

# Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene



Erarbeitung im Rahmen des EU-Forschungsprojektes 3EnCult



3ENCULT is co-funded by the EU Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement n° 260162. The European Union is not liable for any use that may be made of the information contained in this publication which is merely representing the authors view.



Januar 2014

# Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene

**Autoren:**

Søren Peper  
Armin Bangert  
Zeno Bastian

**Unter Mitarbeit von:**

Waldemar Rupp

**Herausgeber:**

PASSIVHAUS INSTITUT  
Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstraße 44/46  
D-64283 Darmstadt  
Tel: 06151-82699-0  
E-Mail: mail@passiv.de  
www.passiv.de

**Darmstadt Januar 2014**

Dieser Bericht entstand im Rahmen des EU Forschungsprojektes „3EnCult“, Efficient ENergy for EU Cultural Heritage.

Wir danken den Produktherstellern Ampack, Astorplast, Coroplast, Doerken, Isocell, Kloeber, Otto-Chemie, Pro Klima, Saint-Gobain, Siga, Tremco-Ilbruck und Weiss-Chemie für die kostenlose Bereitstellung der Materialproben von Abdichtungsmaterial sowie der Beratung zu geeigneten Methoden und Verfahren.

Außerdem danken wir der Holzwerkstatt der TU Darmstadt für die Herstellung der Musterbalken sowie Herrn Stefan Helfrich für die Beschaffung der Altbalken.

Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Abweichend sind jeweils die Quellen angegeben.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zusammenfassung .....	3
2	Grundlagen .....	11
2.1	Luftdichte Gebäude .....	11
2.1.1	Warum luftdicht bauen? .....	11
2.1.2	Luftdichtheitsprüfung .....	14
2.1.3	Besondere Anforderung „Innendämmung“ .....	16
3	Balken in Altbauten .....	18
3.1.1	Rissbildung und Rissarten .....	18
3.1.2	Bauschäden durch Feuchte .....	19
4	Versuchsablauf .....	20
4.1	Versuchsaufbau und Messgeräte .....	20
4.1.1	Details zu Versuchsaufbau und Messtechnik .....	21
4.2	Versuchsdurchablauf .....	24
4.2.1	Musterbalken .....	24
4.2.2	Versuchsdurchführung .....	25
4.2.3	Vorgehen Auswertung .....	26
5	Untersuchung der Abdichtungslösungen .....	28
5.1	Materialbeschreibung .....	29
5.2	Methodenbeschreibung und Verarbeitung .....	31
5.2.1	Methode: Klebeband .....	32
5.2.2	Methode: Klebeband + Haftgrundierung .....	34
5.2.3	Methode: Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse .....	36
5.2.4	Methode: Butylkautschukband + Haftgrundierung .....	38
5.2.5	Methode: Butylkautschukband + Dichtmasse .....	39
5.2.6	Methode: „Speziallösung“ .....	39
5.2.7	Methode: „Speziallösung II“ .....	42
5.2.8	Methode: Putzanschlussband + Dichtmasse .....	43
5.2.9	Methode: Injektionskanal .....	45
5.2.10	Methode: Folien-Manschette .....	46
5.2.11	Methode: Gipsverguss .....	49
5.2.12	Methode: Dickbeschichtung .....	51
5.3	Methodenvergleich .....	52
5.3.1	Vergleich Messergebnisse .....	52
5.3.2	Vergleich Handhabung .....	56
5.4	Übertragung: Großer Musterbalken und Altbalken .....	57
5.5	Handlungsempfehlung .....	59
5.6	Anwendungsbereich und Reversibilität .....	60
5.7	Einordnung und Ausblick .....	62
6	Luftdichtheit von OSB Platten .....	63
7	Anhang .....	69
7.1	Anhang A: Differenzdruckmessung (Beispiel) .....	69
7.2	Anhang B: Messdatenauswertung in Excel .....	70
7.3	Anhang C: Messergebnisse Einzelmessungen .....	71
8	Glossar .....	73
9	Literaturverzeichnis .....	75



# 1 Einführung und Zusammenfassung

Bei Sanierungsprojekten mit denkmalgeschützten Fassaden kommt in der Regel nur der Einsatz von Innendämmung in Frage. Bei energetisch anspruchsvollen Sanierungen stellen dann insbesondere alte, rissige Holzbalken Planer wie Handwerker vor nicht einfache zu lösende Aufgaben. Die Normung liefert hierzu keine Antworten und selbst unter Fachleuten gibt es keinen Konsens darüber, wie mit Durchdringungen der luftdichten Ebene durch Holzbalken umzugehen ist. Die Gefahr besteht in der mangelhaften Einbindung von Balkenköpfen in die luftdichte Ebene des Gebäudes. Die Wahrscheinlichkeit eines Bauschadens durch konvektiven Feuchteintrag in den kalten Außenwandbereich steigt dadurch stark an (vgl. auch [AkkP 32]). Weitere Durchdringungen der luftdichten Ebene ergeben sich häufig im Dachbereich und dort insbesondere beim Dach-/Wandanschluss an der Traufe, beim Anschluss von Kehlbalken an die Sparren, sowie bei senkrecht auf einer wärme gedämmten obersten Geschossdecke aufstehenden Stützbalken.

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle spielt, insbesondere bei energieeffizienten Gebäuden eine entscheidende Rolle. Es sind vor allem Detailfragen wie die Einbindung rissiger Balkenköpfe, die über die erreichte Luftdichtheit eines sanierten Gebäudes entscheiden. Bei mangelhafter Planung oder Ausführung können zusätzlicher Heizenergiebedarf und Bauschäden die Folge sein. Zur Kontrolle der Bausubstanz (Statik) und zur Festlegung der notwendigen Arbeiten werden die alten Balken häufig im Bereich der Einbindung in die Wand überprüft. Unter der Voraussetzung der vollständigen („rundum“) Freilegung der Holzbalken im Bereich vor dem Auflager, stellt sich die Frage der Ausführung der luftdichten Anbindung des Balkens an die luftdichte Ebene der innengedämmten Wand.


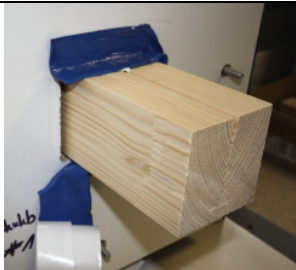
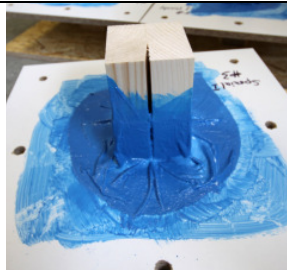

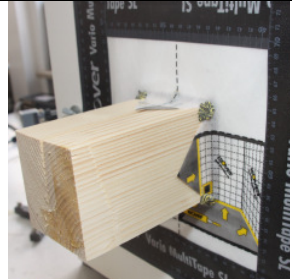



Aus diesem Grund wurden am Passivhaus Institut Versuchsreihen zur luftdichten Einbindung von Holzbalken durchgeführt. Dabei wurde untersucht, welche Methoden und Materialien sich eignen und wie groß die Restleckagen der untersuchten Methoden ausfallen. Dazu wurden sieben unterschiedliche, handelsübliche Varianten und vier sog. „Alternativlösungen“ zur Holzbalkenabdichtung in der Altbausanierung untersucht. Dabei handelt es sich um Erweiterungen mit zusätzlichen Maßnahmen bzw. um, für diese Anwendung nicht übliche Materialien oder Methoden. Für die Auswahl der zu untersuchenden Produkte und Methoden wurde eine Vielzahl von Fachherstellern kontaktiert und zu Lösungsansätzen für die bekannte Problematik befragt. Zehn der angeschriebenen Firmen aus dem In- und Ausland haben dem Passivhaus Institut Produktmuster zur Verfügung gestellt und zum Teil auch zur Handhabung beraten.

Um die unterschiedlichen Lösungen miteinander vergleichen zu können, wurden standardisierte „**Musterbalken**“ (8 x 8 cm) mit einem definierten, auf Null auslaufenden Spalt angefertigt. Der dreieckförmige Spalt soll die Problematik abbilden, die sich bei realen Rissen ergibt: eine Abdichtung bis in die Spitze des Spaltes ist schwierig.

Bei der Untersuchung stand die Andichtung an den Holzbalken inkl. der Abdichtung des Spaltes im Vordergrund. Als Wandebene wurden beschichtete Holzplatten („Holzblende“) verwendet.

Aus den Materialmustern der Hersteller und den „Alternativlösungen“ ergaben sich insgesamt zwölf unterschiedliche Kombinationen der folgenden Produktgruppen und Verfahren zur Andichtung von Holzbalken: Klebeband, Dichtmasse/Kleber, Haftgrundierung, dehnfähiges Butyl-Kautschukklebeband, Reinacrylat-Dispersion („Speziallösung“), Putzanschlussband, Folienmanschette, Dickbeschichtung, Injektionskanal sowie Gipsverguss. Die Materialkombinationen bestehen jeweils aus bis zu drei Materialien. Es werden bei den untersuchten handelsüblichen Lösungen keine Produkte unterschiedlicher Hersteller miteinander kombiniert; eine Unverträglichkeit der verwendeten Produkte zueinander wird damit ausgeschlossen. An einer Kombination wurde zusätzlich ein Vergleich von zwei ähnlichen Produkten unterschiedlicher Hersteller durchgeführt.

**Tabelle 1: Übersicht über die unterschiedlichen Andichtungsmethoden die an den Musterbalken ausgeführt wurden**

			
Klebeband	Butyl-Kautschuk-Klebeband	Speziallösung (Reinacrylat-Dispersion)	Putzanschlussband
			
Folienmanschette	Injektionskanal	Dickbeschichtung	Gipsverguss

Die Versuche wurden in einem an die [DIN EN 12114] angelehnten Versuchsstand durchgeführt. Die gemessenen Einzelproben bestehen aus einer Holzblende, der Holzbalkendurchdringung durch die Blende und der untersuchten Andichtungsmethode. Es wurde jeweils eine Serie von unterschiedlichen Druckdifferenzen

zwischen Umgebung und Prüfbox angelegt. Gemessen wurde der Volumenstrom, der durch die verbleibenden Restleckagen der Holzbalkenabdichtung strömt. Die Undichtheiten der Prüfbox selber wurden dabei mit einer geschlossenen, luftdicht beschichteten Holzblende (ohne Durchbruch für einen Balken) als Offsetwert berücksichtigt. Die Auswertung erfolgt analog einer Luftdichtheitsmessung von Gebäuden (Blower-Door-Messung) bei einer Druckdifferenz von 50 Pa. Die durchgeführten Versuchsreihen liefern Hinweise für den erfolgreichen Anschluss freigelegter Holzbalken im Bereich der Balkenköpfe in der Altbausanierung sowie die Größenordnung der zu erwartenden Leckageströme bei 50 Pa Druckdifferenz.

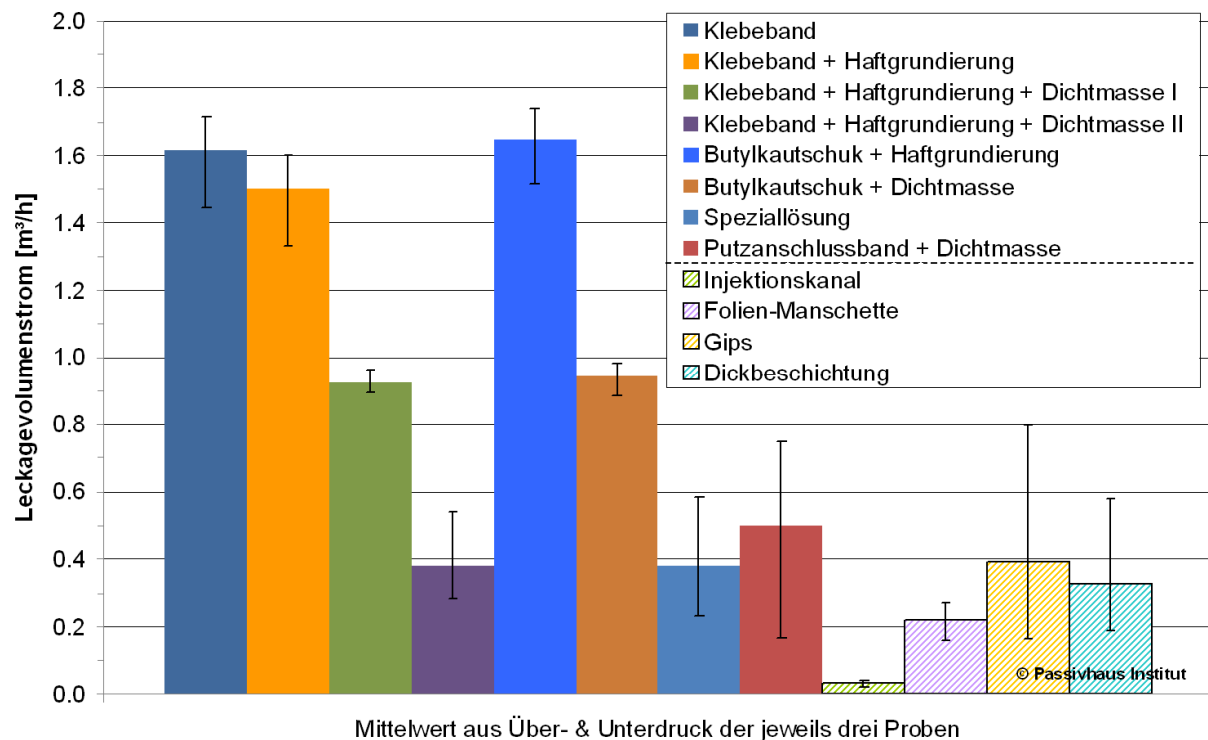
Aufgrund der Qualität der verwendeten Messgeräte liegen die Messabweichungen dieser Untersuchung zwischen 3 und 7 % bezogen auf den jeweiligen Messwert (berechnet nach [DIN EN 12114]).

### **Messergebnisse**

Die Messergebnisse der untersuchten Methoden werden jeweils als arithmetischer Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung über die jeweils untersuchten drei Einzelproben dargestellt. Neben den Mittelwerten (Säulen) sind jeweils der minimale und der maximale Messwert dargestellt (I-Striche). Die Messwerte mussten gegenüber den zuvor veröffentlichten Ergebnissen ([PHT 2012] und [Buildair 2013]) aufgrund eines Messgerätefehlers geringfügig korrigiert werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die erfolgreichen Methoden immer eine Abdichtung des Rissquerschnitts im Balken voraussetzen. Sobald der Riss mit Material verfüllt wird, kann der Leckagevolumenstrom gegenüber einer einfachen Abklebung mit Klebeband deutlich verringert werden. Der beste Messwert - also der geringste Leckagevolumenstrom - ergibt sich bei der Lösung mit dem Injektionskanal mit nur 0,03 m<sup>3</sup>/h (entspricht einer Reduktion um 98 %). Diese Rissabdichtung kann mit allen anderen Methoden kombiniert werden. Vorab muss allerdings zwingend die Statik des Balkens geklärt werden, da Bohrungen durchgeführt werden.

Entscheidend für den Erfolg ist, ob sich der Spalt mit der gewählten Technik ausfüllen lässt oder nicht. In allen durchgeführten Versuchen wurden für die Herstellung von luftdichten Verbindungen Spezialprodukte eingesetzt. Insgesamt kann festgestellt werden, dass es weniger auf die gewählte Materialart dieser Spezialprodukte zur Abdichtung ankommt, als insbesondere auf das weitgehende Verschließen des Rissquerschnitts. Es ist naheliegend, dass sobald der Querschnitt des Risses verringert wird, die Dichtheit merklich ansteigt. Aussagen über die evtl. unterschiedliche Dauerhaftigkeit der untersuchten Verbindungen können im Rahmen dieser Untersuchung nicht erfolgen. Alle untersuchten Proben sind vor UV-Licht geschützt eingelagert und könnten zu einem späteren Zeitpunkt nochmals untersucht werden.



**Abbildung 1:** Vergleich der Leckageströme der durchgeführten Messungen normiert auf 50 Pa Druckdifferenz (jeweiliger Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung der drei Proben). Die dünne schwarze Linie gibt jeweils den gemessenen Minimal- und Maximalmittelwert an.

In der **Handhabung** unterscheiden sich die untersuchten Methoden zur Holzbalkenandichtung deutlich, sie wurde bei der Untersuchung ebenfalls bewertet. Wird keine besondere Abdichtung des Risses vorgenommen ist ein Balken relativ zügig an die luftdichte Ebene (Dampfbremssfolie, Holzwerkstoffplatte, etc.) anzuschließen. Eine qualitativ hochwertige Andichtung – deren Voraussetzung die Zugänglichkeit des Balkens sowie die grundlegende Reinigung der Holzoberfläche ist – braucht hingegen mehr Zeit und Sorgfalt. Welche Methode im Einzelfall ausgewählt wird, muss nach den jeweiligen Randbedingungen entschieden werden.

### Übertragung der Ergebnisse

Die Untersuchung an den kleinen Musterbalken mit nur einer Leckage wurde realisiert, um die unterschiedlichen Methoden sauber vergleichen zu können. Dabei sollten andere Einflüsse als die der Andichtung möglichst ausgeschlossen bzw. gering gehalten werden. Es handelt sich damit im Vergleich zu Situationen an historischen Balken um eine bewusst vereinfachte Situation. Um die Übertragung auf typische reale Situationen herzustellen, wurden einige Messungen an größeren Balken durchgeführt.

Dafür wurden die erfolgreichsten Abdichtungsmethoden zusätzlich an einem alten, exemplarischen Holzbalken (ca. 16 x 12 cm) (Bezeichnung hier: Alt- oder „Real“-



Balken) und einem weiteren „großen“ Musterbalken (16 x 15 cm) getestet. Dieser größere Musterbalken weist eine Vielzahl unterschiedlicher Rissgeometrien auf: Es gibt diverse kleine und einige große Risse, welche wieder alle auf „Null auslaufen“ um tatsächlichen, natürlichen Rissformen nahe zu kommen. Die Summe der Leckagefläche bei diesem größeren Musterbalken beträgt ca. 11,5 cm<sup>2</sup>, dagegen verfügt der kleine Musterbalken der umfangreicheren Untersuchung nur über ca. 0,9 cm<sup>2</sup>.

Als Referenzmessung dient in diesem Fall erneut die Andichtung nur mit Luftdichtheitsklebeband ohne weitere Maßnahmen bezüglich der Rissabdichtung. Nach der Rissverfüllung mit eingespritzter Dichtmasse und Abklebung mit Klebeband wird beim großen Musterbalken eine Reduktion des Leckagevolumenstroms von 89 % erreicht, es verbleiben knapp 1,2 m<sup>3</sup>/h Leckagenvolumen. Beim Altbalken verbleiben mit der Methode noch knapp 0,4 m<sup>3</sup>/h, was einer Reduktion um 95 % entspricht. Mit der Methode „Reinacrylat-Dispersion“ (pastöse Masse) verbleiben beim großen Musterbalken knapp 0,5 m<sup>3</sup>/h, was einer Reduktion um sogar 96 % entspricht. Der Erfolg der Abdichtungsmaßnahme kann damit erwartungsgemäß auf diese größeren Balken mit anderen Rissgeometrien übertragen werden.

Mit dieser Übertragung der Abdichtungsmethoden kann die Größenordnung der in der Realität auftretenden Leckageströme abgeschätzt werden. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die Messungen am Versuchsstand an vollständig freiliegenden Balken durchgeführt wurden. Es gibt kein Mauerwerk oder dergleichen, welches den Luftstrom nach dem Abdichtungsbereich behindern oder reduzieren würde; real treten daher ganz andere Leckagevolumenströme auf. In der Realität sind aufgrund von Windanströmung und Thermik an Gebäuden Druckdifferenzen von z.B. 3 bis 8 Pa zu erwarten; nur in Böen oder bei sehr hohen Gebäuden liegen die Werte höher. Zur Verwendung der Messwerte an realen Gebäuden mit solchen Druckdifferenzen müssen die Werte entsprechend heruntergerechnet werden.

Das Vorgehen zur erfolgreichen Balkenabdichtung lässt sich reduzieren auf die folgenden Arbeitsschritte:

- Balken freilegen
- Im Einbindungsbereich Balken reinigen
- Risse verfüllen
- Abdichtung Balken zur Wandebene ausführen

Voraussetzung ist dabei immer die Verwendung von geeigneten Materialien (Spezialprodukten). Die Entscheidung für die eine oder die andere Methode bzw. deren Kombinationen zur Holzbalkenabdichtung bleibt immer der Einzelfallprüfung vorbehalten.

## Luftdichtheit von OSB-Platten

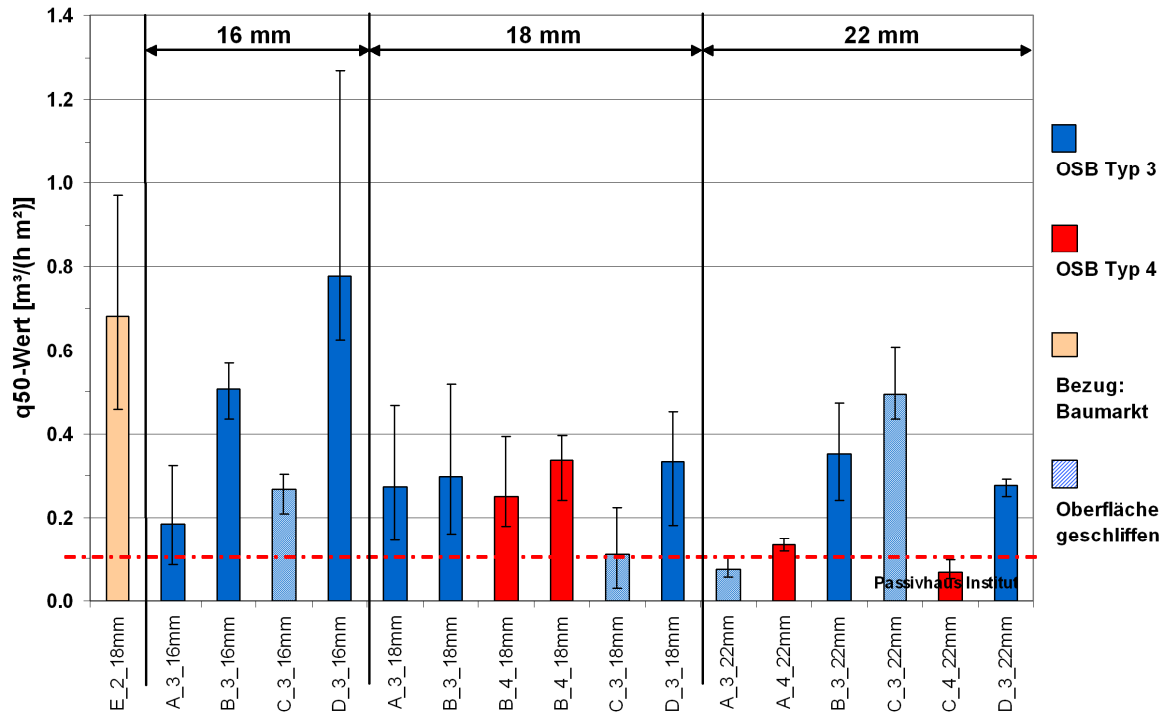
Der Bau der Prüfbox für die Messungen der Balkenabklebungen erfolgte aus OSB-Platten (Oriented Strand Board). Bei den ersten Messungen wurde festgestellt, dass die Undichtheit der Prüfbox für diese Untersuchung nicht zu vernachlässigen ist. Die Ursache lag insbesondere in der Undichtheit der verwendeten OSB-Platten. Aus diesem Grund wurde die Prüfbox nachträglich flächig mit Luftdichtheits-Klebeband abgeklebt.

Die Luftdichtheit von OSB-Platten kann auch bei Altbausanierungen von Interesse sein. Um die Undichtheit der OSB-Platten genauer einschätzen zu können und die Auswirkungen auf die Verwendung im Bau beurteilen zu können, wurde daher während der Projektlaufzeit entschieden, die Luftdichtheit der Platten weitergehend zu untersuchen. Dafür konnte die vorhandene Prüfbox verwendet werden.

Bei Großhändlern wurden OSB-Platten vom Typ 3 und 4 in den Stärken 16, 18 und 22 mm der vier großen Hersteller am deutschen Markt gekauft. Aus einer Platte wurden jeweils drei oder vier Proben gesägt. Am Prüfstand wurde die zu prüfende Platte luftdicht eingebaut und die Fläche von 200 x 200 mm auf Dichtheit untersucht.

Als Anforderung an die Flächendichtheit wird in [Zeller 2012] ein  $q_{50}$ -Wert von maximal  $0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  gefordert, für Passivhäuser von  $0,06 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ , in [Langmans 2010] sind es  $0,09 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . In Kanada gilt sogar eine Anforderung von nur  $q_{50} = 0,048 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  an die Flächendichtheit von Baumaterial. Die hier vorliegende Untersuchung orientiert sich am moderaten Zielwert von  $0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ .

Eine Übersicht über die Messergebnisse aller untersuchten OSB-Platten zeigt Abbildung 2. Die  $q_{50}$ -Messergebnisse zeigen – analog zur Untersuchung von [Langmans 2010] – eine sehr große Streuung der jeweils drei Einzelwerte einer Platte. Die Ursache ist vermutlich in dem nicht homogenen Material mit den typischen, groben Spänen begründet. Die Größenordnung der Ergebnisse ist ebenfalls vergleichbar mit den Ergebnissen von [Langmans 2010]. Die Mittelwerte (Säule) der Messwerte je Platte liegen beim **OSB Typ 3** zwischen  $0,08$  und  $0,78 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ , die der Einzelmessungen (I-Strich) zwischen  $0,03$  und  $1,27 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Es sind die Mittelwerte und der jeweilige kleinste und größte  $q_{50}$ -Messwert dargestellt. Die vier Hersteller sind mit den Buchstaben A bis D gekennzeichnet. Die vier Messreihen der OSB-Platten vom **Typ 4** liegen mit ihren Mittelwerten (rote Säulen) zwischen  $0,07$  und  $0,34 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ , die zugehörigen Einzelmessungen (I-Strich) zwischen  $0,06$  und  $0,4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Zusätzlich wurde eine im Baumarkt bezogene Platte vermessen und dargestellt (beige Säule).



**Abbildung 2: Messergebnisse zur Luftdichtheit von OSB-Platten (q<sub>50</sub>-Wert) vom Typ „OSB 3“ und „OSB 4“ von vier Herstellern (A...D) sortiert nach Plattendicke 16, 18 und 22 mm. Zusätzlich ist das Ergebnis einer über einen Baumarkt bezogenen Platte abgebildet. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert aus drei Messungen (Säule) sowie der kleinste und der größte Messwert (I-Strich). Der Zielwert liegt bei 0,1 m³/(m²h) (rote gestrichelte Linie).**

Nur drei der siebzehn Mittelwerte der Platten liegen unterhalb oder gleich dem Zielwert von  $q_{50} = 0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Dabei handelt es sich um zwei 22 mm Platten (Typ 3 und 4) sowie eine 18 mm Platte (Typ 3). Alle anderen Messwerte sind deutlich über dem Zielwert angesiedelt. Eine zusätzlich im Baumarkt bezogene Platte (18 mm) ist deutlich schlechter als die anderen 18 mm Platten aber besser als die schlechteste 16 mm Platte.

Dienen bei einem Gebäude die OSB-Platten als luftdichte Ebene, führen die unzureichend dichten Platten zu einem größeren Leckagevolumenstrom des Gebäudes. Beim Zielwert von  $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$  liegt der Anteil der OSB-Platten an der Gesamtleckage bei einem berechneten Beispielgebäude je nach Plattenqualität bei 20 bis 40 % (Mittelwerte der Messungen aller untersuchten 18 mm Platten bzw. aller Platten des Herstellers mit den höchsten q<sub>50</sub>-Werten).

Das Erreichen einer hohen Luftdichtheit der Gebäudehülle, wie sie z.B. für Passivhäuser und EnerPHit-Sanierungen erforderlich ist, bleibt weiterhin unter Verwendung der hier untersuchten OSB-Platten als luftdichte Ebene möglich. Der Sicherheitsabstand zu den Anforderungswerten an die Luftdichtheit sinkt mit diesen

Qualitäten aber und muss an anderer Stelle ggf. aufwändig und mühevoll durch exakteres Arbeiten etc. ausgeglichen werden.

Der Planer, der Lieferant wie auch der ausführende Handwerker hat im Regelfall keine Kenntnis über die Luftdichtheitsqualität der verwendeten OSB-Platten. Im Sinne einer hohen Luftdichtheit der Gebäudehülle zur Sicherstellung der Bauschadensfreiheit und Planungssicherheit muss gefordert werden, dass seitens der Hersteller verbindliche Angaben zur Luftdichtheit gemacht werden; am praktischsten wären Aufdrucke auf den Platten selbst. Denkbar ist anderenfalls auch die Erarbeitung von anderweitigen Lösungsvorschlägen durch die Hersteller, um den Planern, Bauausführenden und Investoren die notwendige Qualität und Sicherheit bieten zu können.

***Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des EU-Forschungsvorhabens „3EnCult“, Efficient ENergy for EU Cultural Heritage. Die Autoren bedanken sich bei den involvierten Herstellern für die Bereitstellung der untersuchten Produktmuster zur Holzbalkenandichtung.***

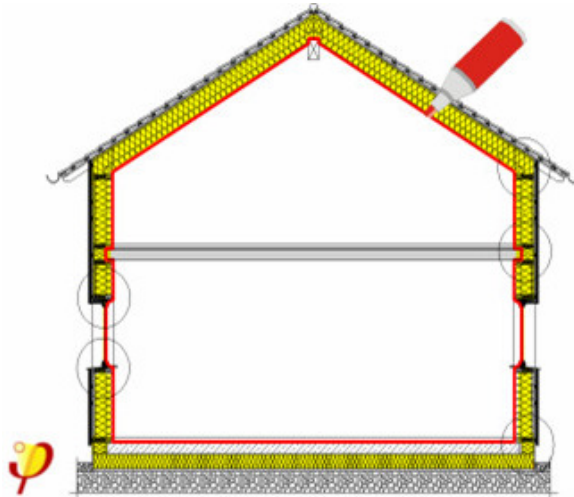
## 2 Grundlagen

### 2.1 Luftdichte Gebäude

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle liefert einen wesentlichen Beitrag zur Energieeffizienz von Gebäuden. Der Dämmstandard Mitte der 1970er Jahre war noch so unzureichend, dass In- und Exfiltrationswärmeverluste in Folge von Undichtigkeiten nicht besonders ins Gewicht fielen und kaum Beachtung fanden. Erst durch die allmähliche Verbesserung der Gebäudedämmung wuchs auch der Stellenwert der Luftdichtheit. 1995 wurde ein erster Versuch unternommen, in Deutschland eine Normung zur Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle vorzunehmen. Die [WSVO 1995] forderte erstmals in §4 (1) explizit den Einbau einer „luftundurchlässigen Schicht über die gesamte Fläche“; vorher standen mehr die Undichtheiten an z.B. Fensterfugen im Fokus beim Thema „Undichtheiten“ (Wärmeschutzverordnung vom 24.02.1982). Mit der Herausgabe der [DIN 4108-T7] im Jahre 1996 (Vornorm Mai 1996) wurden Praktikern und Planern Handlungsempfehlungen für verschiedenste Detaillösungen gegeben.

#### 2.1.1 Warum luftdicht bauen?

Die Ausführung einer luftdichten Gebäudehülle ist nach heutigen Forschungserkenntnissen zwingend notwendig. Dies ist durch den mit der Luftdichtheit des Gebäudes verbesserten Wärme-, Feuchte-, Brand- und Schallschutz begründet. Weiterhin liefert die luftdichte Ebene einen wirksamen Schutz vor Schadstoffen (beispielsweise Stickoxide an stark befahrenen Straßen oder Radon aus dem Erdreich), sowie die Grundlage für den ökonomischen Betrieb einer hocheffizienten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung [BW 2008]. Die Lage der luftdichten Ebene ist dabei abhängig vom Wandaufbau und den verwendeten Baumaterialien. Abbildung 3 zeigt schematisch den Verlauf der Luftdichtheitsebene mit der sog. „Stiftregel“: Die luftdichte Ebene muss in jeder Schnittzeichnung umlaufend mit einem Stift abgefahren werden können, ohne dabei absetzen zu müssen [Peper/Feist/Sariri 1999/2009]. Die Vermeidung von Durchdringungen der luftdichten Ebene (durch Elektroinstallation, Balkenköpfe, Geschossdecken, etc.) ist Bestandteil eines sorgfältig erstellten Luftdichtheitskonzeptes des verantwortlichen Planers.



**Abbildung 3:** Die Luftdichtheitsebene lässt sich in der Schnittzeichnung mit einem Stift abfahren, ohne dabei absetzen zu müssen („Stiftregel“) (Quelle: PHI)

## Wärmeschutz

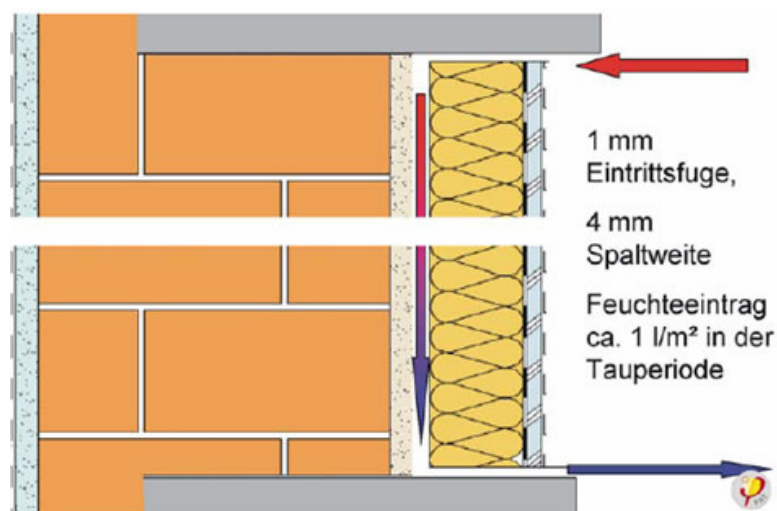
Im Winter führt der unkontrollierte Luftaustausch zwischen dem Inneren eines Gebäudes und der Umgebung zu erhöhtem Heizwärmeverbrauch. Druckunterschiede über der Gebäudehülle stellen die treibende Kraft für den Luftaustausch dar. Diese entstehen durch zwei unterschiedliche Effekte:

Zum einen entstehen durch Winddruck und Windsog lokale Über- bzw. Unterdruckbereiche zwischen außen und innen. Diese führen an Leckagen in der Gebäudehülle zu Luftströmungen. Je exponierter die Lage eines Hauses, desto stärker ist der Einfluss des Windes. Die Druckverteilung an der Gebäudehülle als Folge von Windeinfluss lässt sich mittels detaillierter Berechnungsansätze aus [DIN EN 15242] nachvollziehen.

Zum anderen treten als Folge der Beheizung und Klimatisierung temperaturbedingte Druckunterschiede zwischen außen und innen auf: Wärmere Luftschichten weisen eine geringere Dichte auf als kältere und steigen deshalb nach oben. Eine mangelhaft ausgeführte Luftdichtheitsebene führt aus den oben genannten Gründen in kalten Wintermonaten zu einem bedeutenden Anstieg des Heizwärmeverbrauchs. Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes soll hier ein Beispiel aus [BW 2008] herangezogen werden: „Es sei eine Hauseingangstür angenommen, die [...] einen Spalt von 5-10 mm Höhe aufweist. [...] bei einer Spatlänge von 1 m und einer Spalttiefe von 70 mm kann ein Volumenstrom von ca. 45 bis 90 m<sup>3</sup>/h durch diesen Spalt strömen. Dies führt je nach Temperaturdifferenz und Dauer der Druckbelastung zu unnötigen Wärmeverlusten [...]“. Für detaillierte Berechnungen der zusätzlichen Wärmeverluste aufgrund von Leckagen ist die [DIN EN ISO 13790] heranzuziehen.

## Feuchteschutz

Konvektiver Feuchteeintrag in den Wandaufbau ist verantwortlich für eine Vielzahl von Bauschäden: Im Bereich von Leckagen durchströmt feuchtwarme Luft aus dem Innenraum die Gebäudehülle von innen nach außen. Besonders kritisch sind dabei längere Strömungswege durch die Konstruktion, bei denen sich die Luftgeschwindigkeit reduziert und die Lufttemperatur verringert. Dabei können über die Zeit große Mengen Feuchtigkeit ausfallen und in der Konstruktion verbleiben. Auch bei nicht fachgerecht abgedichteten und deshalb mit Raumluft hinterströmten Innendämmungen können so Schimmel- oder Feuchteschäden entstehen (siehe Abbildung 4) (vgl. [Borsch-Laaks et al. 2009] und [Künzel et al. 2010]). In diesem Fall kondensiert die Feuchtigkeit aus der sich immer stärker abkühlenden Luft aus. Es entstehen „Feuchtenester“, die bei zu geringen Trocknungsreserven (Entfeuchtung über Diffusion und Verdunstung) zu Schimmel und Pilzbefall führen können.



**Abbildung 4: Konvektiver Feuchteeintrag bei „hinterlüfteter“ Innendämmung [Pfluger 2005])**

Ein gerade in Details sorgfältig ausgeführtes Luftdichtheitskonzept reduziert solche schädlichen Durch- und Hinterströmungen und damit Bauschäden in Folge von konvektivem Feuchteeintrag auf ein Minimum.

## Brand- und Schallschutz

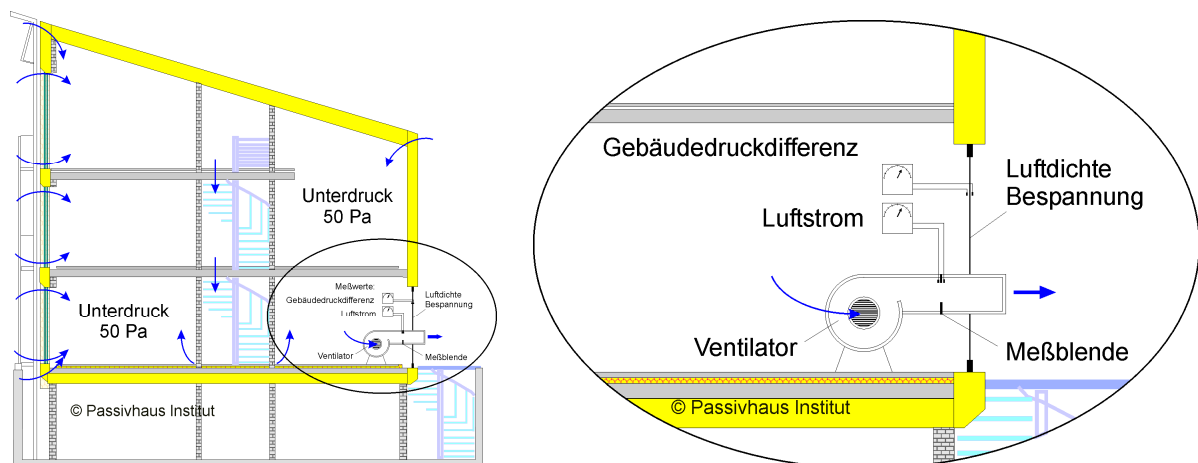
Die Dichtheit von Außenbauteilen ist eine wesentliche Anforderung an Brandschutzkonstruktionen. Leckagen führen im Brandfall in besonderem Maße zu Weiterleitung von Hitze und giftigen Rauchgasen. Für weitere Informationen zu diesem Thema wird auf [BW 2008] verwiesen. Ebenso stellt der Schallschutz Anforderungen an die Luftdichtheit: Durch luftdurchströmte Leckagen kann sich Schall gut ausbreiten womit der Schallschutz verschlechtert wird.

## Kontrollierte Lüftung

Für den zuverlässigen und ökonomischen Betrieb einer hocheffizienten Lüftungsanlage ist eine hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle unerlässlich. Besonders bei der Wärmerückgewinnung aus der Abluft wird schnell deutlich, warum Leckagen der Gebäudehülle eine Lüftungsanlage unwirtschaftlich werden lassen. Aus Leckagen austretende warme Raumluft wird nicht über den Wärmetauscher der Lüftungsanlage geleitet, der die Wärmerückgewinnung und damit die Erwärmung der Außenluft gewährleistet. Somit wird weniger Heizenergie zurück gewonnen, als es bei einer ausreichend dichten Gebäudehülle der Fall wäre. Ein höherer Heizenergieverbrauch und erhöhte Kosten gegenüber einer ausreichend luftdichten Gebäudehülle sind die Folge.

### 2.1.2 Luftdichtheitsprüfung

Bei der Luftdichtheitsprüfung eines Gebäudes wird mit Hilfe eines Gebläses, welches meist temporär in einer Haustüröffnung montiert wird, eine Serie von unterschiedlichen Druckdifferenzen gegenüber der Umgebung erzeugt. Diese Druckdifferenzstufen liegen im Bereich von ca. 20-100 Pa Über- bzw. Unterdruck. Der durch das Gebläse geförderte Luftmassenstrom entspricht dem Massenstrom, der durch die Leckagen in der Gebäudehülle strömt. So ist ein Maß für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle gegeben [Zeller 2008].



**Abbildung 5: Prinzipieller Messaufbau für eine Luftdichtheitsprüfung [Peper/Feist/Sariri 1999/2009]**

Aus den mit Hilfe der Luftdichtheitsprüfung erhaltenen Messwertpaaren lassen sich logarithmische Kennlinien erzeugen, die den jeweils geförderten Massenstrom für den dazugehörigen Druck wiedergeben. Durch doppeltlogarithmische Auftragung lässt sich erwähnte Kennlinie durch eine Geradengleichung beschreiben. Aus den so erhaltenen Parametern der Geradengleichung lässt sich unter Verwendung der allgemeinen Strömungsgleichung der Strömungskoeffizient  $C$  und der Strömungs-



exponent  $n$  gewinnen. Auf diese Weise lässt sich der Volumenstrom bei 50 Pa bestimmen. Dieser wird in der Norm als **Leckagestrom** bezeichnet.

$$\text{Strömungsgleichung} \quad \dot{V} = C * \Delta p^n \quad \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (\text{Formel 1})$$

$$\text{Geradengleichung} \quad y = a * x + b \quad (\text{Formel 2})$$

$$\text{Logarithmische Strömungsgleichung} \quad \log(\dot{V}) = \log(\Delta p) * n + \log(C) \quad (\text{Formel 3})$$

Der Strömungskoeffizient  $C$  beschreibt den Schnittpunkt der  $y$ -Achse bei 1 Pascal Gebäuedruck. Da es sich um eine logarithmische Gleichung handelt, ist die Bestimmung des Schnittpunktes mit der  $y$ -Achse bei 0 Pascal nicht möglich. Der Strömungsexponent  $n$  gibt die Steigung der Geraden an und lässt gleichzeitig eine qualitative Bewertung der vorhandenen Leckagen zu. Für gewöhnlich liegt der Strömungsexponent zwischen 0,5 und 1. Liegt er näher bei 0,5 handelt es sich um überwiegend turbulente Strömungen; liegt der Wert näher an 1, dominieren laminare Strömungen.

Die Bestimmung der Koeffizienten  $C$  und  $n$  ist in der [DIN EN 13829] enthalten. Tabellenkalkulationsprogramme oder speziell für Differenzdruckmessungen ausgelegte Software erleichtern die Ermittlung der Koeffizienten erheblich.

Dividiert man den Leckagestrom durch das lichte Gebäudevolumen erhält man die Luftwechselrate bei 50 Pa. Dies ist der sogenannte  $n_{50}$ -Wert, welcher für die Berechnung der Lüftungswärmeverluste durch In- und Exfiltration herangezogen wird.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{\text{Gebäude}}} \quad \left[ \frac{1}{h} \right] \quad (\text{Formel 4})$$

Dividiert man den Leckagestrom durch die Hüllfläche des Gebäudes so erhält man das Maß für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehüllfläche ( $q_{50}$ -Wert). Dieser beschreibt die Qualität der Luftdichtheit der gesamten Gebäudehülle des Bauwerks. Die Angabe wird insbesondere für größere Gebäude ( $> 1500 \text{ m}^3$  Luftvolumen) empfohlen.

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_{\text{Gebäudehülle}}} \quad \left[ \frac{m^3}{m^2 * h} \right] \quad (\text{Formel 5})$$

In Europa werden die Messungen der Luftdichtheit von Gebäudehüllen nach [DIN EN 13829] vorgenommen. Darin sind umfangreiche Informationen zum Thema Differenzdruckmessung enthalten.

### 2.1.3 Besondere Anforderung „Innendämmung“

Oftmals ist eine Verbesserung des Wärmeschutzes bei Sanierung historischer Gebäude nur mit Hilfe einer innen liegenden Dämmung möglich. So zum Beispiel bei erhaltenswerten Fassaden aber auch in dicht bebauten Innenstädten. Die Innendämmung bringt gegenüber der Außendämmung jedoch zusätzliche bauphysikalische Anforderungen mit sich.

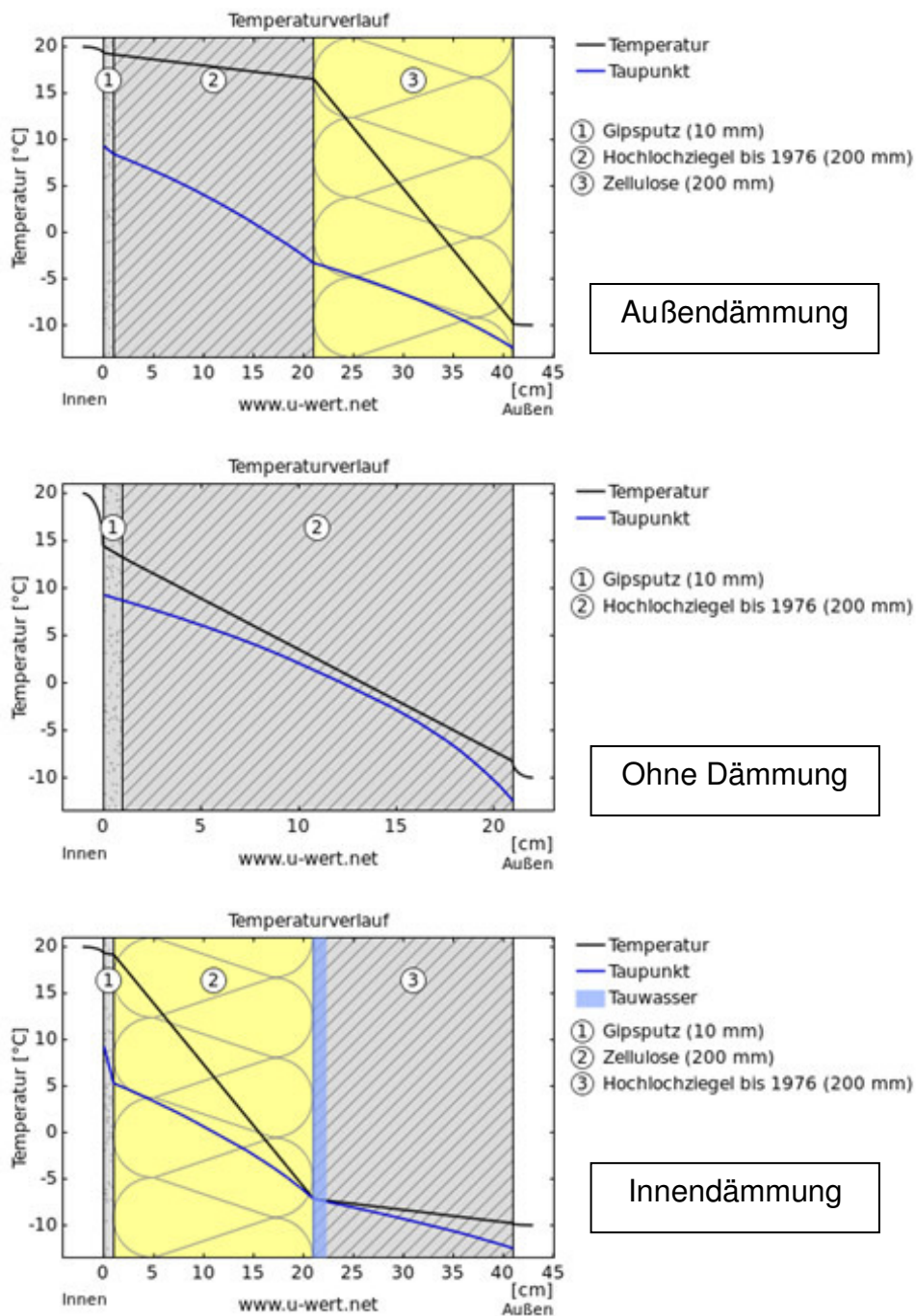


Abbildung 6: Verlauf von Temperatur- und Taupunkt bei Mauerwerkswänden mit Außendämmung (oben), ohne Dämmung (Mitte) sowie mit Innendämmung (unten). Die Berechnungen und Darstellungen erfolgten mit dem Online-Tool auf der Homepage [www.u-wert.net](http://www.u-wert.net).

Eine an der Innenseite der Außenmauer angebrachte Dämmschicht hat eine Veränderung des bauphysikalischen Verhaltens der Außenmauer zur Folge: Die Temperatur der Mauer in den kühlen Wintermonaten wird deutlich herabgesetzt, da der überwiegende Teil des Temperaturabfalls in der innenliegenden Wärmedämmung erfolgt. Die Wärmedämmwirkung des Mauerwerks und damit der dort auftretende Temperaturabfall ist dagegen minimal. Damit steigt die Gefahr von Tauwasserbildung in der Wand an, da der Taupunkt sich nun in der Außenwandkonstruktion befindet (Abbildung 6).

Eine raumseitig neu eingebrachte Dampfbremse soll den Feuchteeintrag durch Dampfdiffusion aus dem Innenraum in die Wandkonstruktion verringern. Diese behindert aber auch das Austrocknen von Feuchtigkeiten aus der Wand zum Innenraum. Es ist daher besonders wichtig, beim Einsatz von Innendämmung auf die sorgfältige Ausführung der luftdichten Ebene zu achten, um den Feuchteeintrag über Leckagen aus dem Innenraum in die Wandkonstruktion zu minimieren.

### 3 Balken in Altbauten

Im Dachbereich und in den Geschossdecken sind in zahlreichen Altbauten viele Holzbalken zu finden. Diese werden bei der Ausführung einer Innendämmung regelmäßig zu Durchdringungen der Dämmschicht und der luftdichten Ebene. Damit ergeben sich in der Praxis an diesen Punkten besondere Herausforderungen für die Ausbildung der Luftdichtheit. Oftmals handelt es sich um eine große Zahl von Durchdringungen, welche zusätzlich auch noch schwer zugänglich sind. Dies erschwert ein korrektes Andichten der luftdichten Ebene an die Balkenköpfe. Aufgrund der Thermik im Gebäude ist die Gefahr von Leckageströmungen im Dachbereich besonders groß. In Bereichen der fehlenden oder fehlerhaften Andichtung an Holzbalken oder Holzbalkenköpfen kann es zur Kondensation von Luftfeuchtigkeit kommen. Je nach Ausprägung der Randbedingungen kommt es dann ggf. zu Feuchteschäden: Das Holz als organischer Stoff kann anfangen zu schimmeln und verliert im ungünstigsten Fall seine Festigkeit.

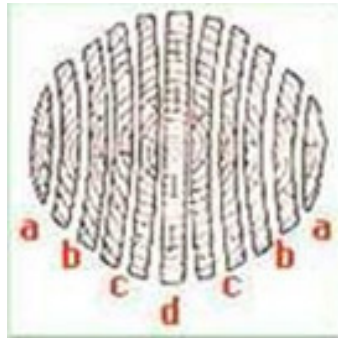


**Abbildung 7:** Zum Teil freigelegte Holzbalkendecken mit Wandaufleger der Holzbalken in zwei Sanierungsprojekten (Fotos: PHI)

#### 3.1.1 Rissbildung und Rissarten

Risse im Holz entstehen, wenn Spannkkräfte die Festigkeit des Holzes übersteigen. Sieht man von mechanischen Einflüssen ab, ist vor allem feuchtigkeitsbedingtes Schwinden und Quellen die Ursache für auf das Holz einwirkende Spannkkräfte. Holz nimmt in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit Wasser auf oder gibt es ab. Dieser Effekt wird als Hygroskopie bezeichnet. Das Aufnehmen und Abgeben von Feuchtigkeit geschieht bis zur Gleichgewichtsfeuchte, welche bei einem Normwohnklima (20°C, 50% relative Luftfeuchte) zu ca. 10 Massen-% (bezogen auf Darrgewicht) Holzfeuchte führt. Formveränderungen finden unterhalb der Fasersättigungsgrenze statt. Diese ist artspezifisch und liegt im Mittel bei 30 Massen-% Holzfeuchte. Die eigentliche Rissbildung ist nun ein Ergebnis der sogenannten „Anisotropie“ (Richtungsabhängigkeit) des Holzes: Quell- und Schwindverhalten verhalten sich in

longitudinaler, radialer und tangentialer Richtung wie 1:10:20 (ungefähre Angabe). Abbildung 8 verdeutlicht die Anisotropie des Holzes bildhaft.



**Abbildung 8: Anisotropes Schwinden und Quellen von Holz (Quelle: [Hol])**

Am häufigsten finden sich im Gebäudebestand sogenannte Trockenrisse an Holzbalken. Diese sind Folge der Holzbewegungen unterhalb der bereits erwähnten Fasersättigungsgrenze. In Abbildung 9 ist der typische Verlauf solcher Risse dargestellt. Dieser ist immer in radialer Richtung ausgedehnt und weiterhin abhängig von der Einschnittart des Balkens. Bei der Verwendung von Vollbalken ist das Rissrisiko demnach größer als bei Viertelbalken.



**Abbildung 9: Verlauf von Trockenrissen bei unterschiedlichen Einschnittarten (links.: Vollbalken; Mitte: Halbbalken; rechts: Viertelbalken) (Quelle: [GDHeV])**

### 3.1.2 Bauschäden durch Feuchte

Zwei Drittel der Holzschäden im Bau entstehen durch Pilze; das verbleibende Drittel wird durch Insekten verursacht [Müller 2011]. Das Holz wird durch den Pilz abgebaut. Dies geschieht teilweise in Kombination mit einem Insektenbefall. Feuchtigkeit spielt bei diesen Schadensfällen fast immer eine entscheidende Rolle. Pilzbefall ist nur dann möglich, wenn in den Zellen freies Wasser vorhanden ist. Die Fasersättigungsgrenze muss über einen längeren Zeitraum (> 6 Monate) überschritten werden. Ist dies nicht der Fall stellt der Pilz sein Wachstum im Regelfall wieder ein. Dies schließt bei erneuter Befeuchtung ein erneutes Aufleben nicht aus. In der Regel lassen sich Pilze durch die üblichen Temperaturschwankungen am Bau (- 20 °C bis + 40 °C) nicht abtöten [Müller 2011]. Deshalb ist bei Sanierungsmaßnahmen mit Innendämmung eine sorgfältige Begutachtung der Holzbalken von großer Bedeutung.



## 4 Versuchsablauf

### 4.1 Versuchsaufbau und Messgeräte

Aufgrund der besonderen Herausforderung bei der luftdichten Holzbalkenandichtung in der Altbausanierung sollen erfolgversprechende Methoden identifiziert werden. Dazu wurden in einem an die [DIN EN 12114] angelehnten Versuch mehrere Methoden und Produkte zur luftdichten Einbindung von Holzbalken untersucht. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Prüfbox aus Holzwerkstoffplatten, zwei Membranvakuumumpumpen sowie Messgeräten zur Volumenstrom-, Temperatur-, Luftdruck-, Differenzdruck- und Feuchtemessung.

Als Versuchsstand dient eine Prüfbox aus Holzwerkstoffplatten (OSB), welche zur Erhöhung der Luftdichtheit mit speziellem Klebeband flächig überklebt wurden (Abbildung 10 / „A“). An der Vorderseite der Prüfbox befindet sich eine Blende, welche von einem Holzbalken mit einem künstlich erzeugten Riss durchstoßen wird. Die Blende mit dem Balken kann getauscht werden (Verschraubungen); zwischen Prüfbox und Blende befindet sich eine Dichtung.

In der Prüfbox werden mit Hilfe von zwei Pumpen (Abbildung 10 / „C“) unterschiedliche Druckdifferenzen erzeugt und der sich dazu einstellende Leckagevolumenstrom gemessen. Dies erfolgt mit einem der beiden Schwebekörper-Durchflussmessgeräte (Abbildung 10 / „B“). Die Größe des gemessenen Luftvolumenstroms, der zwischen Blende und Holzbalkendurchdringung aus dem Versuchsstand entweicht, dient als Maß für die Qualität der untersuchten Methode zur Balkenandichtung.

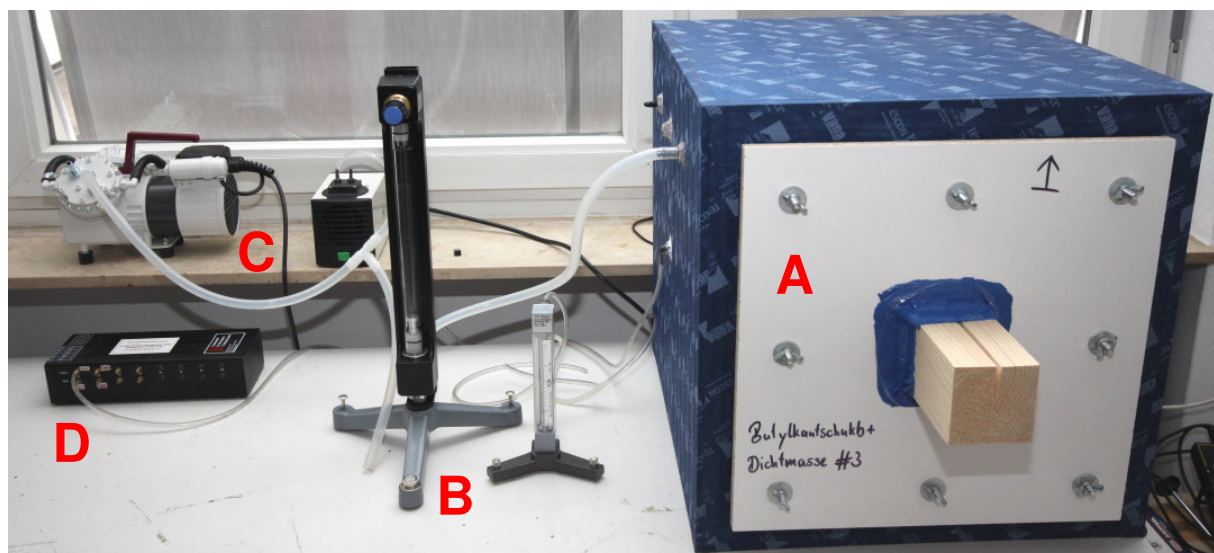


Abbildung 10: Versuchsaufbau zur Luftdichtheitsmessung der Balkenköpfe am Passivhaus Institut (A: Prüfbox mit Blende und einem beispielhaft eingedichtetem Testbalken ; B: Schwebekörper-Durchflussmesser; C: Membranvakuumumpumpen; D: Differenzdruckmessung)

Die sich durch die Luftförderung ergebenden Druckdifferenzen zwischen Prüfbox und Umgebung werden mittels einer Druckmessdose aufgenommen (Abbildung 10 / „D“) und durch einen Computer aufgezeichnet. Aus den so erzeugten Kennlinien ( $\dot{V}_{Leckage} = f(p_{Differenz})$ ) lässt sich mittels Tabellenkalkulationsprogrammen die Kurvenfunktion berechnen. Mit dieser kann der Wert für den Leckagevolumenstrom bei z.B. 50 Pa Druckdifferenz berechnet werden (siehe dazu auch Anhang 7.1). Bei den im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Messungen wurde immer auf die Druckdifferenz von 50 Pa normiert.

Die Undichtheit des Versuchstandes ohne Balkendurchdringung muss bei den Messungen unbedingt berücksichtigt werden. Um die Dichtheit des Versuchstandes (Restleckage der Prüfbox ohne eingebauten Balken) feststellen zu können, wird eine Blende ohne Balkendurchdringung auf der Box verschraubt. Durch diese sog. „Nulldruckmessung“ kann die Restleckage der Box und der Abdichtung zur Blende messtechnisch bestimmt und bei den Messungen zum Abzug gebracht werden. Nach einigen Untersuchungen wurde festgelegt, dass es zweckmäßig ist, die Nulldruckmessungen mindestens einmal je Messtag durchzuführen. Die so ermittelten Volumenströme werden mit den Messungen des Tages verrechnet.

Der am PHI realisierte Versuchsaufbau ist nahezu identisch mit dem in der Norm [DIN EN 12114] dargestellten Schema.

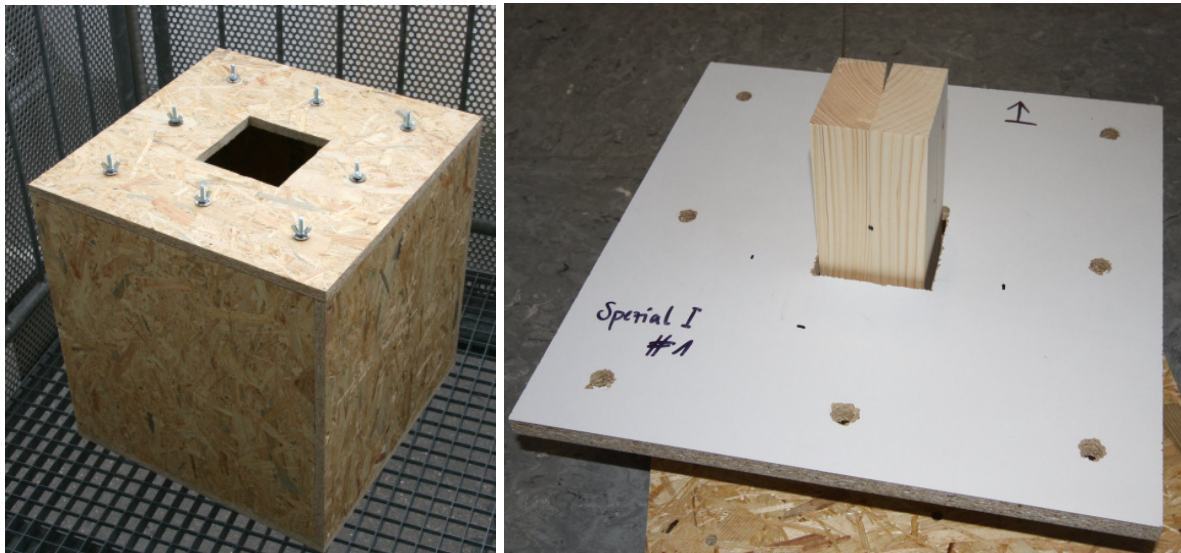
#### 4.1.1 Details zu Versuchsaufbau und Messtechnik

In diesem Abschnitt werden die Bauteile des Versuchsaufbaus sowie die verwendeten Messgeräte im Detail erläutert.

##### Prüfbox (Versuchsstand)

Als Prüfbox wurde ein aus 18 mm starken Holzwerkstoffplatten (OSB) bestehende würfelförmiger Kasten mit einer Kantenlänge von ca. 50 cm angefertigt. Nach einigen Testmessungen wurde der Kasten von außen komplett mit Luftdichtheitsklebeband überklebt um die Luftdichtheit noch weiter zu erhöhen. OSB-Platten gelten als, für die Ausführung einer luftdichten Ebene geeignetes Bauteil. Untersuchungen (z.B. [Langmans 2010]) zeigen allerdings, dass diese Aussage nicht generell für alle Platten zutrifft. Um darüber weitere Informationen zu erhalten wurde im Anschluss an die Untersuchungen der Balkenköpfe auch Messungen an unterschiedlichen OSB-Platten durchgeführt (siehe Abschnitt 6).

Auf einer Seite der Prüfbox befindet sich eine Öffnung mit der Anschlussmöglichkeit einer Blende (Verschraubungen). Die verwendeten Blenden bestehen aus beschichteten Spanplatten, welche von dem anzudichtenden Holzbalken durchstoßen werden (Abbildung 11). So ist der Wechsel der untersuchten Andichtungsmethode durch das Wechseln der Blenden in kurzer Zeit ohne größere Umbaumaßnahmen möglich.



**Abbildung 11: Prüfbox mit Öffnung und Verschraubungen für die Blendenbefestigung noch ohne weitere Abklebung und ohne Dichtung zur Blende (links). Blende mit Balkendurchdringung und hier noch unverklebten Testbalken mit Löchern für die Verschraubung (rechts).**

Der luftdichte Anschluss zwischen der Prüfbox und einer Blende mit der Balkendurchdringung wird mit einem, auf der Box verklebten ca. 4 cm breitem Ring aus geschlossenzelligem Schaumstoff auf EPDM-Basis hergestellt. Dieser Schaumstoff verfügt über ausreichend Rückstellkraft, so dass sich das Material bei der Verschraubung an jede Blende gleichermaßen luftdicht anpresst. Weiterhin sind drei Schlauchtüllen für die Anschlüsse der Schläuche auf der einen Seite des Kastens eingeklebt. Über diese erfolgen die Differenzdruckmessung und der Anschluss an die Membranvakuumpumpen.

### Membranvakuumpumpen

Zur Erzeugung des für die Messung benötigten Differenzdruckes zwischen dem Probekörper und der Umgebung werden zwei unterschiedliche Membranvakuumpumpen vom Hersteller KNF Neuberger verwendet (Volumenströme bis 4 l/min: Modell N 86 KT.18; Volumenströme von 4 bis 39 l/min: Modell N026.1.2 AN.18).

Die Pumpen sind jeweils über einen Schlauch an die Volumenstrommessgeräte angeschlossen. Da die Geräte über keine Regelung verfügen muss der Volumenstrom über ein T-Stück-Schlauchverbinder und eine Schlauchklemme geregelt werden. Für eine Änderung des Luftvolumenstroms, der in den Kasten oder aus diesem heraus strömt, muss mit der Schlauchklemme der Strömungswiderstand in eine der beiden vom T-Stück vorgegebenen Richtungen erhöht werden.

Es stellte sich heraus, dass aufgrund der nicht kontinuierlichen Volumenförderung der Pumpen ein Druckausgleichsbehälter notwendig ist. Dazu wurde ein Stahlbehälter



mit ca. 3 Liter Inhalt in die Schlauchverbindung zwischen Pumpe und Volumenstrommessgerät integriert.

### **Volumenstrommessgerät**

Zur Messung des Volumenstroms werden zwei Schwebekörper-Volumenstrommessgeräte eingesetzt. Diese bestehen aus einem konischen Glasrohr, in dem sich ein vertikal beweglicher Schwebekörper befindet. Die Luft strömt von unten nach oben durch das Prüfrohr und hebt den Schwebekörper gegen die Schwerkraft an. An einer am Glaskonus angebrachten Messskala lässt sich der Volumenstrom optisch ablesen.

Das kleinere der beiden verwendeten Schwebekörper-Volumenstrommessgeräte stammt von dem Hersteller Yokogawa (Modell: RGC1) und ist unter Normbedingungen (20 °C, 1013 hPa) auf einen maximalen Volumenstrom von 4 l/min ausgelegt. Das größere der verwendeten Volumenstrommessgeräte stammt von der Firma Mecon (Modell: Minix MA 302) und ist auf einen Luftvolumenstrom von 4 bis 40 l/min unter Normbedingungen ausgelegt.

Vom Ausgang des Durchflussmessgerätes führt eine weitere Schlauchverbindung direkt zur Prüfbox. In der [DIN EN 12114] wird gefordert, dass „die Messung des Luftvolumenstroms mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 5\%$ “ erfolgen soll. Der Hersteller, die Fa. Mecon, gibt die Messgenauigkeit des „Minix MA 302“ mit der Klasse 2,5 (gem. [VDI/VDE 3513 Blatt 2]) an. Dies bedeutet, dass ab einem Durchfluss von 20 % bezogen auf den maximalen Durchfluss ein Gesamtfehler von 5 % (bezogen auf Messwert) besteht. Bei größeren Durchflussmengen sinkt dieser Fehler weiter ab bis er bei maximalem Durchfluss bei 2,5 % liegt. Bei Leckagevolumenströmen größer 8 l/min liegt die Messgenauigkeit damit im von der Norm geforderten Bereich.

Die Fa. Yokogawa gibt die Messgenauigkeit des zweiten verwendeten Durchflussmessgerätes „RGC1“ mit Klasse 4 an. Nach [VDI/VDE 3513 Blatt 2] ergibt sich daraus für dieses Messgerät ab einem Volumenstrom größer 2 l/min ein Messfehler von 5 % und weniger; womit die Norm eingehalten wird. Durch die Verwendung zweier Volumenstrommessgeräte ist gewährleistet, dass auch Volumenströme kleiner 4 l/min mit einer hohen Genauigkeit gemessen werden können.

### **Druckmessdosen**

Als Druckmessdose wurde das Geräte APT (Automated Performance Testing System) vom Hersteller TEC (The Energy Conservatory; Minneapolis/USA) eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein 4 Kanal-Druckmessgerät, welches in Verbindung mit der Software TECTITE Express für die Durchführung automatischer Differenzdruckmessungen insbesondere bei Blower-Door-Messungen verwendet wird. Der Druck wird mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 1\%$  gemessen. Damit wird auch hier die Anforderung der [DIN EN 12114], in der für die Druckmessung eine Messgenauigkeit

von  $\pm 5\%$  gefordert wird, deutlich erfüllt. Die an den Prüfkörper angelegte Druckdifferenz lässt sich in Echtzeit mit der Software TECLOG am Computer verfolgen und aufzeichnen (siehe 7.1 Anhang A). Zu jedem bei dem Versuch eingestellten Volumenstrom wird auf diesem Weg der Differenzdruck zwischen Raumluft und Prüfbox gemessen. Es ergeben sich dann Messwertepaare aus Volumenstrom und der zugehörigen Druckdifferenz.

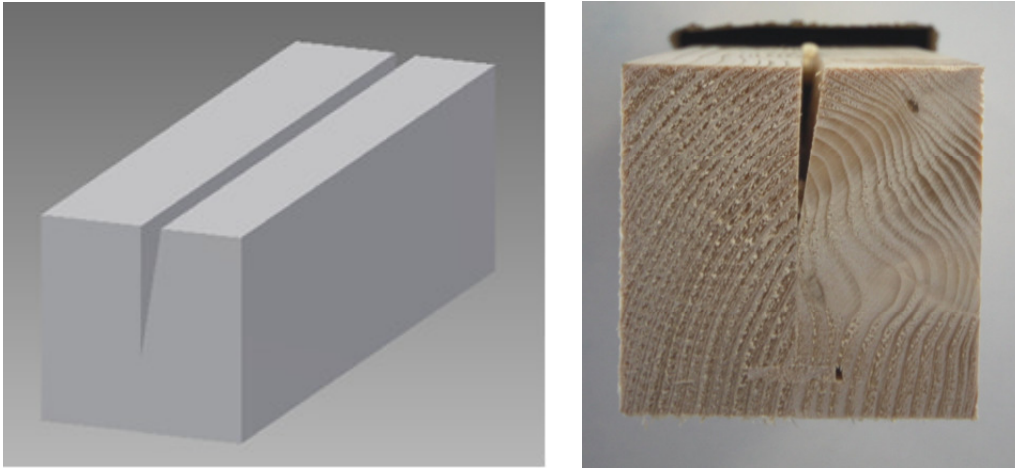
## 4.2 Versuchsdurchablauf

### 4.2.1 Musterbalken

Ziel der Untersuchungen ist es unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten zur Andichtung von Holzbalken miteinander vergleichen zu können. Da alte Holzbalken aus Sanierungsprojekten sehr unterschiedliche Holzarten, Größen und Rissarten aufweisen, können diese nicht für einen Vergleich der unterschiedlichen Methoden herangezogen werden. Aus diesem Grund wurde mit unterschiedlichen Testbalken geprüft, welche Größe und welche Rissbilder sich für die vergleichenden Versuche eignen. Für die Auswahl wurden diese Testbalken von einer Tischlerei angefertigt und im PHI geprüft, um dann einen „Musterbalken“-Typ festzulegen.

Für die vergleichenden Messungen wurde ein Musterbalken mit den Abmessungen 80 mm x 80 mm x 250 mm festgelegt. Alle diese Musterbalken verfügen als Leckage über einen identischen Riss. Dieser soll einen typischen Holzriss simulieren, wie er an alten Holzbalken zu finden ist. Daher besteht dieser nicht aus einem einfachen Sägeschnitt, sondern weist eine Keilform auf. Wie in Abbildung 12 zu sehen, läuft die „Rissbreite“ am Grund auf Null aus. Damit soll – wie in der [DIN EN 12114] gefordert – versucht werden, eine repräsentative Leckage für die in der Praxis auftretenden Risse abzubilden. Herstellungsbedingt wurden die Musterbalken daher aus zwei Teilen zusammengeleimt. Geringe Abweichungen sind aufgrund des Materials sowie der handwerklichen Herstellung nicht vollständig zu vermeiden. Die Komplexität aufwendigerer Geometrien würde bereits bei der Herstellung zu einer produktionsbedingten Streuung führen, unter der die Genauigkeit der Messungen leiden würde.

Die Entscheidung für Musterbalken mit einer einzigen Leckage hat ihre Begründung in der Eliminierung möglichst vieler Einfluss- und damit Unsicherheitsfaktoren auf die vergleichenden Messungen. Außerdem konnte damit der Aufwand für Herstellung, Messung und Auswertung in einem handhabbaren Kosten- und Zeitrahmen gehalten werden.



**Abbildung 12: 3D-Modell und frontales Foto vom Musterbalken (Länge: 250 mm, Kantenlänge: 80 x 80 mm, Rissfläche: 0,9 cm<sup>2</sup>)**

In der Praxis weisen Balken im Regelfall eine Vielzahl unterschiedlichster Rissgrößen und -geometrien auf. Um die Übertragung der Messergebnisse auf komplexere Geometrien und auf Altbaubalken herzustellen, wurden im Anschluss Messreihen mit einem großen Musterbalken mit unterschiedlichen Rissgrößen sowie mit Abschnitten von einem Altbaubalken durchgeführt. Der handwerklich hergestellte große Musterbalken hat eine Kantenlänge von ca. 160 mm x 150 mm und eine Leckagefläche von ca. 11,5 cm<sup>2</sup>; der Altbalken von ca. 120 mm x 160 mm mit unterschiedlichen Leckageflächen (je nach Abschnitt). In Abbildung 13 sind bei beiden Balken die auf Null zulaufenden Risse zu erkennen.



**Abbildung 13: Schnittfläche eines großen Musterbalkens (ca. 16 mm x 15 mm) sowie eines Altbalkens (ca. 120 mm x 145 mm)**

#### 4.2.2 Versuchsdurchführung

Als Vorbereitung der Messungen der unterschiedlichen Methoden zur Balkenandichtung wird an jeder Blende mittels eines Winkels ein Musterbalken in der Blende fixiert. Dabei wird der Balken so fixiert, dass er umlaufend zur Blende einen gleichmäßigen Ringspalt erhält. Danach werden die Balken mit dem jeweiligen Abdich-

tungsverfahren an die Blende andgedichtet. Von jeder Methode werden drei gleiche Proben angefertigt um eine gewisse Sicherheit gegenüber handwerklichen Einflüssen zu haben. Die so hergestellten Proben werden nacheinander luftdicht mit dem Versuchstand verschraubt und vermessen. Der komplette Andichtungsvorgang wird mit Fotos dokumentiert.

Der Undichtheit der untersuchten Probe entsprechend, wird mit der größeren oder der kleineren Membranvakuumpumpe eine Serie von ansteigenden Volumenströmen in den Versuchsstand hinein gefördert. Der sich für den jeweiligen Volumenstrom einstellende Überdruck wird zusammen mit den zum Versuchszeitpunkt herrschenden Versuchsbedingungen (Temperatur, relative Feuchtigkeit und barometrischer Druck) dokumentiert und in das Tabellenkalkulationsprogramm zur Erstellung der Kennlinien übertragen. Analog zu dem beschriebenen Vorgehen bei Überdruck wird bei der Unterdruckmessung verfahren. Es ergeben sich Messwertpaare aus Differenzdruck und Volumenstrom für den Über- und den Unterdruckfall. Im direkten Anschluss werden die beiden anderen Proben der gleichen Abdichtungsmethode analog vermessen.

Wie beschrieben wird die Luftdurchlässigkeit des Versuchsstandes selbst, als sog. „Nullmessung“ mindestens an jedem Messtag festgestellt. Dieser Offset-Wert wird vom Messwert abgezogen um die Verklebung ohne Einfluss der Prüfbox beurteilen zu können.

#### 4.2.3 Vorgehen Auswertung

Die Auswertung der Messwerte wird mit MS Excel durchgeführt. Nach Einfügen der Messwertpaare in das Auswertungstool erfolgt eine Umrechnung des Volumenstroms auf die Referenzbedingungen unter denen die Schwebekörper-Durchflussmesser kalibriert wurden. Weiterhin sind für eine korrekte Beurteilung der Messergebnisse die Bildung des Mittelwertes und die Angabe des größten und kleinsten Messwertes der drei Proben einer Methode sinnvoll. Die Berechnung der Standardabweichung ist bei nur drei Proben nicht zielführend.

#### Volumenstromkorrektur

Die für die Umrechnung des gemessenen Volumenstroms auf die Referenzbedingungen (20 °C, 1013 hPa und 50 % relative Luftfeuchtigkeit) erforderliche Gleichung findet sich in der [DIN EN 12114]:

$$\dot{V}_0 = \dot{V} * \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad \text{(Formel 6)}$$

Dabei ist:

- $\dot{V}_0$  der korrigierte Luftvolumenstrom unter Referenzbedingungen;  
 $\dot{V}$  der gemessene Luftvolumenstrom unter Laborbedingungen;  
 $\rho_0$  die Dichte von Luft unter Referenzbedingungen ( $\rho_0 = 1,198 \text{ kg/m}^3$ );  
 $\rho$  die Dichte von Luft unter Laborbedingungen, berechnet nach Formel 9

$$\rho = \frac{p_a - 0,378802 * p_w}{287,055 * T} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{Formel 7})$$

Dabei ist:

- $p_a$  der Luftdruck in Pa;  
 $T$  die thermodynamische Temperatur in K;  
 $p_w$  der Wasserdampfdruck in Pa, berechnet nach Formel 10

$$p_w = 610,5 * \phi \exp\left(\frac{21,875 * (T - 273,15)}{T - 7,65}\right) \quad [\text{Pa}] \quad (\text{Formel 8})$$

Dabei ist:

- $\phi$  die relative Luftfeuchte

Die sehr konstanten Bedingungen im Labor führen nur zu marginalen Korrekturfaktoren beim gemessenen Volumenstrom. Diese lagen bei den durchgeführten Messungen zwischen -1,002 und +1,005.

Aus den Messwertpaaren (Leckagevolumenstrom und Differenzdruck) ergeben sich Kennlinien für die Über- und die Unterdruckbedingungen. Diese werden in einer doppeltlogarithmischen Grafik angezeigt (siehe 7.2: Anhang B). Mit der Trendlinienfunktion von MS Excel lässt sich jeweils die Strömungsgleichung mit den Koeffizienten C und n darstellen. Durch entsprechendes Einsetzen des Druckes von 50 Pa für die Variable  $\Delta p$  erhält man den gewünschten Leckagestrom bei 50 Pa Druckdifferenz für Über- und Unterdruck. Die Mittelwertbildung aus diesen beiden Werten ergibt den gesuchten Leckagevolumenstrom. Für die abschließende Beurteilung ist die Subtraktion des Offsets des Versuchstandes noch vorzunehmen.

## 5 Untersuchung der Abdichtungslösungen

Bei der Untersuchung wird zwischen Abdichtungslösungen welche von Herstellern empfohlen wurden und weiteren Lösungen (hier „Alternativlösungen“) unterschieden.

Für die Auswahl der zu untersuchenden Produkte für die luftdichte Einbindung alter Holzbalkenköpfe wurde eine Vielzahl von Fachherstellern angeschrieben und zu Lösungsansätzen für diese Abdichtungsaufgabe befragt. Infolgedessen haben zehn der angeschriebenen Firmen aus dem In- und Ausland dem Passivhaus Institut, an dem die Versuche für diese Arbeit durchgeführt wurden, Produktmuster zur Verfügung gestellt. Damit steht eine breite Lösungspalette zur Verfügung die dennoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Aus den Mustern wurden acht unterschiedliche Methoden zur Abdichtung der Musterbalken zusammengestellt. Diese Methoden bestehen aus einer Kombination von bis zu drei Materialien aus den Produktgruppen Klebeband, Dichtmasse/Kleber, Haftgrundierung, dehnfähige Butyl-Kautschukklebebänder, Speziallösung und Putzanschlussband. Es wird bei jeder zu untersuchenden Methode stets „im System geblieben“; d.h. es werden je Methode keine Produkte unterschiedlicher Hersteller miteinander kombiniert. Somit kann eine Unverträglichkeit verwendeter Produkte zueinander ausgeschlossen werden. Im Vordergrund der Untersuchung stehen die unterschiedlichen Methoden der Abdichtung, nicht die einzelnen Produkte der Hersteller.

Insgesamt werden hier acht Messreihen der Herstellerlösungen sowie vier Messreihen der Alternativlösungen vorgestellt und ausgewertet. An der Kombination **Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse/Kleber (KHD)** wurde ein Herstellervergleich durchgeführt, weshalb diese Methode zwei Mal ausgeführt wurde.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die in Summe zwölf Methoden. Wie beschrieben wurden jeweils drei Balkenproben hergestellt und auf dem Prüfstand vermessen.

**Tabelle 2: Produktmatrix der unterschiedlichen Materialkombinationen der untersuchten Messmethoden (Methode = Produkt I + Produkt II + Produkt III)**

Methode	Produkt I	Produkt II	Produkt III
<b>Herstellerlösungen</b>			
1	Klebeband	-	-
2		Haftgrundierung	-
3 + 4			Dichtmasse/Kleber
5	Butyl-Kautschukkleber auf Spezialvlies	Haftgrundierung	-
6		Dichtmasse/Kleber	-
7	„Speziallösung“ (Reinacrylat-Dispersion mit Vliesträger)	-	-
8	Putzanschlussband	Dichtmasse/Kleber	-
<b>Alternativlösungen</b>			
9	Folienmanschette	Dichtmasse	Klebeband
10	Dichtmasse (Bohrung Injektionskanal)	Klebeband	-
11	Dickbeschichtung	-	-
12	Gipsverguss (nur horizontal anwendbar)	-	-

## 5.1 Materialbeschreibung

Im Folgenden werden die verwendeten Materialgruppen kurz beschrieben:

### Klebeband

Die für die Luftdichtheit verwendeten Klebebänder besitzen in der Regel einen Klebstoff auf Acrylatbasis. Dieser befindet sich auf einem möglichst elastischen und reißfesten Trägermaterial wie beispielsweise einem Polyestergewebe.

Die Klebebänder werden in der Praxis sowohl für die luftdichte Verbindung von Dampfbremsen als auch für das Anschließen von Durchdringungen (Elektroinstallationen, Balkenköpfe, Schornsteine etc.) verwendet.

### Haftgrundierung

Die Haftgrundierung, auch als Primer bezeichnet, besteht meist aus einer Acrylat-Copolymerdispersion auf Wasserbasis.

Der Primer wird dazu verwendet optimale Bedingungen auf dem Untergrund zu schaffen, auf dem das Klebeband haften soll. So werden Primer beispielsweise zur Vorbehandlung von Holzfaserverplatten oder ähnlichem verwendet. Die Verwendung einer Haftgrundierung erhöht stets die Qualität der Verbindung zwischen Untergrund

und Klebeband. Bei einem Produkt auf Wasserbasis ist nach dem Auftragen laut Herstellern meist eine Trocknungszeit von 15 bis 30 Minuten einzuhalten, bevor der Primer überklebt werden kann.

### **Dichtmasse/Kleber**

Dichtmassen und Anschlusskleber gibt es in einer Vielzahl unterschiedlicher Produktvarianten. Diese reichen von Spezialkautschuken, einkomponentigen Spezialpolymeren über modifizierte Acrylat-Polymerdispersionen bis zu 2-Komponenten-EPOXI-Reaktionsklebstoffen. Bei einigen Herstellern ist das Basismaterial des Klebstoffes beziehungsweise der Dichtmasse nicht ohne weiteres ersichtlich.

Die Aufgabe aller genannten Varianten ist die Herstellung einer dauerelastischen Verklebung von Luftdichtheitsbahnen. Sei es an Überlappungen oder um Anschlüsse zwischen Luftdichtheitsbahnen und Durchdringungen herzustellen. Dichtmassen und Kleber sind weiterhin in der Lage Unebenheiten des Untergrundes auszugleichen um Leckagen zu vermeiden. Die Viskosität des jeweiligen Materials ist bei der Verfüllung der künstlich erzeugten Leckage am Musterbalken und damit ebenso für das Verfüllen in der Praxis auftretender Balkenrisse von entscheidender Bedeutung.

### **Butyl-Kautschukklebeband**

Klebebänder aus Butylkautschuk zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität und Dehnbarkeit aus. Weiterhin ist die Verformbarkeit dieser Klebebänder bei Durchdringungen von Vorteil. Man kann in diesem Zusammenhang durchaus von per Hand verformbaren Manschetten sprechen. Durch die dicke Materialschicht gelingt es kleinere Unebenheiten am Untergrund auszugleichen und so kleinere Leckagen zu vermeiden. Neben dem Verkleben von Durchdringungen werden Butyl-Kautschukklebebänder auch für das luftdichte Verkleben von Fugen, Bauteilanschlüssen und Überlappungen von Luftdichtheitsbahnen verwendet.

### **„Speziallösung“**

Bei der als „Speziallösung“ bezeichneten Methode handelt es sich um eine „pastöse Funktionsbeschichtung“. Diese besteht aus einer strukturviskosen Reinacrylat-Dispersion und wird in Kombination mit einem Spezialvlies auf die anzudichtende Stelle aufgebracht. Es erfolgt zunächst ein Anstrich mit der Dispersion, dann wird das Spezialvlies aufgelegt und der Durchdringung entsprechend geformt. Dies wird dann erneut mit der Dispersion überstrichen.





**Abbildung 14: „Speziellösung“ zur Abdichtung einer Foliendurchdringung mit einer pastösen Funktionsbeschichtung auf Basis von Reinacrylat-Dispersion (Quelle: Dörken GmbH & Co. KG)**

### **Putzanschlussband**

Für den Anschluss von Türen, Fenstern oder auch Pfetten und Deckenbalken werden in der Praxis unter anderem auch sogenannte Putzanschlussbänder verwendet. Diese bestehen beispielsweise aus einem Polypropylen- oder Polyethylenvlies mit einer Spezialmembran. Eine Seite des Bandes wird an der Durchdringung ähnlich wie ein Klebeband festgeklebt. Die andere Seite wird luftdicht eingeputzt. Die untersuchten Produkte weisen mit einem sd-Wert von ca. 2,5 m leicht dampfbremsende Eigenschaften auf.

### **Dickbeschichtung**

Dickbeschichtung auf Bitumen-Basis wird normalerweise zur Mauerwerksabdichtung eingesetzt („Schwarze Wanne“). Dabei handelt es sich um industriell hergestellte Mischungen von Bitumen mit polymeren Kunststoffen (Elastomerbitumen).

## **5.2 Methodenbeschreibung und Verarbeitung**

Bei der Herstellung der jeweils drei Proben einer Abdichtungsmethode wurde das Handling bei der Verarbeitung der Abdichtung untersucht und beschrieben. Die Methoden werden hier mit Beschreibung und Fotos der Arbeitsschritte vorgestellt. Dabei werden auch Besonderheiten, welche bei der Verarbeitung aufgefallen sind, beschrieben.

Die Untersuchungen wurden zum Teil im Rahmen der Arbeit [Bangert 2012] durchgeführt. Die Messwerte mussten aufgrund eines Messgerätefehlers gegenüber auch weiteren bereits vorab veröffentlichten Ergebnissen ([PHT 2012] und [Buildair 2013])

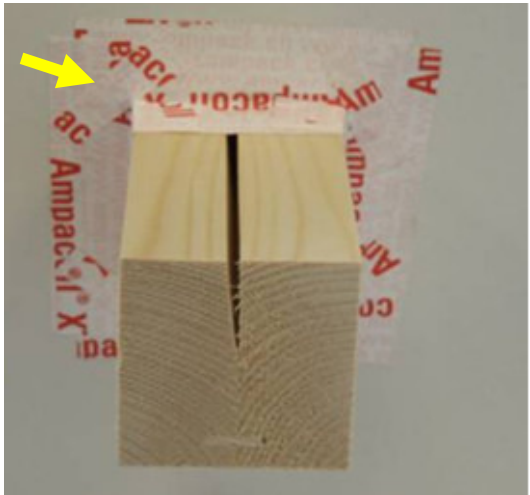
geringfügig korrigiert werden. Die Aussagen und generellen Ergebnisse werden durch diese geringe Korrektur nicht verändert.

### 5.2.1 Methode: Klebeband

Bei dieser Methode wird der Balken nur umklebt und mit der Blende verbunden; der Riss im Testbalken wird nicht weiter abgedichtet. Die Einzelschritte lassen sich anhand Tabelle 3 nachvollziehen.

**Tabelle 3: Verarbeitungsschritte bei der Erstellung der Methode „Klebeband“**

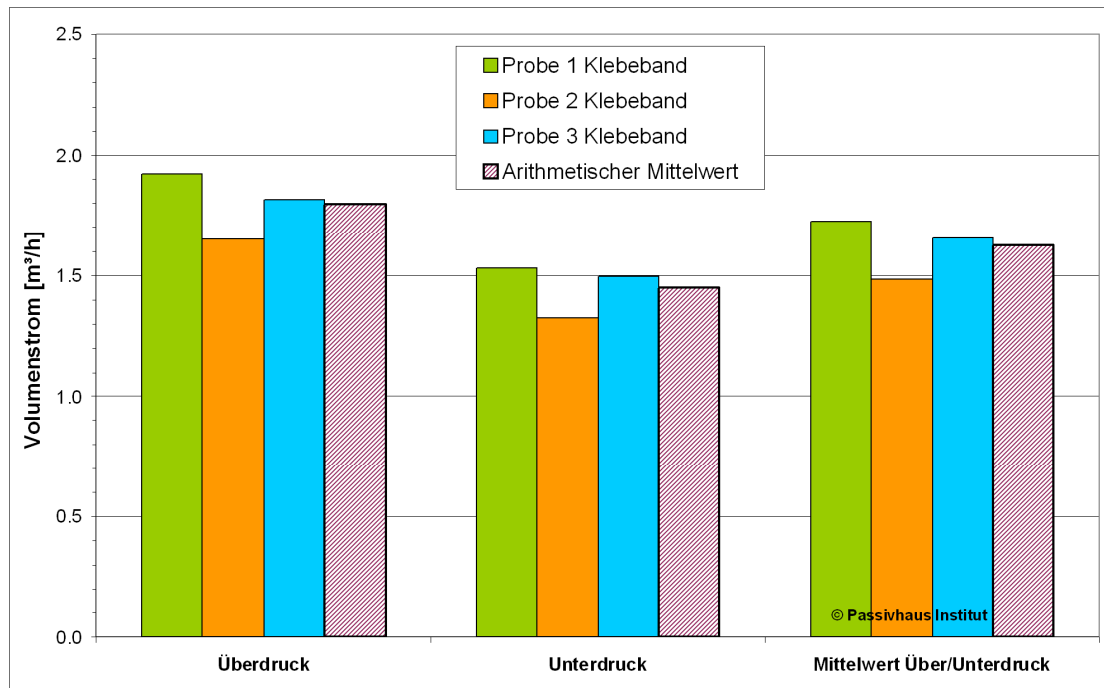
1.	<p>Ein an beiden Seiten des Balkens etwa 3 cm überstehender Klebeband-Streifen wird möglichst spannungsfrei auf den Übergang von Musterbalken zur Blende geklebt. Die Spannungsfreiheit ist nötig um Bauteilbewegungen aufnehmen zu können. Auf Balken und Blende muss ausreichend Klebebandbreite vorhanden sein (mittig). Am Rand des Balkens wird das Klebeband jeweils eingeschnitten um die Spannungsfreiheit der Verklebung zu garantieren.</p>	
2.	<p>Mit dem zweiten Streifen Klebeband wird analog zu 1. verfahren. Durch das Überlappen der beiden Klebebandstreifen verbleibt eine minimale Fehlstelle, welche mit einem zusätzlichen Streifen Klebeband abgedichtet wird.</p>	

3.	Die verbleibenden Seiten werden mit weiteren Streifen Klebeband identisch verklebt. Im Bild ist links oben (Pfeil) der kleinere schräge Streifen zu erkennen, mit dem die Ecken-Fehlstelle überklebt wurde.	
----	---	--

Gemessen werden am Prüfstand - wie beschrieben - bei jeder Probe der Unter- und der Überdruck. Aufgrund der Anordnung der Restleckage und der Art der Abdichtung unterscheiden sich die Ergebnisse dieser beiden Messungen in der Regel. Es gibt „bewegliche“ Bereiche der Verklebung, welche je nach Druckart mehr oder weniger stark abdichten. Von Luftdichtheitsprüfungen in Bestandsgebäuden ist dieses Phänomen gut bekannt. Der Vergleich mit einem Rückschlagventil bietet sich in diesem Fall durchaus an: Kann eine Leckage beispielsweise von einer Seite her gut durchströmt werden, so sorgt ein Luftstrom in entgegengesetzter Richtung für einen Verschluss der Leckage.

Aus dem jeweiligen Unter- und dem Überdruckwert wird für jede Messung der arithmetische Mittelwert gebildet. Aus den drei Mittelwerten wird dann nochmals ein gemeinsamer Mittelwert berechnet. Dieser Wert wird auch für den späteren Methodenvergleich herangezogen. Alle Ergebnisse werden immer normiert auf den Differenzdruck von 50 Pa angegeben.

Das Messergebnis der drei Überdruckmessungen der Methode „Klebeband“ liegt, nach Abzug der Restleckage der Box (Offsetwert) bei  $V_{pÜ} = 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$  bei 50 Pa. Deutlich besser liegt das „offsetbereinigt“ Ergebnis der Unterdruckmessung mit  $V_{pU} = 1,45 \text{ m}^3/\text{h}$ . Damit beträgt der geförderte Volumenstrom bei Unterdruck nur ca. 80 % desjenigen bei Überdruck. Für den arithmetischen Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung ergibt sich  **$V_p = 1,61 \text{ m}^3/\text{h}$** . In der folgenden Abbildung 15 sind die Messergebnisse für alle drei Proben der Methode Klebeband bei Unter- und Überdruck, sowie die arithmetischen Mittelwerte aufgeführt.



**Abbildung 15: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie den arithmetischen Mittelwerten**

Die Andichtungsmethode „Klebeband“ ist für die Untersuchung von besonderem Interesse, da diese den Leakagestrom für den Fall liefert, dass der Balken zwar an die Blende und damit die luftdichte Ebene angeschlossen ist, der künstlich erzeugte Riss aber auf keine Weise abgedichtet ist. Geht man von der vollständigen Luftdichtheit des Klebebandes und der Verklebung aus, erhält man mit dieser Messung also den Volumenstrom, der maximal durch den Riss entweicht. Der Messwert dient bei der vorliegenden Untersuchung als **Referenzgröße** der unterschiedlichen Abdichtungsmethoden. Die Relevanz dieser Größe ist auch von besonderem Interesse, da Balkendurchdringungen in der Praxis nicht selten auf diese Weise abgedichtet werden, vorausgesetzt die Balken werden für die Bearbeitung überhaupt vollständig freigelegt.

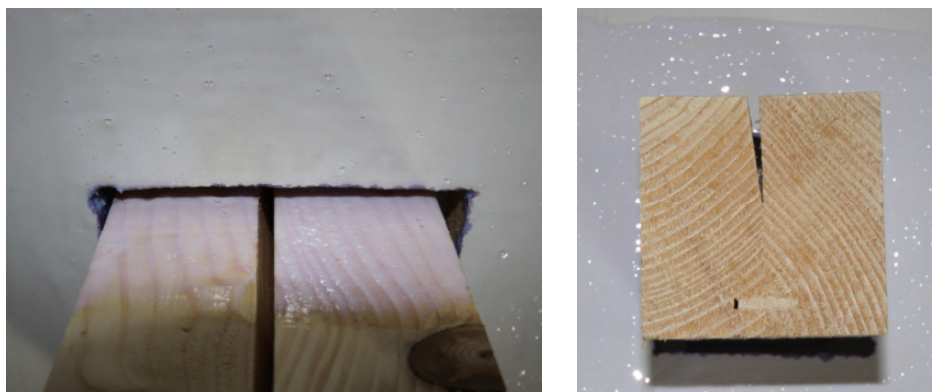
### 5.2.2 Methode: Klebeband + Haftgrundierung

Eine Haftgrundierung oder Primer dient als Haftgrund für Klebebänder auf porösem Untergrund, wie beispielsweise Mauerwerk, Putz, Beton, unbehandeltem Holz und Holzweichfaserplatten. Um die Verklebung auf dem Holzbalken noch weiter zu verbessern, wurde die Grundierung hier eingesetzt.

Die verwendete Haftgrundierung wurde am vertikal stehenden Balken mit einem Pinsel auf den Balken aufgebracht. Durch das vertikale Stehen des Balkens sind eventuelle Einflüsse durch die Position des Risses weitgehend ausgeschlossen. Zeigt der Riss beispielsweise nach oben kann die flüssige Haftgrundierung gut in diesen hineinlaufen. Ist der Riss jedoch auf der Unterseite tropft die Haftgrundierung

sofort heraus. Die Haftgrundierung ist von milchiger Konsistenz und fließt deshalb recht zügig am Balken herab. Die vom Hersteller angegebene Abtrocknungszeit ist stark vom Untergrund abhängig. Ist die Saugfähigkeit gering, verlängert sich die Zeit für das Abtrocknen der Haftgrundierung.

Die Verarbeitung des Klebebandes ist identisch zum vorangegangenen Versuch „Methode Klebeband“. Zu Vergleichszwecken wurde das gleiche Produkt verwendet. So kann eine Beurteilung des Einflusses der Haftgrundierung versucht werden.



**Abbildung 16: Balken mit Haftgrundierung vor dem Anbringen der Klebebänder**

Die bei den Messungen festgestellten Unterschiede bei der Über- und der Unterdruckmessung sind für die Praxis nicht relevant, je nach Art der Bedingungen können sich wieder ganz andere Unterschiede einstellen. Die Messergebnisse der Einzelmessungen aller untersuchten Methoden sind im Anhang dargestellt (Abschnitt 7.3).

Erwartungsgemäß liegt das Messergebnis mit  $V_p = 1,50 \text{ m}^3/\text{h}$  in der gleichen Größenordnung wie bei der Messung ohne Haftgrundierung. Wie im vorangegangenen Versuch lässt sich feststellen, dass bei Unterdruck weniger Volumenstrom aus dem Versuchsstand heraus gefördert wurde. Die dritte Probe zeigt im Vergleich zu den ersten beiden Proben einen etwas reduzierten Volumenstrom, was der handwerklichen Herstellung der Andichtung zugeschrieben wird.

Es kann festgestellt werden, dass der Einfluss der Haftgrundierung auf die Qualität der Andichtung des Balkens gering ist. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da – wie oben beschrieben – die Grundierung keinen nennenswerten Einfluss auf die Rissabdichtung hat. Die Methoden können somit als nahezu gleichwertig betrachtet werden. Damit wird keine generelle Aussage über die Notwendigkeit oder den Nutzen von Haftgrundierungen gemacht. Insbesondere bei den erwähnten Untergründen ist eine Haftgrundierung notwendig und erzeugt deutliche Vorteile in der Haltbarkeit der Verklebung. Generell sollten dazu immer die Herstellerhinweise beachtet werden.

### 5.2.3 Methode: Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse

Bei der Methode „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse“ („KHD“) wurden, wie bei der vorausgehenden Methode, Haftgrundierung und Klebeband verwendet. Der Unterschied besteht in der Abdichtung des Risses durch Dichtmasse aus einer Kartusche. Anders als bei den bisherigen Versuchen wurde damit die Leckagefläche des Risses reduziert, was einen verringerten Leckagevolumenstrom erwarten lässt.

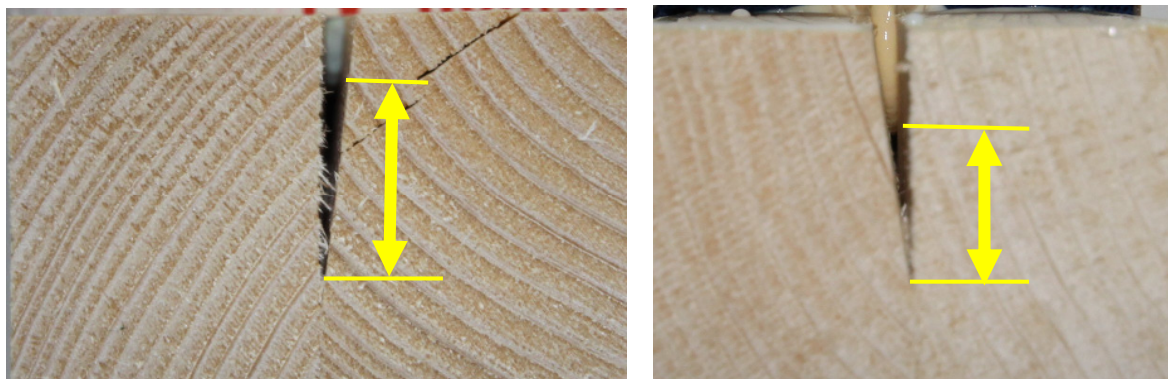
Für diese Methode „KHD“ ist ein Herstellervergleich vorgenommen worden. Im Folgenden werden die zu vergleichenden Varianten mit „KHD I“ und „KHD II“ bezeichnet. „KHD I“ und „KHD II“ wurden jeweils ausschließlich aus Produkten eines einzigen Herstellers hergestellt. Man spricht in diesem Fall auch davon „im System“ zu bleiben. Ziel ist es, dass nur aufeinander abgestimmte Produkte verwendet werden.

Vor dem Aufbringen der Haftgrundierung und des Klebebandes wurde zunächst die Dichtmasse mit einer Kartuschenpistole am horizontal stehenden Balken in den künstlichen Riss gespritzt. Es wurde stets versucht die Masse so tief in den Riss des Musterbalkens zu applizieren wie es die Größe der Spitze der Kartusche zuließ. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Dichtmasse in beiden Fällen nicht vollständig bis in die Rissspitze hineindrücken ließ. Nach optischer Prüfung war festzustellen, dass die Masse bei „KHD II“ tiefer eingedrungen war (siehe Abbildung 17). Dieser Unterschied zeigt sich dann auch an den Messergebnissen. Für das bessere Eindringen sind die niedrigere Viskosität und eine schmalere Kartuschestülle verantwortlich.

Es ist daher zu empfehlen bei engen Rissen mit einer schmaleren Kartuschenspitze zu arbeiten. Der Riss lässt sich so tiefer verfüllen, was gleichbedeutend mit einer Reduktion der verbleibenden Leckage ist.

Nach dem Verfüllen des Risses mit der Dichtmasse und der nachfolgenden Grundierung des Balkens wird das Klebeband, wie weiter oben beschrieben um den Balken herum geklebt.





**Abbildung 17: Eindringtiefe der Dichtmassen in den Spalt bei den Methoden KHD I und KHD II. Mit den Pfeilen ist der verbleibende offene Spaltbereich markiert.**

In beiden Fällen ließe sich vermutlich eine bessere Rissabdichtung erreichen, wenn ein Gegendruck zum enger werdenden Riss bestehen würde. Dieser ließe sich beispielsweise durch eine vor dem Einspritzen der Dichtmasse um den Balken gelegte Manschette realisieren. Ohne diesen Gegendruck quillt das Material beim Einspritzen einfach nach oben heraus. Damit trägt es nicht zur Rissabdichtung bei.

Nach dem Einbringen der Dichtmasse verbleibt der Balken für zwei Tage zur Aushärtung des Materials in horizontaler Position. Ein weiteres Vordringen der Masse in den Riss ließ sich nach optischer Prüfung nicht feststellen.

#### **Methode: „KHD I“**

Die Messergebnisse der drei Proben der Methode „KHD I“ liegen sehr dicht zusammen, auch die Unterdruck- und die Überdruckmessungen sind im Volumenstrom fast identisch. Der arithmetische Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung aller drei Proben liegt bei einem Volumenstrom von  $V_p = 0,92 \text{ m}^3/\text{h}$ . Damit zeigt sich bereits die erwartete Verbesserung durch das Auffüllen des Risses.

#### **Methode: „KHD II“**

Die Volumenströme bei der Methode „KHD II“ liegen noch einmal deutlich unter denen aus „KHD I“. Bei der Auswertung der drei Proben zeigt sich, dass eine Probe relativ deutlich von den beiden anderen abweicht. Nach optischer Prüfung war festzustellen, dass die Dichtmasse nicht so tief in den Riss eingedrungen ist wie bei den anderen Proben. Für das Mittel aus Über- und Unterdruck wird der Volumenstrom von  $V_p = 0,38 \text{ m}^3/\text{h}$  bestimmt. Zwischen dem Messergebnis der Überdruckmessung und der Unterdruckmessung besteht wie im vorangegangenen Fall kein nennenswerter Unterschied.

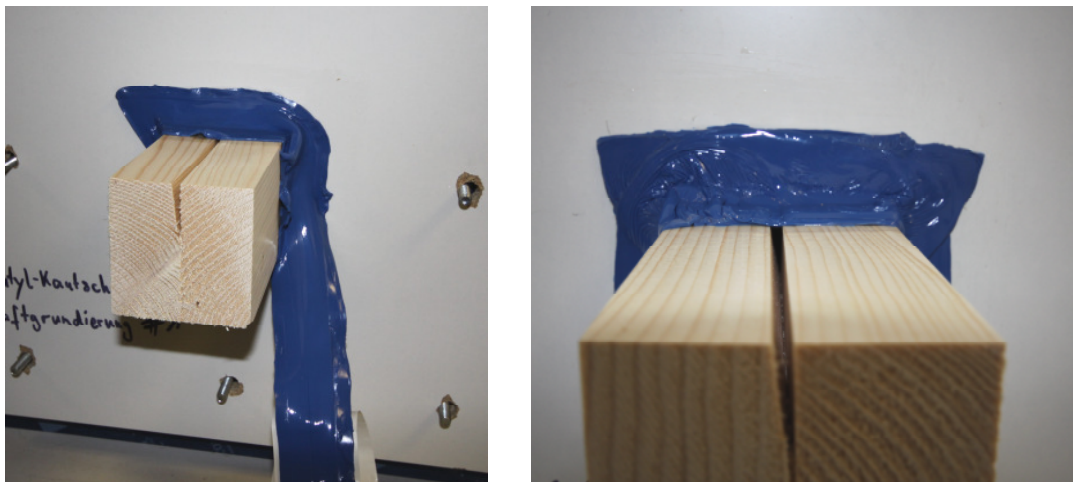
#### **Vergleich der beiden Methoden KHD**

Der Vergleich der beiden Methoden zeigt, dass durch eine schmalere Kartuschen- spitze und eine weniger viskose Dichtmasse der Riss im Musterbalken deutlich

besser und tiefer verfüllt werden kann. So ergibt sich für den Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung (über alle drei Proben) bei Methode „KHD II“ ein um 59 % geringerer Leckagevolumenstrom als der bei Variante „KHD I“.

#### 5.2.4 Methode: Butylkautschukband + Haftgrundierung

Die Haftgrundierung wurde zunächst analog zu den vorangegangenen Versuchen auf den Musterbalken aufgebracht. Nach dem Abtrocknen der Grundierung wurde der Musterbalken mit einem Butylkautschukband an die Blende angedichtet. Die hohe Klebkraft des Bandes erforderte große Sorgfalt, da ein Ablösen des einmal haftenden Bandes nur schwer möglich ist. Der Butylkautschuk verleiht dem Band weiterhin eine große Flexibilität, so dass es möglich ist, dieses in einem einzigen Stück um den Balken herum zu verlegen (Abbildung 18). So wird das Zuschneiden und Übereinanderkleben mehrerer Einzelstreifen, wie es bei der Verwendung von Klebebändern auf Acrylatbasis häufig nötig ist, überflüssig. Die Verkleinerung der Leckagefläche gelingt mit dem verwendeten Butylkautschukband jedoch kaum. Dafür lässt sich das Material nicht tief genug in den Balkenriss hineindrücken. Es ist aber festzustellen, dass kleinere Unebenheiten mit dieser Art Klebeband gut auszugleichen sind.



**Abbildung 18: Verarbeitung Butylkautschukklebeband (links: Verklebung in einem Stück; rechts: recht geringe Eindringtiefe der elastischen Klebemasse in den Spalt)**

Die Auswertung der drei Proben ergibt für den Unterdruckfall einen um 20 % reduzierten Leckagevolumenstrom gegenüber dem Überdruckfall. Die Gründe hierfür sind in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert worden. Zwischen den drei Einzelmessungen gibt es keine großen Abweichungen.

Für das arithmetische Mittel aus den Über- und Unterdruckmessungen ergibt sich ein Volumenstrom von  $V_p = 1,65 \text{ m}^3/\text{h}$ . Damit liegt ein Messwert in der Größenordnung vor, wie er bei der Abdichtungsart nur mit einem Klebeband (Referenzfall)



erreicht wurde. Da der Spalt mit dem Butylkautschukband nicht weiter abgedichtet werden konnte war das Ergebnis in dieser Größe zu erwarten.

### 5.2.5 Methode: Butylkautschukband + Dichtmasse

Bei der Methode „Butylkautschukband + Dichtmasse“ wird vor dem Verkleben mit dem Butylkautschukband der Balkenriss mit der Dichtmasse bestmöglich ausgespritzt. Dabei wird die gleiche Dichtmasse wie bei der Methode „KHD I“ und das gleiche Butylkautschukband wie bei der Methode „Butylkautschukband + Haftgrundierung“ verwendet. Die Verarbeitung ist in den entsprechenden vorherigen Abschnitten beschrieben.

An Hand der Mittelwerte wurde kein Unterschied zwischen den Unter- und den Überdruckmessungen festgestellt. Bei 50 Pa Druckunterschied ergibt sich ein Leckagevolumenstrom von  $V_p = 0,94 \text{ m}^3/\text{h}$  (arithmetischer Mittelwert aus Über- und Unterdruck der drei Einzelproben). Der erfasste Volumenstrom liegt damit auf dem Niveau der Methode „KHD I“. Dieses Ergebnis ist aufgrund der geringen Eindringtiefe der Dichtmasse zu vermuten gewesen. Bei Verwendung der geringer viskosen Dichtmasse ist ein noch deutlich besseres Ergebnis in der Höhe von Methode „KHD II“ zu erwarten.

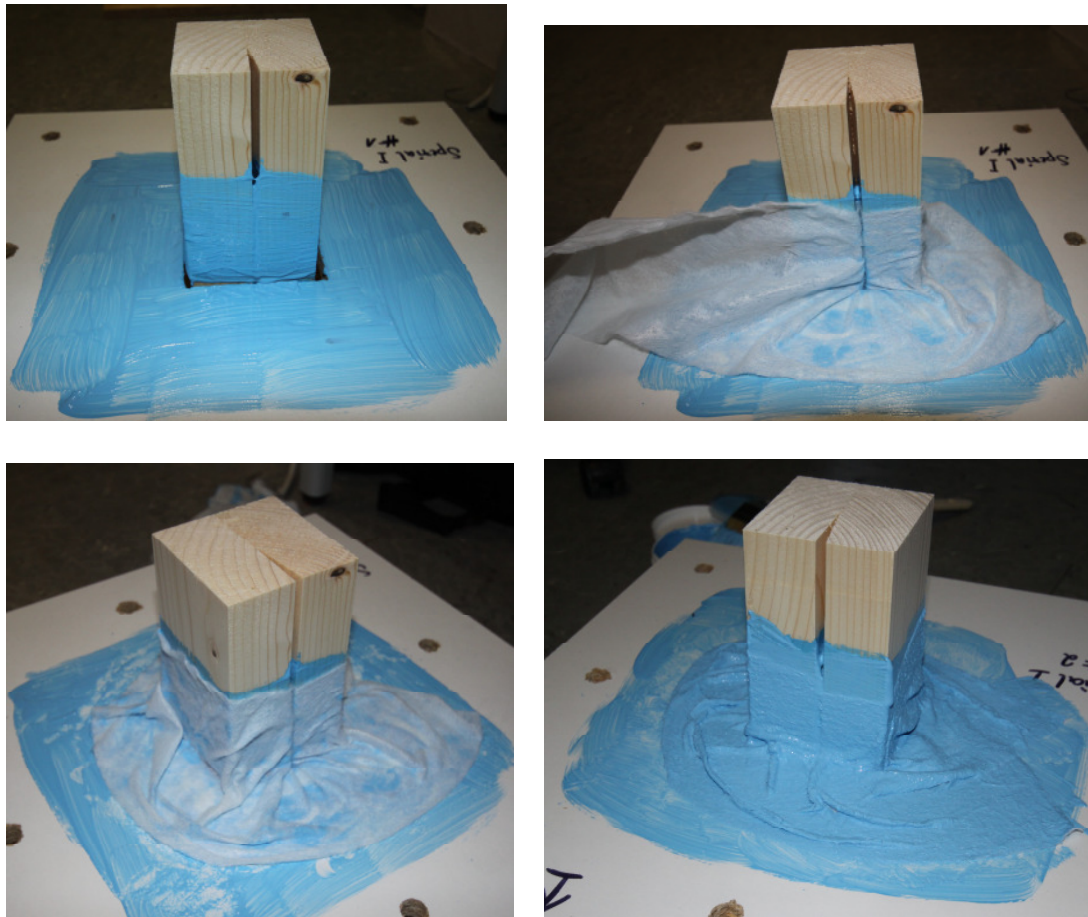


**Abbildung 19: Ausgespritzter Riss mit geringer Eindringtiefe der Dichtmasse (links) und Aufbringen des Butylkautschukklebebandes (rechts)**

### 5.2.6 Methode: „Speziallösung“

Die Verarbeitung der „Speziallösung“ (Reinacrylat-Dispersion) geschah in drei Schritten. Zunächst wurde mit einem herkömmlichen Pinsel eine erste Schicht der pastösen Masse auf Blende und Holzbalken aufgetragen. Auch der Riss im Musterbalken wurde mit der Masse komplett verfüllt. Der Musterbalken war dazu vertikal aufgestellt. Daraufhin wurde das zur Masse zugehörige Spezialvlies in einem Stück um den Balken gelegt und an die bereits aufgetragene erste Schicht der Masse angegedrückt. Für eine möglichst gute Abdichtung wurde das Vlies mit einem

schmalen Holzstab in den Spalt gedrückt. Im dritten und letzten Schritt wurde das Vlies mit einer zweiten Schicht der pastösen Masse ausgiebig durchtränkt. Dabei wurde – wie vom Hersteller vorgegeben – Schlaufen im Vlies besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Sonst könnten in diesen Bereichen Leckagen entstehen. In der folgenden Bilderserie sind die gerade beschriebenen Schritte der Verarbeitung dieser Speziallösung nachzuvollziehen.

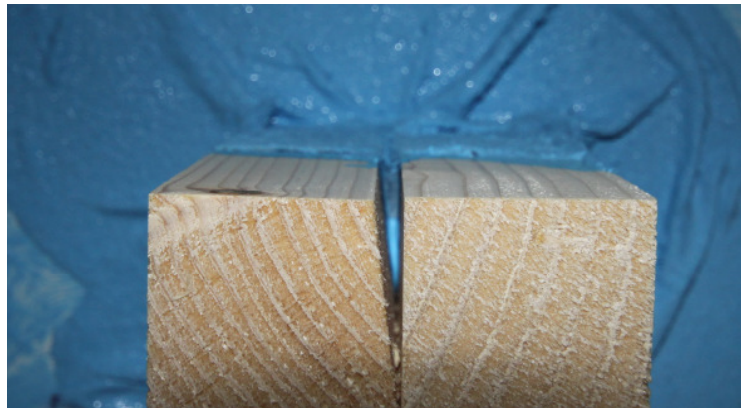


**Abbildung 20: Bilderserie Verarbeitung „Speziallösung“ (oben links: erste Schicht pastöser Masse auf Balken und Blende; oben rechts: Anpassung Vlies an Spalt und Riss; unten links: fertig angepasstes und angedrücktes Vlies, Schlaufen sind deutlich zu erkennen; unten rechts: zweite Schicht pastöser Masse / durchtränktes Vlies)**

Die relativ starke Geruchsentwicklung der Masse erfordert eine gute Durchlüftung der Räumlichkeiten, in denen mit dem Produkt gearbeitet wird. Weit positiver als der Geruch ist bei der Verarbeitung die Viskosität des Materials aufgefallen. Diese ist für den Zweck der Rissabdichtung fast ideal, da sie in der Lage ist den Riss komplett zu verfüllen (siehe Abbildung 21), dabei aber nicht an dem vertikal stehenden Balken hinunterläuft. Bei Überkopparbeiten von unten an einem Balken ist allerdings diesbezüglich auch mit gewissen Einschränkungen zu rechnen.

Weiterhin ist anzumerken, dass das oben erwähnte sorgfältige Durchtränken des Vlieses besonders bei den sich bildenden Schlaufen einen größeren Materialeinsatz

nötig macht. Es gilt außerdem den zusätzlichen Aufwand durch das Mitführen des Materialeimers (üblicherweise 5 Liter Gebinde) und des entsprechenden Vlieses zu berücksichtigen. Dadurch können sich praxisrelevante Nachteile bei der Verwendung der „Speziallösung“ auf Leitern oder anderen Arbeitsplätzen ergeben, die wenig Abstellmöglichkeiten bieten.



**Abbildung 21: Komplett mit Masse verfüllter Riss**

Das Messergebnis liegt mit  $V_p = 0,38 \text{ m}^3/\text{h}$  im niedrigen Bereich und zeigt den Erfolg der guten Rissabdichtung. Die verbleibende Undichtheit liegt auf einem Niveau mit der bis hierhin besten Methode „KHD II“. Den Messergebnissen sind keine gravierenden Unterschiede zwischen der Abdichtung bei Unterdruck und jener bei Überdruck zu entnehmen. Diese unterscheiden sich um lediglich 5 %. Auffälliger ist das deutlich schlechtere Abschneiden einer der drei Proben was wieder auf den handwerklichen Einfluss hindeutet.

Der Leckagevolumenstrom der einen Messung ( $V_p = 0,58 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ist mehr als doppelt so groß wie der Mittelwert der beiden anderen Proben; er liegt damit auffällig hoch. Zur Überprüfung wurde einige Tage nach der ersten Messung eine weitere Messung der auffälligen Probe durchgeführt. Auf diese Weise ist über die **Reproduzierbarkeit** des Messergebnisses ein Ausschluss einer fehlerhaften Messung möglich. Das Ergebnis lag erneut deutlich höher als bei den beiden anderen ursprünglichen Messungen, daher kann ein fehlerhafter Messwert ausgeschlossen werden. Die Abweichung zwischen den beiden Messungen betrug nur 5,2 %.

Als weitere Prüfung wurde eine optische Prüfung der Rissverfüllung durchgeführt. Auf diese Weise hat sich kein Unterschied zwischen den drei Proben feststellen lassen. In keinem Fall fiel bei einer hinter den Balken gehaltenen Lichtquelle Licht durch den Riss. Zur Visualisierung der vorhandenen Leckage wurde der Versuchstand mit Nebel gefüllt und mittels Pumpe ein Überdruck erzeugt. Durch Beobachtung des Nebelaustritts lassen sich so Leckagen schnell lokalisieren. Es konnte ein flächiger Nebelaustritt an dem Übergang von Balken zu Blende festgestellt werden. Die Vermutung liegt nahe, dass trotz optisch guter Ausführung die Durch-

tränkung des Vlieses an dieser Stelle weniger intensiv ist als bei den anderen Proben. Zur Bestätigung dieser Vermutung wurde der oben beschriebene Nebelaustritt auch an einer der anderen Proben untersucht. Hier konnte ebenfalls ein flächiger Rauchaustritt an dem Übergang von Balken zu Blende ausgemacht werden. Dieser fiel jedoch deutlich geringer aus als bei der auffälligen Probe.

Eine intensive Durchtränkung des Vlieses ist also entscheidend für den Erfolg der Andichtung einer Balkendurchdringung mit dieser Methode. Auch bei optisch korrekter Ausführung können hier Schwachstellen auftreten.

### 5.2.7 Methode: „Speziallösung II“

Die „Speziallösung II“ besteht aus einem Klebstoff in Rollenform mit mineralischen Füllstoffen. Das Material ist auch als Dichtmasse in einem Kartuschenbeutel erhältlich. Der luftdichte Übergang von Balken zu Blende kann mit dem Produkt allein nicht hergestellt werden. Die komplette Andichtung des Musterbalkens ist nur mit einer zusätzlich verwendeten Luftdichtheitsfolie möglich.

Bei der Anwendung der „Speziallösung II“ war zunächst eine Raupe des Materials um den anzudichtenden Balken herum aufzukleben. Wie vom Hersteller zum Ausgleich von Unebenheiten empfohlen, wurde die Raupe mit einer Schlaufe an der Stelle ausgeführt, an der sie über den Riss verläuft. Das hier zusätzlich vorhandene Material wurde über den Riss gelegt und in diesen hineingedrückt (siehe Abbildung 22).

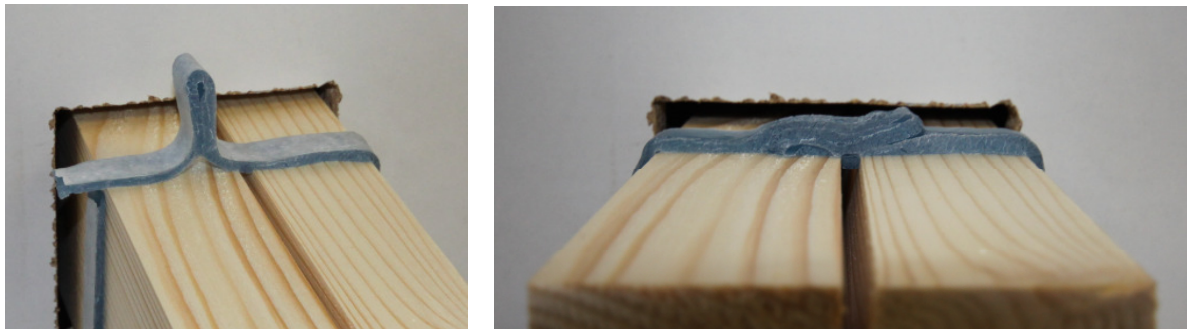


Abbildung 22: Verarbeitung „Speziallösung II“

Es wurde daraufhin versucht mit einer handelsüblichen Luftdichtheitsfolie einen luftdichten Anschluss zwischen Balken und Blende herzustellen. Ein entsprechendes Stück Folie um den Balken herumzuführen, ohne dieses dabei zerschneiden zu müssen, ist praktisch kaum durchführbar. Denkbar ist hier auch die weiter unten beschriebene Lösung mit einer Folienmanschette.

Weil sich das Klebematerial fast nicht in den Riss eindrücken ließ (siehe Abbildung 22 rechts), konnte die Rissfläche nicht maßgeblich verringert werden. Es ist ein Ergebnis in der Größenordnung der reinen Klebebandlösung (Referenzfall) zu

erwarten. Daher wurde von der Durchführung einer Messreihe zu dieser Methode abgesehen.

Die Speziallösung II hat bei der Verklebung von Luftdichtheitsbahnen auf rauen Untergründen, beispielsweise auf rauem Putz, Vorteile gegenüber herkömmlichen Klebebändern. Durch die Elastizität der Raupe können in diesem Fall kleine Unebenheiten ausgeglichen und so eine größere Haftung erzielt werden. Für das Verfüllen und Abdichten von Rissen in Holzbalken kann diese Methode aus den genannten Gründen jedoch nicht empfohlen werden.

### **5.2.8 Methode: Putzanschlussband + Dichtmasse**

Zur Andichtung eines Balkens an eine luftdichte Ebene (z.B. Innenputz) kann ein sog. Putzanschlussband eingesetzt werden, welches auf der einen Seite gut überputzbar ist (PET-Vlies). Hier wird das Band zur Andichtung des Balkens, also der Überklebung des Spaltes zwischen Balken und Blende eingesetzt, ohne späteres Verputzen. Der Einsatz ist damit dem eines normalen Luftdichtheits-Klebebandes ähnlich.

Zunächst wurde die Dichtmasse in den Spalt am Musterbalken gespritzt, um diesen möglichst gut abzudichten. Die verwendete Masse ist identisch mit derjenigen aus der Methode „KHD II“. Das Putzanschlussband wurde dann mit dem darauf vorhandenen Klebestreifen in einem Stück um den Balken herum geklebt. Hierfür liegt eine detaillierte Beschreibung vom Hersteller vor. Damit das Umkleben mit einem einzigen Streifen Putzanschlussband möglich ist, sind an den Ecken des Balkens kleine „Dreiecke“ aus dem Band auszubilden, welche in der Praxis mit eingeputzt werden sollen (siehe Abbildung 8.2.9). Der nicht selbstklebende Teil des Bandes wurde abschließend mit einem Luftdichtheitsklebeband desselben Herstellers mit der Blende verklebt (anstelle des sonstigen Einputzens).





**Abbildung 23: Verklebter Balken mit Putzanschlussband (hellblau) und Verklebung zur Blende mit Luftdichtheitsklebeband (dunkel). Im rechten Detailbild ist ein Dreieck aus überstehendem Anschlussband an der Balkenecke dargestellt (Verfahren nach Herstellervorgabe)**

Die Ausbildung der Dreiecke im Eckbereich des Balkens hat sich als schwierig erwiesen. Die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Handlungsempfehlung mit Bilderserie erscheint hier idealisiert und nicht praktisch durchführbar. Vor allem das spätere Einputzen der überstehenden Dreiecke gelänge später wohl nur mit einer sehr dicken Putzschicht.

Weiterhin war auffällig, dass die Viskosität der frisch geöffneten Dichtmasse zunächst sehr gering war. Bei der direkt auf die Andichtung der ersten Probe folgenden Andichtungen der beiden anderen Proben, hatte sich die Viskosität wieder verbessert. Sie stimmte dann mit den Erfahrungen aus den vorangegangenen Versuchen überein. Ein Grund für diese Beobachtung ist möglicherweise eine zu Beginn nicht ausreichende Durchmischung der Masse. Die Lagertemperatur scheidet als Grund aus, da die Masse bereits lange vorher im Versuchsraum gelagert war.

Bei der Auswertung der Proben sind bei jeder Probe nur geringe Abweichungen der Leckageströme bei Über- beziehungsweise Unterdruck festzustellen. Allerdings gibt es große Unterschiede in den Einzelergebnissen der drei Proben: In Bezug auf den höchsten Volumenstrom der drei Proben, beträgt der Volumenstrom der beiden anderen nur 22 bzw. 73 %.

Im Folgenden werden die Ursachen für die starke Streuung der Einzelmessungen näher erläutert: Bei der Herstellung der ersten Probe war - wie oben beschrieben - die Viskosität der Dichtmasse geringer als bei der Herstellung der anderen Proben. Bei einer Gegenlichtprüfung zur Feststellung der Eindringtiefe war bei der besten Probe kein durch den Riss eindringendes Licht auszumachen. Dies führt zu den in den Messwerten abzulesenden hohen Qualität der Andichtung. Bei den beiden

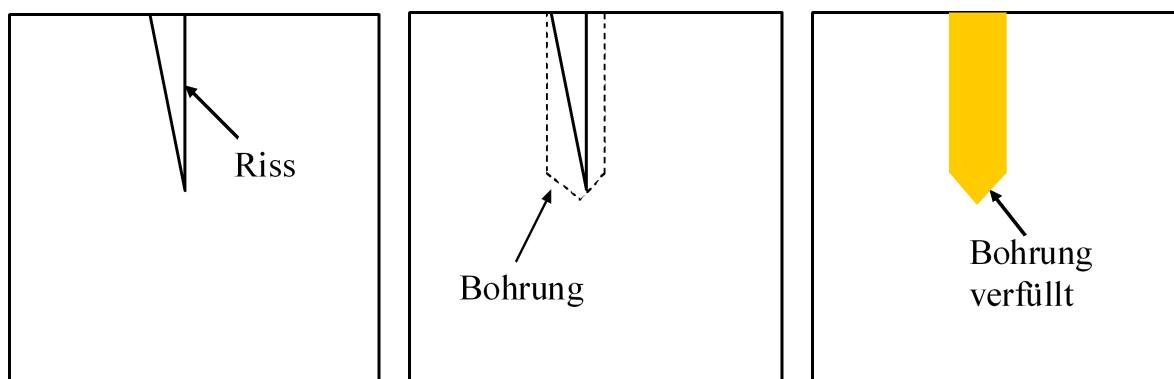
anderen Proben verfügt die Masse über nur geringere Eindringtiefe. Daher sind die Messergebnisse plausibel.

Insgesamt ergibt sich ein Mittelwert der drei abweichenden Einzelmessungen für die Methode „Putzanschlussband + Dichtmasse“ das Messergebnis für den Leakagestrom von  $V_p = 0,50 \text{ m}^3/\text{h}$ ; die beste der drei Proben liegt bei nur  $0,16 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### 5.2.9 Methode: Injektionskanal

Die Abdichtung des Rissquerschnitts hat, unabhängig von der (geeigneten) Art der Abdichtung zur Blende, den entscheidenden Einfluss auf den Leakagestrom. Das möglichst vollständige Verschließen des Rissquerschnitts ist daher auch in einem ggf. gesonderten Arbeitsgang zielführend. Daher wurde die, von einem Berater einer der Herstellerfirmen, empfohlene Lösung der „Injektionsbohrung“ getestet. Dabei wird der Riss in der späteren Abdichtungsebene mit einem Bohrer bis zum Grund aufgebohrt und das dann mit einer Spritztülle gut zugängliche Loch mit einer geeigneten Dichtmasse ausgespritzt. Alternativ kann die Abdichtung auch mittels eines eingeschlagenem Rundholzes oder **Holzdübels** erfolgen.

Es handelt sich damit um eine Methode, welche nicht vergleichbar ist mit den bisherigen Abdichtungsmethoden zur Blende. Es geht dabei vielmehr um die gezielte Abdichtung der Rissfläche, welche mit einer weiteren Abdichtungsmethode kombiniert werden muss. Alle Methoden, welche den Riss nicht nennenswert abdichten, können mit diesem Verfahren kombiniert und dadurch deutlich verbessert werden.

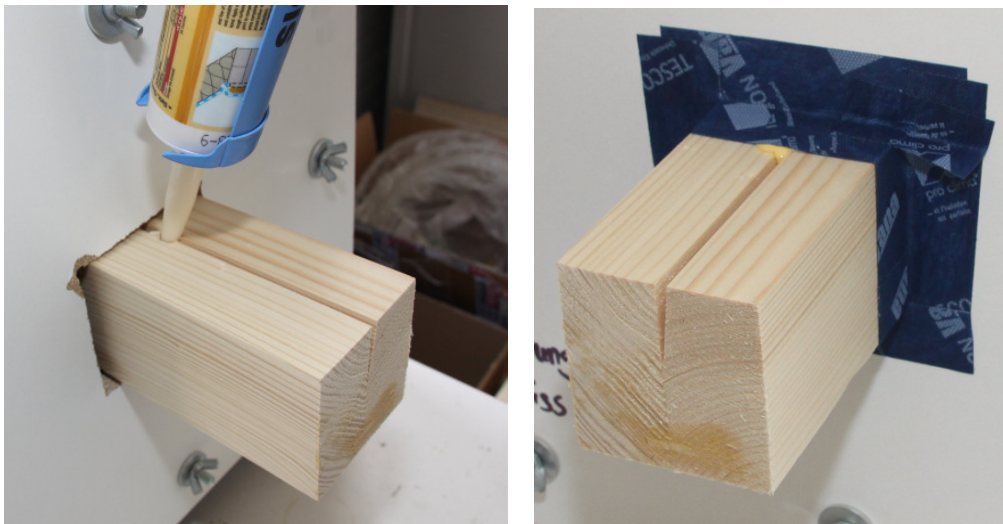


**Abbildung 24: Schematische Darstellung (Balkenschnitt) der Arbeitsschritte „Aufbohren“ (Injektionskanal) und „Verfüllen“ des Balkenrisses bei der Lösung Injektionsbohrung. Eine Verfüllung mit einem Holzdübel wäre auch möglich.**

Der Riss wurde bei den Proben mit einem 10 mm Bohrer 36 mm tief aufgebohrt. Die verwendete Spritztülle ist an der breitesten Stelle (Verschraubung) ca. 10 mm breit.

Die Bohrspäne sollten möglichst vollständig aus dem Bohrloch entfernt werden. Die Bohrung und Rissverfüllung muss in genau der Ebene erfolgen, in welcher später die weitere Abdichtung zur Blende bzw. der Wand erfolgt.

Bei dieser Methode werden punktuelle Bohrungen in einem Balken eingebracht und der Balken damit zwangsläufig geschwächt. Daher muss vorher zwingend die **Statik des Balkens** überprüft werden um keine nachhaltigen Schäden zu erzeugen.



**Abbildung 25: Der Riss wird in der späteren Abdichtungsebene aufgebohrt und mit Dichtmasse aufgefüllt (Injektionskanal) (links). Danach wird der Balken mit Klebeband abgedichtet (rechts)**

Durch das optimale Verschließen der Rissfläche und das geeignete Klebeband konnte ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden. Für die drei Proben ergab sich im Mittel ein Leckagestrom von nur  **$V_p = 0,03 \text{ m}^3/\text{h}$** . Auch dieser geringe Volumenstrom kann mit dem kleineren Volumenstrommessgerätes gut gemessen werden. Der Unterschied zwischen den drei Proben war nur gering.

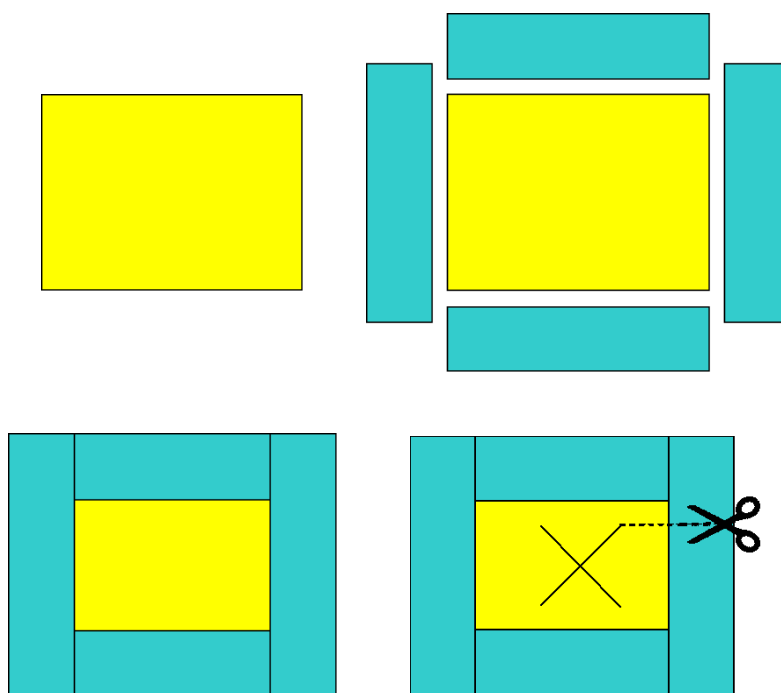
#### 5.2.10 Methode: Folien-Manschette

Eine weitere Möglichkeit der Abdichtung zwischen Balken und Wandfläche ist die Verwendung einer Folie. Diese muss an allen Seiten des Balkens und an den Wandflächen angeschlossen werden. Die Verwendung einer zur Balkengröße und zum Abstand zwischen Balken und Wandfläche passenden Manschette ist dabei eine praktische und einfache Lösung. Um nicht diverse Produktgrößen und Spezialprodukte zu benötigen, kann diese mit Hilfe von zwei oder drei Schablonen (Rechteckiges Brettchen) selber einfach angefertigt werden. Die lange Seite der Schablone dient auch zur Abmessung der vier gleichlangen Klebebandstreifen.

Die Arbeitsschritte werden hier im Ablauf dargestellt und mit Skizzen und Fotos ergänzt:



1. Der Balkenriss wird nach der oben beschriebenen Injektionsmethode ausgebohrt und die Bohrung dicht verfüllt.
2. Ein rechteckiges Folienstück wird (ggf. mit Hilfe einer Schablone) zugeschnitten
3. Die Klebestreifen werden an allen vier Seiten auf das Folienstück geklebt. Dabei werden jeweils 50 % der Klebestreifenbreite auf die Folie aufgeklebt, die andere Hälfte steht über zur Verklebung an der Blende. Dabei ist es hilfreich ein Klebeband mit zweiteiligem Haftschutz zu verwenden, damit die überstehenden Bereiche noch nicht kleben.
4. Mit einem Cutter werden zwei Schnitte in X-Form in die Mitte des Folienstückes geschnitten um dort den Balken aufnehmen zu können. Die Länge der Schnitte ist dabei entsprechend der Diagonale des Balkens zu wählen.
5. An einer Stelle werden Klebeband und Folie bis zum Kreuzschnitt eingeschnitten um die Manschette über den Balken ziehen zu können.



**Abbildung 26: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur Herstellung einer Folienmanschette (gelb: Folie; türkis: Klebeband). Erläuterungen siehe Text.**

6. Das Folienstück mit den Klebebändern wird über den Balken gezogen; die Cutterschnitte ggf. angepasst. Es bilden sich auf jeder Balkenseite Foliendreiecke.

7. Die verbliebenen Haftschutzstreifen der Klebebänder werden entfernen und die Manschette in der Andichtungsebene spannungs- und faltenfrei auf der Blende verklebt. Der Bereich des Einschnittes der Folie und des Klebebandes wird mit einem zusätzlichen Klebeband verklebt.
8. An den Ecken - also den vier Enden der Cutterschnitte - besteht kein Folienüberstand. An diesen potentiellen Leckagen wird zusätzlich eine Abdichtungsmasse aufspritzt.
9. Als letzter Schritt wird das Klebeband in einem Stück um den Folienüberstand herum führen und mit dem Balken verklebt.
10. Es ist darauf zu achten, dass das Klebeband in ausreichender Breite (min 2 cm) auf dem Balken verklebt wird. Sollte, bedingt durch die Dicke des Balkens die aufliegende Folienecke zu groß sein, muss die Spitze gekürzt werden oder es muss eine weitere Lage Klebeband eingesetzt werden.

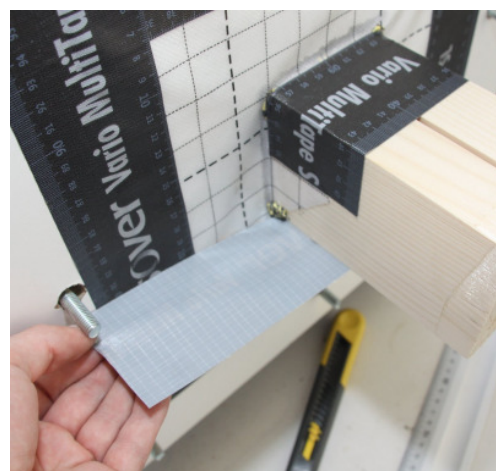
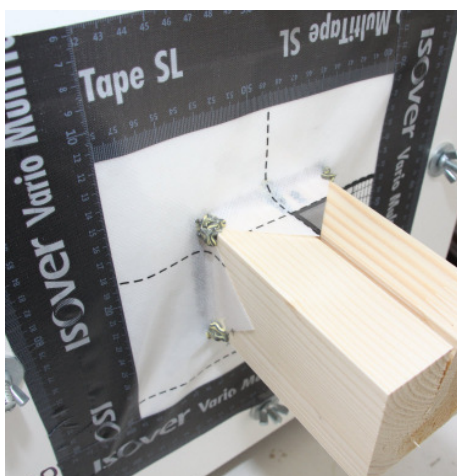
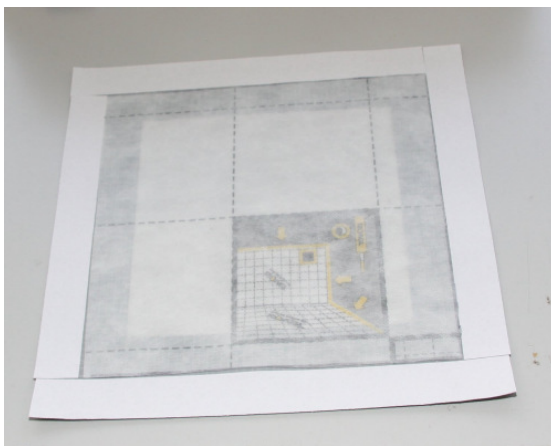


Abbildung 27: Fotos zu den Arbeitsschritten der Folienmanschette (Erläuterung siehe Text)

Auch bei dieser Methode handelt sich nicht nur um ein bzw. mehrere Produkte sondern insbesondere um ein handwerkliches Vorgehen in Ergänzung mit der zuvor beschriebenen Injektionsmethode. Daher ist das Ergebnis auch nicht direkt vergleichbar mit den bisherigen Andichtungsmethoden.

Die drei in der Form hergestellten Proben ergeben ein Messergebnis mit einem Leckagestrom von nur  $V_p = 0,22 \text{ m}^3/\text{h}$ . Damit zeigt dieses Verfahren ein erwartungsgemäß gutes Ergebnis bei gleichzeitig guter Durchführbarkeit. Die Unterschiede zwischen den drei Proben sind nur gering und in der handwerklichen Umsetzung begründet.

### 5.2.11 Methode: Gipsverguss

Um die unterschiedlichen Risse eines Balkens zu verschließen ist es auch möglich diese auszugießen. Diese Methode ist nur möglich wenn die Dichtebene horizontal angeordnet ist. So können z.B. Risse in Balkendurchdringungen in einem unbeheizten Dachboden verschlossen werden. Als Vergussmaterial eignet sich insbesondere flüssig angerührter Gips; dieser schwindet nicht beim Aushärten.

In solchen Fällen wird die luftdichte Ebene bis zum Balken geführt und fixiert. Dann wird in einigen Zentimetern Abstand um die Durchdringung eine Barriere aus Holzleisten aufgenagelt, welche als „Schalung“ dient. Diese wird dann mit dem dünnflüssigen Gips ausgegossen. Dabei dringt der Gips gut in alle großen und kleinen Spalten ein und verschließt die Risse vollständig. Bei größeren Risse müssen diese mit z.B. Papier ausgestopft werden, damit der Gips nicht nach unten weglaufen kann. Möglicherweise später durch Bauteilbewegung auftretende Haarrisse sind minimal, da das Material an der Position verbleibt.

Für das Herstellen der Proben war es notwendig die Balken senkrecht zu stellen.

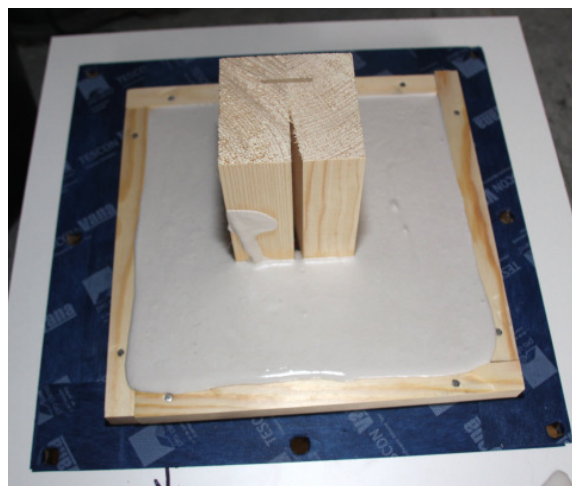
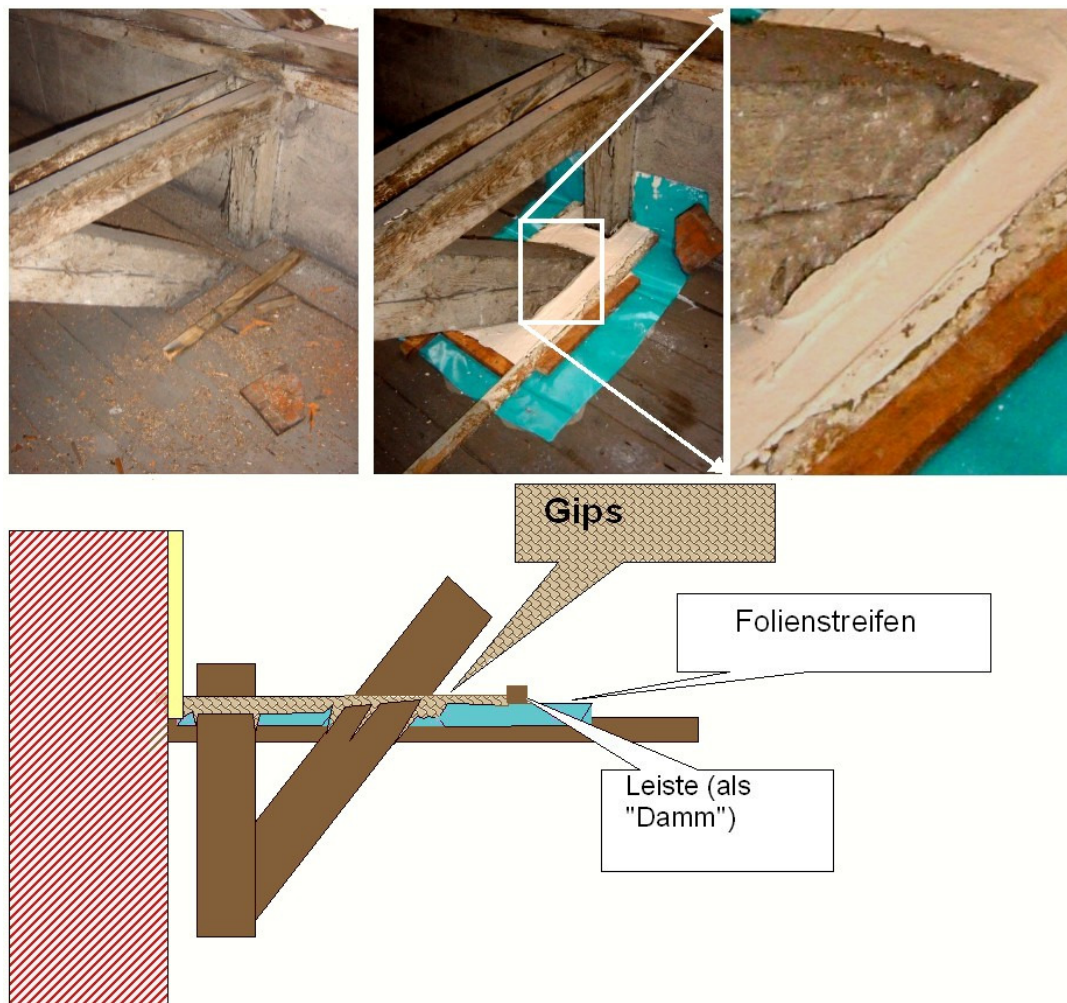


Abbildung 28: Horizontaler Gipsverguss (dünnflüssig, mit Holzbegrenzung)

Die Messungen ergaben ein gesamtes Messergebnis von  $V_p = 0,39 \text{ m}^3/\text{h}$  für den Leckagestrom. Dabei war eine der drei Einzelproben deutlich schlechter in der erreichten Qualität. Bei dieser war der Gips vermutlich nicht ausreichend dünnflüssig um bis in die Tiefe des Risses einzudringen.

Auch bei dieser Lösung handelt es sich aufgrund der Einschränkung (horizontale Dichtungsebene) um eine Sonderlösung. Das Verfahren wurde z.B. bei einer Altbausanierung in Nürnberg erfolgreich angewendet [Feist 2003] und ist hier mit der folgenden Abbildung dargestellt:



**Abbildung 29:** Horizontaler Gipsverguss im Sanierungsprojekt "Jean-Paul-Platz 4" in Nürnberg. Eindichtung durchstoßender Verstrebungen in die luftdichte Ebene der obersten Geschosdecke (oben links: Ausgangszustand mit einer Strebe; oben Mitte: fertiger Gipsverguss; oben rechts: Detail - der Gips fließt in alle Spalte; unten: Prinzipskizze (aus [Feist 2003])).

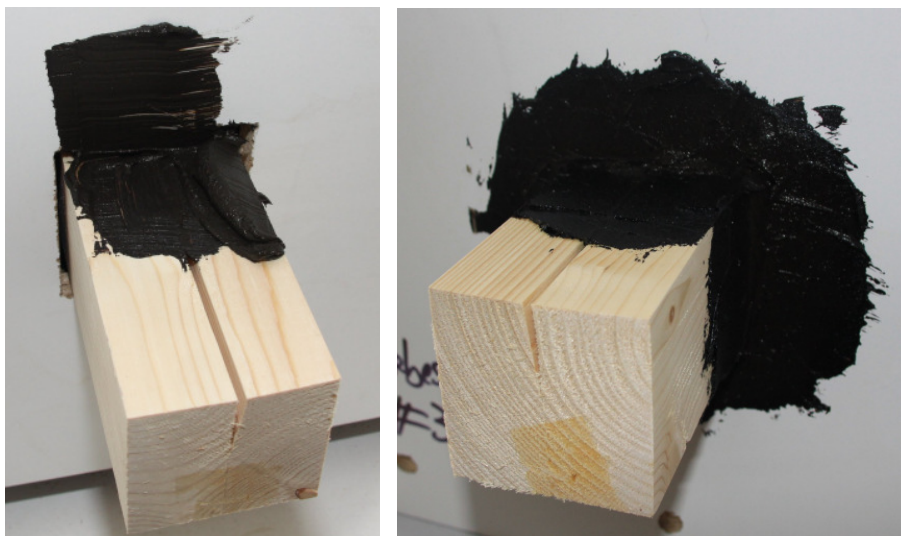


### 5.2.12 Methode: Dickbeschichtung

Als weitere Möglichkeit der Andichtung wurde handelsübliche Dickbeschichtung auf Bitum-Basis eingesetzt, welche normalerweise zur Mauerwerksabdichtung eingesetzt wird („Schwarze Wanne“). Dabei handelt es sich um kunststoffmodifizierte Bitumenemulsionen - industriell hergestellte Mischungen von Bitumen mit polymeren Kunststoffen. Die Eignung des Materials für den Innenraum wurde im Rahmen dieser Untersuchung nicht überprüft.

Die Dickbeschichtung kann kalt verarbeitet werden und wird mit einem Spachtel großzügig um den Balken herum aufgetragen. Damit kann ohne weiteres Material der Spalt zur Blende überbrückt werden. Auf der Blende und dem Balken erfolgt eine gute Abdichtung. Die Masse kann dabei auch mit dem Spachtel in den Riss gedrückt werden um diesen anzudichten. Es muss dafür gesorgt werden, dass eine ausreichende Schichtdicke erreicht wird.

Auch hier zeigt sich eine deutliche Streuung der drei Einzelmessung; wieder ist eine Probe deutlich schlechter ausgefallen. Es zeigt sich, dass auch hier die Füllung des Risses entscheidenden Einfluss hat. Der Mittelwert bewegt sich aber mit einem Leakagestrom von  $V_p = 0,33 \text{ m}^3/\text{h}$  recht auf niedrigem Niveau. Das Material lässt sich gut verarbeiten und ist seit langer Zeit erprobt und nach dem Aushärten dauerhaft flexibel.



**Abbildung 30: Aufbringen der Dickbeschichtung zur Balkenabdichtung**

In einem Sanierungsprojekt in Wartin in der Nähe von Prenzlau wurde das Verfahren zur Balkenabdichtung erfolgreich eingesetzt [Hasper 2010].



**Abbildung 31: Beispiel für den Einsatz der Dickbeschichtung zur Balkenabdichtung im Sanierungsprojekt „Schloss Wartin“ [Hasper 2010]**

### **5.3 Methodenvergleich**

Der Vergleich der untersuchten Methoden geschieht sowohl auf Grundlage der Messergebnisse, als auch auf Grundlage der bei der Verarbeitung gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Praxistauglichkeit.

#### **5.3.1 Vergleich Messergebnisse**

Für den Vergleich der Messergebnisse der untersuchten Methoden wird jeweils der arithmetische Mittelwert der Über- und Unterdruckmessung über die jeweils untersuchten drei Einzelproben herangezogen. Die Werte wurden jeweils bei der Beschreibung der einzelnen Methoden bereits angegeben. Dargestellt in Abbildung 32 ist jeweils der Mittelwert der drei Messungen sowie der Kleinst- und der Größtwert.

Wie weiter oben bereits beschrieben mussten die Messwerte aufgrund eines Messgerätefehlers gegenüber bereits vorab veröffentlichter Ergebnisse geringfügig korrigiert werden. Die Aussagen und generellen Ergebnisse der vorherigen Veröffentlichungen sind von dieser geringen Korrektur nicht betroffen.

**Tabelle 4: Übersicht über die unterschiedlichen Abdichtungsmethoden die an den Musterbalken ausgeführt wurden**

			
Klebeband	Butyl-Kautschuk-Klebeband	Speziallösung (Reinacrylat-Dispersion)	Putzanschlussband
			
Folienmanschette	Injektionskanal	Dickbeschichtung	Gipsverguss

Als **Referenzgröße** bzw. Vergleichsgröße wird die Messung herangezogen, bei der der Riss nicht weiter abgedichtet wurde, sondern lediglich der Balken mit Klebeband an die Blende angedichtet wird (Methode „Klebeband“). Bei dieser Methode verbleibt bei einem Differenzdruck von 50 Pa ein Leckagevolumenstrom von rund 1,6 m<sup>3</sup>/h.

Aus dem Ergebnissen der Methoden „Butylkautschuk + Haftgrundierung“ (hellblaue Säule in Abbildung 32) und „Klebeband + Haftgrundierung“ (gelbe Säule) lässt sich feststellen, dass diese unterschiedlichen Bänder der Methoden zu einer vergleichbaren luftdichten Abdichtung führen. Der Unterschied liegt hier bei knapp 9%. Insgesamt sind diese beiden Ergebnisse in der gleichen Größe wie der Referenzwert und nicht zufriedenstellend, da die Rissfläche nicht reduziert wird.

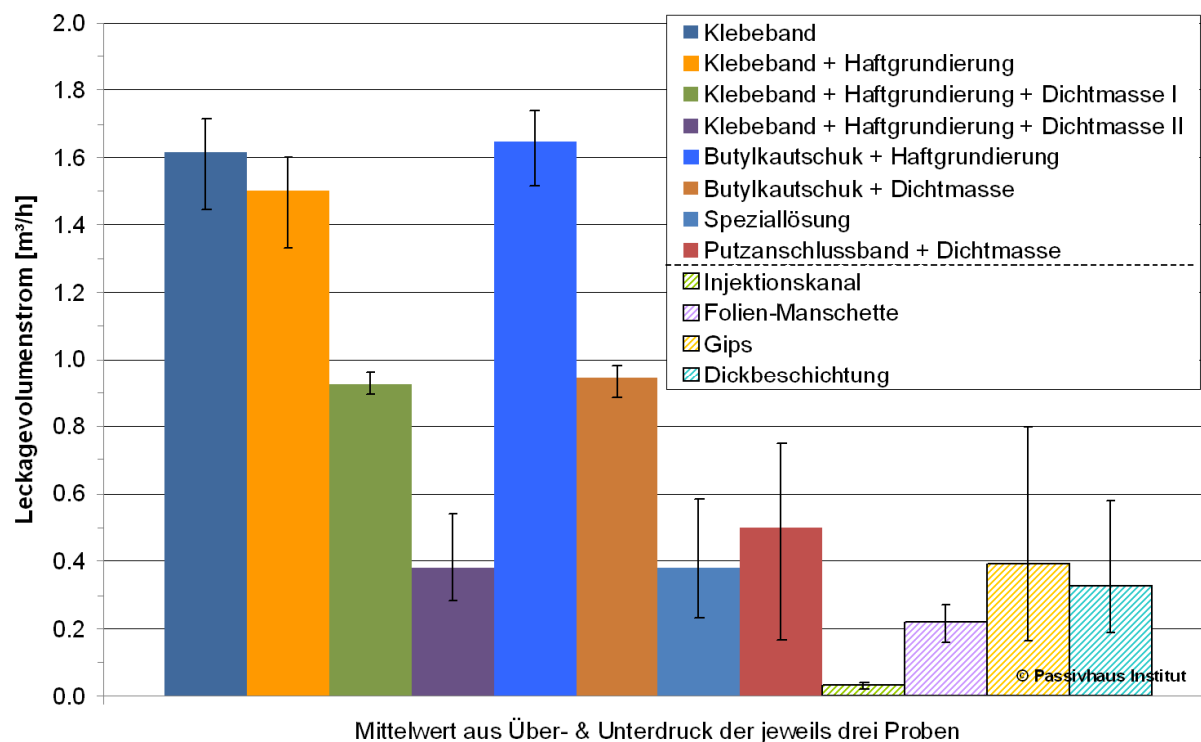
Sobald der Riss im Musterbalken zusätzlich mit einer Dichtmasse gefüllt wird, ist durch die Verringerung der Leckagefläche eine deutliche Verbesserung gegenüber der alleinigen Verwendung von Klebeband feststellbar. In der Übersicht der Ergebnisse (Abbildung 32) ist ebenfalls zu erkennen, dass mit den Methoden „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse II“ („KHD II“) und „Speziallösung“ (Reinacrylat-Dispersion mit Vlies) bei den **Standardlösungen** die größte Reduktion des Leckagevolumenstromes möglich ist (lila und blaue Säule). Bei entsprechender Rissabdichtung verblieben mit knapp 0,4 m<sup>3</sup>/h lediglich rund 24 % des Referenzleckagevolu-

menstroms; es wird also eine Reduktion des Leckagevolumenstroms von 76 % erreicht. Die „Speziallösung“ unterscheidet sich dabei grundlegend von den beiden anderen Methoden, ist dabei in der Qualität der Andichtung aber genauso erfolgreich.

Wird die Rissfläche nur teilweise ausgefüllt, verbleibt ein höherer Restleckage-Volumenstrom. Das zeigen die Varianten „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse I“ („KHD I“) (grüne Säule) und „Butylkautschuk + Dichtmasse“ (braune Säule): Diese erreichen gegenüber dem Fall, dass der Riss nicht weiter abgedichtet wird eine Reduktion des Leckagevolumenstroms um ca. 43 %. Die beiden Methoden unterscheiden sich zwar in der Herstellung der Luftdichtheit zwischen Balken und Blende, aber nicht in der Art der Rissabdichtung. Hier wurde in beiden Fällen dasselbe Material desselben Herstellers verwendet. Daher unterscheiden sich die gemessenen Leckagevolumenströme der beiden Varianten nur marginal voneinander.

Der mit den Messungen durchgeführte **Produktvergleich** zweier Hersteller bei der Methode „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse“ zeigt den Einfluss von unterschiedlichen Herstellerprodukten. Durch die schmalere Kartuschenspitze der Dichtmasse bei „KHD II“ gegenüber „KHD I“ war ein tieferes Einspritzen des Materials in den künstlich erzeugten Riss möglich. Weiterhin führte die geringere Viskosität der Dichtmasse aus „KHD II“ zu einer besseren Abdichtung. Dieser schon durch optische Prüfung festzustellende Unterschied drückte sich auch in den Messergebnissen beider Varianten aus. Der bei „KHD II“ festzustellende Leckagevolumenstrom ist gegenüber demjenigen bei „KHD I“ um fast 60 % reduziert. Die festgestellten Unterschiede der beiden Produkte beziehen sich nur auf die Dichtmassen; bei den Klebebändern waren bei beiden Produkten keine Undichtheiten auffällig.





**Abbildung 32: Vergleich der Leckageströme der durchgeführten Messungen normiert auf 50 Pa Druckdifferenz (jeweiliger Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung der drei Proben). Die dünne schwarze Linie gibt jeweils den gemessenen Minimal- und Maximal-Mittelwert an.**

### Ergebnisse „Alternativlösungen“

Die Messergebnisse der vier „Alternativlösungen“ zeigen im Vergleich sehr gute Ergebnisse, welche zumindest gleich oder besser als die vorausgegangenen Ergebnisse sind. Bei den Methoden handelt es sich zum Teil um Kombinationen der vorausgegangenen Methoden (Folienmanschette) oder um Ergänzungen dieser (Injektionskanal). Die Lösung Gipsverguss hat die Einschränkung des horizontalen Einsatzes, wogegen die Dickbeschichtung erfolgreich universell einsetzbar ist. Der beste Messwert - also der geringste Leckagevolumenstrom - ergibt sich bei der Lösung mit dem Injektionskanal mit nur 0,03 m³/h (entspricht der Reduktion um 98 %). Diese Rissabdichtung kann mit allen Methoden kombiniert werden. Vorab muss allerdings zwingend die Statik des Balkens geklärt werden, da Bohrungen durchgeführt werden.

Bei allen vier „Alternativlösungen“ wird der Spalt - mehr oder weniger gut - bis zum Grund abgedichtet. In der Tatsache, ob der Spalt sich mit der gewählten Technik ausfüllen lässt oder nicht, liegt der größte Unterschied aller untersuchten Methoden.

In allen durchgeführten Versuchen wurden für die Herstellung von luftdichten Verbindungen Spezialprodukte eingesetzt. Insgesamt kann festgestellt werden, dass es weniger auf die gewählte Materialart dieser Spezialprodukte zur Abdichtung ankommt, als insbesondere auf das möglichst komplette weitgehende Verschließen der

Rissfläche. Es ist naheliegend, dass sobald der Querschnitt des Risses verringert wird, die Dichtheit merklich ansteigt. Aussagen über die evtl. unterschiedliche Dauerhaftigkeit der untersuchten Verbindungen kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht erfolgen. Alle untersuchten Proben sind vor UV-Licht geschützt eingelagert und könnten zu einem späteren Zeitpunkt nochmals untersucht werden.

### 5.3.2 Vergleich Handhabung

In der Handhabung unterscheiden sich die untersuchten Methoden zur Holzbalkenabdichtung deutlich. Wird keine besondere Abdichtung des Risses vorgenommen ist ein Balken relativ zügig an die luftdichte Ebene (Dampfbremssfolie, Holzwerkstoffplatte, etc.) anzuschließen. Eine qualitativ hochwertige Abdichtung – deren Voraussetzung die Zugänglichkeit des Balkens sowie die grundlegende Reinigung der Holzoberfläche ist – braucht hingegen mehr Zeit und Sorgfalt.

Bei der Herstellung der Luftdichtheit zwischen Balken und Blende (ohne Rissverfüllung) hat sich das Butylkautschukband durch Variabilität und zügige Verarbeitung ausgezeichnet. Es ist davon auszugehen, dass auch bei sehr unebenen Untergründen durch die vorgegebene, relativ dicke Butylkautschukschicht eine ordentliche Anpassung an die Durchdringung erfolgen kann. Herkömmliche Luftdichtheitsklebebänder auf Acrylatbasis müssen in diesen Fällen häufig in vielen kleineren Streifen um die Durchdringung gelegt werden – so auch in der vorliegenden Versuchsreihe. Dies erfordert Zeit beim Ablängen der Streifen und ist bei nicht sorgfältig übereinander geklebten Bändern anfällig für kleinere Leckagen (vgl. Kapitel 5.2.1). Zur Vermeidung des Zuschneidens vieler Klebebandstreifen ist neben dem Butylkautschukband auch die Verwendung eines Putzanschlussbandes denkbar. Dies führte aber möglicherweise zu den unter Kapitel 5.2.8 erläuterten Problemen in der Ausführung der Eckbereiche des Balkens.

Das Verwenden einer Kartusche mit Dichtmasse bedeutet in der Praxis zwar einen zusätzlichen Aufwand, aber mit Hilfe dieser lassen sich tiefere Leckagen recht zügig und mit hoher Qualität verfüllen. Voraussetzung dafür ist eine ausreichend schmale Kartuschenspitze und eine entsprechende Viskosität der Dichtmasse. Um eine vergleichbare Abdichtung etwaiger Risse zu erreichen wäre auch die Verwendung der „Speziallösung“ (Reinacrylat-Dispersion) denkbar. Dabei muss allerdings mehrlagig gearbeitet werden und ausreichend Material aufgebracht werden, was optisch nicht einfach zu kontrollieren ist. Es muss auch berücksichtigt werden, dass das Mitführen des Materials (Eimer mit Kleber und Vliesbändern) eine zusätzliche Hürde darstellen kann. Die großen Anpassungsmöglichkeiten an verschiedenste Durchdringungen sind unter den in dieser Versuchsreihe untersuchten Produkten allerdings herausragend. Nur die Dickbeschichtung ist diesbezüglich ähnlich gut zu bewerten.

Mit der Folienmanschette gibt es eine einfache Möglichkeit mit wenigen Materialien (welche auch alle sowieso bei Abdichtungsarbeiten zum Einsatz kommen) eine sehr gute Abdichtung zu realisieren.

Da die Abdichtung der Rissfläche für ein gutes Ergebnis entscheidend ist, sollten die Methoden immer entsprechend kombiniert werden. Die Abdichtung mit der ausgefüllten Injektionsbohrung überzeugt dabei mit dem besten Ergebnis und einfacher Handhabung. Wird diese mit einer Abklebung mit Klebeband, Butyl-Kautschukkleber oder der Folienmanschette kombiniert, ergeben sich hier sehr gute Ergebnisse. Die Injektionsbohrung kann einfach auch mit einem Holzdübel ausgeführt werden, was im Sinne des Denkmalschutzes sicherlich positiver zu bewerten ist.

Es soll nochmals betont werden, dass die Voraussetzung für alle Methoden und Arbeiten in jedem Fall an der Abdichtungsstelle vollständig freigelegte und gesäuberte Balken sind.

#### **5.4 Übertragung: Großer Musterbalken und Altbalken**

Die Untersuchung mit den kleinen Musterbalken mit nur einer Leckage wurde realisiert, um die unterschiedlichen Methoden vergleichen zu können. Dabei sollten andere Einflüsse als die der Abdichtung möglichst ausgeschlossen bzw. gering gehalten werden. Es handelt sich damit im Vergleich von Situationen an historischen Balken um eine bewusst idealisierte Situation. Um die Übertragung auf typische Situationen herzustellen wurden einige Messungen an größeren Balken durchgeführt.

Dafür wurden die beiden erfolgreichsten Abdichtungsmethoden „KHD II“ (siehe Abschnitt 5.2.3) und „Speziallösung“ (siehe Abschnitt 5.2.6) der „Herstellerlösungen“ aus den oben beschriebenen Messungen zusätzlich an einem alten, exemplarischen Holzbalken (ca. 16 x 12 cm) (Bezeichnung hier: Alt- oder „Real“balken) und einem weiteren „großen“ Musterbalken (16 x 15 cm) getestet. Dieser größere Musterbalken weist eine Vielzahl unterschiedlicher Rissgeometrien auf: Es gibt diverse kleine und einige große Risse, welche wieder alle auf „Null auslaufen“ um tatsächlichen, natürlichen Rissformen nahe zu kommen. Die Summe der Leckagefläche bei diesem größeren Musterbalken beträgt ca. 11,5 cm<sup>2</sup>, dagegen verfügt der kleine Musterbalken der umfangreichen Untersuchung nur ca. 0,9 cm<sup>2</sup>.



**Abbildung 33: Abgedichteter Musterbalke „groß“ (links) und Alt- bzw. „Real“balke (rechts)**

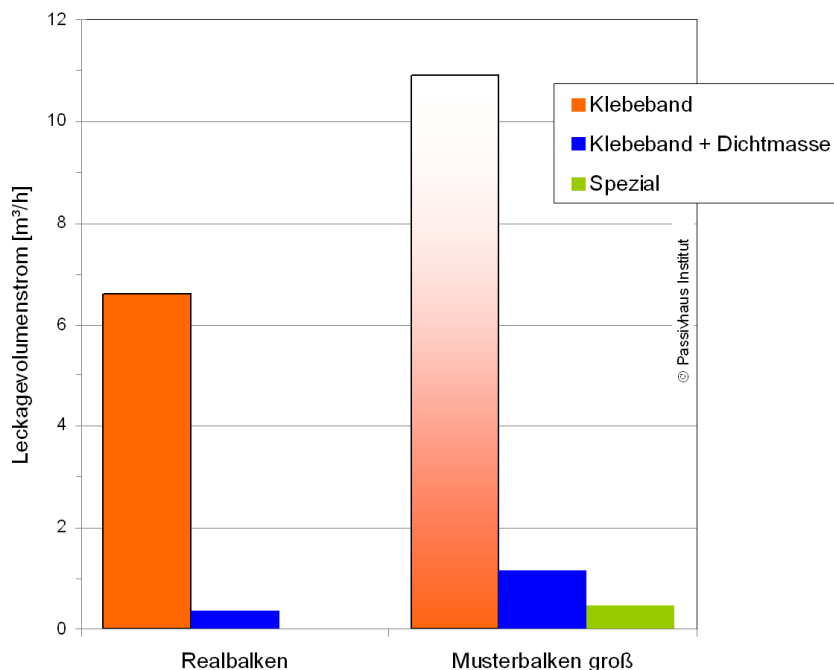
Als Referenzmessung dient in diesem Fall erneut die Abdichtung nur mit Luftdichtheitsklebeband ohne weitere Maßnahmen bezüglich der Rissabdichtung. Für den großen Musterbalke ließ sich mit dieser Abdichtung aufgrund der begrenzten Pumpenleistung die Luftdichtheit nicht bei der gewünschten Druckdifferenz messen. Daher musste der Leckagestrom auf  $11,3 \text{ m}^3/\text{h}$  hochgerechnet werden. Alle anderen Messungen konnten identisch zu der weiter oben beschriebenen Durchführung an den kleinen Musterbalke durchgeführt werden. Allerdings wurden bei diesen orientierenden Messungen jeweils nur eine und nicht drei Proben hergestellt und vermessen. Der Referenzfall mit einer einfachen Klebeband-Abklebung führt beim Altbalke auf einen Leckagevolumenstrom von  $6,6 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Nach der Rissverfüllung mit eingespritzter Dichtmasse und Abklebung mit Klebeband wird beim großen Musterbalke eine Reduktion des Leckagevolumenstroms von 89 % erreicht, es verbleiben knapp  $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$  Leckagevolumen. Beim Altbalke verbleiben mit der Methode noch knapp  $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , was einer Reduktion um sogar 95 % entspricht.

Am großen Musterbalke wurde zusätzlich auch die Abdichtungsmethode „Speziallösung“ mit der Reinacrylat-Dispersion und dem Spezialvlies durchgeführt. Damit ergibt sich eine noch mal verbesserte Abdichtung: Es verbleiben knapp  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , was am großen Musterbalke einer Reduktion um 96 % entspricht. Die Messergebnisse sind in Abbildung 33 dargestellt. Der Erfolg der Abdichtungsmaßnahme kann damit erwartungsgemäß auf diese größeren Balken mit anderen Rissgeometrien übertragen werden.

Mit dieser Übertragung der Abdichtungsmethoden kann die Größenordnung der in der Realität auftretenden Leckageströme abgeschätzt werden. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die Messungen am Versuchsstand an vollständig frei-

liegenden Balken durchgeführt wurden. Es gibt kein Mauerwerk oder dergleichen, welches den Luftstrom nach dem Abdichtungsbereich behindert und reduziert. In der Realität würden aufgrund solcher Bedingungen – bei identischer Abdichtung und angenommener Druckdifferenz von 50 Pa (was in der Realität nicht vorkommt) – vollständig andere Leckagevolumenströme auftreten. Dabei ist eine Reduktion auch bis auf gar keinen Volumenstrom möglich.



**Abbildung 34: Leckagevolumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz am alten „Realbalken“ und dem Musterbalken „groß“ mit den Abdichtungen nur Klebeband (ohne Rissverfüllung), Klebeband + Dichtmasse und der Speziallösung (Reinacrylat-Dispersion)**

## 5.5 Handlungsempfehlung

Die Einbindung rissiger Holzbalkenköpfe in die luftdichte Ebene der Gebäudehülle ist sowohl mit dem Einsatz einer geeigneten Dichtmasse (KHD II), als auch mit der untersuchten „Speziallösung“ – bestehend aus einer streichbaren pastösen Masse und einem Spezialvlies – in ausreichender Qualität denkbar. Gegenüber der Abdichtung mit Klebeband (ohne Rissverfüllung) war bei dem kleinen Musterbalken mit beiden Varianten eine Reduktion des Leckagevolumenstroms um bis zu 74 % möglich. Noch bessere Ergebnisse wurden bei der Injektionsbohrung, der verklebten Folienmanschette und der Dickbeschichtung erreicht. Die Injektionsbohrung ist sehr erfolgreich und kann gut mit anderen Abdichtungstechniken kombiniert werden.

Die als „Speziallösung“ benannte pastöse Masse (Reinacrylat-Dispersion) ist in Kombination mit dem dazugehörigen Spezialvlies sehr variabel an jede am Bau

übliche Durchdringung anzupassen, so dass bei ausreichendem Materialauftrag mit einer guten Qualität der Luftdichtung zu rechnen ist. Die Geruchsentwicklung und die Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Einwirkung bis zur vollständigen Abtrocknung der pastösen Masse bringen allerdings ggf. praxisrelevante Nachteile mit sich. Aufgrund der Geruchsentwicklung ist ein Verarbeiten in gut belüfteten Räumen zu empfehlen. Das Mitführen dieser „Spezialmaterialien“ könnte den Einsatzbereich auf der Baustelle evt. einschränken, da ein relativ großer Materialeinsatz nötig ist.

Bei Verwendung der spritzbaren Dichtmasse zur Holzrissabdichtung ergibt sich für den Ausführenden der Vorteil, dass er neben den sowieso verwendeten Produkten (z.B. Dampfbremssfolie, Luftdichtheitsklebeband) nur eine Kartusche mit Kartuschenpistole zusätzlich mitführen muss. Weiterhin positiv zu bewerten ist auch das relativ zügig durchzuführende Ausspritzen etwaiger Unebenheiten und Risse. Jedoch ist die Dichtmasse gegenüber der „Speziallösung“ weniger variabel einsetzbar und kann deshalb nicht jede Undichtheit befriedigend beheben. Ist die Kartuschenspitze beispielsweise zu breit, ist ein Verfüllen eines Risses nicht ohne weiteres möglich. In der Praxis kann die verfüllte Injektionsbohrung oder ggf. die Verwendung einer schmaleren Spitze Abhilfe schaffen. Dies bringt aber einen zusätzlichen Zeitaufwand mit sich. Der Bohrung von Injektionskanälen sind aus Stabilitätsgründen (Statik) des Holzbalkens Grenzen gesetzt. Beim Einsatz der Dickbeschichtung sollte die Eignung für den Einsatz im Innenraum im Einzelfall geprüft werden.

Grundlegend wichtig und nicht überraschend ist generell, dass die vorhandenen Risse nicht nur überklebt sondern auch verfüllt werden sollten. Nur dann ist eine deutliche Reduktion des Leckagevolumenstroms möglich. Damit lässt sich das Vorgehen reduzieren auf:

- Balken freilegen
- Im Einbindungsbereich Balken reinigen
- Risse verfüllen
- Abdichtung Balken - Wandebene ausführen

Voraussetzung ist dabei immer die Verwendung von geeigneten Materialien (Spezialprodukten). Die Entscheidung für die eine oder die andere Methode bzw. deren Kombinationen zur Holzbalkenabdichtung bleibt immer der Einzelfallprüfung vorbehalten.

## **5.6 Anwendungsbereich und Reversibilität**

Im Fokus der Abdichtungsarbeiten steht der Erhalt der Bausubstanz, hier insbesondere der Holzbalken sowie die Erhöhung der Behaglichkeit für die Bewohner (Zugfreiheit). Gleichzeitig werden dabei Heizwärme- bzw. CO<sub>2</sub>-Einsparungen realisiert. Für den Denkmalschutz ist die Frage nach dem Anwendungsbereich und

der Reversibilität, also dem Rückgängigmachen bzw. der Entfernbareit der Maßnahme von Bedeutung.

Die Methode ist bei allen Gebäuden mit Holzbalken in Decke- und/oder Dachbereich anwendbar, wenn die Balken die luftdichte Ebene – zum Beispiel den Innenputz – durchdringen. Zwingende Voraussetzung ist, dass die Balken im Bereich der Durchdringung (Verklebungsstelle) vollständig freigelegt und gesäubert werden. Die Öffnung der Holzfußböden im Wandbereich ist bei einer Sanierung häufig zur Kontrolle der Statik – zumindest von einer Seite – sowieso notwendig. Eine Beschreibung zum Freilegen und Ausdämmen des Zwischenraumes im Fußboden findet sich in [Fingerling 1995].

Betroffen von der Verklebung sind nur die freigelegten Oberflächen der Holzbalken im sehr begrenzten Bereich der Durchdringung der luftdichten Ebene (etwa 5 bis 10 Zentimeter breit). Ebenso betroffen ist die Oberfläche der angrenzenden luftdichten Ebene z.B. die umliegende Wandfläche (ertüchtigter oder neuer Putz etc.). Die Eigenschaften des Gebäudes werden durch die Maßnahme gezielt verändert: die Luftdichtheit wird erhöht, womit sich die Lüftungswärmeverluste reduzieren und die in die Konstruktion konvektiv eingetragene Wassermenge reduziert wird.

Ziel der Verklebung ist es, eine dauerhafte Verbindung zur luftdichten Ebene herzustellen. Die betroffenen Flächen auf den Holzbalken und der (z.B.) Wand ist relativ klein. Der überwiegende Teil der Verklebungen ist – je nach Art und Ausführung – reversibel; es werden nur geringe Reste auf der Oberfläche verbleiben. Je nach Einzelfall können aufgebohrte Balkenrisse zur Abdichtung mit Holzdübeln anstelle von Dichtmassen verschlossen werden, um weniger Fremdmaterial einzubringen. Außer der evtl. Verwendung von Holzdübeln werden Spezialprodukte eingesetzt, welche auf Dauerhaftigkeit ausgelegt sind. Je nach Produkt kann für solche Verbindungen die längere Einwirkung von UV-Strahlung problematisch sein. Der Schutz davor ist innerhalb eines Gebäudes in der Konstruktion (z.B. Bodenaufbau) im Regelfall gegeben.

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der eingesetzten Materialien bei einer derartigen Verwendung wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Es gibt Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Hersteller zu ihren Produkten sowie z.B. durch [Maas/Gross 2010]. Das PHI hat die Dauerhaftigkeit von realisierten Luftdichtheitskonzepten im Zusammenhang von Gesamtgebäuden untersucht [Peper et al. 2005]. Bei einem guten Konzept und den richtig eingesetzten Spezialprodukten zeigten sich dabei durchgehend sehr gute Ergebnisse.

Die Kosten derartiger Maßnahmen sind sehr stark abhängig von den unterschiedlichen Randbedingungen und eingesetzten Materialien. In der Hauptsache wird es sich um Arbeitskosten handeln, da die Arbeiten vollständig



handwerklich, vor Ort durchgeführt werden müssen. Alle verwendenden Materialien sind handelsüblich und verfügbar, wodurch die Beschaffung einfach ist.

Zur Voruntersuchung ist vorab eine Luftdichtheitsuntersuchung (Blower-Door-Test) und ggf. in Einzelfällen auch eine Infrarot-Thermografie empfehlenswert. Damit kann beurteilt werden, ob Luftleckagen am Balken-Wand-Anschluss vorhanden sind. Es kann auch sinnvoll sein, stichpunktartig an einigen Balkenköpfen Sensoren zur Feuchtemessung einzubringen (Widerstandsmessung über zwei Metallstifte), um die Maßnahme in den Folgejahren zu überprüfen.

## **5.7 Einordnung und Ausblick**

Die hier ermittelten Ergebnisse geben Hinweise über die zu erwartende Größenordnung von Restleckage-Volumenströmen bei Balkenabdichtungen. Für Normalbedingungen an einem Gebäude durch Winddruck und Thermik müssen die Ergebnisse auf geringere Druckdifferenzen (z.B. 3 bis 8 Pa) umgerechnet werden.

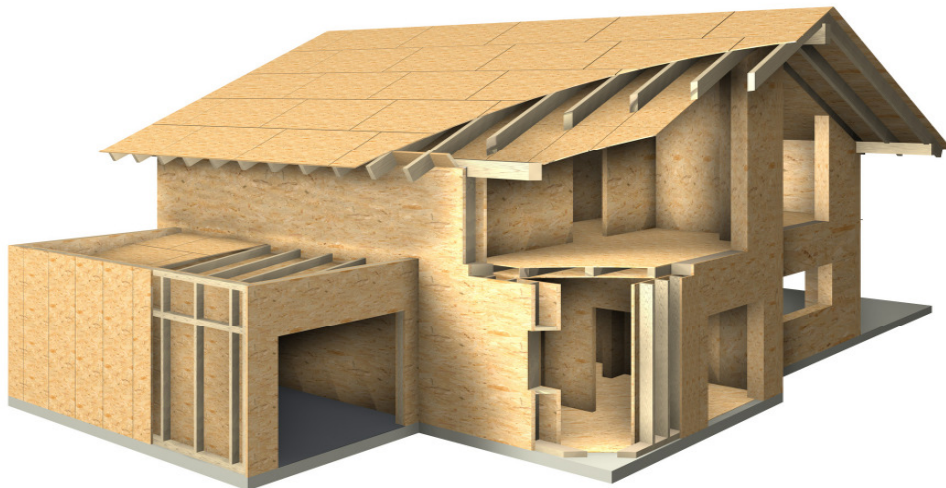
Der Umfang der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Messungen gibt erste Hinweise auf die Restleckagevolumenströme; eine statistisch ausreichende Anzahl von Proben konnten im Rahmen der Untersuchung nicht angestrebt werden. Der Bereich der Dauerhaftigkeit der untersuchten Konstruktionen wurde nicht gesondert untersucht, weshalb dazu keine Aussagen gemacht werden können.

Die aufgrund der Restleckage in die Konstruktion eingetragenen Wassermengen, hängen von einer Vielzahl von Parametern ab. Die messtechnisch ermittelten verbleibenden Leckagevolumenströme wurden für weitere Untersuchungen zum Bereich des konvektiven Feuchteintrags in den Wandaufbau verwendet: Für dessen Bewertung sind diese Kenntnisse Voraussetzung. An der Universität Innsbruck und am Passivhaus Institut Darmstadt wird zeitgleich im Rahmen des Forschungsvorhabens 3EnCult zu diesem Thema geforscht.

## 6 Luftdichtheit von OSB Platten

Der Bau der Prüfbox für die Messungen der Balkenabklebungen erfolgte, wie beschrieben, aus OSB-Platten (Oriented Strand Board). Bei den ersten Messungen wurde dann festgestellt, dass die Undichtheit der Prüfbox für diese Untersuchung nicht zu vernachlässigen ist. Die Ursache lag insbesondere in der Undichtheit der verwendeten OSB-Platten. Aus diesem Grund wurde die Prüfbox nachträglich flächig mit Luftdichtheits-Klebeband abgeklebt (vgl. Abschnitt 4.1.1). Um die Undichtheit der OSB-Platten genauer einschätzen zu können und die Auswirkungen auf die Verwendung im Bau beurteilen zu können, wurden die Luftdichtheit der Platten weitergehend untersucht. Dafür konnte die gleiche Prüfbox verwendet werden.

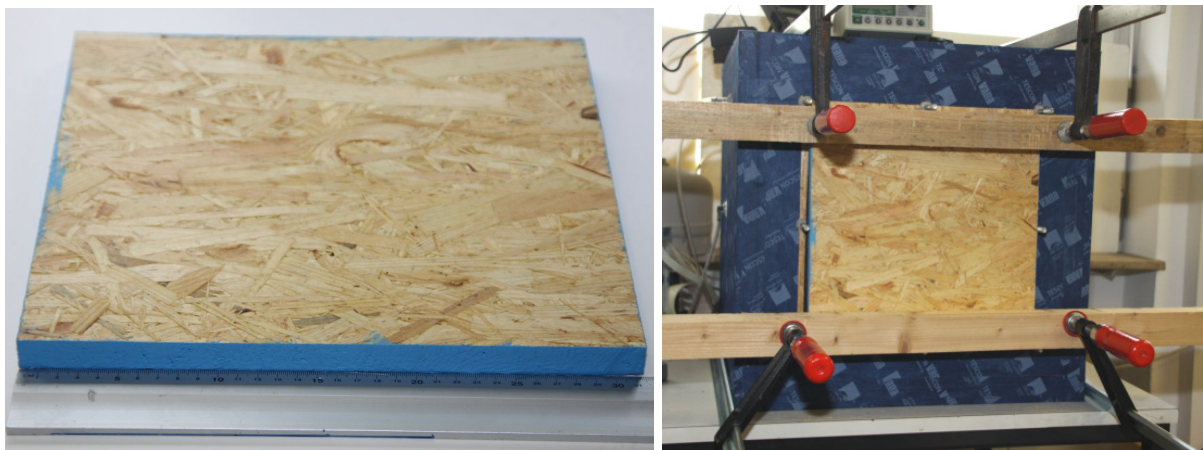
Mit der Anhebung der Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden steigt auch die Anforderung an die Luftdichtheit der flächigen Bauteile. Als luftdicht in der Fläche gelten Beton, Innenputz (auf Mauerwerk), Folien und Baupappen sowie (harte) Holzwerkstoffplatten (vgl. [Peper/Feist/Sariri 1999/2009]). Bei den Holzwerkstoffplatten werden häufig OSB-Platten eingesetzt, welche als luftdicht gelten. Mehrfach wurden in den letzten Jahren keine optimalen Messwerte bei Luftdichtheitsmessungen in Holzhäusern ermittelt. Als Ursache konnte unter anderem festgestellt werden, dass die verwendeten OSB-Platten nicht ausreichend luftdicht waren. Als einfache Kontrolle wird dazu eine Folie (z.B. 1 m x 1 m) auf die Innenseite der OSB-Platte luftdicht aufgeklebt. Bei Unterdruck im Gebäude wölbt sich die Folie deutlich, was auf eine flächige Undichtheit der Platte hinweist. Diese Erfahrungen decken sich mit den Undichtheiten der Prüfbox bei den am PHI durchgeführten Messungen zur Balkenabdichtung.



**Abbildung 35: Beispiel für den „Extremfall“ eines vollständig mit OSB-Platten beplankten Einfamilienhauses (Darstellung: Norbord)**

In einer ersten systematischen Untersuchung [Langmans 2010] zur Luftdichtheit von OSB-Platten wurden Produkte von acht am europäischen Markt vertretenen Herstellern getestet. Untersucht wurden handelsübliche OSB-Platten vom Typ „OSB 3“ in der Stärke von 18 mm. Diese zeigten überwiegend keine ausreichende Luftdichtheit. Trotz (bzw. wegen) der Messungen von Langmans gab und gibt es immer wieder Fragen und Unsicherheiten. Bei einigen Akteuren häuften sich widersprüchliche Überlegungen bzw. Aussagen zum Vorgehen beim Einsatz von OSB-Platten: Sind zusätzliche flächige Abdichtungen notwendig (Folien, Pappen oder Anstriche)? Von welcher Qualität sind die Platten am deutschen Markt? Reicht es anstelle OSB 3 einfach OSB 4 zu verwenden? Ein Hersteller bietet mittlerweile ein Produkt mit ergänzender Zellosoleschicht als luftdichte OSB-Platte an [Kronospan].

Um zu versuchen einige der anstehenden Fragen zu klären, wurden an der Prüfbox Messungen zur Luftdichtheit von OSB-Platten durchgeführt. Dazu wurden bei Großhändlern OSB-Platten vom Typ 3 und 4 in den Stärken 16, 18 und 22 mm der vier großen Hersteller am deutschen Markt gekauft. Aus einer Platte wurden jeweils drei oder vier Proben in der Größe von 315 x 305 mm gesägt. Am Prüfstand wird die zu prüfende Platte luftdicht eingebaut indem sie mit Schraubzwingen gegen den oben beschriebenen EPDM-Dichtring gedrückt wird (vgl. 4.1.1). Die geprüfte OSB-Fläche ergibt sich aus der freibleibenden Innenfläche des Dichtrings von 200 x 200 mm. Die Befestigung liegt dabei am Plattenrand auf und behindert nicht die Prüffläche.



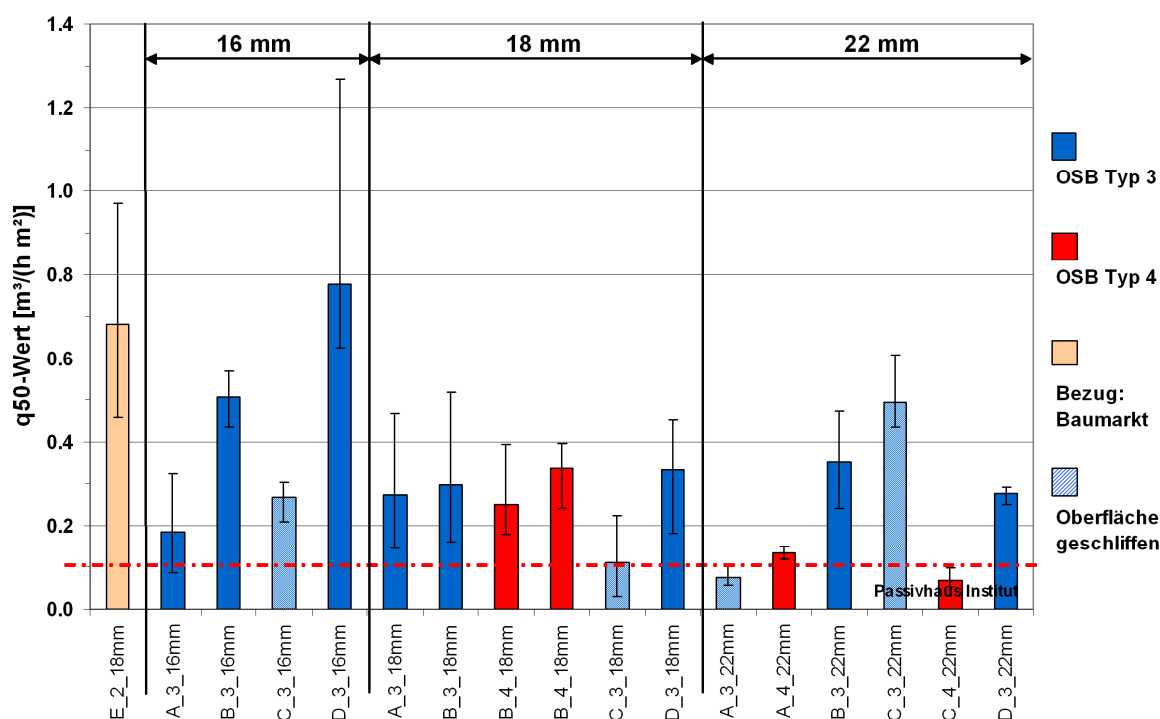
**Abbildung 36: OSB-Plattenprobe mit abgedichtetem Rand (links). Auf der Prüfbox mit Kantholz und Schraubzwingen befestigte OSB-Plattenprobe (rechts)**

Die Messung des Leckagevolumenstroms erfolgte bei Drücken von etwa 100 bis 600 Pa, um ausreichend große Messwerte zu erhalten. Es wurden wieder jeweils Über- und Unterdruckmessungen von jeder Probe durchgeführt. Die Eigenleckage des Messaufbaus wurde wieder unter Nutzung einer vollständig luftdichten Platte regelmäßig gemessen und als Offset von den Messwerten abgezogen. Die Auswertung der Leckagevolumenströme erfolgte wieder beim normierten Druck von 50 Pa. Nach Abzug des Offset-Wertes wird der Leckagevolumenstrom durch die Plattenfläche geteilt um den  $p_{50}$ -Wert zu erhalten.

Bei den Untersuchungen hat sich erwartungsgemäß herausgestellt, dass die Plattenränder durch einen „Flankenvolumenstrom“ einen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis haben. Daher wurden die Ränder der Platten vor den Messungen mit einer Beschichtung luftdicht versiegelt. Durch die geringe Größe der Proben gegenüber der am Bau verwendeten Platten würde der Einfluss sonst deutlich überschätzt. Insgesamt wurden mit Kontroll- und Reproduzierbarkeitsmessungen über 80 Messungen (jeweils Über- und Unterdruck) durchgeführt.

Als Anforderung an die Flächendichtheit wird in [Zeller 2012] ein  $q_{50}$ -Wert von maximal  $0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  gefordert, für Passivhäuser von  $0,06 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ , in [Langmans 2010] sind es  $0,09 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . In Canada gilt sogar eine Anforderung von nur  $q_{50} = 0,048 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  an die Flächendichtheit von Baumaterial. Diese hier vorliegende Untersuchung orientiert sich am moderaten Zielwert von  $0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ .

Eine Übersicht über die Messergebnisse aller untersuchten OSB-Platten zeigt die folgende Abbildung:

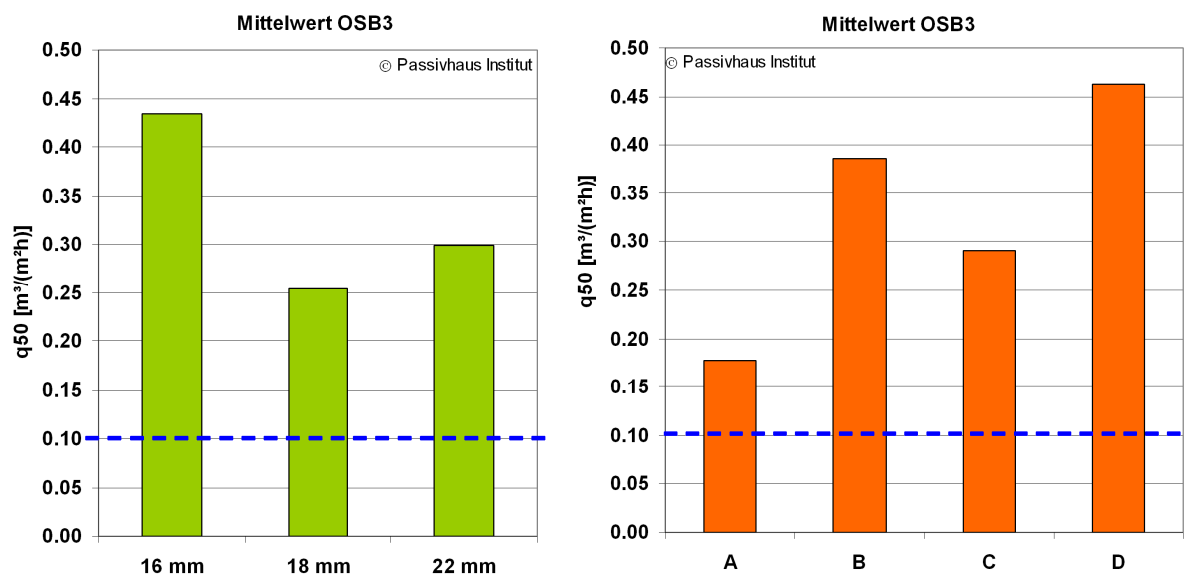


**Abbildung 37: Messergebnisse zur Luftdichtheit von OSB-Platten ( $q_{50}$ -Wert) vom Typ „OSB 3“ und „OSB 4“ von vier Herstellern (A...D) sortiert nach Plattendicke 16, 18 und 22 mm. Zusätzlich ist das Ergebnis einer über einen Baumarkt bezogenen Platte abgebildet. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert aus drei Messungen (Säule) sowie der kleinste und der größte Messwert (I-Strich). Der Zielwert liegt bei  $0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  (rote gestrichelte Linie).**

Die  $q_{50}$ -Messergebnisse in Abbildung 37 zeigen – analog zur Untersuchung von [Langmans 2010] – eine sehr große Streuung der jeweils drei Einzelwerte einer Platte. Die Ursache ist vermutlich in dem nicht homogenen Material mit den typisch-

en, groben Spänen begründet. Die Größenordnungen der Ergebnisse sind ebenfalls vergleichbar mit den Ergebnissen von [Langmans 2010]. Die Mittelwerte (Säule) der Messwerte je Platte liegen beim **OSB Typ 3** zwischen  $0,08$  und  $0,78 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ , die der Einzelmessungen (I-Strich) zwischen  $0,03$  und  $1,27 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Es sind die Mittelwerte und der jeweilige kleinste und größte  $q_{50}$ -Messwert dargestellt. Die vier Hersteller sind mit den Buchstaben A bis D gekennzeichnet. Die vier Messreihen der OSB-Platten vom **Typ 4** liegen mit ihren Mittelwerten (rote Säulen) zwischen  $0,07$  und  $0,34 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ , die zugehörigen Einzelmessungen (I-Strich) zwischen  $0,06$  und  $0,4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Zusätzlich wurde eine im Baumarkt bezogene Platte vermessen und dargestellt (beige Säule).

Nur drei der siebzehn Mittelwerte der Platten liegen unterhalb oder gleich dem Zielwert von  $q_{50} = 0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Dabei handelt es sich um zwei 22 mm Platten (Typ 3 und 4) sowie eine 18 mm Platte (Typ 3). Alle anderen Messwerte sind deutlich über dem Zielwert angesiedelt. Die im Baumarkt bezogene Platte (18 mm) ist deutlich schlechter als die anderen 18 mm Platten aber besser als die schlechteste 16 mm Platte.

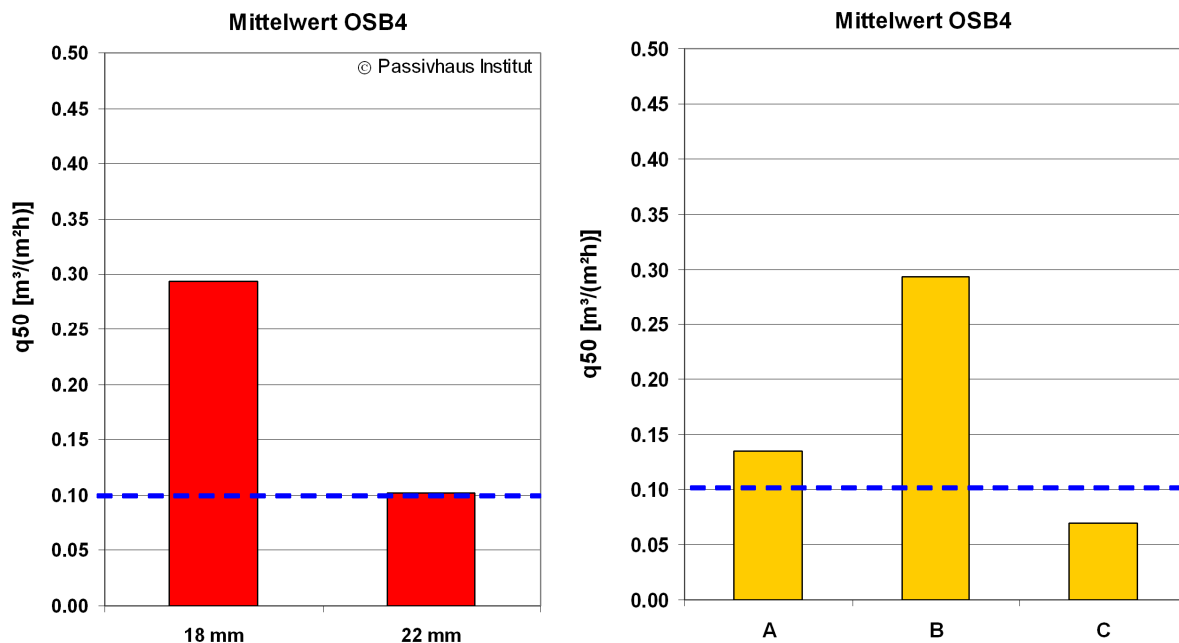


**Abbildung 38: Mittelwerte der Messwerte der OSB-Platten vom „Typ 3“ aus Abbildung 37 nach Plattendicken (links) und nach Herstellern (rechts); gemittelt ohne die Baumarktplatte; blaue Linie: Zielwert  $q_{50} = 0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ .**

Werden alle Messwerte der **OSB-Platten vom Typ 3** einer Materialstärke gemittelt, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 38 (links): Die 18 mm Platten schneiden bei diesen Proben am besten ab und nicht, wie vermutet werden könnte, die dicksten Platten. Alle Werte liegen aber deutlich über dem Zielwert. Auch die Mittelung der Messwerte aller Plattendicken jeweils eines Herstellers zeigt deutliche Unterschiede: Die Platten von Hersteller A zeigen im Mittel weniger als die Hälfte des Volumensstroms von Hersteller D (Abbildung 38 / rechts). Aber auch hier zeigt sich, dass der

Mittelwert des besten Herstellers um 78 % **über** dem Zielwert liegt, der des schlechtesten gar um 360 %.

Werden die gleichen Darstellungen für die Platten vom **Typ 4** erstellt, ergibt sich Abbildung 39. Insgesamt liegen die Messwerte deutlich niedriger als die der OSB-Platten vom Typ 3. Für die 18 mm Platten (zwei Chargen eines Herstellers; zweimal drei Einzelmessungen) ergibt sich ein deutlich schlechterer Mittelwert als bei den 22 mm Platten (zwei Hersteller); diese halten den angestrebten moderaten Zielwert sogar ein. In der rechten Darstellung (Sortierung nach Herstellern) zeigt sich allerdings, dass nur die Platte eines Herstellers den Zielwert unterschreitet.



**Abbildung 39: Mittelwerte der Messwerte der OSB-Platten vom „Typ 4“ aus Abbildung 37 nach Plattendicken (links) und nach Herstellern (rechts). Blaue Linie: Zielwert  $q_{50} = 0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ .**

Die Stichprobe von insgesamt vier Platten mit je vier Proben (16 Messungen) von drei Herstellern ist zwar nur gering, sie gibt aber doch erste Anhaltspunkte zur Einschätzung der Luftdichtheit von OSB 4 Platten. Auch hier muss festgestellt werden, dass der Einsatz von OSB-Platten vom Typ 4 ebenfalls keine generelle Lösung im Bezug auf die Einhaltung des Zielwertes darstellt. Nur die Platte des einen Herstellers unterschreitet den Zielwert eindeutig und kann diesbezüglich empfohlen werden.

### Beispiel Einfamilienhaus

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Luftdichtheit von OSB-Platten auf die Gebäudedichtheit werden für einige Messergebnisse die Auswirkungen auf die Luftdichtheit eines Beispielgebäudes dargestellt:

Ein Einfamilien-Passivhaus in Holzbauweise mit zwei Etagen und Dachgeschoss verfügt über 252 m<sup>2</sup> Innenoberfläche aus OSB-Platten. Die Anforderung an die Luftdichtheit ist mit  $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$  festgelegt. Erfüllen die OSB-Platten den angestrebten Zielwert von  $q_{50} = 0,1 \text{ m}^3 / (\text{m}^2\text{h})$  ergibt sich nur Aufgrund der OSB-Flächen ein Teilbeitrag am  $n_{50}$ -Wert von  $0,05 \text{ h}^{-1}$ . Dieser Leckagevolumenstrom ist problemlos zu verkraften.

Setzt man den Mittelwert aller Hersteller für die Plattenstärke von 18 mm beim OSB Typ 3 aus Abbildung 38 mit  $q_{50} = 0,25 \text{ m}^3 / (\text{m}^2\text{h})$  für alle Flächen an, ergibt sich ein Anteil am  $n_{50}$ -Wert von  $0,13 \text{ h}^{-1}$ . Damit kann die Luftdichtheitsanforderung immer noch eingehalten werden, der gewünschte Sicherheitsabstand wird aber deutlich geringer. Bei der aufwendigen Optimierung aller Anschlussdetails sind  $0,13 \text{ h}^{-1}$  allein durch das Flächenmaterial ein unnötig hoher und vermeidbarer Beitrag (22 % des  $n_{50}$ -Grenzwertes). Bei den Werten des Herstellers mit den höchsten Mittelwerten über alle Stärken beim OSB Typ 3 ( $q_{50} = 0,46 \text{ m}^3 / (\text{m}^2\text{h})$ ), steigt der Anteil am  $n_{50}$ -Wert auf nennenswerte  $0,24 \text{ h}^{-1}$  (entspricht 40 % des  $n_{50}$ -Grenzwertes). Im Sinne ausreichender Reserven für Fugen und unvorhergesehene Undichtigkeiten stellt dies einen inakzeptablen hohen Wert dar.

Der Bau von energieeffizienten Gebäuden wie Passivhäusern mit höheren Anforderungen an die Luftdichtheit in Holzbauweise ist weiterhin auch mit OSB-Platten gut möglich. Der Sicherheitsabstand zum Anforderungswert der Luftdichtheit sinkt mit diesen Qualitäten aber weiter und muss an anderer Stelle ggf. aufwendig und mühevoll durch exaktes Arbeiten etc. ausgeglichen werden.

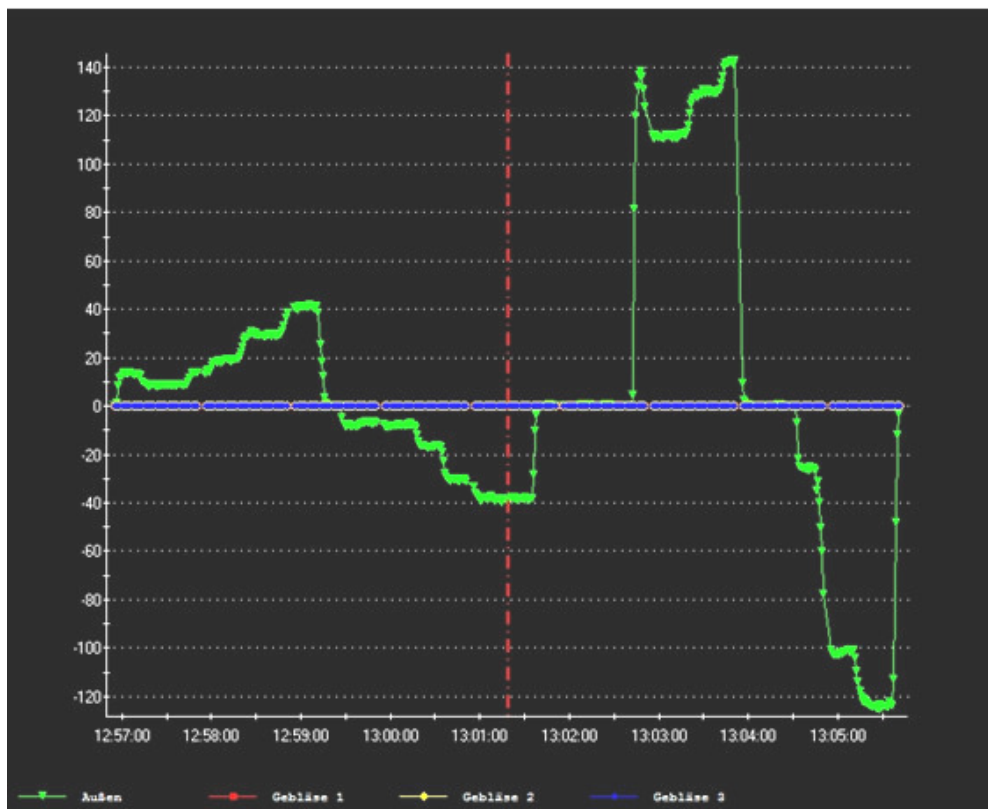
Der Planer, der Lieferant wie auch der ausführende Handwerker hat im Regelfall keine Kenntnis über die Luftdichtheitsqualität der verwendeten OSB-Platten. Im Sinne einer hohen Luftdichtheit der Gebäudehülle zur Sicherstellung der Bauschadensfreiheit und Planungssicherheit muss gefordert werden, dass seitens der Hersteller verbindliche Angaben zur Luftdichtheit gemacht werden; am praktischsten wären Aufdrucke auf den Platten selbst. Denkbar ist anderenfalls auch die Erarbeitung von anderweitigen Lösungsvorschlägen durch die Hersteller um den Planern, Bauausführenden und Investoren die notwendige Qualität und Sicherheit bieten zu können.



## 7 Anhang

### 7.1 Anhang A: Differenzdruckmessung (Beispiel)

Screenshot aus einer beispielhaften Differenzdruckmessung unter Verwendung der Software „Teclog“.

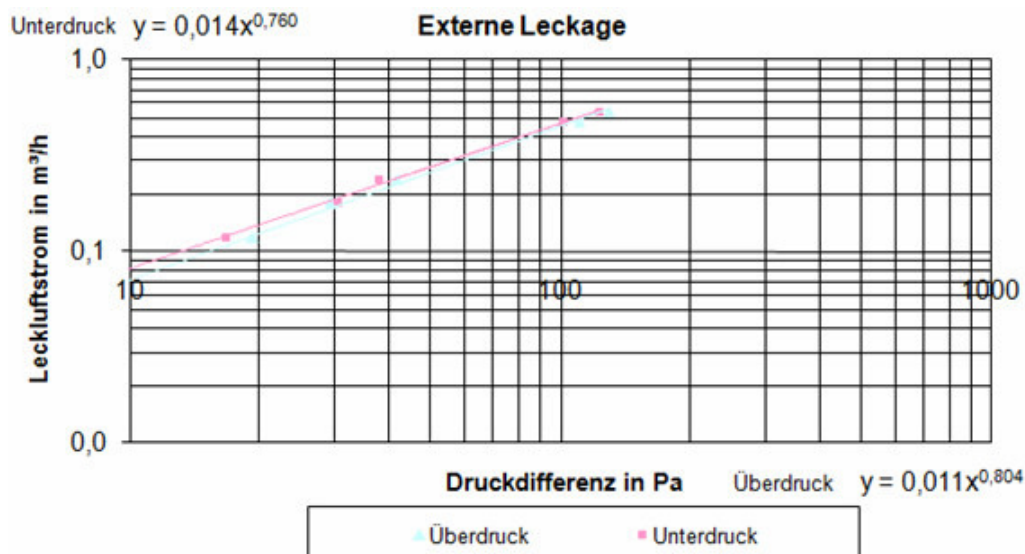


## 7.2 Anhang B: Messdatenauswertung in Excel

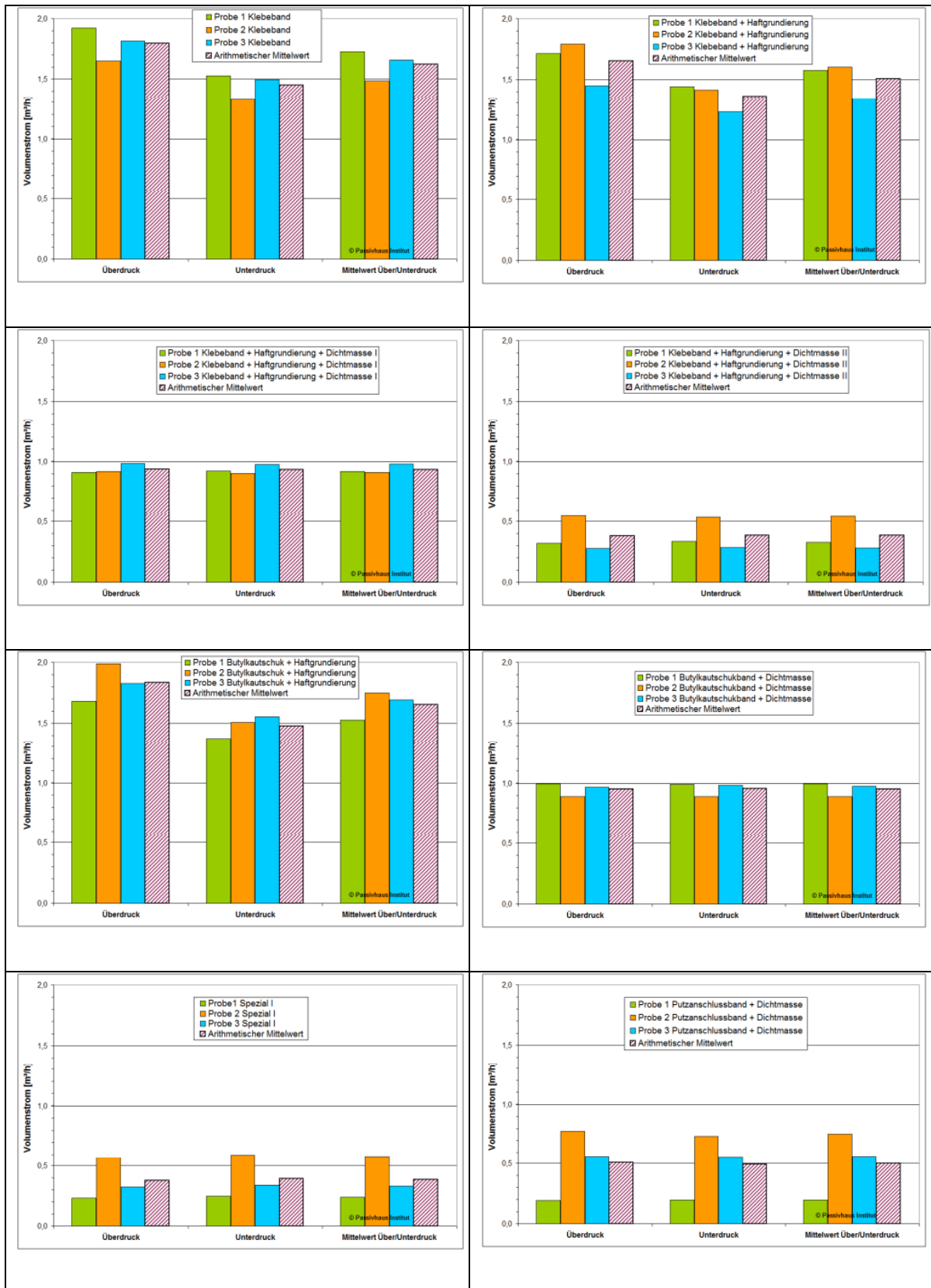
Ausschnitt aus dem Auswertetool mit den Messwertepaaren für Über- und Unterdruck, der Koeffizientenbestimmung „C“ und „n“ zur Ermittlung des Leckagevolumenstroms bei 50 Pa sowie der graphischen Darstellung der Messdaten.

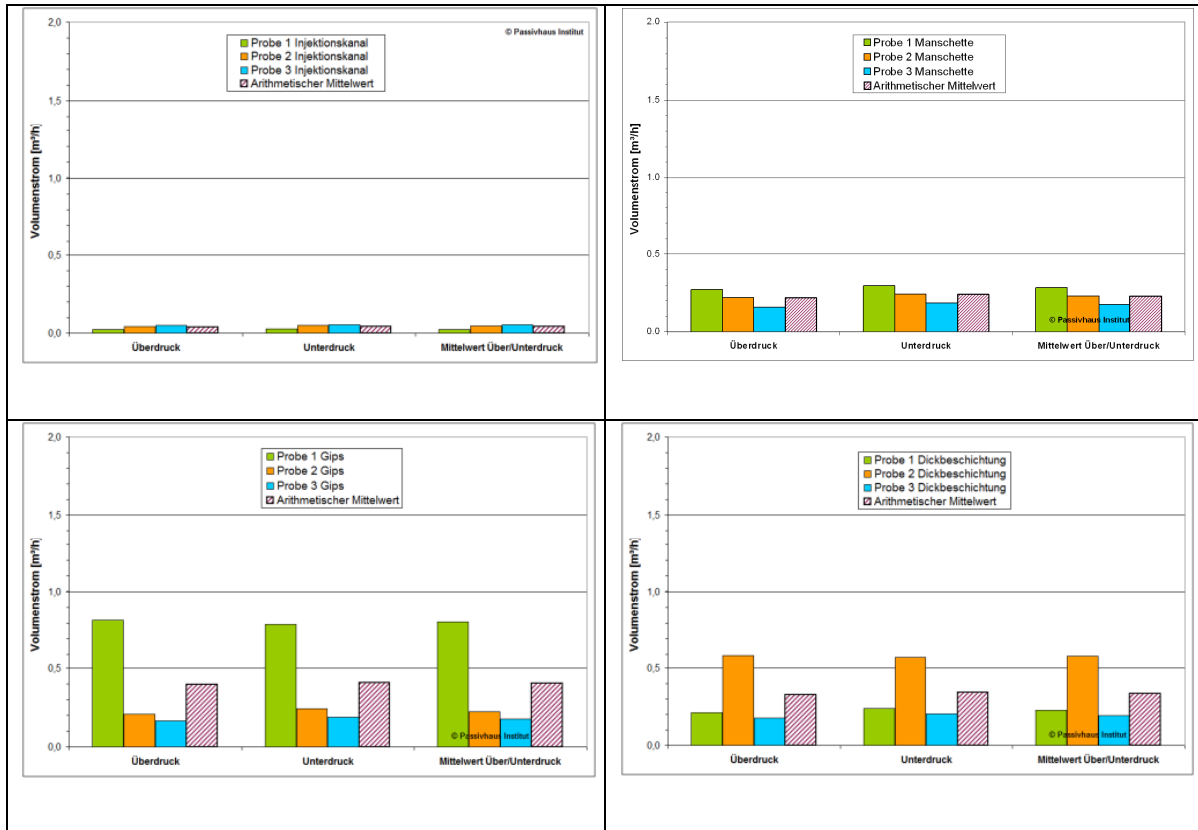
			1	2	3	4	5	6
Überdruck	Druckdifferenz zur Umgebung	Pa	8,6	19,3	29,5	41,7	110,8	129,8
	Leckluftstrom gesamt	m³/h	0,06	0,12	0,18	0,24	0,48	0,54
Unterdruck	Druckdifferenz zur Umgebung Vergleichsmessung	Pa	6,7	16,7	30,5	37,9	101,7	123,8
	Leckluftstrom gesamt	m³/h	0,06	0,12	0,18	0,24	0,48	0,54

Leckluftstrom bei Überdruck :	$\dot{V}_{L, \text{Über}} = 0,0111 \cdot \Delta p^{0,804}$	in m³/h
Leckluftstrom bei 50 Pa:	$\dot{V}_{L, \text{Über}, 50 \text{ Pa}} = 0,26$	m³/h
Leckluftstrom bei Unterdruck :	$\dot{V}_{L, \text{Unter}} = 0,0141 \cdot \Delta p^{0,7604}$	in m³/h
Leckluftstrom bei 50 Pa:	$\dot{V}_{L, \text{Unter}, 50 \text{ Pa}} = 0,28$	m³/h



### 7.3 Anhang C: Messergebnisse Einzelmessungen





## 8 Glossar

**Adsorption:** Als Adsorption bezeichnet man die Anreicherung von Stoffen aus Gasen oder Flüssigkeiten an der Oberfläche eines Festkörpers, allgemeiner an der Grenzfläche zwischen zwei Phasen.

**Anisotropie:** Die Anisotropie bezeichnet die Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft oder eines Vorgangs.

**Dispersion:** Eine Dispersion ist ein Gemenge aus mindestens zwei Stoffen, die sich nicht oder kaum ineinander lösen oder chemisch miteinander verbinden.

**Energetische Sanierung:** Die energetische Sanierung bezeichnet in der Regel die Modernisierung eines Gebäudes zur Minimierung des Energieverbrauchs für Heizung, Warmwasser und Lüftung.

**Fasersättigungsgrenze:** Die Fasersättigungsgrenze bezeichnet einen bestimmten Feuchtezustand von Holz, Unterhalb des Fasersättigungsbereiches wird Feuchtigkeit lediglich als gebundenes Wasser in die Zellwände eingelagert. Bei einem Feuchtegehalt über Fasersättigung kann Holz weitere Feuchtigkeit nur noch in Form von freiem Wasser in den Lumina seiner Zellen aufnehmen, was nur geringen Einfluss auf seine physikalischen und mechanischen Eigenschaften hat.

**Hygroskopie:** Hygroskopie ist die Eigenschaft, Feuchtigkeit aus der Umgebung (meist in Form von Wasserdampf aus der Luftfeuchtigkeit) zu binden.

**Infiltration:** Als Infiltration wird das ungewollte Eindringen von Luft über Fassadenöffnungen bezeichnet. (Ggs. Exfiltration)

**Kapillare:** Eine Kapillare ist ein sehr feiner, langgestreckter Hohlraum.

**Kondensation:** Als Kondensation bezeichnet man den Übergang eines Stoffes vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand. Als Produkt entsteht das Kondensat.

**Konus:** Ein Konus ist ein technisches Bauteil, welches die Form eines Kegels oder Kegelstumpfes aufweist.

**Konvektion:** Konvektion ist ein Mechanismus zur Wärmeübertragung von thermischer Energie von einem Ort zu einem anderen. Konvektion ist stets mit dem Transport von Teilchen verknüpft, die thermische Energie mitführen.

**Leckage:** Eine Leckage ist ein Loch in einem Produkt oder in technischen Systemen, durch das Feststoffe, Flüssigkeiten oder Gase unerwünscht ein- oder austreten können.

**Luftwechselrate:** Die Luftwechselrate (Einheit: 1/h) gibt an, wie oft das Innenraumvolumen pro Stunde umgesetzt wird.

**Partialdruck:** Der Partialdruck ist der Druck, der in einem Gemisch aus idealen Gasen einer einzelnen Gaskomponente zugeordnet ist. Der Partialdruck entspricht dem Druck, den die einzelne Gaskomponente bei alleinigem Vorhandensein im betreffenden Volumen ausüben würde.

**Relative Luftfeuchtigkeit:** Die relative Luftfeuchtigkeit ist das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Dampfdruck des Wassers und dem Sättigungsdampfdruck desselben (bei der Lufttemperatur) über einer reinen und ebenen Wasseroberfläche.

**Sättigungsdampfdruck:** Der Sättigungsdampfdruck ist der Druck der dampfförmigen Phase eines Stoffes, wenn die flüssigförmigen und dampfförmigen Phasen sich im Gleichgewicht befinden.

**Taupunkt:** Als Taupunkt bezeichnet man die Temperatur, bei der sich auf einem Gegenstand (bei vorhandener Feuchte) ein Gleichgewichtszustand an kondensierendem und verdunstendem Wasser einstellt, mit anderen Worten die Kondensatbildung gerade einsetzt.

**Turbulente Strömung:** Beschreibt die Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen, bei der Verwirbelungen auf allen Größenskalen auftreten. (Ggs. Laminare Strömung)

**Wärmekapazität:** Die Wärmekapazität gibt an, wie viel thermische Energie ein Körper bezogen auf die Temperaturänderung speichern kann.

## 9 Literaturverzeichnis

- [AkkP 32] Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung; Protokollband Nr. 32 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2005
- [Buildair 2013] Peper, S.; Bangert, A.; Rupps, W.; Bastian, Z.: Messungen zur Andichtung von Holzbalkenköpfen und Luftdichtheit von OSB-Platten. In: Tagungsband, 8. Internationales BUILDAIR-Symposium, 2013, Hannover
- [BL 2010] Borsch-Laaks, Robert: Wie undicht ist dicht genug? Zur Zulässigkeit von Fehlstellen in Luftdichtheitsschichten und Dampfsperren. In: Aachener Bausachverständigentage 2009 (2010), S. 119-132
- [Borsch-Laaks et al. 2009] Borsch-Laaks, Robert; Zirkelbach, Daniel; Künzel, Hartwig; Schafaczek, Beate: Trocknungsreserven schaffen. In: Tagungsband zur AIVC/ BUILDAIR - Konferenz, 1./2.10.2009 in Berlin
- [Bangert 2012] Bangert, Armin, „Recherche, Analyse und messtechnische Untersuchung am Markt erhältlicher Produkte zur luftdichten Integration alter, rissiger Holzbalken in die luftdichte Ebene der Gebäudehülle“, Bachelorarbeit, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2012
- [BW 2008] Bolender, Torsten; Weissmüller, Armin: Gründe für eine Luftdichtheit der Gebäudehülle. In: Gebäude-Luftdichtheit, FLiB-Buch, Band 1, Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen, 2008, Kassel
- [DIN 4108-T7] DIN 4108, Teil 7: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7, Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele; (August 2001; Vornorm Mai 1996), Beuth Verlag 2011
- [DIN EN 12114] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden; Luftdurchlässigkeit von Bauteilen, Laborprüfverfahren (April 2000)



- [DIN EN 15242] DIN EN 15242: Lüftung von Gebäuden - Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Luftvolumenströmen in Gebäuden einschließlich Infiltration. Beuth Verlag, September 2007
- [DIN EN ISO 13790] DIN EN ISO13790: Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung; Beuth Verlag, September 2008
- [DIN EN 13829] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden; Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden (November 2000)
- [Feist 2003] Feist, Wolfgang: Wärmebrücken und Verbesserung der Luftdichtheit im Altbau. In: Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung; Protokollband Nr. 24 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2003.
- [Fingerling 1995] Fingerling, K.-H.: Niedrigenergiehaus-Fachwerkhaus, gefördert durch das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, Kassel/Wiesbaden 1995
- [GDHeV] Gesamtverband Deutscher Holzhandel e.V.: Trocknungsbedingt Risse bei Holz
- [Hasper 2010] Hasper, Wolfgang; Kaufmann, Berthold; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Speichergebäudes mit aufgesprühter Zellulose-Innendämmung. Bauphysikalische Begleitmessung. IEA SHC Task 37. Passivhaus Institut Darmstadt, 2010
- [Hol] Holzendorf, Ulf: Holz als Werkstoff – Holz arbeitet. In: Informationsmaterial, Institut für Arbeitslehre/Technik, Universität Potsdam
- [Hol 2011] In: Tagungsband Holzschutz & Bauphysik (2011)
- [Kronospan] Herstellerinformation zum Produkt „Air Stop Finish“ des Herstellers „Kronospan OSB, spol. s r.o.“ Tschechien
- [Künzel et al. 2010] Künzel, Hartwig; Binder, Andrea; Schafaczek, Beate: Berücksichtigung der Wasserdampfkonvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen. In: wksb 65 (55. Jahrgang), Mai 2010

- [Langmans 2010] Langmans, J.; Klein, R.; Roels S.: Air permeability requirements for air barrier materials in passive houses – Comparison of the air permeability of eight commercial brand of OSB, In: 5th International Symposium on Building and Ductwork Air-tightness (October 21-22, 2010, Copenhagen/Lyngby, Denmark)
- [Maas/Gross 2010] Maas; A.; Gross R.: Qualitätssicherung klebemassenbasierter Verbindungstechnik für die Ausbildung der Luftdichtungsschichten. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel 2010
- [Müller 2011] Müller, Uwe: Holzbalkenköpfe in historischem Mauerwerk. Zwischen Luftumspülung und Innendämmung. In: Tagungsband 2. Intern. Holz[Bau]Physik-Kongress; Leipzig, 2011
- [Peper/Feist/Sariri 1999/2009] Peper, Søren; Feist, Wolfgang; Sariri, Vahid: Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, Eine Planungshilfe, CEP-HEUS-Projektinformation Nr. 7, Fachinformation PHI-1999/6, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999, 10. Auflage 2009
- [Peper et al. 2005] Peper, Søren; Kah, Oliver; Feist, Wolfgang: Zur Dauerhaftigkeit von Luftdichtheitskonzepten bei Passivhäusern, Feldmessungen. Forschungsbericht im Rahmen vom IEA SHC TASK 28 / ECBSC ANNEX 38. Passivhaus Institut, Darmstadt, Juni, 2005.
- [Pfluger 2005] Pfluger, Rainer: Feuchtetransportvorgänge in Außenbauteilen mit Innendämmung. In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005
- [PHT 2012] Bangert, A.; Peper, S.; Bastian, Z.: Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene. In: Tagungsband 16. Internationale Passivhaustagung 2012, Hannover (Seite 531 - 536). Passivhaus Institut Darmstadt
- [VDI/VDE 3513 Blatt 2] VDI/VDE 3513 Blatt 2: Schwebekörperdurchflussmesser; Fehlergrenzen G des Gerätes, Beuth Verlag, August 2008
- [Worch 2010] Worch, Anatol: Innendämmung nach WTA – Das Merkblatt 6 – 4. (2010)

- [WSVO 1995] Verordnung über einen enegiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV). (Inkraftgetreten: 01.01.1995); Bundesgesetzblatt, Bonn 16.08.1994
- [Zeller 2008] Zeller, Joachim: Messung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. In: Gebäude-Luftdichtheit, FLiB-Buch, Band 1, Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen, 2008, Kassel
- [Zeller 2012] Zeller, J.: Luftdichtheitsanforderungen an Materialien – Wie dicht müssen Bauprodukte sein, die die Luftdichtheit herstellen sollen? Buildair 2012, Stuttgart