zwischen 1,0 und 3,9 h^{-1} , ein Haus mit dem Dichtheitswert von 5,8 h^{-1} fällt heraus, es wurde mit nicht abgeklebtem Küchenabzug gemessen.

Der Autor stellt fest, dass es Gebäude mit deutlichem, leichtem und keinem jahreszeitlichem Trend der Luftdichtheit gibt. Dabei wurden Schwankungen bis 30 % des Mittelwertes festgestellt. Die begleitenden Materialfeuchtemessungen lassen darauf schließen, dass die Veränderungen durch Quell- und Schwindvorgänge verursacht werden.

Im Bezug auf die Dauerhaftigkeit gibt es zum Teil Überlagerungen der jahreszeitlichen Schwankungen und einer evtl. dauerhaften Veränderung der Gebäudeluftdichtheit. Es wird für 2 Häuser eine gleichbleibende Luftdichtheit festgestellt, bei 3 gibt es eine leichte, bei 5 eine deutliche Verschlechterung. Bei dreien lassen sich diesbezüglich keine Aussagen machen. Die Gründe für die Veränderungen konnten im Rahmen der Arbeit nicht analysiert werden. Für eine Aussage bezüglich der Langzeitdauerhaftigkeit sind die Ergebnisse nur von eingeschränkter Aussagekraft. Der Zeitraum ist mit einem Jahr relativ kurz. Von den Gebäuden liegen keine Abnahmemessungen bei Fertigstellung vor.

Beachtenswert ist insbesondere, dass der Autor zusammenfassend feststellt, dass eine langfristige **Reproduzierbarkeit** von Blower Door Messungen in der Regel innerhalb einer **20 bis 40 % Messgenauigkeit** liegen. Dabei liegt die Hälfte der Unsicherheit auf der Messung selbst und die andere auf dem Gebäude (Jahreszeitenschwankung). Bei ungünstiger Witterung (starker Wind), starker Austrocknung des Gebäudes und/oder nicht dauerhaften Detaillösungen der Luftdichtheitsschicht kann die Unsicherheit deutlich größer werden [Geißler 1998].

2.1.7 Resümee Literaturstudie

Die bisher dokumentierten Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit beschäftigen sich überwiegend nur am Rande mit der Frage der Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten. Die Messwerte liegen fast alle deutlich höher als für energieeffiziente Häuser nach heutigen Möglichkeiten empfohlen. Die Zeiträume zwischen den Messungen liegen je nach Untersuchung zwischen 1 bis 4 Jahren. Bei den bezüglich der Dauerhaftigkeit auswertbaren Projekten wurden überwiegend etwa gleichbleibende Messwerte nachgewiesen, sodass die Autoren der meisten Studien auch von einer dauerhaften Luftdichtheit ausgehen. Bei einigen Holzhäusern gab es durch-

gehend deutliche Verschlechterungen durch Trocknungs- und Schwindvorgänge (meist im ersten Jahr). Hier sind dann z.T. schlechte Luftdichtheitskonzepte als Begründung angeführt worden. Dazu muss angemerkt werden, dass Holzwerkstoffe, welche starken Trocknungs- und Schwindvorgängen unterliegen, ohne zusätzliche Verklebungen o.ä. generell nicht geeignet sind um luftdichte Anschlüsse zu gewährleisten. Mit einem besseren – mit den heute verfügbaren Materialien und Methoden realisierten – Luftdichtheitskonzept würde die Verringerung der Holzfeuchte vermutlich keinen oder nur einen minimalen Einfluss auf die Veränderung der Luftdichtheit haben.

2.2 Dichtstoffe und Klebemittel

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit haben die verwendeten Produkte wie Klebebänder, Folien, Dichtungsbänder und Spritzmassen. Zumindest die führenden Hersteller prüfen ihre Spezialprodukte mit künstlichen Alterungstests, um die notwendige Dauerhaftigkeit sicherzustellen. Mittlerweile werden Systemgarantien der Hersteller bis zu 20 Jahre gegeben [Geißler 2002]. Für die Sicherstellung der Luftdichtheit eines Gebäudes sind allerdings Zeiträume von 30 bis 50 Jahre (je nach Bauteil) notwendig und angestrebt.

Im „Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V.“ (www.FLiB.de) werden in der Arbeitsgruppe „Klebebänder“ zusammen mit einigen Herstellern Kriterien zur Produktbewertung und Prüfung von Klebebändern erarbeitet. Ziel ist die Zertifizierung von Klebebändern zur Herstellung der Luftdichtheitschicht, um Anwendern geeignete Produkte aufzeigen zu können bzw. sie vor ungeeigneten schützen zu können. Ein Entwurf der Prüf- und Kennzeichnungsvorschrift [FLiB 2005] liegt vor. Dazu werden an der Universität Kassel und am Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) Schälkraft und Kriechverhalten von Klebebändern untersucht. Auch die Alterungsbeständigkeit von Klebebändern ist Gegenstand dieser Prüfungen [Maas/Gross 2004][Maas/Gross 2005]. Dabei wird dort in Anlehnung an die [ASTM D 3611] ein Versuchsaufbau bei 65 °C und 80 % relativer Luftfeuchte zur Untersuchung der künstlichen Alterung der Klebebandproben gewählt. Es wurden Schälversuche mit unterschiedlichen Acrylat-Klebebändern auf PE-Folie und einer Konditionierung von 350 Tagen durchgeführt. In [Nostrand 1989] wird hinsichtlich der künstlichen Alterung ein Verhältnis von sieben Tage zu einem Jahr angegeben. In [Maas/Gross 2004] wird mit den Versuchen eine Aussage zur Alterungsbeständigkeit der Klebeband-Substrat-Kombination von 30 Jahren angestrebt.

Nach der Philosophie der meisten namhaften Hersteller ist es maßgeblich jeweils systemkonform die Produkte zu kombinieren. Die Anwender (Planer/Handwerker) können die Verträglichkeit der unterschiedlichen Produkte so gut wie gar nicht beurteilen. Es kann dann z.B. zu chemischen Unverträglichkeiten kommen, was im ungünstigsten Fall (Verzicht auf mechanische Sicherung) zum Versagen der

luftdichten Anschlüsse führt. So wird in der Literatur z.B. das Ausschwitzen von Trennmitteln aus PE-Folien beschrieben, was nach einigen Wochen zum Ablösen der zunächst gut verklebten Klebebänder führte [Ranz 2003].

Um valide Aussagen zur Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit an gebauten Objekten machen zu können, wurden die hier dokumentierten Nachmessungen an Passivhäusern durchgeführt.

3 Nachmessungen

Im Rahmen des Projektes „IEA Task 28“ wurden Nachmessungen zur Luftdichtheit an unterschiedlichen Passivhaus Objekten durchgeführt. Ziel war es dabei, Passivhäuser in unterschiedlichen Bauweisen zu untersuchen, welche bereits möglichst einige Jahre bewohnt sind. Voraussetzung dafür war, dass zum Vergleich Messprotokolle der Abnahmemessungen nach Fertigstellung der Gebäude vorlagen. Ebenso waren Dokumentationen der Luftdichtheitskonzepte mit Detailzeichnungen notwendig. Diese wurden von den Architekten oder den Messteams zur Verfügung gestellt.

In Tabelle 1 sind die Gebäude und deren Bauweise aufgeführt, bei denen die Nachmessungen durchgeführt wurden.

#	Passivhaus-Projekt	Bauweise	Wohneinheiten mit Nachmessungen
1	Reihenhäuser Damstadt Kranichstein	Massivbau	2
2	Einfamilienhäuser Bretten	Holzleichtbau	2
3	Siedlung Lindlar/Hohkeppel	Holzleichtbau (kraftschlüssig)	5
4	Einfamilienhäuser Stegaurach/Mühlendorf und Bamberg	Holzleichtbau	2
5	Reihenhäuser Hannover-Kronsberg	Mischbau	4
6	Reihenhäuser Rheinmünster und Bühl	Betonschalungsstein (Massiv)	2

Tabelle 1: Passivhäuser, bei denen die Nachmessungen durchgeführt wurden und deren Bauweise

Insgesamt wurden 17 Blower Door Nachmessungen an acht Standorten in fünf unterschiedlichen Bauweisen durchgeführt. Die Nachmessungen sind alle mit einer Blower Door der Firma Minneapolis „Modell 4“ durchgeführt worden.

Vorgehen

Bei den ausgewählten Gebäuden wurde Kontakt zu den Bewohnern hergestellt und nach der Feststellung der Bereitschaft zu einer Nachmessung ein Messtermin abgestimmt.

An den jeweiligen Messterminen wurde nach einer Sichtkontrolle des Gebäudes die Luftfördereinrichtung nach Möglichkeit in die gleiche Tür eingebaut wie bei der Erstmessung. Dies erhöht die Vergleichbarkeit der beiden Messungen. Zur Vorbereitung der Messung wurden alle Fenster und Türen in der Außenhülle geschlossen und die Lüftungsanlage wurde möglichst außen- und fortluftseitig mittels Luftblasen oder Klebeband abgedichtet. Anschließend wurde mit der Luftfördereinrichtung ein Unterdruck von 50 Pa aufgebaut und eine detaillierte Leckagesuche im gesamten Gebäude durchgeführt. Die in den Protokollen der Erstmessungen beschriebenen Leckagen wurden dabei insbesondere überprüft. Die Leckagen wurden jeweils dokumentiert. Im Anschluss daran konnten die eigentlichen Über- und Unterdruckmessungen durchgeführt werden.

Die Messungen werden geordnet nach Standorten ausgewertet und dokumentiert.

Im Anhang sind die Messprotokolle abgedruckt.

3.1 Reihenhäuser Darmstadt-Kranichstein (Massivbau)

Beim Passivhaus Darmstadt-Kranichstein sind zu den bisherigen Messungen (vgl. [Feist 1995] und [Peper 2000]) noch Nachmessungen im September 2001 in zwei der vier Wohneinheiten durchgeführt worden. Damit liegt hier eine Langzeitbetrachtung über mehr als 10 Jahre vor. Die Reihenhauszeile ist als unterkellertes Massivbau mit Leichtbaudach ausgeführt.



Abbildung 10: Ansicht der Passivhauszeile in Darmstadt Kranichstein (Südfassade)

Beim Luftdichtheitskonzept wurde auf bewährte und zuverlässige Grundkonstruktionen zurückgegriffen. Die Luftdichtheit in der Fläche wird durch eine durchgehende Polyäthylenfolie im Leichbaudach, durch vollflächig und lückenlos aufgebrachten Innenputz im Außen- und Trennwandbereich und im Bodenbereich durch die Rohbetondecke hergestellt. Durch den bis zur Bodenplatte gehenden Innenputz ist der Anschluss Wand an Bodenplatte luftdicht. Die Dachfolie überlappt im Wandbereich, wurde mit Streckmetall fixiert und luftdicht eingeputzt. Bei den Fensteranschlüssen wurde der Innenputz im Laibungsbereich bis an eine Putzendschiene geführt. Die bleibende Fuge zwischen Schiene und Fensterrahmen wurde anschließend mit Acrylatdichtmasse verfugt. Um die Rohbaudecke luftdicht an die Fenster anzuschließen, wurde eine Dreiecksleiste vor den Blendrahmen geschraubt und mit Silikon eingedichtet.

Stoss von/gegen	Kellerdecke	Flügelrahmen	Blendrahmen	Außenwand	Dach
Dach				Einputzen der Folie in Gipsputz	Verklebung d. Folien (Butylkautschukklebebander)
Außenwand	Gipsputz bis auf die Rohdecke gezogen		Putzendschiene, mit Acrylatdichtmasse gegen Rahmen verfugt	durchgehender Gipsputz	
Blendrahmen	angeschraubte Dreiecksleiste mit Silikon verfugt	Lippendichtung			
Flügelrahmen					
Kellerdecke					

Tabelle 2: Luftdichte Anschlüsse im Reihenhaus Damstadt-Kranichstein (Quelle: [Feist 1995])

Durchdringungen der luftdichten Hülle wurden bei diesem Projekt möglichst vermieden. Kabel- und Rohrdurchführungen wurden mit flüssigem Gips vergossen. Leerdosen für Schalter und Steckdosen sind mit den bereits eingeführten Kabeln mit viel Gips eingesetzt worden. Unterdachbelüfter belüften den Abluftstrang. Der prinzipielle Verlauf der luftdichten Ebene ist in Abbildung 10 dargestellt.

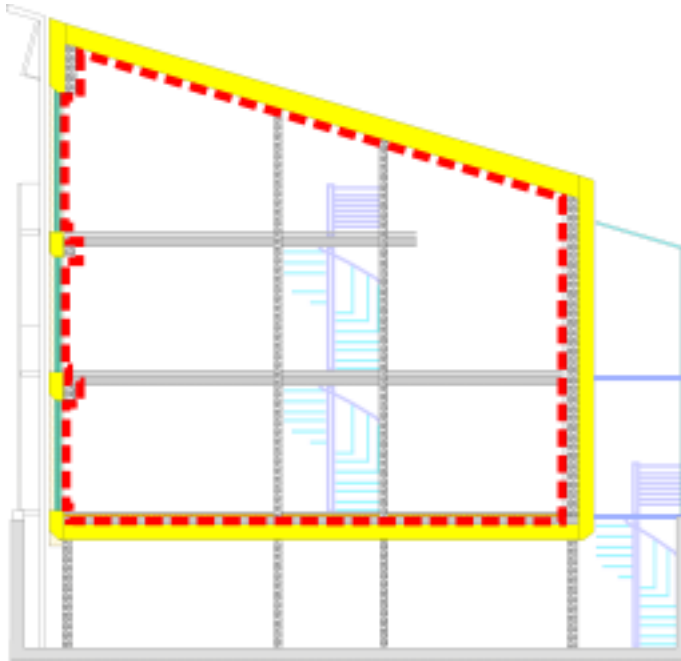


Abbildung 11: Verlaufsplan der luftdichten Ebene im Gebäudeschnitt (Quelle: PHI).

3.1.1 Nachmessung

In zwei der insgesamt 4 Reihenhäuser wurde in einer Nachmessung der Luftdichtheitskennwert bestimmt. Der Drucktest wurde in einem Endhaus (A) und einem Mittelhaus (B) durchgeführt. Die erste Messung lag dabei über 10 Jahre zurück. Bei der letzten Nachmessung in Haus A im Dezember 1999 wurden, bei sehr guten Luftdichtheitswerten von $n_{50} = 0,27 \text{ h}^{-1}$ als einzige Schwachstelle Undichtheiten an den nicht gewarteten Fenstern festgestellt. Allerdings wurde bei dieser damaligen Messung nur eine grobe Leckagesuche durchgeführt.

Die Lüftungsanlagen befinden sich außerhalb der luftdichten Hülle im Untergeschoss und wurden für die Messung durch Setzen von Gummiblasen im Außenluft- und Fortluftkanal abgedichtet. Die Blower-Door wurde bei beiden Objekten wie bei den Erstmessungen in die jeweilige Terrassentür eingesetzt, so dass auch evtl. Leckagen an den jeweiligen Haustüren erfasst werden konnten.

	Erstmessung	Nachmessung	Nachmessung	Nachmessung	Nachmessung	Zeitraum zwischen Abnahme- und letzter Nachmessungen
Endhaus A	25.2.1991	9.9.1992	17.10.1994	16.12.1999	21.9.2001	> 10, 5 Jahre
Mittelhaus B	25.2.1991	9.9.1992			21.9.2001	> 10, 5 Jahre

Tabelle 3: Termine aller durchgeführten Drucktest-Messungen und Zeitraum zwischen der Abnahme- und der letzten Nachmessung.



Abbildung 12: Abdichten des Lüftungssystems am Zentralgerät im Untergeschoss.

Bei Haus A und B wurden geringe Restleckagen vorwiegend in den folgenden Bereichen festgestellt:

- im Bereich der Fußleisten am Fensteranschluss,
- an den Fensterdichtungen (gering),
- an Rissen der raumseitigen Fenster-Dämmschale,
- und an Schalterleisten.

Restleckagen Mittelhaus B

Die raumhohen Fenster im 1. und 2. OG sind unten mit zwei senkrecht zum Fenster verlaufenden Metallplatten gehalten. Eine vor den Blendrahmen geschraubte Leiste und die Metallplatte wurden in Emangelung geeigneter Materialien während der Bauzeit mit der Geschossdecke mit einer zentimeterstarken Silikonverfugung abgedichtet. Die gemessenen Luftströmungen an den Fußleisten im Fensterbereich deuteten auf Leckagen an dieser Verfugung hin, die zum Zeitpunkt der Messung nicht mehr zugänglich waren. Der untere Anschluss befindet sich unter dem Fußbodenparkett und Estrich.

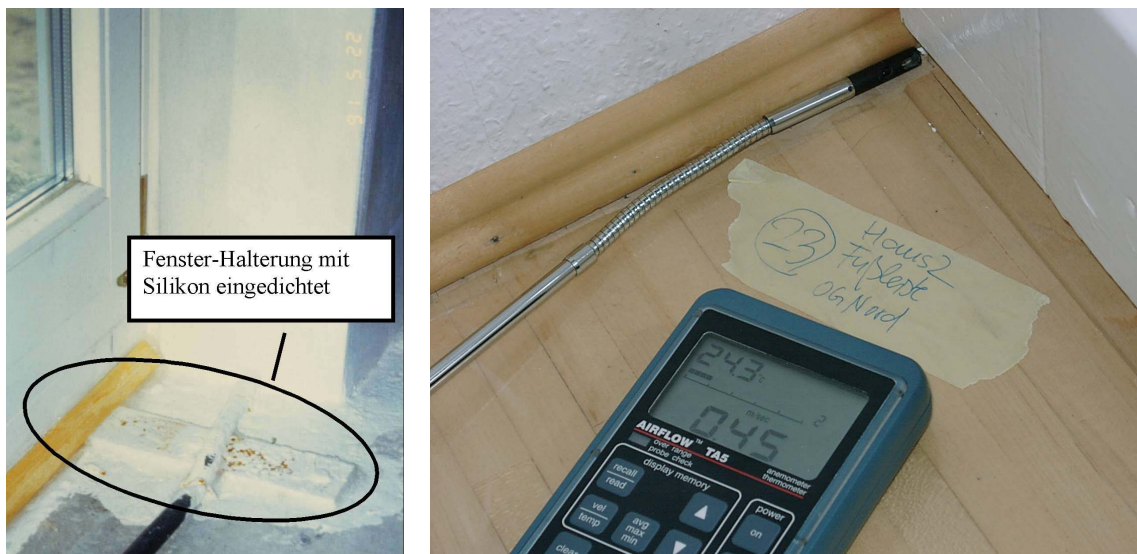


Abbildung 13: Fensteranschluss unten. Links: Fensterhalterung in der Bauphase (1991) mit Dreiecksleiste. Rechts: Festgestellte Leckage am Fensteranschluss / an der Fußleiste bei der Nachmessung.



Abbildung 14: Leckage an Verschluss-Seite der Balkentür.



Abbildung 15: Kabeldurchführung. Interne Leckage in der Trennwand zum Nachbarhaus.

Die Fensterbeschläge wurden kurze Zeit vor der Messung nach über 10 Jahren neu eingestellt. An den öffnenbaren Fenstern ist die Dichtlippe durch das Fensterscharnier auf etwa 2 cm unterbrochen. Leckagen an den Fenstern wurden überwiegend an diesen Stellen festgestellt. Aufgrund der kurzen Längen bzw. der geringen Querschnitte können die beobachteten Undichtheiten an Beschlag- als auch Verschluss-Seite als gering eingestuft werden.

In den Bädern des 1. und 2. OG wurden interne Leckagen zum Nachbarhaus festgestellt. In zwei Fällen handelt es sich um Kabeldurchführungen in der Installationswand, wobei die Kabel mit Silikon eingedichtet sind.

Ein durch Setzung und Bewegung im Dach entstandener Riss in der Tapete zeigt *keine* Leckagen, die luftdichte Schicht blieb erhalten und bestätigt das Luftdichtheitskonzept: Die luftdichte Schicht bildet im Dachbereich eine durchgängige Polyäthylen-Folie, die an den massiven Außenwänden auf der Innenseite eingeputzt wurde. Die ebenfalls untersuchten Anschlüsse Geschossdecke/Außenwand, Dach/Außenwand und eine Außenwand mit zahlreichen Nagellöchern zeigten ebenfalls keine messbaren Leckagen.



Abbildung 16: Anschluss Trennwand Dach. Anschluss der Dachfolie in der Bauphase (links) und (rechts) Riss in der Tapete durch Setzung. Die luftdichte Ebene wurde durch die Baubewegung nicht beschädigt.

Restleckagen im Endhaus A

Ähnlich wie im Mittelhaus traten auch im Endhaus an den Fußleisten im Fensterbereich Leckagen auf. Ursache ist vermutlich auch hier die Schwachstelle beim Fensteranschluss: die mit Silikon eingedichtete Metallschiene zur Rahmenhalterung. Systematisch weisen nahezu alle Fenster im 1. und 2. OG mit diesem Anschlussdetail kleine Restleckagen auf.



Abbildung 17: Leckagen am unteren Fensteranschluss. Balkon 1. OG.

Bei der Untersuchung wurden an einigen Fensterdichtungen an der Beschlag- z. T. auch an der Verschlussseite Undichtheiten gefunden. Die Undichtheiten sind als gering einzustufen. An der Haustür konnten keinerlei Undichtheiten festgestellt werden. Eine merkliche Verschlechterung der Fensterdichtungen konnte ebenfalls nicht festgestellt werden.

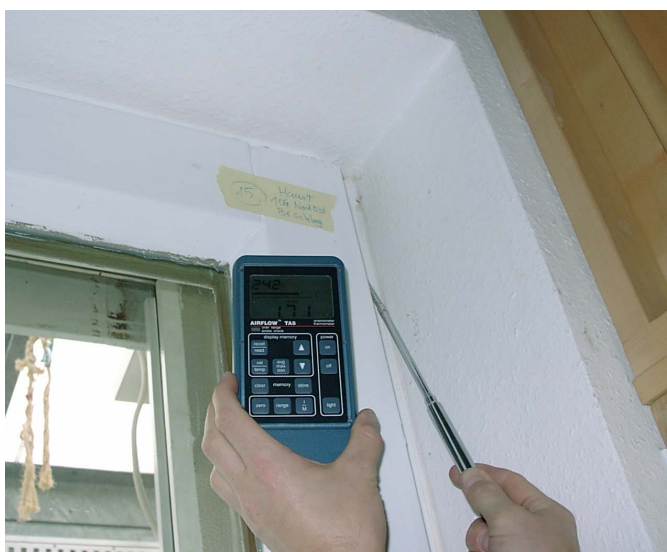


Abbildung 18: Leckage an den Fensterdichtungen am Beschlag.



Abbildung 19: Leckagen an Fensterversatzschalen. Riss in Rahmendämmung.

An feinen Risse in der raumseitigen Fensterrahmendämmung konnten teilweise Leckageströmungen gemessen werden. Bereits in der Bauphase wurden an der Fuge zwischen Glasleiste und Rahmen sowie an Astlöchern und feinen Rissen im Rahmen Lufteintritte beobachtet [Feist 1995], die z.T. mit Silikon abgedichtet wurden. Durch Risse in der aufgeklebten Fenstervorsatzschale machten sich geringe Leckagen im Rahmen bemerkbar, die allerdings auch schon bei der Erstmessung festgestellt worden waren.

Geringe Leckagen konnten auch an zwei zum Keller führenden Installationsschächten beobachtet werden. Die Luftdichtheit an Schaltern und Steckdosen in Außenwänden wurden mit viel Gips realisiert. Risse oder Lücken im Gips verursachen vermutlich die geringen Undichtheiten. Die Installationsschächte schließen jeweils an den Lüftungsschacht an.



Abbildung 20: Leckage zum Installationsschacht (Nachweis links mit Rauchfahne, rechts mit Thermoanemometer).

Auch im Endhaus verursachten Setzung und Bewegungen im Dach Risse in der Tapete am Anschluss Dach/Giebelwand. Eine Prüfung des Anschlusses zeigte jedoch keine Leckage. Die durchgängige Folie im Dachbereich, die an den massiven Wänden luftdicht eingeputzt ist, wurde nicht beschädigt. Im Bad ist die Fuge der Kachelkante zur Außenwand abgerissen. Vor der eigentlichen Außenwand, welche auch die luftdichte Ebene darstellt, befindet sich eine vorgesetzte Installationswand. Der Riss in der Silikonfuge zeigt keine Wirkung auf die luftdichte Ebene. Auch hier zeigt sich, dass Silikon für luftdichte Anschlüsse eine problematische Lösung darstellt.



Abbildung 21: Bewegungsrisse bei Anschluss Dach/Giebelwand. Keine Leckage feststellbar (Rauchtest).



Abbildung 22: Abriss der Kachelfuge. Keine Leckage messbar. Die Luftdichtheitsebene verläuft als durchgehender Putz auf der Außenwand hinter der Vormauerung.

Die gesamte Gebäudehülle hat gegenüber der Erstmessung vor 10 Jahren nicht messbar an Luftdichtheit eingebüßt. Trotz Setzung und Bewegung im Dach, worauf die Risse in der Tapete im Anschlussbereich Dach/Giebelwand hindeuten, bleibt die luftdichte Ebene voll funktionsfähig. Wie die Eindichtung der unteren Fensteranschlüsse zeigen, sind luftdichte Anschlüsse mit Silikon jedoch nicht als dauerhaft einzustufen.

3.1.2 Quantitative Messergebnisse

Auch bei der erneuten Nachmessung im September 2001 von den Häusern A und B wurden sehr gute Ergebnisse festgestellt. Zwischenzeitlich wurden die Fenster der vier Wohneinheiten von einer Fachfirma nachgestellt. Bei Haus A zeigt sich eine minimale Verbesserung des Wertes, welche allerdings bei der Schwankungsbreite der Messgenauigkeit keine Aussage hat. Haus B zeigt eine Verschlechterung um $0,1 \text{ h}^{-1}$ gegenüber der Messung von 1992, was sich nicht mehr allein mit der Messgenauigkeit erklären lässt. Bei der näheren Untersuchung wurden bei beiden Gebäuden in der Hauptsache kleinere systematische Leckagen bei den unteren Anbindungen der Fenster an die Geschossdecken festgestellt.

Das Luftdichtheitskonzept hat sich bestätigt. Trotz Setzung und Bauteilbewegung im Dach, worauf die Risse in der Tapete im Anschlussbereich Dach/Trennwand hindeuten, bleibt die luftdichte Schicht erhalten. Die Dichtung mit Silikon ist bezüglich der Luftdichtheit kritisch zu beurteilen. Die Eindichtung der unteren Fensteranschlüssen (1. und 2. OG) ist vermutlich nicht dauerhaft und stellt eine Schwachstelle im Luftdichtheitskonzept dar.

Damit kann festgestellt werden, dass „Notlösungen“ welche den Einsatz von größeren Mengen sog. „dauerelastischer“ Dichtmassen, insbesondere an später nicht mehr einsehbaren Bereichen, erfordern, nicht als dauerhafte Lösungen angesehen werden können. Hier sollte besser der Weg einer konsequenteren Planung beschränkt werden, um eine optimierte Lösung zu finden. Vor 10 Jahren war allerdings noch nicht die Vielzahl an geeigneten Spezialmaterialien zur Abdichtung am Markt verfügbar wie heute.

Insgesamt betrachtet bedeuten die guten Messergebnisse, dass das Luftdichtheitskonzept des Gebäudes als dauerhaft einzustufen ist. Auch in der Zukunft sind keine weiteren maßgeblichen Verschlechterungen zu erwarten. Damit kann sowohl der Teilbereich des Luftdichtheitskonzeptes „Innenputz im Massivbau“ und auch „Folie, an den Rändern eingeputzt“ als dauerhaft für Passivhäuser geeignet klassifiziert werden.

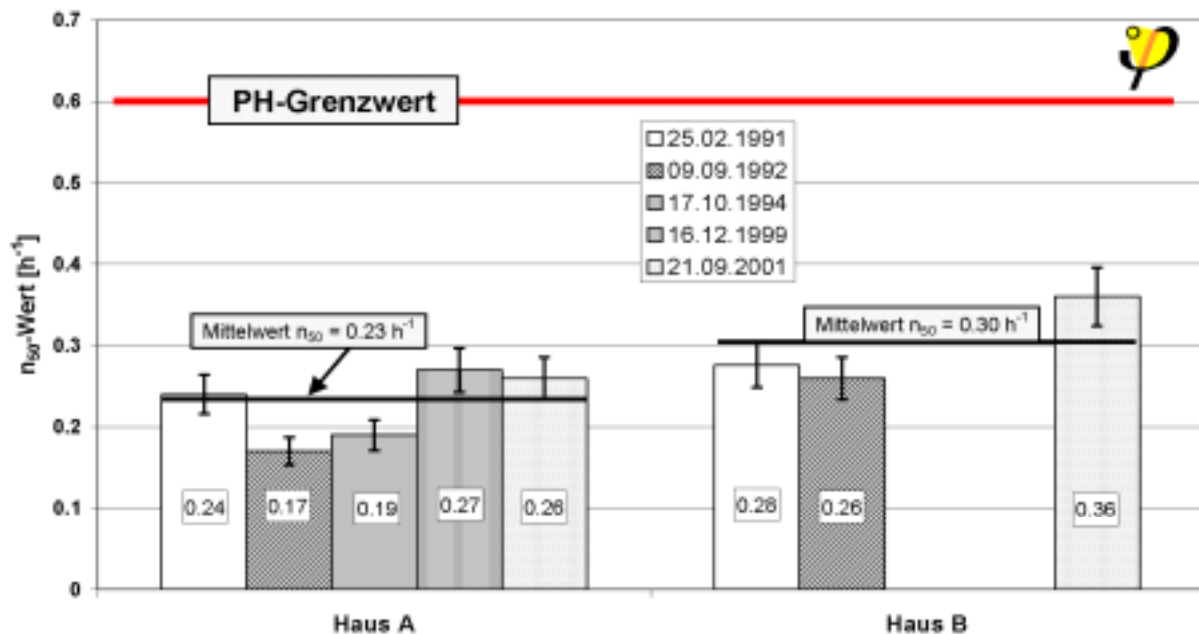


Abbildung 23: Vergleich der Messergebnisse der Luftdichtheitsmessungen bei zwei Häusern des Projektes Passivhaus Kranichstein.

3.2 Einfamilienhäuser Bretten (Holzleichtbau)

Bei den beiden Passiv-Einfamilienhäusern, welche mit Nachmessungen auf die Langzeitstabilität des Luftdichtheitskonzeptes überprüft wurden, handelt es sich um Projekte der Architekten oehler + archkom in Bretten. Beide Häuser sind als Holzleichtbau ausgeführt. Haus 1 hat ein zusätzliches Untergeschoss in Ortbetonbauweise. Bei Haus 2 wurde Tragkonstruktion und Gebäudehülle getrennt. Die Tragkonstruktion bildet ein Stahlskelett mit vorgestellten Holzelementen. Hinsichtlich der Luftdichtheit wurden bei den Häusern unterschiedliche Konzepte verfolgt. Bei Haus 1 bilden Folien im Dach sowie im Wandbereich und bei Haus 2 abgeklebte Holzwerk-

stoffplatten die luftdichte Ebene. Zusätzlich bildet in Haus 1 die Ortbetonkonstruktion im Untergeschoss die luftdichte Ebene in der Fläche.



Abbildung 24: Eines der untersuchten Passivhäuser in Bretten mit einem Viertelkreis Grundriss (Foto Ohler).

Die luftdichten Fensteranschlüsse in Haus 1 wurden mit Folienstreifen, die mit Butylkautschuk-Klebeband angeschlossen wurden, hergestellt. Im Bereich der Holzleimbaukonstruktion sichert die innere Beplankung den Folienstreifen zusätzlich mechanisch. Im Bereich der Zwischendecke ist die luftdichte Ebene durch die Deckenaufleger unterbrochen. Ein zwischen Stahlwinkel und Wandkonstruktion eingeklemmter EPDM-Streifen stellt an dieser Stelle die Luftdichtheit her. Die von oben und unten herangeführten Wandfolien sind mit Butylkautschuk-Klebeband an den EPDM-Streifen angedichtet. Der Anschluss an das massive Untergeschoss wird über Folienstreifen, die auf dem Rohbetonboden verklebt wurden, hergestellt. Die Wanddurchdringung des Fortluftkanals und des Abgasrohrs sollten mit Dichtkragen angeschlossen und anschließend überputzt werden. Zum Ersttermin war der Innenputz nicht vollständig an die Durchdringungen herangeführt. Die Versorgungsleitungen werden in Leerrohren durch die Bodenplatte in den Technikraum geführt. Gummiringe in den Leerrohren dichten zu den Leitungen hin ab. Der Verlauf der luftdichten Ebene ist für den Fassadenschnitt in Abbildung 25 dargestellt.

Stoß von/gegen	Kellerd. / Bodenpl.	Flügel- rahmen	Blend- rahmen	AW Leichtbau	AW massiv	Dach
Dach				Verklebung d. Folien (Butyl- kautschuk)		Verklebung d. Folien (Butyl- kautschuk)
AW massiv	durchgängige Ortbeton- Konstruktion		Folienstreifen mit Rahmen verklebt			
AW Leichtbau	AW-Folien wird mit Rohbeton- Boden verklebt (Butylkaut- schuk)		Folienstreifen mit Rahmen verklebt und mechanisch gesichert	Verklebung d. Folien (Butyl- kautschuk)		
Blend- rahmen	Folienstreifen mit Rahmen u. auf Rohbeton- decke verklebt	Lippendichtung				
Flügel- rahmen						
Kellerd. / Bodenp.						

Tabelle 4: Luftdichte Anschlüsse Projekt Bretten im Haus 1

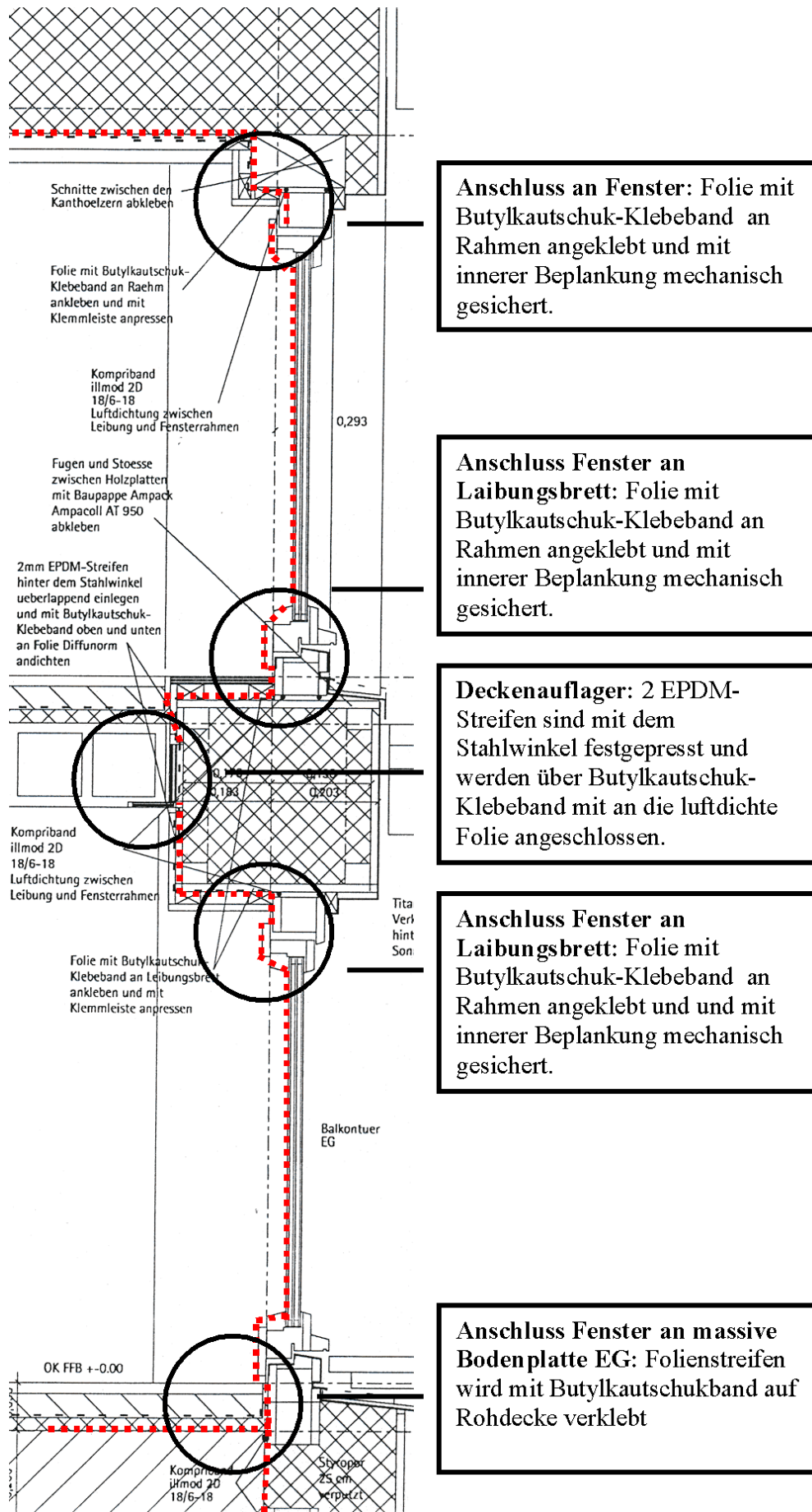


Abbildung 25: Fassadenschnitt Haus 1. Verlauf der luftdichten Ebene (nach oehler+archkom).

In Haus 2 sind alle Holzleichtbau-Elemente mit Klebebändern luftdicht verbunden. Die Fensterrahmen sind mit Folienstreifen an die Holzwerkstoffplatten der Wandelemente angeschlossen und mit Butylkautschuk-Band verklebt (vgl. Abbildung 26). Die innere Beplankung sorgt zusätzlich für eine mechanische Sicherung der Folienstreifen. Der luftdichte Anschluss der Wandelemente an die Bodenplatte wurde mit Bitumen-Klebestreifen hergestellt. Die luftdichte Ebene ist in Abbildung 27 dargestellt.

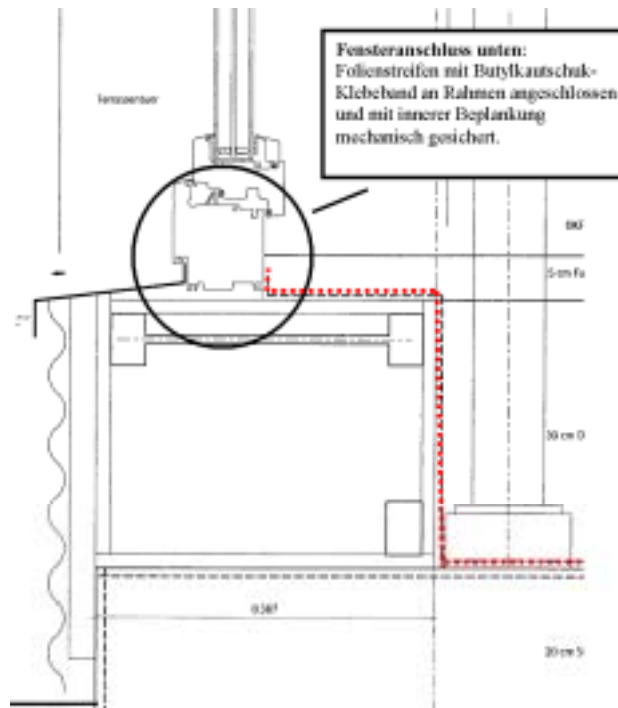


Abbildung 26: Fensteranschluss unten bei Haus 2 (nach oehler+archkom).

Stoss von/gegen	Bodenplatte	Flügelrahmen	Blendrahmen	AW Leichtbau	Dach
Dach				Verklebung d. Holzwerkstoffplatten (Butylkautschuk)	Verklebung d. Holzwerkstoffplatten (Butylkautschuk)
AW Leichtbau	Bitumen-Klebestreifen verbinden Holzwerkstoffplatten und Rohbeton-Boden		Folienstreifen mit Rahmen verklebt und mechanisch gesichert	Verklebung d. Holzwerkstoffplatten (Butylkautschuk)	
Blendrahmen	Folienstreifen mit Rahmen verklebt	Lippendichtung			
Flügelrahmen					
Bodenplatte					

Tabelle 5: Luftdichte Anschlüsse Projekt Bretten Haus 2.

Beide Häuser sind mit Unterdachentlüftern im Abluftstrang ausgerüstet. Steckdosen und Zuleitungen wurden aufputz angeordnet, so dass die luftdichte Ebene nicht durchstoßen wurde und auf eine zusätzliche Installationsebene verzichtet werden konnte. Insgesamt sind bei Haus 1 aufwendigere Detailösungen realisiert worden als bei Haus 2. Zusätzlich sind die Fenstertüren und die Haustür in Haus 1 statisch im Grenzbereich und schließen nicht mehr einwandfrei.

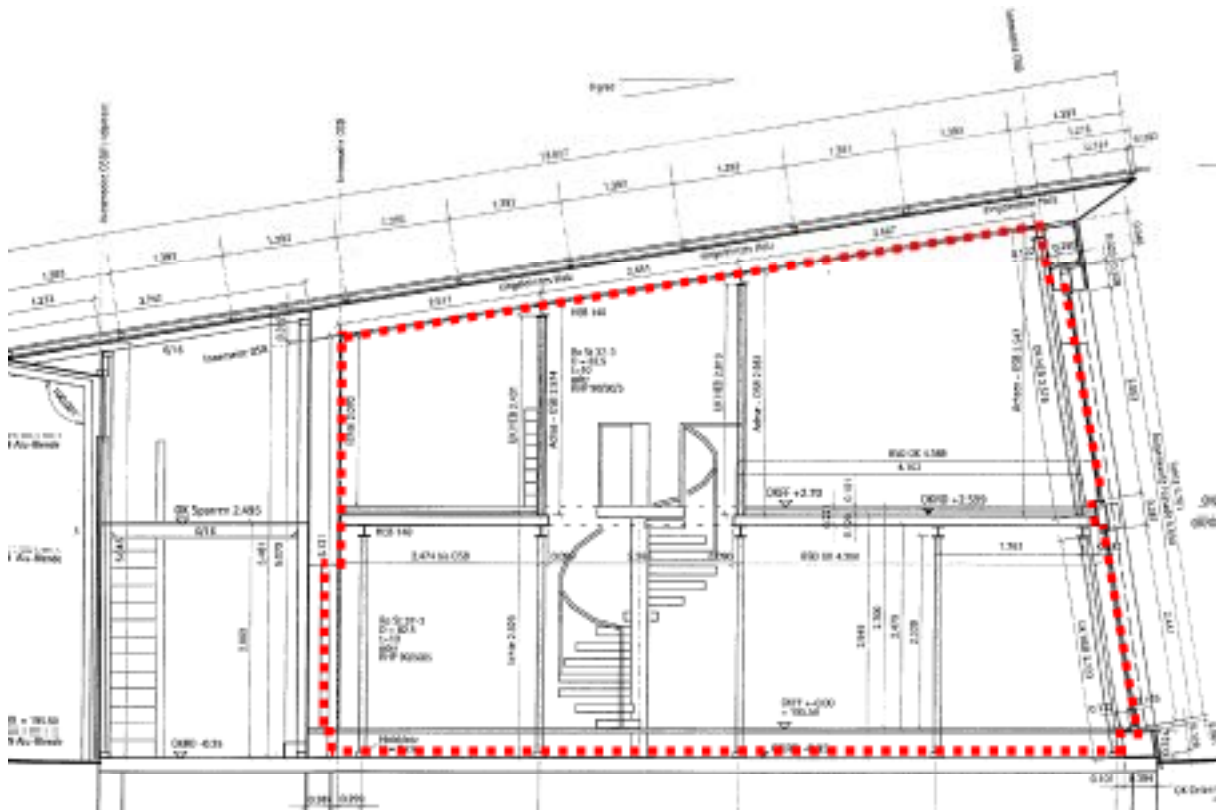


Abbildung 27: Verlauf der luftdichten Ebene bei Haus 2 (gestrichelte Linie; nach oehler + archkom).

3.2.1 Nachmessung

Bei Haus 1 als auch bei Haus 2 wurde die Blower-Door jeweils in eine Terrassentür eingebaut. Gummiblasen im Abluftstrang des Lüftungsgeräts und in der Erdwärmetauscher-Zuluft verschließen das Lüftungssystem in Haus 1. Leckagen am Lüftungsgerät, die durch diese Anordnung mitgemessen wurden, wurden nicht festgestellt. Auch in Haus 2 verschließen Gummiblasen im Zentralgerät (Abluft- und Außenluftseite) das Lüftungnetz während des Drucktestes.



Abbildung 28: In Terrassentür eingebaute Blower Door (Haus 2).

Restleckagen in Haus 1

Als größte Leckagen wurden die Abdichtungen der Durchdringungen der Frisch- und Fortluftrohre, die Befestigungspunkte der Brettstapeldecken sowie die Haustür lokalisiert. An den Befestigungspunkten der Brettstapeldecken an die Außenwände wurden bedeutende Leckagen gefunden, deren Ursache bei dem komplett ausgebauten und bewohnten Gebäude nicht eindeutig finden ließen. Vermutlich hat sich durch mechanische Beanspruchung die Anbindung der unter den Stahlwinkeln eingeklemmten EPDM-Streifen an die PE-Folie teilweise gelöst. Der Übergang zur Folie wurde mit Butyl-Kautschuk-Klebeband geklebt. In diesem Bereich wurden bereits bei der Messung in der Bauphase „großflächige Leckagen“ festgestellt [Kritschig 1998]. Die Folie war damals in diesem Bereich nicht durchgehend verklebt, der Anschluss der Folien von Erd- und Obergeschoss im Bereich der Zwischendecke war nicht sorgfältig ausgeführt.



Abbildung 29: Leckage am Deckenaufleger.

Ein weiterer Lufteintritt wurde an den Wanddurchbrüchen des Fortluftkanals und des Abgasrohrs festgestellt. Die Lüftungsrohre waren teilweise nicht mit der luftdichten Ebene der Kellerwand (Putz) verbunden. Während der Bauphase war die Lüftungsanlage noch nicht vorhanden und die Wanddurchführungen wurden für die Drucktest-Messung provisorisch abgeklebt bzw. ausgestopft.



Abbildung 30: Leckage am Wanddurchbruch für den Fortluftkanal. (Anmerkung: Der Fortluftkanal sollte im warmen Keller auf jeden Fall gedämmt sein.)

Restleckagen wurden auch an den Fensteranschlüssen beobachtet (vgl. Abbildung 31). Im EG ist der untere Fensteranschluss über einen Folienstreifen zur Rohbetondecke hergestellt und im OG mit einem Butylkautschuk-Klebeband an das untere Laibungsbrett. Die genaue Ortung beider Leckagen war auch hier aufgrund des Innenausbaus nicht möglich. Bei einem Drucktest in der Bauphase traten Leckagen im Bereich der Folien-Klebung an die Fenster auf, so dass auch in diesen Fällen die Schwachstelle hier vermutet werden muss.



Abbildung 31: Fensteranschluss im Kinderzimmer OG (links) und in der Küche EG (rechts).



Abbildung 32: Leckage an der Haustür.

Neben der Haustür wurde Lufteintritt bei Unterdruck noch an einigen Fensterdichtungen festgestellt. Haustür und Fenstertüren stoßen durch ihre Größe an die Grenze der statischen Belastbarkeit der Beschläge und schließen daher nicht mehr einwandfrei. Ein Nachstellen der Beschläge von Fenstern und Haustür könnte vermutlich die Luftdichtheit an diesen Bereichen dennoch verbessern.

Die Schwachpunkte zeigen nochmals die Wichtigkeit der Planungsarbeit. Der gemessene Wert kann durch Nachbesserungen – zumindest an den Lüftungsrohren und den Haustür- sowie Fensterbeschlägen – wieder verbessert werden. Eine Aussage über die Langzeitstabilität der Verbindungen kann der hier **nicht** getroffen werden, da die drei Hauptleckagen die Qualität der anderen Verbindungen „überlagern“. Entscheidend ist, dass das Haus als Passivhaus gut funktioniert und die Bewohner zufrieden sind. Wenn sich, wie hier, keine Qualitätsmängel einstellen, ist „nur“ mit einem erhöhten Energieverbrauch des Gebäudes zu rechnen. Der Energieverbrauch in diesem Objekt ist trotz der Leckagen auf niedrigem Niveau.

Restleckagen in Haus 2

Restleckagen traten in Haus 2 teilweise an den Fensteranschlüssen, am Anschluss Dach/Außenwand und an der Haustür auf. Klebestreifen schließen die einzelnen Elemente luftdicht aneinander an. Am Fensteranschluss ist ein Folienstreifen mit Butylkautschuk-Klebeband am Rahmen verklebt und durch die innere Bepunktung mechanisch gesichert worden. Die eigentlichen Restleckagen im Bereich des Fensteranschlusses waren zum Termin der Nachmessung nicht mehr zugänglich. Vermutlich hat sich der Anschluss am Fenster teilweise gelöst bzw. wurde nicht durchgängig hergestellt.



Abbildung 33: Fensteranschluss Ecke unten und oben

Im Bereich des Dachanschlusses hinter den Querträgern konnte ebenfalls ein Lufteintritt festgestellt werden. Der luftdichte Anschluss Außenwand an Dachelement im Bereich des Querträgers konnte, aufgrund des Bauablaufs, nicht zusätzlich durch Klebebänder gesichert werden. Vermutlich liegen die nicht genau lokalisierbaren Leckagen in diesem Anschluss. Wie das ausgezeichnete Ergebnis des Drucktest zeigt (vgl. Abbildung 36), ist auch der Fehler durch diese „Notlösung“ für die Luftdichtheit nicht bedeutend.



Abbildung 34: Restleckagen vermutlich am Anschluss Dach/Außenwand hinter dem Querträger.

Weitere typische Restleckagen zeigten sich am Schloss der Haustür.



Abbildung 35: Restleckage am Türschloss

3.2.2 Quantitative Messergebnisse

Die Blower Door Messung bei Haus 1 ergab in der Bauphase am 17.12.1997 mit Nachbesserungen den Messwert von $0,56 \text{ h}^{-1}$. Bei der Nachmessung nach fast vier Jahren ergab sich ein deutlich verschlechterter Wert von $1,2 \text{ h}^{-1}$. Die durchgeführten Nachbesserungen wurden vermutlich z.T. nicht so ausgeführt, dass sie dauerhaft stabil sind. Andere Leckagen, wie die Wanddurchbrüche, wurden beim ersten Messtermin nicht mitgemessen. Haustür und Fenstertüren sind sehr großzügig dimensioniert. Die statischen Belastungen an diesen Pfosten-Riegel-Konstruktionen der ersten Generation sind vermutlich zu groß. Haustür und Fenstertüren haben sich mit der Zeit gesetzt und haben zum Nachmesstermin nicht mehr einwandfrei abgedichtet.

Bei diesem Objekt handelt es sich um das erste realisierte Passivhaus des Architekten. Das etwa 1,5 Jahre später errichtete Haus 2 zeigt deutlich den Zugewinn an Erfahrungen bei der Planung optimierter Luftdichtheitskonzepte. Dazu gehörten klare Planungslösungen und das Vermeiden von aufwendigen Detaillösungen.

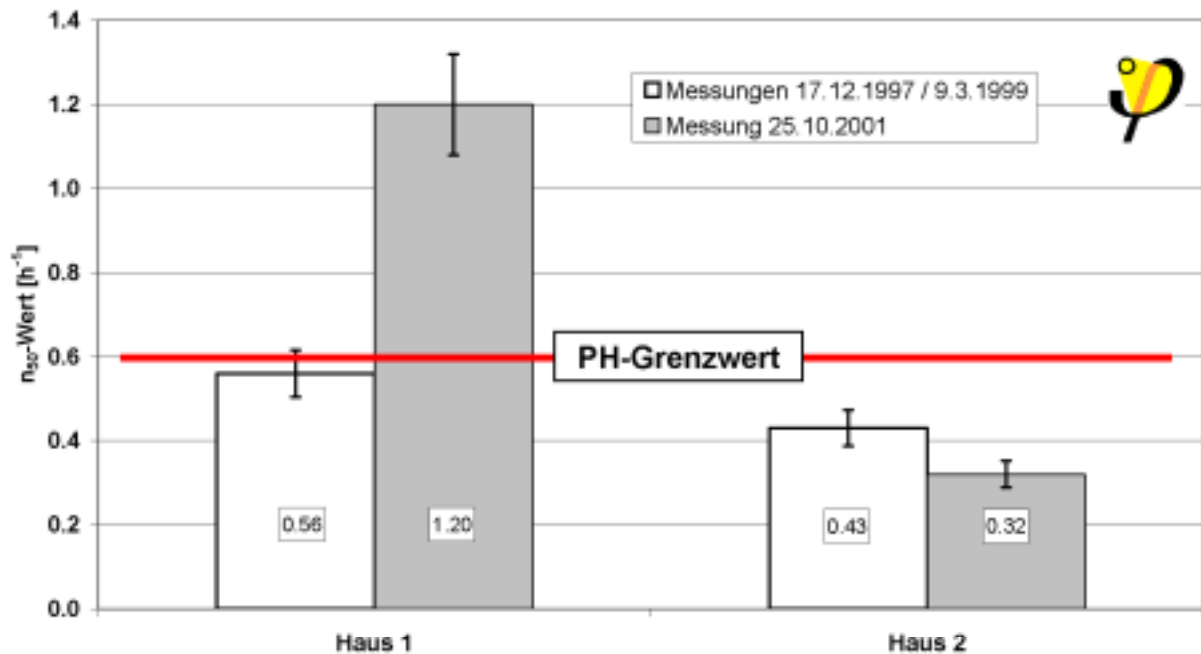


Abbildung 36: Vergleich der Erst- und der Nachmessungen in Passivhäuser in Bretten.

Bei Haus 2 zeigt die erste Messung in der Bauzeit vom 09.03.1999 ein sehr gutes Ergebnis von $0,43 \text{ h}^{-1}$, die Nachmessung vom Oktober 2001 sogar einen nochmals verbesserten Wert von $0,32 \text{ h}^{-1}$. Diese Verbesserungen lassen sich durch Nacharbeiten nach dem ersten Blower Door Test und durch die Fertigstellung des Innenausbaus erklären. Durch den vollständigen Fußbodenaufbau wird z.B. der luftdichte Anschluss an die Bodenplatte zusätzlich mechanisch gesichert.

Hier zeigt sich nach gut 2,5 Jahre die Dauerhaftigkeit des Konzeptes sowie der einzelnen Anschlüsse. Die hier im Holzbau gewählten Verbindungen können nach dieser Nachmessung zumindest für einen solchen Zeitraum als dauerhaft dicht eingestuft werden. Eine spätere nennenswerte Verschlechterung ist nicht zu erwarten.

3.3 Siedlung Lindlar / Hohkeppel (Holzleichtbau)

Bei diesem Passivhausprojekt handelt es sich um fünf Einfamilien-Passivhäuser in Lindlar/Hohkeppel bei Köln des Architekten M. Brausem. Die Gebäude sind in Holzleichtbauweise („Holzwerkstoff-Monocoque-Bauweise“) gebaut und auf der Innenseite mit Holzwerkstoffplatten ausgesteift, welche kraftschlüssig verklebt sind (Quellkleber). Die Holzwerkstoffplatten bilden im Wand und im Dachbereich die luftdichte Ebene in der Fläche. Am Boden stellt die Stahlbetonbodenplatte die Luftdichtheit in der Fläche sicher. Um luftdichte Anschlüsse zwischen den Elementen zu erhalten sind die Holzwerkstoff-Elemente immer durchgängig mit Polyurethan-Leim verbunden.



Abbildung 37: Ein Doppelhaus der Passivhäuser in Lindlar Hohkeppel (Foto Brausem)

An den Fensteranschlüssen wurde mit Butyl-Kautschuk Klebeband mit Flieskaschierung luftdicht angeschlossen. Das verwendete Produkt war zu diesem Zeitpunkt noch ganz neu am Markt und bei kaltem feuchten Wetter nicht unproblematisch in der Verarbeitung. Die Wandelemente sitzen auf einem Streifen aus Bitumenpaste, der auf die Bodenplatte aufgetragen wurde und der die Luftdichtheit herstellt. Bei der Ausführung ergaben sich allerdings durch zusätzliches Ausrichten der großen Elemente Lücken im Bitumenstreifen, die aufwendig nachgearbeitet werden mussten. Andere Lösungen waren zu dieser Zeit noch nicht marktverfügbar. Außer an den Fensteranschlüssen und an Durchdringungen konnte somit weitgehend auf zusätzliche Klebebänder bzw. Luftdichtungsbahnen und deren Verarbeitung verzichtet werden. Die Lage der luftdichten Ebene ist in Abbildung 39 dargestellt. Sie verläuft im Bereich der Holzleichtbau-Elemente konsequent auf der Innenseite der Holzwerkstoffplatten. Der Abwasserstrang ist mit Unterdachbelüftern ausgerüstet, um die Zahl der Durchdringungen zu verringern. Die Installationschächte verlaufen an den Innenwänden. An den Außenwänden wurden nur Aufputzsteckdosen eingesetzt. Die elektrische Zuleitung an diesen Wänden ist in die Fußleisten integriert, auf eine zusätzliche Installationsebene wurde verzichtet. Die Versorgungsleitungen wurden über die Bodenplatte ins Haus geführt. Hierzu notwendige Leerrohre mit einer gut haftenden Außenoberfläche wurden in die Bodenplatte eingegossen. Ein Abschlussdeckel mit entsprechender Bohrung für den Leitungsquerschnitt stellt die Luftdichtheit zur Versorgungsleitung her und hält die Leerrohre auch für nachträgliche Installationen zugänglich. Die Außenwanddurchdringung am Fortluftkanal ist mit einem Dichtkragen abgedichtet.

Stoss von/gegen	Bodenplatte	Flügel-rahmen	Blend-rahmen	AW Leichtbau	Dach
Dach				kraftschlüssige, durchgängige Verleimung d. Holzwerkstoffplatten	kraftschlüssige, durchgängige Verleimung d. Holzwerkstoffplatten
AW Leichtbau	Bitumen-Paste zw. Wandelement und Bodenplatte		Butyl-Kautschuk Klebeband mit Flieskaschierung	kraftschlüssige, durchgängige Verleimung d. Holzwerkstoffplatten	
Blendrahmen		Lippendichtung			
Flügel-rahmen					
Bodenplatte					

Tabelle 6: Luftdichte Anschlüsse Projekt Lindlar / Hohkeppel.

Das Luftdichtheitskonzept erfordert eine hohe Passgenauigkeit der Einzelteile und eine sehr sorgfältige Ausführung beim Verleimen der Elemente. Beim realisierten Luftdichtheitskonzept handelt es sich um eine seltene Sonderlösung, die unbedingt ausreichend gesicherte praktische Erfahrungen erfordert.

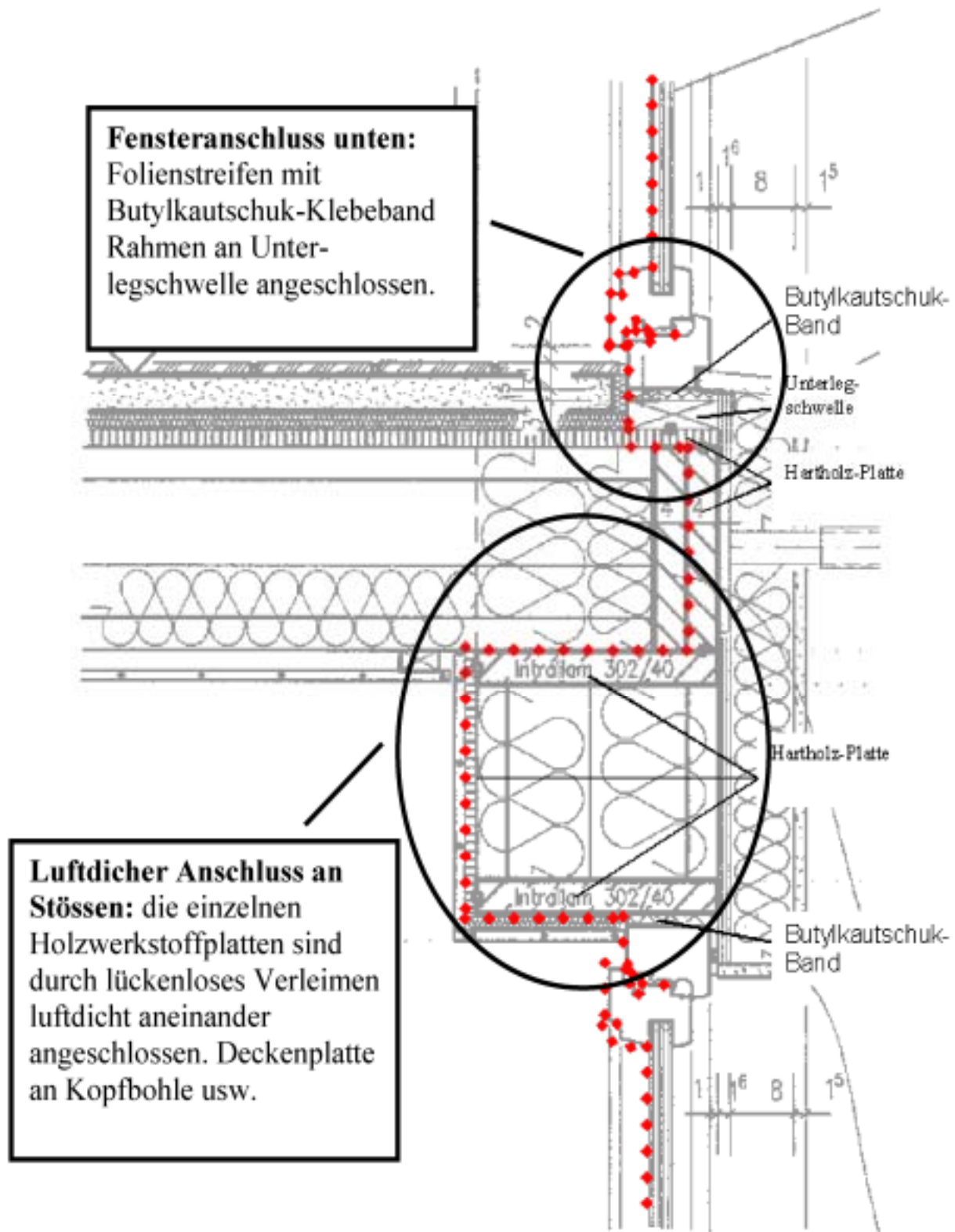


Abbildung 38: Detail Decke, Fenstersturz und Fenster mit eingezeichneter luftdichter Ebene (Punktlinie) (nach Architekt M. Brausem).

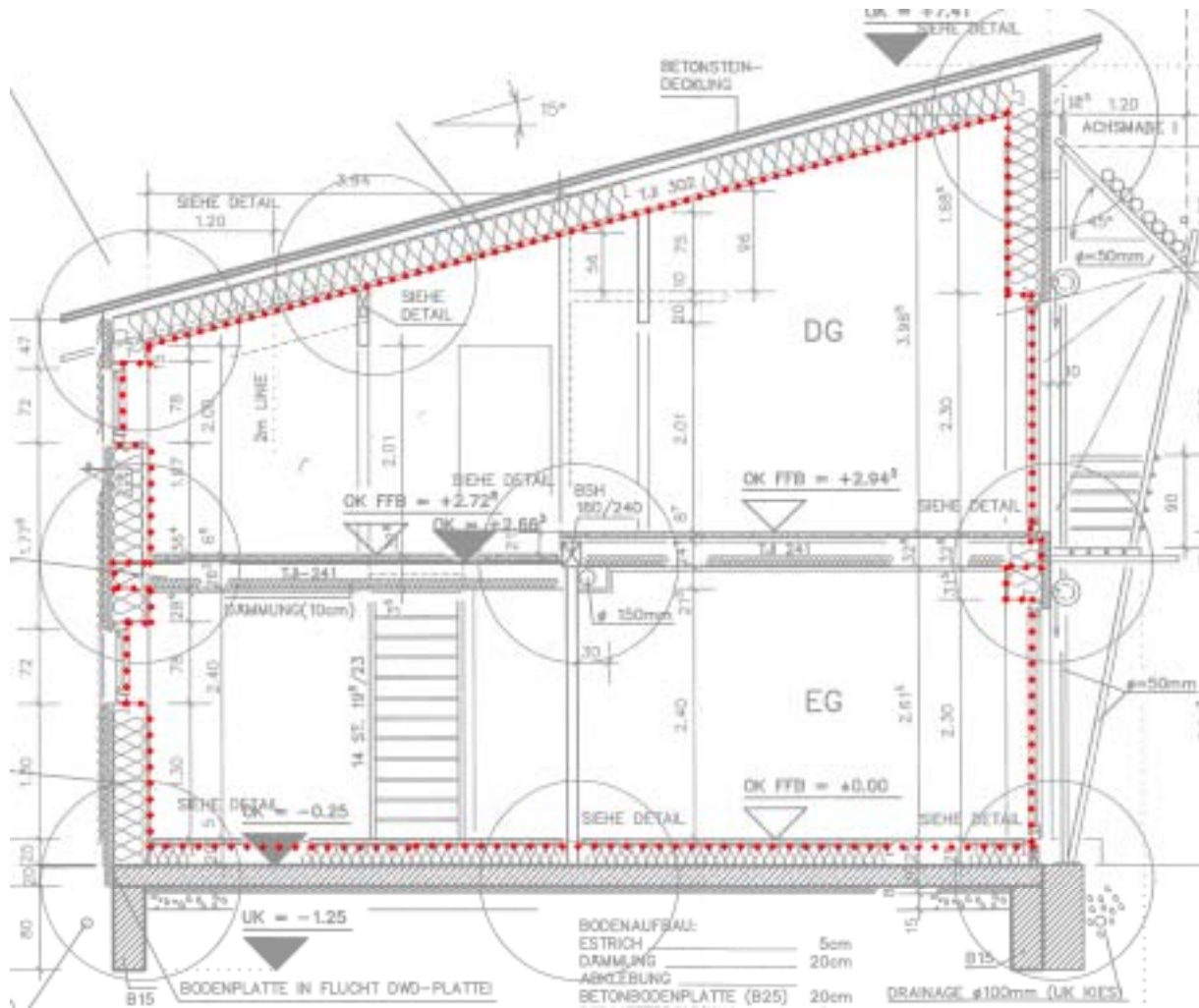


Abbildung 39: Gebäudeschnitt mit Verlauf der luftdichten Ebene als Punktlinie (nach Architekt M. Brausem).



Abbildung 40: An den Außenwänden sind nur Aufputzsteckdosen eingesetzt. Die elektrischen Versorgungsleitungen verlaufen in den Fußleisten.

3.3.1 Nachmessungen

Gut 3 1/2 Jahre nach den Erstmessungen konnte das Passivhaus Institut bei den 5 Passivhäusern in Lindlar/Hohkeppel Drucktest-Nachmessungen durchführen. Das Lüftungsnetz wurde hierzu jeweils vor dem Lüftungsgerät außen- und fortluftseitig abgedichtet, das Gebläse konnte bei allen Messungen in die Terrassentür eingebaut werden. Außer den Fensterdichtungen zeigten die fünf konstruktionsgleichen Häuser keine systematischen Leckagen. Einzelne Restleckagen wurden an der Entlüftung des Toiletten-Fallrohrs, vereinzelt im Bereich des unteren Fensteranschlusses, gelegentlich an nutzungsbedingten Durchdringungen der luftdichten Ebene (Bohrungen etc.), an einer Vorwandinstallation im Bad und bei einem Haus am Dachanschluss, aufgrund eines Ausführungsfehlers des Dachdeckers, festgestellt.



Abbildung 41: Restleckage an Fenster- bzw. Tüрдichtung. Doppelfenster mit Stulp sind oft ein Schwachpunkt.

Die Fensterdichtungen auf der Beschlagseite waren regelmäßig geringfügig undicht. Aufgrund der Führung der Fensterbänder durch die Dichtlippen, waren die Restleckagen größtenteils konstruktionsbedingt. Ein weiterer Schwachpunkt hinsichtlich Luftdichtheit an den Fenstern war der Stulp bei Doppelflügel.

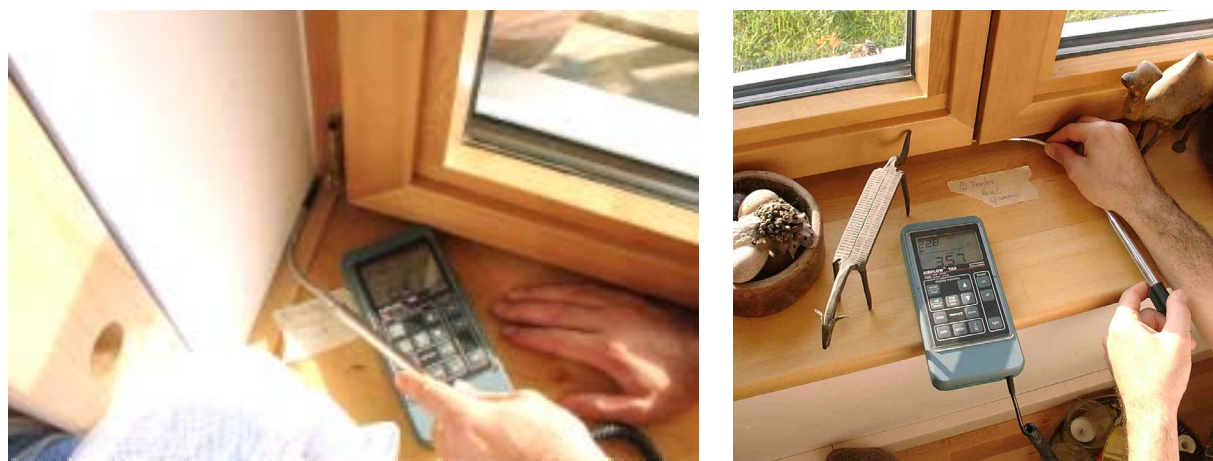


Abbildung 42: Fensteranschluss-Leckagen.

Leckageströme traten auch im Bereich des Fensteranschlusses auf. Die Zuordnung der Lecks ist in diesen Bereichen schwierig, da die luftdichte Schicht im ausgebauten Zustand nicht mehr zugänglich ist. Beim vorhergehenden Drucktest wurden vor allem Leckagen am Anschluss Wand/Bodenplatte gefunden, die damals nachgebessert wurden. Die beobachteten Leckagen am Fensteranschluss könnten ihre Ursache auch im Wandanschluss haben. Eine Ablösung oder fehlerhafte Ausführung der Butyl-Klebebänder am Fensterrahmen oder unvollständig verleimte Schwellen und Bohlen im Laibungsbereich könnten auch die Leckagen bilden. Allerdings waren auch hier, wie die Drucktestergebnisse belegen, die vermessenen Leckagen an keiner Stelle bedeutend.

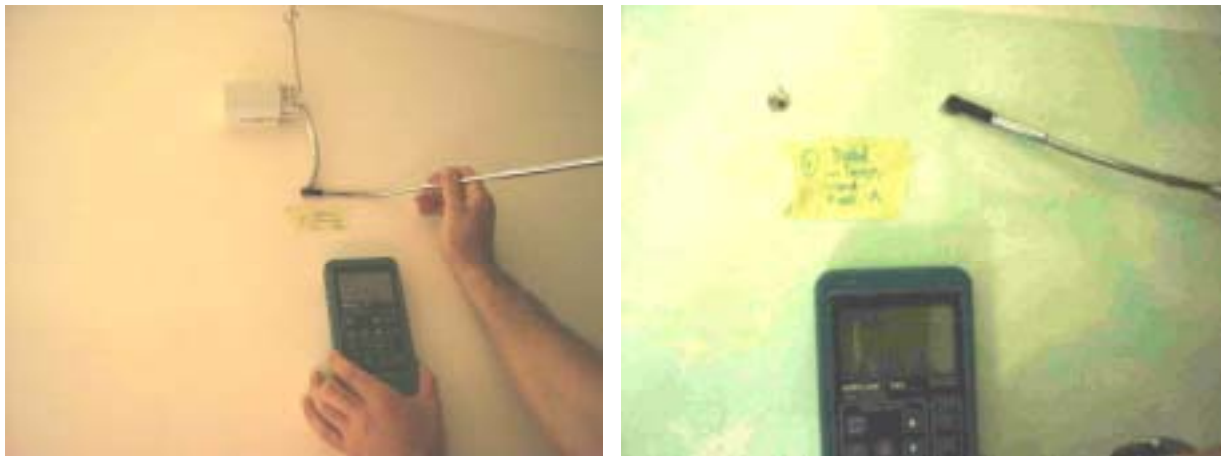


Abbildung 43: Nutzungsbedingte Restleckagen aufgrund von Durchstoßungen der luftdichten Ebene. Interne Leckage durch Dübel in Trennwand. Nachträgliche Installation eines Kabels.

Ein weiterer Aspekt sind die Leckagen aufgrund der Nutzung. Durch Befestigung von Gegenständen im Wandbereich oder durch eine nachträgliche Durchführung von Kabeln (z.B. Antennenkabel) kann die luftdichte Schicht beschädigt werden. Geringe Luftströmungen wurden in den untersuchten Häusern an zwei Dübeln von Fehlbohrungen und an einer nachträglichen Kabelinstallation gefunden. Bei einer Einweisung der Bewohner sollte immer auch über mögliche Befestigungssysteme aufgeklärt werden, um Verletzungen der luftdichten Schicht nach Möglichkeit zu vermeiden (was hier erfolgt war). Aufgrund der geringen Querschnitte sind die Durchdringungen aber unbedeutend.



Abbildung 44: Durchdringungen für die Versorgungsleitungen.

Für die Versorgungsleitungen wurden Leerrohre in der Bodenplatte eingegossen. Nach der Durchführung der Zuleitungen wurden die Leerrohre mit Abschlussdeckeln versehen und mit Silikon abgedichtet. Geringe Leckagen zeigten sich an wenigen Leerrohren, vereinzelt fehlten die Abschlussdeckel. Sicherer wäre das Ausgießen der Durchbrüche um die Leerrohre mit Gips. Eine nachträgliche Revision oder Verlegung zusätzlicher Leitungen wäre mit dieser Lösung allerdings nicht mehr möglich. Auch an der Außenwanddurchführung des Fortluftkanal wurden z.T. kleinere Leckagen gefunden. Bei der Abdichtung von wärmedämmten Leitungen ist die Mineralwolle-dämmung luftdurchströmt. Mit luftdichten Dämmmaterialien oder Abschnürungen (z.B. mit Kabelbindern) kann dies deutlich verringert werden.



Abbildung 45: Restleckage Entlüftung des Toiletten-Fallrohrs (Entlüftungsventil ist im Schacht montiert).

Bei zwei Häusern wurde ein Lufteintritt an den Öffnungsgittern zur Vorwandinstallation beobachtet. Vermutlich sind die Unterdachbelüfter nicht ausreichend dicht. Eine Restleckagen am Spülkasten hat vermutlich die gleiche Ursache.



Abbildung 46: Restleckage an der Vorwandinstallation am WC-Spültaster.



Abbildung 47: Restleckage am Dachanschluss aufgrund eines Ausführungsmangels des Dachdeckers.

Beim Aufstellen der Dachelemente sind in einem Haus die Passungen (Nut und Feder) der Holzwerkstoff-Platten teilweise beschädigt worden. Diese Stellen wurde in der Bauphase mit einer zusätzlichen Folienbahn abgedichtet. Wie die Nachmessung zeigte, blieben geringe Restleckagen.

3.3.2 Quantitative Messergebnisse

Die Gebäude wurden 1997/1998 gebaut und im Januar/März 1998 vor Bezug das erste Mal mittels Blower Door untersucht. Angestrebt waren vom Architekten Luftdichtheitswerte von maximal $1,0 \text{ h}^{-1}$. Wie die Ergebnisse in Abbildung 48 zeigen, wurden diese Werte in 4 Fällen auch erreicht und in einem minimal überschritten

(Abweichung liegt innerhalb der Messgenauigkeit). Bei diesen Abnahmemessungen wurden die Hauptleckagen bei der Anbindung der Bodenplatte an die Wände gefunden. Diese wurden nach den Messungen nachträglich abgedichtet. Bei den im Oktober 2001 durchgeführten Nachmessungen der Luftdichtheit durch das PHI wurden deutlich verbesserte n_{50} -Messwerte von durchgehend kleiner oder gleich $0,6 \text{ h}^{-1}$, im Mittel $0,52 \text{ h}^{-1}$, festgestellt.

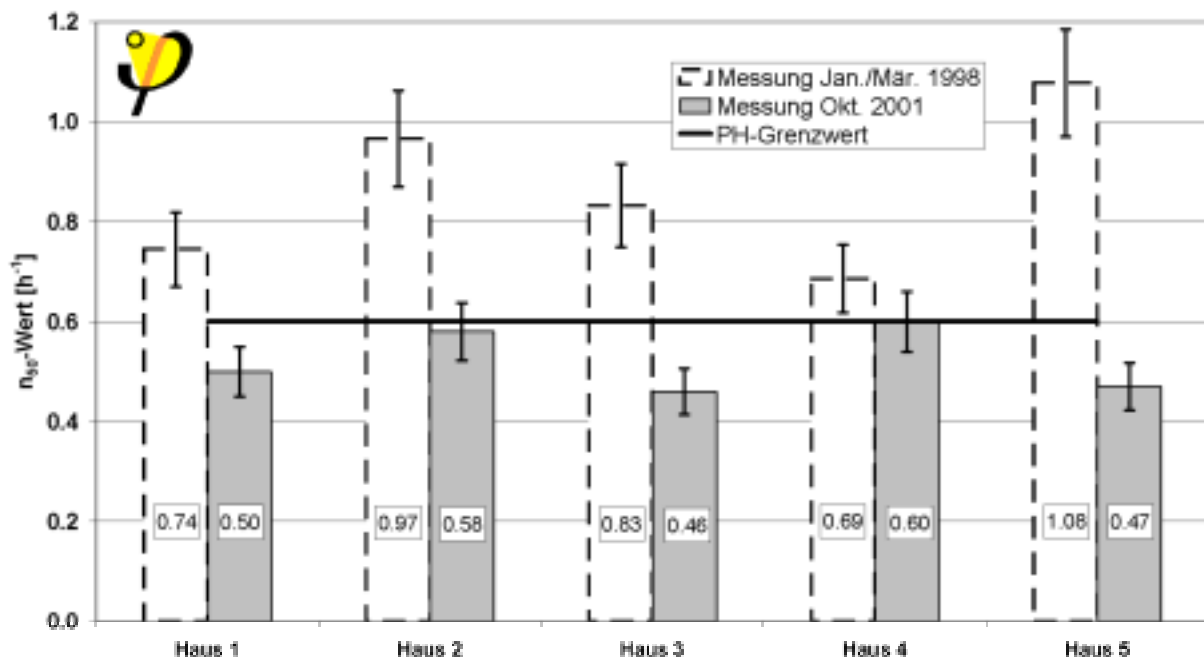


Abbildung 48: Ergebnisse der Nachmessung in Hohkeppel-Lindlar.

Mit diesen Messwerten wird deutlich, dass die Nachbesserungen in diesen Gebäuden nach den ersten Messungen erfolgreich waren und dauerhaft sind. Das Konzept der luftdichten Ebene über die kraftschlüssig verbundene Holzwerkstoffplatten ist damit für diese Gebäude als erfolgreich anzusehen. Die Ergebnisse liegen zwischen $0,46$ und $0,60 \text{ h}^{-1}$ und damit sehr nah beieinander. Daran kann abgelesen werden, dass mit dem Konzept gleichbleibende Qualität reproduzierbar möglich ist. Nach einem Zeitraum von mehr als 3,5 Jahren ist nicht mit nachfolgenden deutlichen Verschlechterungen zu rechnen. Entscheidend für das Konzept ist, dass Bauteilbewegungen sicher vermieden werden müssen, um ein Abreißen der kraftschlüssigen Verbindungen oder ein Aufreißen an anderer Stelle ausschließen zu können. Bei größeren Gebäuden könnte diesbezüglich erhöhter Planungsaufwand anfallen. Ab einer gewissen Gebäudegröße sind Dehnungsfugen sicher unumgänglich. Diese Lösung ist trotz des hier erwiesenen Erfolges nur zu empfehlen, wenn ausreichend gesicherte praktische Erfahrungen vorhanden sind.

3.4 Einfamilienhäuser Bamberg und Stegaurach (Holzleichtbau)

An zwei vom Ingenieurbüro Trykowski aus Frensdorf geplanten Passivhäusern im Raum Bamberg wurde die Dauerhaftigkeit vom Luftdichtheitskonzept in Holzbauweise überprüft. Die beiden Einzelhäuser wurden im August 1998 fertiggestellt. Es handelt sich um reine Holzhäuser mit ganz unterschiedlichen Grundrissen und Gebäudeformen. Beide Häuser sind mit Erdgeschoss-Fußböden als Holzkonstruktionen über einem Luftraum ausgestattet (keine Unterkellerung). Die Wände bestehen aus in der Werkhalle des Fachbetriebes vorgefertigten Elementen. Beide Häuser sind mit Unterdachentlüftern für den Druckausgleich im Abwasserstrang ausgerüstet.



Abbildung 49: Die beiden Passivhäuser in Stegaurach/Mühlendorf (links) und in Bamberg (rechts) mit den großen Verglasungsflächen nach Norden, bei denen die Nachmessungen zur Luftdichtheit durchgeführt wurden.

Bei beiden Passivhäusern ist das Luftdichtheitskonzept durchgängig mit verklebten Holzwerkstoffplatten realisiert worden. Die luftdichte Ebene verläuft konsequent in der zweischaligen Wand hinter der Installationsebene. Jede der Holzhartfaserplatten ist an den Stößen zur nächsten Platte in Dach, Wand und Fußboden mit Spezialklebeband auf Acryldispersion-Basis verklebt worden. Die luftdichte Ebene in der Fläche besteht damit rundherum aus den verklebten Hartfaserplatten. Auch die Übergänge zwischen den Flächen-Bauteilen (Wand an Dach, Wand an Fußboden, Wand an Wand) sind auf diese Weise ausgeführt. Zum luftdichten Verbinden in den Ecken wurde ein Butylkautschukband eingesetzt. Die Fenster und Türen sind umlaufend mit einer reißfesten Polypropylen-Folie (Breite: 20 cm) ausgestattet. Diese ist mit einem Butylkautschuk-Klebeband am Fenster bzw. an der Tür und mit Acryldispersions-Klebeband an den OSB-Platten der Wandflächen komplett verklebt. Die Durchführungen der Elektrokabel, Wasser- und Abwasserleitungen wurden mit Dichtkragen aus Klebeband hergestellt. Diese Dichtkragen wurden direkt auf die Holzwerkstoffplatten aufgeklebt. Daraus ergibt sich ein konsequentes Luftdichtheits-

konzept für den Holzbau, welches heute sehr häufig von Passivhausarchitekten eingesetzt wird.

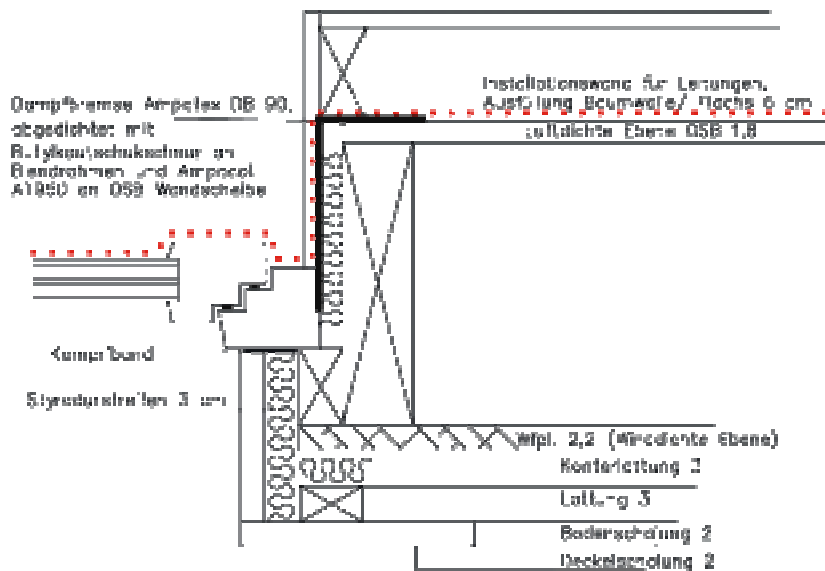


Abbildung 50: Details Luftdichtheit am Fensteranschluss mit Angabe der luftdichten Ebene als Punktlinie (Nach: Ingenieurbüro Trykowski).

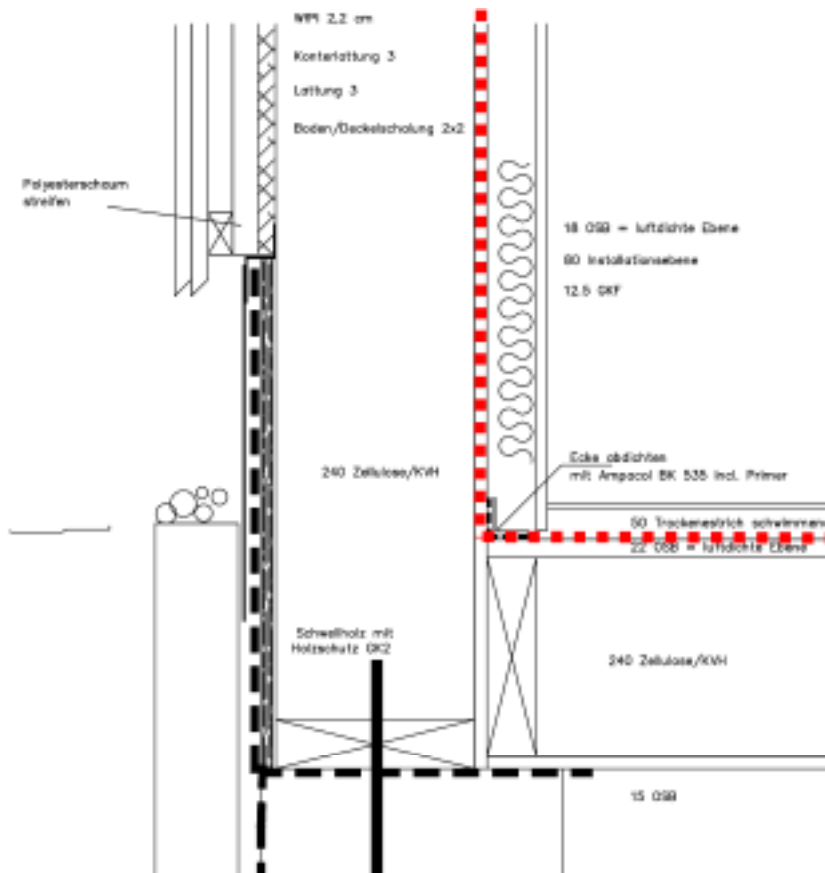


Abbildung 51: Details Fußpunkt mit eingezeichneter luftdichter Ebene (nach Ingenieurbüro Trykowski).

Stoss von/gegen	Bodenplatte	Flügel-rahmen	Blend-rahmen	AW Leichtbau	Dach
Dach				Acryldispersion-Klebeband, Ecken mit Butyl-Kautschuk	Acryldispersion-Klebeband (Firstfette mit PP-Folie und Abklebung)
AW Leichtbau	OSB-Platten verklebt mit Acryldispersion-Klebeband		Butyl-Kautschuk Klebeband, PP-Folie und Acryldispersion-Klebeband	Acryldispersion-Klebeband	
Blendrahmen	Butyl-Kautschuk Klebeband, PP-Folie und Acryldispersion-Klebeband	Lippendichtung			
Flügelrahmen		Lippendichtung			
Bodenplatte	Acryldispersion-Klebeband				

Tabelle 7: Luftdichte Anschlüsse Passivhaus-Projekte Raum Bamberg.

3.4.1 Nachmessung

Über 4 Jahren nach den Luftdichtheits-Abnahmemessungen wurden am 12. Juni 2002 an den beiden Passivhäusern Luftdichtheits-Nachmessungen unter Einsatz einer Blower Door durchgeführt. Bei beiden bewohnten Gebäuden wurde jeweils alle beheizten Räume der Gebäude mit einbezogen.

	Termin Erstmessung	Termin Nachmessung	Zeitraum
Passivhaus Stegaurach	03.06.1998	12.06.2002	4 Jahre
Passivhaus Bamberg	17.02.1998	12.06.2002	4 Jahre 4 Monate

Tabelle 8: Termine der Erstmessungen und der Nachmessungen sowie der Zeiträume zwischen den Messungen der zwei Passivhäuser.

Für die Nachmessungen wurden bei beiden Objekten die Lüftungsanlagen außen- und fortluftseitig abgeklebt. Die Haustüren wurden nicht abgeschlossen. Die Luftfördereinrichtung wurde jeweils in eine Terrassentür eingebaut.

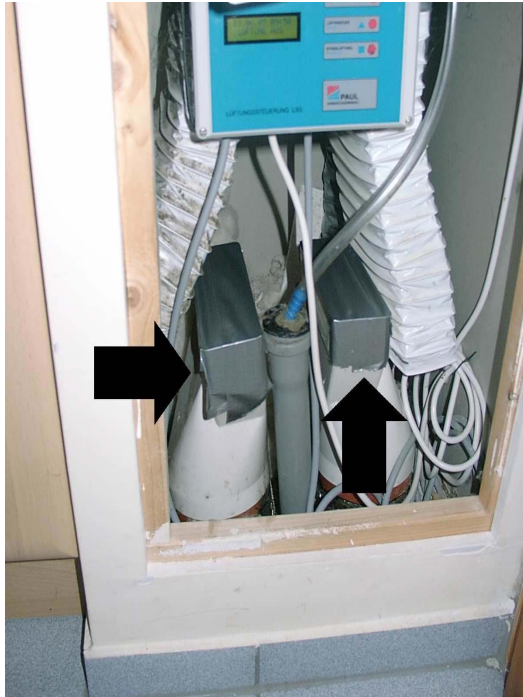


Abbildung 52: Demontierte Verbindung der Lüftungsanlage zum Außen- und Fortluftrohrstutzen beim Passivhaus in Stegaurach/Mühlendorf. Die nach außen führende Rohre sind für die Blower Door Messung temporär luftdicht abgeklebt (Pfeile).

Restleckagen Passivhaus Bamberg

Bei der Leckagesuche im Passivhaus Bamberg wurden, trotz der guten Luftdichtheit (Ergebnis siehe weiter unten) einige Undichtheiten festgestellt:

- Anschluss Fenster bzw. Festverglasung an Fußboden/Laibung,
- Anschluss Fensterbank an Wandelement,
- Einführung der Frischwasserleitungen im EG Fußboden,
- Steckdosenableckage Außenwand,
- Anschluss Festverglasung im Dach an Dachelement
- Haustürdichtung (Anschlagseite),
- einige Glasleisten der Fenster sowie
- Beschädigung der Gipsverkleidungsplatte in der Laibung (Küche).



Abbildung 53: Undichtheiten beim Passivhaus Bamberg im EG in der Laibung beim Anschluss Festverglasung bzw. Fenster an den Fußboden/Bodenaufbau.



Abbildung 54: Restleckagen am Übergang Fensterbank an Wandelement (links: Fenster EG, rechts: Festverglasung 2. OG).



Abbildung 55: Links: Leckagen an der Einführung der Wasserleitungen durch den Erdgeschossfußboden. Rechts: Undichtheit der Steckdose in der Küche im EG.



Abbildung 56: Links: Undichtheit der Festverglasung im Dach (Sommersonnenschutz durch außen aufgelegte Schilfmatte). Rechts: Leckage an beschädigter Gipsplatte (durch die Seileinführung der innenliegenden Jalousie am Fensterflügel).

Die exakte Leckagezuordnung der georteten Strömungen an einigen Fenster- und Festverglasungsanschlüssen bzw. den Fensterbänken ist nicht möglich. Es handelt sich um kleinere Leckagen die mehrfach, auf den unterschiedlichen Etagen, aufgetreten sind. Da die Schwachstellen wiederholt im unteren Bereich in der Nähe der Fenster aufgetreten sind, handelt es sich vermutlich um beschädigte oder nicht exakt ausgeführte Abklebungen der an die Fenster geklebten Folien. Die umlaufenden Folien werden zum Umklappen auf die Wand nur etwa auf den letzten 10 cm aufgeschnitten und verklebt. Trotz der guten Planung sind hier Schwachstellen in der Ausführungen möglich. Auch das Protokoll der Erstmessung weist darauf hin; es wurde protokolliert: „An einigen Anschlüssen Fensterrahmen-Laibung hatte sich das Dichtpapier etwas gelöst“ [Sachs 1998]. Möglicherweise wurde das Material stellenweise nicht im optimalen Zustand verarbeitet.

Die gefundene Leckage im Bereich der Wasserleitungseinführung durch den EG Fußboden hat eine etwas größere Bedeutung, da es sich vermutlich um einen größeren Leckagequerschnitt handelt. Eine exakte Bestimmung oder Nacharbeit ist allerdings durch die beengten Platzverhältnisse problematisch. Die Abdichtungen an dieser Stelle sind, aus derzeitigem Mangel an geeigneten Produkten, in Handarbeit hergestellt worden. Mittlerweile sind am Markt von verschiedene Herstellern geeignete Dichtmanschetten verfügbar.

An den Fensterdichtungen (Flügel/Blendrahmen) wurden keine Undichtheiten festgestellt. Die typischen kleineren Leckagen der Haustürdichtung (Nachstellung möglich) und an vereinzelt Steckdosen sind in dem gefundene Umfang als unproblematisch einzustufen. Letztere haben ihre Ursache vermutlich in nicht ausreichend abgedichteten Leerrohren.

Die geringen Leckagen an einigen Glasleisten wurden bereits bei der Erstmessung festgestellt. Es handelt sich um einen herstellungsbedingten Mangel. Es sollte vom Hersteller eine bessere Lösung gefunden werden. Eine Nachbesserung an den eingebauten Fenstern ist nicht notwendig und wäre sehr aufwendig und von fragwürdiger Dauerhaftigkeit.

Die Eindichtung der Festverglasungen im Dach ist ein bautechnisch schwieriges Detail. Hier sind an einigen Stellen bedeutende Undichtheiten gemessen worden. Da es sich allerdings nur um Leckagen mit kleinen Querschnitten handelt, ist die energetische Bedeutung nicht groß. Um eventuelle Schäden zu vermeiden, wurde im Rahmen der Gewährleistung eine nicht mehr festsitzende Glashalteleiste an einem späteren Termin nachgebessert.

In der Küche ist die Gipsverkleidungsplatte in der Laibung durch die Seileinführung der innenliegenden Jalousie (auf dem Fensterflügel befestigt) beschädigt worden. Sie wurde nicht vom Architekten geplant und ist nachträglich montiert worden. Hier konnte ein Luftstrom gemessen werden. Wie Abbildung 50 zeigt, verläuft die luftdichte Ebene in der Laibung direkt unterhalb der Gipsplatte, eine Installationsebene ist hier nicht vorhanden. Daher ist bei der Beschädigung der Gipsplatte auch die Luftdichtheitsfolie zerstört worden. Dieser Schaden könnte relativ einfach behoben werden.

Restleckagen Passivhaus Stegaurach

Bei der Leckagesuche bei 50 Pa Unterdruck wurden im Passivhaus in Stegaurach die folgenden kleineren Leckagen gefunden:

- einige Lichtschalter/Steckdosen/Kabeldurchführungen,
- wenige Anschlußfugen zwischen Flächenbauteilen (Wand/Geschossdecke und Wand/Dach und Dach/Dach),
- Glasleisten einiger Fensterflügel,
- Haustürdichtung (nicht abgeschlossen) sowie
- geringe Leckagen an Rohrdurchführungen für Regen- und Hauptwasserleitungen.



Abbildung 57: Kleinere Leckagen im Passivhaus Stegaurach an Lichtschaltern in der Außenwand und an der Kabeldurchführung im Leerrohr durch die Bodenplatte.



Abbildung 58: Leckagen im Passivhaus Stegaurach an der Kabeldurchführung der Deckenlampe in einem Abstellraum und an der Fuge der Gipsverkleidungsplatten im Giebel (unterhalb der Firstpfette).

Die Leckagen an einigen Steckdosen und Lichtschaltern sind trotz der vorhandenen Installationsebene aufgetreten. Hier sind vermutlich nicht optimal abgedichtet Leerrohre die Ursache, welche die luftdichte Hülle durchstoßen. Die Durchdringung – und damit die eigentliche Leckage – kann sich allerdings örtlich auch an ganz anderen Stellen befinden. Bei der Erstmessung waren die Installationsebene und damit auch die Schalter und Steckdosen noch nicht vorhanden.

Schwachstellen an Verbindungen von Flächenbauteilen liegen nur in einem geringen Umfang vor. Die Ursachen sind durch die geschlossene Verkleidung der Installationsebene (Gipsplatten) nicht mehr zu erkennen. Ob es sich um eine ungenügende Verklebung der Holzwerkstoffplatten oder eine Leckage durch nachträgliche Durchdringungen handelt (denkbar wären hier z.B. auch Elektrokabel), kann nicht sicher festgestellt werden. Von einer alterungsbedingten Leckage wird nicht ausgegangen.

Die Anschlüsse der Fenster in die Wandelemente haben – mit einer nicht relevanten Ausnahme – überall eine sehr gute Luftdichtheit gezeigt. Die Schwachstellen einiger Glasleisten sind nur sinnvoll produktionsseitig zu ändern, sie wurden bereits bei der Erstmessung festgestellt. Eine Verbesserung an diesem Gebäude ist nicht sinnvoll. Die Haustüchtigkeit könnte mit einer (regelmäßigen) Nachstellung erhöht werden.

3.4.2 Quantitative Messergebnisse

Bei den Erstmessungen lagen beide Gebäude mit $n_{50} = 0,47$ und $0,57 \text{ h}^{-1}$ [Sachs 1998] unterhalb des Passivhaus-Grenzwertes für die Luftdichtheit von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$. Bei Gebäude 1 handelt es sich um das erste Passivhaus, welches der Architekt geplant hat. Bei Planung von Gebäude 2 flossen gesammelte Erfahrungen auch in Bezug auf die Luftdichtheit mit ein. Die Fehlergrößen bei den beiden Erstmessungen sind in den Messprotokollen mit sehr unterschiedlich Größen angegeben. Vermutlich waren unterschiedliche Windstärken während der Messungen die Ursache dafür.

Die Ergebnisse der beiden Nachmessung mit $n_{50} = 0,64$ und $0,43 \text{ h}^{-1}$ zeigen bei Haus 1 einen leicht erhöhten Wert und bei Haus 2 etwas geringeren Messwert gegenüber den Erstmessungen. Die Messgenauigkeit (vgl. Fehlerbalken) relativieren diese Aussagen allerdings: Aufgrund der Fehler resultieren ähnliche Ergebnisse wie bei den Erstmessungen, es gibt keine nennenswerten Veränderungen. Beide Ergebnisse verdeutlichen die gute Luftdichtheit der Wohngebäude und zeigen, dass das Luftdichtheitskonzept der Planer schlüssig und dauerhaft ist. Bei den gewählten Verklebungen und Sicherungen ist nicht mit einer Verschlechterung zu rechnen. Der Hersteller der in den Objekten eingesetzten Verbindungsprodukten gibt eine Herstellergarantie von 10 Jahren. Es ist von einer deutlich längeren Lebensdauer der fachgerechten Verklebungen auszugehen.

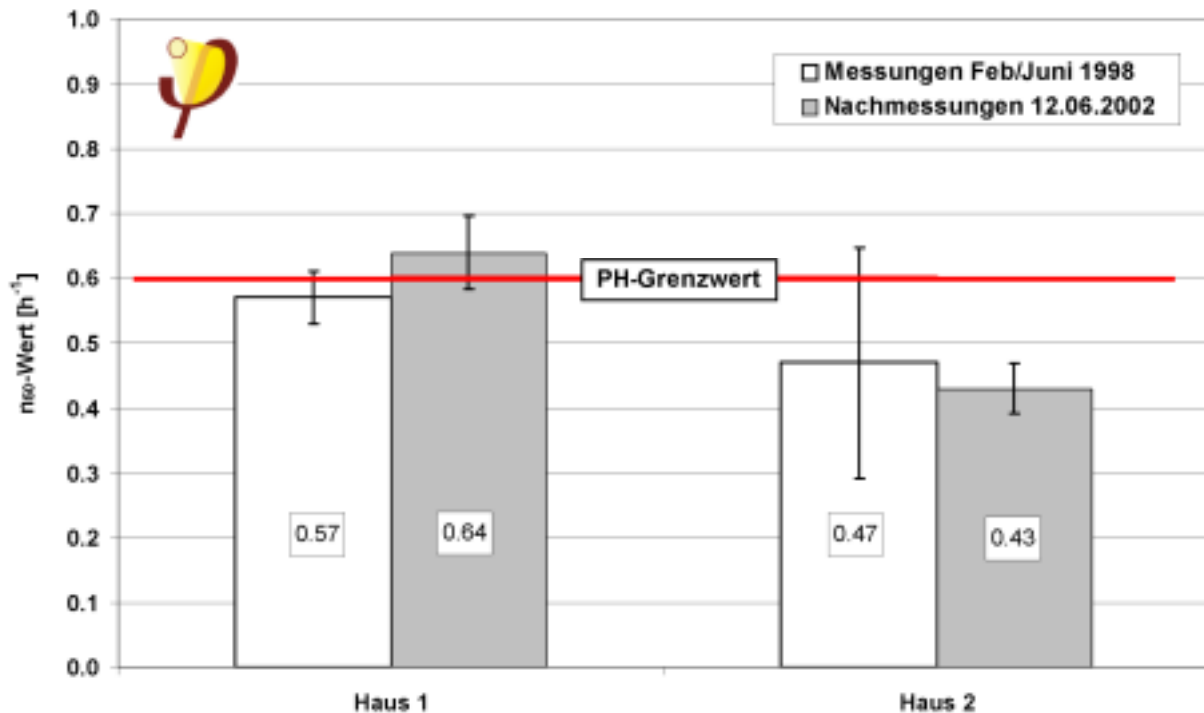


Abbildung 59: Vergleich der Drucktestmessergebnisse von Erst- und Nachmessungen nach über 4 Jahren bei den zwei Passivhäusern im Raum Bamberg. Die jeweiligen Balken geben die Fehlergrößen an.

3.5 Passivhaus-Siedlung Hannover-Kronsberg (Mischbau)

Am 15. und 16. April 2003 wurden vier Luftdichtheits-Nachmessungen in der Passivhaus-Siedlung Hannover Kronsberg durchgeführt. Die Siedlung besteht aus 32 Reihenhäusern in vier Zeilen und wurde im Dezember 1998 bis Februar 1999 fertiggestellt (Architekten: F. Rasch/P. Grenz, Darmstadt). Die Häuser sind in **Mischbauweise** errichtet worden (Betonskelett mit Holzleichtbau Fassaden- und Dachelementen).

Das Luftdichtheitskonzept beruht auf PE-Folien in den Wand- und Dachelementen, die zugleich die Dampfbremse darstellen. Diese sind an allen Verbindungsstellen nach der Montage von innen konsequent miteinander verklebt worden. An den Verbindungen zu der Beton-Bodenplatte und den Beton-Giebelwänden wurden Folienstreifen aufgelegt oder der Folienstreifen in dem jeweiligen Leichtbauelement herausgeführt und von außen auf dem Beton verklebt. An den Haustrennwänden zwischen den Reihenhäusern wurde vor dem Auflegen bzw. Montieren der Leichtbau-Dach- und Wandelemente ein Folienstreifen aufgelegt und nachträglich mit den Folien der Elemente verklebt. Diese Objekte sind mir allen Details auch bzgl. der Luftdichtheit im Bericht [Feist 2001] dokumentiert.



Abbildung 60: Südfassade einer Reihenhausezeile der Passivhaus-Siedlung in Hannover-Kronsberg im April 2003.

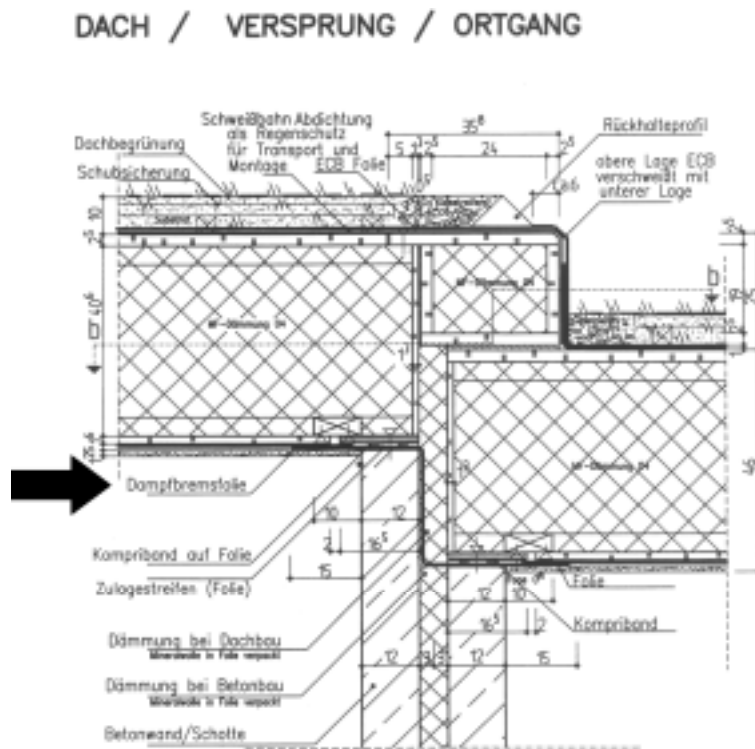


Abbildung 61: Luftdichter und wärmebrückenfreier Anschluss zweier versetzter Dachelemente mit Höhenversprung der Passivhäuser in Hannover-Kronsberg [Feist 2001]. Der Pfeil weist auf die Beschriftung der Dampfbremstafel, welche gleichzeitig die luftdichte Ebene darstellt.

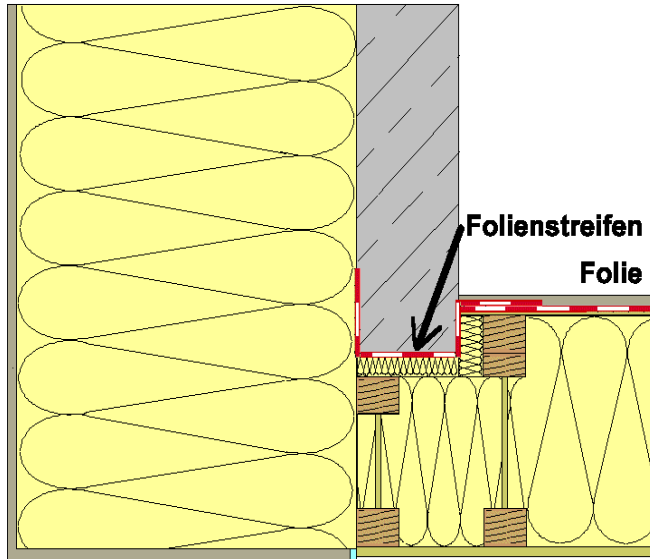


Abbildung 62: Anschluss der Fassadenelemente an die Giebelwand (Horizontalschnitt) der acht Endhäuser. Der Pfeil weist auf die verklebte PE-Folie auf der Außenseite der Beton-Giebelwand [Schnieders 2001].

Elektrokabel sowie Frisch- und Abwasserleitungen wurden zentral an nur einer Stelle durch die Bodenplatte geführt und dann mit Quellbeton vergossen. Die Heizungsrohre sowie die Telefon- und Antennenkabel verlaufen durch die Trennwände im Giebelbereich und wurden mit Brandschutzmaterial abgedichtet. Die Außen- und Fortluftrohre sowie die Solaranlagenleitungen wurden durch die Dach-Leichtbauelemente geführt und rundum mit Acrylklebeband abgeklebt. Im Technikraum im DG ist jeweils ein Unterdachbelüfter für den Abwasserstrang montiert um die Anzahl der Dachdurchdringungen zu minimieren.

Stoss von/gegen	Bodenplatte	Flügelrahmen	Blendrahmen	AW Leichtbau	Dach
Dach				Acryl-Klebeband (Verbindung PE-Folien)	Acryl-Klebeband (Verbindung PE-Folien)
AW Leichtbau	PE-Folie mit Acryl-Klebeband oder Butyl-Kautschuk Klebeband auf grundierten Beton geklebt		Butyl-Kautschuk Klebeband mit Flieskaschierung an PE-Folie	Acryl-Klebeband (Verbindung PE-Folien)	
Blendrahmen	Butyl-Kautschuk Klebeband mit Flieskaschierung	Lippen-dichtung			
Flügelrahmen					
Bodenplatte	Mörtel plus Glattstrich				

Tabelle 9: Luftdichte Anschlüsse der Passiv haus-Siedlung Hannover-Kronsberg

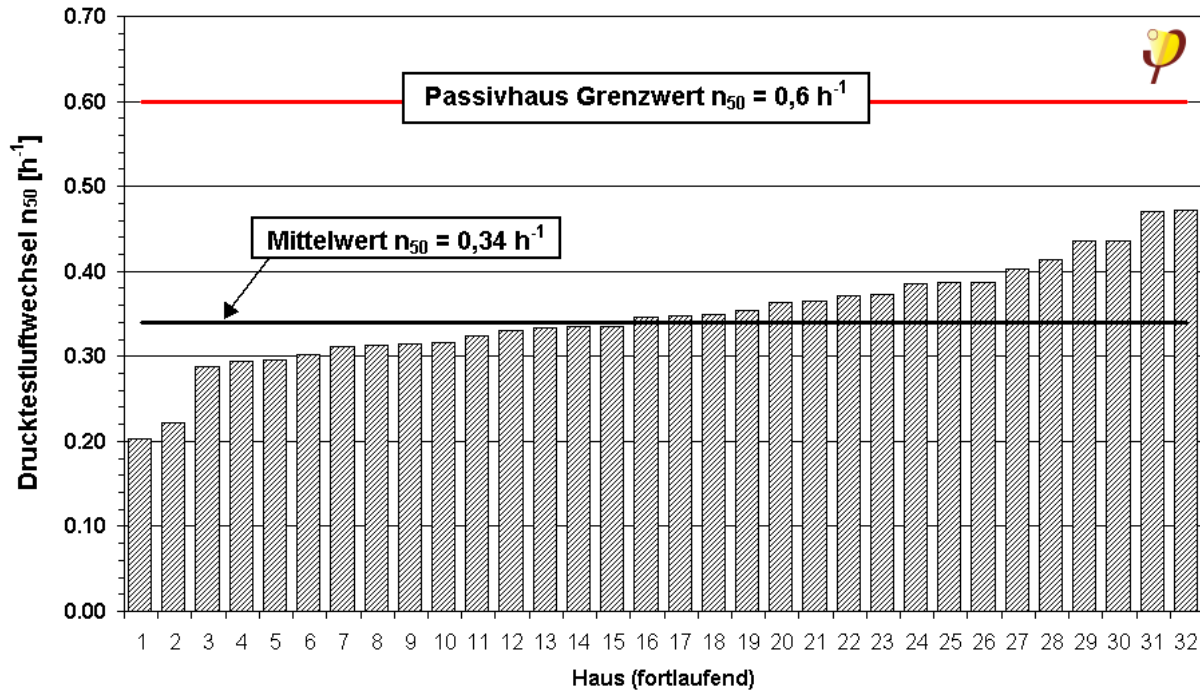


Abbildung 63: Drucktestergebnisse der 32 Passivhäuser in Hannover-Kronsberg ohne Abzug der Leckageströme zu den Nachbargebäuden (nach [Peper 1999]).

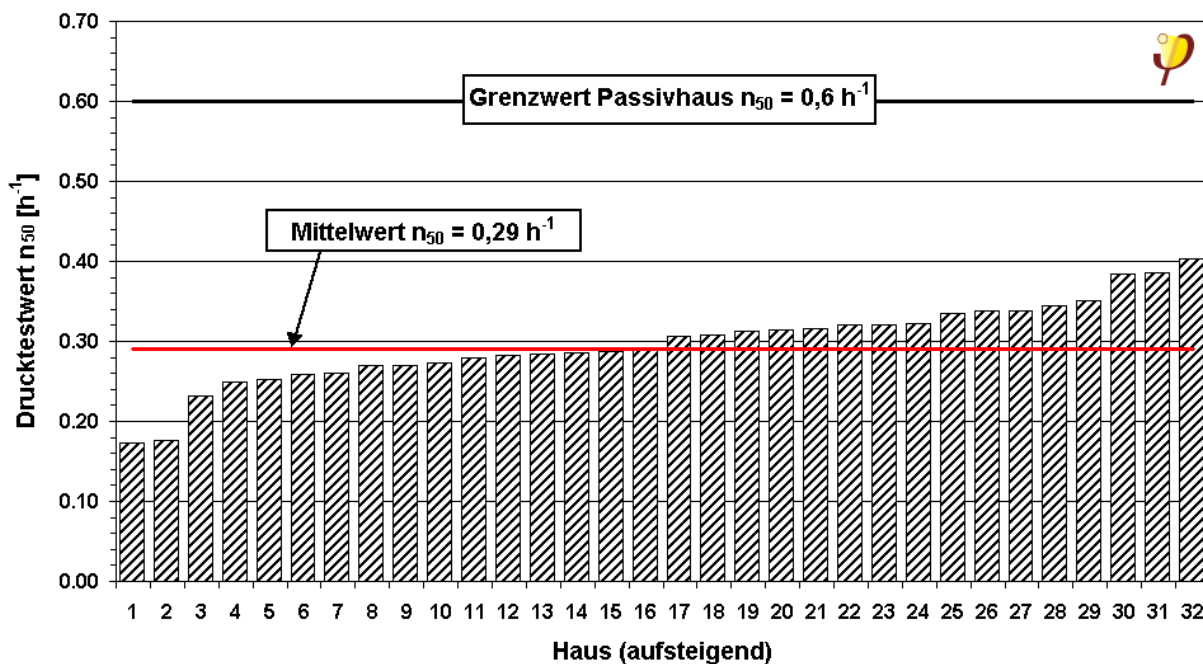


Abbildung 64: Endergebnisse der Drucktestmessungen der 32 Passivhäuser in Hannover-Kronsberg mit Abzug der Leckageströme zu den Nachbargebäuden (nach [Peper 1999]).

Zur Zeit der Fertigstellung der Siedlung 1998/1999 wurden die Blower Door Erstmessungen in allen Häusern durchgeführt. Bei den Messungen wurde zusätzlich in den jeweils angrenzenden Häusern Schutzdruck aufgebaut, um die Größe der Leckageströme in die Nebenhäuser festzustellen. Ein Wohnblock aus jeweils acht

Reihenhäuser wird thematisch als eine Einheit betrachtet. Daher sind die Leckageströme in die (beheizten) Nebenhäuser der Zeile energetisch nicht entscheidend. Sie wurden von den Messwerten abgezogen. Es ergab sich ein Mittelwert aller Häuser dieser Messdaten abzüglich der Nachbarhausleckagen von $n_{50} = 0,29 \text{ h}^{-1}$. Ohne die Berücksichtigung der Nachbarhausleckageströme ergibt sich ein geringfügig höhere Mittelwert von $n_{50} = 0,34 \text{ h}^{-1}$. Die Messungen sind in [Peper 1999] dokumentiert worden. Die Drucktestergebnisse ohne und mit Schutzdruckabzug werden hier grafisch dargestellt.

Mit der Passivhaus-Siedlung in Hannover hat sich gezeigt, dass sehr hohe Luftdichtheitsqualität auch in der Serienfertigung ohne zeitaufwendige und damit teure „Bastlerlösung“ möglich sind. Die geringen Restleckagen wurden in der Hauptsache an den Haustüren und Fenstern sowie an einigen Anschlussfugen lokalisiert. Um die Luftdichtheit noch weiter zu verbessern, wurden zum Teil Leckagen an Anschlussfugen mit Silikon nachgearbeitet. Dies erfolgte allerdings im Zustand, als die inneren Wandverkleidungen (Gipsplatten) der Leichtbauwände zum größten Teil bereits montiert waren. Daher konnte eine nachträgliche Abdichtung in diesen Fällen häufig nicht direkt an der luftdichten Ebene erfolgen. Solche Maßnahmen können daher nicht besonders erfolgreich sein und gelten außerdem als nicht dauerhaft. Unter anderem sollte diese Annahme mit den Blower Door Nachmessungen überprüft werden.

3.5.1 Nachmessungen

Am 15. und 16. April 2003 wurden an vier bewohnten Passivhäusern der Siedlungen Nachmessungen der Luftdichtheit mit Leckagesuche durchgeführt. Dabei wurden die Einbauorte der Messeinrichtung (Terrassen- oder Fenstertür der Küche) jeweils gleich wie bei der Erstmessung gewählt, um diesbezüglich gleiche Voraussetzungen herzustellen. Die Messungen wurden wieder mit einer Messeinrichtung vom Typ „Minneapolis Blower Door“ Modell 4 durchgeführt.

Zwischen den Erstmessungen und den Nachmessungen der vier Reihenhäuser liegt ein Zeitraum von 4 Jahren und 2 bis 4 Monaten.

	Termin Erstmessung	Termin Nachmessung	Zeitraum
Haus A	10.02.1999	15.04.2003	4 Jahre 2 Monate
Haus B	11.02.1999	15.04.2003	4 Jahre 2 Monate
Haus C	11.02.1999	16.04.2003	4 Jahre 2 Monate
Haus D	16.12.1998	16.04.2003	4 Jahre 4 Monate

Tabelle 10: Termine der Erst- und Nachmessungen sowie des Zeitraumes zwischen den Messungen der vier Passiv-Reihenhäuser in Hannover-Kronsberg.



Abbildung 65: Messaufbau in einer Terrassentür bei einer der vier Nachmessungen in Hannover.

Die Wetterbedingungen sind bedingt durch Windgeschwindigkeiten mit Spitzenwerten bis über 7 m/s für Luftdichtheits-Messungen nach [DIN EN 13829] als nicht optimal einzustufen. In allen vier Häusern wurden die Außen- und die Fortluftrohre der Lüftungsanlagen mit Luftblasen verschlossen. Die Haustüren wurden während der Messungen doppelt umgeschossen. Beide Maßnahmen stellen vergleichbare Bedingungen zur Erstmessung her.

Vor den jeweiligen eigentlichen Messungen wurden bei konstanten 50 Pa Unterdruckbedingungen die Gebäudehüllen auf Leckagen abgesucht und protokolliert. Dabei wurden auch die Leckageprotokolle der Erstmessungen verwendet, um gezielt besonders auch an den damals gefundenen Punkten zu prüfen. Als hauptsächliche Restleckagen wurden in allen vier Häusern gefunden:

- Haustürdichtungen,
- einige Fensterdichtungen,
- einige Glasleistenverbindungen,
- Einbindungen Fenster- und Haustürblendrahmen an die Leichtbauwand,
- einige Bauteilverbindungen der Außenwände an Haustrennwände, Bodenplatte oder an die Dachelemente sowie
- einige Ecken Fensterlaibung/Fußboden.



Abbildung 66: Undichtheiten an der Haustür- (rechts) und Fensterdichtungen (links). Diese Leckagen könnten durch Nachstellen v on Tür und Fenster behoben werden.



Abbildung 67: Links: Nachgewiesener Leakagestrom an der Verbindungsstelle der Glasleisten. Rechts: Kleinere Undichtheit bei der Einbindung der Türrahmen an die PE-Folie des Leichtbauelementes.



Abbildung 68: Links: Leckage an der Kante Außenwandelement zur Haustrennwand, Abriss der Fuge durch Bauteilbewegungen. Rechts: Leckage an der Ecke der Fensterleibung zum Fußboden.

Der größte Teil der Restleckagen aus den Erstmessungen konnten bei den Nachmessungen wieder lokalisiert werden. Die exakte Zuordnung zur eigentlichen Leckagestelle ist allerdings durch die Wandverkleidungen und Fußbodenbeläge schwierig. Häufig ist die eigentliche Leckage nicht mehr zu sehen und es kann nur der Ausritt des Strömungspfades in den Innenraum lokalisiert werden.

Die gefundene Leckagen an den Haustüren und Fenstern könnten durch das Nachstellen deutlich verringert werden. Die kleinen Leckagen an mehreren Gehungsfugen der Glasleisten deuten auf eine Schwachstelle in der Fensterproduktion hin. Die Leckagen sind allerdings sehr gering und eine Nacharbeit kann nicht empfohlen werden, da diese sehr aufwendig wären.

Die Undichtheiten an den Verbindungsstellen der unterschiedlichen Bauteile (Außenwandelement / Bodenplatte / Trennwand) wurden zum größten Teil bereits bei den Erstmessungen gefunden. Sie deuten auf partiell nicht vollständig gelungene Abklebungen der verschiedenen PE-Folien hin. Zum Teil war es an Ecken notwendig Verbindung zwischen drei Folien herzustellen. Diese Details wurden vor dem Bau im Modell (bis zum Maßstab 1:1) geprüft. Insgesamt wurden diese Verklebungen auch erfolgreich umgesetzt; es gibt aber regelmäßig kleinere Restleckagen. Diese sind im verkleideten Zustand entweder in der Verbindung Fußboden/Außenwandelement oder in der Kante Bauteilverbindung Außenwand/Trennwand bzw. Außenwand/Dachelement nachweisbar.

Wie oben bereits erwähnt, wurden bei der Erstmessung die Verbindungsfugen z.T. mit elastischem Fugenmaterial (Silikon) nachgebessert. Dies konnte allerdings nur auf der raumseitigen Ebene der Gipsplatten, bzw. „irgendwo“ darunter erfolgen. Eine gezielte und sinnvolle Abdichtung konnte mit dieser Maßnahme nicht erzielt werden. Allein dadurch nicht, dass nicht sichergestellt werden konnte, dass die Verklebungen nur an zwei statt an drei Flanken Klebekontakt haben. Nur dann können normale

Bauteilbewegungen ohne Abriss aufgenommen werden. Eine Nachbesserung ist generell nur direkt an der luftdichten Ebene (hier Folie) sinnvoll und nicht an einer anderen Stelle (z.B. hier Gipswerkstoffplatten). Durch Bauteilbewegungen sind diese nicht sachgerechten Verklebungen zum großen Teil abgerissen. Dadurch können sich die Leakageströme an diesen Stellen geringfügig erhöht haben. Eindeutig nachzuweisen ist diese allerdings nicht. Möglich ist auch, dass durch die Siliconfugen zwar der Strömungspfad verlängert ist aber die Leckagen dennoch nicht verschlossen wurden.

3.5.2 Quantitative Messergebnisse

Die Ergebnisse der vier Nachmessungen zeigen, dass alle untersuchten Gebäude weiterhin über eine sehr hohe Luftdichtheitsqualität verfügen. Der Mittelwert der vier Nachmessungen liegt bei $n_{50} = 0,4 \text{ h}^{-1}$. Bei drei der vier Gebäuden ist der Messwert leicht angestiegen, beim vierten ist er gleich geblieben. Die Veränderungen liegen allerdings im Bereich der Messgenauigkeit der Untersuchungen. Damit ist eine Aussage über eine Erhöhung der n_{50} -Werte nicht eindeutig möglich. Eine Ausnahme macht hier nur Haus B, da sich hier auch unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit eine leichte Erhöhung des Messwertes zeigt. Insgesamt weisen die vier Objekte sowohl bei der Erstmessung als auch bei der Nachmessung eine sehr hohe Luftdichtheit auf.

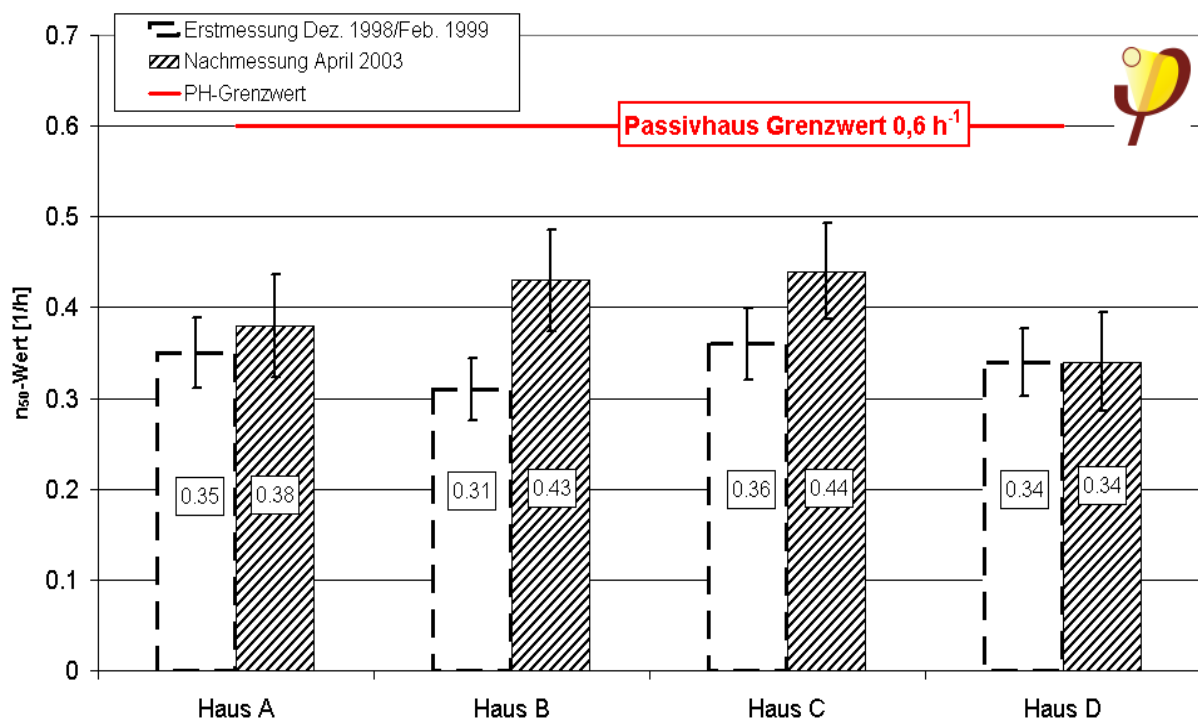


Abbildung 69: Ergebnisse der vier Luftdichtheitsnachmessung in Hannover-Kronsberg im Vergleich zu den Ergebnissen der Erstmessungen. Die Leakageströme zu den Nachbarhäusern (Schutzdruckmessungen) sind hier nicht berücksichtigt worden. Die Balken geben jeweils die Fehlerbereiche der einzelnen Messung an.

Zentrale Aussage der Nachmessungen ist damit die nachgewiesene hohe Luftdichtheit der Reihenhäuser. Wenn überhaupt, können partielle „Verschlechterungen“ hauptsächlich bei Fenstern bzw. Haustüren und den nicht dauerhaften Silicon-Nacharbeitungen festgestellt werden. Das Luftdichtheitskonzept dieser Gebäude in Mischbauweise kann – zumindest nach diesem Zeitraum – als dauerhaft eingestuft werden. Weitere relevante Verschlechterungen sind nicht zu erwarten. Der Erfolg dieser „Luftdichtheit in Serie“ in der Passivhaus-Siedlung liegt vor allem bei der expliziten Planung der Luftdichtheit. Dabei hat sich die Herstellung der Detail-Modelle (bis zum Maßstab 1:1) für Bereiche, bei denen die räumlich Handhabung der luftdichten Verbindung von bis zu drei Folien geplant wurde, als hilfreich und zielführend erwiesen. Es zeigt sich, dass nicht nur die konsequente theoretische Planung entscheidend ist, sondern dass auch die Möglichkeiten der praxisnahen Umsetzung durchdacht werden müssen.

Die Leckageströme zu den Nachbarhäusern wurden bei den Nachmessungen nicht gesondert gemessen. Daher wurden hier die Ergebnisse der n_{50} -Werte ohne den Abzug der Leckagen zu den Nachbarhäusern verglichen. Durch diesen Abzug – der Betrachtung des energetisch relevanten Leckageanteils – würden sich die Werte noch weiter verbessern (vergleiche auch [Peper 1999]).

3.6 Reihenhäuser Rheinmünster und Bühl (Massiv mit Betonschalungssteinen)

Bei zwei Objekten der Bauunternehmung und des Planungsbüros Früh wurden am 30.09.2003 Luftdichtheits-Nachmessungen durchgeführt. Die untersuchten Passivhäuser sind jeweils Endhäuser zweier Reihenhausezeilen. Beide Objekte sind als Massivbau mit Betonschalungssteinen ausgeführt worden. Luftdichte Grundkonstruktion und Anschlüsse wurden nach gleichen Prinzipien umgesetzt.



Abbildung 70: Nordansicht PH Rheinmünster / Südansicht PH Bühl

Bei der dreischaligen Wandkonstruktion stellt der Innenputz die luftdichte Ebene in der Fläche her. Das Dach ist als Holzleichtbau-Konstruktion mit Folie als luftdichte Ebene ausgeführt. Am Boden bildet die Rohbeton-Decke die Luftdichtheit in der Fläche. Die im Wandbereich überlappende Dachfolie ist mit Putzträgern fixiert und anschließend eingeputzt. Der Innenputz ist vollständig und lückenlos an die Bodenplatte und Wandelemente herangeführt und stellt an diesen Stellen den luftdichten Anschluss her. Bei den Fenstern ist ein Dichtband am Blendrahmen mit den Wandelementen zunächst verklebt und darauffolgend überputzt worden und bildet hier einen luftdichten Anschluss. Die Elektro-Installation im Außenwandbereich wird im Schalungsstein vorinstalliert und abschließend mit Beton vergossen. Die Häuser sind mit Unterdachbelüftern im Abwasserstrang der Toiletten ausgerüstet.

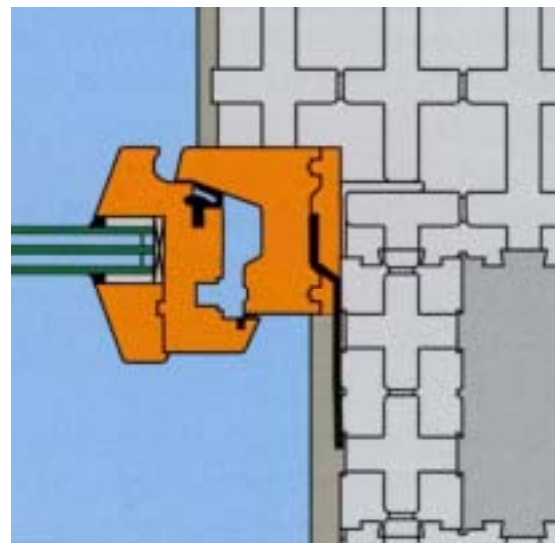
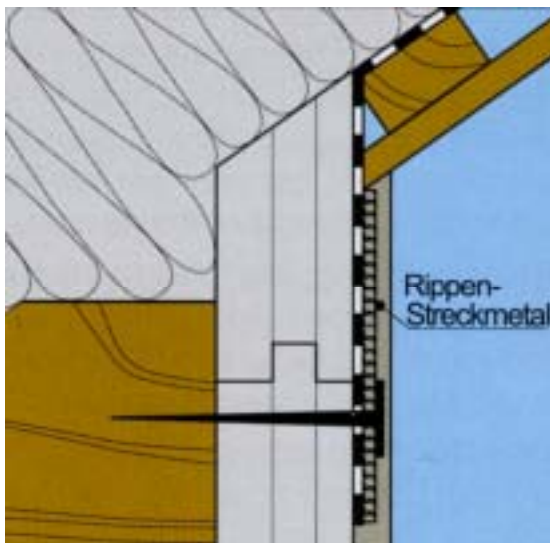


Abbildung 71: Anschluss Dachfolie an Wand (links) / Anschluss Fenster (rechts). Die Dachfolie wurde mit einem Putzträger auf der Wand fixiert und anschließend mit Innenputz luftdicht eingeputzt. Das Dichtband des Blendrahmens wurde zunächst im Laibungsbereich verklebt und nachher luftdicht überputzt (Quelle: isorast-Technikhandbuch).

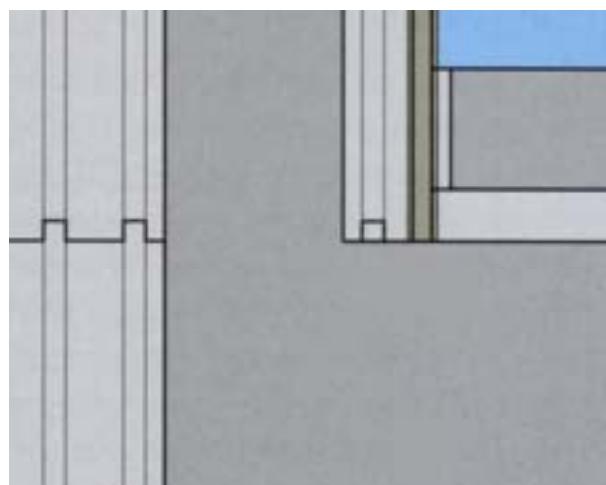
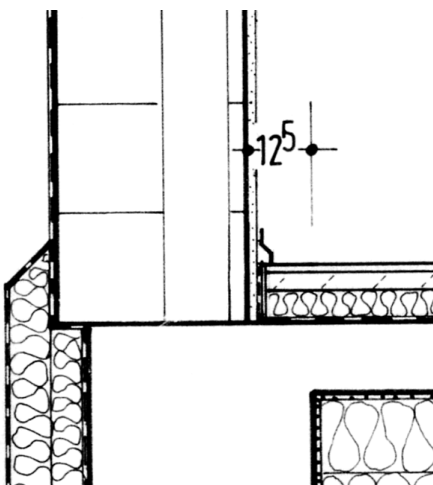


Abbildung 72: Anschluss Wand / Bodenplatte. Der Innenputz wurde v ollständig bis auf die Rohbetonbodenplatte geführt (Quelle: links Architektur- u. Ingenieurbüro Früh, rechts isorast-Technikhandbuch).

Stoss von/gegen	Bodenplatte	Flügelrahmen	Blendrahmen	Außenwand	Dach
Dach				Einputzen der Folie mit Innenputz	
Außenwand	Innenputz bis auf die Rohdecke gezogen		Dichtband an Blendrahmen geklebt und eingeputzt	durchgehender Innenputz	
Blendrahmen		Lippendichtung			
Flügelrahmen					
Bodenplatte					

Tabelle 11: Luftdichte Anschlüsse der Objekte Rheinmünster und Bühl.

3.6.1 Nachmessungen

Nach eineinhalb bzw. beinahe 5 Jahren wurden in zwei Objekten der Fa. Früh Drucktest-Nachmessungen durchgeführt. Für den Drucktest wurde die Blower Door bei beiden Objekten in eine Terrassentür eingebaut. Die Lüftungsanlage wurde in Rheinmünster am Außenlufteinlass mit Folien und am Fortluftauslass mit einer Gummiblaste abgedichtet. In Bühl wurde das Lüftungssystem am Außenluftein- und Fortluftauslass mit Gummiblasten verschlossen. Die Nachmessung wurde entsprechend der Erstmessung vorbereitet und durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Es wurden jeweils zwei Messungen mit verriegelter und unverriegelter Haustür durchgeführt (Erstmessung bei verriegelter Haustür).



Abbildung 73: Verschluss des Lüftungssystems beim Drucktest in Bühl. In Außenluftein- und Fortluftauslass sind jeweils Gummiblasten gesetzt.



Abbildung 74: Gebläse und Rahmen sind jeweils in eine Terrassentür eingebaut (Objekt Rheinmünster / Bühl).

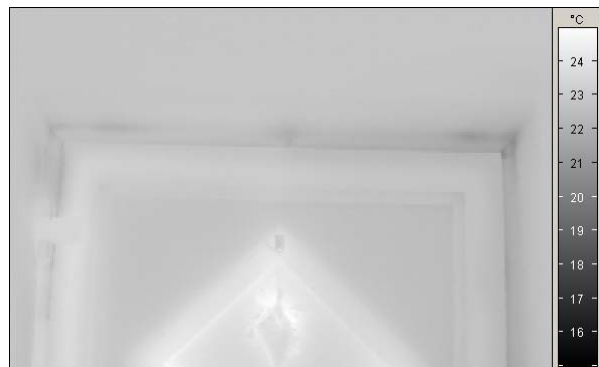
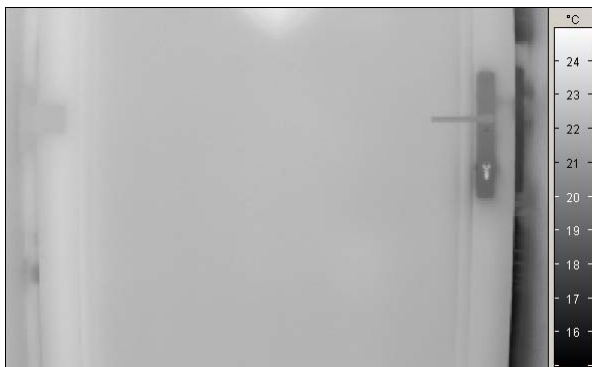


Abbildung 75: Haustür im PH Rheinmünster. Auf der Unterdruck-Thermographie-Aufnahme ist deutlich eine Leckage auf der Anschlagseite erkennbar. Mit der Unterdruck-Thermographie werden Kaltluftfahnen an Leckagen sichtbar gemacht. Vermutlich ist das Türblatt verzogen. Wie auf den Infrarot-Aufnahmen erkennbar ist, schließt die Haustür im oberen Bereich deutlich besser.

Restleckagen im Passivhaus Rheinmünster

Die Haustür stellte die Hauptleckage im Passivhaus in Rheinmünster dar. Zur Bauzeit des Gebäudes waren bezüglich Luftdichtheit noch keine geeigneten Passivhaus-Haustüren auf dem Markt verfügbar, welche auch die hohen Luftdichtheitsanforderungen sicherstellen können.

Weitere Restleckagen wurden an den Fensterdichtungen gefunden. Bei den hochwärmegedämmten Fenstern handelt es sich um die erste Serie des Herstellers. Die Dichtungen sind ein bekannter Schwachpunkt der ersten Serie. Die Fensterbeschläge wurden seit der Fertigstellung des Gebäudes nicht nachgestellt.



Abbildung 76: Innenthermographie eines Fensters. Die Abbildung rechts zeigt das Fenster bei Unterdruck. Am Fensterbeschlag rechts unten ist eine schwache Kaltluftfahne erkennbar.

Die luftdichte Ebene im Dach wird durch eine Folie hergestellt. Die an der Außenwand überlappende Dachfolie wurde mit einem Putzträger fixiert und anschließend mit Innenputz eingeputzt (luftdicht angeschlossen). Punktuelle Restleckagen traten in der Innenecke an Putzrissen auf. Vermutlich wurde die unter dem Innenputz liegende Folie an einzelnen Stellen des Anschlusses beschädigt. Auf der Unterdruck-Thermographie sind die geringen Restleckagen nicht erkennbar; sichtbar auf der IR-Aufnahme ist der geringe Wärmebrückeneffekt an der Innenecke.

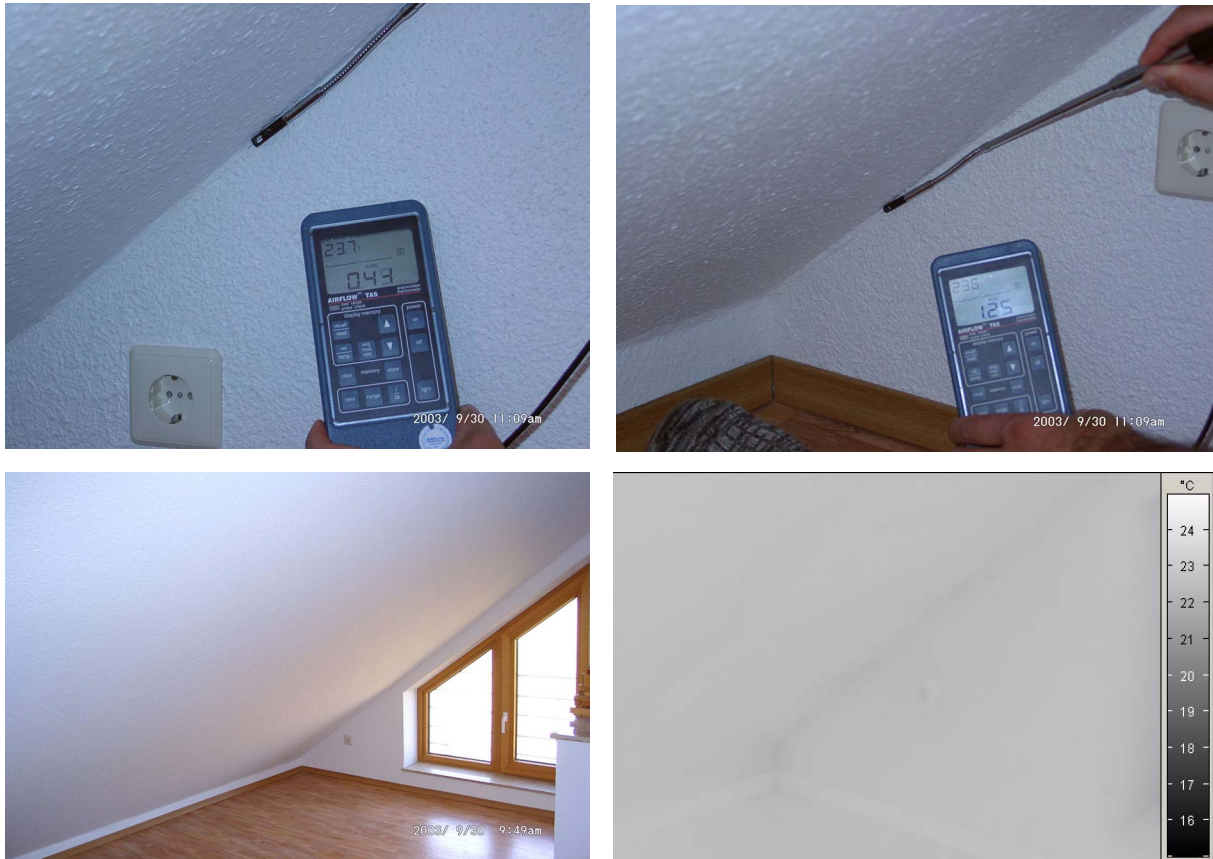


Abbildung 77: Punktuelle Restleckagen am Dachanschluss. Auf der Unterdruck-Thermografie sind auf der einheitlichen warmen Innenoberfläche (über 21°C) keine Kaltluftfahnen erkennbar.

Restleckagen im Passivhaus Bühl

Auch im Passivhaus in Bühl bildet die Haustür die Hauptleckage mit Luftgeschwindigkeiten von über 1 m/s an Boden und Anschlagseite. Lediglich an einem Fenster wurden geringe Restleckagen an der Beschlagseite gefunden. An den Fensterdichtungen der restlichen Fenster gab es keine Schwachstellen.



Abbildung 78: Die Hauptleckage in diesem Haus stellt ebenfalls die Haustür dar.



Abbildung 79: Restleckage an der Beschlagseite eines Fensters.

An den Schaltern und Dosen der Elektroinstallation wurde keinerlei Leckagen gefunden. Das Konzept des Vorrüstens der Elektroinstallation im Schallungsstein und spätere eingießen im Beton erweist sich als zuverlässig dicht. Auch eine Durchdringung eines Antennenkabels durch die Außenwand war luftdicht.

Am Anschluss Dach Außenwand wurden keine Setzrisse und Leckagen gefunden. Aus „optischen“ Gründen ist der Übergang zwischen Innenputz mit Putzendschiene und innerer Beplankung des Dachs mit Acrylat verfugt. Etwaige Beschädigungen der darunter verlaufenden Folie konnten daher ohnehin nicht aufgespürt werden.



Abbildung 80: Das Antennenkabel durchdringt die Außenwand. Die Elektroinstallation ist in den Schalungssteinen vergossen. Es wurden keine Leckagen festgestellt.



Abbildung 81: Keine Restleckagen am Dachanschluss.

3.6.2 Quantitative Messergebnisse

Die untersuchten Häuser erzielen ausgezeichnete Luftdichtheitskennwerte (vgl. Abbildung 82). Gegenüber der Erstmessung beim PH-Bühl vor eineinhalb Jahren ist die Luftdichtheit bei verriegelter Haustür unverändert gut. Im PH-Rheinmünster hat sich der Luftdichtheitskennwert nach fast 5 Jahren geringfügig verschlechtert, erzielt aber immer noch einen hervorragenden Wert. Die leichte Zunahme an Undichtheiten beim Haus in Rheinmünster ist vermutlich überwiegend den Fensterdichtungen und der Haustür zuzuschlagen. Die Fenster gehören zur ersten Generation des betreffenden Herstellers und wurden seit der Fertigstellung des Baus nicht nachgestellt. In beiden Objekten stellt die Haustür die Hauptleckage dar. Zusätzliches Verriegeln der Haustür verringert den n_{50} -Wert um $0,06 \text{ h}^{-1}$ (Rheinmünster) bzw. $0,13 \text{ h}^{-1}$ (Bühl). Aufgrund der ausgezeichneten Luftdichtheit macht sich eine Zunahme von Leckagen an der Haustür und an Fensterdichtungen (PH Rheinmünster) ausgehend von dem geringen Niveau deutlicher bemerkbar. Bei beiden Objekten kann festgestellt werden, dass mit dem konsequenten Luftdichtheitskonzept (Innenputz an Wänden, Rohbetonbodenplatte und Folie im Holzleichenbaudach) dauerhaft luftdichte Ebenen hergestellt wurden. Die Hauptleckagen könnten durch Nachstellen der Beschläge sogar noch verbessert werden.

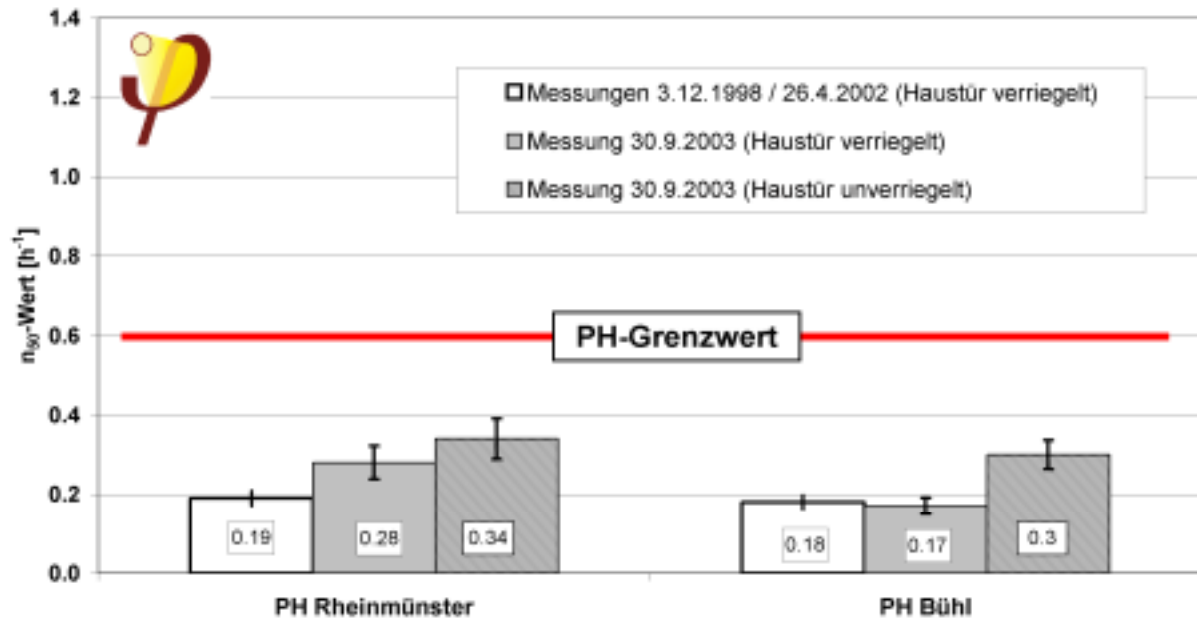


Abbildung 82: Ergebnisse der Luftdichtheitsnachmessung für die Betonschalungsstein-Bauweise.

4 Zusammenfassende Beurteilung Luftdichtheitskonzepte

Bei allen im Rahmen des Projektes untersuchten Gebäuden wurden – für die hohen Passivhausanforderungen – gute bis sehr gute Luftdichtheitswerte gemessen. Eine Ausnahme macht nur das Gebäude, bei welchem die Hauptleckagen die Qualität der anderen Verbindungen überlagern. Für dieses Objekt kann **keine** Aussage über die Langzeitstabilität der Verbindungen getroffen werden. Alle Ergebnisse der Nachmessungen von den übrigen 16 Objekten lagen unter bzw. eines knapp über dem Passivhaus-Grenzwert von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$. Die geringe Überschreitung ist allerdings unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit vernachlässigbar. Auch liegen fast alle Veränderungen der Messergebnisse zwischen Abnahme- und Nachmessung innerhalb der Messgenauigkeiten. Hier bilden nur die Gebäude Nr. 5 bis 9 Ausnahmen, da dort **nach** der Abnahmemessung die gefundene Leckagen nachgebessert wurden. Dadurch hat sich die Luftdichtheit deutlich verbessert, was erst jetzt durch die Nachmessungen belegt werden konnte.

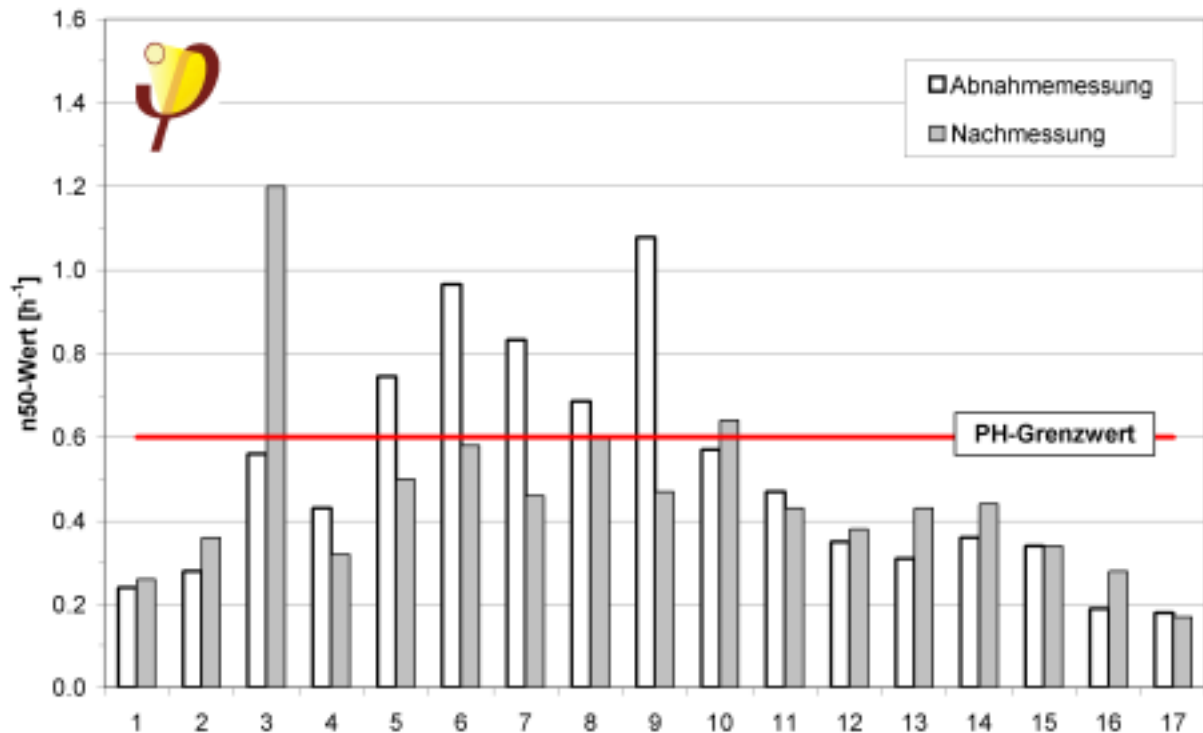


Abbildung 83: Übersicht über die Messergebnisse der Luftdichtheitsmessungen der 17 untersuchten Gebäude (Abnahme- und Nachmessungen).

Für die Dauerhaftigkeit der Luftdichtheitskonzepte zeigt sich mit den Messungen ein positives Bild. Die von den jeweiligen Planern und Architekten gewählten Konzepte und Verbindungen sind für den Zeitraum zwischen Abnahme- und Nachmessung als erfolgreich zu bewerten. Dabei ergibt sich kein Unterschied zwischen den Bauweisen. Es hat sich gezeigt, dass nicht die Bauweisen, sondern vielmehr die Planungsqualität für die erfolgreiche Umsetzung einer hohen Luftdichtheit entscheidend ist. Selbstredend muss natürlich die Planung am Objekt auch entsprechend sorgfältig umgesetzt werden. Eben genau an diesem Punkt zeigt sich dann auch, ob der Planer gut umsetzbare Konzepte erstellt hat.

Bei allen untersuchten Objekten ist nicht davon auszugehen, dass sich in den nächsten Jahren eine nennenswerte Verschlechterung der Luftdichtheit ergeben wird. Dafür liegen bei diesen Objekten Planungen und Ausführungen zugrunde, welche geeignete Produkte verwenden und diese nach Herstellervorgaben einsetzen. Die zu erwartenden Bewegungen von Elementen am Bau sind nach den jeweils verstrichenen Zeitabständen bereits eingetreten. Nach den vorliegenden Ergebnissen kann daher davon ausgegangen werden, dass die Luftdichtheit auch in der hier untersuchten Klasse von extrem luftdichten Gebäuden ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$) dauerhaft Bestand hat. Die in einigen Literaturstellen beschriebene Verschlechterung während der ersten beiden Jahre (vergleiche Abschnitt 0) trifft damit nachweislich in den hier dokumentierten Objekten mit geplanter Luftdichtungsebene nicht auf.

#	Bauweise	Luftdichte Ebene	Anzahl Objekte	Zeitdauer	Beurteilung
1	Massiv	Innenputz / PE-Folie / Beton	2	> 10,5 a	Dauerhaft
2	Holzbau	Stoßweise abgeklebte Holzwerkstoffplatten, PE- Folien, Beton	2	> 3,6	Nicht bewertbar
				> 2,8 a	Dauerhaft
3	Holzbau (kraft- schlüssig)	Holzwerkstoffplatten kraftschlüssig verklebt, Beton	5	> 3,5 a	Dauerhaft
4	Holzbau	Holzwerkstoffplatte verklebt	2	> 4 und > 4,3 a	Dauerhaft
5	Mischbau	PE-Folie / Beton	4	> 3,1 a	Dauerhaft
6	Betonscha- lungsstein	Innenputz / PE-Folie / Beton	2	> 4,8 und > 1,4 a	Dauerhaft

Tabelle 12: Übersicht über die nachgemessenen Gebäude und die Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit im bewertbaren Zeitraum.

5 Literatur

- [ASTM D 3611] ASTM: D 3611-77 (Reapproved 1981), Standard Practice for Accelerated aging of pressure sensitive taps. American Society for Testing and Materials.
- [Beckert 2005] Beckert, Michael: Telefonische Aussage am 15.04.2005 des Mitarbeiters am IBP, Entgegen den Angaben in [Kluttig/Erhom 1998] (Seite 13) wurden bei den Erstmessungen nur Unterdruckmessungen durchgeführt.
- [Böhmer 1998] Böhmer, Heike: Niedrigenergiehäuser in Niedersachsen. Abschluss des Pilot- und Demonstrationsvorhaben Niedrigenergiehaus, Institut für Bauforschung e.V. Hrsg.: Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Verkehr, Hannover, 1998.
- [DIN 4108-2] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, März 2001.
- [DIN 4108-7] DIN 4108-7: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, August 2001.
- [DIN EN 13829] DIN EN 13829: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Bestimmung der Luftdichtheit von Gebäuden. Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert), Deutsche Fassung EN 13829:2000., DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, Februar 2001.
- [Elmroth/
Logdberg 1981] Elmroth, Arne; Logdberg, Arne: Airtight houses and energy consumption. In: Building Research and Practice. Seite 102 – 117. März/April 1981.
- [Feist 1995] Feist, Wolfgang: Die Luftdichtheit im Passivhaus, Passivhaus-Bericht Nr. 6, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt 1995.
- [Feist 2001] Feist, Wolfgang; Peper, Søren; Görg, Manfred; von Oesen, Matthias: Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronenberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18, Fachinformation PHI-2001/5, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001.

- [FLiB 2005] FLiB: Haftklebebänder, Prüf- und Kennzeichnungsvorschrift. „Für Innenanwendungen“. Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V., Kassel, Mai 2005.
- [Geißler 1998] Geißler, Achim: Reproduzierbarkeit von Luftdichtheitsmessungen. wksb 43, Heft 42, Seite 24-33, 1998.
- [Geißler 2001] Geißler, Achim: Theoretische Ermittlung der in der Praxis erreichbaren Genauigkeit von Luftdichtheitsmessungen. Teil II: Ergebnisse und Zusammenfassung. In: Bauphysik 23 (2001), Heft 5, Seite 281 – 287. Verlag Ernst und Sohn, Berlin 2001.
- [Geißler 2002] Geißler, Achim: Zeitbombe Klebeband? In: Mikado 8/2002, Seite 37-38. Verlag WEKA MEDIA, Kissing 2002.
- [Geißler/
Hauser 1996] Geißler, A; Hauser, G.: Untersuchung der Luftdichtheit von Holzhäusern. AIF-Forschungsvorhaben Nr. 9579, T 2717, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1996.
- [Kim/Shaw
1986] Kim, Andrew K.; Shaw, Chia Y.: Seasonal Variation in Airtightness of Two Detached Houses. ASTM STP 904, H. R. Trechsel and P.L. Lagus, Eds., American Society for Testing and Materials, Seite 17 bis 32, Philadelphia, 1986.
- [Kluttig/Beckert/
Erhorn 1999] Kluttig, Heike; Beckert, Michael; Erhorn, Hans: Luftdichtheitsmessungen im Wohnbereich der 9 Ziegel-Niedrigenergiehäuser in Bochum. Erläuterungsbericht. Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart, Dezember 1999.
- [Kluttig/Erhorn
1998] Kluttig, Heike; Erhorn, Hans: Niedrigenergiehäuser in Ziegelbauweise. Abschlußbericht. Fraunhofer Institut für Bauphysik, IBP-Bericht WB 100/1998, Stuttgart, Dezember 1998.
- [Kritschig 1998] Kritschig, Th.; Werner, Johannes: Messung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle im Passivhaus Oehler, Bretten. ebök, Tübingen 1998.
- [Maas/Gross
2004] Maas, Anton; Gross, Rolf: Untersuchung zur Haltbarkeit von Klebeverbindungen für Luftdichtheitsschichten. In: Reader zum 9. BlowerDoor-Symposium des euz, Energie- und Umweltzentrum am Deister, April 2004.
- [Maas/Gross
2005] Maas, Anton; Gross, Rolf: Qualitätssicherung klebebasierter Verbindungstechnik für Luftdichtheitsschichten. In: Bauphysik 27 (2005), Heft 2, Seite 87 – 94, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2005.

- [Nostrand 1989] Van Nostrand, Reinhold, Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology, S. 247-249. Herausgeber: Satas, D., 2nd Edition, ISBN 0-442-28026-2, New York, 1989.
- [O'Sullivan/
Jones 1982] O'Sullivan, P.; Jones, P.J.: The Ventilation Performance Of Houses – A Case Study. Aus: 3rd AIC Conference: Energy Efficient Domestic Ventilation Systems For Achieving Acceptable Indoor Air Quality. Paper 10. September 20-23 1982, London, England.
- [Peper 1999] Peper, Søren: Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Fachinformation PHI-1999/4, Damstadt, Passivhaus Institut, 1999.
- [Peper 1999a] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, Eine Planungshilfe; Fachinformation Passivhaus Institut PHI-1999/6, CEPHEUS-Projekt-information Nr. 7, Passivhaus Institut Damstadt 1999.
- [Peper 2000] Peper, Søren: Luftdichtheit bei Passivhäusern – Erfahrungen aus über 200 realisierten Objekten; Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Passivhaus Dienstleistung GmbH, Kassel und Damstadt 2000.
- [Proskiw 1993] Proskiw, Gary: Measured Airtightness of 24 Detached Houses Over Periods of up to Three Years, AIVC Report #No 10106, in: Airflow Performance of Building Envelopes, Components and Systems, ASTM 1995, pp. 248 – 265, presented at a symposium, Texas, USA, Dallas 1993.
- [Ranz 2003] Ranz, Marko: Gehen Sie auf Nummer sicher! In: „TrockenBau Akustik“ Ausgabe 2/2003, Seite 34 bis 36, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln 2003.
- [Sachs 1998] Sachs, Harald: Ergebnisse der Luftdurchlässigkeitsmessungen. Drucktest-Protokolle der Passivhaus-Erstmessungen in Bamberg (18.02.1998) und Stegaurach (16.06.1998). Enertec Ingenieurbüro für energietechnik, Würzburg, 1998.
- [RWE 2004] RWE Bau-Handbuch. WVEW Energieverlag GmbH, 13. Ausgabe 2004, Frankfurt a. M.
- [Saxhof/Nielsen 1982] Saxhof, B.; Nielsen, A. A.: Insulation and Air Tightness of Six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, Low-Energy House Projekt, Thermal Insulation Laboratory, Report No. 121, Technical University of Denmark, Lyngby 1982.

-
- [Schnieders 1998] Schnieders, Jürgen und Wolfgang Feist: Passivhaus-Reihenhäuser: Über die Zuluft beheizbar? Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens bei Variation ausgewählter Parameter und bei Zuluftnachheizung. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 5, Fachinformation PHI-1998/12, Damstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998.
- [Schnieders/ Such 1998] Schnieders, J.; Such, M.: Untersuchung der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim; Fachinformation Passivhaus-Institut 1998/9, Damstadt 1998.
- [Schnieders 2001] Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer; Kah, Oliver: CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung Endbericht, Fachinformation Passivhaus Institut PHI-2001/9, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22, Passivhaus Institut Damstadt, Juni 2001.
- [Yoshino 1992] Yoshino, H: Airtightness Standards for Residential Buildings in Japan. Performance of the exterior envelopes of buildings V, Herausgeber: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Clearwater Beach, Florida 1992, ISBN: 091011093X.
- [Zeller u.a. 1995] Zeller, J.; Dorschky, S.; Borsch-Laaks, R.; Feist, W.: Luftdichtigkeit von Gebäuden – Luftdichtigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden, Institut für Wohnen und Umwelt, Damstadt 1995.

6 Anhang

Im Anhang sind die Protokollblätter der einzelnen Drucktest-Nachmessungen dokumentiert.

	Passivhaus-Projekt	Anzahl Protokolle
1	Reihenhäuser Darmstadt Kranichstein	2
2	Einfamilienhäuser Bretten	2
3	Siedlung Lindlar/Hohkeppel	5
4	Einfamilienhäuser Stegaurach / Mühlendorf und Bamberg	2
5	Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg	4
6	Reihenhäuser Rheinmünster und Bühl	2

Blower-Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4

Objekt : <u>Haus A</u> Adresse : <u>Darmstadt Kranichstein</u> 	Auftraggeber : <u>IEA Task 28</u> Tel : _____ Ansprechpartner : _____ Tel : _____
---	--

Messdaten : Messung ausgeführt von : Peper, Kah, Kaufmann am 21.9.01

Belüftetes Volumen	<u>494</u> m ³
Beheizte Fläche	_____ m ²
Gebäudehüllfläche	_____ m ²
Innentemperatur	<u>23.0</u> °C
Außentemperatur	<u>15.4</u> °C

Bemerkungen : Wind böig bis 3 m/s

Unterdruck

Überdruck

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	2.3	—	—	—
d	62.2	150.7	153	0.22
d	50.2	107.2	129	0.42
d	36.5	63.8	100	0.49
d	20.9	24.9	63	0.68
d	34.4	55.3	93	-1.62
d	40.9	75.1	108	-0.54
d	69.1	178.8	166	0.26
d	21.3	25.5	64	0.11
Gebläse geschlossen	2.0	—	—	—

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	-0.7	—	—	—
d	51.0	113.1	133	0.56
d	20.0	27.8	66	0.67
d	66.1	163.9	159	-0.53
d	39.6	79.3	111	1.84
d	57.2	130.0	142	-1.18
d	34.1	63.7	100	2.28
d	27.0	39.9	79	-3.51
d				
Gebläse geschlossen	-0.3	—	—	—

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r = 0.99979
Gebäudekoeffizient [m ³ /hPa], norm.	C ₀ = 6.5
Gebäudeexponent	n = 0.765

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r = 0.99805
Gebäudekoeffizient [m ³ /hPa], norm.	C ₀ = 6.9
Gebäudeexponent	n = 0.753

Ergebnis, Kenngrößen :

	n ₅₀ h ⁻¹	Regression	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA _{4Pa}
		Abweichg. %	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.26	+/- 0.79	130			20
Überdruck	0.27	+/- 2.16	131			21
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.26		131			21
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
Darmstadt

Bearbeiter/in : O. Kah
Tel : _____

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : Haus B

Adresse : Darmstadt Kranichstein

Auftraggeber : IEA Task 28

Tel : _____
Ansprechpartner : _____

Tel : _____

Messdaten :

Belüftetes Volumen	<u>494</u> m ³
Beheizte Fläche	_____ m ²
Gebäudehüllfläche	_____ m ²
Innentemperatur	<u>21.3</u> °C
Außentemperatur	<u>14.4</u> °C

Messung ausgeführt von : Peper, Kah, Kaufmann, Feist am 21.9.2001

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	<u>2.2</u>	_____	_____	_____
C	<u>51.5</u>	<u>75.3</u>	<u>182</u>	<u>-2.00</u>
C	<u>44.3</u>	<u>62.3</u>	<u>165</u>	<u>0.86</u>
C	<u>39.4</u>	<u>50.5</u>	<u>148</u>	<u>-0.02</u>
C	<u>36.7</u>	<u>45.7</u>	<u>141</u>	<u>1.14</u>
C	<u>30.7</u>	<u>33.7</u>	<u>121</u>	<u>0.65</u>
C	<u>26.6</u>	<u>26.8</u>	<u>107</u>	<u>1.30</u>
C	<u>20.7</u>	<u>15.9</u>	<u>82</u>	<u>-3.66</u>
C	<u>20.2</u>	<u>17.0</u>	<u>85</u>	<u>1.84</u>
Gebläse geschlossen	<u>0.5</u>	_____	_____	_____

Überdruck

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	<u>-0.7</u>	_____	_____	_____
C	<u>45.6</u>	<u>60.4</u>	<u>163</u>	<u>2.04</u>
C	<u>44.7</u>	<u>59.0</u>	<u>161</u>	<u>2.34</u>
C	<u>38.4</u>	<u>43.8</u>	<u>138</u>	<u>-1.74</u>
C	<u>32.8</u>	<u>38.7</u>	<u>130</u>	<u>3.49</u>
C	<u>26.7</u>	<u>22.2</u>	<u>98</u>	<u>-9.26</u>
C	<u>23.5</u>	<u>21.9</u>	<u>97</u>	<u>-0.97</u>
C	<u>15.8</u>	<u>13.9</u>	<u>77</u>	<u>4.81</u>
Gebläse geschlossen	<u>-0.1</u>	_____	_____	_____

Korrelationskoef. (mind. 0,998) $r = 0.99790$
Gebäudekoeffizient [m³/hPa], norm. $C_0 = 7.6$
Gebäudeexponent $n = 0.813$

Korrelationskoef. (mind. 0,998) $r = 0.98530$
Gebäudekoeffizient [m³/hPa], norm. $C_0 = 9.4$
Gebäudeexponent $n = 0.742$

Ergebnis, Kenngrößen :

	n_{50} h ⁻¹	Regression	V_{50}	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
		Abweichg. %	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.37	+/- 2.94	182			25
Überdruck	0.35	+/- 8.12	172			28
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.36		177			27
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
Darmstadt

Bearbeiter/in : O. Kah
Tel : 06151 / 82699 0

09.10.03

Unterschrift

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : <u>Bretten / Haus 1</u> Adresse : <u>Bretten</u>	Auftraggeber : <u>IEA Task 28</u> Tel : _____ Ansprechpartner : _____ Tel : _____
--	--

Messdaten : Messung ausgeführt von : M. John, O. Kah am 25.10.2001

Belüftetes Volumen	<u>428</u> m ³
Beheizte Fläche	_____ m ²
Gebäudehüllfläche	_____ m ²
Innentemperatur	<u>20.1</u> °C
Außentemperatur	<u>14.0</u> °C

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck

Überdruck

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	1.9	_____	_____	_____
B	51.2	40.1	515	-0.79
B	48.5	36.9	494	-0.80
B	43.1	32.1	461	1.63
C	35.9	345.8	395	0.22
C	29.7	246.7	332	-1.89
C	28.0	241.0	328	1.57
C	22.3	166.1	272	0.99
C	16.2	94.8	204	-0.88
Gebläse geschlossen	1.9	_____	_____	_____

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	-1.1	_____	_____	_____
B	47.8	41.8	525	-2.31
B	45.7	41.6	524	0.92
B	39.6	33.7	472	1.42
C	32.4	352.3	398	-0.58
C	26.5	260.5	342	-0.86
C	24.5	238.2	326	0.52
C	22.6	218.9	313	2.25
C	13.6	98.8	209	-1.27
Gebläse geschlossen	-1.3	_____	_____	_____

Korrelationskoeff. (mind. 0,998) $r = 0.99917$
 Gebäudekoeffizient [m³/hPa], norm. $C_0 = 27.9$
 Gebäudeexponent $n = 0.746$

Korrelationskoeff. (mind. 0,998) $r = 0.99882$
 Gebäudekoeffizient [m³/h*Pa], norm. $C_0 = 26.2$
 Gebäudeexponent $n = 0.779$

Ergebnis, Kenngrößen :

	n_{50}	Regression Abweichg.	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
	h ⁻¹	%	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	1.2	+/- 1.81	517			85
Überdruck	1.3	+/- 2.17	552			83
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	1.2		534			84
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht nicht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus-

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
Darmstadt

Bearbeiter/in : _____
Tel : _____
 09.10.03

Unterschrift

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : Bretten / Haus 2
Adresse :
Bretten

Auftraggeber : IEA Task 28
Tel : _____
Ansprechpartner : _____
Tel : _____

Messdaten :

Messung ausgeführt von : M. John, O. Kah am 25.10.2001

Belüftetes Volumen 377 m³
Beheizte Fläche _____ m²
Gebäudehüllfläche _____ m²
Innentemperatur 20.1 °C
Außentemperatur 15.1 °C

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck

Überdruck

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	0.4	_____	_____	_____
D	50.4	85.2	115	-0.84
D	43.9	69.2	104	-0.31
D	40.1	60.5	97	0.23
D	35.9	51.8	90	1.22
D	29.8	37.1	77	-0.70
D	26.3	31.2	70	0.62
D	20.4	20.9	58	0.79
D	15.4	12.8	45	-0.97
Gebläse geschlossen	0.6	_____	_____	_____

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	0.0	_____	_____	_____
C	51.6	37.8	128	-1.08
C	45.0	32.4	118	1.77
C	39.8	26.2	106	0.42
C	35.8	21.9	97	-0.52
C	30.7	16.9	85	-1.65
C	27.3	14.9	80	1.11
Gebläse geschlossen	0.1	_____	_____	_____

Korrelationskoeff. (mind. 0,998) $r = 0.99966$
 Gebäudekoeffizient [m³/hPa], norm. $C_0 = 5.6$
 Gebäudeexponent $\eta = 0.772$

Korrelationskoeff. (mind. 0,998) $r = 0.99744$
 Gebäudekoeffizient [m³/h*Pa], norm. $C_0 = 6.2$
 Gebäudeexponent $\eta = 0.773$

Ergebnis, Kenngrößen :

	n₅₀ h ⁻¹	Regression Abweichg.	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
		%	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ² /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.30	+/- 1.18	115			18
Überdruck	0.34	+/- 2.41	127			19
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.32		121			19
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus-

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
Darmstadt

Bearbeiter/in : O. Kah
Tel : _____

09.10.03

Unterschrift

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : <u>Haus A</u>	Auftraggeber : <u>IEA Task 28</u>
Adresse : <u>Lindlar-Hohkeppel</u>	Tel : _____
	Ansprechpartner : _____
	Tel : _____

Messdaten :

Messung ausgeführt von : John Kah am 17.10.2001

Belüftetes Volumen	<u>323 m³</u>
Beheizte Fläche	<u>107 m²</u>
Gebäudehüllfläche	<u> m²</u>
Innentemperatur	<u>26.5 °C</u>
Außentemperatur	<u>17.4 °C</u>

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck

Überdruck

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	0.9	—	—	—
C	49.7	77.0	184	0.59
C	44.2	66.7	171	1.75
C	39.1	54.1	154	-0.05
C	33.7	43.0	137	-0.70
C	31.0	37.5	127	-1.76
C	24.5	27.7	109	0.62
C	19.5	18.1	88	-3.46
C	15.1	13.8	77	3.17
Gebläse geschlossen	3.5	—	—	—

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	-0.6	—	—	—
C	49.0	82.4	190	-0.29
C	46.2	81.5	189	3.38
C	40.3	60.4	162	-2.17
C	34.5	49.0	146	-1.74
C	29.1	41.9	135	2.31
C	23.9	31.1	116	0.52
C	21.0	23.7	101	-4.21
C	14.3	16.4	84	2.44
Gebläse geschlossen	-3.8	—	—	—

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	$r =$	0.99781
Gebäudekoeffizient [m ³ /hPa], norm.	$C_0 =$	12.6
Gebäudeexponent	$n =$	0.689

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	$r =$	0.99598
Gebäudekoeffizient [m ³ /h*Pa], norm	$C_0 =$	10.2
Gebäudeexponent	$n =$	0.750

Ergebnis, Kenngrößen :

	n₅₀ h ⁻¹	Regression	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
		Abweichg. %	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.58	+/- 3.12	186	1.7		35
Überdruck	0.59	+/- 3.58	192	1.8		31
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.58		189	1.8		33
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus-Kriterium

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : O Kah
Tel : 06151/8 26 99 0

09.10.03

Unterschrift

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : Haus B

Adresse : _____
Lindlar-Hohkeppel

Auftraggeber : IEA Task 28

Tel : _____

Ansprechpartner : _____

Tel : _____

Messdaten :

Messung ausgeführt von : John, Kah am 18.10.2001

Belüftetes Volumen	<u>411</u> m ³
Beheizte Fläche	<u>140</u> m ²
Gebäudehüllfläche	_____ m ²
Innentemperatur	<u>26.8</u> °C
Außentemperatur	<u>15.6</u> °C

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck

Überdruck

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	1.6	_____	_____	_____
C	55.2	93.6	203	1.25
C	47.4	73.9	180	0.58
C	39.0	52.5	151	-2.10
C	36.8	47.7	144	-2.54
C	31.3	41.6	134	2.79
C	24.9	29.4	113	2.47
C	23.0	23.5	101	-2.76
C	14.9	12.9	74	0.48
Gebläse geschlossen	1.0	_____	_____	_____

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	-0.5	_____	_____	_____
C	48.4	85.5	194	0.04
C	44.2	76.6	183	0.76
C	39.1	63.3	166	-0.67
C	35.2	57.9	159	2.24
C	32.0	48.6	145	-0.19
C	25.2	33.0	120	-3.11
C	19.0	23.5	101	-0.82
C	14.0	16.2	83	1.85
Gebläse geschlossen	1.8	_____	_____	_____

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r = 0.99767
Gebäudekoeffizient [m ³ /hPa], norm.	C ₀ = 10.8
Gebäudeexponent	n = 0.727

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r = 0.99841
Gebäudekoeffizient [m ³ /h*Pa], norm	C ₀ = 14.4
Gebäudeexponent	n = 0.678

Ergebnis, Kenngrößen :

	n ₅₀ h ⁻¹	Regression	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
		Abweichg. %	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.45	+/- 3.03	186	1.3		32
Überdruck	0.50	+/- 2.42	205	1.5		40
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.47		195	1.4		36
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus-Kriterium

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : O. Kah
Tel : 06151/82 69 90

09.10.03

Unterschrift

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : <u>Haus C</u> <hr/> Adresse : <u>Lindlar-Hohkeppel</u>	Auftraggeber : <u>IEA Task 28</u> Tel : _____ Ansprechpartner : _____ Tel : _____
---	--

Messdaten :

 Messung ausgeführt von : John, Kah am 18.10.01

Belüftetes Volumen	<u>411</u> m ³
Beheizte Fläche	<u>140</u> m ²
Gebäudehüllfläche	_____ m ²
Innentemperatur	<u>23.5</u> °C
Außentemperatur	<u>13.7</u> °C

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck
Überdruck

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	0.0	_____	_____	_____
C	49.1	84.9	193	0.50
C	43.9	71.8	177	0.27
C	39.3	61.0	163	0.36
C	33.9	45.9	141	-2.98
C	29.1	41.2	134	2.80
C	23.8	29.0	112	-0.01
C	19.5	20.8	95	-1.81
C	13.4	12.6	73	0.98
Gebläse geschlossen	0.3	_____	_____	_____

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	-2.3	_____	_____	_____
C	45.2	69.4	174	0.94
C	44.1	67.6	172	1.29
C	34.6	55.1	155	6.59
C	30.4	44.1	139	3.48
C	31.0	32.4	118	-12.70
C	22.0	27.1	108	-0.71
C	18.1	21.7	97	0.47
C	14.0	16.2	83	1.83
Gebläse geschlossen	1.9	_____	_____	_____

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r = 0.99860
Gebäudekoeffizient [m ³ /hPa], norm.	C ₀ = 10.4
Gebäudeexponent	n = 0.743

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r = 0.97646
Gebäudekoeffizient [m ³ /h*Pa], norm	C ₀ = 15.1
Gebäudeexponent	n = 0.643

Ergebnis, Kenngrößen :

	n₅₀	Regression Abweichg.	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
	h ⁻¹	%	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.46	+/- 2.52	191	1.4		31
Überdruck	0.45	+/- 9.56	187	1.3		40
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.46		189	1.4		36
Grenzwert	0.6					

 Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus-Kriterium
Auftragnehmer :
 Passivhaus Institut
 Rheinstr. 44/46
 64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : O. Kah
 Tel : _____

09.10.03

Unterschrift

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : <u>Haus D</u>	Auftraggeber : <u>IEA Task 28</u>
Adresse : <u>Lindlar-Hohkeppel</u>	Tel : _____
	Ansprechpartner : _____
	Tel : _____

Messdaten :

Messung ausgeführt von : John, Kah am 17.10.2001

Belüftetes Volumen	<u>478 m³</u>
Beheizte Fläche	<u>155 m²</u>
Gebäudehüllfläche	<u> m²</u>
Innentemperatur	<u>25.8 °C</u>
Außentemperatur	<u>19.0 °C</u>

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck

Überdruck

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	2.2	_____	_____	_____
C	52.4	145.2	254	2.00
C	46.2	115.8	226	-0.39
C	41.7	96.1	206	-2.15
C	35.5	81.7	189	1.54
C	30.5	62.8	166	-0.50
C	25.7	48.0	145	-1.45
C	21.8	38.1	129	-0.47
C	17.2	27.6	109	1.49
Gebläse geschlossen	0.8	_____	_____	_____

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
O ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	-1.0	_____	_____	_____
C	57.1	152.3	260	1.41
C	44.7	111.1	222	1.97
C	40.6	94.6	204	0.18
C	34.6	75.6	182	-0.51
C	31.3	60.9	163	-4.64
C	21.6	40.1	132	-1.00
C	18.7	35.1	123	1.60
C	12.1	19.7	92	1.17
Gebläse geschlossen	-0.1	_____	_____	_____

Korrelationskoeff. (mind. 0,998)	r = 0.99865
Gebäudekoeffizient [m ³ /hPa], norm.	C ₀ = 14.9
Gebäudeexponent	n = 0.713

Korrelationskoeff. (mind. 0,998)	r = 0.99797
Gebäudekoeffizient [m ³ /h*Pa], norm.	C ₀ = 16.4
Gebäudeexponent	n = 0.682

Ergebnis, Kenngrößen :

	n ₅₀ h ⁻¹	Regression	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
		Abweichg. %	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.51	+/- 2.18	243	1.6		43
Überdruck	0.49	+/- 2.81	236	1.5		45
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.50		240	1.5		44
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus-Kriterium

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : Oliver Kah
Tel : 06151/82 69 90

09.10.03

Unterschrift

Blower Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : <u>Haus E</u> Adresse : _____ <u>Lindlar-Hohkeppel</u>	Auftraggeber : <u>IEA Task 28</u> Tel : _____ Ansprechpartner : _____ Tel : _____
---	--

Messdaten :

Messung ausgeführt von : John. Kah am 17.10.2001

Belüftetes Volumen	<u>477</u> m ³
Beheizte Fläche	<u>155</u> m ²
Gebäudehüllfläche	_____ m ²
Innentemperatur	<u>23.3</u> °C
Außentemperatur	<u>16.2</u> °C

Bemerkungen : siehe Beiblatt

Unterdruck

Überdruck

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	-2.3	_____	_____	_____
C	45.3	140.9	250	-6.09
C	44.7	141.8	251	-4.74
C	36.6	126.9	237	6.51
C	30.3	74.9	181	-4.70
C	24.1	65.1	169	6.93
C	21.3	55.1	155	8.26
C	20.0	47.5	144	5.79
C	11.3	14.9	80	-10.08
Gebläse geschlossen	-3.9	_____	_____	_____

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m ³ /h]	[%]
Gebläse geschlossen	3.2	_____	_____	_____
C	51.1	204.9	302	4.12
C	44.6	169.5	275	3.80
C	44.9	160.0	267	0.30
C	44.2	137.6	247	-6.15
C	37.0	127.6	238	2.31
C	31.1	82.4	190	-7.58
C	23.3	67.8	172	2.91
C	15.2	34.8	123	1.01
Gebläse geschlossen	1.9	_____	_____	_____

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r =	0.98124
Gebäudekoeffizient [m ³ /hPa], nom	C ₀ =	7.8
Gebäudeexponent	n =	0.906

Korrelationskoef. (mind. 0,998)	r =	0.98821
Gebäudekoeffizient [m ³ /h*Pa], nom	C ₀ =	23.7
Gebäudeexponent	n =	0.649

Ergebnis, Kenngrößen :

	n ₅₀ h ⁻¹	Regression Abweichg.	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA ₄
		%	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.56	+/- 11.01	270	1.7		29
Überdruck	0.63	+/- 5.98	300	1.9		63
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.60		285	1.8		46
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift Passivhaus-Kriterium

Auftragnehmer :
 Passivhaus Institut
 Rheinstr. 44/46
 64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : O. Kah
Tel : 06151/82 69 90

09.10.03

Unterschrift

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : 96135 Stegaurach	Prüfer/in: S.Peper / O. Kah Datum: 12.06.2002 FLIB-Nr. 24400
------------------------------	---

Klimadaten

Innentemperatur: 20 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 1.0 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 22 °C	Windstärke: 2	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101300 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 2 %	

Unterdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	-	-0.1 Pa	-	-0.2 Pa

Überdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	0.1 Pa	-	-	-0.1 Pa

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	-0.1	—	—	—	Δp_{01}	0.1	—	—	—
C	-53	216	310	0.19	C	53	147	255	0.37
C	-48	192	293	2.02	C	47	124	234	0.96
C	-38	120	230	-2.85	C	40	93	202	-2.63
C	-34	103	213	0.08	C	34	78	185	1.74
C	-29	79	186	-0.14	C	28	55	155	-0.01
C	-26	70	175	0.40	C	23	42	135	-0.21
C	-19	39	130	-0.57	C	22	38	129	-0.66
C	-16	31	116	0.94	C	16	24	102	0.50
Δp_{02}	-0.2	—	—	—	Δp_{02}	-0.2	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.999	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	12	max. 13	min. 11	C_{env} [m³/(h Pa²)]	12	max. 13	min. 11
C_L [m³/(h Pa²)]	12	max. 13	min. 11	C_L [m³/(h Pa²)]	12	max. 13	min. 11
n [-]	0.82	max. 0.85	min. 0.79	n [-]	0.77	max. 0.80	min. 0.74

Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	Nettogrundfläche:	Hüllfläche:
628 m³ +/- 5 %		

	V_{50} m³/h	Unsicher- heit %	n_{50} h⁻¹	Unsicher- heit %	W_{50} m³/m²h	Unsicher- heit %	q_{50} m³/m²h	Unsicher- heit %
Unterdruck	297	+/- 8 %	0.47	+/- 9 %				
Überdruck	243	+/- 8 %	0.39	+/- 9 %				
Mittelwert	270	+/- 8 %	0.43	+/- 9 %				

Anforderungen nach: Passivhaus Institut	0.6	1/h		
---	-----	-----	--	--

Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstraße 44 / 46
64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : S.Peper / O. Kah
Tel : 06151/826990

09.05.03

Unterschrift

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : 96049 Bamberg	Prüfer/in: S.Peper / O. Kah Datum: 12.06.2002 FLIB-Nr. 24400
---------------------------	---

Klimadaten

Innentemperatur: 23 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 1.0 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 24 °C	Windstärke: 2	Gebäudestandort: B
Luftdruck (Standard): 101300 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 2 %	

Unterdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	-	-0.1 Pa	-	-0.1 Pa

Überdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	0.3 Pa	-	-	-0.3 Pa

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	-0.9	—	—	—	Δp_{01}	0.3	—	—	—
C	-50	261	342	1.30	C	62	300	367	-1.72
C	-48	231	321	-0.75	C	50	215	310	-1.08
C	-42	194	294	0.41	C	43	172	276	0.00
C	-39	176	280	1.46	C	37	135	244	-0.10
C	-31	123	234	-0.53	C	31	108	218	4.04
C	-26	86	194	-4.03	C	24	64	168	0.67
C	-22	75	182	-0.21	C	18	45	139	3.05
C	-17	50	147	2.50	C	15	27	107	-4.59
Δp_{02}	-0.1	—	—	—	Δp_{02}	-0.3	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.998	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	18	max. 21	min. 15
C_L [m³/(h Pa²)]	18	max. 21	min. 15
n [-]	0.75	max. 0.80	min. 0.70

Korrelationskoef. r:	0.998	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	12	max. 14	min. 10
C_L [m³/(h Pa²)]	12	max. 14	min. 10
n [-]	0.84	max. 0.89	min. 0.78

Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	Nettogrundfläche:	Hüllfläche:
511 m³ +/- 5 %		

	V_{50}	Unsicher- heit	n_{50}	Unsicher- heit	W_{50}	Unsicher- heit	q_{50}	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	339	+/- 8 %	0.66	+/- 9 %				
Überdruck	313	+/- 8 %	0.61	+/- 10 %				
Mittelwert	326	+/- 8 %	0.6	+/- 9 %				

Anforderungen nach: Passivhaus Institut	0.6	1/h		
--	------------	-----	--	--

Die Anforderungen der Vorschrift werden erfüllt.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer :

Bearbeiter/in : S.Peper / O. Kah

Tel : 06151/826990

09.05.03

Unterschrift

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : Passivhaus Kronsberg 13.5	Prüfer/in: Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel
	Datum: 16.04.03 FLIB-Nr: 24400

Klimadaten

Innentemperatur: 22 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 2.0 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 15 °C	Windstärke: 3	Gebäudestandort: B
Luftdruck (barom.): 101800 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 9 %	

Unterdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	1.2 Pa	-0.1 Pa	6.5 Pa	-2.3 Pa

Überdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	2.9 Pa	-	7.3 Pa	-1.4 Pa

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_f	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_f	Abwei- chung
0 ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	0 ABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	5.0	—	—	—	Δp_{01}	8.1	—	—	—
D	-47	114	133	1.61	D	54	86	116	-4.96
D	-41	98	124	3.16	D	57	109	130	1.91
D	-34	77	110	3.73	D	49	88	117	3.21
D	-32	83	114	9.85	D	49	83	114	0.09
D	-24	38	77	-10.63	D	35	51	90	-1.04
D	-19	27	65	-13.04	D	31	45	84	1.85
D	-14	20	56	-11.82	D	24	27	65	-3.09
D	-10	26	64	22.19	D	25	31	70	2.33
Δp_{02}	3.5	—	—	—	Δp_{02}	3.3	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.936	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.994	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	8	max. 20	min. 3	C_{env} [m³/(h Pa²)]	11	max. 14	min. 9
C_L [m³/(h Pa²)]	8	max. 20	min. 3	C_L [m³/(h Pa²)]	11	max. 14	min. 9
n [-]	0.69	max. 0.95	min. 0.43	n [-]	0.62	max. 0.69	min. 0.55

Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	Nettogrundfläche:	Hüllfläche:
372 m³ +/- 3 %	120 m² +/- 3 %	

	V_{50}	Unsicher- heit	n_{50}	Unsicher- heit	W_{50}	Unsicher- heit	q_{50}	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	126	+/- 21 %	0.34	+/- 21 %	1.1	+/- 21 %		
Überdruck	127	+/- 12 %	0.34	+/- 12 %	1.1	+/- 12 %		
Mittelwert	126	+/- 16 %	0.34	+/- 16 %	1.1	+/- 16 %		

Anforderungen nach:	Passivhaus Institut	0.6	1/h		
---------------------	---------------------	-----	-----	--	--

Die Passivhaus-Anforderungen werden erfüllt. Das Gebäude ist nach über 4 Jahren sehr gut luftdicht.

Bemerkung: Messung nicht normgerecht (nach EN 13829) wg. Überschreitung der natürl. Druckdifferenz
Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer : Passivhaus Institut Rheinstraße 44/46 64283 Darmstadt	Bearbeiter/in : Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel Tel : 06151-82699-0
---	---

08.05.03

Unterschrift

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : Passivhaus Kronsberg 9.3	Prüfer/in: Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel
	Datum: 16.04.03 FLIB-Nr.: 24400

Klimadaten

Innentemperatur: 22 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 2.5 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 19 °C	Windstärke: 3	Gebäudestandort: B
Luftdruck (barom.): 101800 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 9 %	

Unterdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	-	-4.8 Pa	1.2 Pa	-

Überdruck

Natürliche Druckdiff.	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
	1.5 Pa	-0.7 Pa	-	-2.9 Pa

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	-0.8	—	—	—	Δp_{01}	0.0	—	—	—
C	-48	60	162	2.79	C	56	72	178	2.19
C	-48	54	153	-2.19	C	36	31	115	-6.95
C	-44	46	141	-2.40	C	40	43	136	0.39
C	-36	35	122	0.43	C	36	36	125	0.69
C	-35	37	127	4.57	C	31	31	115	3.86
C	-29	22	96	-5.23	C	23	18	88	-2.02
C	-21	15	81	3.74	C	19	15	79	2.42
D	-16	22	59	-1.31	D	14	23	61	-0.18
Δp_{02}	-0.7	—	—	—	Δp_{02}	-0.6	—	—	—

Korrelationskoeff. r:	0.995	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	6	max. 8	min. 5
C_L [m³/(h Pa²)]	6	max. 8	min. 5
n [-]	0.84	max. 0.92	min. 0.75

Korrelationskoeff. r:	0.995	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	8	max. 10	min. 6
C_L [m³/(h Pa²)]	8	max. 10	min. 6
n [-]	0.77	max. 0.84	min. 0.69

Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	Nettogrundfläche:	Hüllfläche:
372 m³ +/- 3 %	120 m² +/- 3 %	

	V_{50}	Unsicher- heit	n_{50}	Unsicher- heit	w_{50}	Unsicher- heit	q_{50}	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	164	+/- 12 %	0.44	+/- 12 %	1.4	+/- 12 %		
Überdruck	160	+/- 12 %	0.43	+/- 12 %	1.3	+/- 12 %		
Mittelwert	162	+/- 12 %	0.44	+/- 12 %	1.4	+/- 12 %		

Anforderungen nach: Passivhaus Institut	0.6	1/h		
---	-----	-----	--	--

Die Passivhaus-Anforderungen werden erfüllt. Das Gebäude ist nach über 4 Jahren sehr gut luftdicht.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstraße 44/46
64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel
Tel : 06151-82699-0

08.05.03

Unterschrift

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : <u>Passivhaus Kronsberg 9.4</u>	Prüfer/in: <u>Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel</u>
	Datum: <u>15.04.03</u> FLIB-Nr.: <u>24400</u>

Klimadaten

Innentemperatur: <u>21 °C</u>	Luftgeschwin. Anemom.: <u>2.0 m/s</u>	Referenzdruckmessstellen: <u>1</u>
Außentemperatur: <u>20 °C</u>	<u>Windstärke:</u> <u>3</u>	Gebäudestandort: <u>B</u>
<u>Luftdruck</u> (barom.): <u>101500 Pa</u>	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: <u>9 %</u>	

Unterdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	<u>1.7 Pa</u>	<u>-0.6 Pa</u>	<u>1.6 Pa</u>	<u>-1.3 Pa</u>

Überdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	<u>1.2 Pa</u>	<u>-1.5 Pa</u>	<u>1.8 Pa</u>	<u>-2.5 Pa</u>

Messreihen

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung	Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	<u>-1.4</u>	—	—	—	Δp_{01}	<u>-1.6</u>	—	—	—
C	<u>-51</u>	<u>55</u>	<u>155</u>	<u>-2.97</u>	C	<u>51</u>	<u>60</u>	<u>162</u>	<u>0.81</u>
C	<u>-41</u>	<u>37</u>	<u>127</u>	<u>-2.39</u>	C	<u>39</u>	<u>45</u>	<u>140</u>	<u>4.50</u>
C	<u>-40</u>	<u>41</u>	<u>134</u>	<u>4.46</u>	C	<u>38</u>	<u>41</u>	<u>134</u>	<u>0.15</u>
C	<u>-36</u>	<u>31</u>	<u>116</u>	<u>0.99</u>	C	<u>34</u>	<u>33</u>	<u>120</u>	<u>-2.91</u>
C	<u>-32</u>	<u>25</u>	<u>104</u>	<u>1.58</u>	C	<u>29</u>	<u>27</u>	<u>109</u>	<u>-3.37</u>
C	<u>-25</u>	<u>19</u>	<u>91</u>	<u>9.15</u>	C	<u>23</u>	<u>21</u>	<u>94</u>	<u>-2.57</u>
C	<u>-26</u>	<u>14</u>	<u>78</u>	<u>-8.26</u>	D	<u>21</u>	<u>55</u>	<u>93</u>	<u>2.31</u>
C	<u>-16</u>	<u>7</u>	<u>54</u>	<u>-1.60</u>	D	<u>12</u>	<u>27</u>	<u>66</u>	<u>1.35</u>
Δp_{02}	<u>-3.1</u>	—	—	—	Δp_{02}	<u>-1.0</u>	—	—	—

Korrelationskoef. r:	<u>0.988</u>	Vertrauensintervall	
C_{90V} [m³/(h Pa⁹)]	<u>6</u>	max. 9	min. 4
C_L [m³/(h Pa⁹)]	<u>6</u>	max. 9	min. 4
n	<u>0.85</u>	max. 0.98	min. 0.72

Korrelationskoef. r:	<u>0.995</u>	Vertrauensintervall	
C_{90V} [m³/(h Pa⁹)]	<u>12</u>	max. 15	min. 10
C_L [m³/(h Pa⁹)]	<u>12</u>	max. 15	min. 10
n	<u>0.66</u>	max. 0.72	min. 0.59

Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	Nettogrundfläche:	Hüllfläche:
<u>372 m³</u> +/- 3 %	<u>120 m²</u> +/- 3 %	

	V_{50}	Unsicher- heit	n_{50}	Unsicher- heit	W_{50}	Unsicher- heit	Q_{50}	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	161	+/- 14 %	0.43	+/- 14 %	1.3	+/- 14 %		
Überdruck	156	+/- 11 %	0.42	+/- 12 %	1.3	+/- 12 %		
Mittelwert	159	+/- 12 %	0.43	+/- 13 %	1.3	+/- 13 %		

Anforderungen nach: Passivhaus Institut	0.6	1/h		
--	------------	-----	--	--

Die Passivhaus-Anforderungen werden erfüllt. Das Gebäude ist nach über 4 Jahren sehr gut luftdicht.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstraße 44/46
64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel
Tel : 06151-82699-0

08.05.03

Unterschrift

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis Blower Door Modell 4 - Tectite Express 2.1.10.1

Objekt : Passivhaus Kronsberg 9.7	Prüfer/in: Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel
	Datum: 15.04.03 FLIB-Nr. 24400

Klimadaten

Innentemperatur: 24 °C	Luftgeschwin. Anemom.: 2.0 m/s	Referenzdruckmessstellen: 1
Außentemperatur: 23 °C	Windstärke: 3	Gebäudestandort: B
Luftdruck (barom.): 101400 Pa	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: 9 %	

Unterdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	2.6 Pa	-0.2 Pa	1.6 Pa	-0.7 Pa

Überdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	1.1 Pa	-0.9 Pa	1.2 Pa	-0.8 Pa

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung	Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	1.7	—	—	—	Δp_{01}	1.7	—	—	—
C	-44	35	123	1.14	D	51	74	108	2.17
C	-39	30	113	0.11	D	46	60	97	-1.11
C	-37	31	115	6.72	D	40	48	87	-0.37
C	-33	22	97	-2.48	D	31	35	74	1.12
C	-29	18	87	-3.66	D	31	38	78	5.97
D	-24	39	78	-3.46	D	26	23	60	-6.21
D	-18	27	66	-1.72	D	20	13	45	-12.68
D	-12	17	53	3.83	D	17	16	51	13.19
Δp_{02}	3.6	—	—	—	Δp_{02}	3.3	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.992	Vertrauensintervall		Korrelationskoef. r:	0.968	Vertrauensintervall	
C_{nV} [m³/(h Pa²)]	7	max. 9	min. 5	C_{nV} [m³/(h Pa²)]	7	max. 13	min. 4
C_L [m³/(h Pa²)]	7	max. 9	min. 5	C_L [m³/(h Pa²)]	7	max. 13	min. 4
n [-]	0.75	max. 0.85	min. 0.66	n [-]	0.68	max. 0.86	min. 0.51

Ergebnis, Kenngrößen

Innenvolumen:	Nettogrundfläche:	Hüllfläche:
309 m³ +/- 3 %	97 m² +/- 3 %	

	V_{50} m³/h	Unsicher- heit %	n_{50} h⁻¹	Unsicher- heit %	W_{50} m³/m²h	Unsicher- heit %	Q_{50} m³/m²h	Unsicher- heit %
Unterdruck	129	+/- 12 %	0.42	+/- 12 %	1.3	+/- 12 %		
Überdruck	108	+/- 16 %	0.35	+/- 17 %	1.1	+/- 17 %		
Mittelwert	118	+/- 14 %	0.38	+/- 15 %	1.2	+/- 15 %		

Anforderungen nach: Passivhaus Inst.	0,6	1/h		
--------------------------------------	-----	-----	--	--

Die Passivhaus-Anforderungen werden erfüllt. Das Gebäude ist nach über 4 Jahren sehr gut luftdicht.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer :
Passivhaus Institut
Rheinstraße 44/46
64283 Darmstadt

Bearbeiter/in : Dipl.-Ing. S. Peper, M. Nagel
Tel : 06151-82699-0

08.05.03

Unterschrift

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A
Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt: <u>Reihenendhaus</u> <u>77836 Rheinmünster-Schwarzach</u>	Prüfer/in: <u>O. Kah; M. John</u> Datum: <u>30.09.2003</u> FLIB-Nr:
--	--

Klimadaten

Innentemperatur: <u>22 °C</u>	Referenzdruckmessstellen: <u>1</u>
Außentemperatur: <u>9 °C</u>	Windstärke: <u>3</u>
Luftdruck (Standard): <u>101325 Pa</u>	Gebäudestandort: <u>B</u>
	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: <u>9 %</u>

Unterdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff	<u>2.2 Pa</u>	<u>-</u>	<u>2.7 Pa</u>	<u>-</u>

Überdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff	<u>2.6 Pa</u>	<u>-</u>	<u>4.6 Pa</u>	<u>-</u>

Messreihen

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	<u>2.2</u>	<u>—</u>	<u>—</u>	<u>—</u>
D	<u>-20</u>	<u>29</u>	<u>67</u>	<u>3.75</u>
D	<u>-24</u>	<u>32</u>	<u>71</u>	<u>-2.86</u>
D	<u>-27</u>	<u>39</u>	<u>78</u>	<u>-0.25</u>
D	<u>-38</u>	<u>62</u>	<u>98</u>	<u>-2.56</u>
D	<u>-49</u>	<u>90</u>	<u>118</u>	<u>-2.93</u>
D	<u>-54</u>	<u>123</u>	<u>138</u>	<u>5.72</u>
D	<u>-73</u>	<u>172</u>	<u>163</u>	<u>-0.51</u>
Δp_{02}	<u>2.7</u>	<u>—</u>	<u>—</u>	<u>—</u>

Reduzierblende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_r	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	<u>2.6</u>	<u>—</u>	<u>—</u>	<u>—</u>
D	<u>24</u>	<u>21</u>	<u>58</u>	<u>-3.40</u>
D	<u>25</u>	<u>26</u>	<u>64</u>	<u>2.60</u>
D	<u>33</u>	<u>39</u>	<u>78</u>	<u>-0.23</u>
D	<u>39</u>	<u>55</u>	<u>93</u>	<u>2.78</u>
D	<u>47</u>	<u>74</u>	<u>107</u>	<u>1.66</u>
D	<u>59</u>	<u>95</u>	<u>121</u>	<u>-4.82</u>
D	<u>77</u>	<u>168</u>	<u>161</u>	<u>1.70</u>
Δp_{02}	<u>4.6</u>	<u>—</u>	<u>—</u>	<u>—</u>

Korrelationskoef. r:	<u>0.995</u>	Vertrauensintervall		
C_{env} [m³/(h Paⁿ)]	<u>6</u>	max. 8	min. 4	
C_L [m³/(h Paⁿ)]	<u>6</u>	max. 8	min. 4	
n [-]	<u>0.77</u>	max. 0.86	min. 0.68	

Korrelationskoef. r:	<u>0.996</u>	Vertrauensintervall		
C_{env} [m³/(h Paⁿ)]	<u>6</u>	max. 8	min. 5	
C_L [m³/(h Paⁿ)]	<u>6</u>	max. 8	min. 5	
n [-]	<u>0.77</u>	max. 0.84	min. 0.69	

Ergebnis, Kenngrößen

V =	<u>425 m³</u>	A _F =	<u>170 m²</u>	A _E =	<u>379 m²</u>
-----	---------------	------------------	---------------	------------------	---------------

	V_{50}	Unsicher- heit	n_{50}	Unsicher- heit	w_{50}	Unsicher- heit	q_{50}	Unsicher- heit
	m³/h	%	h⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	115	+/- 11 %	0.27	+/- 15 %	0.68	+/- 15 %	0.30	+/- 15 %
Überdruck	121	+/- 11 %	0.28	+/- 15 %	0.71	+/- 15 %	0.32	+/- 15 %
Mittelwert	118	+/- 11 %	0.28	+/- 15 %	0.69	+/- 15 %	0.31	+/- 15 %

Anforderungen nach: Passivhaus-Kriterium	0.6	1/h	***		***	
---	------------	-----	------------	--	------------	--

Die Anforderungen werden erfüllt.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer: O. Kah; M. John
Passivhaus Institut Dr. W. Feist
64285 Darmstadt

Datum, Unterschrift

Stempel

BlowerDoor-Prüfprotokoll

Berechnungsgrundlage EN 13829, Verfahren A

Minneapolis BlowerDoor Modell 4 - Tectite Express 3.0.0.10

Objekt : <u>Reihenendhaus</u> <u>77815 Bühl</u>	Prüfer/in: <u>O. Kah; M. John</u>
	Datum: <u>30.09.2003</u> FLIB-Nr.:

Klimadaten

Innentemperatur: <u>23 °C</u>	Referenzdruckmessstellen: <u>1</u>
Außentemperatur: <u>22 °C</u>	Windstärke: <u>0</u>
Luftdruck (Standard): <u>101325 Pa</u>	Gebäudestandort: <u>A</u>
	Zusätzliche Messunsicherheit infolge Wind: <u>0 %</u>

Unterdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	0.4 Pa	-	2.2 Pa	-

Überdruck

Natürliche	Δp_{01+}	Δp_{01-}	Δp_{02+}	Δp_{02-}
Druckdiff.	3.8 Pa	-	1.0 Pa	-0.1 Pa

Messreihen

Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_f	Abwei- chung	Reduzier- blende	Gebäude- druck	Gebläse- druck	Volumen- strom V_f	Abwei- chung
OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]	OABCDE	[Pa]	[Pa]	[m³/h]	[%]
Δp_{01}	0.4	—	—	—	Δp_{01}	3.8	—	—	—
E	-18	49	36	5.93	D	28	22	59	20.42
E	-24	65	42	-2.90	D	28	13	46	-5.14
E	-29	86	48	-3.31	D	34	20	57	-2.72
E	-42	156	65	-1.75	D	45	31	70	-7.98
E	-51	205	75	-3.73	D	49	34	74	-9.81
D	-67	82	113	16.87	D	52	40	79	-9.01
D	-68	50	89	-9.03	D	71	119	136	19.17
Δp_{02}	2.2	—	—	—	Δp_{02}	1.0	—	—	—

Korrelationskoef. r:	0.980	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	3	max. 6	min. 1
C_L [m³/(h Pa²)]	3	max. 6	min. 1
n [-]	0.83	max. 1.02	min. 0.64

Korrelationskoef. r:	0.930	Vertrauensintervall	
C_{env} [m³/(h Pa²)]	3	max. 13	min. 1
C_L [m³/(h Pa²)]	3	max. 13	min. 1
n [-]	0.85	max. 1.24	min. 0.46

Ergebnis, Kenngrößen

V =	475 m³	A _F =	170 m²	A _E =	379 m²
-----	--------	------------------	--------	------------------	--------

	V_{50}	Unsicher- heit	n_{50}	Unsicher- heit	w_{50}	Unsicher- heit	q_{50}	Unsicher- heit
	m³/h	%	h ⁻¹	%	m³/m²h	%	m³/m²h	%
Unterdruck	75	+/- 7 %	0.16	+/- 12 %	0.44	+/- 12 %	0.20	+/- 12 %
Überdruck	88	+/- 7 %	0.18	+/- 12 %	0.52	+/- 12 %	0.23	+/- 12 %
Mittelwert	81	+/- 7 %	0.17	+/- 12 %	0.48	+/- 12 %	0.22	+/- 12 %

Anforderungen nach: <u>Passivhaus-Kriterium</u>	0.6	1/h	***	***
---	------------	-----	-----	-----

Die Anforderungen werden erfüllt.

Bemerkung: Das Messergebnis schließt (verdeckte) Mängel in der Konstruktion nicht aus.

Auftragnehmer: O. Kah; M. John
Passivhaus Institut Dr. W. Feist
64285 Darmstadt

Datum, Unterschrift

Stempel