

**Recherche, Analyse und
messtechnische Untersuchung am
Markt erhältlicher Produkte zur
luftdichten Integration alter, rissiger
Holzbalken in die luftdichte Ebene der
Gebäudehülle**

Bauschadenvermeidung & Wärmeschutz

Bachelorarbeit

im Studiengang

Umwelttechnik (Schwerpunkt: Nachhaltiger Energieeinsatz)

vorgelegt von

Armin Bangert



am 29. Februar 2012

an der Hochschule für angewandte Wissenschaften
Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Armin Gregorzewski

Zweitprüfer/in: Dipl.-Ing. Søren Peper

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen beiden Korrektoren. Herrn Prof. Dr. Armin Gregorzweski möchte ich nicht nur dafür danken, dass er sich die Zeit genommen hat meine Arbeit zu betreuen, sondern vor allem dafür, dass er über das gesamte Studium hinweg ein offenes Ohr für die Studenten hatte. Bei Herrn Dipl.-Ing. Søren Peper möchte ich mich vor allem für die ausgezeichnete Betreuung während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Danken möchte ich auch allen weiteren Mitarbeitern des Passivhaus Instituts in Darmstadt, die mir stets mit gutem Rat beiseite standen.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung, Motivation und das Vertrauen in den letzten Jahren bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Kurzfassung	9
Abstract	9
1 Motivation	10
2 Grundlagen	11
2.1 Luftdichtheit in Gebäuden.....	11
2.1.1 Warum luftdicht bauen?.....	11
2.1.2 Luftdichtheitsprüfung	14
2.1.3 Besonderer Anspruch „Innendämmung“	16
2.2 Balkenköpfe in Altbauten.....	19
2.2.1 Rissbildung und Rissarten.....	20
2.2.2 Bauschäden durch Feuchte.....	21
2.3 Versuchsgrundlagen	21
2.3.1 Versuchsaufbau	22
2.3.2 Grundlagen Herstellerlösungen	27
2.4 Alternative Ansätze	31
2.4.1 Gezielte Wärmeenergiezufuhr	31
2.4.2 Maßnahmen ohne Wärmeenergiezufuhr	31
3 Hauptteil	32
3.1 Versuchsdurchführung	32
3.2 Auswertung – Grundlagen.....	32
3.2.1 Volumenstromkorrektur	33
3.2.2 Mittelwert und Standardabweichung.....	34
3.3 Auswertung der untersuchten Methoden zur Holzbalkenandichtung.....	34
3.3.1 Klebeband	35
3.3.2 Klebeband + Haftgrundierung.....	37
3.3.3 Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse	39
3.3.4 Butylkautschukband + Haftgrundierung	43
3.3.5 Butylkautschukband + Dichtmasse.....	45
3.3.6 Speziallösung I.....	46

3.3.7	Speziellösung II	50
3.3.8	Putzanschlussband + Dichtmasse	51
3.4	Methodenvergleich	53
3.5	Bewertung mit Blick auf den Feuchteschutz	56
3.6	Bewertung mit Blick auf den Wärmeschutz	59
3.7	Handlungsempfehlung	60
4	Zusammenfassung	62
5	Ausblick	64
	Anhang A – Datenblätter	65
	Anhang B – Differenzdruckmessung (Beispiel)	72
	Anhang C – Messdatenauswertung in Excel	73
	Anhang D – Berechnung Differenzdruck für Wärmeschutz und Feuchteschutz	74
	Glossar	75
	Literaturverzeichnis	77
	Stichwortverzeichnis	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1.1: Die Luftdichtheitsebene lässt sich mit einem Stift abfahren, ohne dabei absetzen zu müssen (Quelle: PHI – Altbauhandbuch).....	12
Abbildung 2.1.2: Konvektiver Feuchteintrag bei „hinterlüfteter“ Innendämmung (Quelle: PHI, [Pfl2005])	13
Abbildung 2.1.3: Prinzipieller Messaufbau für eine Luftdichtheitsprüfung (Quelle: PHI, [Pep2009])	15
Abbildung 2.1.4: Taupunktverschiebung bei Innendämmung (mit Online Tool berechnet); oben: Mauerwerk mit Außendämmung, Mitte: Mauerwerk ohne Dämmung, unten: Mauerwerk mit Innendämmung.....	17
Abbildung 2.1.5: Darstellung der prinzipiellen Temperaturschwankung im Jahresverlauf innerhalb eines innen gedämmten Außenmauerwerks (Quelle: [Gän2008]).....	18
Abbildung 2.2.1: Anisotropes Schwinden und Quellen von Holz (Quelle: [Hol])	20
Abbildung 2.2.2: Verlauf von Trockenrissen bei unterschiedlichen Einschnittarten (links.: Vollbalken; Mitte: Halbbalken; rechts: Viertelbalken) (Quelle: [GDHeV]).....	20
Abbildung 2.3.1: li.: schematischer Versuchsaufbau aus [DIN_EN12114]; re.: Laborversuchsaufbau am Passivhaus Institut (A: Membranvakuumumpfen; B: Schwebekörper-Durchflussmesser; C: Kasten mit Blende; D: Messeinrichtung zur Bestimmung der Umgebungsbedingungen; E: Differenzdruckmessung)	22
Abbildung 2.3.2: 3D-Modell Musterbalken (Länge: 25 cm, Kantenlänge: 8 x 8 cm, Rissfläche: 2 cm ²)	23
Abbildung 2.3.3: Funktionsprinzip Membranvakuumpumpe (grün: Saugseite; rot: Druckseite) (Quelle: http://www.knf.de/index.php?id=3)	24
Abbildung 2.3.4: Kräfteverteilung am Schwebekörper-Volumenstrommessgerät; F_r = Kraft als Folge des Strömungswiderstandes; F_A = Auftriebskraft; F_G = Schwerkraft (Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Schwebek%C3%B6rper-Durchflussmesser).....	25
Abbildung 2.3.5: Blende mit Balkendurchdringung	26
Abbildung 2.3.6: Speziallösung mit pastöser Funktionsbeschichtung (Quelle: Dörken GmbH & Co. KG).....	30
Abbildung 2.3.7: Speziallösung mit dauerelastischer Raupe	30
Abbildung 3.3.1: Bilderserie Klebeband; oben links: erster Klebebandstreifen, an Ecken eingeschnitten; oben rechts: verbleibendes Loch bei überlappenden Klebebandstreifen; unten links, rechts: Abschließen der Andichtung mit einem dritten und vierten Klebebandstreifen.....	36
Abbildung 3.3.2: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	37
Abbildung 3.3.3: Balken mit Haftgrundierung.....	38
Abbildung 3.3.4: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband + Haftgrundierung“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	39

Abbildung 3.3.5: Eindringtiefe der Dichtmasse in den Spalt (links: KHD II; rechts: KHD I).....	40
Abbildung 3.3.6: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse I“ („KHD I“) für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	41
Abbildung 3.3.7: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse II“ („KHD II“) für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	42
Abbildung 3.3.8: Vergleich der Mittelwerte von je drei Messungen für „KHD I“ und „KHD II“.....	43
Abbildung 3.3.9: Verarbeitung Butylkautschukklebeband (links: Verklebung in einem Stück; rechts: recht geringe Eindringtiefe der elastischen Klebemasse).....	44
Abbildung 3.3.10: Messergebnisse für die Andichtung mit „Butylkautschukband + Haftgrundierung“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	45
Abbildung 3.3.11: Messergebnisse für die Andichtung mit „Butylkautschukklebeband + Dichtmasse“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	46
Abbildung 3.3.12: Bilderserie Verarbeitung „Speziallösung I“ (oben links: erste Schicht pastöser Masse auf Balken und Blende; oben rechts: Anpassung Vlies an Durchdringung; unten links: fertig angepasstes und angedrücktes Vlies, Schlaufen deutlich zu erkennen; unten rechts: zweite Schicht pastöser Masse / durchtränktes Vlies)	47
Abbildung 3.3.13: Komplette mit Masse verfüllter Riss	48
Abbildung 3.3.14: Messergebnisse für die Andichtung mit „Speziallösung I“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	49
Abbildung 3.3.15: Verarbeitung „Speziallösung II“	50
Abbildung 3.3.16: Ungenügender Andichtungsversuch mit Luftdichtheitsfolie	51
Abbildung 3.3.17: Dreieck aus überstehendem Anschlussband an der Balkenecke (nach Herstellvorgabe).....	52
Abbildung 3.3.18: Messergebnisse für die Andichtung mit „Putzanschlussband + Dichtmasse“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert	53
Abbildung 3.4.1: Vergleich der Leckageströme aller durchgeführten Versuche bei 50 Pa Druckdifferenz (jeweiliger Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung) mit Angabe der durch die Standardabweichung des Mittelwertes vorgegebenen Intervallgrenzen	54
Abbildung 3.5.1: Abschätzung zum konvektiv in eine Wandkonstruktion eingebrachte Wasserdampfmenge für die untersuchten Andichtungsmethoden @ 14 Pa	58
Abbildung 3.6.1: Wärmeverluste bezogen auf die Nutzenergie als Folge der Undichtheit an einer einzelnen Holzbalkendurchdringung für die gegebenen Parameter @ 7 Pa	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.3-1: Produktmatrix (Methode = Produkt I + Produkt II + Produkt III)	28
---	----

Abkürzungsverzeichnis

Bft	Beaufort (Skala)
EqLA	Equal Leak Area
FLiB	Fachverband für Luftdichtheit im Bauwesen e.V.
KHD	Klebeband + Haftgrundierung + Dichmasse
OSB	Oriented Strand Board
PHI	Passivhaus Institut

Kurzfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit werden verschiedene am Markt erhältliche Produkte zur Andichtung von Holzbalkendurchdringung an die luftdichte Ebene der Gebäudehülle vorgestellt und auf ihren Erfolg hin untersucht.

Eine Vielzahl der Fachhersteller wurde zu obenstehender Problematik befragt und um Materialproben ihrer Lösungsvorschläge gebeten. Die zur Verfügung gestellten Materialien wurden daraufhin an einer künstlich erzeugten Holzbalkendurchdringung in einem an die **[DIN_EN12114]** angelehnten Versuch auf ihre Luftdichtheit hin untersucht.

Als Ergebnis der Untersuchung konnte eine Handlungsempfehlung bezüglich der erfolgsversprechenden und praktisch durchführbaren Andichtung von Holzbalkendurchdringungen gegeben werden. Die Kenntnis über die sich durch die verbleibende Undichtheit einstellenden Leckagevolumenströme erlaubt außerdem Abschätzungen im Bezug auf Wärmeverluste und den konvektiven Feuchteeintrag in den Wandaufbau.

Schlagwörter:

Holzbalkenkopfdurchdringung, Luftdichtheit, Leckage

Abstract

This bachelor thesis examines the performance of several products available on the market for sealing of beam end penetrations of the air-tight building envelope.

Miscellaneous manufacturers specialized on “air-tightness of buildings” were consulted about the problem at hand and asked to provide samples of their proposed solutions. Their provided materials were examined in an experimental setup referring to the **[DIN_EN12114]**.

Resulting from this investigation a recommended course of action is given. The knowledge of the remaining leakage flow also allows further considerations in relation to the heat loss and convective moisture ingress into the wall construction.

Keywords:

Penetration of beam ends, air-tightness, leakage

1 Motivation

Die energetische Sanierung von Altbauten gewinnt zunehmend an Bedeutung. So ist im Energiekonzept der Bundesregierung¹ eine jährliche Sanierungsrate von 2 % vorgesehen. Wie in **[Sto2010]** erwähnt, darf bei einer energetischen Aufbesserung des Gesamtgebäudebestandes in Deutschland – wovon 80 % vor dem Jahr 1970 errichtet wurden – keine Ausnahme bei denkmalgeschützten Gebäuden und solchen mit einer erhaltenswerten Fassade gemacht werden. Ansonsten ist die Einhaltung der Klimaschutzziele in Gefahr. Mit diesen wird bis 2020 eine Reduktion der Treibhausgasemission um 40 % gegenüber dem Jahr 1990 angestrebt. Bei oben genannten Gebäudetypen ist die Ausführung einer Innendämmung als wärmeisolierende Schicht der Gebäudehülle in der Regel unvermeidbar. Hierbei ist eine besonders ausführliche und gewissenhafte Planung entscheidend, um Bauschäden durch ungewollten Feuchteintrag in den Wandaufbau zu vermeiden.

In energetisch anspruchsvollen Sanierungsprojekten stellen gerade alte, rissige Holzbalkenköpfe Planer wie Handwerker vor nicht einfache Aufgaben. Auch die **[DIN4108_7]** liefert hierzu keine Antworten. Selbst unter Wissenschaftlern gibt es keinen Konsens darüber, wie mit Balkendurchdringungen in Gebäudehüllen umzugehen ist. Die Gefahr besteht in der mangelhaften Einbindung von Balkenköpfen in die luftdichte Ebene des Gebäudes (siehe *Kapitel 2.1.1*). Die Wahrscheinlichkeit eines Bauschadens durch konvektiven Feuchteintrag in den kalten Außenwandbereich steigt dadurch stark an (siehe *Kapitel 2.1.1 Feuchteschutz*).

Wie in *Kapitel 2.1.1* beschrieben, spielt die Luftdichtheit der Gebäudehülle eine entscheidende Rolle bei energieeffizienten Gebäuden. Es sind vor allem Detailfragen wie die Einbindung rissiger Balkenköpfe, die über die erreichte Luftdichtheit eines sanierten Gebäudes entscheiden. Mitunter kann eine angestrebte Förderung des Sanierungsvorhabens an einem zu schlechten Luftdichtheitswert scheitern. Außerdem entsteht durch die Undichtheit der Gebäudehülle zusätzlicher Heizenergiebedarf, welcher sich nach **[DIN_EN_ISO13790]** berechnen lässt. Die innerhalb dieser Bachelorarbeit durchgeführten Untersuchungen liefern einen weiteren Beitrag zur Qualitätssteigerung bei der Ausführung einer luftdichten Ebene in der Altbausanierung.

Eine wissenschaftliche Untersuchung am Markt erhältlicher Produkte, die sich potenziell für die luftdichte Einbindung alter, rissiger Holzbalkenköpfe in die luftdichte Ebene eignen, ist also aus Gründen der Bauschadenvermeidung und der Minimierung des Heizwärmebedarfes bei Altbausanierungen sinnvoll.

¹ http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf

2 Grundlagen

2.1 Luftdichtheit in Gebäuden

„Dicht bedeutet heute grundsätzlich, dass die gesamte Gebäudehülle so luftdicht ist, wie eine gemauerte, verputzte Wand“ **[ZB1998]**.

Mit der Energiekrise 1973 stieg in Deutschland die Sensibilität für energierelevante Themen. Da die Luftdichtheit der Gebäudehülle einen wesentlichen Beitrag zur Energieeffizienz im Bau liefert (siehe *Kapitel 2.1.1 Wärmeschutz*), wurde auch dieser nun mehr Beachtung zu teil. Jedoch war der Dämmstandard Mitte der 1970er Jahre noch so unzureichend, dass Lüftungswärmeverluste in Folge von Undichtigkeiten nicht besonders ins Gewicht fielen. Erst eine Verbesserung der Gebäudeisolierung zeigte durch den prozentualen Anstieg der Lüftungswärmeverluste an den Gesamtwärmeverlusten den Forschungsbedarf an der Luftdichtheit von Gebäuden. 1995 wurde ein erster Versuch unternommen in Deutschland eine Normung zur Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle vorzunehmen. Die **[WSVO1995]** fordert erstmals in §4 (1) explizit den Einbau einer „luftundurchlässigen Schicht über die gesamte Fläche“. Mit der Herausgabe der **[DIN4108_7]** im darauffolgenden Jahr (Vornorm Mai 1996) wurde Praktikern und Planern Handlungsempfehlungen für verschiedenste Detaillösungen gegeben. Weitere Informationen zu der historischen Entwicklung der luftdichten Ausführung von Gebäudehüllen sind **[Fin2008]** zu entnehmen.

2.1.1 Warum luftdicht bauen?

Die Ausführung einer luftdichten Gebäudehülle ist nach heutigem Forschungserkenntnissen alternativlos. Dies ist durch den mit der Luftdichtheit des Gebäudes gesteigerten 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 **[BW2008]**. Die Lage der luftdichten Ebene ist dabei stark abhängig vom Wandaufbau und den verwendeten Baumaterialien. *Abbildung 2.1.1* zeigt den idealen Verlauf der Luftdichtheitsebene. Diese muss mit einem Stift abgefahren werden können, ohne dabei absetzen zu müssen. Die Vermeidung von Durchdringungen der luftdichten Ebene (durch Elektroinstallation, Balkenköpfe, Geschossdecken, etc.) ist Bestandteil eines sorgfältig ausgeführten Luftdichtheitskonzeptes des verantwortlichen Planers.

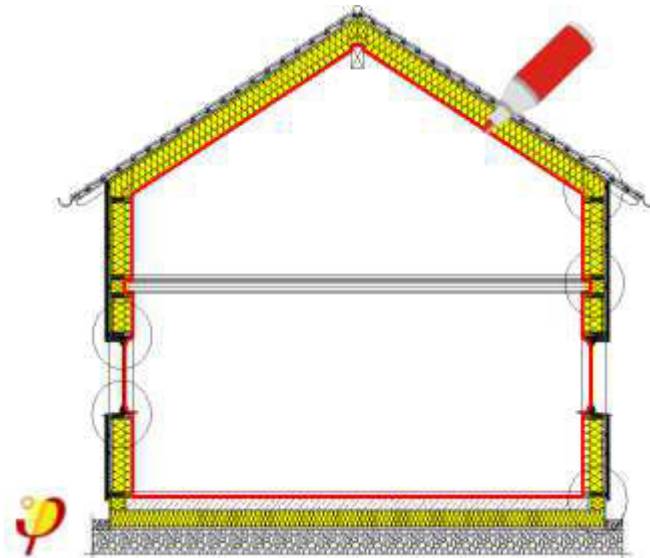


Abbildung 2.1.1: Die Luftdichtheitsebene lässt sich mit einem Stift abfahren, ohne dabei absetzen zu müssen (Quelle: PHI – Altbauhandbuch)

Wärmeschutz

Es ist leicht nachvollziehbar, dass im Winter der unkontrollierte Luftaustausch zwischen dem Inneren eines Gebäudes und der Umgebung einen erhöhten Heizwärmebedarf verursacht. Zwei Faktoren führen zu Druckunterschieden über der Gebäudehülle, welche als treibende Kraft für den gerade erwähnten Luftaustausch fungieren.

Über die Gebäudehülle variierende Druckdifferenzen in Folge von Windlasten haben Luftströmungen zwischen innen und außen zur Folge. Die Abhängigkeit von der Umgebung, in der sich ein Objekt befindet, spielt hier eine große Rolle. 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_EN15242]** nachvollziehen.

Weiterhin treten als Folge von Heizung und Klimatisierung temperaturbedingte Druckunterschiede auf. Wärmere Luftschichten weisen eine geringere Dichte auf als kältere und steigen deshalb nach oben. Der Druckunterschied lässt sich deshalb wie folgt berechnen:

$$\Delta p = g \cdot h \cdot (\rho_1 - \rho_2) \quad \left[Pa = \frac{kg}{m \cdot s^2} \right] \quad (1)$$

Eine mangelhaft ausgeführte Luftdichtheitsebene führt aus den oben genannten Gründen in Deutschland in den Wintermonaten zu einem bedeutenden Anstieg des Heizwärmebedarfes. Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes soll hier ein kurzes Beispiel aus **[BW2008]** herangezogen werden. „Es sei eine Hauseingangstür angenommen, die... einen Spalt von 5-10 mm Höhe aufweist. ... bei einer Spaltbreite von 1 m und einer Spalttiefe von 70 mm kann ein Volumenstrom von ca. 45 bis 90 m³/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_ISO13790] heranzuziehen.

Feuchteschutz

Der konvektive Feuchteintrag in den Wandaufbau ist verantwortlich für eine Vielzahl von Bauschäden. Feuchtwarme Luft aus dem Innenraum durchströmt unter den in *Kapitel 2.1.1 Wärmeschutz* erläuterten Bedingungen die Gebäudehülle von innen nach außen. Dabei sind direkte Strömungen zwischen Innenraum und Umgebung feuchtetechnisch auf Grund der relativ hohen Strömungsgeschwindigkeit und der kurzen Strömungswege eher unkritisch zu bewerten. Wird jedoch eine Innendämmung auf der kalten Seite über einen längeren Weg hinterströmt (siehe *Abbildung 2.1.2*) ist das Risiko eines Schadens sehr groß (vgl. [BL2009] und [Kün2010]). 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.

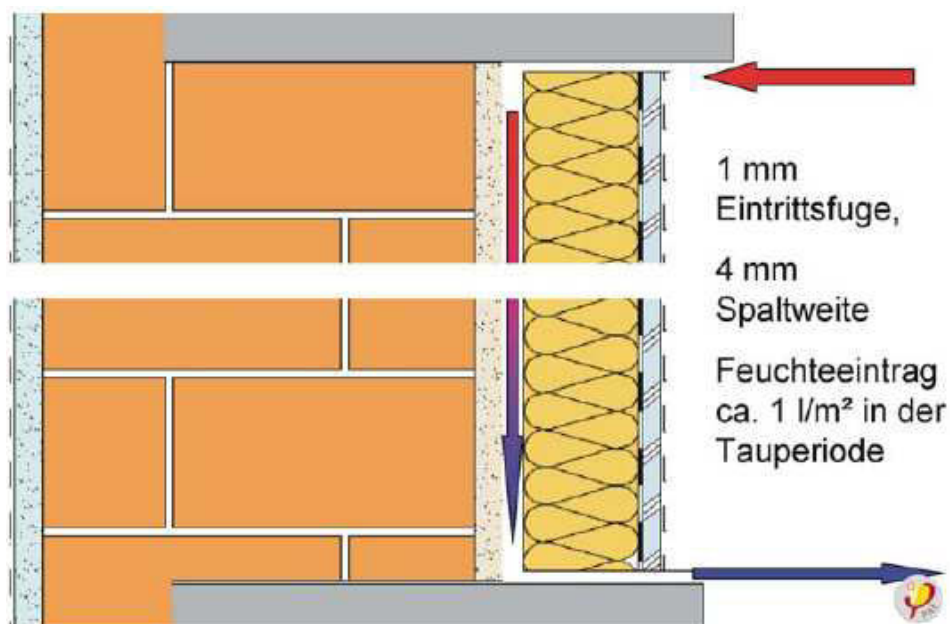


Abbildung 2.1.2: Konvektiver Feuchteintrag bei „hinterlüfteter“ Innendämmung (Quelle: PHI, [Pfl2005])

Ein gerade in Details sorgfältig ausgeführtes Luftdichtheitskonzept reduziert solche gefährlichen Hinterströmungen und damit Bauschäden in Folge von konvektivem Feuchteintrag auf ein Minimum.

Brandschutz

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 an dieser Stelle auf **[BW2008]** verwiesen.

Schallschutz

Durch luftdurchströmte Leckagen wie Fugen und Löcher kann sich Schall ausbreiten und so den Schallschutz verschlechtern. Dies kann besonders in Mehrfamilienhäusern schnell zu Problemen führen. Für weitere Informationen soll auch hier auf **[BW2008]** verwiesen werden.

Kontrollierte Lüftung

Für den 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 stärkerer Heizenergiebedarf und mehr Kosten gegenüber dem optimalen Betrieb sind die Folge.

2.1.2 Luftdichtheitsprüfung

Bei der Luftdichtheitsprüfung eines Gebäudes wird mit Hilfe eines Gebläses, welches meist in die Eingangstür eingebracht wird, eine Serie von unterschiedlichen Druckdifferenzen gegenüber der Umgebung erzeugt (siehe *Abbildung 2.1.3*). Diese Druckdifferenzstufen liegen im Bereich von ca. 10-100 Pa Über- beziehungsweise 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 **[Zel2008]**.

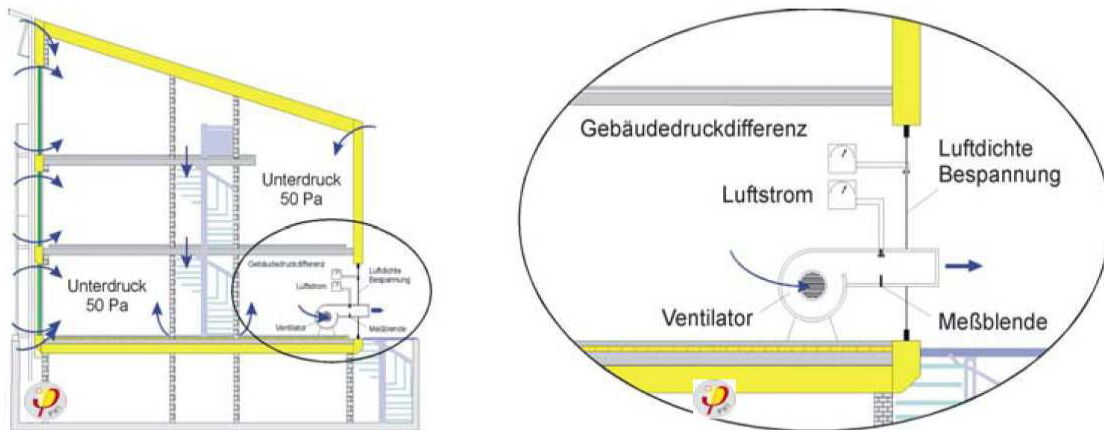


Abbildung 2.1.3: Prinzipieller Messaufbau für eine Luftdichtheitsprüfung (Quelle: PHI, [Pep2009])

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 (4) beschreiben. Zur Findung der Geradengleichung wird die „Methode der kleinsten Quadrate“ angewandt. Aus den so erhaltenen Parametern der Geradengleichung lässt sich unter Verwendung der allgemeinen Strömungsgleichung (2) der Strömungskoeffizient C und der Strömungsexponent n gewinnen. Auf diese Weise lässt sich der Volumenstrom bei 50 Pa bestimmen. Dieser wird in der Norm als Leakagestrom bezeichnet.

$$\dot{V} = C * \Delta p^n \left[\frac{m^3}{h} \right]; \text{ Strömungsgleichung} \quad (2)$$

$$y = a * x + b; \text{ Geradengleichung} \quad (3)$$

$$\log(\dot{V}) = \log(\Delta p) * n + \log(C); \text{ logarithmische Strömungsgleichung} \quad (4)$$

Der Strömungskoeffizient C beschreibt den Schnittpunkt der y -Achse bei 1 Pascal Gebäudedruck. 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 turbulente Strömungen. Liegt der Wert näher an der 1 dominieren laminare Strömungen.

Die Bestimmung der Koeffizienten C und n ist in der **[DIN_EN13829]** enthalten. Tabellenkalkulationsprogramme wie MS Excel oder speziell für Differenzdruckmessungen ausgelegte Software erleichtern die Ermittlung der Koeffizienten erheblich, da die Bestimmung der Geradengleichung vom Programm vorgenommen wird.

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.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{\text{Gebäude}}} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (5)$$

Dividiert man den Leckagestrom durch die Hüllfläche des Gebäudes so erhält man das Maß für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle (q_{50} -Wert). Dieser beschreibt die Qualität der Luftdichtung.

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_{\text{Gebäudehülle}}} \left[\frac{m^3}{m^2 * h} \right] \quad (6)$$

Der Leckagestrom bei 50 Pa in m^3/h multipliziert mit 0,5 liefert in Näherung die vom kanadischen Forschungsministerium definierte „äquivalente Leckfläche“ (EqLA) in cm^2 durch eine scharfkantige Öffnung in einer dünnen Platte.

$$EqLA_{50} = \dot{V}_{50} * 0,5 \quad [cm^2] \quad (7)$$

Durch das Zusammenfassen der Gesamtheit aller Leckagen zu einer äquivalenten Leckagefläche soll die Vorstellung der vorhandenen Undichtheit verbessert werden. In der Realität wird die Öffnung größer sein, da die Gebäudehülle in der Regel keine dünne Platte ist und die realen Strömungspfade häufig deutlich länger sind (siehe *Feuchteschutz*).

In Deutschland werden die Messungen der Luftdichtheit von Gebäudehüllen nach **[DIN_EN13829]** vorgenommen. Darin sind umfangreiche Informationen zum Thema Differenzdruckmessung enthalten.

2.1.3 Besonderer Anspruch „Innendämmung“

Oftmals ist eine Verbesserung des Wärmeschutzes nur mit Hilfe einer innen liegenden Dämmung möglich. Dies ist zum Beispiel bei erhaltenswerten Fassaden oder in dicht bebauten Innenstädten der Fall. Die Innendämmung bringt gegenüber der Außendämmung jedoch bauphysikalische Nachteile mit sich, die im Folgenden erläutert werden sollen.

Eine an der Innenseite der Außenmauer angebrachte Dämmschicht hat eine gravierende Veränderung des bauphysikalischen Verhaltens der Außenmauer zur Folge. Die Gefahr von Tauwasserbildung in der Wand steigt durch die Verlagerung des Taupunktes in die Außenwandkonstruktion hinein (siehe *Abbildung 2.1.4*). Feuchteschäden können dann besonders bei Holzkonstruktionen nicht mehr ausgeschlossen werden.

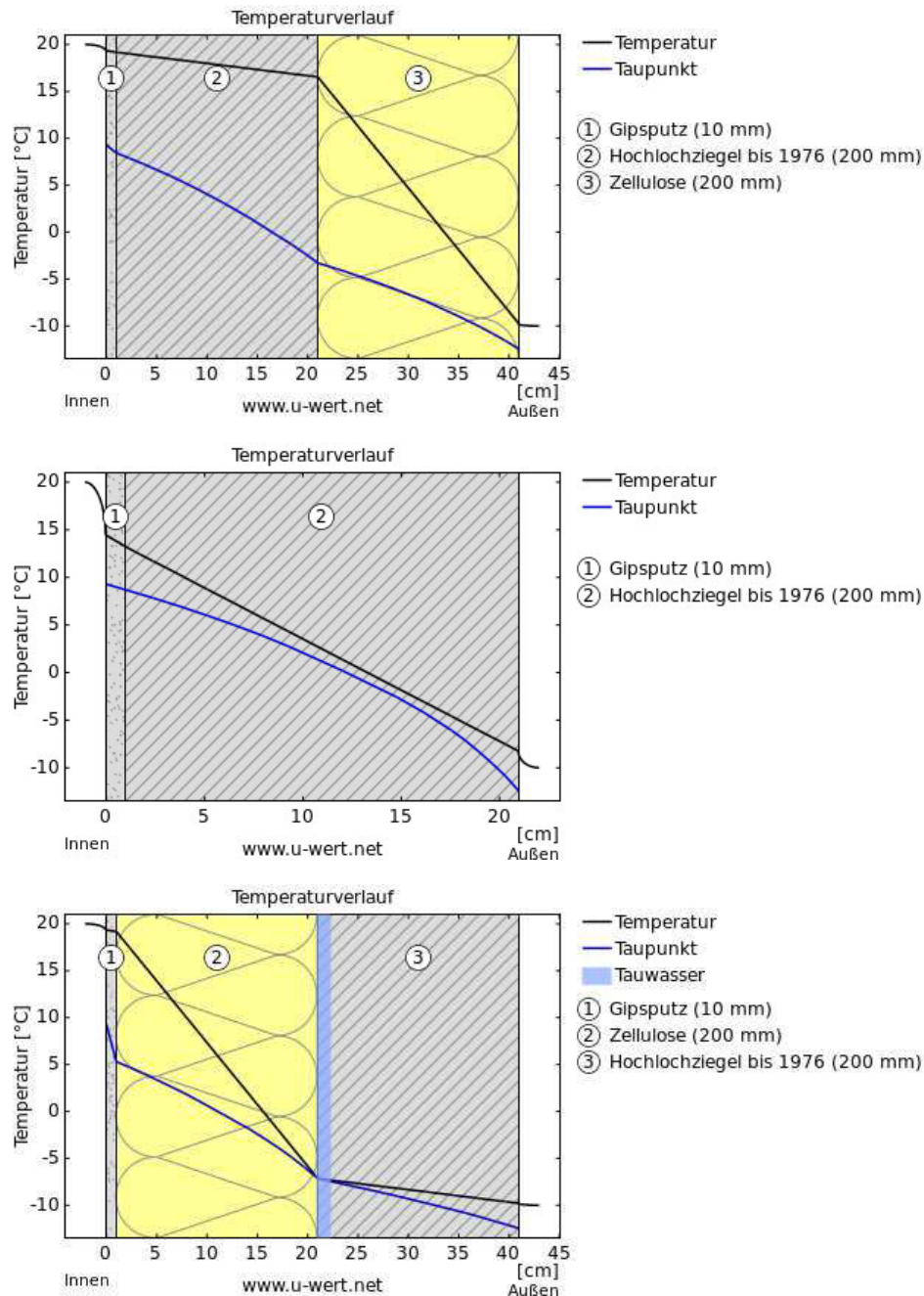


Abbildung 2.1.4: Taupunktverschiebung bei Innendämmung (mit Online Tool² berechnet); oben: Mauerwerk mit Außendämmung, Mitte: Mauerwerk ohne Dämmung, unten: Mauerwerk mit Innendämmung

Weiterhin ist häufig ein eingeschränktes Austrocknungspotenzial der Wandkonstruktion in Verbindung mit einer Innendämmung zu beobachten [Wor2010]. Normalerweise über den Innenraum austrocknende Feuchtigkeit wird von neu eingebrachten Bauteilschichten – wie Dampfsperren – in der Wand zurückgehalten. Aufgabe einer solchen Dampfsperre ist es den diffusen Feuchteintrag aus dem Innenraum in die Wandkonstruktion zu unterbinden. Herkömmliche Dampfsperren beeinträchtigen aber so auch die Austrocknung der Konstruktion.

² <http://www.u-wert.net/berechnung/u-wert-rechner/>

Mitte 2009 wurde mit der [WTA6_4] eine erste Richtlinie geschaffen, mit der Planung und Konzeption einer innen liegenden Dämmung ermöglicht wird. Damit stellt das Merkblatt eine anwendungsbezogene Weiterentwicklung der vorangegangenen WTA-Merkblätter 4 und 5 dar, in welchen sich der Simulation gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports gewidmet wurde. Diese Transportvorgänge mit Computerprogrammen berechnen zu können, stellte einen wesentlichen Fortschritt in der Beurteilung der Risiken einer Innendämmung dar.

In erster Linie verändert eine Innendämmung das thermische Verhalten der Gesamtkonstruktion. Der starke Temperaturabfall in der Dämmschicht führt zu größeren Temperaturschwankungen im außen liegenden Mauerwerk (siehe *Abbildung 2.1.5*). Das Schadensrisiko in Zusammenhang mit wasserführenden Leitungen in der Wand muss demnach in der Planung berücksichtigt werden. Abplatzungen durch gefrierendes Wasser in der Außenwand sind nach [Wor2010] hingegen eher eine Seltenheit und bedürfen keiner ausführlichen Betrachtung.

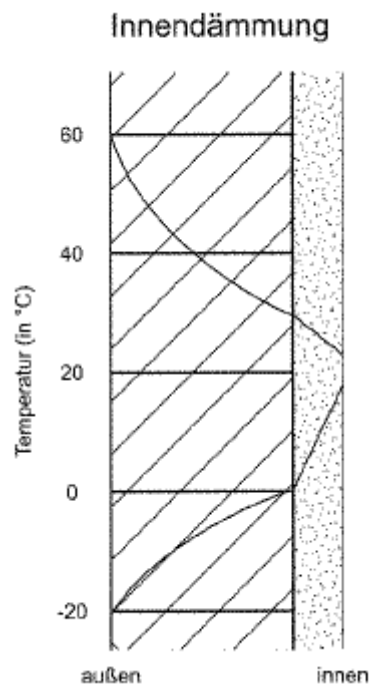


Abbildung 2.1.5: Darstellung der prinzipiellen Temperaturschwankung im Jahresverlauf innerhalb eines innen gedämmten Außenmauerwerks (Quelle: [Gän2008])

Das zu Beginn dieses Unterkapitels angesprochene Risiko der Tauwasserbildung ist besonders im Grenzbereich zwischen altem Mauerwerk und Innendämmung groß (siehe *Abbildung 2.1.4, unten*). Kleine Hohlräume zwischen beiden Teilen in Folge einer mangelhaften Ausführung der Dämmung oder großer Unebenheiten am Mauerwerk bergen die Gefahr kleiner Feuchtenester. Bauschäden sind hier häufig vorprogrammiert. Bei der Bildung solcher Feuchtenester sind zwei voneinander unabhängige Prozesse beteiligt. Wie in [Wor2010] ausführlich beschrieben kondensiert über Diffusion in die Wand gelangte Feuchtigkeit an den gerade

beschriebenen Hohlräumen zwischen Dämmung und Mauerwerk aus und verschärft in diesem Bereich die Feuchtproblematik. Eine zweite Ursache für die Bildung von Feuchtenestern im Wandaufbau ist die Konvektion. In Kapitel *2.1.1 Feuchteschutz* wurde die Hinterströmung der Innendämmung als Folge von Leckagen der luftdichten Ebene bereits erläutert.

Neben dem diskutierten Feuchteeintrag in die Wandkonstruktion stellt die gehemmte Abtrocknung zum Innenraum hin ein weiteres Problem bei der Ausführung einer Innendämmung dar. Grund für die langsamere Abtrocknung des Mauerwerks ist zum einen die durch die Innendämmung stark reduzierte Wärmezufuhr aus dem Innenraum und zum anderen Bauteile wie Dampfbremsen, die einen Feuchtetransport zwischen Wandkonstruktion und Innenraum unterbinden. Höhere Sicherheit verschaffen hier sogenannte „intelligente Baustoffe“ wie feuchteadaptive Dampfbremsfolien, die einen feuchteabhängigen Diffusionswiderstand aufweisen, oder kapillaraktive Dämmstoffe, welche dazu in der Lage sind Tauwasser kapillar aufzunehmen und im Dämmstoff entgegen des Dampfdruckgefälles zum Innenraum hin zu transportieren. Über die Wirkungsweise dieser beispielhaft angeführten Materialien lassen sich in **[Wor2010]** weitere Informationen finden.

Ein feuchtetechnischer Nachweis für die Schadensanfälligkeit einer gewählten Wandkonstruktion ist im Wesentlichen von der angestrebten Dämmstärke abhängig. Für geringe Dämmstärken bis 40 mm finden sich in der **[DIN4108_3]** eine Vielzahl von Konstruktionen für die kein Nachweis erforderlich ist. Für Innendämmungen gilt allgemein: Je dicker die Dämmung, desto kritischer. In **[Sch2005]** wird die Auswahl einer Dicke von 40 – 100 mm als sinnvoll empfohlen. Darüber hinaus wird nur eine geringe Reduktion des flächenbezogenen Heizwärmebedarfs erreicht. Unterhalb dieser Grenze lohnt sich hingegen meist der Aufwand einer solchen Sanierungsmaßnahme nicht.

2.2 Balkenköpfe in Altbauten

Gerade im Dachbereich und in Geschossdecken lassen sich in vielen Altbauten eine Vielzahl von Balken finden, welche bei der Ausführung einer Innendämmung zu Durchdringungen der Dämmschicht und der luftdichten Ebene werden. Damit ergeben sich in der Praxis besondere Herausforderungen für die Ausbildung der Luftdichtheit. Nicht nur dass ein Dachstuhl dutzende solcher Durchdringungen aufweisen kann, oftmals sind die Balken auch schwer zugänglich. Dies erschwert ein korrektes Andichten der Balkenköpfe. Aufgrund der in *2.1.1 Wärmeschutz* beschriebenen Thermik im Gebäude ist die Gefahr von Leckageströmungen im Dachbereich besonders groß. Über die Jahre hinweg durch Quellen und Schwinden des Holzes entstandene Risse stellen hier problematische Undichtheiten dar. Kommt es in diesen Rissen aus den in *2.1.1 Feuchteschutz* beschriebenen Gründen zur Kondensation von Luftfeuchtigkeit, kann das Holz als organischer Stoff beginnen zu faulen und seine Festigkeit zu verlieren.

2.2.1 Rissbildung und Rissarten

Risse im Holz entstehen, wenn Spannkräfte 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 Spannkräfte. 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 Darrgewicht³) Holzfeuchte führt. Formveränderungen finden unterhalb der Fasersättigungsgrenze⁴ statt. Diese ist artspezifisch und liegt im Mittel bei 30 Massen-% Holzfeuchte. Die eigentliche Rissbildung ist nun ein Ergebnis der sogenannten „Anisotropie“ des Holzes. Quell- und Schwindverhalten verhalten sich in longitudinaler, radialer und tangentialer Richtung wie 1:10:20 (ungefähre Angabe). *Abbildung 2.2.1* verdeutlicht die Anisotropie des Holzes noch einmal bildhaft.

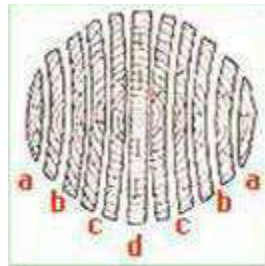


Abbildung 2.2.1: Anisotropes Schwinden und Quellen von Holz (Quelle: [Hol])

Am häufigsten finden sich im Gebäudebestand sogenannte Trockenrisse an Holzbalken. Diese sind Folge der Holzbewegungen unterhalb der bereits erwähnten Fasersättigungsgrenze. In *Abbildung 2.2.2* 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 2.2.2: Verlauf von Trockenrissen bei unterschiedlichen Einschnittarten (links.: Vollbalken; Mitte: Halbbalken; rechts: Viertelbalken) (Quelle: [GDHeV])

³ Gewicht des völlig (absolut) trockenen Holzes

⁴ Zellwände sind mit Wasser gesättigt und die Zellhohlräume enthalten noch kein tropfbar flüssiges Wasser

2.2.2 Bauschäden durch Feuchte

Zwei Drittel der Holzschäden im Bau entstehen durch Pilze. Das verbleibende Drittel wird von Insekten abgedeckt [Hol2011]. 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 in Kapitel 2.2.1 erläuterte Fasersättigungsgrenze muss also über einen längeren Zeitraum (> 6 Monate) überschritten werden. Ist dies nicht der Fall stellt der Pilz sein Wachstum meist 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 [Hol2011]. Deshalb ist bei Sanierungsmaßnahmen mit Innendämmung eine sorgfältige Begutachtung der Holzbalken von großer Bedeutung.

2.3 Versuchsgrundlagen

Aufgrund der auf den vorangegangenen Seiten beschriebenen Problematik und Unsicherheit auf dem Feld der Holzbalkenabdichtung in der Altbausanierung, sollen in einem an die [DIN_EN12114] angelehnten Versuch mehrere Methoden und Produkte zur luftdichten Einbindung dieser Balken untersucht werden. Der Versuchsaufbau, bestehend aus einem Kasten aus Holzwerkstoffplatten, Membranvakuumpumpen, Volumenstrom-, Temperatur-, Luftdruck-, Differenzdruck- und Feuchtemessung, soll auf den folgenden Seiten genauer erläutert werden.

Als Versuchsstand dient ein luftdichter Kasten aus Holzwerkstoffplatten, welche zur Erhöhung der Luftdichtheit mit speziellem Klebeband flächig überklebt wurden (*Abbildung 2.3.1: C*). An der Vorderseite des Kastens befindet sich eine Blende, welche von einem Holzbalken mit einem künstlich erzeugten Riss durchstoßen wird. In *Abbildung 2.3.1* ist diese Durchdringung nur auf die Blende aufgezeichnet, da für die Feststellung der Dichtheit des Versuchsstandes an sich eine Messung mit einer geschlossenen Platte nötig ist.

An diesen Kasten wird nun mit Hilfe zweier Pumpen eine Serie von Druckdifferenzen angelegt und der sich dazu einstellende Leckagevolumenstrom gemessen. Die Undichtheit des Versuchstandes an sich ist dabei stets zu berücksichtigen. Die Größe des gemessenen Luftstroms, der im Wesentlichen zwischen Blende und Holzbalkendurchdringung aus dem Versuchsstand entweicht, dient als Maß für die Qualität der untersuchten Methode zur Balkenabdichtung.

Der am PHI realisierte Versuchsaufbau und das in der Norm dargestellte Schema des Versuchsaufbaus sind in *Abbildung 2.3.1* zu sehen.



Abbildung 2.3.1: li.: schematischer Versuchsaufbau aus [DIN_EN12114]; re.: Laborversuchsaufbau am Passivhaus Institut (A: Membranvakuum pumpen; B: Schwebekörper-Durchflussmesser; C: Kasten mit Blende; D: Messeinrichtung zur Bestimmung der Umgebungsbedingungen; E: Differenzdruckmessung)

Die Druckdifferenz zwischen Kasten und Umgebung wird je nach Volumenstrombedarf mit einer größeren oder einer kleineren Membranvakuum pumpen der Firma KNF Neuberger erzeugt (Abbildung 2.3.1: A). Diese fördert Luft über ein je nach Volumenstrom größeres oder kleineres Schwebekörper-Durchflussmessgerät (Abbildung 2.3.1: B) der Firma Mecon beziehungsweise der Firma Yokogawa in den Versuchsstand hinein (Überdruck) oder aus diesem heraus (Unterdruck). Die sich in Folge dessen ergebende Druckdifferenz zwischen dem Kasten und der Umgebung wird dann mittels APT (Automated Performance Testing System) aufgenommen (Abbildung 2.3.1: E) und über die Software TECLOG am Computer aufgezeichnet. Aus den so erzeugten Kennlinien ($\dot{V}_{Leckage} = f(p_{Differenz})$) lässt sich mittels Tabellenkalkulationsprogrammen die Kurvenfunktion ermitteln und der Wert für den Leckagevolumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz berechnen (siehe Kapitel 2.1.2).

2.3.1 Versuchsaufbau

Im folgenden Abschnitt sollen die einzelnen Bestandteile des Versuchsaufbaus im Prinzipiellen, sowie im Speziellen, näher erläutert werden.

Musterbalken

Die Holzbalken, an denen die verschiedenen Andichtungsmethoden untersucht werden, weisen alle eine identische Leckage auf. Diese Leckage soll einen typischen Holzriss simulieren, wie er an alten Holzbalken zu finden ist. Daher besteht dieser nicht aus einem einfachen Schnitt, sondern weist eine Keilform auf. Wie in Abbildung 2.3.2 zu sehen, bleibt also keine Schnittbreite des Sägeblattes bestehen. Stattdessen läuft die „Rissbreite“ auf Null zu. Damit ist – wie in der [DIN_EN12114] gefordert –

sichergestellt, dass die Leckage im Musterbalken repräsentativ für in der Praxis auftretende Risse ist.

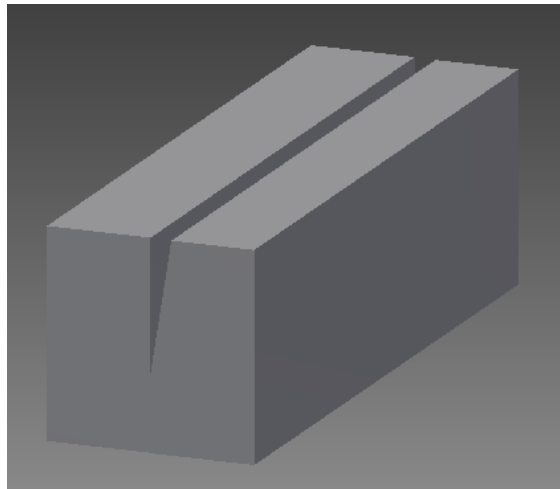


Abbildung 2.3.2: 3D-Modell Musterbalken (Länge: 25 cm, Kantenlänge: 8 x 8 cm, Rissfläche: 2 cm²)

Nichtsdestotrotz wird ein in der Praxis anzudichtender Balken meist eine Vielzahl unterschiedlichster Risse aufweisen. Diese werden mit einer weit weniger idealisierten Geometrie wahrscheinlich noch größere Herausforderungen für Luftdichtheitsprodukte darstellen. Die Entscheidung für eine einzige Leckage stützt sich deshalb auf die Eliminierung möglichst vieler Unsicherheitsfaktoren, die die Auswertung der Messung und die Herstellung der Balken in dem für diese Arbeit zu Verfügung stehenden Zeitraum unmöglich machen würden. So ist beispielsweise bei der Herstellung eines Balkens mit vielen Einschnitten nach obigem Vorbild viel Leimarbeit vom Schreiner durchzuführen. Allein die Komplexität würde bereits bei der Herstellung zu einer produktionsbedingten Streuung führen, unter der die Genauigkeit der Messungen leiden würde.

Membranvakuumpumpe

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, siehe *Anhang A*). Zum Funktionsprinzip soll an dieser Stelle ein kurzer Textauszug aus der Herstellerbeschreibung⁵ angeführt werden. „Eine elastische Membrane wird durch einen Exzenter auf- und abbewegt. Im Abwärtshub saugt sie das zu fördernde Gas bzw. die Flüssigkeit über das Einlassventil an. Im Aufwärtshub drückt die Membrane das Medium über das Auslassventil aus dem Pumpenkopf hinaus. Der Förderraum ist vom Pumpenantrieb durch die Membrane hermetisch getrennt.“ In

⁵ <http://www.knf.de/index.php?id=3>

Abbildung 2.3.3 ist die prinzipielle Funktionsweise der Pumpen grafisch dargestellt. Die Grüne Öffnung kennzeichnet den Eingang, also die Saugseite, und die rote den Ausgang, also die Druckseite.

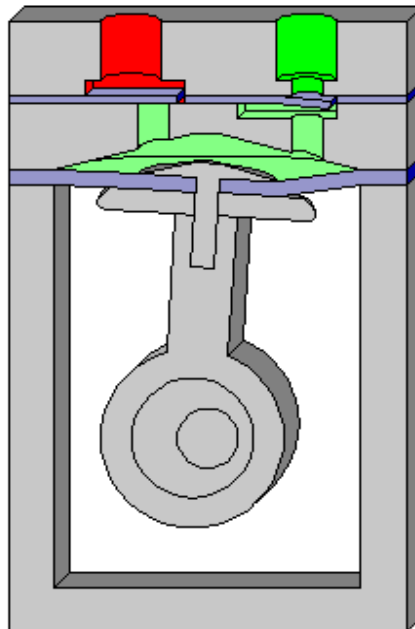


Abbildung 2.3.3: Funktionsprinzip Membranvakuumpumpe (grün: Saugseite; rot: Druckseite) (Quelle: <http://www.knf.de/index.php?id=3>)

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.

Schwebekörper-Volumenstrommessgerät

Zur Messung des Volumenstroms wird ein Schwebekörper-Volumenstrommessgerät eingesetzt. Dieses besteht aus einem konischen Rohr, in dem sich ein vertikal beweglicher Schwebekörper befindet. An dem Schwebekörper greifen drei Kräfte an, die im Betrieb in der Summe Null ergeben und die Position des Schwebekörpers im Glaskonus bestimmen. An einer am Konus angebrachten Messskala lässt sich dann der Volumenstrom ablesen. Der Strömungswiderstand des Schwebekörpers führt zu einer Krafteinwirkung auf diesen in Richtung der Strömung. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit und damit der Volumenstrom des durchströmenden Mediums, desto höher steigt der Schwebekörper im Konus an. Gleichzeitig vergrößert sich der Spalt zwischen Schwebekörper und dem Konus, was den Strömungswiderstand verringert. In Verbindung mit der weiterhin auf den Schwebekörper einwirkenden Schwerkraft pendelt sich der

Schwebekörper dem Volumenstrom entsprechend auf der Messstrecke ein (siehe *Abbildung 2.3.4*).

Das in *Kapitel 2.3 Versuchsgrundlagen* bereits erwähnte 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 Schwebekörper-Volumenstrommessgeräte stammt von der Firma Mecon (Modell: Minix MA 302) und ist auf einen Luftvolumenstrom von 4 bis 40 l/min unter Normbedingungen ausgelegt.

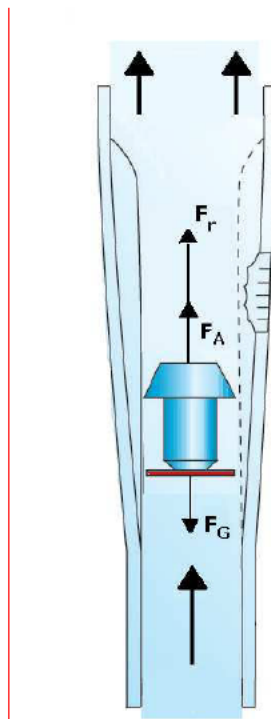


Abbildung 2.3.4: Kräfteverteilung am Schwebekörper-Volumenstrommessgerät; F_r = Kraft als Folge des Strömungswiderstandes; F_A = Auftriebskraft; F_G = Schwerkraft (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwebek%C3%B6rper-Durchflussmesser>)

Vom Ausgang des Durchflussmessgerätes führt eine weitere Schlauchverbindung direkt zu dem zu Anfang dieses Kapitels beschriebenen Versuchsstand. In der [DIN_EN12114] wird gefordert, dass „die Messung des Luftvolumenstroms mit einer Messgenauigkeit von $\pm 5\%$ “ erfolgen soll. Mecon gibt die Messgenauigkeit des „Minix MA 302“ mit der Klasse 2,5 (gem. [VDI_VDE3513_Blatt2]) 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.

Fa. Yokogawa gibt die Messgenauigkeit des zweiten verwendeten Durchflussmessgerätes „RGC1“ mit der Klasse 4 an. Nach **[VDI_VDE3513_Blatt2]** ergibt sich daraus für dieses Messgerät ab einem Volumenstrom größer 2 l/min ein normgerechter Messfehler von 5 % und weniger. Durch die Verwendung zweier Volumenstrommessgeräte ist gewährleistet, dass auch Volumenströme kleiner 4 l/min mit einer hohen Genauigkeit gemessen werden können.

Versuchsstand (Kasten)

Der aus 18 mm starken Holzwerkstoffplatten bestehende Kasten ist wie bereits erwähnt zur Erhöhung der Luftdichtheit zusätzlich mit Luftdichtheitsklebeband überklebt. OSB-Platten gelten zwar unter Praktikern als für die Ausführung der luftdichten Ebene geeignetes Bauteil. Jedoch zeigt die Versuchsreihe in **[Lan2010]**, dass diese Aussage nicht auf alle Platten zutrifft.

Auf einer Seite des Kastens befindet sich ein Aufsatz für eine Blende aus einer beschichteten Spanplatte, welche von dem anzudichtenden Holzbalken durchstoßen wird (siehe *Abbildung 2.3.5*). So ist der Wechsel der untersuchten Andichtungsmethode durch das Wechseln der Blende in kurzer Zeit ohne größere Umbaumaßnahmen möglich.



Abbildung 2.3.5: Blende mit Balkendurchdringung

Der luftdichte Anschluss zwischen dem Kasten und der Blende mit der Balkendurchdringung wird mit einem verklebten Ring aus ARMAFLEX hergestellt. Dabei handelt es sich um einen geschlossenzelligen Schaumstoff mit ausreichend Rückstellkraft, so dass sich das Material an jede Blende gleichermaßen luftdicht anpresst. Weiterhin befinden sich, wie in *Abbildung 2.3.1* zu sehen, drei Schlauchtüllen

auf der Seite des Kastens. Über diese erfolgen die Differenzdruckmessung und der Anschluss an die Membranvakuumpumpen.

Automated Performance Testing System (APT)

Bei dem APT handelt es sich um ein mit 8 Druckkanälen ausgestattetes Druckmessgerät des Herstellers Minneapolis, welches in Verbindung mit der Software TECTITE Express für die Durchführung automatischer Differenzdruckmessungen verwendet wird. Der Druck wird mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1\%$ gemessen. Auch hier wird die Anforderung der **[DIN_EN12114]**, in der für die Druckmessung eine Messgenauigkeit von $\pm 5\%$ gefordert wird, erfüllt. Die an den Prüfkörper angelegte Druckdifferenz lässt sich in Echtzeit mit der Software TECLOG am Computer verfolgen und aufzeichnen (siehe *Anhang B*). Zu jedem eingestellten Volumenstrom – wie in *Membranvakuumpumpe* beschrieben – lässt sich der Differenzdruck feststellen, um so die in *Kapitel 2.3* beschriebenen Kennlinien zu erhalten.

Die Produktspezifikationen finden sich unter dem als Fußnote aufgeführten Link zur Herstellerseite⁶.

2.3.2 Grundlagen Herstellerlösungen

Für die Auswahl der zu untersuchenden Produkte für die luftdichte Einbindung alter Holzbalkenköpfe wurde eine Vielzahl von Fachherstellern angeschrieben und zu Lösungsansätzen für dieses allseits bekannte Problem 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.

Aus den Mustern lassen sich acht unterschiedliche Methoden zur Andichtung der Musterbalken zusammenstellen. Diese Methoden bestehen aus einer Kombination von bis zu drei Materialien aus den Produktgruppen Klebeband, Dichtmasse/Kleber, Haftgrundierung, dehnfähige Butyl-Kautschukklebebänder, Speziallösung und Putzanschlussband (siehe *Tabelle 2.3-1*). Es wird bei jeder zu untersuchenden Methode stets „im System geblieben“. Es werden also pro Methode keine Produkte unterschiedlicher Hersteller miteinander kombiniert. Somit kann eine Unverträglichkeit verwendeter Produkte zueinander ausgeschlossen werden.

An der Kombination Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse/Kleber (KHD) soll ein Herstellervergleich durchgeführt werden, so dass sich neun Messreihen zu je drei Proben ergeben.

⁶ <http://www.energyconservatory.com/products/products3.htm#pd16>

Tabelle 2.3-1: Produktmatrix (Methode = Produkt I + Produkt II + Produkt III)

Methode	Produkt I	Produkt II	Produkt III
1	Klebeband	-	-
2		Haftgrundierung	-
3			Dichtmasse/Kleber
4	Butyl-Kautschukkleber auf Spezialvlies	Haftgrundierung	-
5		Dichtmasse/Kleber	-
6	Speziallösung I	-	-
7	Speziallösung II	-	-
8	Putzanschlussband	Dichtmasse/Kleber	-

Im Folgenden werden die Eigenschaften und Auffälligkeiten in der Handhabung der einzelnen Produkte genauer erläutert.

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 ein Polyestergelege.

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 15-30 Minuten einzuhalten, bevor der Primer überklebt werden kann.

Dichtmasse/Kleber

An Dichtmassen und Anschlussklebern gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte. Die Variation reicht 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 (siehe *Kapitel 2.3.1 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 der Luftdichtheitsbahnen verwendet.

Speziellösungen

Es werden zwei Speziallösungen für den luftdichten Anschluss von Durchdringungen der luftdichten Ebene untersucht.

Dabei handelt es sich zum einen 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 (siehe *Abbildung 2.3.6*).



Abbildung 2.3.6: Speziallösung mit pastöser Funktionsbeschichtung (Quelle: Dörken GmbH & Co. KG)

Bei der zweiten Speziallösung handelt es sich um eine Klebmasse in Rollenform aus einer modifizierten Polyacrylat-Copolymer-Dispersion mit mineralischen Füllstoffen. Diese ist mit einem „silikonisiertem Releaseliner“ abgedeckt (siehe *Abbildung 2.3.7*). Bei größeren Unebenheiten kann laut Hersteller eine Schlaufe in die Raupe gelegt werden und die Unebenheit so mit dem Material verfüllt werden. Kleinere Unebenheiten, wie sie beispielsweise auf einem rauen Putz entstehen, werden durch die dauerelastische Struktur der Raupe ausgeglichen.

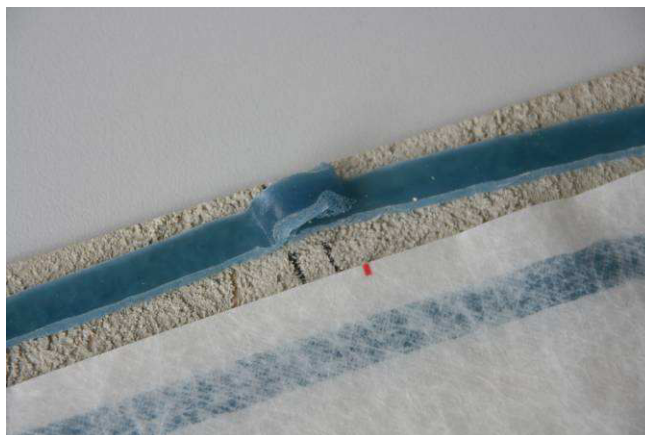


Abbildung 2.3.7: Speziallösung mit dauerelastischer Raupe

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 meist in den innenliegenden Putz, der nach **[DIN4108_7]** als luftdicht zu betrachten ist, eingeputzt. Die untersuchten Produkte weisen mit einem s_d -Wert von ca. 2,5 m leicht dampfbremsende Eigenschaften auf.

2.4 Alternative Ansätze

Neben dem Versuch die Qualität der luftdichten Einbindung von rissigen Holzbalkenköpfen zu erhöhen, gibt es alternative Ansätze das in Kapitel 2.1.1 *Feuchteschutz* beschriebene Problem des konvektiven Feuchteintrages in die Wand beziehungsweise an den Balkenkopf heran zu vermeiden. Im Folgenden sollen zwei dieser Ansätze kurz erläutert werden.

2.4.1 Gezielte Wärmeenergiezufuhr

Wie in 2.1.1 *Feuchteschutz* beschrieben ist für den Kondensatausfall ein massiver Temperaturabfall durch die Innendämmung verantwortlich. Um diesem Effekt entgegenzuwirken sind in **[Sto2010]** verschiedene Möglichkeiten einer gezielten Wärmezufuhr an den Holzbalkenkopf erläutert. Der Variantenreichtum reicht dabei von Heizrohrgestützter Wärmeenergiezufuhr bis zu künstlich geschaffenen, konstruktiven Wärmebrücken. Solche Lösungen sind denkbar, aber aufwändig und häufig mit zusätzlichem Energieaufwand verbunden. Es besteht außerdem die Gefahr des unbemerkten Defekts an einer aktiven Wärmezufuhr zum Balkenkopf, welche dann zu Schäden führen kann.

2.4.2 Maßnahmen ohne Wärmeenergiezufuhr

Es besteht die Möglichkeit einer örtlich begrenzten Außendämmung oder des Einsatzes sorptiver Speicher. Diese Varianten haben wie bei der gezielten Wärmeenergiezufuhr das Ziel der Temperaturerhöhung am Balkenkopf und lassen sich ausführlich in **[Sto2010]** nachlesen. Für die Wahl einer begrenzten Außendämmung oder den Einsatz sorptiver Speicher ergibt sich allerdings ein erhöhter Heizenergiebedarf.

Für nähere Informationen soll hier auf die genannte Literatur zu diesem Thema verwiesen werden.

3 Hauptteil

3.1 Versuchsdurchführung

Die Messung der verschiedenen Methoden zur Balkenandichtung setzt zunächst die Vorbereitung der Blenden mit den jeweiligen Balkendurchdringungen voraus. Ist dies geschehen, wird der Balken nach Herstellerangaben an die Blende angedichtet und die so hergestellte Probe luftdicht mit dem Versuchstand verschraubt. Der komplette Andichtungsprozess wird dabei ausführlich mit Fotos dokumentiert.

Der Undichtheit der untersuchten Probe entsprechend wird mit der größeren oder der kleineren Membranvakuumpumpe eine Serie von ansteigenden Volumenströmen in den Versuchstand hinein gefördert. Der sich für den jeweiligen Volumenstrom einstellende Überdruck wird dann zusammen mit den zum Versuchszeitpunkt herrschenden Rahmenbedingungen (Temperatur, relative Feuchtigkeit und barometrischer Druck) dokumentiert und in ein Tabellenkalkulationsprogramm zur Erstellung der unter *Kapitel 2.1.2* beschriebenen Kennlinien eingetragen. Analog zu dem beschriebenen Vorgehen bei Überdruck wird bei der Unterdruckmessung verfahren. Dafür sind die Schlauchverbindungen zwischen Pumpe, Volumenstrommessgerät und Versuchstand nur dahingehend zu tauschen, dass die Luft nicht mehr in den Versuchstand hinein, sondern aus diesem heraus gefördert wird. Nach den auf diese Weise erstellten Messwertpaaren aus Differenzdruck und Volumenstrom für den Über- und den Unterdruckfall wird im direkten Anschluss mit den in *Kapitel 2.3.2* erwähnten identischen Proben 2 und 3 derselben Methode genauso verfahren.

Zur Beurteilung der erfolgten Andichtung ist es nötig die Luftdurchlässigkeit des Versuchstandes selbst festzustellen, da ansonsten eine Überbewertung der am Balken verbliebenen Leckage erfolgen würde. Hierzu findet an jedem Messtag eine Messung mit einer Blende statt, die nicht von einem Balken durchdrungen ist (siehe *Abbildung 2.3.1*). Dieser im Folgenden als Offset bezeichnete Wert muss bei jeder Messung vom eigentlichen Messwert subtrahiert werden.

3.2 Auswertung – Grundlagen

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 ist für eine korrekte Beurteilung der Messergebnisse die Bildung des Mittelwertes und der Standardabweichung über die drei Proben einer Methode nötig.

3.2.1 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_EN12114]**:

$$\dot{V}_0 = \dot{V} * \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (8)$$

Dabei ist:

\dot{V}_0 der korrigierte Luftvolumenstrom unter Referenzbedingungen;

\dot{V} der gemessene Luftvolumenstrom unter Laborbedingungen;

ρ_0 die Dichte von Luft unter Referenzbedingungen ($\rho_0 = 1,198 \text{ kg/m}^3$);

ρ die Dichte von Luft unter Laborbedingungen, berechnet nach Gleichung (9)

$$\rho = \frac{p_a - 0,378802 * p_w}{287,055 * T} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (9)$$

Dabei ist:

p_a der Luftdruck in Pa;

T die thermodynamische Temperatur in K;

p_w der Wasserdampfdruck in Pa, berechnet nach Gleichung (10)

$$p_w = 610,5 * \phi \exp\left(\frac{21,875 * (T - 273,15)}{T - 7,65}\right) \quad [Pa] \quad (10)$$

Dabei ist:

ϕ die relative Luftfeuchte

Die sehr konstanten Bedingungen im Labor führen zu marginalen Korrekturfaktoren beim gemessenen Volumenstrom. Diese liegen zwischen -1,002 und +1,005.

Aus den Messwertpaaren (Leckagevolumenstrom und Differenzdruck) ergeben sich Kennlinien für den Über- und den Unterdruckfall. Diese werden normgerecht in einer doppeltlogarithmischen Grafik angezeigt (siehe *Anhang C*). Mit der Trendlinienfunktion von MS Excel lässt sich jeweils die Strömungsgleichung (2) mit den in *Kapitel 2.1.2* eingeführten Koeffizienten C und n darstellen. Durch entsprechendes Einsetzen des Druckes von 50 Pa für die Variable Δp 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 (systematischer Fehler).

3.2.2 Mittelwert und Standardabweichung

Da es in der Praxis nicht möglich ist ein Experiment unendlich oft zu wiederholen, kann der wahre Wert der Messung nicht aus der Normalverteilung bestimmt werden. Man benutzt aber alle n Messwerte (3 Proben pro Methode) um einen Wert abzuschätzen und bezeichnet als wahrscheinlichsten Wert das arithmetische Mittel aller Messwerte \bar{v} . Der Mittelwert \bar{v} ist das unberechtigte Messergebnis y .

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j = y \quad (11)$$

Die Standardabweichung s liefert ein Maß für die Streuung der Einzelmesswerte um ihren Mittelwert. Das Ergebnis einer Einzelmessung liegt mit ca. 68 % Wahrscheinlichkeit im Bereich $\bar{v} \pm s$.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (v_j - \bar{v})^2} \quad (12)$$

Als Unsicherheit $u(y)$ des Messergebnisses y wird die Standardabweichung des Mittelwertes verwendet.

$$u(\bar{v}) = u(y) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (v_j - \bar{v})^2} \quad (13)$$

Der Mittelwert wird mit ca. 68 % Wahrscheinlichkeit im Bereich $\bar{v} \pm u(\bar{v})$ liegen.

Die relative Unsicherheit ist $u_{rel}(y) = \frac{u(y)}{|y|}$.

Das vollständige Messergebnis Y für die Messgröße wird in folgender Schreibweise angegeben:

$$Y = y * (1 \pm u_{rel}(y)) \quad (14)$$

Beispiel: $\dot{V} = 1,966 * (1 \pm 0,045) \text{ m}^3/\text{h}$; die Standardabweichung des Mittelwertes beträgt 4,5 % \rightarrow das Messergebnis Y liegt mit 68 % Wahrscheinlichkeit im Intervall $[1,878 \text{ m}^3/\text{h}; 2,055 \text{ m}^3/\text{h}]$

3.3 Auswertung der untersuchten Methoden zur Holzbalkenandichtung

Die im folgenden Kapitel angegebenen Leckagevolumenströme für Unter- und Überdruckmessung sind jeweils Mittelwerte über die drei Einzelproben, die zu jeder Andichtungsmethode untersucht wurden. Dabei wird stets ein Differenzdruck von 50 Pa zwischen Versuchsstand und Umgebung angenommen. Alle Volumenströme haben

sofern nicht anders angegeben die Einheit m^3/h und sind bereits „offsetbereinigt“. Die Leckage des Versuchsstandes ist also aus den Messergebnissen herausgerechnet.

Weiterhin wird der arithmetische Mittelwert aus Unter- und Überdruckmessung über die drei Einzelproben einer Methode gebildet. Dieser Wert soll auch für den späteren Methodenvergleich herangezogen werden.

Die Darstellung der messtechnisch erfassten Volumenströme wird außerdem durch Auffälligkeiten in der Verarbeitung der verschiedenen Produkte ergänzt.

3.3.1 Klebeband

Im Folgenden soll das schrittweise Vorgehen bei der Andichtung des Musterbalkens mit Luftdichtheitsklebeband erläutert werden. Die Einzelschritte lassen sich dabei anhand der *Abbildung 3.3.1* nachvollziehen.

1. Ein an beiden Seiten des Balkens etwa 3 cm überstehender Streifen Klebeband wird möglichst spannungsfrei auf den Übergang von Musterbalken zu Blende geklebt. Die Spannungsfreiheit erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Bauteilbewegungen ohne ein Ablösen des Klebebandes von diesem aufgenommen werden können. Weiterhin ist darauf zu achten, dass auf Balken und Blende jeweils ausreichend Klebeband vorhanden ist. Bei stark asymmetrischer Verteilung kann es hier sonst zu Leckagen kommen. Der eingeschnittene Bereich des Klebebandes an den Kanten des Balkens ist in *Abbildung 3.3.1 oben links* gut zu erkennen. Das Einschneiden des Bandes ist in diesem Bereich nötig um die Spannungsfreiheit der Verklebung zu garantieren.
2. Mit dem zweiten Streifen Klebeband wird analog zu 1. verfahren. Durch das Überlappen der beiden Klebebandstreifen kommt es mitunter zu kleineren Löchern (siehe *Abbildung 3.3.1 oben rechts*), welche mit einem zusätzlichen Streifen Klebeband abzudichten sind.
3. Die weiteren Streifen Klebeband auf den beiden verbliebenen Seiten müssen dann unter der Berücksichtigung der unter 1. und 2. geschilderten Aspekte auf Balken und Blende aufgebracht werden. Das Vorgehen hierbei ist *Abbildung 3.3.1 unten links, rechts* zu entnehmen.

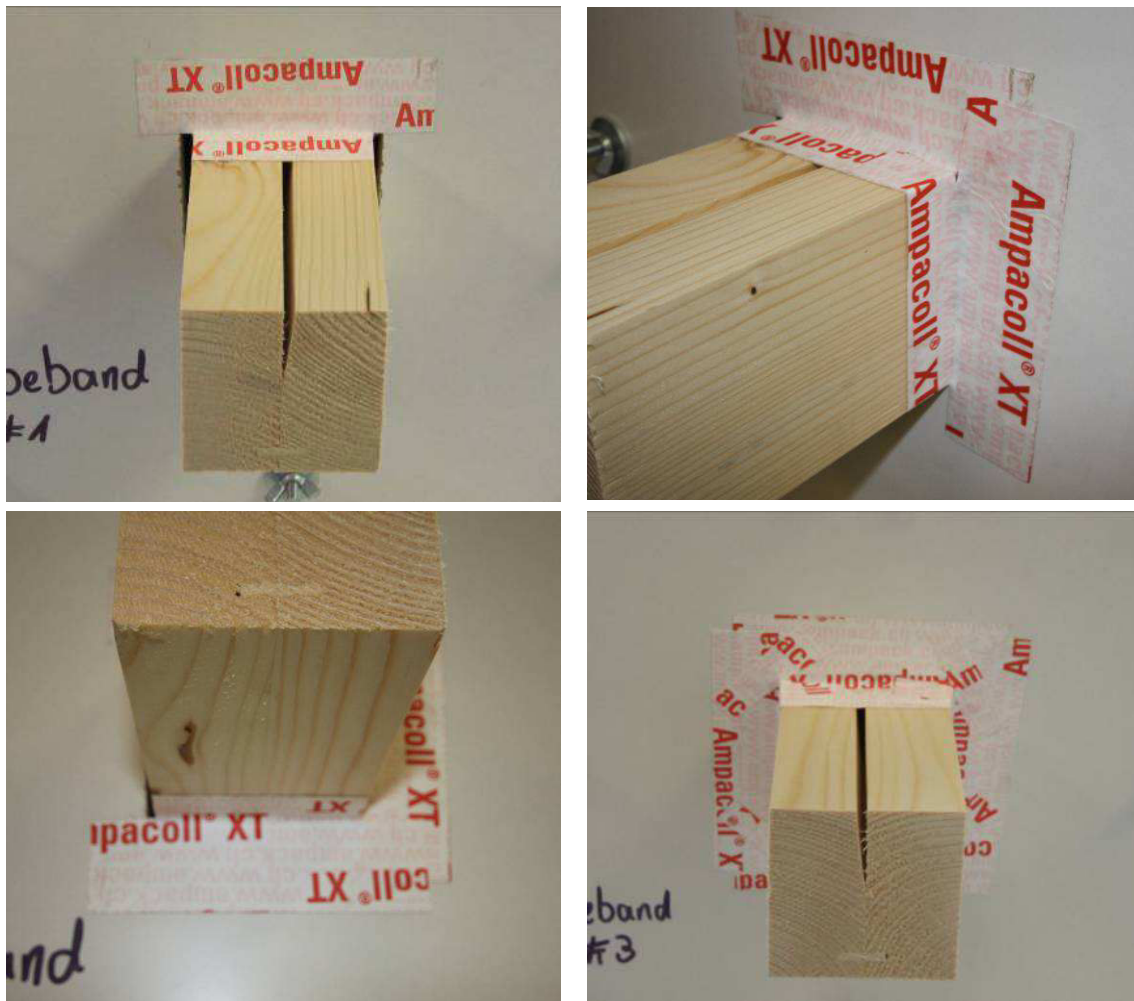


Abbildung 3.3.1: Bilderserie Klebeband; oben links: erster Klebebandstreifen, an Ecken eingeschnitten; oben rechts: verbleibendes Loch bei überlappenden Klebebandstreifen; unten links, rechts: Abschließen der Andichtung mit einem dritten und vierten Klebebandstreifen.

Das Messergebnis für die Überdruckmessung der Methode „Klebeband“ liegt bei $\dot{V} = 1,966 * (1 \pm 0,045)$. Deutlich besser liegt das Ergebnis der Unterdruckmessung mit $\dot{V} = 1,584 * (1 \pm 0,044)$. Damit beträgt der geförderte Volumenstrom bei Unterdruck nur ca. 80 % desjenigen bei Überdruck.

Der geringere Volumenstrom bei Unterdruck im Versuchsstand ist möglicherweise auf das „Ansaugen“ des Klebebandes an den Holzbalken und die Blende zurückzuführen. Von Luftdichtheitsprüfungen in Bestandsgebäuden ist dieses Phänomen gut bekannt. Der Vergleich mit einem Rückschalventil 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.

Für den arithmetischen Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung ergibt sich $\dot{V} = 1,775 * (1 \pm 0,044)$. In der folgenden *Abbildung 3.3.2* sind die Messergebnisse für

alle drei Proben der Methode Klebeband bei Unter- und Überdruck, sowie das arithmetische Mittel aus beiden, aufgeführt.

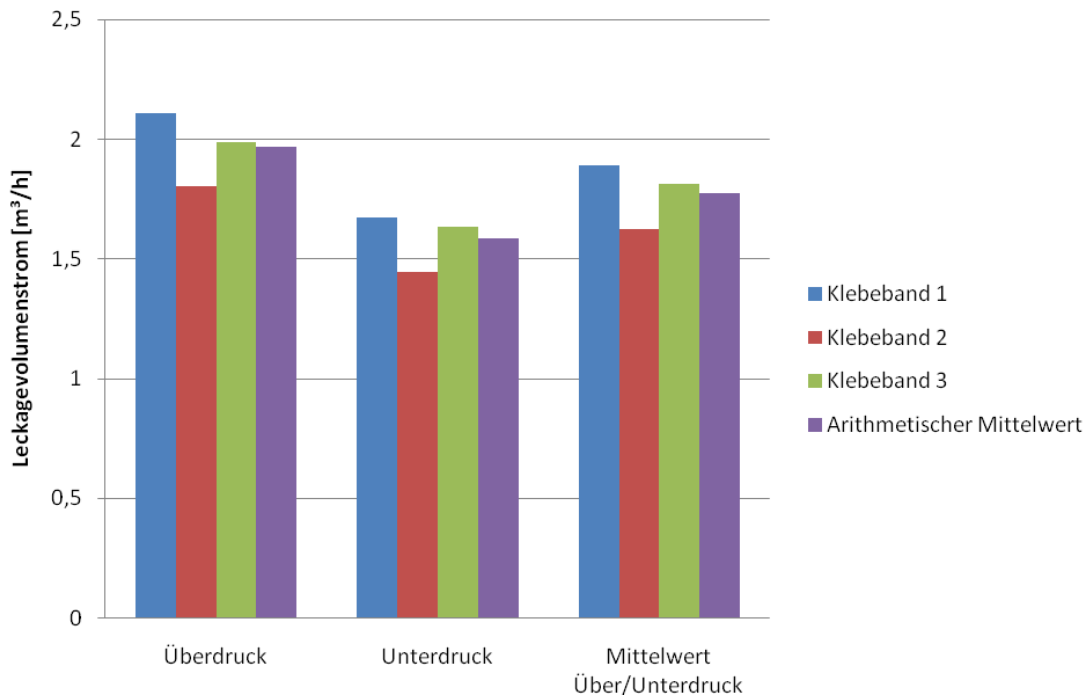


Abbildung 3.3.2: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

Die Andichtungsmethode „Klebeband“ ist besonders interessant, da diese den Leckagestrom 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 Luftdichtheit des Klebebandes aus, erhält man mit dieser Messung also den Volumenstrom, der maximal durch den Riss entweicht. Die Relevanz dieser Größe ist besonders interessant, da Balkendurchdringungen in der Praxis nicht selten auf diese Weise angedichtet werden.

3.3.2 Klebeband + Haftgrundierung

Eine Haftgrundierung oder Primer dient als Haftgrund für Klebebänder auf porösem Untergrund, wie beispielsweise Mauerwerk, Putz, Beton, rohem Holz und Holzweichfaserplatten.

Die verwendete Haftgrundierung wurde am vertikal stehenden Balken mit einem Pinsel auf den Balken aufgebracht (siehe *Abbildung 3.3.3*). Durch das vertikale Stehen des Balkens sind eventuelle Einflüsse durch die Position des Risses 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, muss man mehr Zeit für das Abtrocknen der Haftgrundierung einplanen.

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

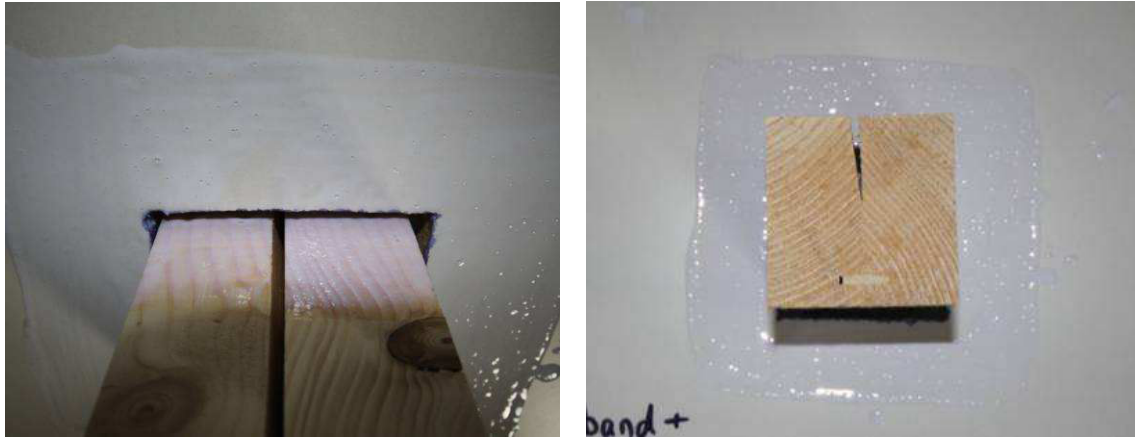


Abbildung 3.3.3: Balken mit Haftgrundierung

Wie im vorangegangenen Versuch lässt sich feststellen, dass bei Unterdruck weniger Volumenstrom aus dem Versuchsstand heraus gefördert wird. Bei Überdruck gemessene $\dot{V} = 1,815 * (1 \pm 0,062)$ stehen den $\dot{V} = 1,485 * (1 \pm 0,050)$ bei Unterdruck gegenüber. Bei letzterem fließen also nur knapp 82 % des Volumenstroms, der bei Überdruck gemessen wurde. Der Unterschied ist damit in der gleichen Größenordnung wie beim vorherigen Versuch ohne Haftgrundierung. Im Mittel aus Über- und Unterdruckmessung ergibt sich $\dot{V} = 1,650 * (1 \pm 0,056)$. Die folgende Abbildung zeigt die Messergebnisse im Einzelnen.

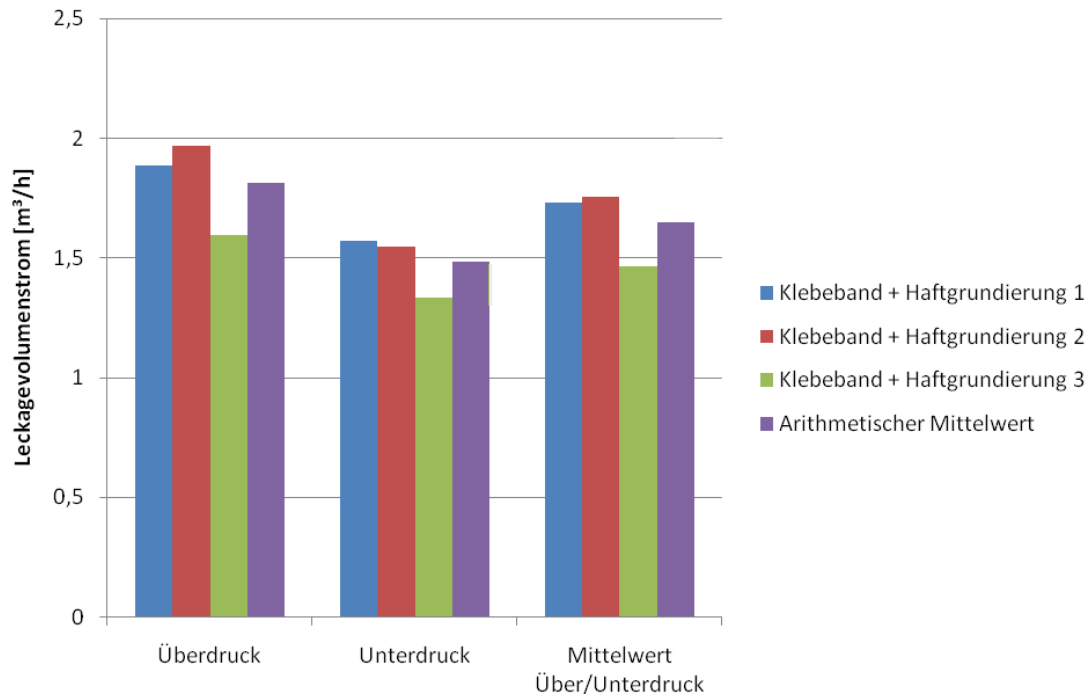


Abbildung 3.3.4: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband + Haftgrundierung“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

Der für die dritte Probe gemessene Volumenstrom ist im Vergleich zu den ersten beiden Proben etwas reduziert. Dies wird unvermeidbaren Schwankungen bei der Herstellung der Andichtung zugeschrieben und daher nicht weiter untersucht.

Der Einfluss der Haftgrundierung auf die Qualität der Andichtung des Balkens ist gering. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da – wie oben beschrieben – die Grundierung recht schnell am Balken herabfließt und die Leckage somit nur in geringem Maße abgedichtet wird. Mit Haftgrundierung fließen noch rund 93 % des Leckagevolumenstroms, welcher bei der Methode „Klebeband“ gemessen werden konnte. Damit liegen die Messergebnisse etwa im Bereich der Standardabweichung der jeweils anderen Methode und sind somit als nahezu gleich zu betrachten.

Damit wird hier 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.

3.3.3 Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse

Für die Methode „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse“ („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. Die Vorgehensweise war in beiden untersuchten Fällen identisch und ist, für die Verwendung des Klebebandes und der Haftgrundierung, an den vorangegangenen Versuchen nachzuvollziehen.

Zunächst wurde 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 Spitze der Kartusche zuließ. Dabei war auffällig, dass die Dichtmasse sich in beiden Fällen nicht vollständig hineindrücken ließ. Nach optischer Prüfung war festzustellen, dass die Masse bei „KHD II“ tiefer eingedrungen war (siehe *Abbildung 3.3.5*), was sich auch an den Messergebnissen (siehe *Abbildung 3.3.8*) belegen lässt. Für das bessere Eindringen im zweiten Fall sind die niedrigere Viskosität und eine schmalere Kartuschetülle bei Variante „KHD II“ verantwortlich.

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

Nach dem Verfüllen des Risses mit der Masse wird das Klebeband wie in *Kapitel 3.3.1* beschrieben um den Balken herum geklebt.

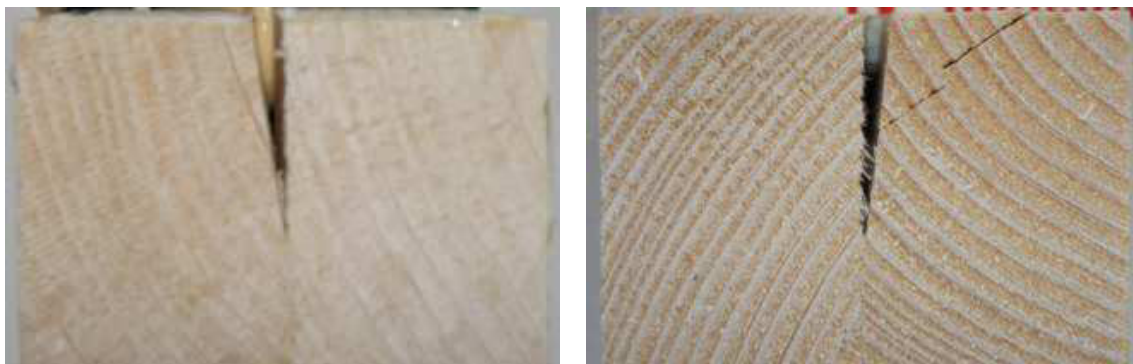


Abbildung 3.3.5: Eindringtiefe der Dichtmasse in den Spalt (links: KHD II; rechts: KHD I)

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.

„KHD I“

Die Messergebnisse der drei Proben der Methode „KHD I“ liegen sehr dicht zusammen und weisen somit eine geringe Standardabweichung auf. Der arithmetische Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung liegt bei $\dot{V} = 1,016 * (1 \pm 0,024)$. Weiterhin ist zwischen Überdruck ($\dot{V} = 1,018 * (1 \pm 0,025)$) und Unterdruck ($\dot{V} = 1,014 * (1 \pm 0,024)$) kein wesentlicher Unterschied festzustellen. Die Methode verhält sich also in beiden Fällen gleich. Für die Ergebnisse der Einzelmessungen siehe *Abbildung 3.3.6*.

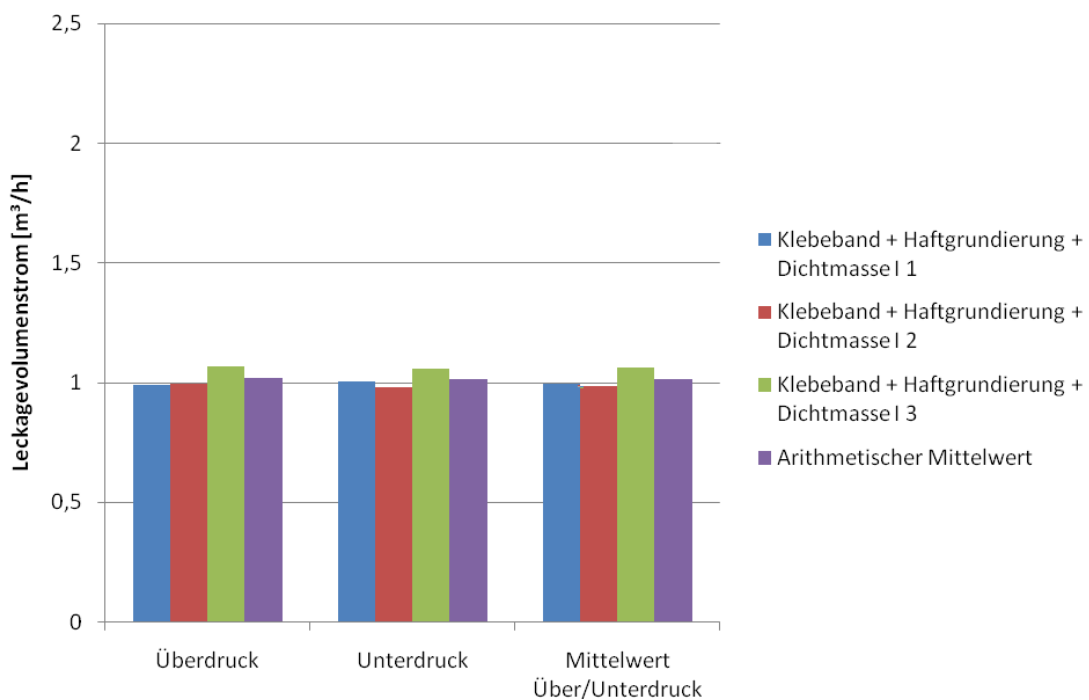


Abbildung 3.3.6: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse I“ („KHD I“) für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

„KHD II“

Insgesamt liegen die bei Methode „KHD II“ gemessenen Leakagevolumenströme deutlich unter denen aus „KHD I“. Bei der Auswertung der drei Proben zeigt sich, dass die zweite Probe („Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse II 2“) relativ deutlich von der ersten und dritten Probe abweicht. Nach optischer Prüfung war festzustellen, dass die Dichtmasse nicht so tief in den Riss eingedrungen ist wie bei Probe 1 und 3. Für das Mittel aus Über- und Unterdruck wird ein Volumenstrom von $\dot{V} = 0,419 * (1 \pm 0,210)$ errechnet. Zwischen dem Messergebnis der Überdruckmessung ($\dot{V} = 0,418 * (1 \pm 0,220)$) und der Unterdruckmessung ($\dot{V} = 0,421 * (1 \pm 0,200)$) besteht wie im vorangegangenen Fall kein deutlicher

Unterschied. Die Einzelergebnisse der Methode „KHD II“ sind in *Abbildung 3.3.7* dargestellt.

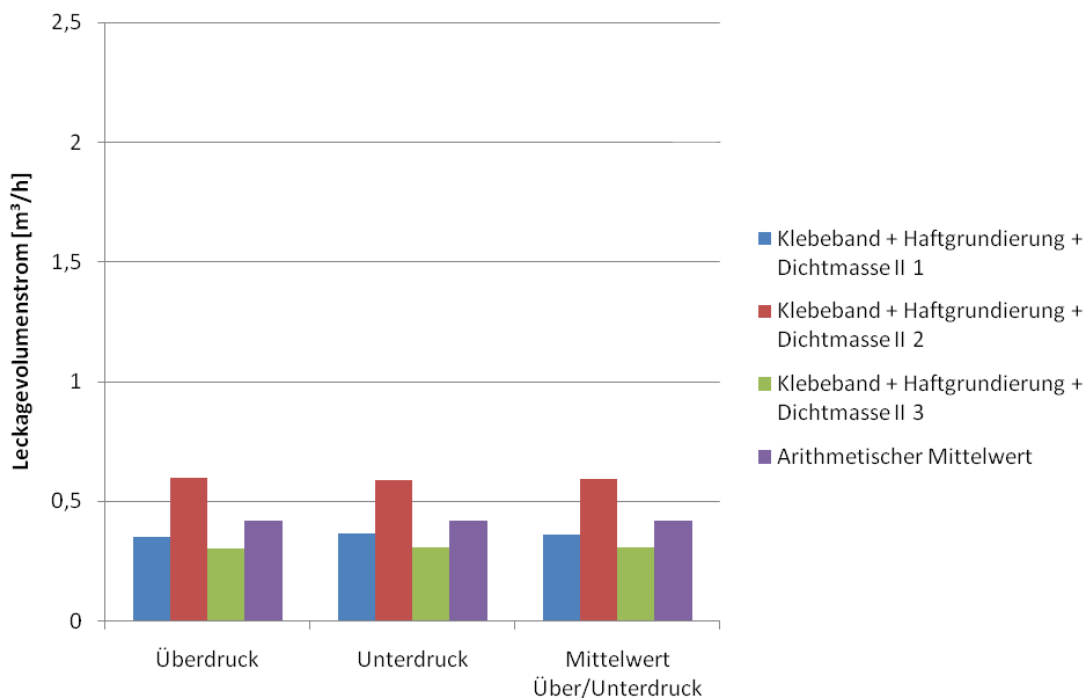


Abbildung 3.3.7: Messergebnisse für die Andichtung mit „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse II“ („KHD II“) für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

Vergleich

Der Vergleich der beiden Methoden zeigt, dass durch eine schmalere Kartuschenspitze 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 rund 59 % geringerer Leckagevolumenstrom als der bei Variante „KHD I“.

In *Abbildung 3.3.8* sind zur Verdeutlichung des Unterschiedes zwischen beiden Varianten die arithmetischen Mittelwerte aus den Einzelproben der jeweiligen Methode für den Über- und den Unterdruckfall gegenübergestellt.

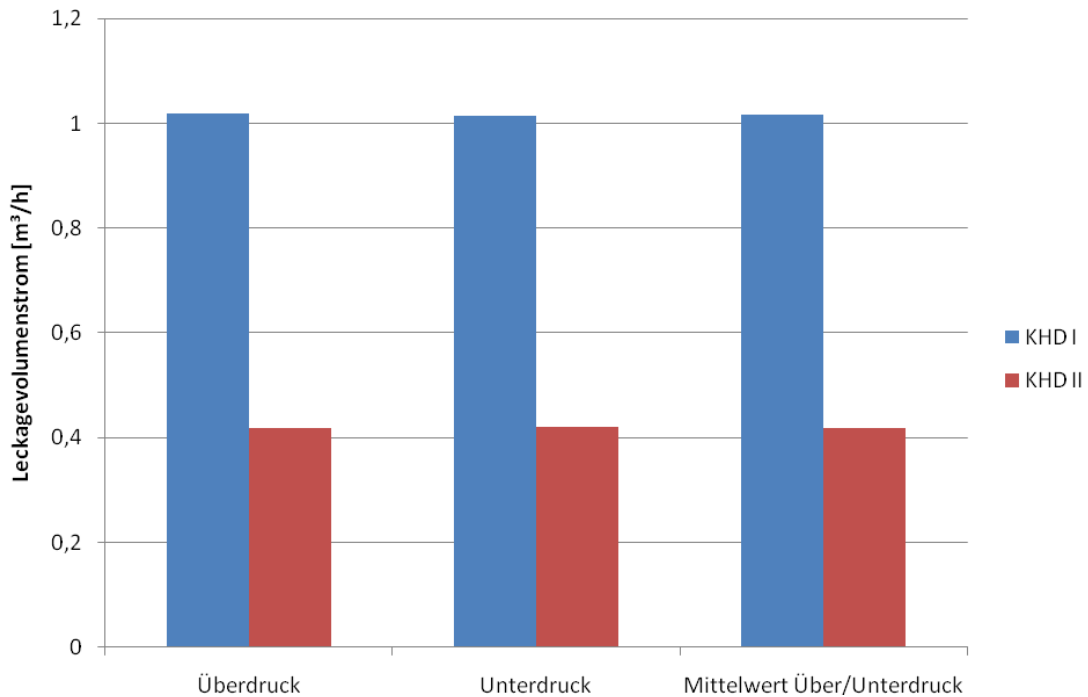


Abbildung 3.3.8: Vergleich der Mittelwerte von je drei Messungen für „KHD I“ und „KHD II“

3.3.4 Butylkautschukband + Haftgrundierung

Die Haftgrundierung wurde zunächst analog zu den vorangegangenen Versuchen auf den Musterbalken aufgebracht. Nach dem Abtrocknen der Grundierung wurde der Musterbalken mit dem Butylkautschukband an die Blende angedichtet. Die hohe Klebkraft des Bandes erforderte hier 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 (siehe *Abbildung 3.3.9 li.*). So wird das Zuschneiden und Übereinanderkleben mehrerer Einzelstreifen, wie es bei der Verwendung von Klebebändern auf Acrylatbasis häufig nötig ist, überflüssig. Die Verkleinerung der Rissleckage gelingt mit dem verwendeten Butylkautschukband jedoch kaum. Dafür lässt sich das Material nicht tief genug in den Balkenriss hineindrücken (siehe *Abbildung 3.3.9 re.*). Es ist aber festzustellen, dass kleinere Unebenheiten mit dieser Art Klebeband gut auszugleichen sind.

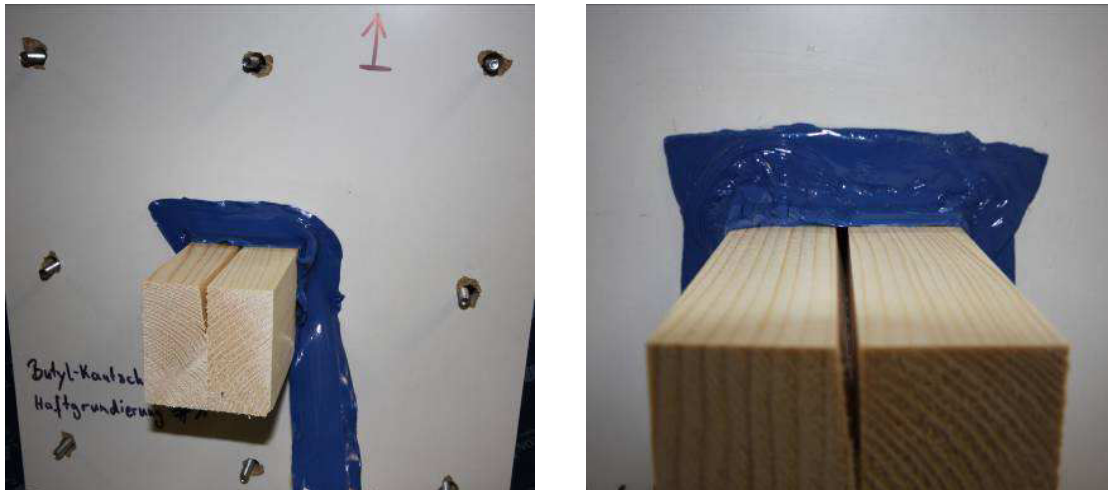


Abbildung 3.3.9: Verarbeitung Butylkautschukklebeband (links: Verklebung in einem Stück; rechts: recht geringe Eindringtiefe der elastischen Klebmasse)

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: Undichtheiten verhalten sich in manchen Fällen wie Rückschlagventile. Sie lassen den Volumenstrom in eine Richtung passieren, in die entgegengesetzte Richtung versperren sie den Strömungskanal jedoch.

Für das arithmetische Mittel aus beiden Fällen ergibt sich ein Volumenstrom von $\dot{V} = 1,811 * (1 \pm 0,040)$. Es gibt zwischen den Einzelmessungen keine großen Abweichungen. Die Standardabweichung des Mittelwertes liegt daher bei geringen 4 %. Der *Abbildung 3.3.10* sind die Messwerte der untersuchten Proben im Einzelnen zu entnehmen.

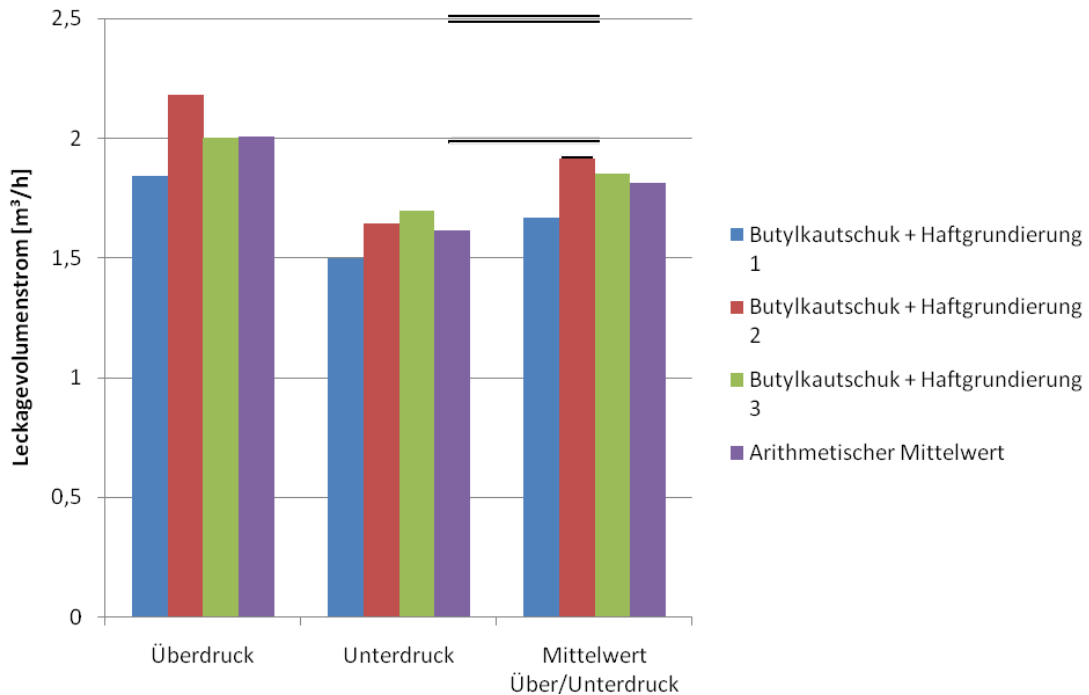


Abbildung 3.3.10: Messergebnisse für die Andichtung mit „Butylkautschukband + Haftgrundierung“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

3.3.5 Butylkautschukband + Dichtmasse

Es kommen bei der Methode „Butylkautschukband + Dichtmasse“ die gleiche Dichtmasse wie bei der Methode „KHD I“ und das gleiche Butylkautschukband wie bei der Methode „Butylkautschukband + Haftgrundierung“ zum Einsatz. Die Verarbeitung betreffend wird an dieser Stelle daher auf die vorangegangenen Kapitel verwiesen.

Das Vorgehen bei dieser Methode ist im Prinzip identisch mit dem aus *Kapitel 3.3.3*. Der Riss im Musterbalken wurde zunächst mit der Dichtmasse bestmöglich ausgespritzt und dann das Butylkautschukband wie im vorangegangenen Versuch um den Balken herum geklebt.

Der aus den untersuchten Einzelproben gewonnene arithmetische Mittelwert für den Leckagevolumenstrom bei Unterdruck ist identisch mit jenem bei Überdruck. Bei 50 Pa Druckunterschied ergibt sich ein Leckagevolumenstrom von $\dot{V} = 1,038 * (1 \pm 0,033)$ (arithmetischer Mittelwert aus Über-/Unterdruck über die drei untersuchten Einzelproben). Der erfasste Volumenstrom liegt also auf dem Niveau der Methode „KHD I“. Die geringe Standardabweichung des Mittelwertes von 3,3 % zeigt die geringen Abweichungen der Einzelproben zueinander. In *Abbildung 3.3.11* sind die Einzelmesswerte der Methode „Butylkautschuk + Dichtmasse“ zu sehen.

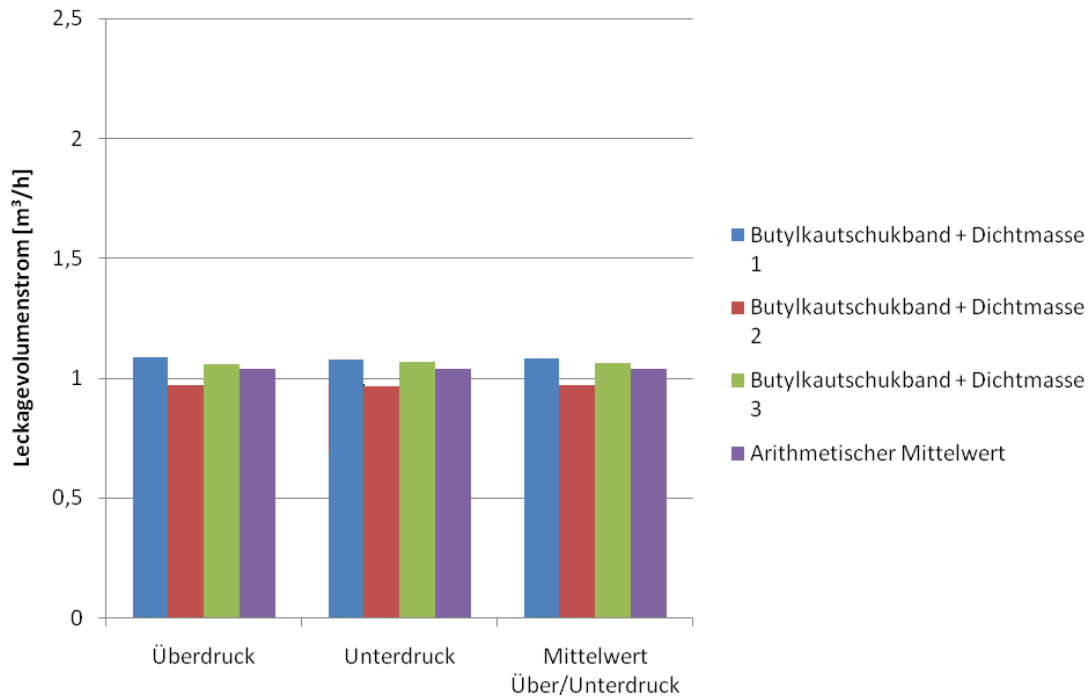


Abbildung 3.3.11: Messergebnisse für die Andichtung mit „Butylkautschukklebeband + Dichtmasse“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

3.3.6 Speziallösung I

Die Verarbeitung der „Speziallösung I“ (Reinacrylat-Dispersion) geschah in drei Schritten. Zunächst wurde mit einem herkömmlichen Pinsel eine erste Schicht der – in *Kapitel 2.3.2 Speziallösungen* bereits erwähnten – pastösen Masse auf Blende und Holzbalken aufgetragen. Auch der Riss im Musterbalken wurde mit der Masse komplett verfüllt. Wie in den vorangegangenen Versuchen war der Musterbalken dabei 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 angedrückt. Für eine möglichst gute Anpassung des Vlieses an die anzudichtende Durchdringung kam bei dem Riss ein schmaler Holzstab zum Einsatz, mit dem das Vlies in den Spalt gedrückt werden konnte. Im dritten und letzten Schritt wurde das Vlies mit einer zweiten Schicht der pastösen Masse ausgiebig durchtränkt. Dabei musste – wie auch vom Hersteller angemerkt – Schlaufen im Vlies besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, um hier eventuell entstehende Leckagen zu vermeiden. In der folgenden Bilderserie sind die gerade beschriebenen Schritte der Verarbeitung dieser Speziallösung nachzuvollziehen.

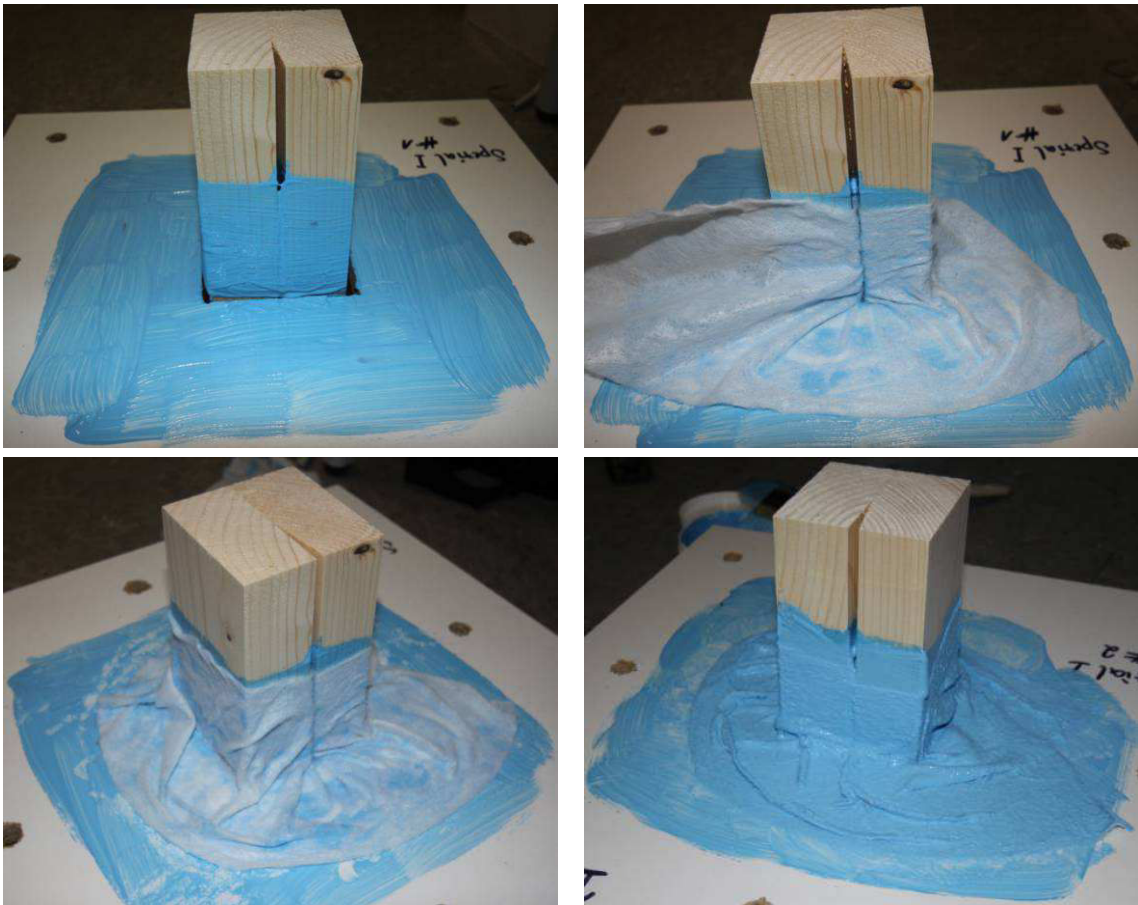


Abbildung 3.3.12: Bilderserie Verarbeitung „Speziallösung I“ (oben links: erste Schicht pastöser Masse auf Balken und Blende; oben rechts: Anpassung Vlies an Durchdringung; unten links: fertig angepasstes und angedrücktes Vlies, Schlaufen deutlich zu erkennen; unten rechts: zweite Schicht pastöser Masse / 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 3.3.13*), dabei aber nicht an dem vertikal stehenden Balken hinunterläuft.

Weiterhin ist anzumerken, dass das oben erwähnte sorgfältige Durchtränken des Vlieses besonders bei den sich bildenden Schlaufen einen erheblichen Materialeinsatz nach sich zieht. Es gilt außerdem den zusätzlichen Aufwand durch das Mitführen des Eimers (üblicherweise 20 Liter) und des entsprechenden Vlieses zu berücksichtigen. Dadurch können sich praxisrelevante Nachteile bei der Verwendung der „Speziallösung I“ auf Leitern oder anderen Arbeitsplätzen ergeben, die wenig Abstellmöglichkeiten bieten.



Abbildung 3.3.13: Komplett mit Masse verfüllter Riss

Den Messergebnissen sind keine gravierenden Unterschiede zwischen der Andichtung bei Unterdruck und jener bei Überdruck zu entnehmen. Diese unterscheiden sich um lediglich 5 %. Auffälliger ist das deutlich schlechtere Abschneiden der Probe 2 gegenüber den anderen beiden Proben. Daraus entsteht folglich eine große Standardabweichung im Gesamtergebnis für diese Methode ($\dot{V} = 0,421 * (1 \pm 0,271)$).

Insgesamt jedoch lässt sich hier ein im Vergleich zu den bisher untersuchten Methoden recht niedriger Leckagevolumenstrom ermitteln. Die verbleibende Undichtheit liegt auf einem Niveau mit der bis hierin besten Methode „KHD II“. Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind *Abbildung 3.3.14* zu entnehmen.

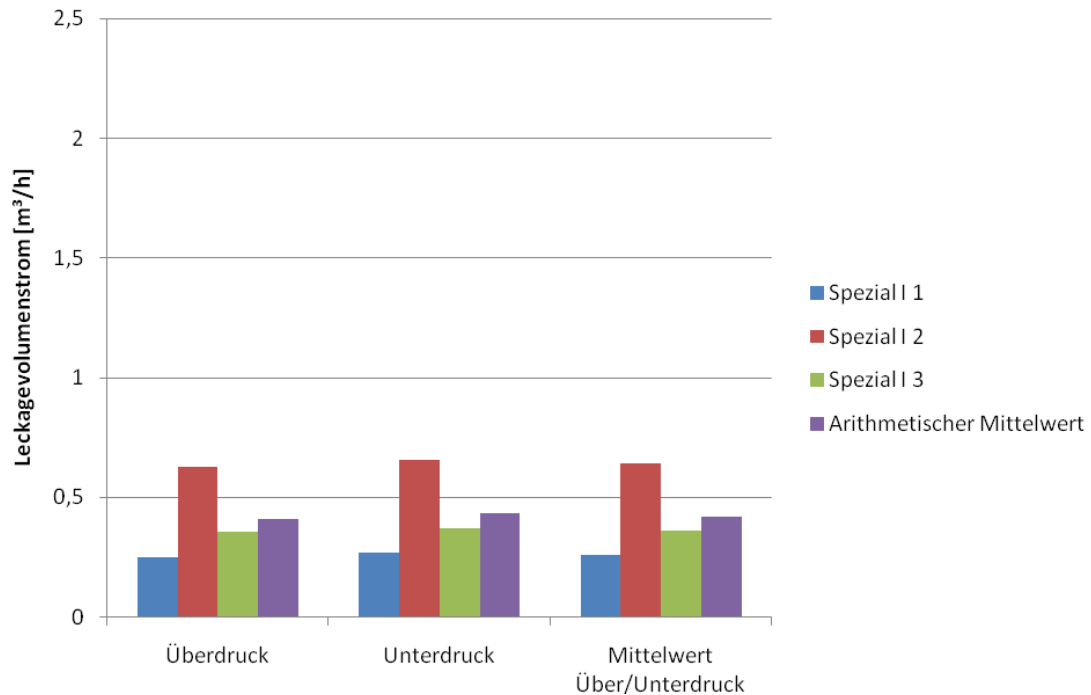


Abbildung 3.3.14: Messergebnisse für die Andichtung mit „Speziallösung I“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

Im Folgenden wird näher auf die große Abweichung der Probe 2 eingegangen:

Da der Leckagevolumenstrom bei Probe 2 im Vergleich zu den anderen beiden Proben auffällig hoch lag, wurde einige Tage nach der ersten Messung der Probe 2 eine weitere Messung derselben Probe durchgeführt. Auf diese Weise ist über die Reproduzierbarkeit des Messergebnisses ein Ausschluss einer fehlerhaften Messung möglich. Da das Ergebnis erneut deutlich höher lag als bei Probe 1 und 3, konnte ein fehlerhafter Messwert ausgeschlossen werden. Daraufhin 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 gehaltene Lichtquelle Licht durch den Riss. Zur Visualisierung der vorhandenen Leckage wurde dann der Versuchsstand mit Rauch gefüllt und ein Überdruck an diesen angelegt. Durch Beobachtung des Rauchaustritts lassen sich so Leckagen schnell lokalisieren. Es konnte ein flächiger Rauchaustritt an dem Übergang von Balken zu Blende festgestellt werden. Die Vermutung liegt also nahe, dass trotz optisch guter Ausführung die Durchtränkung des Vlieses an dieser Stelle weniger intensiv ist als bei den anderen Proben. Zur Bestätigung dieser Vermutung wurde der oben beschriebene Rauchaustritt auch an der Probe 1 untersucht. Hier konnte ebenfalls ein flächiger Rauchaustritt an dem Übergang von Balken zu Blende ausgemacht werden. Dieser fiel jedoch deutlich geringer aus als bei Probe 2.

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 Schwächen auftreten.

3.3.7 Speziallösung II

Die „Speziallösung II“ besteht aus einem Klebstoff in Rollenform mit mineralischen Füllstoffen. Das Material ist ebenfalls als Dichtmasse in einem Kartuschenbeutel erhältlich. Der luftdichte Übergang von Balken zu Blende kann mit dem Produkt allein jedoch 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 3.3.15*).

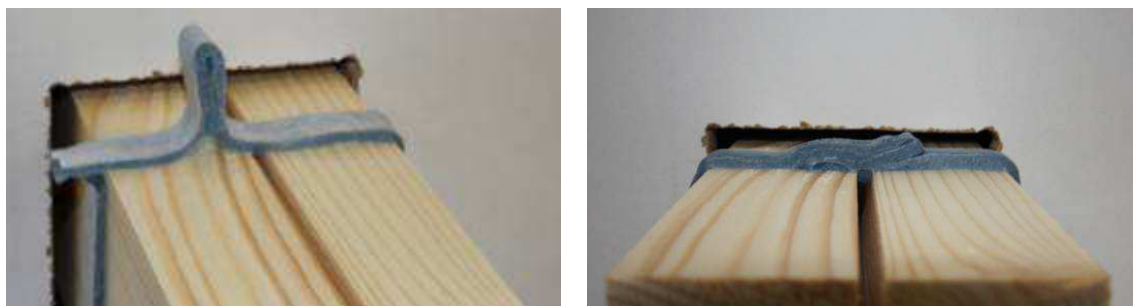


Abbildung 3.3.15: Verarbeitung „Speziallösung II“

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 (*siehe Abbildung 3.3.16*). Vermutlich würde in der Praxis eine solch aufwändige und schwierige Andichtung eines Holzbalkens nicht oder nur ungenügend durchgeführt werden.



Abbildung 3.3.16: Ungenügender Andichtungsversuch mit Luftdichtheitsfolie

Nach der Erfahrung mit der Folie und weil das Material sich nicht in besonderem Maße in den Riss applizieren ließ (siehe *Abbildung 3.3.15 rechts*), wurde hier von der Durchführung einer weiteren Messreihe abgesehen.

Die Speziallösung II hat zwar 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 ist diese Methode aus den genannten Gründen jedoch ungeeignet.

3.3.8 Putzanschlussband + Dichtmasse

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, welches bei dem luftdichten Anschluss von Fenstern, Türen und Durchdringungen zum Einsatz kommt, 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 3.3.17*). Der nicht selbstklebende Teil des Bandes wurde abschließend mit einem Luftdichtheitsklebeband desselben Herstellers mit der Blende verklebt.



Abbildung 3.3.17: Dreieck aus überstehendem Anschlussband an der Balkenecke (nach Herstellvorgabe)

Die Ausbildung der Dreiecke im Eckbereich des Balkens hat sich als sehr 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 wohl nur mit einigen Zentimetern Putz.

Weiterhin war auffällig, dass die Viskosität der frisch geöffneten Dichtmasse zunächst sehr gering war. Bei der direkt auf die Andichtung der Probe 1 folgenden Andichtungen der Proben 2 und 3 hatte sich die Viskosität wieder normalisiert und stimmte mit den Erfahrungen aus den vorangegangenen Versuchen überein. Ein Grund für diese Beobachtung ist möglicherweise eine zu Beginn nicht ausreichende Durchmischung der Masse.

Bei der Auswertung der Proben sind bei jeder Probe nur geringe Abweichung der Leckageströme bei Über- beziehungsweise Unterdruck festzustellen. Allerdings gibt es große Unterschiede in den Einzelergebnissen der drei Proben (siehe *Abbildung 3.3.18*).

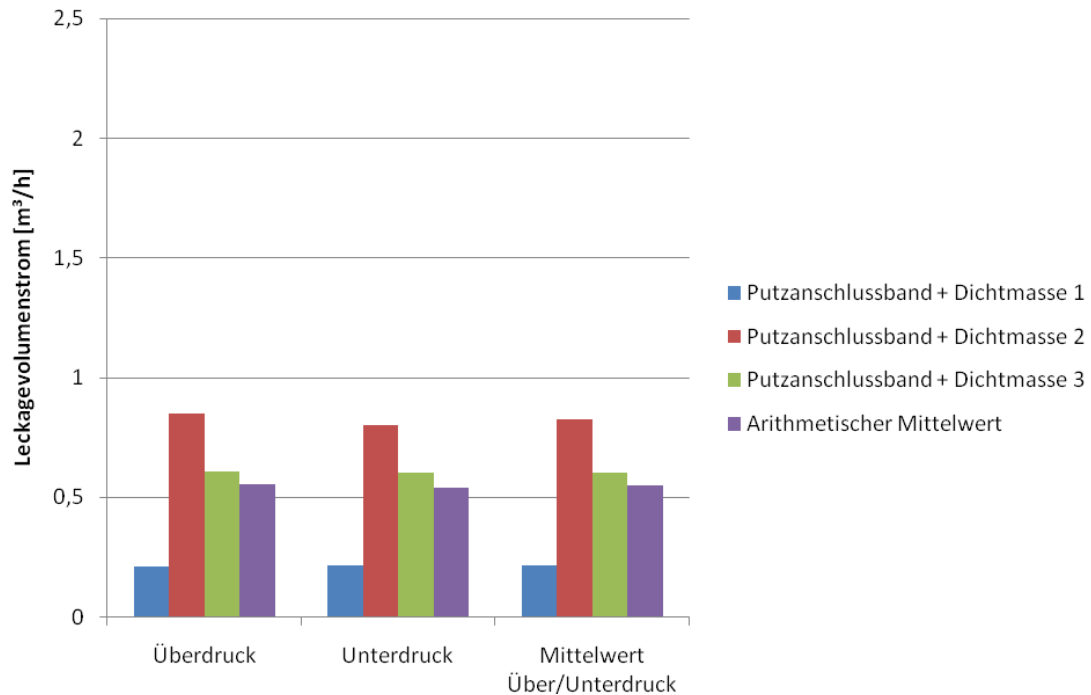


Abbildung 3.3.18: Messergebnisse für die Andichtung mit „Putzanschlussband + Dichtmasse“ für die drei Ausführungen jeweils mit Über- und Unterdruck sowie dem arithmetischen Mittelwert

Im Folgenden werden die Ursachen für die Streuung der Einzelmessungen genauer erläutert:

Bei der Herstellung der ersten Probe war wie oben beschrieben die Viskosität der Dichtmasse geringer als bei der Herstellung der Proben 2 und 3. Bei einer Gegenlichtprüfung zur Feststellung der Eindringtiefe war daher bei Probe 1 kein durch den Riss eindringendes Licht auszumachen. Dies führt zu der in den Messwerten abzulesenden hohen Qualität der Andichtung. Die Dichtmasse bei Probe 2 weist im Vergleich zu den anderen beiden Proben die geringste Eindringtiefe auf. Daher erscheint auch dieses Messergebnis plausibel.

Als Folge der untereinander stark abweichenden Einzelmessungen ergibt sich für die Methode „Putzanschlussband + Dichtmasse“ eine große Standardabweichung des Mittelwertes. Das Messergebnis für den fließenden Leckastrom liegt somit bei $\dot{V} = 0,548 * (1 \pm 0,327)$.

3.4 Methodenvergleich

In dem folgenden Kapitel wird ein Vergleich der untersuchten Methoden zueinander hergestellt. Dies geschieht sowohl auf Grundlage der Messergebnisse, als auch auf Grundlage der bei der Verarbeitung gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Praxistauglichkeit der verschiedenen Varianten.

Vergleich Messergebnisse

Für den Vergleich der Messergebnisse der untersuchten Methoden wird jeweils der arithmetische Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung über die jeweils untersuchten drei Einzelproben herangezogen. Die Güte der verwendeten Mittelwerte lässt sich aus den im vorangegangenen Kapitel aufgeführten Standardabweichungen und den sich daraus ergebenden Intervallgrenzen (siehe *Abbildung 3.4.1*) nachvollziehen.

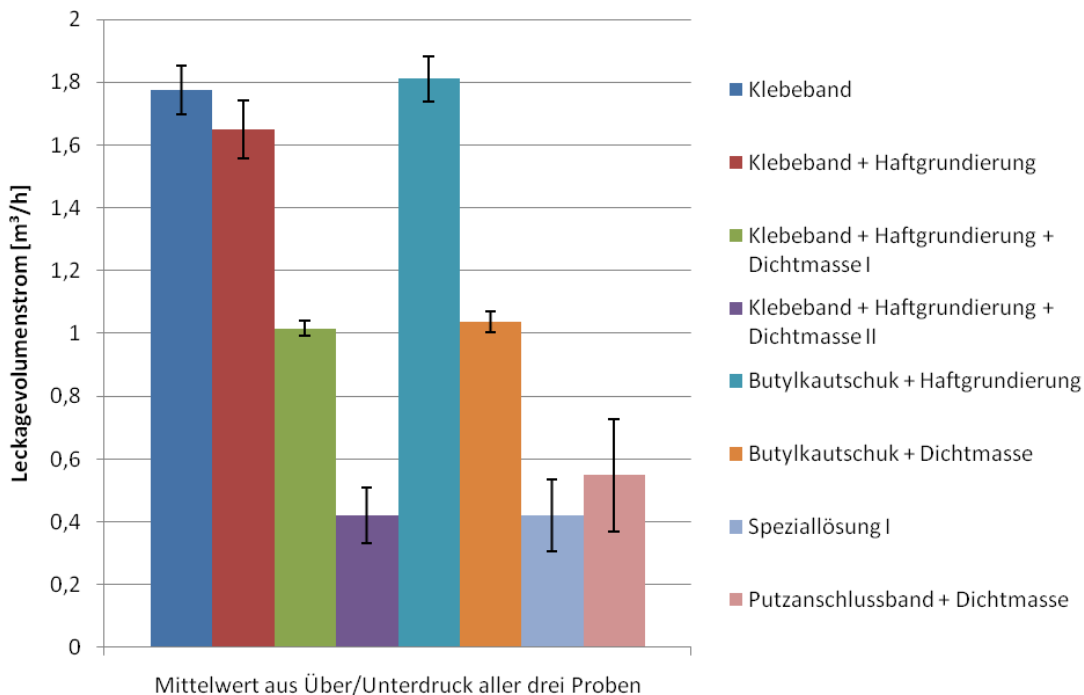


Abbildung 3.4.1: Vergleich der Leckageströme aller durchgeführten Versuche bei 50 Pa Druckdifferenz (jeweiliger Mittelwert aus Über- und Unterdruckmessung) mit Angabe der durch die Standardabweichung des Mittelwertes vorgegebenen Intervallgrenzen

Wird der Riss in keiner besonderen Weise abgedichtet, sondern lediglich der Balken mit Klebeband oder ähnlichem an die Blende angedichtet, so verbleibt bei einem Differenzdruck von 50 Pa ca. ein Leckagevolumenstrom von rund 1,8 m³/h. Dieser Volumenstrom wird durch den Einsatz einer Haftungsgrundierung erwartungsgemäß nicht in großem Maße beeinflusst.

Weiterhin lässt sich aus dem Vergleich zwischen „Butylkautschuk + Haftgrundierung“ (hellblaue Säule) und „Klebeband + Haftgrundierung“ (weinrote Säule) feststellen, dass diese unterschiedlichen Bänder zu einer vergleichbaren luftdichten Abdichtung führen. Der Unterschied liegt hier bei knapp 9 %.

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. Die Varianten „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse I“ („KHD I“) (grüne Säule) und „Butylkautschuk +

Dichtmasse“ (orangene Säule) erreichen gegenüber dem Fall, dass der Riss nicht weiter abgedichtet wird eine Reduktion des Leckagevolumenstroms um ca. 43 %. „KHD I“ und „Butylkautschuk + Dichtmasse“ 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 bei beiden Varianten fließenden Leckagevolumenströme nur marginal voneinander.

Der *Abbildung 3.4.1* (siehe *vorherige Seite*) ist außerdem zu entnehmen, dass die besten Andichtungen mit den Methoden „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse II“ („KHD II“) (lila Säule), „Speziallösung I“ (graublau Säule) und „Putzanschlussband + Dichtmasse“ (rosa Säule) gelungen sind. „KHD II“ und „Putzanschlussband + Dichtmasse“ unterscheiden sich zwar in der Herstellung der Luftdichtung zwischen Balken und Blende, die verwendete Dichtmasse zum Ausspritzen des Risses ist jedoch in beiden Fällen die gleiche. Insofern liegt es nahe, dass auch hier von beiden Varianten ein ähnliches Ergebnis in der Andichtung erreicht wird. Die „Speziallösung I“ unterscheidet sich hingegen grundlegend von den beiden anderen Methoden, ist dabei in der Qualität der Andichtung aber genauso erfolgreich. Gegenüber dem Fall, dass keine Abdichtung des Risses vollzogen wird, gelingt mit den gerade beschriebenen Methoden in diesem speziellen Versuchsaufbau eine Reduktion des Leckagevolumenstroms von mehr als 70 %.

In allen durchgeführten Versuchen wurden für die Herstellung von luftdichten Verbindungen spezielle Produkte eingesetzt. Insgesamt kann festgestellt werden, dass es weniger auf die gewählte Materialart der Abdichtung ankommt als insbesondere auf die weitergehende Rissabdichtung. Es ist naheliegend, dass sobald der Querschnitt des Risses verringert wird die Dichtheit merklich ansteigt. Damit sind allerdings noch keine Aussagen über die evtl. unterschiedliche Dauerhaftigkeit der Verbindungen erfolgt.

Vergleich Handhabung

In der Handhabung unterscheiden sich die untersuchten Methoden zur Holzbalkenandichtung deutlich. Wird keine besondere Abdichtung des Risses vorgenommen ist ein Balken relativ zügig an die luftdichte Ebene (Dampfbremsschicht, 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.

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 3.3.1*). Zur Vermeidung des Zuschneidens vieler Klebebandstreifen ist neben dem Butylkautschukband auch die Verwendung eines Putzanschlussbandes denkbar. Dies führte aber zu den unter *Kapitel 3.3.8* 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 I“ (Reinacrylat-Dispersion) denkbar. Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass das Mitführen eines 20 Liter Eimers mit der benötigten Masse und den dazugehörigen Vliesbändern nicht immer in der Praxis möglich ist. Die großen Anpassungsmöglichkeiten an verschiedenste Durchdringungen sind unter den in dieser Versuchsreihe untersuchten Produkten allerdings herausragend.

3.5 Bewertung mit Blick auf den Feuchteschutz

In *Kapitel 2.1.1 Feuchteschutz* wurde die Schadensanfälligkeit von Wandkonstruktionen infolge eines konvektiven Feuchteintrages durch Leckagen in der luftdichten Ebene bereits erläutert. Aus diesem Grund folgt eine Berechnung des für ein Normwohnklima (20 °C, 50 % r.F.) zu erwartenden Feuchtetransportes durch die verbleibende Leckage bei den acht untersuchten Methoden zur luftdichten Einbindung rissiger Holzbalkenköpfe in die luftdichte Ebene der Gebäudehülle. Weiterhin sollen die Faktoren erläutert werden, welche für eine Beurteilung der zulässigen Feuchtemenge im Hinblick auf eine Schadensfreiheit der Balkenköpfe berücksichtigt werden müssen.

Für die Ermittlung der über Konvektion durch die Leckage geförderten Feuchte ist zunächst der Sättigungsdampfdruck für Wasser $p_{WD,S}$ zu bestimmen. Dieser ist ausschließlich von der Temperatur (hier: 20 °C) abhängig und lässt sich nach Gleichung (15) berechnen.

$$p_{WD,S} = 611,2 * e^{\left(\frac{17,62*t}{243,12+t}\right)} = 2332,6 \quad [Pa] \quad (15)$$

Dabei ist:

t Temperatur in °C

Über die relative Feuchte φ (hier: 50 % r.F.) lässt sich dann der Partialdampfdruck p_{WD} ermitteln, den das Wasser in der Raumluft erzeugt.

$$p_{WD} = \varphi * p_{WD,S} = 1166,3 \quad [Pa] \quad (16)$$

Mit Kenntnis des Partialdruckes lässt sich nun unter Anwendung des idealen Gasgesetzes (Gaskonstante für Wasser: $R_w = 462 \text{ J}/(\text{Kg} * \text{K})$) die absolute Luftfeuchtigkeit φ_{wD} bestimmen.

$$\varphi_{wD} = \frac{P_{wD}}{R_w * T} = 8,6 \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad (17)$$

Zur Bestimmung der bei den verschiedenen Methoden durch die Leckage geförderten Wassermenge \dot{G} ist die gerade ermittelte absolute Luftfeuchtigkeit φ_{wD} noch mit dem jeweiligen Leckagevolumenstrom zu multiplizieren. Hier kann nicht der jeweils ermittelte Volumenstrom bei einem Differenzdruck von 50 Pa herangezogen werden. Druckunterschiede in dieser Größenordnung treten am Gebäude nur bei extremen Windlasten auf. Die Folge wäre eine unrealistisch hohe Bewertung des konvektiven Feuchtetransports.

Da es sich bei der Bewertung des konvektiven Feuchteintrages um ein komplexes Thema mit vielen Einflussfaktoren handelt, bei dem mit ausreichenden Sicherheiten bezüglich der gewählten Parameter gerechnet werden sollte, wird für die Berechnung eine hohe Windsogbelastung angenommen. Aus dem Mittelwert der höchsten Windgeschwindigkeiten (obere 33 %) in der Region Frankfurt a.M. ergibt sich eine Windgeschwindigkeit von rund 5,3 m/s. Daraus resultiert unter Berücksichtigung des Druckbeiwertes ein Windsog auf eine rechtwinklig stehende Fassade von 12,5 Pa (siehe *Anhang D*). Dazu addiert sich die Druckdifferenz, die sich aus dem Dichteunterschied der Innen- und Außenluft ergibt. Diese wird hier für die Heizperiode mit 1,8 Pa angeschätzt. Die Berechnungen zu den hier getroffenen Annahmen finden sich im Anhang.

Der folgenden Berechnung liegt somit der Leckagevolumenstrom bei rund 14 Pa zugrunde. Um diesen zu erhalten ist die Anwendung der Strömungsgleichung (2) erforderlich. Der daraus resultierende Feuchteintrag lässt sich nach Gleichung (18) ermitteln.

$$\dot{G} = \frac{G}{t} = \varphi_{wD} * \dot{V}_{14} \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] \quad (18)$$

Nach Gleichung (18) ist der konvektive Feuchtetransport durch die Leckage direkt proportional zu dem gemessenen Leckagevolumenstrom. Daher bleiben die aus dem Methodenvergleich in *Kapitel 3.4* ermittelten Verhältnisse zwischen den verschiedenen Varianten zur Holzbalkenandichtung bestehen (siehe *Abbildung 3.5.1*). Der Feuchtetransport soll hier zur besseren Veranschaulichung für den Zeitraum von einem Tag angegeben werden. Bei 14 Pa Druckunterschied zwischen dem Inneren des Gebäudes und der Umgebung ergeben sich pro Tag Wasserdampfmengen von ca. 33 – 179 g, die per Konvektion durch die verbleibende Leckage transportiert würden.

Bei der Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass es sich um eine von innen nach außen durchgehende Leckage handelt und nicht um z.B. eine „sackförmige“ Leckage

ohne direkte Verbindung nach außen. Eine Aussage dazu, wie viel der berechneten Feuchte tatsächlich in der Konstruktion verbleiben und wie viel mit dem Luftstrom direkt nach außen abgeführt werden kann hier nicht beantwortet werden.

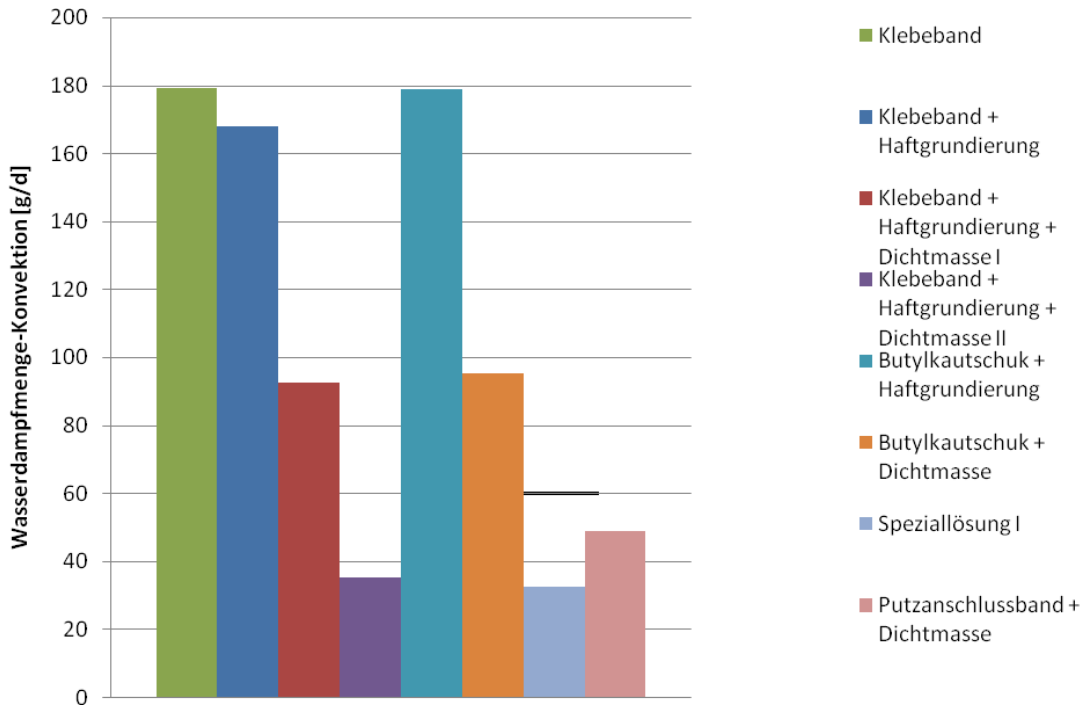


Abbildung 3.5.1: Abschätzung zum konvektiv in eine Wandkonstruktion eingebrachte Wasserdampfmenge für die untersuchten Andichtungsmethoden @ 14 Pa

Die Frage der zulässigen Feuchtemenge ist aus zwei Gründen nicht pauschal zu beantworten.

- 1) Es stellt sich zunächst die Frage in welchem Raumbereich die konvektiv eingebrachte Feuchtigkeit verbleibt. Zur Ermittlung dessen wären zunächst Modelle bezüglich der Fläche zu entwickeln, auf dem der Wasserdampf adsorbiert. Mit einer Simulationssoftware zur Berechnung des Feuchtetransportes in porösen Materialien (z.B. „Delphin“) wäre dann eine Beurteilung des kapillaren Wassertransportes im Holz möglich. Auf das so berechnete Materialvolumen könnte nun die Wassermenge verteilt werden. Daraus ließe sich dann über das Trockengewicht der jeweiligen Holzsorte eine Holzfeuchte ermitteln.
- 2) Weiterhin ist die Frage der verträglichen Holzfeuchte zu klären. Wie in *Kapitel 2.2.1* bereits erläutert ist für die Pilzbildung freies, also nicht zellgebundenes Wasser erforderlich. Die holzartspezifische Fasersättigungsgrenze, oberhalb der freies Wasser in den Zellzwischenräumen vorhanden ist, sollte daher nicht über einen längeren Zeitraum (> 6 Monate) überschritten werden. Zur Garantie einer Schadensfreiheit sollte die Holzfeuchte die Fasersättigungsgrenze jedoch

deutlich unterschreiten. In der Praxis wird eine Holzfeuchte bis ca. 20 % als gering schadensanfällig betrachtet.

3.6 Bewertung mit Blick auf den Wärmeschutz

An den nach einer Sanierungsmaßnahme verbliebenen Leckagen an Holzbalkendurchdringungen treten In- und Exfiltrationseffekte auf. In der Heizperiode bedeutet dies konkret einen Verlust an Wärmeenergie, da die ausströmende Innenraumluft ein hohes Temperaturniveau aufweist, auf welches die nachströmende kalte Außenluft geheizt werden muss. Wie in *Kapitel 2.1.1 Wärmeschutz* bereits erläutert bedeutet dies einen zusätzlichen Heizenergieaufwand und führt zu zusätzlichen Kosten.

Zur Ermittlung des zusätzlichen Heizwärmebedarfs sind zunächst einige Annahmen für die Rahmenbedingungen und Parameter festzulegen. Diese sollen im Folgenden erläutert werden.

Es sei ein imaginäres Gebäude in Frankfurt am Main angenommen (Koordinaten: 50°6'39" N, 8°40'55" E). Dieses liegt auf einer Höhe von 105 Metern über dem Meeresspiegel. Für diesen Standort wurde mit dem frei zugänglichen Online-Tool PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System⁷) die durchschnittliche Temperatur in der Heizperiode ermittelt. Dafür liegen für jeden Monat die Tagesdurchschnittstemperaturen aus der Periode 1995 bis 2003 vor. Nach deutscher Rechtsprechung (*LG Düsseldorf BIGBW 55, 31; AG Düsseldorf ZMR 56, 332*) wird – sofern im Mietvertrag nicht anders geregelt – die Dauer vom 1. Oktober bis zum 30. April (entspricht 211 Tagen) als Heizperiode definiert. Die mittlere Temperatur in diesem Zeitraum soll bei der Berechnung der zusätzlichen Heizkosten als Außenlufttemperatur angesetzt werden. Diese liegt bei 5,8 °C. Für die Innenraumlufttemperatur wird der typische Wert von 20 °C angesetzt. Weiterhin wird vereinfachend die spezifische Wärmekapazität $c_{p,L}$ und die Dichte ρ_L der Luft als konstant angenommen. Die Wärmeverluste Q_V bei einem Druckunterschied zwischen innen und außen von 7 Pa lassen sich somit mit Gleichung (19) berechnen.

$$Q_V = c_{p,L} * m_{L,7} * (T_{innen} - T_{außen}) \quad [kWh] \quad (19)$$

$$Q_V = c_{p,L} * \rho_L * V_{L,7} * (T_{innen} - T_{außen}) \quad [kWh] \quad (20)$$

Die Wahl eines Differenzdruckes zwischen dem Innenraum des Gebäudes und der Umgebung von 7 Pa basiert auf der Annahme einer mittleren Windgeschwindigkeit von 3,5 m/s. Dies ist ein für die Rhein-Main-Region typischer Wert und entspricht einer schwachen Brise auf der Beaufort-Skala (Bft=3). Für die Windsogseite ergibt sich unter Berücksichtigung des Druckbeiwertes ein Winddruck von 5,4 Pa. Dazu kommt eine zusätzliche Druckdifferenz, die sich aus den Dichteunterschieden zwischen der Innen-

⁷ <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

und der Außenlufttemperatur ergibt. Daraus resultiert ein Druckunterschied von zusätzlich 1,8 Pa. Die Berechnung zu dem hier gewählten Differenzdruck zwischen Innenraum und Umgebung ist analog zu derjenigen aus *Kapitel 3.5*.

Abbildung 3.6.1 zeigt unter den gegebenen Bedingungen die auf die Nutzenergie bezogenen zusätzlichen Wärmeverluste durch die jeweilige Leckage bei der Holzbalkenandichtung.

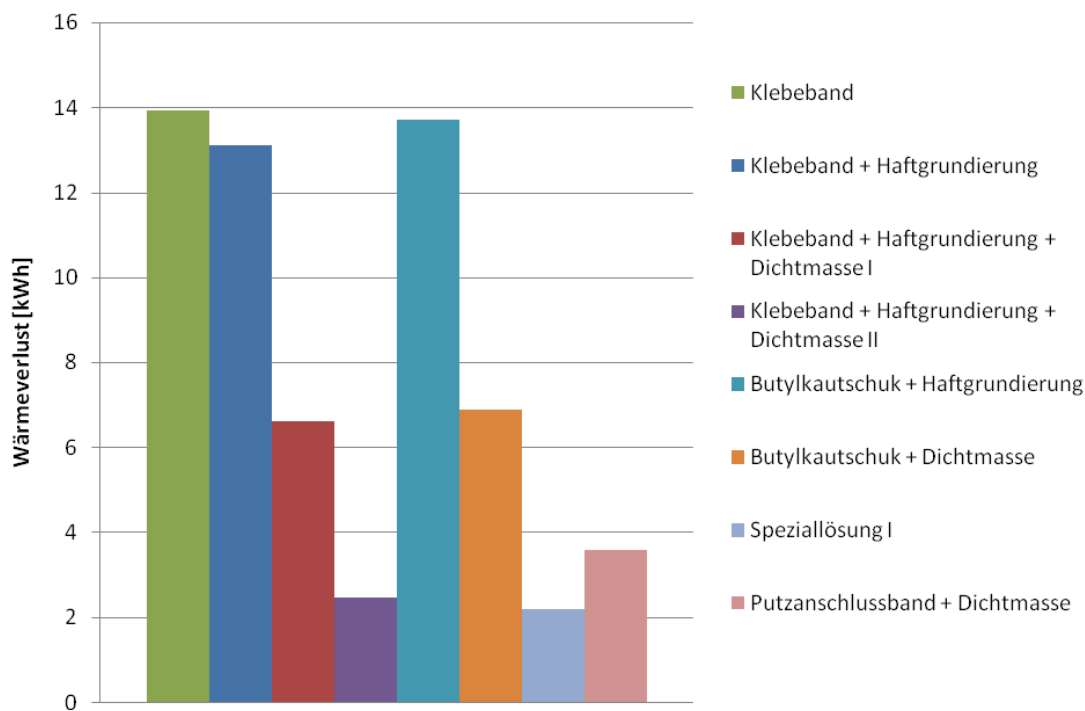


Abbildung 3.6.1: Wärmeverluste bezogen auf die Nutzenergie als Folge der Undichtheit an einer einzelnen Holzbalkendurchdringung für die gegebenen Parameter @ 7 Pa

3.7 Handlungsempfehlung

Die Einbindung rissiger Holzbalkenköpfe in die luftdichte Ebene der Gebäudehülle ist sowohl mit dem Einsatz einer geeigneten Dichtmasse, als auch mit der untersuchten „Speziallösung I“ – bestehend aus einer streichbaren pastösen Masse und einem Spezialvlies – in ausreichender Qualität denkbar. Gegenüber der Abdichtung mit Klebeband (ohne Rissverfüllung) war mit beiden Varianten eine Reduktion des Leckagevolumenstroms auf bis zu 23 % möglich. Die Entscheidung für die eine oder die andere Methode zur Holzbalkenandichtung bleibt aus folgenden Gründen der Einzelfallprüfung vorbehalten:

Die als „Speziallösung I“ benannte pastöse Masse ist in Kombination mit dem dazugehörigen Spezialvlies sehr variabel an jede am Bau übliche Durchdringung anzupassen, so dass stets mit einer hohen Qualität der Luftdichtung zu rechnen ist. Die starke Geruchsentwicklung und die Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Einwirkung bis zur vollständigen Abtrocknung der pastösen Masse bringen allerdings praxisrelevante Nachteile mit sich. Besonders aufgrund der Geruchsentwicklung ist ein

Verarbeiten in wenig belüfteten Räumen nicht zu empfehlen. Weiterhin schränken der Transport und der Platzanspruch des großen Eimers mit der pastösen Masse den Einsatzbereich an der Baustelle ein. Es ist zu berücksichtigen, dass in den Versuchen ein relativ großer Materialeinsatz nötig war.

Bei Verwendung der Dichtmasse zur Holzrissabdichtung ergibt sich für den Praktiker der Vorteil, dass er neben den üblicherweise verwendeten Produkten zur Einbindung von Holzbalkendurchdringungen in die luftdichte Ebene (Dampfbremsfolie, 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 I“ 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 ließe sich hier durch das Bohren eines ausreichend breiten Injektionskanals oder durch den provisorischen Bau einer schmaleren Spitze Abhilfe schaffen. Dies birgt aber einen zusätzlichen Zeitaufwand in sich. Außerdem ist der Bohrung von Injektionskanälen aus Stabilitätsgründen des Holzbalkens Grenzen gesetzt.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in mehreren Versuchsreihen acht nach Herstellerangaben handelsübliche Varianten zur Holzbalkenabdichtung in der Altbausanierung untersucht.

Dazu wurden unterschiedliche Andichtungen an einem vollständig freiliegenden – daher rundum gut erreichbaren – Musterbalken mit einem definierten Spalt messtechnisch untersucht. Die Versuche wurden in einem an die **[DIN_EN12114]** angelehnten Versuchsstand durchgeführt. Die gemessenen Einzelproben – bestehend aus einer Holzblende, der Holzbalkendurchdringung durch die Blende und der untersuchten Andichtungsmethode – wurden luftdicht mit dem Versuchsstand verschraubt und der sich infolge der angelegten Druckdifferenzserien einstellende Leckagevolumenstrom durch die Holzbalkenabdichtung erfasst.

Bei der Andichtung der für den Versuch künstlich hergestellten Balkendurchdringung mit Luftdichtheitsklebeband – ohne weitere Maßnahmen – verblieb ein Leckagevolumenstrom von ca. 1,8 m³/h bei 50 Pa Druckunterschied zwischen Versuchsstand und Umgebung. Dies wird als Referenzgröße für die übrigen Abdichtungsmethoden herangezogen.

Die verschiedenen Varianten zur Holzbalkenabdichtung bestehen aus einer Kombination von bis zu drei Materialien aus den Produktgruppen Klebeband, Dichtmasse/Kleber, Haftgrundierung, dehnfähige Butyl-Kautschukklebebänder, Speziallösung und Putzanschlussband (siehe *Tabelle 2.3-1*).

Mit den Methoden „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse II“ („KHD II“) und „Speziallösung I“ war die größte Reduktion des oben genannten Leckagevolumenstromes möglich. Bei entsprechender Andichtung verblieben lediglich rund 25 % des Referenzleckagevolumenstroms. Die Auswahl der in der Praxis verwendeten Methode kann bei beiden Varianten erst nach einer Einzelfallprüfung erfolgen.

Anhand eines durchgeführten Produktvergleichs unterschiedlicher Hersteller bei der Methode „Klebeband + Haftgrundierung + Dichtmasse“ („KHD“), konnte außerdem der Einfluss der gewählten Produktreihe ermittelt werden. 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 „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.

Unter den in den *Kapiteln 3.5 und 3.6* getroffenen Voraussetzung wurden zudem der konvektive Feuchtetransport und der Heizwärmeverlust für die jeweils untersuchten

Methoden berechnet. Die durch die Leckage beförderte Wasserdampfmenge liegt zwischen 33 und 180 g/d. Die beförderte Wasserdampfmenge ist dabei nicht mit der tatsächlich am Balken bzw der Wandkonstruktion adsorbierten Wassermenge zu verwechseln. Für die Heizwärmeverluste ergeben sich Werte zwischen 2 und 14 kWh/Leckage (Einzelriss) bezogen auf die Nutzenergie.

5 Ausblick

Die vorliegende Bachelorarbeit gibt Hinweise auf die korrekte Einbindung von Holzbalkendurchdringungen. Es wurden aber auch weitere Fragen aufgeworfen. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse bieten sich weitere Versuchsreihen an, um diese Fragestellungen zu beantworten.

Die durchgeführten Messungen sind an einem idealisierten Musterbalken mit einer definierten Leckage durchgeführt worden. In der Praxis findet sich jedoch an alten Holzbalkendurchdringungen eine Vielzahl unterschiedlicher Leckagen. Dieser Umstand legt weitere Versuche an anderen, komplexeren Rissgeometrien nahe. Dabei sollte sich nicht auf künstlich hergestellte Musterbalken beschränkt, sondern auch Proben realer Holzbalken untersucht werden. Diese können nicht nur komplexere Leckagen aufweisen (stark verwinkelt und in Haarrissen auslaufend), der vorhandene Schmutz an alten Balken kann auch einen negativen Einfluss auf die durchgeführte Verklebung haben. Weiterhin weisen reale Balkenproben größere Unebenheiten an der Oberfläche auf, die die Abdichtung möglicherweise weiter erschweren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde sich ausschließlich auf Spezialprodukte für die Herstellung von luftdichten Schichten beschränkt. Die Frage, ob es nicht auch andere Produkte – wie Brunnenschäume, Zwei-Komponenten-Kleber oder Dickbeschichtungen – aus anderen Bereichen gibt, die potentiell für die Abdichtung etwaiger Durchdringungen geeignet sind, bleibt offen. Bei der Verarbeitung der untersuchten Varianten wurde sich streng an die Handlungsempfehlungen der Hersteller gehalten. Auf das Bohren von Injektionskanälen oder das entwerfen schmalerer Kartuschenspitzen zur erleichterten Verfüllung des Risses im Musterbalken wurde verzichtet. Untersuchungen zu alternativen Lösungsansätzen, sowohl bei der Produktauswahl, als auch bei der Verarbeitung, schließen sich direkt an diese Arbeit an und werden vom Passivhaus Institut Darmstadt in Zukunft veröffentlicht werden.

Der Umfang der vorliegenden Bachelorarbeit erlaubte keine ausgedehntere Versuchsreihe. Somit war nur die Untersuchung dreier Einzelproben zu jeder Andichtungsmethode durchführbar. Dies führte bei einzelnen Proben zu einer großen Streuung der Einzelmesswerte und infolgedessen zu einer hohen Standardabweichung des Mittelwertes. Qualitative Aussagen zu den jeweiligen Fällen sind daher schwierig zu treffen. Um hier eine höhere Genauigkeit zu erlangen wären weitere Einzelmessungen durchzuführen.

Die ermittelten Werte für den nach einer Andichtung der Holzbalkendurchdringungen verbleibenden Leckagvolumenstrom können für weitere Untersuchungen verwendet werden. So ist für die Bewertung des konvektiven Feuchteintrages in den Wandaufbau die Kenntnis der verbleibenden Undichtheit am Balken elementar. Am Passivhaus Institut Darmstadt und an der Universität Innsbruck wird zu diesem Thema aktuell unter Verwendung der Software Delphin geforscht.

Anhang A – Datenblätter

Membranpumpen für Luft, Gase und Dämpfe

INNOVATIVE
TECHNOLOGIE
WELTWEIT

KNF NEUBERGER



LABOPORT® Mini-Membran- Vakuumpumpen und -Kompressoren

Technische Merkmale:

- 100% ölfreie Förderung
- dadurch unverfälschtes Fördern, Evakuieren und Verdichten
- Version für leicht aggressive bzw. korrosive Gase und Dämpfe
- wartungsfrei
- umweltfreundlich
- hohe Gasdichtigkeit.

Pumpen der Typenreihe LABOPORT® N 86 K_.18

Die Membranpumpen der Reihe N 86 sind einköpfige trockenlaufende Geräte, die in Laboratorien für vielfältige Anwendungen zum Einsatz kommen. Sie fördern, verdichten und evakuieren unverfälscht, d.h. die Medien werden nicht verunreinigt.

Das Herz der sehr kompakten Pumpen ist eine KNF-Strukturmembrane. Diese patentierte Membrane wurde mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode spannungsoptimiert. Das Ergebnis: verringerte Baugröße der Pumpen und längere Lebensdauer der Membrane.

Die Pumpen werden in unterschiedlichen Materialausführungen im medienberührten Bereich angeboten.

Technische Daten:

	N 86 KN.18	N 86 KT.18
Förderleistung (l/min) ¹⁾	6	5,5
Endvakuum (mbar abs.)	100	160
Betriebsüberdruck (bar)	2,4	2,5
Schlauchanschluss (mm)	ID 4	ID 4
Zulässige Gas- und Umgebungstemperatur	+5...+40 °C	+5...+40 °C
Netz	230V/50Hz	230V/50Hz
Schutzart des Motors	IP 20	IP 20
Motorleistung P ₁	65 W	65 W
Stromaufnahme	0,63 A	0,63 A
Gewicht	1,9 kg	1,9 kg
Abmessungen LxHxB (mm)	164/141/90	164/141/90
Mit Thermoschalter und Netzsicherung		

Motoren mit anderen Spannungen und Frequenzen auf Anfrage.

¹⁾ Förderleistung bei atmosphärischem Druck

Material der medienberührten Pumpenkopfteile

Typ/Bestell-Nr.	Pumpenkopf	Membrane	Ventile
N 86 KN.18	PPS	EPDM	FPM
N 86 KT.18	PPS	PTFE-beschichtet	FFPM

Zubehör und Ersatzteile

Benennung	Bemerkung	Bestell-Nr.
Geräuschdämpfer	G 1/8	000345
Ansaugfilter	G 1/8	000346
Schlauchnippel	G 1/8, PVDF, für Schlauch ID 4 mm	025671
Feinregulierkopf mit Manometer	druckseitig	001786
Feinregulierkopf mit Vakuummeter	saugseitig	001787
Ersatzteil-Kit	für N 86 KN.18	043241
Ersatzteil-Kit	für N 86 KT.18	043242

Membranpumpen für Luft, Gase und Dämpfe

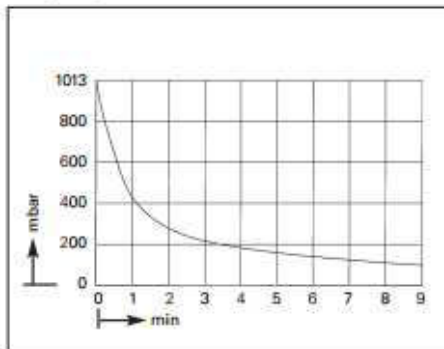
INNOVATIVE
TECHNOLOGIE
WELTWEIT

KNF NEUBERGER

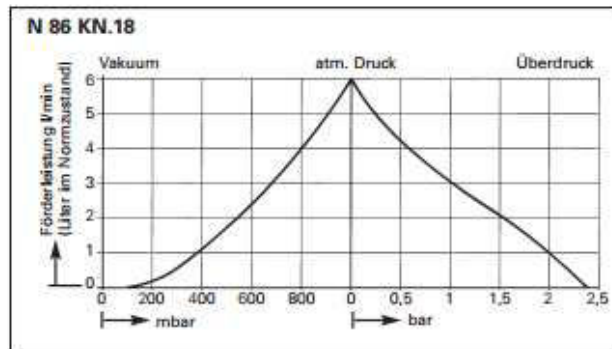


Maße und Leistungskurven

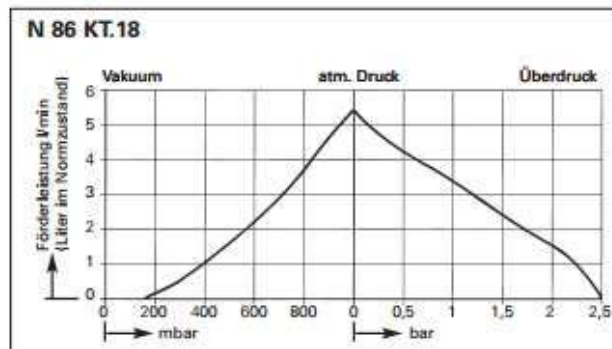
Auspumpzeit eines 5 l Behälters



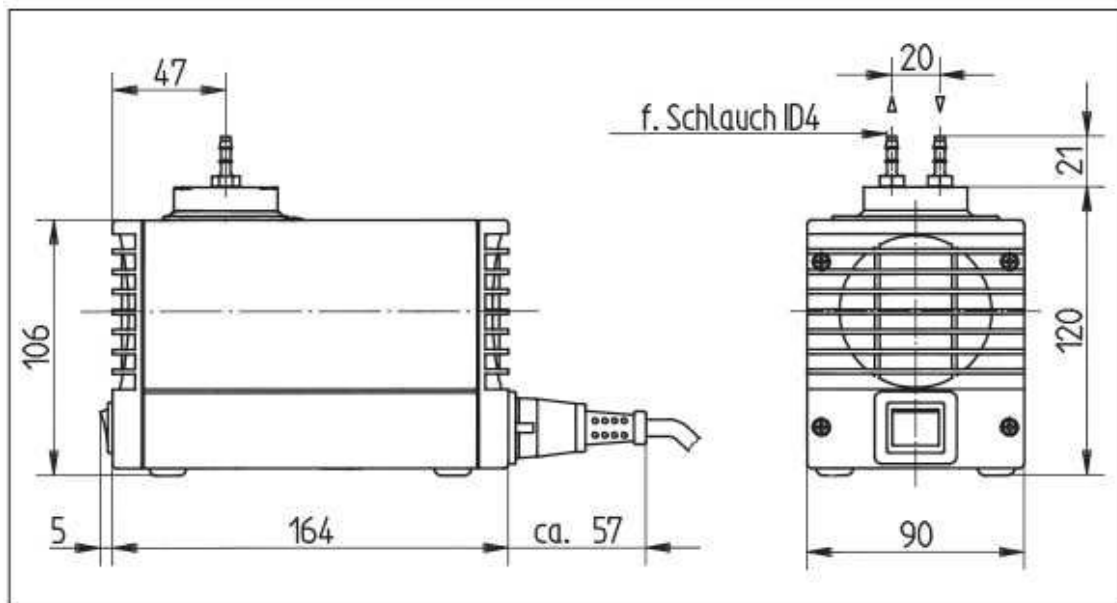
Leistungskurve



Leistungskurve



Maße (mm)



KNF Neuberger GmbH, Alter Weg 3, D-79112 Freiburg, Tel. 07664/5909-0, Fax 07664/5909-99, www.knf.de, E-Mail: info@knf.de

Technische Änderungen vorbehalten.

KNF 08/2010 Produced in Germany

Membranpumpen für Luft, Gase und Dämpfe

INNOVATIVE
TECHNOLOGIE
WELTWEIT

KNF
NEUBERGER



Membran- Vakuumpumpen und -Kompressoren

Technische Merkmale:

- 100% ölfreie Förderung
- dadurch unverfälschtes Fördern, Verdichten und Evakuieren
- Version für leicht aggressive bzw. korrosive Gase und Dämpfe
- wartungsfrei
- umweltfreundlich
- gasdicht, Leckrate ca. 6×10^{-3} mbar x l/s, jedoch serienmäßig nicht geprüft.

Pumpen der Typenreihe N 026.1.2 A_18

Die Membranpumpen der Reihe N 026.1.2 sind zweiköpfige trockenlaufende Geräte, die in Laboratorien für vielfältige Anwendungen zum Einsatz kommen. Sie fördern, verdichten und evakuieren unverfälscht, d.h. die Medien werden nicht verunreinigt. Die Pumpen werden in unterschiedlichen Materialausführungen im medienberührten Bereich angeboten.

Technische Daten:

	N 026.1.2 AN.18	N 026.1.2 AT.18
Förderleistung (l/min) ¹⁾	39	31
Endvakuum (mbar abs.)	100	100
Betriebsüberdruck (bar)	2	2
Schlauchanschluss (mm)	ID 9	ID 9
Zulässige Gas- und Umgebungstemperatur	+5...+40 °C	+5...+40 °C
Netz	230V/50Hz	230V/50Hz
Schutzart des Motors	IP 20	IP 20
Motorleistung P ₁	170 W	170 W
Stromaufnahme	0,85 A	0,85 A
Gewicht	5,8 kg	5,8 kg
Abmessungen LxHxB (mm)	254/192/185	254/192/185
Mit Thermoschalter		

Material der medienberührten Pumpenkopfteile

Typ/Bestell-Nr.	Pumpenkopf	Membrane	Ventile
N 026.1.2 AN.18	Aluminium	CR	Edelstahl
N 026.1.2 AT.18	Aluminium	PTFE-beschichtet	Edelstahl

Motoren mit anderen Spannungen und Frequenzen auf Anfrage.

¹⁾ Förderleistung bei atmosphärischem Druck

Zubehör

Benennung	Bemerkung	für Typ	Bestell-Nr.
Geräuschdämpfer/Ansaugfilter	G 1/4		000352
Überdruckventil	2 bar	N 026.1.2 AN.18	003074
Feinregulierkopf mit Manometer	druckseitig	N 026.1.2 AN.18	011867
Feinregulierkopf mit Vakuummeter	saugseitig	N 026.1.2 AN.18	011868

Membranpumpen für Luft, Gase und Dämpfe

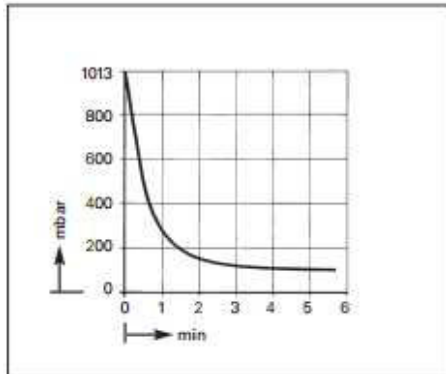
INNOVATIVE
TECHNOLOGIE
WELTWEIT

KNF
NEUBERGER

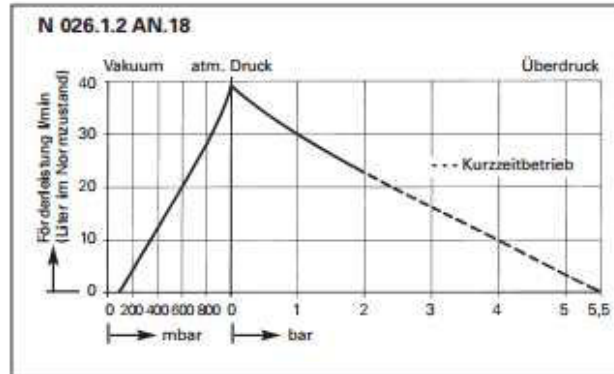


Maße und Leistungskurven

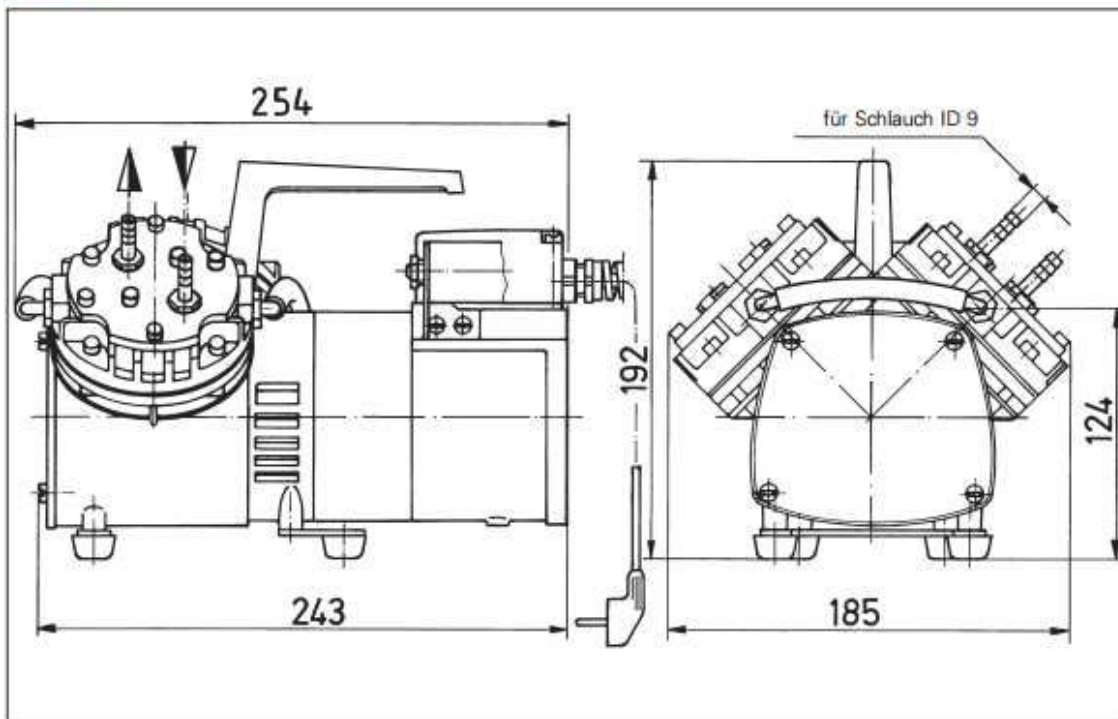
Auspumpzeit eines 20 l Behälters



Leistungskurve



Maße (mm)



RGC1 MODELL ohne Feinregulierventil

Messrohrlänge: 75mm

Beschreibung

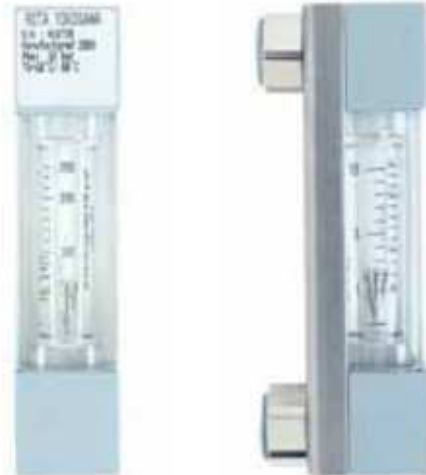
Dieser Rotameter Typ wird zur Messung von kleinen Flüssigkeits- und Gasströmen eingesetzt.

Vorteile

- Kostengünstige Lösung
- Platzsparendes Design
- Vernachlässigbarer Druckverlust

Anwendungsgebiete

- Visuelle Kontrolle des Mediums
- Qualitative Anzeige des Durchflusses
- Gasanalyse-Systeme
- ...



Technische Daten

Prozessanschluss	¼" NPT Innengewinde Material: Polypropylen
Messrohr	Länge: 75 mm Material: Borosilikatglas (Duran 50)
Schwebekörperwerkstoff	Für Flüssigkeiten: Edelstahl Für Gase: Glaskugel
Dichtungsmaterial	Buna (NBR)
Erlaubte Einsatzbedingungen	Max. 16 bar (@20°C), Max. 80°C
Messspanne	10:1
Messgenauigkeit	4% ($q_G=50\%$)
gem. Richtlinie VDI/VDE 3513, Blatt 2	

Variable area meter F VA Minix



Fig. 1 F VA Minix variable area meter

Application

The F VA Minix variable area meters are used to measure the volume of transparent liquids and gases passing through closed piping. The built-in needle valve permits manual control of flow rates. Standard scales are available for liquids with a density of 1 kg/l (62.43 lb/cu.ft) and for air. The scales must be recalculated for all other media depending on the physical characteristics.

Design and operation

The main components of the F VA Minix variable area meters are the glass variable-area flow tube with float, the fitting, the connection parts and the valve. The flow is displayed directly on the scale present on the flow tube (e.g. in l/h) and is read at the position of the float's widest diameter.

Special features

- Product scales for liquids and gases
- Rugged versions with various materials
- Can be used for high pressures
- Suitable for panel mounting and battery assembly

Connection and mode of operation

The variable area meter must be fitted vertically and without tension. Reductions or expansions in the pipe diameter upstream or downstream of the variable area meter have no influence on the accuracy. With liquids, the valve can be fitted at the top or bottom. With gases, the valve can only be fitted at the top so as to prevent pulsations resulting from compression. Since variable area meter respond extremely sensitively to changes in flow, control elements should always be adjusted slowly.

The calibration has been carried out for defined media conditions. Deviations in the density, pressure or temperature of gases, or in the density or viscosity of liquids, result in measurement errors. It is essential to observe the calibration conditions. When ordering, it is therefore essential to provide data on the medium, density and viscosity at the operating temperature and pressure if the conditions deviate from the standard values in the measuring range tables. With gases, it is additionally necessary to specify the exact reference point of the pressure (pressure above atmospheric, or absolute pressure).

- 1 Fitting
- 2 Connection unit with valve insert
- 3 Valve spindle
- 4 Locking screw
- 5 O-ring gasket
- 6 Threaded plug
- 7 Rotary knob
- 8 O-ring gasket
- 9 Limit stop
- 10 Limit stop washer ¹⁾
- 11 Gasket
- 12 Float
- 13 Flow tube
- 14 Connection unit
- 15 O-ring gasket
- 16 Pressure plug
- 17 Screw cap
- 18 O-ring gasket ¹⁾
- 19 Valve seat ¹⁾
- 20 Spacer sleeve ¹⁾
- 21 Circlip ¹⁾

¹⁾ Only with MINIX MA 152 and MA 302

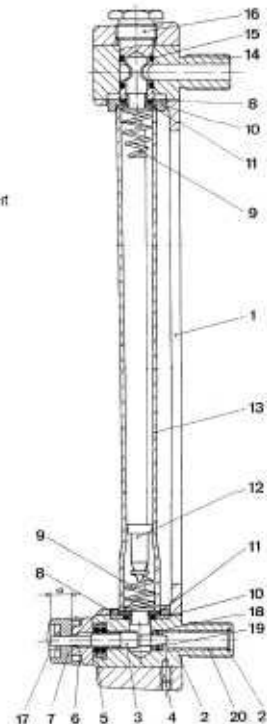


Fig. 2 F VA Minix, design

Note of application

The operator of these measuring instruments is responsible for suitability, proper use and corrosion resistance of the used materials with regard to the measuring material. It must be ensured that the materials selected for the meter parts in contact with the medium are suitable for the used process media. The unit may only be used within the pressure and voltage limits specified in the operating instructions. Before replacing the measuring tubes, check that the meter is free of hazardous media and pressures. The flowmeter meets the requirements of the PED 97/23/EG as stated in the table on page 2.

Variable area meter F VA Minix

MECON

FLOW-CONTROL-SYSTEMS

Technical Data

Application	See page 1
Mode of operation	See page 1
Measuring principle	Float
Input	
Flow	Vertically upwards
Pressure limit	Max. 10 bar / 145 psi
Rated operating conditions	
Ambient conditions	
Temperature limits	-10 to +70 °C (14 to 158 °F)
Medium conditions	
• Accuracy	Class 2,5 (according to VDE/VDI 3513, sheet 2)
• Measuring range	Dependent on flow tube and medium (see measuring range table)
• Dimensions for meas. variable	l/h
Design	
Connections	Male thread DIN/NPT 1/4" or 1/2" or hose bushing (DIN 3254)
Material	
• Flow tube	Borosilicate glass
• Connection	Brass, stainless steel mat.No. 1.4571/316Ti
• Float	Aluminium, stainless steel mat.No. 1.4571/316Ti
• Gasket	Buna N, Viton
• Fitting	Aluminium
Weight	
• MA 70	0,5 kg (1,10 lb)
• MA 151	0,5 kg (1,10 lb)
• MA 152	1,5 kg (3,31 lb)
• MA 301	0,5 kg (1,10 lb)
• MA 302	1,7 kg (3,75 lb)
Certificates and approvals	
Classification according to PED 97/23/EC	For gases of fluid group 1 and liquids of fluid group 1; complies with requirements of article 3, paragraph 3 (sound engineering practice SEP)

Dimensional drawings

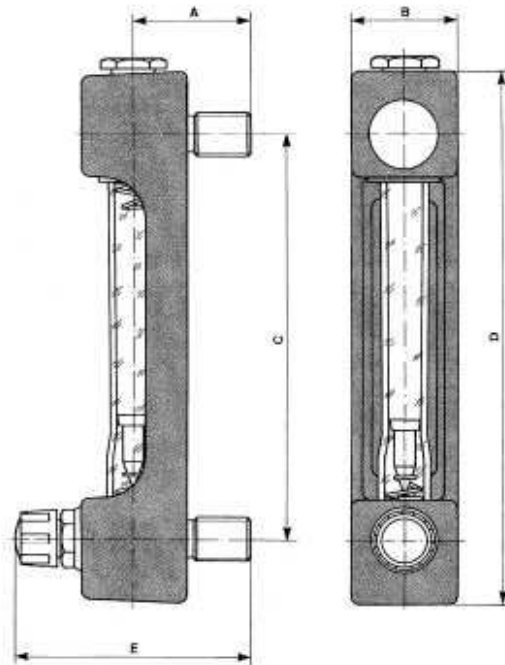


Fig. 3 Minix, dimensions

Type	Dimension in mm (inch)									
	A ¹⁾		B		C		D		E ¹⁾	
MA 70	38	(1,50)	27	(1,06)	90	(3,54)	120	(4,72)	76	(2,99)
MA 151	38	(1,50)	31	(1,22)	170	(6,69)	202	(7,95)	76	(2,99)
MA 152	55	(2,17)	50	(1,97)	190	(7,48)	250	(9,84)	118	(4,65)
MA 301	38	(1,50)	31	(1,22)	320	(12,60)	352	(13,86)	76	(2,99)
MA 302	55	(2,17)	30	(1,18)	340	(13,39)	400	(15,75)	118	(4,65)

¹⁾ Dimensions A and E only apply to the standard design with DIN male thread, brass.

Anhang B – Differenzdruckmessung (Beispiel)

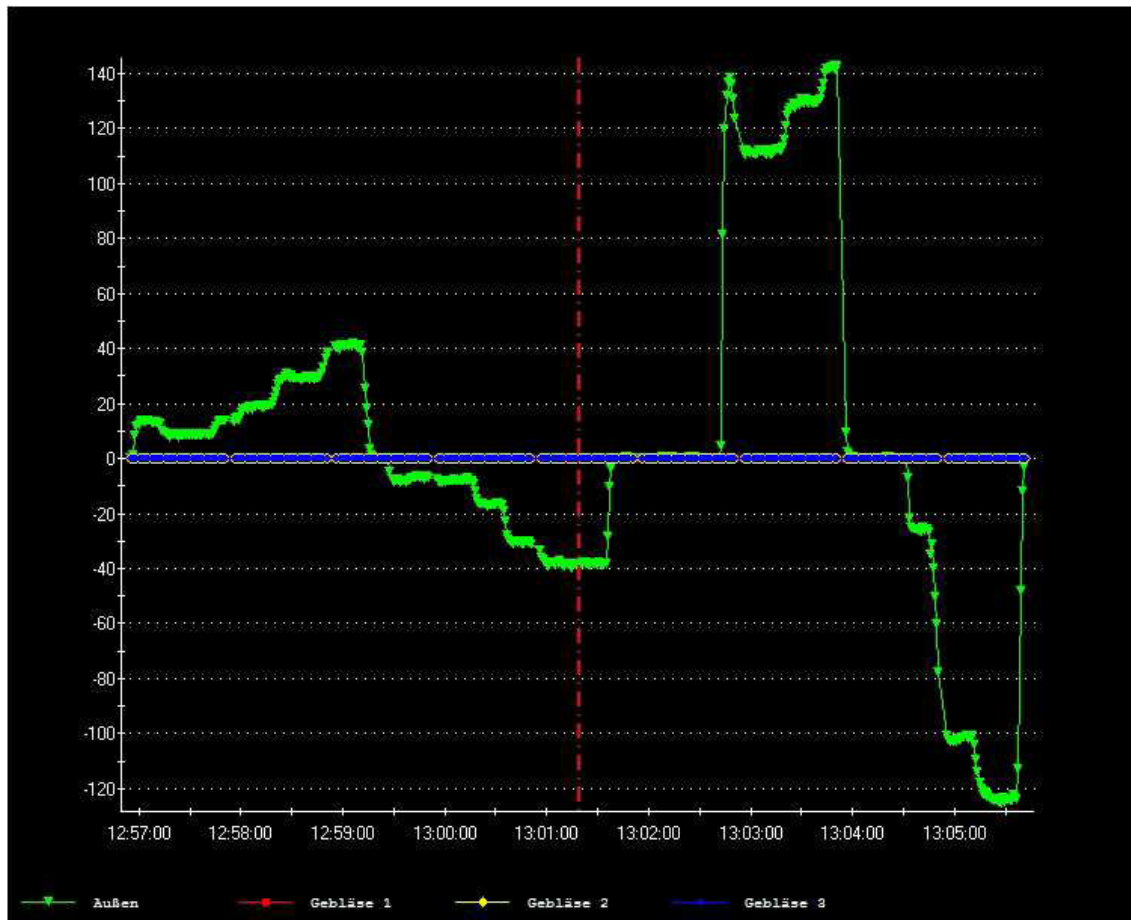
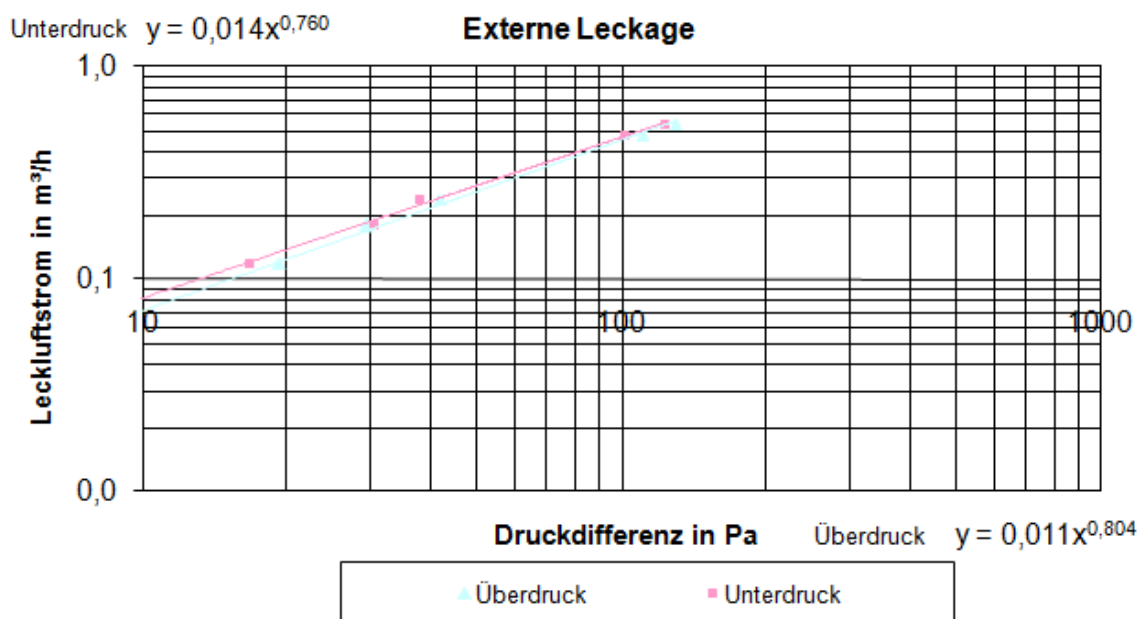


Abbildung 0.1: Screenshot aus der Differenzdruckmessung unter Verwendung der Software Teclog

Anhang C – Messdatenauswertung in Excel

			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	Pa	6,7	16,7	30,5	37,9	101,7	123,8
	Vergleichsmessung 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

Abbildung 0.2: MS Excel Programmausschnitt zur Ermittlung des Leckagevolumenstroms bei 50 Pa

Anhang D – Berechnung Differenzdruck für Wärmeschutz und Feuchteschutz

Druckdifferenz Wind

$$q_w = \frac{1}{2} * \rho * v^2 = 17,8 \text{ Pa} \quad ; \text{ (Staudruck)}$$

Dabei ist:

ρ Dichte der Luft (hier: 1,267 kg/m³)

v mittlere Windgeschwindigkeit der oberen 33 % (hier: 5,3 m/s)⁸

$$w = c * q = 12,5 \text{ Pa} \quad ; \text{ (Winddruck/-sog)}$$

Dabei ist:

c Druckbeiwert (hier: 0,7)

Druckdifferenz in Folge von Dichteunterschied der Luft

$$q_D = (\rho_A - \rho_I) * g * h = 1,80 \text{ Pa}$$

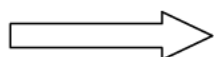
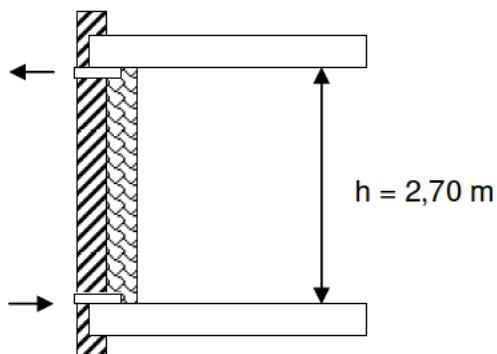
Dabei ist:

ρ_A Dichte der Außenluft (hier: 1,267 kg/m³)

ρ_I Dichte der Innenraumlufte (hier: 1,199 kg/m³)

g Gravitationsbeschleunigung der Erde (9,81 m/s²)

h Geschossdeckenhöhe (2,70 m)



Summe der Druckdifferenzen $\Delta p_{w,D} = 14,3 \cong 14 \text{ Pa}$

⁸ Quelle für Windgeschwindigkeiten *meteonorm Version 6.1*

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.

Exzenter: Ein Exzenter ist eine auf einer Welle angebrachte Steuerungsscheibe, deren Mittelpunkt außerhalb der Wellenachse liegt.

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)

Wärmebrücke: Als Wärmebrücke wird ein Bereich in Bauteilen eines Gebäudes bezeichnet, durch den die Wärme schneller nach außen transportiert wird als durch die anderen Bauteile.

Wärmedämmung: Eine Wärmedämmung soll den Durchgang von Wärmeenergie möglichst weit reduzieren, Wärmedämmung von Gebäuden wird durch die Bauweise vorgegeben und kann durch Einsatz von Dämmstoffen verstärkt werden.

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

Wärmetauscher: Ein Wärmetauscher ist ein Apparat, der thermische Energie von einem Stoffstrom auf einen anderen überträgt.

Literaturverzeichnis

- [BL2010] **BORSCH-LAAKS, Robert:** Wie undicht ist dicht genug? Zur Zulässigkeit von Fehlstellen in Luftdichtheitsschichten und Dampfsperren. In: Aachener Bausachverständigentage 2009 (2010), S. 119-132
- [Sto2010] **STOPP, Horst:** Messergebnisse und bauphysikalische Lösungsansätze zur Problematik der Holzbalkenköpfe in Außenwänden mit Innendämmung. In: Bauphysik (2010)
- [ZB1998] **ZELLER, Joachim/ BIASIN, Karl:** Luftdichtigkeit von Wohngebäuden – Messung, Bewertung, Ausführungsdetails. RWE Energie Aktiengesellschaft (Hrsg.), Essen 2. Auflage (1998)
- [WSVO1995] **Verordnung über einen energieparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV).** (Inkrafttreten: 01.01.1995); Bundesgesetzblatt, Bonn 16.08.1994
- [DIN4108_7] **Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie – beispiele;** (August 2001; Vornorm Mai 1996)
- [DIN_EN_ISO13790] **Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung;** (September 2008)
- [Fin2008] **FINGERLING, Anne:** Anforderungen im Wandel - Luftdichtheit damals heute. In: FLiB-Buch Band 1 (2008)
- [BW2008] **BOLENDER, Torsten/ Weissmüller, Armin:** Gründe für eine Luftdichtheit der Gebäudehülle. In: FLiB-Buch Band 1 (2008)
- [DIN_EN15242] **Lüftung von Gebäuden;** Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Luftvolumenströmen in Gebäuden einschließlich Infiltration (September 2007)
- [BL2009] **BORSCH-LAAKS, Robert/ Zirkelbach, Daniel/ Künzel, Hartwig M./ Schafaczek, Beate:** Trocknungsreserven schaffen. In: Tagungsband zur AIVC/ BUILDAIR - Konferenz, 1./2.10.2009 in Berlin
- [Kün2010] **KÜNZEL, Hartwig M./ Binder, Andrea/ Schafaczek, Beate:** Berücksichtigung der Wasserdampfkonvektion bei

- der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen. In: wksb 65 (55. Jahrgang), Mai 2010
- [Pfl2005]** **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.
- [Pep2009]** **PEPER, Søren/ FEIST, Wolfgang/ Sariri, Vahid:** Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, Eine Planungshilfe, Cepheus-Projektinformation Nr. 7, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999/ 10. Auflage 2009
- [DIN_EN13829]** **Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden;** Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden (November 2000)
- [Zel2008]** **ZELLER, Joachim:** Messung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. In: FLiB-Buch Band 1 (2008)
- [Wor2010]** **WORCH, Anatol:** Innendämmung nach WTA – Das Merkblatt 6 – 4. In: Innendämmung im Bestand (2010)
- [WTA6_4]** **WTA-Merkblatt 6 – 4;** Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden, München, WTA e.V., Ausgabe 05/2009
- [Gän2008]** **GÄNSSMANTEL, J./ GEBURTIG, G.:** Richtig dämmen, Handbuch für zeitgemäßes Bauen im Bestand, C. Maurer Druck und Verlag, Geislingen (2008)
- [DIN4108_3]** **Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung;** (Juli 2002)
- [Hol2011]** In: Tagungsband Holzschutz & Bauphysik (2011)
- [DIN_EN12114]** **Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden;** Luftdurchlässigkeit von Bauteilen, Laborprüfverfahren (April 2000)
- [VDI_VDE3513_Blatt2]** **Schwebekörperdurchflussmesser;** Fehlergrenzen G des Gerätes (August 2008)
- [Lan2010]** **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)

[Sch2005]

SCHNIEDERS, Jürgen: Innendämmung – Potenziale und Grenzen. In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.

[Hol]

Holzendorf, Ulf: Holz als Werkstoff – Holz arbeitet. In: Informationsmaterial, Institut für Arbeitslehre/Technik, Universität Potsdam

[GDHeV]

Gesamtverband Deutscher Holzhandel e.V.:
Trocknungsbedingt Risse bei Holz

Stichwortverzeichnis

A		
Anisotropie	20	
äquivalente Leckfläche	16	
Austrocknungspotenzial	17	
Automated Performance Testing System	27	
B		
Balkenkopfdurchdringung	19	
Brandschutz	13	
Butyl-Kautschukklebeband	29	
D		
Dichtmasse	28	
Differenzdruckmessung	16	
F		
feuchteadaptive Dampfbremssfolie	19	
Feuchteeintrag, konvektiv	57	
Feuchtemenge, zulässige	58	
Feuchteschutz	13	
H		
Haftgrundierung	28	
Handhabung	55	
Handlungsempfehlung	60	
Holzschäden	21	
Hygroskopie	20	
I		
Innendämmung	16	
intelligente Baustoffe	19	
K		
kapillaraktiver Dämmstoff	19	
Klebeband	28	
L		
Leckagestrom	15	
Luftdichtheit	11	
Luftdichtheitsprüfung	14	
Lüftungsanlage	14	
M		
Membranvakuumpumpe	23	
Messergebnisse	54	
Mittelwert	34	
Musterbalken	22	
N		
n_{50} -Wert	16	
P		
Putzanschlussband	30	
Q		
q_{50} -Wert	16	
S		
Schallschutz	14	
Schwebekörper-Volumenstrommessgerät	24	
Speziallösungen	29	
Standardabweichung	34	
Strömungsexponent	15	
Strömungskoeffizient	15	
T		
Tauwasserbildung	18	
thermische Verhalten	18	
Trockenrisse	20	
V		
Versuchsstand	26	
Volumenstromkorrektur	33	
W		
Wärmeschutz	12	
Wärmetauscher	14	
Wärmeverluste, zusätzliche	60	