

Anforderungen an Methoden zur Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene bei der Sanierung von Gebäudehüllen

Bachelorarbeit

in dem Studiengang

„Umweltingenieurwesen – nachhaltige Siedlungsplanung, Bachelor of Engineering“

vorgelegt von

Janne Steinmetz

Matrikelnummer: 761128

Betreuung:

Referent:

Prof. Dr. Benjamin Krick

Hochschule Darmstadt

Korreferent:

Dipl. Ing. Wolfgang Hasper

Passivhaus Institut GmbH

April 2024

FACHBEREICH BAU- UND UMWELTINGENIEURWESEN

B A C H E L O R A R B E I T

SCHWERPUNKT	Energieeffizientes Bauen
THEMA DER ARBEIT	Anforderungen an Methoden zur Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene bei der Sanierung von Gebäudehüllen
VERFASSER (IN)	Janne Steinmetz
MATRIKELNUMMER	761128
REFERENT (IN)	Prof. Dr. Benjamin Krick Hochschule Darmstadt
KORREFERENT (IN)	Dipl. Ing. Wolfgang Hasper Passivhaus Institut GmbH
AUSGABEDATUM	22.01.2024
ABGABEDATUM	21.04.2024

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Das gilt auch für Quellen, die ich selbst für andere Zwecke erstellt habe. Die Zeichnungen oder Abbildungen in der Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfung oder Prüfungsbehörde eingereicht worden. Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, der zur Exmatrikulation führen kann, wenn sich die vorstehende Erklärung als unrichtig erweist.

Datum: 21.04.2024

Unterschrift des Verfassers:



Die Arbeit umfasst 69 Seiten und 5 Pläne/Anlagen

Aufgabenstellung

Der Klimawandel und seine Auswirkungen sind in der heutigen Zeit allgegenwärtig und klar erkennbar, sodass wir als Menschen nun mehr denn je in der Verantwortung stehen, die von uns verursachten Klimaschäden nicht nur zu neutralisieren, sondern langfristig auch klimapositiv auf unsere Umwelt einzuwirken. Ein nicht unwesentlicher Teil der menschengemachten Umweltbelastung stellen, nach Angaben des Umweltbundesamtes, der hohe Heizenergieverbrauch von Gebäuden und den damit verbundenen CO₂-Emissionen dar¹. Die Lösung dieses Problems liegt nicht nur in der Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger, sondern vor allem in der Reduzierung bzw. dem Verzicht auf Heizenergie. Hierzu ist es notwendig, Gebäude hoch energieeffizient und nachhaltig zu konstruieren. Das Passivhaus-Konzept bildet hierzu eine bewährte Grundlage. Die 5 Grundprinzipien für die Umsetzung eines Passivhauses bestehen in der Ausführung einer Lüftungswärmerückgewinnung, der wärmebrückenfreien Konstruktion, der Ausführung einer luftdichten Ebene, der Verwendung von Passivhaus-Fenstern und einer adäquaten Wärmedämmung².

Die Entstehung von Rissen in Holzbalken ist, aufgrund der sich ändernden Holzfeuchte im eingebauten Zustand, langfristig unvermeidbar und stellt das Potential für Leckagen und somit für Wärmeverluste und Bauschäden dar. Grundsätzlich ist es daher ratsam, in der Praxis Holzbalken-Durchdringungen in der luftdichten Ebene eines Gebäudes konstruktiv zu vermeiden. Dies führt in der Regel zu einfachen, sicheren und preiswerten Konstruktionen. Da sich das Durchdringen rissiger Holzbalken der Luftdichten Ebene bei Sanierungen jedoch oftmals nicht vermeiden lässt und Sanierungen die entscheidende Aufgabe der Zukunft darstellen, wird in diesem Bereich nun vermehrt nach Lösungen gesucht.

Daher ist das Ziel dieser Thesis, die Anforderungen an Methoden zur luftdichten Integration rissiger Holzbalken in die luftdichte Ebene, bei der Sanierung von Gebäudehüllen, zu klären. Hierbei sollen, aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen und messtechnischen Untersuchungen, Anforderungen an zukünftige kommerzielle Abdichtungssysteme und deren Prüfung erarbeitet werden. Außer der durch die Messtechnik ermittelten Luftdichtheit wird auch die Praktikabilität möglicher Methodenwendungen in der Sanierungspraxis betrachtet.

Hierzu dient als Grundlage für das methodische Vorgehen die Untersuchung der Risstypologien in Holzbalken, um herauszufinden, welche Risstypologien bei Holzbalken in Gebäudehüllen im Kontext der Sanierung auftreten. Anhand dieser Erkenntnisse sollen vier repräsentative Prüfkörper, welche die untersuchten Risstypologien so gut wie möglich abbilden, erstellt werden. Mit diesen soll die Funktionalität von

¹ Umweltbundesamt, 2023.

² Passivhaus Institut, 2023., S.44

verschieden Abdichtungssysteme durch selbst durchgeführte messtechnische Luftdichtheitsprüfungen, an einem geeigneten Messstand des Passivhaus Instituts verglichen werden.

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms soll jede zu untersuchende Abdichtungsmethode jeweils an allen vier repräsentativen Prüfkörpern angewendet, durch eine gemeinsame übliche luftdichte Ebene (Holz, Folie, Beton) hindurchgeführt und gemeinsam auf Luftdichtheit überprüft werden. Der gemessene Leckagevolumenstrom wird bei der Auswertung auf die Balkenumfänge bezogen. Aus bisherigen Untersuchungen ist hervorgegangen, dass neben der Abdichtung des Balkenumfangs an die Luftdichte Ebene auch die Verfüllung von Rissen erforderlich ist³. Die erfolgreichste Verfüllmethode aus den Voruntersuchungen, bestehend aus einer Bohrung und einer Injektion mit Dichtmasse, dient daher hier als Referenzmethode⁴. Es sollen zwei bis vier weitere vielversprechende Abdichtungsmethoden identifiziert, entworfen, geprüft und verglichen werden.

Um die Integrationsmöglichkeit dieser Erkenntnisse in die Sanierungspraxis zu beurteilen, muss festgelegt werden welche Aspekte für die Praktikabilität der Anwendung dieser Methoden in der Sanierungspraxis entscheidend sind.

Durch die Auswertung dieser Untersuchungen sollen Rückschlüsse darauf gezogen werden, welche Anforderungen an kommerzielle Abdichtungssysteme gestellt werden müssen, um rissige Holzbalken luftdicht zu integrieren. Die Thesis soll somit dazu beitragen, die Herausforderungen im Bereich der Luftdichtheit von Gebäudehüllen bei der Sanierung zu bewältigen und zur Entwicklung nachhaltiger und energieeffizienter Lösungen beitragen.

Ausgabe der Arbeit: 22.01.2024

Abgabe der Arbeit: 21.04.2024



Referent:
Prof. Dr. Benjamin Krick
Passivhaus Institut GmbH



Korreferent:
Dipl. Ing. Wolfgang Hasper
Passivhaus Institut GmbH

³ Peper, S./Bangert, A./Bastian, Z., 2014., S. 5-6

⁴ Ebd.

I Danksagung

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Bachelorarbeit möchte ich meine Wertschätzung für die Unterstützung während des Forschungsprozesses ausdrücken.

Ich danke Herrn Wolfgang Hasper und Prof. Dr. Benjamin Krick für ihre fachliche Begleitung sowie Søren Peper und dem Passivhaus Institut für ihre Unterstützung. Ihre Ratschläge haben stets dazu beigetragen, die Qualität dieser Arbeit zu verbessern.

Außerdem danke ich der Holzwerkstatt der TU Darmstadt für die Herstellung der Prüfkörper.

II Kurzfassung - Abstract

Anforderungen an Methoden zur Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene bei der Sanierung von Gebäudehüllen

Der fortschreitende Klimawandel unterstreicht die Notwendigkeit dringender Maßnahmen im Bereich der Gebäudeenergieeffizienz, da der Heizenergieverbrauch von Gebäuden erhebliche CO₂-Emissionen verursacht⁵. Das Passivhaus-Konzept bietet hier Lösungsansätze, indem es Grundprinzipien wie die Lüftungswärmerückgewinnung und Wärmeschutzmaßnahmen umsetzt⁶. Bei der Herstellung einer luftdichten Ebene sind Abdichtungsmethoden für rissige Holzbalken essenziell, um Lüftungswärmeverluste zu minimieren und so zu einer verbesserten Energieeffizienz beizutragen.

In der vorliegenden Arbeit wird daher die Typologie von Rissen in alten Holzbalken, die bei Sanierungsprojekten der Gebäudehülle vorzufinden sind, untersucht. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurden vier spezifische Prüfkörper entwickelt, welche die relevanten Rissformen und -größen abbilden. An diesen Prüfkörpern wurden vier unterschiedliche Lösungsansätze für Abdichtungssysteme angewendet, hinsichtlich ihrer Luftdichtheit geprüft und durch Messungen der Leckagevolumenströme miteinander verglichen. Außerdem wurden, die Methoden anhand der Messergebnisse bei

Requirements for methods to integrate wooden beams into the airtight layer during the renovation of building envelopes

Progressive climate change underlines the need for urgent measures in the area of building energy efficiency, as the heating energy consumption of buildings causes considerable CO₂ emissions⁸. The Passive House concept offers solutions here by implementing basic principles such as ventilation heat recovery and thermal insulation measures⁹. When creating an airtight layer, sealing methods for cracked wooden beams are essential in order to minimize ventilation heat losses and thus contribute to improved energy efficiency.

This thesis therefore investigates the typology of cracks in old wooden beams found in building envelope refurbishment projects. Based on these investigations, four specific test specimens were developed which represent the relevant crack shapes and sizes. Four different solutions for sealing systems were applied to these test specimens, tested with regard to their airtightness and compared with each other by measuring the leakage volume flows. In addition, the methods were classified into the PHI airtightness classes A+, A, B and C based on the measurement results at a test pressure of 50 Pa in order to be able to estimate the influence on the overall airtightness of the

⁵ Umweltbundesamt, 2023.

⁶ Passivhaus Institut, 2023., S.44

⁸ Umweltbundesamt, 2023.

⁹ Passivhaus Institut, 2023., S.44

einem Prüfdruck von 50 Pa in die PHI Luftdichtheitsklassen A+, A, B und C eingestuft, um so den Einfluss auf die gesamte Gebäudeluftdichtheit abschätzen zu können. Die Messungen orientieren sich an der DIN EN 12114, einem etablierten Prüfverfahren zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauelementen⁷. Jede Abdichtungsmethode wurde an allen Prüfkörpertypen dreifach angewendet und getestet, um die allgemeine Funktionalität erfassen zu können.

Die Methode 1 (Injektionskanal) erreicht hierbei die höchste Abdichtungswirkung mit einem auf den Umfang der Prüfkörper bezogenen Leakagevolumenstrom von $0,12 \text{ m}^3/(\text{hm})$ und erreicht somit die PHI Luftdichtheitsklasse A. Die Methode 4 (Injektionsdübel) erzielt einen ähnlich guten Wert von $0,24 \text{ m}^3/(\text{hm})$ und erreicht ebenfalls die PHI Klasse A. Die Methode 2 (Injektion mit Begrenzung) und 3 (Injektion mit Klinge) erreichen hingegen vergleichsweise schlechtere Leakagevolumenströme von $0,78 \text{ m}^3/(\text{hm})$ und $0,86 \text{ m}^3/(\text{hm})$. Mit diesen Ergebnissen ist die Methode 2 noch der PHI Luftdichtheitsklasse C zuzuordnen, während Methode 3 knapp keine der Klassen erreicht.

Um zusätzliche Hinweise auf die Wirksamkeit der Abdichtungsmethoden in Bezug auf die verschiedenen Risstypen der Prüfkörper zu erhalten, wurden identifizierbare Leckagen während der Messungen erfasst und die einzelnen Prüfkörpertypen gesondert gemessen.

Um die Integrationsmöglichkeit der gewonnenen Erkenntnisse in die Sanierungspraxis beurteilen zu können, wird

building. The measurements are based on DIN EN 12114, an established test method for determining the air permeability of building elements¹⁰. Each sealing method was applied and tested three times on all test specimen types in order to record the general functionality.

Method 1 – Injection channel achieves the highest sealing effect with a leakage volume flow of $0.12 \text{ m}^3/(\text{hm})$ in relation to the circumference of the test specimen and thus achieves PHI airtightness class A. Method 4 – Injection dowel achieves a similarly good value of $0.24 \text{ m}^3/(\text{hm})$ and also achieves PHI Class A. Methods 2 – Injection with limitation and 3 – Injection with blade, on the other hand, achieve comparatively poorer leakage volumetric flows of $0.78 \text{ m}^3/(\text{hm})$ and $0.86 \text{ m}^3/(\text{hm})$. With these results, method 2 can still be assigned to PHI airtightness class C, while method 3 just fails to achieve any of the classes.

In order to obtain additional information on the effectiveness of the sealing methods in relation to the different types of cracks in the test specimens, identifiable leaks were recorded during the measurements and the individual test specimen types were measured separately.

In order to be able to assess the possibility of integrating the knowledge gained into renovation practice, the handling of the methods in practice is evaluated. The criteria of difficulty of application, duration of application and material efficiency are taken into account.

These results provide important information for the optimization and further

⁷ DIN EN 12114, 2000.

¹⁰ DIN EN 12114, 2000.

die Handhabung der Methoden in der Praxis bewertet. Hierbei werden die Kriterien Schwierigkeitsgrad der Anwendung, Anwendungsdauer und Materialeffizienz berücksichtigt.

Diese Ergebnisse liefern wichtige Informationen für die Optimierung und Weiterentwicklung von Abdichtungssystemen für die Bauindustrie. Die Analyse der Untersuchungen ergibt klare Anforderungen an Abdichtungssysteme bei rissigen Holzbalken. Eine leistungsstarke Methode sollte die PHI Luftdichtheitsklasse A erfüllen, flexibel anwendbar und in der Handhabung effizient sein. Die Methoden Injektionskanal und Injektionsdübel zeigen überzeugende Resultate und sollten weiterentwickelt werden. Vor allem der Injektionsdübel bietet Potenzial für Verbesserungen in Handhabung und Material. Die weiteren Lösungsansätze Injektion mit Klinge und Injektion mit Begrenzung erreichen nicht die gewünschte Leistung und gelten daher als wenig vielversprechend.

development of sealing systems for the construction industry. The analysis of the investigations provides clear requirements for sealing systems for cracked wooden beams. A high-performance method should fulfill PHI airtightness class A, be flexible in application and efficient in handling. The injection channel and injection dowel methods show convincing results and should be developed further. The injection dowel in particular offers potential for improvements in handling and material. The other solution approaches, injection with blade and injection with limitation, do not achieve the desired performance and are therefore not considered very promising.

III Inhaltsverzeichnis

	Aufgabenstellung	I
I	Danksagung	III
II	Kurzfassung - Abstract	IV
III	Inhaltsverzeichnis	VII
IV	Abbildungsverzeichnis	IX
V	Tabellenverzeichnis	XII
VI	Abkürzungsverzeichnis.....	XIV
1	Einführung	1
2	Methodik.....	3
2.1	Untersuchungsprogramm	3
3	Grundlagen.....	5
3.1	Energieeffizienz durch Luftdichtheit in Gebäuden	5
3.2	Bauschaden-Potential durch Leckagen.....	6
3.3	Anforderungen an die Luftdichte Ebene.....	7
3.3.1	Luftdichtheitsprüfung	8
3.3.2	PHI Zertifizierung und Zertifizierungsklassen	10
4	Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene von Gebäuden.....	11
4.1	Untersuchung von Risstypologien.....	11
4.1.1	Mechanik der Rissbildung in Holzquerschnitten.....	11
4.2	Messung und Feststellung von Rissausmaßen.....	13
4.2.1	Klassifizierung von Risstypologien.....	14
4.3	Zu untersuchende Risstypologien.....	15
4.3.1	Prüfkörper.....	17
5	Herausforderungen bei der Rissabdichtung durch Dichtmassen/- flüssigkeiten.....	18
6	Lösungsansätze der Abdichtungsmethoden	19
6.1	Methode 1 (Injektionskanal).....	19
6.2	Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)	20
6.3	Methode 3 (Injektion mit Klinge)	20

6.4	Methode 4 (Injektionsdübel).....	21
6.5	Materialbeschreibung	22
6.6	Andichtung an die luftdichte Ebene.....	23
6.7	Methodenanwendung	24
6.7.1	Methode 1 (Injektionskanal).....	25
6.7.2	Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)	26
6.7.3	Methode 3 (Injektion mit Klinge)	26
6.7.4	Methode 4 (Injektionsdübel).....	27
7	Versuchsgrundlagen.....	28
7.1	Messkonzept nach DIN EN 12114	28
7.2	Verwendete Messtechnik.....	30
7.3	Allgemeiner Versuchsaufbau	30
7.4	Allgemeine Durchführung	32
8	Auswertung der Ergebnisse.....	34
8.1	Methode 1 (Injektionskanal).....	36
8.2	Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)	37
8.3	Methode 3 (Injektion mit Klinge)	38
8.4	Methode 4 (Injektionsdübel).....	40
8.5	Methodenvergleich/ Diskussion der Ergebnisse.....	42
9	Handhabungsvergleich der Methoden	43
9.1	Kriterien zur Handhabung der Abdichtungsmethoden.....	43
9.2	Vergleich der Handhabungen anhand der Kriterien	44
10	Handlungsempfehlung.....	45
10.1	Anforderungen an kommerzielle Abdichtungssysteme.....	46
10.2	Weitergehende Forschungsfragen.....	47
11	Literaturverzeichnis	VIII
	Anhang 1: Ergebnisdiagramm Methode 1 (Injektionskanal).....	X
	Anhang 2: Ergebnisdiagramm Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)	X
	Anhang 3: Ergebnisdiagramm Methode 3 (Injektion mit Klinge).....	XI
	Anhang 4: Ergebnisdiagramm Methode 4 (Injektionsdübel).....	XI

Anhang 5: Überblick Auswertung	XII
--------------------------------------	-----

IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafter Sanierungsfall eines rissigen historischen Holzbalkens, welcher die herzustellende luftdichte Ebene durchdringt	2
Abbildung 2: Messung einer angewendeten Abdichtungsmethode an allen Prüfkörpertypen (links) und Messung einer angewendeten Abdichtungsmethode an einem einzelnen Prüfkörpertypen (rechts)	4
Abbildung 3: Pilzbefall durch eindringende Feuchtigkeit, der zur völligen Zerstörung bzw. zum Verlust der Tragfähigkeit der Deckenbalken geführt hat	6
Abbildung 4: Eingezeichnete lückenlose Luftdichteheitsebene im Schnitt eines Gebäudes	7
Abbildung 5: Prinzipieller Messaufbau einer Luftdichtheitsmessung eines Gebäudes	9
Abbildung 6: Ringschäle im Holzstamm entlang des Jahrringes.....	11
Abbildung 7: Trocken- bzw. Schwindriss	12
Abbildung 8: Mögliche Rissbildungen bei Vollholzquerschnitten in Abhängigkeit von der Einschnittsart	13
Abbildung 10: Bestimmung der Risstiefen in einem Kantholz	13
Abbildung 9: Bestimmung der Risstiefe "r" an den Viertelpunkten der Risslänge ...	14
Abbildung 11: Bemaßte Schnittdarstellung des Querschnittes der Prüfkörper	17
Abbildung 12: Prüfkörper mit den Risstypen 2/50 mm (1), 5/80 mm (2), 10/120 mm (3) und 7/70 mm mit abknickendem Riss (4)	18
Abbildung 13: Schematische Schnittskizze des Lösungsansatzes von Methode 1 (Injektionskanal)	19
Abbildung 14: Schematische Skizze des Lösungsansatzes von Methode 2 (Injektion mit Begrenzung).....	20
Abbildung 15: Schematische Schnittskizze des Lösungsansatzes von Methode 3 (Injektion mit Klinge).....	21
Abbildung 16: Schematische Schnittskizze des Lösungsansatzes von Methode 4 (Injektionsdübel).....	21
Abbildung 17: Schnitt- (oben) und 3D-Skizze (unten) des Injektionsdübels	22

Abbildung 18: Unbearbeitete (oben) und bearbeitete (unten) Klinge zur Anwendung für Methode 3 (Injektion mit Klinge)	23
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Andichtung der abgedichteten Holzbalken an die luftdichte Ebene durch Klebeband und Dichtmasse	24
Abbildung 20: Andichtung der abgedichteten Holzbalken an die luftdichte Ebene durch Klebeband und Dichtmasse	24
Abbildung 21: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 1 von links nach rechts	25
Abbildung 22: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 2 (Injektion mit Begrenzung) von links nach rechts	26
Abbildung 23: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 3 (Injektion mit Klinge) von links nach rechts	27
Abbildung 24: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 4 (Injektionsdübel) von links nach rechts	28
Abbildung 25: Vereinfachte Darstellung der erforderlichen Prüfeinrichtung nach der DIN EN 12114	29
Abbildung 26: Zeitabhängige Druckdifferenz im Verlauf der Messung	30
Abbildung 27: Messstand am PHI mit eingespannter OSB-Platte mit Aussparungen für den Einsatz der Prüfkörper	31
Abbildung 28: Messwanne (links), in der benötigten Höhe platzierte Prüfkörper (mitte) und allgemeiner Messaufbau mit angedichteten Prüfkörpern (rechts)	32
Abbildung 29: Messstand mit aufgespanntem luftdichten Deckel zur Messung der Messstandsleckage	32
Abbildung 30: Dokumentation einer spürbaren Leckage mit Hilfe des Anemometers (AIRFLOW™ TA5)	33
Abbildung 31: Messungen einzelner Prüfkörpertypen durch die Abdeckung der anderen Prüfkörper-Reihen mit Dichtdeckeln	34
Abbildung 32: Aufnahmen der sichtbaren Leckage in dem Prüfkörper 4 (rechts 7/70 mm abknickend) unter Anwendung der Methode 1 (Injektionskanal)	37
Abbildung 33: Aufnahmen der sichtbaren Leckagen in den Prüfkörpern 2 (5/80 mm Riss), 3 (10/120 mm Riss) und 4 (7/70 mm abknickender Riss) unter Anwendung der Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)	38
Abbildung 34: Aufnahmen der sichtbaren Leckagen in dem Prüfkörper 3 (links 10/120 mm Riss) und 4 (rechts 7/70 mm abknickender Riss) unter Anwendung der Methode 3 (Injektion mit Klinge)	40

Abbildung 35: Methode 4 (Injektionsdübel) mit komplett eingeführtem Stempel mit Austritt der Dichtmasse aus dem seitlichen Kanals des Dübels in Prüfkörper 1 (links 2/50 mm Riss) und ohne Austritt der Dichtmasse in Prüfkörper 3 (rechts 10/120 mm Riss)	41
Abbildung 36: Freigesägter Querschnitt der Angewendeten Methode 4 (Injektionsdübel) in Prüfkörper 4 (7/70 mm abknickender Riss)	42
Abbildung 37: Vergleich der längenbezogenen Volumenströme in $\text{m}^3/(\text{hm})$ @ 50 Pa der Abdichtungsmethoden mit Messfehlern und PHI Zertifikatsklassen	43
Abbildung 38: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 1 mit den Zertifikatsklassen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)	X
Abbildung 39: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 2 mit den Zertifikatsklassen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)	X
Abbildung 40: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 3 mit den Zertifikatsklassen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)	XI
Abbildung 41: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 4 mit den Zertifikatsklassen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)	XI
Abbildung 42: Übersicht der gemessenen und berechneten Werte der Messungen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)	XII

V Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zu erreichende n_{50} -Werte zu den verschiedenen Gebäudeanforderungen	8
Tabelle 2: Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit der Zertifikatsklassen für Durchführungen	10
Tabelle 3: Einteilung in Sortierklassen nach dem Sortiermerkmal Risse.....	15
Tabelle 4: Schnittholz-Einteilung nach DIN 4074.....	15
Tabelle 5: Orientierungswerte zur Bestimmung der Rissgeometrie der Prüfkörper .	16
Tabelle 6: Übersicht über die verwendeten Messgeräte	30
Tabelle 7: Anteile der Deckelleckagen an den absoluten Volumenströmen der Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen	35
Tabelle 8: Messergebnisse der gemeinsam gemessenen Gesamtleckagevolumenströme aller Prüfkörperreihen der Messungen unter Anwendung der Methode 1 mit Einstufung in die entsprechende PHI Luftdichtheitsklasse	36
Tabelle 9: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 1	36
Tabelle 10: Messergebnisse der gemeinsam gemessenen Gesamtleckagevolumenströme aller Prüfkörperreihen der Messungen unter Anwendung der Methode 2 mit Einstufung in die entsprechende PHI Luftdichtheitsklasse	37
Tabelle 11: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 2.....	38
Tabelle 12: Messergebnisse der gemeinsam gemessenen Gesamtleckagevolumenströme aller Prüfkörperreihen der Messungen unter Anwendung der Methode 3 mit Einstufung in die entsprechende PHI Luftdichtheitsklasse	39
Tabelle 13: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 3.....	39
Tabelle 14: Messergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa der Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen bei Methode 4.....	40
Tabelle 15: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 4.....	41

Tabelle 16: Vergleich und Einstufung der Methodenhandhabungen der Methoden nach den ausgewählten Kriterien	44
---	----

VI Abkürzungsverzeichnis

Bzw.	Beziehungsweise
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
Ebd.	Ebenda
m	Meter
cm	Zentimeter
mm	Millimeter
Pa	Pascal
PHI	Passivhaus Institut
u	Holzfeuchte
Ø	Durchmesser
Σ	Summe
z.B.	zum Beispiel

1 Einführung

Der Klimawandel hat ein erhebliches Ausmaß erreicht, welches dringendes Handeln erfordert. Aus diesem Grund wird die Verantwortung der Menschheit, die durch den Menschen an der Umwelt verursachten Klimaschäden zu minimieren und langfristig klimapositiv einzuwirken, immer deutlicher. Ein bedeutender Anteil menschengemachter Umweltbelastung liegt im hohen Heizenergieverbrauch von Gebäuden, was zu erheblichen CO₂-Emissionen führt, wie vom Umweltbundesamt (2023) berichtet wird¹¹. Der Lösungsansatz dieses Problems geht über die Umstellung auf erneuerbare Energieträger hinaus. Dieser erfordert vielmehr die entscheidende Reduzierung der benötigten Heizenergie. In diesem Kontext ist es unumgänglich, Gebäude hoch energieeffizient und nachhaltig zu konstruieren.

Um dies zu gewährleisten, stellt das Passivhaus-Konzept einen wegweisenden Ansatz dar. Die fünf Grundprinzipien Lüftungswärmerückgewinnung, wärmebrückenfreie Konstruktion, luftdichte Ebene, Verwendung von Passivhaus-Fenstern und adäquate Wärmedämmung bilden die Grundlage für die Ausführung energieeffizienter Gebäude.¹²

Bei der Ausführung einer besseren Dämmwirkung der Bauteile und der Vermeidung von Wärmebrücken werden die Transmissionswärmeverluste vermindert und die Lüftungswärmeverluste gewinnen zunehmend an Bedeutung, sodass diese möglichst ebenfalls minimiert werden müssen¹³. Somit nehmen Sanierungen in der Bauindustrie eine zunehmend bedeutendere Rolle ein und der Bedarf an Lösungen in diesem Bereich wächst stetig.

Um Lüftungswärmeverluste zu vermindern und eine wirksame Lüftungswärmerückgewinnung zu gewährleisten ist es notwendig, eine ununterbrochene luftdichte Ebene innerhalb der Gebäudehülle zu realisieren, wobei einige Herausforderungen bestehen. Zu den wesentlichen Herausforderungen gehören beispielsweise Flächenabdichtungen, luftdichte Fensteranschlüsse sowie Durchführungen. Während die Durchdringung der luftdichten Ebene beispielsweise durch Holzbalken bei Neubauten konstruktiv sicher und kostengünstig vermieden werden kann, lässt sie sich bei Sanierungen oft nicht vermeiden.

Im Folgenden beschäftigt sich diese Arbeit daher mit den Herausforderungen, welche bei Sanierungen der Gebäudehülle zur Abdichtung von Holzbalken in der luftdichten Ebene, wie beispielsweise in Abbildung 1, zu bewältigen sind. Es wird untersucht welche Anforderungen zukünftige kommerzielle Abdichtungsmethoden in der Praxis erfüllen müssen.

¹¹ Umweltbundesamt, 2023.

¹² Passivhaus Institut, 2023., S.44

¹³ Solcher, O. et al., 2012., S.10



Abbildung 1: Beispielhafter Sanierungsfall eines rissigen historischen Holzbalkens, welcher die herzustellende luftdichte Ebene durchdringt

Bisherige Untersuchungen (2014) zu dem Thema „Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene“ haben gezeigt, dass es mindestens erforderlich ist, den Balkenumfang an die luftdichte Ebene anzudichten und Risse zu verfüllen um die Leckagevolumenströme in dem notwendigen Maße zu verringern¹⁴. Die große Herausforderung liegt hierbei nicht in der reinen Andichtung des Holzbalkenumfangs an die luftdichte Ebene, sondern vielmehr in der Abdichtung entstandener Risse in den Holzbalken. Solche Risse, bedingt durch sich über die Zeit ändernde Holzfeuchte im eingebauten Zustand, stellen ein besonderes Potential für Leckagen und somit für Bauschäden dar. Daher wird die Andichtung des Holzbalkenumfangs in dieser Arbeit und den ausgeführten Untersuchungen zwar vorausgesetzt und im Zuge der Messungen ausgeführt, jedoch nicht weiter gesondert betrachtet und untersucht. Eine besondere Schwierigkeit, welche hingegen bei der Abdichtung von Rissen genau untersucht und betrachtet wird, stellt die Abdichtung der in der Regel kaum zugänglichen, auf 0 mm zulaufenden Risspitze dar.

Anhand der Auswertung dieser Untersuchungen sollen Schlussfolgerungen dazu gezogen werden, welche Anforderungen an zukünftig zu entwickelnde kommerzielle Abdichtungssysteme gestellt werden müssen, um eine wirksame, praktikable und zeit-sparende Abdichtung rissiger Holzbalken in der luftdichten Ebene gewährleisten zu können. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, die Herausforderungen im Bereich der Luftdichtheit von Gebäudehüllen im Zuge einer Sanierung zu bewältigen und zur Entwicklung nachhaltiger und energieeffizienter Lösungen beizutragen.

¹⁴ Peper, S./Bangert, A./Bastian, Z., 2014., S.5-6

2 Methodik

Die Grundlage für das methodische Vorgehen dieser Arbeit bildet die Untersuchung der Rissmuster in historischen Holzbalken. Die Herausforderung hierbei besteht darin, solche Arten von Rissen zu identifizieren, welche in Holzbalken bei Sanierungsmaßnahmen häufig aufzufinden sind und ein Erschwernis bei der Ausführung einer angestrebten luftdichten Ebene darstellen. Als Grundlage dafür, werden vier repräsentative Prüfkörper erstellt, die unterschiedliche Rissgrößen und –arten abbilden. Unter Einsatz dieser Prüfkörper werden die Leistungen vier verschiedener Abdichtungssysteme durch Luftdichtheitsprüfungen am Passivhaus Institut an einem geeigneten Messstand gemessen und verglichen. Diese vier Abdichtungsmethoden verfolgen jeweils unterschiedliche Lösungsansätze zur Abdichtung der Risse.

Die Messungen werden in Anlehnung an die DIN EN 12114 durchgeführt, welche das Laborprüfverfahren der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen beschreibt¹⁵. Das genaue Messverfahren und der Versuchsaufbau werden unter Kapitel 7 Versuchsgrundlagen dargestellt.

2.1 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm sieht vor, dass jede Abdichtungsmethode an allen vier Prüfkörpertypen jeweils drei Mal angewendet wird, um ein repräsentatives Ergebnis bezüglich der Funktionalität zu erlangen. Die präparierten 3 x 4 Prüfkörper einer Abdichtungsmethode werden gemeinsam in eine luftdichte Ebene integriert und auf dem Messstand auf Luftdichtheit geprüft. Zusätzlich werden, wie in Abbildung 2 zu sehen, alle vier Prüfkörpertypen mit jeder der vier angewendeten Abdichtungsmethoden einzeln auf Luftdichtheit geprüft. Somit lassen sich Hinweise darüber gewinnen, ob die Abdichtungsmethoden für alle oder nur für bestimmte Risstypen gut funktionieren.

¹⁵ DIN EN 12114, 2000.



Abbildung 2: Messung einer angewendeten Abdichtungsmethode an allen Prüfkörpertypen (links) und Messung einer angewendeten Abdichtungsmethode an einem einzelnen Prüfkörpertypen (rechts)

Aus den zuvor durchgeführten Untersuchungen zu diesem Thema stellte sich von insgesamt acht getesteten Abdichtungsmethoden eine Methode als besonders vielversprechend und effektiv heraus. Die besten Ergebnisse zur Abdichtung des Rissquerschnittes erzielte eine Lösung, welche durch eine Bohrung (Injektionskanal) und eine Injektion hergestellt wird. Diese Methode erreichte eine Reduktion des Leckagevolumenstroms um 98%. Da eine statistisch ausreichende Anzahl an Messungen von Proben im Rahmen dieser Untersuchungen nicht realisiert werden konnte, wird diese Abdichtungsmethode genauer untersucht und stellt eine der vier Lösungsansätze dar.¹⁶

Die Funktionalität der Injektionskanal-Methode wird hier weiter untersucht und statistisch repräsentative Messwerte gesammelt. Zudem werden Erkenntnisse darüber erlangt, wie diese Methode bei den vier verschiedenen Risstypen, insbesondere in Bezug auf die abknickenden Risstypen funktioniert. Die weiteren drei Abdichtungsmethoden, die getestet werden, dienen dem Vergleich der Messdaten und der Findung weiterer Lösungsansätze, welche potentielle Hersteller zukünftiger Abdichtungsmethoden verfolgen und weiterentwickeln können.

Neben der Sicherstellung einer ausreichenden Luftdichtheit der Abdichtungsmethoden nimmt die Handhabung der Methoden in der Sanierungspraxis ebenfalls eine entscheidende Rolle ein. Um die Umsetzbarkeit der Erkenntnisse in der Sanierungspraxis zu bewerten, werden die entscheidenden Aspekte für die Praktikabilität der Methoden festgelegt und anhand dessen gemessen. Somit kommt ein wichtiges Bewertungskriterium zur Luftdichtheit hinzu und ermöglicht eine ganzheitlichere Betrachtung der Methoden.

¹⁶ Peper, S./Bangert, A./Bastian, Z., 2014., S. 5-6

3 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Bedeutung der Luftdichtheit für die Energieeffizienz von Gebäuden sowie potenzielle Bauschäden durch Leckagen erläutert. Darüber hinaus werden die Anforderungen an die luftdichte Ebene betrachtet, wobei insbesondere auf die Durchführung von Luftdichtheitsprüfungen eingegangen wird. Ein solides Verständnis dieser Grundlagen ist von entscheidender Bedeutung, um die Herausforderungen und Lösungsansätze im Bereich der luftdichten Gebäudehülle zu erfassen.

3.1 Energieeffizienz durch Luftdichtheit in Gebäuden

Ein zentraler Aspekt, welcher maßgeblich zu energieeffizienten und langfristig schadenfreien Gebäuden beiträgt, ist die Luftdichtheit der Gebäudehülle. Die Luftdichtheit bezieht sich auf die Fähigkeit eines Gebäudes, unkontrollierten Luftaustausch zwischen Innen- und Außenbereichen zu minimieren. In einem energieeffizienten Gebäude wird der Luftaustausch (Infiltration) in den Räumlichkeiten gezielt durch ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung gesteuert, um mit Hilfe eines Wärmetauschers einen Wärmebereitstellungsgrad von 75% bis über 95% zu erreichen¹⁷.

Da wir uns durchschnittlich 90% unserer Zeit in Räumen aufhalten, ist es von großer Bedeutung, dass diese Variante ein optimales Raumklima, eine regulierte Luftfeuchtigkeit und somit auch eine erhöhte Luft- sowie Lebensqualität ermöglicht¹⁸. Eine undichte Gebäudehülle führt hingegen zu Unbehaglichkeit durch Zugerscheinungen. Außerdem hat sie unerwünschten Wärmeverlust im Winter sowie Wärmeeintritt im Sommer zur Folge. Hierfür ist der Eintritt von kaltem Wind durch Undichtheiten in z.B. Wänden oder auch der Austritt warmer Luft durch beispielsweise Undichtigkeiten des Daches verantwortlich. Dieser kann durch den Auftrieb warmer Luft (Konvektion durch Dichteunterschiede oder Winddruck) innerhalb des Gebäudes entstehen. Dies hat nicht nur erhebliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch, sondern auch auf den Komfort der Bewohner.

Durch die Ausführung einer luftdichten Ebene in der Gebäudehülle unter Verwendung von Dichtungsmaterialien kann die Luftdichtheit von Gebäuden auf ein hohes Niveau gesteigert werden. Hierzu setzt die Baubranche vermehrt auf hochwertige Dichtungssysteme.

¹⁷ Feist, W., 2006.

¹⁸ Müller, P., 2021., S. 15

3.2 Bauschaden-Potential durch Leckagen

Holzschäden im Gebäude entstehen größtenteils durch holzerstörende Lebewesen, wobei etwa zwei Drittel dieser Schäden auf Pilze zurückzuführen sind, während Insekten für das restliche Drittel verantwortlich sind. Pilzsporen keimen aus und Pilzmyzele wachsen, wenn in den Holzzellen freies Wasser vorhanden ist und die Fasersättigungsgrenze über einen Zeitraum von mehr als sechs Monaten überschritten wird. Die üblichen Temperaturschwankungen am Gebäude von -20°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ reichen in der Regel nicht aus, um Pilze abzutöten. Daher ist es bei Sanierungsmaßnahmen von großer Bedeutung, die Holzbalken sorgfältig zu untersuchen, um potenziellen Schäden, wie z.B. in Abbildung 3, vorbeugen zu können.¹⁹



Abbildung 3: Pilzbefall durch eindringende Feuchtigkeit, der zur völligen Zerstörung bzw. zum Verlust der Tragfähigkeit der Deckenbalken geführt hat²⁰

Die Wasseraktivität für Wachstum und Sporenkeimung liegt bei $> 80\%$, diese steht im Gleichgewicht mit der relativen Oberflächenluftfeuchte des betroffenen Bauteils. Unter den Randbedingungen 50% Raumlufffeuchtigkeit, 20°C Raumlufftemperatur und -5°C Außenlufttemperatur lassen sich somit folgende Grenztemperaturen für Tauwasseranfall und schimmelpilzkritische Feuchteschwellen festlegen. Tauwasserbildung tritt an kapillar nicht aktiven Oberflächen unter den genannten Randbedingungen bei Temperaturen unter $9,3^{\circ}\text{C}$ auf, während Schimmelwachstum auf kapillar aktiven Oberflächen bereits ab einer Temperatur von $12,6^{\circ}\text{C}$ möglich ist.²¹

Leckagen in der luftdichten Ebene von Gebäuden führen durch den Eintritt kalter Außenluft zu akuter Abkühlung der undichten Stellen und fördern unter Betrachtung der

¹⁹ Müller, U., 2011.

²⁰ Uwe Wild, 2008.

²¹ Feist, W., 2003., S.4-5

genannten Daten unmittelbar das Risiko für langfristige Bauschäden. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit einer luftundurchlässigen Ausführung der Luftdichtheitsebene bei Sanierungen.

3.3 Anforderungen an die Luftdichte Ebene

Vereinfacht gilt als Anforderung an eine geplante geschlossene Luftdichtheitsebene nach dem Passivhausstandard die umgangssprachliche „Stiftregel“²². Diese besagt, dass sich die luftdichte Ebene in der Grundriss- und Schnittzeichnung des Gebäudes mit einem Stift abfahren lassen muss, ohne dabei absetzen zu müssen. Somit ist die lückenlose Planung dieser Ebene sichergestellt und muss dementsprechend ausgeführt werden.

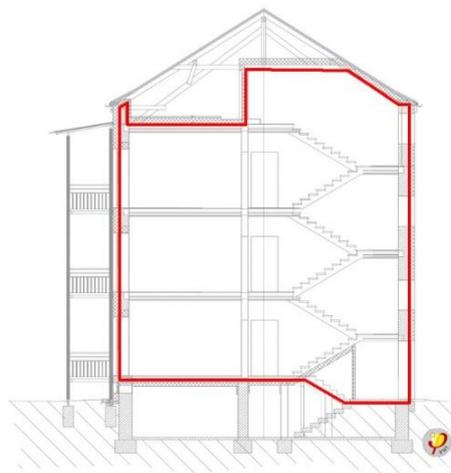


Abbildung 4: Eingezeichnete lückenlose Luftdichtheitsebene im Schnitt eines Gebäudes²³

Die Bestimmungen zur Luftdichtheit von Gebäuden sind derzeit auf Vorgaben zur Luftwechselrate (n_{50}) beschränkt. Diese Rate gibt an, wie oft die Luft im gesamten Volumen eines Gebäudes bei einem Druck von 50 Pa pro Stunde ausgetauscht wird. Gemäß den Bestimmungen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) von 2023, Abschnitt 26, Abs. 2, wird für Wohngebäude ein n_{50} -Wert vorgeschrieben, der eine Dichtigkeit von max. 3,0 1/h ohne Lüftungsanlage und max. 1,5 1/h mit Lüftungsanlage erfordert²⁴. Das Passivhausinstitut fordert zur Einhaltung Passivhausstandards (PH-Standard) hingegen mit 0,6 1/h einen noch besseren n_{50} -Wert²⁵. Bei der Sanierung

²² Passivhaus Institut, 2022.

²³ Bastian, Z. et al., 2009., S.149

²⁴ GEG, 2020.

²⁵ Passivhaus Institut, 2023., S. 38

mit Passivhaus-Komponenten (EnerPHit) muss eine Luftwechselrate von 1,0 1/h erreicht werden, wobei die Einhaltung des Passivhaus-Grenzwertes zu bevorzugen ist²⁶.

Tabelle 1: Zu erreichende n_{50} -Werte zu den verschiedenen Gebäudeanforderungen

Gebäudekriterien nach:	GEG	PH-Standard	EnerPHit
n_{50} -Wert [1/h]	3,0 (ohne Lüftung) 1,5 (mit Lüftung)	0,6	1,0

Außerdem wird der Q_{50} -Wert ermittelt, um die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle zu quantifizieren. Dieser Wert gibt den Volumenstrom pro Stunde an, der bei einem Druck von 50 Pa durch die definierte Gebäudehülle strömt. Um die Anforderungen aus Tabelle 1 nachzuweisen und messen zu können wird bei Gebäuden eine Luftdichtheitsprüfung durchgeführt. Diese wird im Folgenden näher erläutert.

3.3.1 Luftdichtheitsprüfung

Die Überprüfung der Luftdichtheit in Gebäuden nach der Differenzdruck-Methode, auch bekannt als Blower-Door-Test, wird gemäß den normativen Richtlinien der DIN EN ISO 9972 durchgeführt. Die Messvorrichtung besteht aus einem Rahmen, der in eine Türöffnung eingebaut und umlaufend luftdicht an die Türzarge angeschlossen wird. Innerhalb dieses Rahmens befindet sich eine Öffnung, in welcher ein stufenlos regelbarer Ventilator mit einer kalibrierten Durchflusssdüse platziert ist. Mit Hilfe des Ventilators wird eine Druckdifferenz zwischen dem Innen- und Außenbereich des Gebäudes erzeugt. Die Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Messaufbau einer Luftdichtheitsmessung. Der Luftvolumenstrom, der durch den Ventilator strömt, wird anhand des dynamischen Drucks an der Durchflusssdüse gemessen. Die Drehzahl des Ventilators wird so eingestellt, dass der gewünschte Differenzdruck zwischen Innen- und Außenbereich erreicht wird. Zusätzlich werden die Innentemperatur, die Außentemperatur und die Windgeschwindigkeit gemessen. Es wird empfohlen, die Messungen nicht bei starkem Wind durchzuführen.²⁷

²⁶ Ebd.

²⁷ Schild, K./Willems, W. M., 2022.

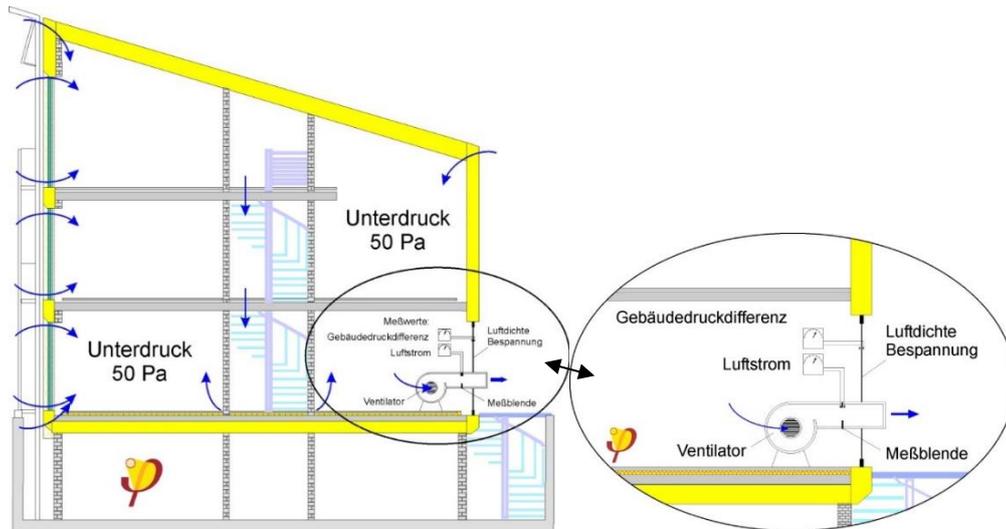


Abbildung 5: Prinzipieller Messaufbau einer Luftdichtheitsmessung eines Gebäudes²⁸

Um größere Leckagen und fehlerhaft abgedichtete Öffnungen zu erkennen, wird das Gebäude zunächst bei der höchsten vorgesehenen Druckdifferenz überprüft. Eventuelle fehlerhafte Abdichtungen sind entsprechend zu überarbeiten. Sowohl Unterdruck- als auch Überdruckmessungen können zur Ortung von Leckagen verwendet werden. Unter Verwendung eines Thermoanemometers, eines Nebelgenerators oder durch Thermografieaufnahmen können Leckagen identifiziert werden. Im Anschluss wird die natürliche Druckdifferenz zwischen Innen und Außen gemessen. Dazu wird die Öffnung des Ventilators verschlossen. Anschließend werden die Mittelwerte aller positiven Werte, aller negativen Werte und Δp_{01} aller Werte berechnet. Liegt einer dieser Werte über 5 Pa, darf der DIN EN ISO 9972 zufolge keine Messung durchgeführt werden. Nach der Differenzdruckmessung wird die natürliche Druckdifferenz erneut gemessen, und der Wert Δp_{02} ermittelt. Überschreitet einer der Beträge der gemittelten positiven oder negativen natürlichen Druckdifferenzen 5 Pa, ist die Messung ungültig zu erklären.²⁹

Die eigentliche Messung zur Überprüfung der Luftdichtheit wird mittels Differenzdruckmessungen im Bereich zwischen ± 10 Pa und ± 50 Pa (idealerweise bis ± 100 Pa) durchgeführt. Es sind mindestens 5 Messungen im Überdruck- und Unterdruckbereich bei unterschiedlichen Druckdifferenzen vorzunehmen. Obwohl formell eine Messreihe entweder im Unterdruck- oder Überdruckbereich ausreichend ist, wird empfohlen, beide Messreihen zu erfassen, um die Ergebnisgenauigkeit zu verbessern.

²⁸ Peper, S./Feist, W./Sariri, V., 1999.

²⁹ Schild, K./Willems, W. M., 2022., S. 287-290

sern. Eine Korrektur der Messergebnisse um die natürliche Druckdifferenz wird vorgenommen und der Volumenstrom bei 50 Pa als Mittelwert aus den bei Überdruck- und Unterdruckmessungen berechnet.³⁰

3.3.2 PHI Zertifizierung und Zertifizierungsclassen

Das Passivhaus Institut agiert als unabhängige Instanz, die Produkte auf ihre Eignung für den Einsatz in Passivhäusern prüft und zertifiziert. Produkte, die das Siegel "Zertifizierte Passivhauskomponente" erhalten, werden einer standardisierten Überprüfung unterzogen, um sicherzustellen, dass sie erforderliche Leistungswerte aufweisen sowie eine hohe energetische Qualität bieten. Die Verwendung solcher zertifizierten Produkte erleichtert die Planung für Architekten erheblich und sichert die reibungslose Funktion eines entstehenden Passivhauses.³¹

Bezüglich der Luftdichtheit werden bislang Systeme der Bereiche "Luftdichter Fensteranschluss", "Flächenabdichtung" und "Durchführungen" geprüft, die für die Luftdichtheit des Gebäudes entscheidend sind und somit seine Energieeffizienz beeinflussen. Um die Qualität und Leistungsfähigkeit von Luftdichtheitssystemen bewerten und vergleichen zu können, sind Zertifikatsklassen für die jeweiligen Systeme anhand von einzuhaltenden Grenzwerten festgelegt. Die Klassen A+, A, B und C sind mit den entsprechenden Grenzwerten für Durchführungen in Tabelle 2 dargestellt. Erreicht ein geprüftes Luftdichtheitssystem mindestens die Klasse C und liegt somit unter dem Grenzwert des maximal zulässigen Leckagevolumenstroms, so ist sichergestellt, dass bei der Verwendung dieser Komponente in Gebäuden die beim Luftdichtheitstest erforderlichen n_{50} -Werte 0,4 1/h (üblicher Wert für Passivhäuser) und somit auch 0,6 1/h (Grenzwert Passivhaus) eingehalten werden. Hierzu wurde das zu erwartende Vorkommen der Systeme in Referenzgebäuden festgelegt, um den Einfluss auf das Gesamtgebäude abzuschätzen. Je geringer der geprüfte Leckagevolumenstrom desto besser wird die Komponente innerhalb dieser Klassen eingestuft.³²

Tabelle 2: Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit der Zertifikatsklassen für Durchführungen³³

Klasse	Luftdurchlässigkeit bezogen auf den Umfang der Durchführung @ 50 Pa [m ³ /(hm)]
phA+	≤ 0,05
phA	≤ 0,30
phB	≤ 0,50
phC	≤ 0,80
keine	> 0,80

³⁰ Ebd.

³¹ Peper, S., 2019.

³² Ebd.

³³ Ebd.

4 Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene von Gebäuden

Innerhalb einer Gebäudestruktur können Holzbalkendurchdringungen an verschiedenen Stellen vorkommen. Sie sind häufig in Deckenkonstruktionen als Träger für höhere Etagen oder als Teil des Dachs, z.B. bei der Verbindung von Dachsparren und Pfetten, zu finden. Ebenso durchdringen sie Wände, um Stabilität zu gewährleisten oder um Öffnungen für Türen und Fenster zu ermöglichen. In mehrstöckigen Gebäuden können sie durch Bodenkonstruktionen führen, um die Lasten der darüber liegenden Stockwerke zu tragen.³⁴

4.1 Untersuchung von Risstypologien

Die Analyse der Risstypologien ist ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit und trägt maßgeblich dazu bei, praxisrelevante Erkenntnisse zu gewinnen. Um auf die relevanten Risstypologien schließen zu können ist das Verständnis der Mechanik der Rissbildung in Holz essenziell.

4.1.1 Mechanik der Rissbildung in Holzquerschnitten

Im Holzbau wird grundsätzlich nach der DIN 4074 zwischen Rissen unterschieden, welche entweder im stehenden Baum, beim Fällen des Baumes oder durch die Trocknung von Schnitthölzern entstehen³⁵. Zu den im Baum entstehenden Rissen gehören die Ringschäle. Ringschäle entstehen durch Wuchsspannung und folgen dem ganzen oder nur einen Teil des Verlaufs des Jahrringes. Ein typischer Verlauf der Ringschäle ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Ringschäle im Holzstamm entlang des Jahrringes³⁶

Da Ringschäle jedoch nach DIN 4074 für Bauteile aus Nadelnschrittholz, die nach Tragfähigkeit zu bemessen sind, grundsätzlich nicht zulässig sind, wird im Folgenden

³⁴ Stahr, M., 2022., S. 314-317

³⁵ DIN 4074-1, 2012.

³⁶ BISCHOFF + SCHÄFER Holz GmbH, 2012, S. 8.

nur genauer auf die Mechanik der Rissbildung von Trocken- bzw. Schwindrissen (Abbildung 7) eingegangen.³⁷



Abbildung 7: Trocken- bzw. Schwindriss³⁸

Holz besitzt die Eigenschaft Feuchtigkeit aufzunehmen und abzugeben (Hygroskopie). Durch eine Feuchtigkeitsaufnahme entsteht eine Volumenvergrößerung des Holzes. Diesen Vorgang bezeichnet man als Quellen. Das Schwinden beschreibt hingegen eine Volumenverkleinerung infolge einer Feuchteabnahme. Zu schnelle Änderungen der relativen Umgebungsfeuchte führen zu einer ungleichmäßigen Holzfeuchteverteilung zwischen dem inneren (Holzkern) und äußeren Querschnittsteilen des Holzes. Hierbei treten durch das zu schnelle Schwinden Querszugeigenspannungen auf, welche die Querszugfestigkeiten des Holzes überschreiten. Im Zuge des Spannungsabbaus entstehen die Trocken- bzw. Schwindrissbildungen.³⁹

Das oben beschriebene Quellen und Schwinden zählt zu den häufigsten Ursachen für Rissbildungen in Holzbalken⁴⁰. Mögliche Rissbildungen werden bei Schnittholzteilen durch die Einschnittsart beeinflusst. Je nach Jahrringlagen in den Querschnitten, können verschiedene Rissbilder auftreten. Dies ist auf die unterschiedlichen Schwindmaße zwischen Kern- und Splintholz sowie zwischen tangentialer und radialer Richtung zurückzuführen. Allgemein ist anzunehmen, dass es in größeren Querschnitt auch zu größeren Rissbildungen kommen kann als bei kleineren Querschnitten. Außerdem entstehen bei markfreien (herzfreien, kernfreien) Querschnitten kleinere Risse als in Vollholzquerschnitten mit Mark⁴¹. In Abbildung 8 sind beispielhaft Rissbildungen bei verschiedenen Einschnittsarten dargestellt.

³⁷ DIN 4074-1, 2012.

³⁸ BISCHOFF + SCHÄFER Holz GmbH, 2012, S. 8.

³⁹ Neuhaus, H., 2017. S. 14-19

⁴⁰ Colling, F., 1999.

⁴¹ Gloß P./Böhner G./Wagner L., 1989.



Abbildung 8: Mögliche Rissbildungen bei Vollholzquerschnitten in Abhängigkeit von der Einschnittsart⁴²

4.2 Messung und Feststellung von Rissausmaßen

Konventionelle Messmethoden von Risstiefen relativ breit klaffender Risse sind z.B. die Messung durch Fühllehren oder Metallmaßstäbe unterschiedlicher Dicken und Flexibilität. Provisorisch kann auch eine grobe Messung mit einem Papierstreifen durchgeführt werden. Rissbreiten können ausreichend genau mit einem üblichen Meterstab gemessen werden. Ist die Stirnseite des Holzbalkens einsehbar, so ist eine einfachere und genauere Messung der Rissausmaße möglich.⁴³

Nach DIN 4074 werden Nadel-schnitthölzer für Bauteile, die nach der Tragfähigkeit zu bemessen sind, in Sortierklassen S7, S10 und S13 eingestuft. Ein Einstufungskriterium sind hierbei unter Anderem die Risse im Holz.

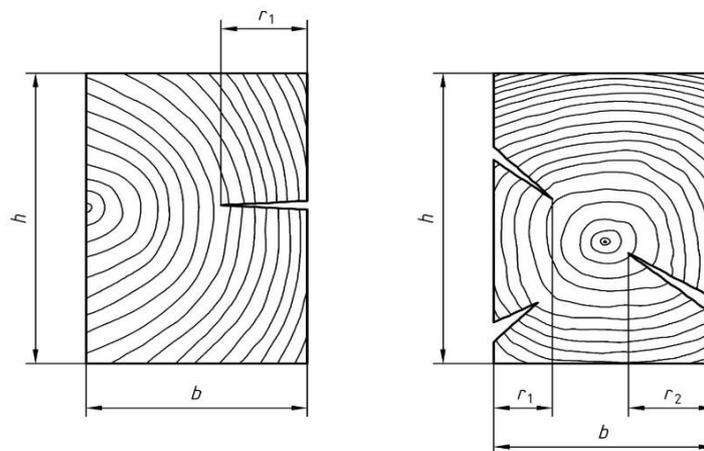


Abbildung 9: Bestimmung der Risstiefen in einem Kantholz⁴⁴

Als Sortierkriterium sind die Risstiefen, gemäß Abbildung 9, an drei Viertelpunkten der Risslänge mit einer 0,1 mm dicken Fühlerlehre zu messen (siehe Abbildung 10). Mit der Formel 1 wird dann der Mittelwert r der Risstiefen ermittelt.

⁴² Neuhaus, H., 2017, S. 17.

⁴³ Frech, P., 1998., S. 56

⁴⁴ DIN 4074-1, 2012.

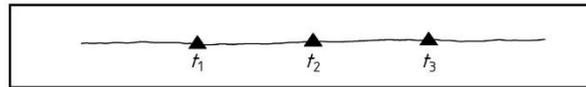


Abbildung 10: Bestimmung der Risstiefe "r" an den Viertelpunkten der Risslänge⁴⁵

$$\text{Formel 1: } r = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$$

$$\text{Formel 2: } R = \frac{r_1}{b}$$

$$\text{Formel 3: } R = \frac{r_1 + r_2}{b}$$

Um das Sortiermerkmal R zu berechnen wird, nach Formel 2 und 3 die Summe der in einem Querschnitt vorhandenen Risstiefen durch die Breite b der Querschnittsseite geteilt.

4.2.1 Klassifizierung von Risstypologien

Um eine Klassifizierung von Risstypologien in historischen Balken abzuleiten, werden im Folgenden die Maximalrisstiefen in frischen Schnitthölzern, welche bei einer Holzfeuchte von 20% nach Tragfähigkeit zu bemessenden sind, vorwiegend durch die Sortierklassen der DIN 4074 festgelegt. Diese maximal zulässigen Risstiefen in frischem Schnittholz stellen für die Klassifizierung im Rahmen dieser Untersuchungen die zu erwartende Mindestrisstiefe in historischen Holzbalken bei Sanierungsprojekten dar. Da nach dem Einbau der Holzbalken eine Verminderung der Holzfeuchte über die Jahre auf bis zu 5% auftreten kann, ist eine weitere Vertiefung der Risse zu erwarten⁴⁶.

Die maximale Risstiefe für historische Holzbalken wird hier abhängig von den maximal zulässigen Risstiefen in Bezug auf die Tragfähigkeit nach Frech (1998) definiert, da ein historischer Holzbalken mit größeren Risstiefen anderweitig behandelt oder ausgetauscht werden muss, um die benötigte Tragfähigkeit zu gewährleisten. Die Werte unbedenklicher Risstiefen bei historischen Holzbalken liegen auf den Querschnitt bezogen in ihrer Summe bei Biegebeanspruchung bei bis zu 60% und bei Schubbeanspruchung bei bis zu 45%. Bei tatsächlich auftretenden geringen Spannungen wird die Obergrenze mit bis zu 80% festgelegt.⁴⁷

In Tabelle 3 sind Kanthölzer Bretter und Bohlen nach den Sortiermerkmalen Ringschäle und Schwindrisse nach DIN 4074 in die Sortierklassen S7, S10 und S13 eingeteilt. Hierbei ist zu sehen, dass Ringschäle in allen Sortierklassen grundsätzlich nicht zulässig sind. Schwindrisse hingegen sind bei Brettern, Bohlen und Latten bei

⁴⁵ Ebd.

⁴⁶ Neuhaus, H., 2017., S. 9

⁴⁷ Frech, P., 1998., S.78-79

der visuellen Sortierung in allen Klassen, gleichgültig in welchen Ausmaßen, zulässig. Bei Kanthölzern und vorwiegend hochkant biegebeanspruchten Brettern und Bohlen ist das Sortiermerkmal R maßgebend.

Tabelle 3: Einteilung in Sortierklassen nach dem Sortiermerkmal Risse⁴⁸

Sortiermerkmal	Sortierklasse		
	S7	S10	S13
Sortierkriterien für Kanthölzer und vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen			
Schwindrisse	Bis R=1/2	Bis R=1/2	Bis R=2/5
Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
Sortierkriterien für Bretter und Bohlen bei der visuellen Sortierung			
Schwindrisse	zulässig	zulässig	zulässig
Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
Sortierkriterien für Latten bei der visuellen Sortierung			
Schwindrisse	-	zulässig	zulässig
Ringschäle	-	nicht zulässig	nicht zulässig

4.3 Zu untersuchende Risstypologien

Zunächst ist festzulegen, welche Art von Holzbalken untersucht wird, da der Begriff des Holzbalkens in Bezug auf Abmessungen nicht klar definiert ist. Im Sinne der DIN 4074 werden Schnitthölzer nach Tabelle 4 unterschieden. Holzbalken werden demnach aufgrund ihrer Abmessungen nach der DIN 4074 als Kantholz definiert.

Tabelle 4: Schnittholz-Einteilung nach DIN 4074⁴⁹

Schnittholzart	Dicke d bzw. Höhe h	Breite b
Latte	$h \leq 40 \text{ mm}$	$b < 80 \text{ mm}$
Brett	$h \leq 40 \text{ mm}$	$b \geq 80 \text{ mm}$
Bohle	$h > 40 \text{ mm}$	$b > 3 \cdot h$
Kantholz	$b \leq h \leq 3 \cdot b$	$b > 40 \text{ mm}$

⁴⁸ DIN 4074-1, 2012.

⁴⁹ Ebd.

Um repräsentative Rissgeometrien in Prüfkörpern darzustellen ist zunächst festzulegen welche Balkenabmessungen im Holzbau verwendet werden, um im Anschluss sinnvolle Rissbreiten und Risstiefen auszuwählen. Vorzugsquerschnitte von Konstruktionsvollholz sind im Holzbau mit Höhen von 10-24 cm üblich⁵⁰. Um sowohl Maximal-, Minimalwerte als auch Mittelwerte darzustellen, werden hier die Balkenhöhen 10 cm, 16 cm und 24 cm gewählt.

Auf dieser Grundlage werden in Tabelle 5 minimale und maximale Risstiefen, nach den in den vorherigen Kapiteln aufgeführten Grundlagen, für die Balkenhöhen 10 cm, 16 cm und 24 cm berechnet.

Tabelle 5: Orientierungswerte zur Bestimmung der Rissgeometrie der Prüfkörper

Balkenhöhen [cm]	10	16	24
Risstiefe [cm]:			
Min. nach S7 (DIN 4074, 2012)	5,0	8,0	12,0
Max. (Frech, 1986)	6,0	9,6	14,4
Für Prüfkörper gewählte Risstiefe [cm]:	5,0	8,0	12,0
Rissbreite b_{Riss} [cm] (Colling, 1999):			
bei u 15%	0,18	0,29	0,43
bei u 5%	0,30	0,48	0,72
Für Prüfkörper gewählte Rissbreite [cm]:	0,2	0,5	1,0

Die Rissbreite b_{Riss} , welche sich bei einer Änderung der Holzfeuchte u von 30 % auf 15 % bzw. 5% durch die entstehenden Zwängungsspannungen ergibt, wird hier aus der Differenz von Δb_{innen} und $\Delta b_{\text{außen}}$ unter Anwendung der Formeln 4 und 5 vereinfacht nach Colling (1999) berechnet⁵¹. Hierzu wurde die Annahme getroffen, dass die feuchteabhängige Dimensionsänderung α 0,24 % im Äußeren des Holzbalkens und etwa die Hälfte, also 0,12 % im Inneren quer zur Holzfaser beträgt. Das Kürzel b steht in diesem Zusammenhang für die Breite des Holzbalkens.

Formel 4: $\Delta b_{\text{innen}} = \alpha * (\Delta u) * b$

Formel 5: $\Delta b_{\text{außen}} = \alpha * (\Delta u) * b$

Auf Grundlage der in Tabelle 5 gewählten Rissbreiten und Risstiefen werden Prüfkörper mit den entsprechenden Maßen (± 1 mm) hergestellt, an denen die Abdichtungs-

⁵⁰ Neuhaus, H., 2017., S. 91

⁵¹ Colling, F., 1999.

methoden angewendet und getestet werden. Neben den oft in der Literatur behandelten keilförmigen Rissen ist es wichtig, auch andere Rissformen wie abknickende Risse zu untersuchen. Dies ermöglicht eine realistischere Darstellung der praktischen Gegebenheiten und unterstützt die Entwicklung geeigneter Lösungsansätze. Die Erforschung einer vielfältigen Palette von Risstypologien ermöglicht außerdem eine umfassendere Analyse und erhöht die Relevanz der Ergebnisse für die praktische Anwendung. Daher wird ein Prüfkörper mit einem abknickenden Risstypen im Mittel der gewählten Maße ebenfalls realisiert. Die Prüfkörper wurden von der Schreinerei der Technischen Universität Darmstadt angefertigt und werden im Folgenden genauer vorgestellt.

4.3.1 Prüfkörper

Die aus den untersuchten Risstypologien abgeleiteten Prüfkörper für die Luftdichtheitsmessungen dieser Arbeit sind aus im Holzbau üblicherweise verwendetem Nadelholz hergestellt. Jeder Prüfkörper besteht aus luftdicht zusammengeleimten Kantenhölzern und besitzt eine Standardlänge von 20 cm. Die genauen Querschnitts- und Rissmaße sind in Abbildung 11 dargestellt.

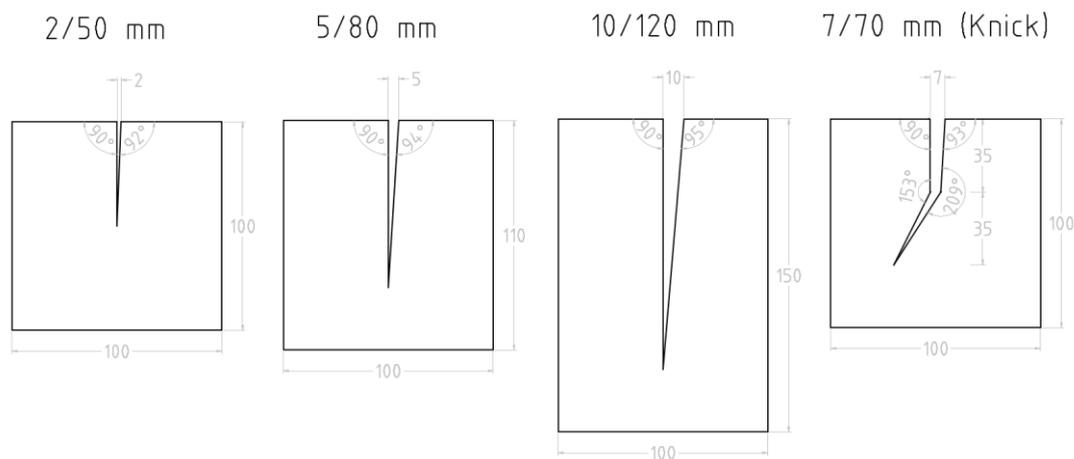


Abbildung 11: Bemaßte Schnittdarstellung des Querschnittes der Prüfkörper

Um realitätsnahe Bedingungen zu simulieren, wird die Oberfläche des Balkenumfangs in einem separaten Nachbehandlungsprozess angeraut. Diese Maßnahme zielt darauf ab, die üblichen Oberflächenbeschaffenheiten von im Einsatz befindlichen Holzbalken nachzuahmen und somit aussagekräftige Messergebnisse zu erzielen.

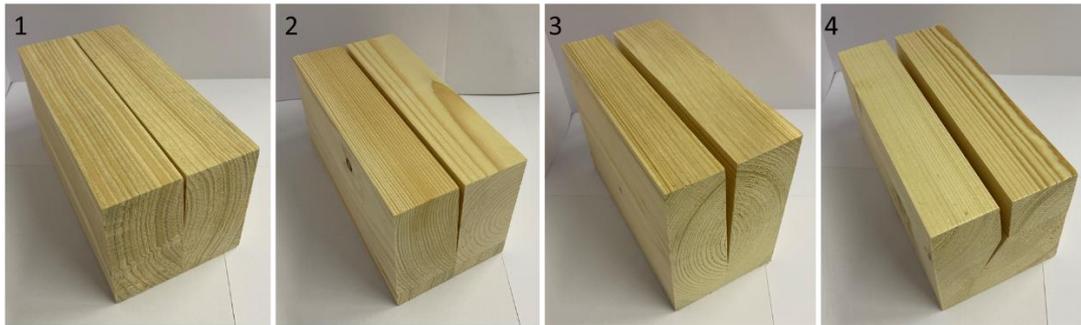


Abbildung 12: Prüfkörper mit den Risstypen 2/50 mm (1), 5/80 mm (2), 10/120 mm (3) und 7/70 mm mit abknickendem Riss (4)

5 Herausforderungen bei der Rissabdichtung durch Dichtmassen/-flüssigkeiten

Bei dem Versuch, Risse mit Dichtmassen luftdicht zu verfüllen, treten verschiedene Herausforderungen auf. Hierzu zählt explizit die Abdichtung der Rissspitze, da es in der Regel schwierig ist, Dichtmasse mit genügend Druck in diese Rissregion zu befördern. Je nach Ausrichtung und Format des Risses, Viskosität der Dichtmasse/-flüssigkeit und Art der verwendeten Verfüllweise ist eine Verfüllung der Rissspitze bis in die letzten Millimeter nur schwer realisierbar.

Die Abdichtung der auf 0 mm zulaufenden Rissspitzen stellt folgende Problematik dar. Eine Dichtmasse/-flüssigkeit fließt unter Druck immer den Weg des geringsten Widerstandes. Wird der Fließweg, wie in den Rissspitzen, enger, so erhöht sich der Widerstand für die Dichtmasse. Reicht ab einem bestimmten durch die Verengung des Risses entstehenden Widerstandes, der Druck nicht aus, so breitet sich die Dichtmasse/-flüssigkeit seitlich entlang des Risses aus und gelangt nicht bis in die erforderliche Tiefe. Daher stellt sich in Bezug auf mögliche Lösungsansätze die Frage, wie der Druck auf die Dichtmasse bis in die Rissspitze aufrechterhalten werden kann. Selbst die entstehende Kapillarkraft in der Rissspitze trägt nur in bestimmten Fällen zur Verfüllung bei. Bei dickflüssigen Dichtmassen ist das der zu geringen Viskosität zuzuschreiben, welche nicht zulässt, dass der Kapillareffekt genutzt werden kann. Gering viskose Dichtmassen/-flüssigkeiten können nur bei nach oben ausgerichteten Rissöffnungen eingesetzt werden, da sie sonst aufgrund der Schwerkraft wieder aus dem Riss herausfließen, bevor sie ausgehärtet sind. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Dickflüssigkeit bei den verwendeten Mitteln in der Sanierungspraxis notwendig um ein Nachlaufen der abdichtenden Masse zu vermeiden. Diese ermöglichen eine Verfüllung auch in horizontalen oder nach unten gerichteten Rissen.

Ein abknickender Riss, wie er im Prüfkörper 4 abgebildet ist, verstärkt diese Problematik, indem zusätzlich die Zugänglichkeit der Rissspitze abnimmt und somit ein ausreichender Druckaufbau auf die Dichtmasse erschwert wird. Die oben beschriebenen

Herausforderungen können die Wirksamkeit der Abdichtung beeinträchtigen und erfordern spezifische Lösungsansätze für eine erfolgreiche Versiegelung.

6 Lösungsansätze der Abdichtungsmethoden

In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die vier unterschiedlichen Lösungsansätze zur Abdichtung der Rissquerschnitte vorgestellt. Bis auf die Methode 1 (Injektionskanal) wurden die Lösungsansätze der Methoden in Zusammenarbeit mit dem PHI entwickelt.

6.1 Methode 1 (Injektionskanal)

Die Methode 1 beinhaltet die Behandlung von Rissen durch einen kontrollierten Injektionskanal, wie in Abbildung 13 dargestellt. Wie eingangs erwähnt, wurde diese vielversprechende Technik bereits in vorherigen Untersuchungen am PHI angewendet und untersucht⁵². Auch die Firma „SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG“ hat sich bereits mit dieser Methode und deren Anwendung auseinandergesetzt. So hat dieses Unternehmen einige Erklär-Videos der Anwendung dieser Methode online, welche im Rahmen dieser Untersuchungen hilfreich waren⁵³.

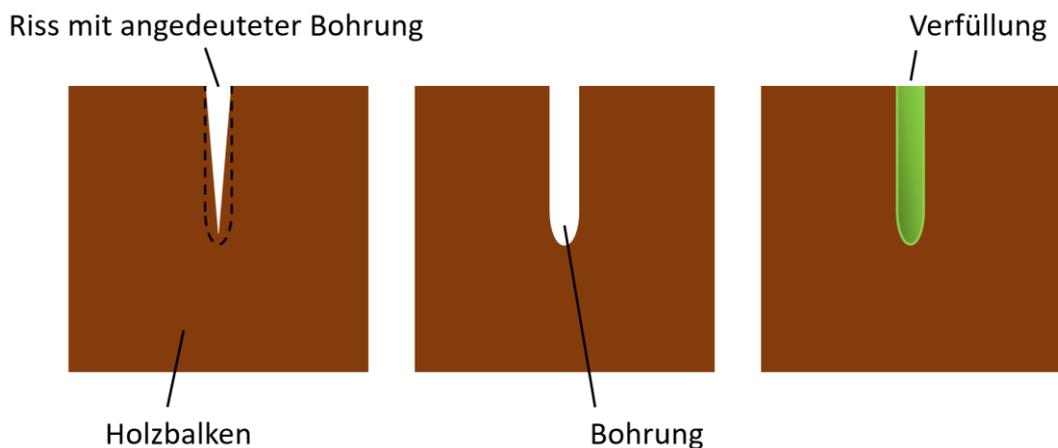


Abbildung 13: Schematische Schnittskizze des Lösungsansatzes von Methode 1 (Injektionskanal)

Hierbei wird der Riss zunächst vollständig senkrecht zur Balkenoberfläche ausgebohrt, um einen präzisen Injektionskanal zu schaffen, welche den kompletten Querschnitt des Risses inklusive der Risspitze erfasst. Somit wird die Risspitze eliminiert und eine bessere Zugänglichkeit dieses Punktes und weniger Widerstand für die

⁵² Peper, S./Bangert, A./Bastian, Z., 2014., S. 5-6

⁵³ IsoverGH, 2021.

Dichtmasse geschaffen. Ob diese Methode für den abknickenden Riss funktioniert, zeigt sich bei der Methodenanwendung. Es bleibt hierbei abzuwarten, ob der Bohrer dem abknickenden Riss beim Bohrvorgang folgt, oder ob der Injektionskanal sich nur bis zu dem Knick realisieren lässt. Sollte letzteres der Fall sein, so ist der Erfolg der Methode bei diesem Risstypen nur schwer abzuwägen.

6.2 Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)

Bei Methode 2 wird der Riss seitlich ausgeschäumt, um durch eine mittige Verfüllung mit Dichtmasse mehr Druck in die Rissspitze zu bekommen. Durch die seitliche Begrenzung des Dichtstoffflusses wird eine gezielte Druckentwicklung, die eine effektivere Abdichtung der Rissspitze, wie in Abbildung 14, ermöglichen soll.

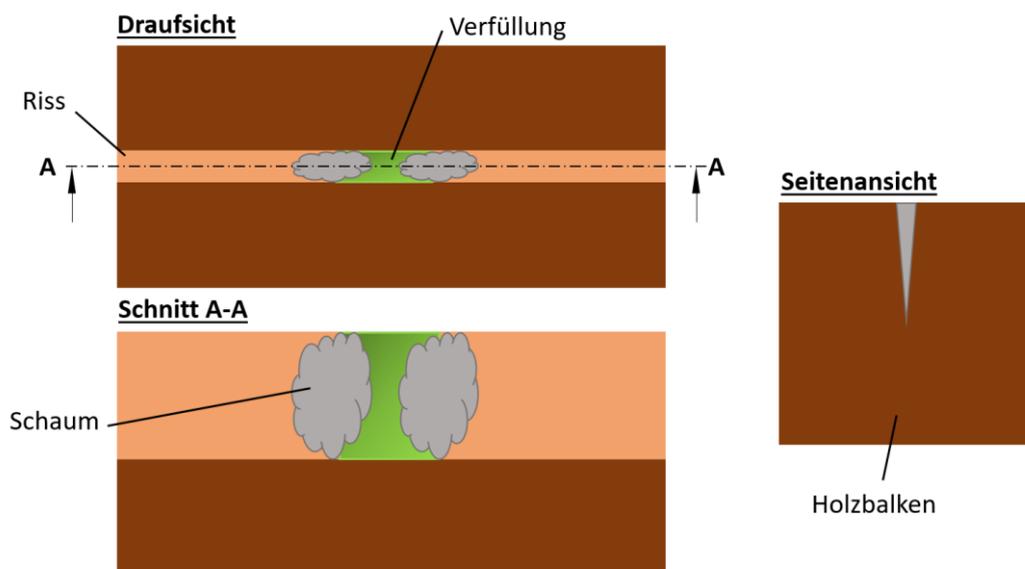


Abbildung 14: Schematische Skizze des Lösungsansatzes von Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)

6.3 Methode 3 (Injektion mit Klinge)

Eine spezielle Klinge wird tief in den für die Injektion schlecht erreichbaren Rissgrund eingeschlagen, um diese zu versiegeln. Durch die flache Schneide der Klinge soll ein weiteres Aufreißen des Risses in Faserrichtung, durch die einwirkende Kraft beim Einschlagen der Klinge, verhindert werden. Nachdem die Klinge eingeschlagen ist, wird der freibleibende Querschnitt von der Klinge bis zur Rissöffnung mit Dichtmasse verfüllt. Der Lösungsansatz wird in Abbildung 15 verdeutlicht. Auch bei dieser Methode bleibt, wie bei Methode 1 abzuwarten in welchem Maße sie bei dem abknickenden Riss angewendet werden kann.

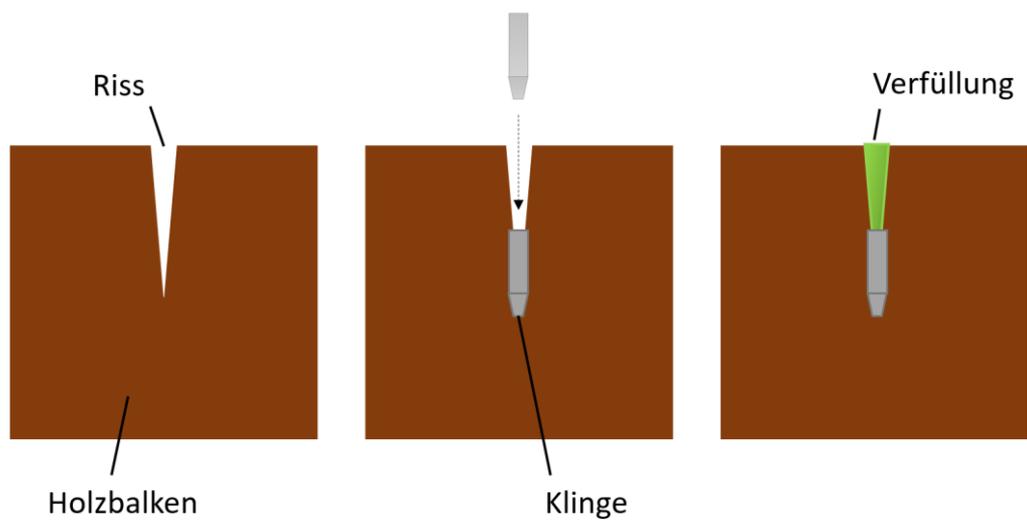


Abbildung 15: Schematische Schnittskizze des Lösungsansatzes von Methode 3 (Injektion mit Klinge)

6.4 Methode 4 (Injektionsdübel)

Analog zu Methode 1 wird zunächst eine Bohrung durchgeführt. Bei dieser Methode wird jedoch ein Injektionsdübel in die Bohrung eingesetzt. Der Einsatz des Dübels wird in Abbildung 16 gezeigt.

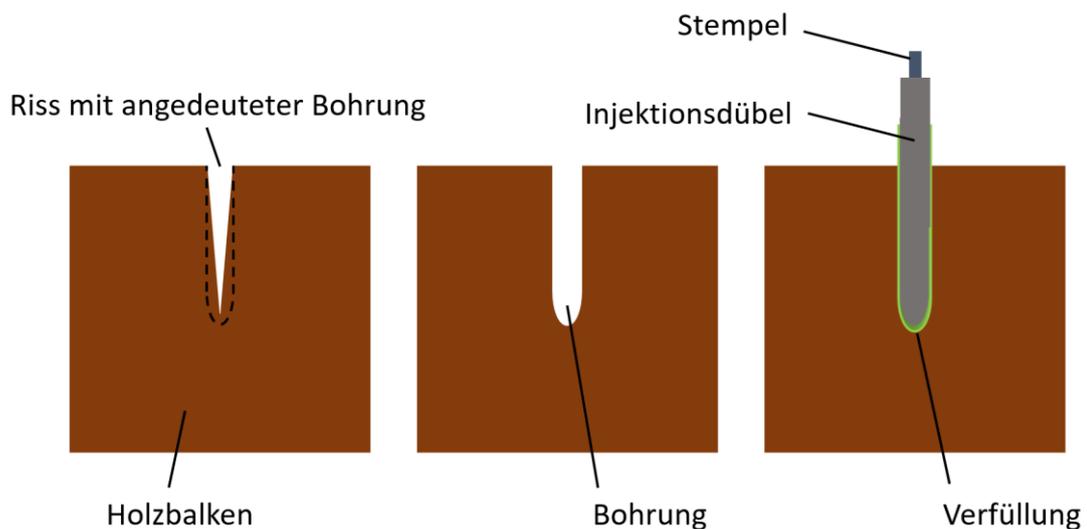


Abbildung 16: Schematische Schnittskizze des Lösungsansatzes von Methode 4 (Injektionsdübel)

Durch die Spritzfunktion des Dübels wird die Dichtmasse mithilfe eines Stempels unter hohem Druck in die Risspitze gespritzt. Ein seitlicher Kanal am Dübel, wie er in Abbildung 17 dargestellt ist, soll gleichzeitig die luftdichte Verbindung entlang des Dübels zum Holz bis hoch zur Bohrungsöffnung sicherstellen. Die Spritzfunktion des

Dübels am Bohrungsende ist eine vielversprechende Funktion, welche auch im abknickenden Riss zu einem erhöhten Druck auf die Dichtmasse und einer besseren Abdichtung führen sollte.

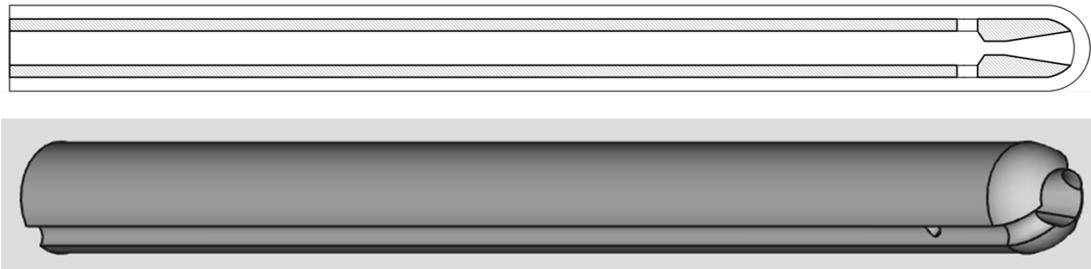


Abbildung 17: Schnitt- (oben) und 3D-Skizze (unten) des Injektionsdübels

6.5 Materialbeschreibung

In diesem Kapitel werden die verschiedenen verwendeten Materialien für die angewendeten Methoden beschrieben. Für alle Methoden wird die gleiche Dichtmasse, "ISOVER Vario DoubleFit +" verwendet, da diese bereits vom Hersteller für Zwecke dieser Art empfohlen wird und alle nötigen Anforderungen erfüllt. So stimmen bei der Mehrkomponenten-Klebe-Dichtmasse Dichtungsvermögen, Viskosität (kein „Nachlaufen“), Klebeverhalten an Holz, Metall sowie dem zur Abdichtung verwendeten Klebeband. Mit einer Aushärtungsgeschwindigkeit von etwa 2 mm/24h bei 23 °C und 50% rel. Luftfeuchtigkeit, ist auch diese völlig ausreichend⁵⁴.

Zusätzliche Materialien werden nur für bestimmte Methoden benötigt. Methode 2 (Injektion mit Begrenzung) verwendet neben der Dichtmasse den Schaum "foam adhesive for window sill TYTAN WINS", mit dem der Riss seitlich des angestrebten Injektionspunktes ausgeschäumt wird. Erfahrungsgemäß ist dieser Schaum nach 30 min genügend ausgehärtet, um den Fluss der Dichtmasse zu unterbinden. Dies wurde in Vorversuchen getestet. Für Methode 3 (Injektion mit Klinge) wird eine spezielle Klinge verwendet, nämlich die "VIGOR Ersatzklingen V6030-12". Diese wird, wie in Abbildung 18, vor der Verwendung mit einem Winkelschleifer nachbehandelt, um sie auf die benötigte Form anzupassen, wie in der Anwendungsbeschreibung weiter erläutert.

⁵⁴ SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG, 2024.

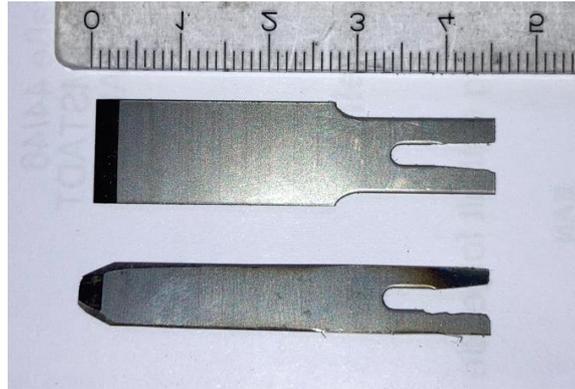


Abbildung 18: Unbearbeitete (oben) und bearbeitete (unten) Klinge zur Anwendung für Methode 3 (Injektion mit Klinge)

Methode 4 (Injektionsdübel) benötigt neben der Dichtmasse einen Spezialdübel, welcher mit einem 3D-Drucker am PHI gedruckt wird und aus PLA+ (modifiziertes Polylactic Acid) besteht. Zudem einen Stempel aus einem handelsüblichen Aluminiumstab mit einem Durchmesser von 5 mm. Als Material für den Stempel wurde aus pragmatischen Gründen Aluminium gewählt, da der Stempel mit der benötigten Maßhaltigkeit, um die Funktion zu gewährleisten, mit dem 3D-Drucker nicht hergestellt werden konnte. Grundsätzlich hat das Material des Dübels und des Stempels keine maßgebliche Auswirkung auf die Funktion, somit könnten diese auch aus Holz oder anderen geeigneten Materialien hergestellt werden. Wichtig ist hierbei ausschließlich, dass der Stempel sich passgenau bis zum Anschlag in den Dübel einführen lässt und die erforderlichen Kanäle des Dübels das vorgegebene Maß einhalten, um die Spritzfunktion zu gewährleisten.

6.6 Andichtung an die luftdichte Ebene

Das Andichten der abgedichteten Prüfkörper erfolgt durch die Verbindung zwischen den Holzbalken und der luftdichten Ebene unter dem Einsatz von Klebeband und Dichtmasse. Das Klebeband wird sorgfältig auf allen Seiten des Holzbalkens und der luftdichten Ebene angebracht. Dabei ist darauf zu achten, dass eine möglichst gleichmäßige Klebefläche sowohl am Balken als auch an der Ebene entsteht. Um die Verfüllung im Riss des Balkens zu integrieren muss das Klebeband auf dem abgedichteten Punkt positioniert sein und eine Verbindung herstellen. Dies ist schematisch in Abbildung 19 dargestellt.

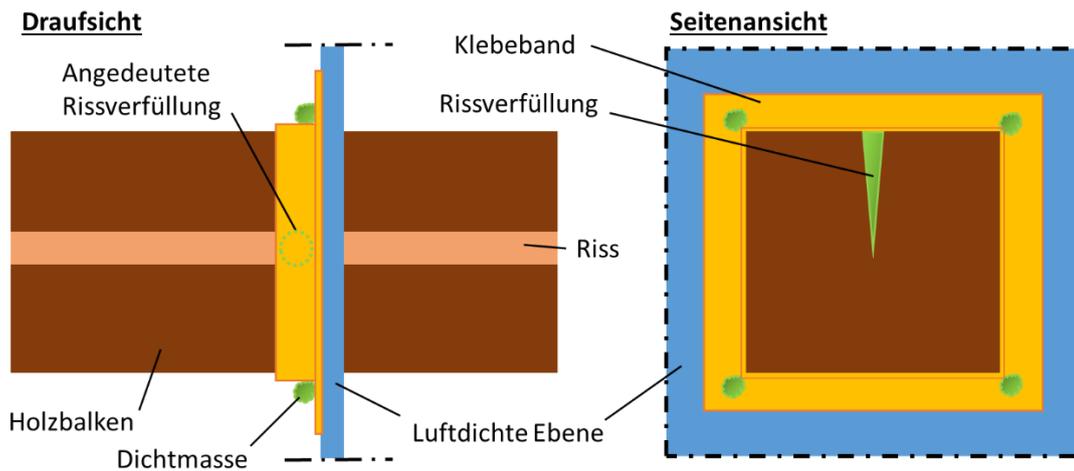


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Abdichtung der abgedichteten Holzbauteile an die luftdichte Ebene durch Klebeband und Dichtmasse

An den Ecken der Balken muss das Klebeband eingeschnitten werden, um die Anklebung am Balken durchführen zu können, wie in Abbildung 20 zu sehen. Aufgrund des Einschnitts an den Ecken des Klebebands können dort kleine offene undichte Punkte entstehen. Diese Punkte werden mit der Dichtmasse abgedichtet. Zusätzlich ist es wichtig, das Klebeband sowohl am Balken als auch an der Ebene gründlich anzudrücken, um eine stabile und zuverlässige Abdichtung zu gewährleisten.

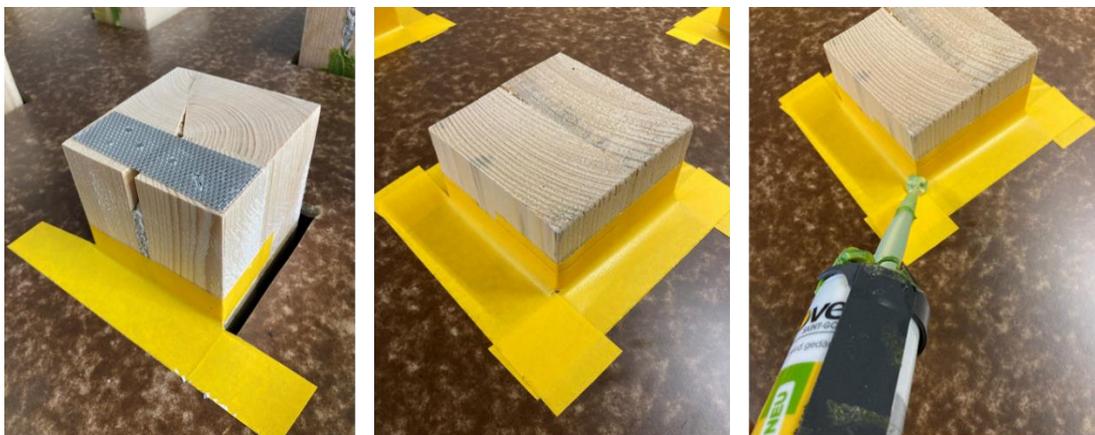


Abbildung 20: Abdichtung der abgedichteten Holzbauteile an die luftdichte Ebene durch Klebeband und Dichtmasse

6.7 Methodenanwendung

Im Prozess der Methodenanwendung werden bei allen Methoden im Rahmen Vorbereitung zur Messung zunächst einige Schritte einheitlich ausgeführt, welche ausschließlich an den Prüfkörpern angewendet werden und in der realen Sanierung keine Rolle spielen. Diese dienen hier ausschließlich der Schaffung realer Bedingungen und der Steigerung der Maßhaltigkeit der Risse.

Hierzu werden die Risse bei Bedarf durch Ausweitung oder Zusammenpressung so genau wie möglich auf die gewünschten Maße angepasst, während gleichzeitig die Balkenköpfe der Prüfkörper mithilfe von Aluplatten und Nägeln stabilisiert und arretiert werden. Diese Maßnahme ist nur bei den Prüfkörpern notwendig, die die Toleranzgrenze der erforderlichen Rissbreiten nach der Fertigung der Schreinerei noch um mehr als ± 1 mm über- oder unterschreitet. Außerdem werden die Oberflächen aller Prüfkörper, wie bereits erwähnt, mit einer groben Holzraspel sägerau gemacht. Die folgenden Schritte sind bei allen Methoden sowohl an den Prüfkörpern als auch an realen Rissen in Sanierungsfällen erforderlich.

Bei allen Methoden ist bei Verfüllungen mit der Dichtmasse unter Verwendung einer Spritzkartusche darauf zu achten, dass die Spritzenspitze zunächst so tief wie möglich im Riss angesetzt wird, um einen möglichst hohen Druck auf die Dichtmasse in der Risspitze zu erzeugen.

6.7.1 Methode 1 (Injektionskanal)

Zunächst wird der Riss bis zur Risspitze ausgebohrt, wobei die Verwendung von über den ganzen Durchmesser spitz zulaufenden Schneide, wie es bei Metall-Bohrern der Fall ist, empfohlen wird, um eine bessere Zentrierung der Bohrung im Riss zu gewährleisten. Holzbohrer sind wegen ihrer rechtwinklig angeschliffenen Schneiden für diesen Zweck ungeeignet. Nach dem Bohren wird die Bohrung mit einer Stahlbürste oder grobem Schleifpapier entgratet.

Der Durchmesser des Bohrers muss immer mindestens der Rissbreite und außerdem dem Durchmesser der Öffnung der Dichtmassen-Kartuschenspitze entsprechen. Dies ist notwendig um die gesamte Erfassung des Rissquerschnittes durch die Bohrung und die Einspritzung der Dichtmasse zu ermöglichen. Die hier verwendete Öffnung der Kartuschenspitze hat einen Außendurchmesser von 7mm.

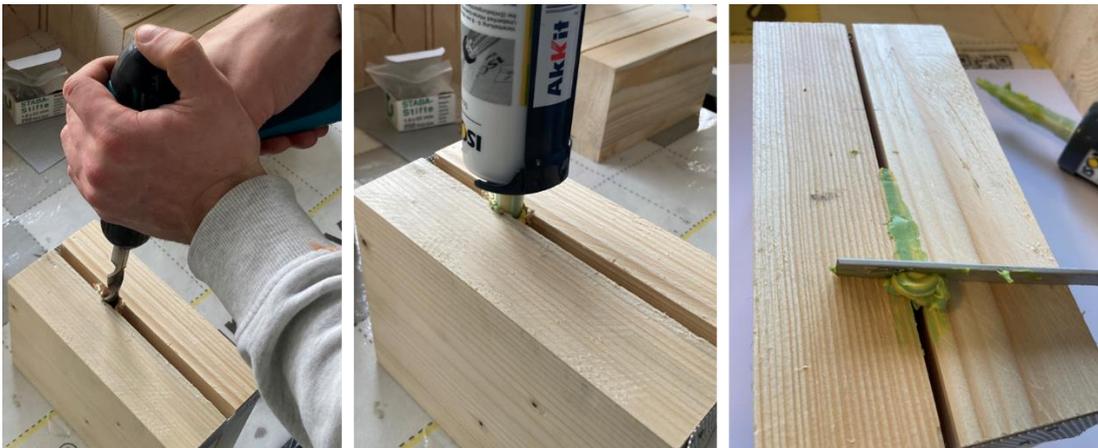


Abbildung 21: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 1 von links nach rechts

Die Bohrung wird, wie in Abbildung 21, mit Dichtmasse ausgefüllt, welche abschließend bündig mit der Bohrungsöffnung glatt gezogen wird, um im weiteren Prozess eine bessere Andichtung mit dem Klebeband zu gewährleisten.

Verwendete Bohrergrößen zur Versuchsvorbereitung der Prüfkörper:

- 2/50mm: Ø 7mm
- 5/80mm: Ø 7mm
- 10/120mm: Ø 13mm
- 7/70mm (abknickend): Ø 9mm

6.7.2 Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)

Als Erstes wird der Rissquerschnitt seitlich des vorgesehenen Injektionspunktes im Riss so umfassend wie möglich ausgeschäumt. Der Vorgang wird in Abbildung 22 dargestellt. Dabei ist strengstens darauf zu achten, dass ein Injektionskanal mit einer Breite von mindestens 1 cm entlang des Risses bis zur Risspitze am gewünschten Injektionspunkt frei von Schaum bleibt. Dazu muss berücksichtigt werden, dass der Schaum expandiert und sich somit schnell entlang des Risses ausbreitet. Aus diesem Grund darf die Schaumdüse während des Schäumens nicht zu nahe an den Injektionspunkt herangeführt werden, um einen Verschluss dieser Stelle zu vermeiden. Gerät Schaum in den für die Injektion vorgesehenen Querschnittsteil des Risses, so kann dies zum Versagen dieser Methode führen.



Abbildung 22: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 2 (Injektion mit Begrenzung) von links nach rechts

Nachdem der Schaum etwa 30 min angetrocknet ist, wird er bündig mit der Holzbalckenoberfläche mit einem Messer abgeschnitten. Anschließend wird der Injektionskanal mit Dichtmasse verfüllt und bündig mit der Bohrungsöffnung glatt gezogen.

6.7.3 Methode 3 (Injektion mit Klinge)

Eine Klinge mit Spezial-Einschlaghalterung wird, wie in Abbildung 23, bis in die Risspitze eingeschlagen. Dabei werden verschiedene Klingengrößen je nach Rissbreite

verwendet. Die Breite der in diesem Rahmen hergestellten Klingen ist aufgrund des Herstellungsprozesses und dem verwendeten Material auf 3 mm limitiert.

Verwendete Klingenmaße (Länge 45 mm):

- 2/50mm: 3 mm breit und angespitzt auf 1 mm
- 5/80mm: 5 mm breit und angespitzt auf 2 mm
- 10/120mm: 8 mm breit und angespitzt auf 3 mm
- 7/70mm (abknickend): 5 mm breit und angespitzt auf 2 mm

Der frei bleibende Rissquerschnitt zwischen Klinge und Rissöffnung wird dann mit Dichtmasse verfüllt und die Dichtmasse bündig mit der Holzbalkenoberfläche abgezogen.



Abbildung 23: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 3 (Injektion mit Klinge) von links nach rechts

6.7.4 Methode 4 (Injektionsdübel)

Der Riss wird mit einem Bohrer entsprechend dem Durchmesser des Spezialdübels (hier 12 mm) bis zur Rissspitze ausgebohrt. Auch hier wird wie bei Methode 1 die Verwendung von Metallbohrern empfohlen. Der 12 mm Dübel ist im Rahmen der Messungsvorbereitungen für alle Rissbreiten ausreichend. Sollten in der Praxis größere Rissbreiten auftreten, muss der Dübel in einer dementsprechend größeren Ausführung verwendet werden. Der Spezialdübel wird zunächst vollständig mit Dichtmasse gefüllt und in die Bohrung eingeführt, bzw. wenn nötig eingeschlagen.

Sitzt der Dübel vollständig in der Bohrung, so erfolgt das Einführen des Stempels in den Dübel bis zum Anschlag. Der seitliche Austritt von Dichtmasse zeigt die vollständige

dige Verfüllung an. Abschließend wird der Dübel bündig abgesägt oder abgeschlagen. Die hier beschriebene Methodenanwendung ist in Abbildung 24 zu sehen.



Abbildung 24: Die beschriebenen Arbeitsschritte zur Anwendung von Methode 4 (Injektionsdübel) von links nach rechts

7 Versuchsgrundlagen

Die allgemeine Durchführung der Messungen richtet sich, wie bereits einleitend erwähnt, nach den Richtlinien der DIN EN 12114. Im folgenden Abschnitt wird der genaue Ablauf dieser Messungen mit den vorgenommenen Anpassungen beschrieben. Die Messungen erfolgten an einem vom PHI konstruierten Messstand, der üblicherweise für Zertifizierungsmessungen eingesetzt wird.

7.1 Messkonzept nach DIN EN 12114

Die Norm DIN EN 12114 legt das Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen fest. Sie ist darauf ausgerichtet, die Luftdurchlässigkeit als eine der grundlegenden Eigenschaften der Gebäudehülle zu überprüfen und beschreibt Bestandteile des Prüfverfahrens wie Prüfeinrichtung, Prüfverfahren und Darstellung der Prüfergebnisse.⁵⁵

Das Prinzip hierbei ist die Erzeugung unterschiedlicher Druckstufen, sowohl Über- als auch Unterdruck, auf den zu prüfenden Probekörper. Dabei wird der Luftvolumenstrom durch den Probekörper bei jeder Druckstufe gemessen und die Messergebnisse werden entsprechend auf Referenzbedingungen angepasst.⁵⁶

Gemäß der Norm besteht die Prüfeinrichtung aus verschiedenen Komponenten (siehe Abbildung 25). Dazu gehören ein Prüfstand, der den Probekörper hält, sowie eine Vorrichtung zur Erzeugung einstellbarer Druckdifferenzen. Außerdem ist eine Einrichtung zur schnellen und definierten Druckänderungen erforderlich, um Druck-

⁵⁵ DIN EN 12114, 2000.

⁵⁶ Ebd.

stöße erzeugen zu können. Zur Messung des Luftvolumenstroms wird ein Gerät verwendet, das unter Referenzbedingungen kalibriert ist und eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ aufweist. Ebenso steht ein Manometer, ebenfalls mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$, zur Messung der angelegten Druckdifferenz zur Verfügung. Die Abdichtung sämtlicher Fugen des Probekörpers erfolgt entweder durch Klebeband oder eine luftdichte Folie, die den Probekörper vollständig bedeckt.⁵⁷

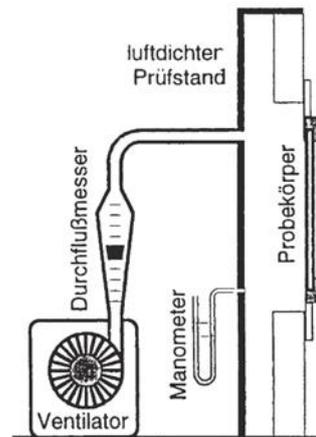


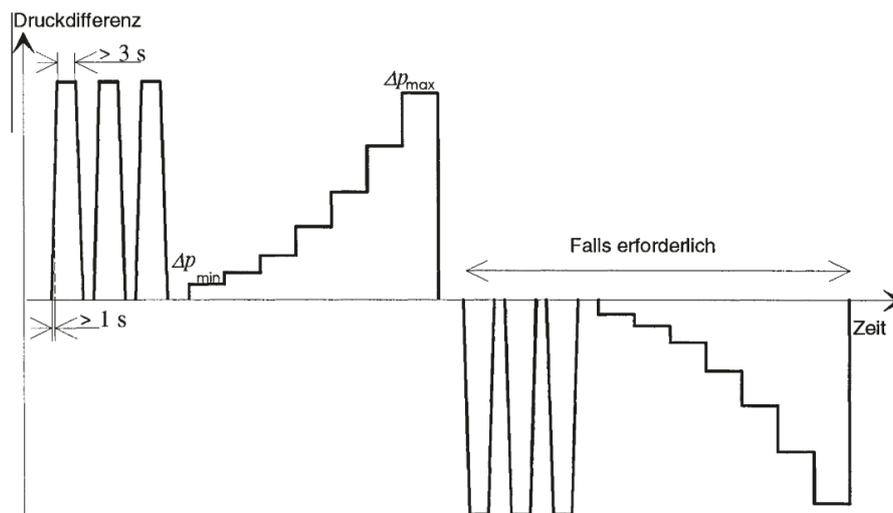
Abbildung 25: Vereinfachte Darstellung der erforderlichen Prüfeinrichtung nach der DIN EN 12114⁵⁸

Zur Messung werden Luftdruckdifferenzen gemäß den entsprechenden Produktspezifikationen schrittweise, wie in Abbildung 26, eingestellt. Die Messung der kleinsten Druckdifferenz muss mit einer Unsicherheit von 5% möglich sein. Bei jeder Stufe werden der Luftvolumenstrom und der statische Druck gemessen und protokolliert. Die Dauer jeder Druckstufe wird so gewählt, dass sich der Luftdruck im Prüfstand vor der Messung des Luftvolumenstroms ausreichend stabilisiert hat.⁵⁹

⁵⁷ DIN EN 12114, 2000.

⁵⁸ Ebd.

⁵⁹ Ebd.

Abbildung 26: Zeitabhängige Druckdifferenz im Verlauf der Messung⁶⁰

7.2 Verwendete Messtechnik

Für die Messung des Volumenstroms wurde hier ein LaminarFlow Element von TetraTec[®] Instruments verwendet. Der Differenzdruck wurde mithilfe eines Automated Performance Testing Systems (APT) des Herstellers The Energy Conservatory gemessen. Genaue Angaben wie zu Messgenauigkeiten und Messbereichen sind Tabelle 6 zu entnehmen.⁶¹

Tabelle 6: Übersicht über die verwendeten Messgeräte⁶²

Name	Gerätetyp	Serien-Nr.	Messbereich	Messgenauigkeit
LaminarMasterFlow-System	LMF	PH796	0-85 l/min	2% im Bereich von 8-80 l/min
TEC Automated Performance Testing System	APT	0072 4	0-2000 Pa	1 %

7.3 Allgemeiner Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht zu großen Teilen aus einem Messstand, der gemäß den Anforderungen der DIN EN 12114 am Passivhaus Institut entworfen und hergestellt wurde, um Messungen für Zertifizierungszwecke durchzuführen. Dieser Messstand (Abbildung 27) integriert bereits erläuterte Messtechniken und ermöglicht die Erzeugung von Über- und Unterdruck in der Messstandswanne durch einen Verdichter, der

⁶⁰ DIN EN 12114, 2000.

⁶¹ Peper, S., 2023.

⁶² Ebd.

durch einen Frequenzumrichter angesteuert wird. Etwaige vom Verdichter induzierte Schwingungen werden durch einen Druckbehälter ausgeglichen.



Abbildung 27: Messstand am PHI mit eingespannter OSB-Platte mit Aussparungen für den Einsatz der Prüfkörper

Ein abnehmbarer und verschraubbarer Metallrahmen, der mit flachen Schaumstoffdichtungen ausgestattet ist, ermöglicht das luftdichte Einspannen von Platten und Folienbahnen. Mit Hilfe dieses Rahmens wird eine luftdicht versiegelte Holzwerkstoffplatte eingesetzt, die speziell mit Aussparungen für die Prüfkörper versehen ist. Dabei wird darauf geachtet, dass zwischen der Oberfläche der Prüfkörper und der Platte ein Spalt von 1 cm verbleibt, um eine reale Einbausituation zu simulieren. Da die Werkstoffplatte nur auf der Oberfläche mit einer luftdichten Schicht versiegelt ist, ist es notwendig die Kanten der Platte mit handelsüblichem luftdichtem Klebeband abzukleben, um eine horizontale Durchströmung der Platte und somit Leckagen zu vermeiden. Die an den Kanten abgedichtete Werkstoffplatte wurde im Rahmen einer am PHI durchgeführten Luftdichtheits-Zertifizierung im Auftrag der Firma FINSA als luftdicht befunden⁶³.

Die Prüfkörper werden in vier Reihen angeordnet, wobei jede Reihe drei Prüfkörper desselben Typs umfasst. Die Prüfkörper werden so platziert, dass der verfüllte Bereich im Riss an die Platte angedichtet werden kann.

⁶³ Peper, S., 2019.



Abbildung 28: Messwanne (links), in der benötigten Höhe platzierte Prüfkörper (mitte) und allgemeiner Messaufbau mit angedichteten Prüfkörpern (rechts)

7.4 Allgemeine Durchführung

Zunächst wird die Holzwerkstoffplatte mit den angedichteten Prüfkörpern, an denen die entsprechende zu messende Abdichtungsmethode angewendet wurde, in den Messstand eingesetzt. Anschließend erfolgt die Nullmessung gemäß Abbildung 29. Hierbei wird ein luftdichter Deckel auf den Metallrahmen gespannt, um die Leckage des Messstandes zu erfassen.



Abbildung 29: Messstand mit aufgespanntem luftdichten Deckel zur Messung der Messstandsleckage

Der Messvorgang beginnt mit der Einstellung eines Unterdrucks von 50 Pa in der Messwanne. Sobald sich der Druck auf $50 \text{ Pa} \pm 1 \text{ Pa}$ eingestellt hat, wird die Nullmessung für die Leckage des Messstandes gestartet. Daraufhin werden die Druckstufen 50 Pa, 100 Pa, 150 Pa, 200 Pa, 250 Pa, 300 Pa und 350 Pa jeweils zuerst im Unter-

und anschließend im Überdruck angefahren und die dabei entstehenden Volumenströme gemessen. Jede Druckstufe wird jeweils 2 ½ Minuten lang angefahren, um ausreichend Messwerte für die jeweilige Druckstufe erfassen zu können.

Zur Erfassung der Druckwerte wird die Messtechnik der BlowerDoor-Messung in Verbindung mit dem APT-Durchflussmessgerät verwendet. Die Software "Teclog" von TEC dient zur Aufzeichnung der erreichten Druckstufen zusammen mit dem genauen Zeitpunkt der Messung. Zur Speicherung der gemessenen Volumenströme kommt eine spezielle Excel-Datei des PHI zum Einsatz.

Nach der Nullmessung erfolgt die Messung aller Prüfkörper einer Methode. Dazu werden die Reihen mit den anderen Prüfkörpertypen mit Dichtdeckeln abgedeckt. Der gleiche Messablauf ist der gleiche wie zuvor, jedoch ohne den Deckel auf dem Messstand, angewendet.

Während der Überdruckmessungen werden Auffälligkeiten, wie spürbare Leckagen an den Rissen, unter Verwendung eines Anemometers (AIRFLOW™ TA5), wie in Abbildung 30 gemessen und dokumentiert. Dies dient dem späteren Abgleich mit den Messwerten in der Auswertung und der Feststellung kausaler Zusammenhänge.



Abbildung 30: Dokumentation einer spürbaren Leckage mit Hilfe des Anemometers (AIRFLOW™ TA5)

Über- und Unterdruckmessung werden an jeder Reihe eines Prüfkörpertyps durchgeführt, während die anderen Reihen bzw. Prüfkörpertypen mit Dichtdeckeln abgedeckt sind. Dies ermöglicht die separierte Betrachtung der Funktionalität der Methoden je Prüfkörpertyp (siehe Abbildung 31).

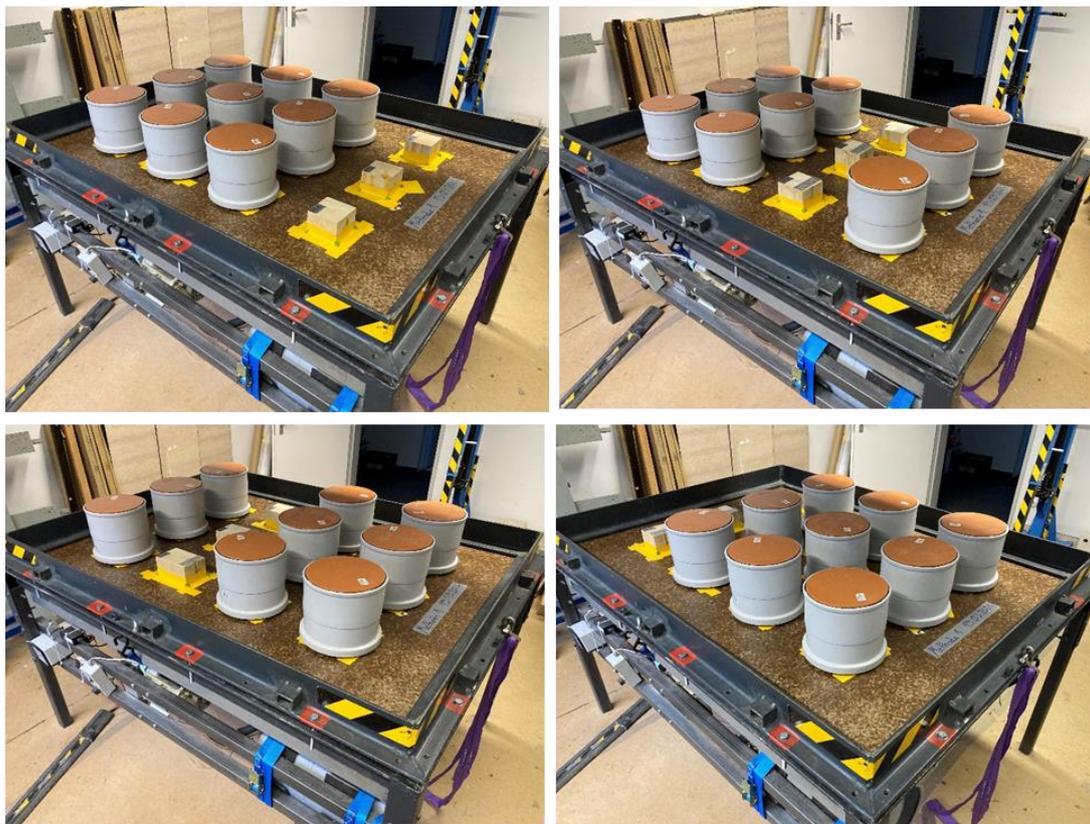


Abbildung 31: Messungen einzelner Prüfkörpertypen durch die Abdeckung der anderen Prüfkörper-Reihen mit Dichtdeckeln

8 Auswertung der Ergebnisse

Nach Abschluss der Messungen liegen sowohl eine Teclog-Textdatei mit den gemessenen Druckwerten als auch eine Excel-Datei mit den Volumenstromdaten vor. Diese Daten werden zur weiteren Analyse in einer vorgefertigten Excel-Vorlage des PHI ausgewertet. Hier werden die Mittelwerte der Volumenströme aus den Über- und Unterdruckmessungen jeder der sieben Druckstufen gebildet. Die Volumenströme, welche in den Ergebnistabellen den Druckwerten der jeweiligen Druckstufen zugeordnet sind, werden zur besseren Vergleichbarkeit auf den genauen angestrebten Druckwert interpoliert. Eine Übersicht der gemessenen und berechneten Werte ist in Anhang 5 beigefügt.

Die gemessene Leckage des Messstandes wird anschließend von dem gemessenen Gesamtvolumenstrom bei den unterschiedlichen Druckstufen abgezogen und es ergeben sich die Netto-Leckagen in m^3/h . Um einen Bezug der Messwerte auf die Balkenumfänge zu schaffen, wird die Netto-Leckage auf diese bezogen und es ergeben sich die längenbezogenen Leckagevolumenströme in $\text{m}^3/(\text{hm})$. Hierzu wurden immer

die Umfänge der gemessenen Prüfkörper summiert und in die Berechnung einbezogen. Somit ist eine Einstufung der Ergebnisse in die genannten PHI Zertifizierungs-klassen für Durchführungen möglich. Die Messung aller Prüfkörper einer Methode bildet hier den Mittelwert der Leckagen, welche nach Anwendung einer Abdichtungsmethode verbleiben. Anhand dieser längenbezogenen Leckagevolumenströme lässt sich die Funktionalität der einzelnen Methoden vergleichen. Die maßgeblichen längenbezogenen Leckagevolumenströme sind hierbei die bei 50 Pa gemessenen.

Da die verwendete Messtechnik zwei mögliche Messfehler zulässt, müssen diese bei den Messergebnissen berücksichtigt werden. Die Volumenstrommessung mittels eines Volumenstromelements (Laminarflow) weist eine Messungenauigkeit f_1 von 2 % auf, während das APT-Durchflussmessgerät mit einem Fehler f_2 von 1 % behaftet ist. Der resultierende Messfehler wird berechnet und für alle Messungen einer Messreihe der maximale Fehlerwert berücksichtigt. Die Fehlerberechnung erfolgt mit der Formel 6 mit der vereinfachten Fehlerrechnung nach Gauß. Für die in den Tabellen der Auswertung dargestellten Messwerte ist für mehrere Messwerte immer der jeweilig maximale Messfehler angegeben.

$$\text{Formel 6: } \text{Messfehler} = \pm\sqrt{(f_1^2 + f_2^2)}$$

Außerdem ist zu beachten, dass die Deckel zur Abdeckung der einzelnen Prüfkörperreihen eine nicht zu vernachlässigbare Undichtheit aufweisen. Diese lässt sich durch die Differenz der absoluten Gesamtvolumenströme der Messungen aller Prüfkörper gemeinsam und den aufsummierten absoluten Volumenströmen der Messungen der einzelnen Messreihen berechnen. So tritt, wie Tabelle 7 zu entnehmen, ein Maximaler Anteil der Deckelleckage bei der Messung der einzelnen Prüfkörperreihen von der angewendeten Methode 1 von 59% auf.

Tabelle 7: Anteile der Deckelleckagen an den absoluten Volumenströmen der Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen

		Methode 1 (Injektionskanal)	Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)	Methode 3 (Injektion mit Klinge)	Methode 4 (Injektionsdübel)
Messwert Prüfkörper (gemeinsam)		0,64	4,03	4,44	1,23
Σ Messwerte Prüfkörperreihen 1-4	[m ³ /h]	1,57	4,90	7,01	1,75
Leckage Deckel	@ 50 Pa	0,92	0,87	2,57	0,53
Anteil Deckelleckage		59%	18%	37%	30%

Aufgrund des hohen Anteils und der Unterschiede der Deckelleckagen bei den angewendeten Methoden im Zuge der Messungen ist ein realistischer Vergleich zwischen den einzelnen Prüfkörperreihen dieser Messungen nicht möglich. Die Messungen können jedoch mit den dokumentierten Beobachtungen während den Messungen abgeglichen werden und somit Hinweise auf mögliche Stärken und Schwächen der einzelnen Abdichtungsmethoden in Bezug auf die verschiedenen Risstypen geben.

Hierzu werden nur die absolut gemessenen Volumenströme der unterschiedlichen Prüfkörperreihen der jeweiligen Methoden in m^3/h angegeben.

8.1 Methode 1 (Injektionskanal)

Die Methode 1 erzielt, wie Tabelle 8 zu entnehmen, einen längenbezogenen Leckagevolumenstrom von $0,12 \text{ m}^3/(\text{h m})$ bei einem Druck von 50 Pa und erreicht somit die PHI Luftdichtheitsklasse A.

Tabelle 8: Messergebnisse der gemeinsam gemessenen Gesamtleckagevolumenströme aller Prüfkörperreihen der Messungen unter Anwendung der Methode 1 mit Einstufung in die entsprechende PHI Luftdichtheitsklasse

Druckstufen	Pa	50	100	150	200	250	300	350
Volumenstrom Gesamt	m^3/h	0,69	1,22	1,57	1,88	2,16	2,42	2,66
Leckage des Messtandes	m^3/h	0,05	0,18	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25
Leckage netto	m^3/h	0,64	1,03	1,36	1,65	1,92	2,18	2,42
Längenbezogener Leckagevolumenstrom	$\text{m}^3/(\text{h m})$	0,12	0,20	0,26	0,32	0,37	0,42	0,47

Q50 (PHI - Bewertung) **0,12** $\text{m}^3/(\text{h m})$ Messfehler $\pm 0,003 \text{ m}^3/(\text{h m})$

ergibt Luftdichtheitsklasse nach PHI

A

Während des Messvorgangs sind spürbare Leckagen nur an zwei der drei Prüfkörper 4 (abknickender Riss) in der Region der Risspitze festzustellen. Diese Beobachtung deckt sich mit den gemessenen absoluten Werten aus Tabelle 9. Hier ist eine klare Differenz zwischen den Prüfkörpern 1-3 zum Prüfkörper 4 erkennbar.

Tabelle 9: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 1

Prüfkörper	Methode 1 (Injektionskanal)
Nr.	m^3/h @ 50 Pa
1 (2/50 mm)	0,32
2 (5/80 mm)	0,34
3 (10/120 mm)	0,27
4 (7/70 mm abknickend)	0,63
Messfehler (\pm)	0,018

Die sichtbare Leckage an einem der Prüfkörper 4 ist in Abbildung 32 dokumentiert. Es ist klar erkennbar, dass die Dichtmasse nach dem Knick im Riss nicht weiter in den Knick eingedrungen ist und die Risspitze dadurch unverfüllt blieb.



Abbildung 32: Aufnahmen der sichtbaren Leckage in dem Prüfkörper 4 (rechts 7/70 mm abknickend) unter Anwendung der Methode 1 (Injektionskanal)

8.2 Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)

Die Methode 2 erzielt, wie Tabelle 10 zu entnehmen, einen längenbezogenen Leckagevolumenstrom von $0,78 \text{ m}^3/\text{hm}$ bei einem Druck von 50 Pa und erreicht somit die PHI Luftdichtheitsklasse C.

Tabelle 10: Messergebnisse der gemeinsam gemessenen Gesamtleckagevolumenströme aller Prüfkörperreihen der Messungen unter Anwendung der Methode 2 mit Einstufung in die entsprechende PHI Luftdichtheitsklasse

Druckstufen	Pa	50	100	150	200	250	300	350
Volumenstrom Gesamt	m^3/h	4,08	6,42	8,25	9,86	11,32	12,68	13,95
Leckage des Messtandes	m^3/h	0,04	0,17	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24
Leckage netto	m^3/h	4,03	6,25	8,07	9,68	11,15	12,51	13,79
Längenbezogener Leckagevolumenstrom	$\text{m}^3/(\text{h m})$	0,78	1,21	1,56	1,88	2,16	2,42	2,67

Q50 (PHI - Bewertung) **0,78** $\text{m}^3/(\text{h m})$ Messfehler $\pm 0,018 \text{ m}^3/(\text{h m})$

ergibt Luftdichtheitsklasse nach PHI

C

Im Laufe des Messvorgangs sind spürbare Leckagen an allen Prüfkörperreihen festzustellen. Die gemessenen absoluten Werte aus Tabelle 11 weisen jedoch auf dreimal größere Leckagevolumenströme bei den Prüfkörperreihen 1 und 2 hin, als bei den Reihen 3 und 4. Außerdem ist auffällig, dass die Leckagen der Prüfkörperreihen 1 und 2 sich, genau wie die der Reihen 3 und 4, sehr ähneln.

Tabelle 11: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 2

Prüfkörper	Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)
Nr.	m ³ /h @ 50 Pa
1 (2/50 mm)	1,84
2 (5/80 mm)	1,84
3 (10/120 mm)	0,60
4 (7/70 mm abknickend)	0,62
Messfehler (±)	0,045

Da diese Methode an dem Prüfkörper 1 nicht anwendbar ist, ist diese Leckage eindeutig auf den nicht verfüllten Riss zurückzuführen. Die sichtbaren Leckagen an den anderen Prüfkörpern sind in Abbildung 33 zu erkennen. Hierbei ist auffällig, dass die Verfüllung nicht in die Risspitzen gelangt ist.

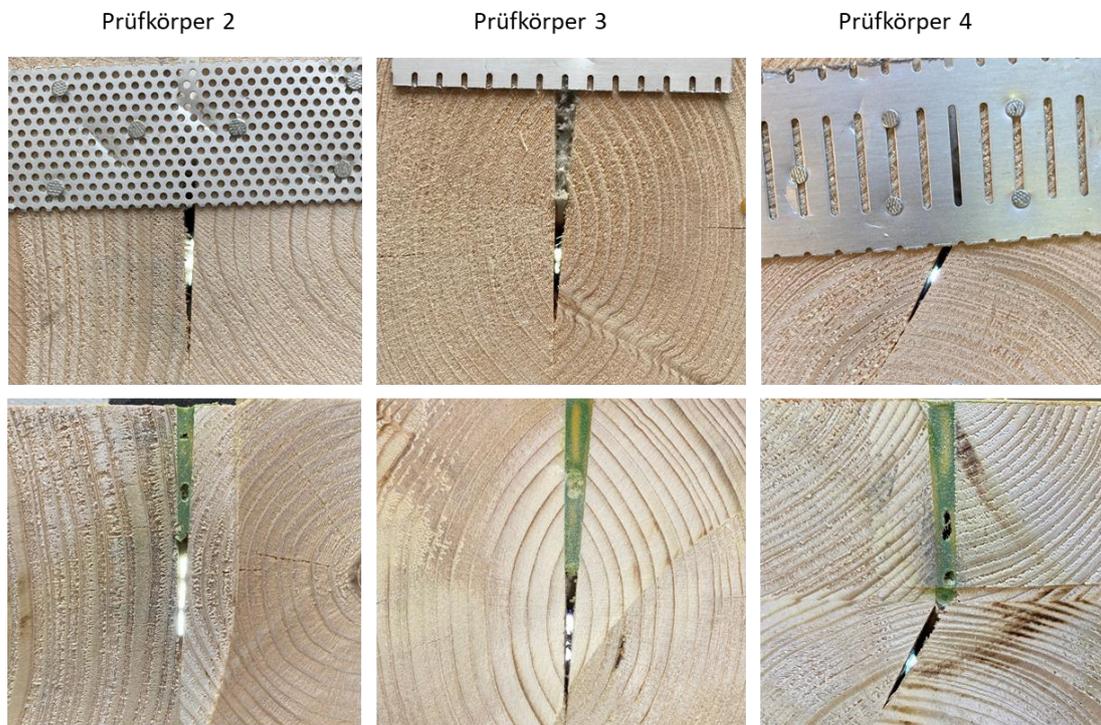


Abbildung 33: Aufnahmen der sichtbaren Leckagen in den Prüfkörpern 2 (5/80 mm Riss), 3 (10/120 mm Riss) und 4 (7/70 mm abknickender Riss) unter Anwendung der Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)

8.3 Methode 3 (Injektion mit Klinge)

Die Methode 3 erzielt, wie Tabelle 12 zu entnehmen, einen längenbezogenen Leckagevolumenstrom von 0,86 m³/hm bei einem Druck von 50 Pa und erreicht somit keine der PHI Luftdichtheitsklassen.

Tabelle 12: Messergebnisse der gemeinsam gemessenen Gesamtleckagevolumenströme aller Prüfkörperreihen der Messungen unter Anwendung der Methode 3 mit Einstufung in die entsprechende PHI Luftdichtheitsklasse

Druckstufen	Pa	50	100	150	200	250	300	350
Volumenstrom Gesamt	m ³ /h	4,49	6,55	8,06	9,34	10,47	11,50	12,45
Leckage des Messtandes	m ³ /h	0,05	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24
Leckage netto	m ³ /h	4,44	6,37	7,87	9,14	10,27	11,29	12,23
Längenbezogener Leckagevolumenstrom	m ³ /(h m)	0,86	1,23	1,52	1,77	1,99	2,19	2,37

Q50 (PHI - Bewertung) **0,86** m³/(h m) Messfehler ± 0,02 m³/(hm)

ergibt Luftdichtheitsklasse nach PHI **keine**

Auffällig in diesem Messvorgang sind spürbare Leckagen an zwei der drei Prüfkörper in Prüfkörperreihe 2 und in jeweils allen Prüfkörpern der Reihen 3 und 4. Hingegen sind an der Prüfkörperreihe 1 keine Leckagen festzustellen. Die Leckagen werden mit dem Anemometer an den Prüfkörpern 3 sowohl jeweils hauptsächlich an der Andichtung des Klebebandes zur Verfüllung, mittig des Risses und an der Rissspitze erfasst. Während bei den Prüfkörperreihen 2 und 4 eher starke Leckagen mittig der Risse bis hin zur Rissspitze erfasst werden. Die Messwerte der Tabelle 13 lassen auch diese Beobachtungen plausibel erscheinen.

Tabelle 13: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 3

Prüfkörper	Methode 3 (Injektion mit Klinge)
Nr.	m ³ /h @ 50 Pa
1 (2/50 mm)	0,84
2 (5/80 mm)	1,19
3 (10/120 mm)	1,48
4 (7/70 mm abknickend)	3,50
Messfehler (±)	0,082

Die Leckagen an den Prüfkörpern 3 und 4 sind in Abbildung 34 sichtbar und zeigen den unverfüllten Übergang von der Dichtmasse zu der Klinge, sowie bei Prüfkörper 4 die freibleibende Abknickung des Risses auf.



Abbildung 34: Aufnahmen der sichtbaren Leckagen in dem Prüfkörper 3 (links 10/120 mm Riss) und 4 (rechts 7/70 mm abknickender Riss) unter Anwendung der Methode 3 (Injektion mit Klinge)

8.4 Methode 4 (Injektionsdübel)

Die Methode 4 erzielt, wie Tabelle 14 zu entnehmen, einen längenbezogenen Leckagevolumenstrom von $0,24 \text{ m}^3/(\text{h m})$ bei einem Druck von 50 Pa und erreicht somit die PHI Luftdichtheitsklasse A.

Tabelle 14: Messergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa der Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen bei Methode 4

Druckstufen	Pa	50	100	150	200	250	300	350
Volumenstrom Gesamt	m^3/h	1,27	2,05	2,60	3,07	3,49	3,88	4,24
Leckage des Messtandes	m^3/h	0,06	0,19	0,21	0,23	0,24	0,25	0,27
Leckage netto	m^3/h	1,23	1,87	2,39	2,85	3,26	3,64	4,00
Längenbezogener Leckagevolumenstrom	$\text{m}^3/(\text{h m})$	0,24	0,36	0,46	0,55	0,63	0,71	0,78

Q50 (PHI - Bewertung) **0,24** $\text{m}^3/(\text{h m})$ Messfehler $\pm 0,006 \text{ m}^3/(\text{h m})$

ergibt Luftdichtheitsklasse nach PHI

A

Während der Messung sind hier keine spürbaren Leckagen an den Prüfkörperreihen 1 und 2 festzustellen. An den Prüfkörpern 3 sind deutliche Leckagen in der Region der Rissöffnung am Übergang zur Andichtung zu erfassen. Die Prüfkörperreihe 4 weist bei 3 der 4 Prüfkörper an der Rissöffnung keine spürbaren Leckagen auf. Die in Tabelle 15 aufgeführten Werte weisen Ähnlichkeiten zu den beschriebenen Beobachtungen auf.

Tabelle 15: Ergebnisse der absoluten Leckagevolumenströme bei 50 Pa aus den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen mit Methode 4

Prüfkörper	Methode 4 (Injektionsdübel)
Nr.	m ³ /h @ 50 Pa
1 (2/50 mm)	0,27
2 (5/80 mm)	0,17
3 (10/120 mm)	0,94
4 (7/70 mm abknickend)	0,37
Messfehler (±)	0,025

Aufgrund der Größe des Risses in Prüfkörper 3 (10/120 mm) liegt hier offensichtlich ein systematisches Problem bei der Anwendung des Injektionsdübels vor. Dieses besteht darin, dass die Menge der Dichtmasse im Dübel nicht ausreicht um die seitlichen Kanäle des Dübels bis hoch zur Rissöffnung zu verfüllen. Dies führt zu einer Leckage. In Abbildung 35 ist der Unterschied der Funktionalität des Dübels an dem Prüfkörper 1 (2/50 mm Riss) und dem Prüfkörper 4 (10/120 mm Riss) deutlich sichtbar. Während die Dichtmasse in der Abbildung links aus dem seitlichen Kanal herausquillt und dieser somit verfüllt ist, bleibt dieser in der Abbildung rechts sichtbar unverfüllt.



Abbildung 35: Methode 4 (Injektionsdübel) mit komplett eingeführtem Stempel mit Austritt der Dichtmasse aus dem seitlichen Kanals des Dübels in Prüfkörper 1 (links 2/50 mm Riss) und ohne Austritt der Dichtmasse in Prüfkörper 3 (rechts 10/120 mm Riss)

Die erfolgreiche Verfüllung einer der Risse in Prüfkörper 4 (7/70 mm abknickend) durch den Injektionsdübel ist in Abbildung 36 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass diese Methode den abknickenden Riss bis in die Spitze verfüllt hat und auch die seitlichen Kanäle des Dübels abgedichtet sind.



Abbildung 36: Freigesägter Querschnitt der Angewendeten Methode 4 (Injektionsdübel) in Prüfkörper 4 (7/70 mm abknickender Riss)

8.5 Methodenvergleich/ Diskussion der Ergebnisse

Die bei einem Druck von 50 Pa gemeinsam gemessenen längenbezogenen Leckagewerte aller Prüfkörper werden hier im Hinblick auf die Anwendung der unterschiedlichen Abdichtungsmethoden verglichen. Im Gegensatz zu den Messungen der einzelnen Prüfkörperreihen liefern diese Ergebnisse valide und vergleichbare Werte. Abbildung 37 zeigt den Vergleich der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Messfehler und stellt die Grenzwerte der PHI Klassen dar. Die Ergebnisse dieser Messungen sind ergänzend als Grafiken in den Anhängen 1-4 aufgeführt. Methode 1 (Injektionskanal) erzielt den besten Wert von 0,12 m³/hm. Mit 0,24 m³/hm schneidet Methode 4 (Injektionsdübel) ebenfalls gut ab. Für Methode 2 (Injektion mit Begrenzung) wird ein Wert von 0,78 m³/hm gemessen. Auch nach Berücksichtigung der Toleranz bleibt diese Methode im Grenzbereich der PHI Klasse C. Methode 3 (Injektion mit Klinge) erreicht mit 0,86 m³/hm einen etwas schlechteren Wert als Methode 2 und liegt damit im kritischen Bereich.

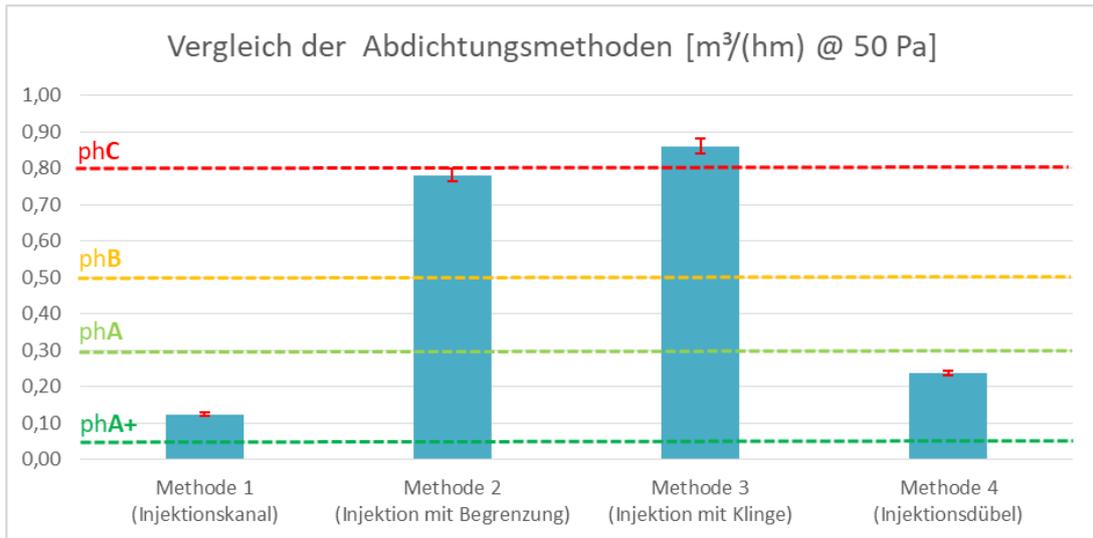


Abbildung 37: Vergleich der längenbezogenen Volumenströme in $\text{m}^3/(\text{hm}) @ 50 \text{ Pa}$ der Abdichtungsmethoden mit Messfehlern und PHI Zertifikatsklassen

Die Abdichtungsmethoden 1 – Injektionskanal und 4 – Injektionsdübel schneiden am besten ab. Sie eignen sich somit im Allgemeinen dazu, Risse, wie sie in den Prüfkörpern abgebildet sind, ausreichend abzudichten, um die gewünschte Dichtheit der luftdichten Ebene für ein energieeffizientes Gebäude herzustellen. Während die Auswertungen zu Methode 1 (Injektionskanal) auf eine Schwäche durch unverfüllte Risspitzen in dem Prüfkörper 4 (7/70 mm Abknickender Riss) hinweist, scheint die Methode 4 (Injektionsdübel) eine bessere Abdichtung dieses Risstyps darzustellen.

9 Handhabungsvergleich der Methoden

Um die Integrationsmöglichkeit der gewonnenen Erkenntnisse in die Sanierungspraxis beurteilen zu können, wird im Folgenden dargelegt, welche Aspekte für die Praktikabilität der Anwendung dieser Methoden in der Sanierungspraxis von Bedeutung sind.

9.1 Kriterien zur Handhabung der Abdichtungsmethoden

Für den Handhabungsvergleich der Abdichtungsmethoden sind die drei zentralen Kriterien Anwendungsdauer, Schwierigkeitsgrad der Anwendung und Materialeffizienz von Bedeutung.

Die Anwendungsdauer beschreibt die benötigte Zeit für die vollständige Anwendung der Methode von der Vorbereitung bis zum Abschluss. Es wird in drei Einstufungen unterschieden:

- Kurze Anwendungsdauer: ≤ 5 Minuten
- Mittlere Anwendungsdauer: ca. 10 Minuten

- Verlängerte Anwendungsdauer: ≥ 15 Minuten

Der Schwierigkeitsgrad der Anwendung ist ein subjektives Maß für die technische Komplexität der Methode und die erforderlichen Fachkenntnisse. Hier wird zwischen folgenden Einstufungen unterschieden:

- Hoher Schwierigkeitsgrad: Geschultes Fachpersonal benötigt
- Mittlerer Schwierigkeitsgrad: Handwerklich begabter Leiharbeitende mit mittelmäßiger handwerklicher Erfahrung ausreichend
- Leichter Schwierigkeitsgrad: Absoluter Leiharbeitende ausreichend

Die Materialeffizienz bewertet die Menge und Effizienz der verwendeten Dicht- und Abdichtungsmaterialien im Verhältnis zur Größe und zum Umfang des Risses. Hier kann eine Methode wie folgt eingestuft werden:

- Hohe Effizienz
- Teilweise Effizient
- Keine Effizienz

Diese Kriterien bieten eine Grundlage für einen Vergleich der Handhabung der verschiedenen Abdichtungsmethoden. Sie ermöglichen eine Bewertung, die in eine Handlungsempfehlung miteingehen und für die Formulierung von allgemeinen Anforderungen an Methode zur luftdichten Einbindung rissiger Holzbalken eine Rolle spielen.

9.2 Vergleich der Handhabungen anhand der Kriterien

Im Vergleich der Handhabung der Methoden zeigen sich deutliche Unterschiede in Bezug auf die zuvor festgelegten Kriterien. Die Tabelle 16 gibt einen Überblick über die Ergebnisse des Vergleichs.

Tabelle 16: Vergleich und Einstufung der Methodenhandhabungen der Methoden nach den ausgewählten Kriterien

		Kriterien		
		Anwendungs- dauer	Schwierigkeits- grad der Anwendung	Material- effizienz
Bewertung	Methode 1 (Injektionskanal)	kurz	mittel	hoch
	Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)	verlängert	hoch	teilweise
	Methode 3 (Injektion mit Klinge)	kurz	mittel	teilweise
	Methode 4 (Injektionsdübel)	mittel	mittel	teilweise

Die Methode 1 (Injektionskanal) zeichnet sich durch eine kurze Anwendungsdauer aus, da sie lediglich die zügigen Arbeitsschritte Ausbohren, Entgraten und Verfüllen des Risses umfasst. Sie erfordert einen mittleren Schwierigkeitsgrad aufgrund benötigter Bohrkenntnisse und weist eine hohe Materialeffizienz auf.

Methode 2 (Injektion mit Begrenzung) hingegen weist aufgrund der Dauer des Aushärtens des Schaums (ca. 30 Minuten) eine verlängerte Anwendungsdauer auf und hat einen hohen Schwierigkeitsgrad aufgrund der präzisen Arbeit des Ausschäumens. Hierbei besteht ein hohes Risiko durch möglichen Verschluss des Injektionskanals durch den Schaum. In diesem Fall kann der Schaum rückwirkend nicht vollständig entfernt werden, was zu langfristigen Leckagen in der Injektion führen kann. Der Materialeinsatz ist teilweise effizient.

Die Methode 3 (Injektion mit Klinge) bietet eine kurze Anwendungsdauer durch das einfache Einschlagen der Klinge und einen mittleren Schwierigkeitsgrad in der Anwendung. Die Materialeffizienz ist teilweise effizient, da durch den Einsatz der Klinge zwar teilweise an Dichtmasse gespart werden kann, jedoch bei engen Rissen das seitliche Verlaufen der Dichtmasse entlang des Risses möglich ist.

Methode 4 (Injektionsdübel) zeigt eine mittlere Anwendungsdauer durch das Ausbohren, Befüllen mit Dichtmasse und Einsetzen des Dübels. Zwar zeichnet sich diese Methode in Bezug auf die Dichtmasse aufgrund des gezielten Einsatzes durch eine hohe Materialeffizienz aus, jedoch besteht hier bei dem Prototypen des Injektionsdübels noch Verbesserungspotential. Dieser wird hier in einer für alle Risse einsetzbaren Einheitsgröße verwendet und im Durchmesser als auch in der Länge nicht dem Rissformat angepasst. Aus diesem Grund fällt hier die gesamte Bewertung der Materialeffizienz nur mittelmäßig aus. Außerdem hat der Injektionsdübel einen mittleren Schwierigkeitsgrad der Anwendung durch die benötigten Bohrkenntnisse.

Zusammenfassend stellt sich heraus, dass keine der Methoden in allen Kriterien optimal abschneidet. Methode 2 fällt im Vergleich aufgrund verlängerter Anwendungsdauer und hohem Schwierigkeitsgrad der Anwendung ab. Die Methoden 3 und 4 schneiden beide eher mittelmäßig ab und unterscheiden sich dabei in Materialeffizienz und Anwendungsdauer. Die Methode 1 fällt lediglich in der Schwierigkeit der Anwendung etwas ab und erweist sich somit als die beste.

10 Handlungsempfehlung

Durch die Auswertung dieser Untersuchungen werden hier Rückschlüsse darauf gezogen, welche Anforderungen an kommerzielle Abdichtungssysteme gestellt werden müssen, um rissige Holzbalken luftdicht zu integrieren. Darüber hinaus zeigt die Analyse auf, welche der hier entwickelten und untersuchten Lösungsansätze der Abdichtungsmethoden verfolgt und weiterentwickelt werden sollten sowie welche als eher weniger vielversprechend erscheinen.

10.1 Anforderungen an kommerzielle Abdichtungssysteme

Allgemein ist festzuhalten, dass eine gute Abdichtungsmethode mindestens die PHI Luftdichtheitsklasse A erreichen sollte. Sie sollte zudem flexibel für verschiedene Orientierungen, wie nach oben und unten gerichtete Rissöffnungen, sowie für unterschiedliche Rissformate einsetzbar sein. In Bezug auf die Handhabung sollte sie eine kurze Anwendungsdauer, einen niedrigen Schwierigkeitsgrad der Anwendung und eine hohe Materialeffizienz aufweisen. Die Auswahl der passenden Methode hängt in der Praxis zudem immer von den spezifischen Anforderungen des Projekts, den örtlichen Bedingungen und verfügbaren Ressourcen ab.

Die Lösungsansätze der Abdichtungsmethoden 1 – Injektionskanal und 4 – Injektionsdübel erscheinen auf Grund der guten Messergebnisse, welche beide in der PHI Klasse A liegen, als sehr vielversprechend und sollten von potentiellen Herstellern kommerzieller Abdichtungssysteme weiterentwickelt werden. In Bezug auf die abknickenden Risse, wie in Prüfkörper 4 abgebildet, verspricht der Einsatz eines Injektionsdübels ein nochmals deutlich verbessertes Ergebnis als die Herstellung eines einfachen Injektionskanals.

Sollte sich die aus dem Handhabungsvergleich hervorgehende mittelmäßige Anwendungsdauer und nur teilweise Materialeffizienz der Methode 4 (Injektionsdübel) verbessern lassen, könnte eine Handhabung dieser Methode ähnlich praktikabel werden wie die hier gut abschneidenden Methode 1 (Injektionskanal) werden. Die Anwendungsdauer könnte durch vorab befüllte Dübel noch deutlich reduziert werden. Außerdem könnte ein Dübel mit Stempel aus Holz oder Kunststoff mit einem Stecheisen leicht und schnell bündig abgeschlagen werden, was das hier erforderliche zeitaufwendigere Absägen ersetzen und den Arbeitsschritt somit deutlich beschleunigen würde. Auch die an Prüfkörper 3 (10/120 mm Riss) vereinzelt Probleme durch einen nicht ausreichenden Vorrat an Dichtmasse innerhalb des Injektionsdübels könnten leicht durch einen vergrößerten Durchmesser der zentralen Bohrung vermieden werden. Die Materialeffizienz des Dübels könnte außerdem durch angepasste Maße (Durchmesser und Länge) auf das abzudichtende Rissformat deutlich erhöht werden.

Obwohl der Lösungsansatz der Methode 3 (Injektion mit Klinge) in der Handhabung insgesamt mittelmäßig abschneidet, ist dieser Ansatz hinsichtlich der Rissabdichtung nicht vielversprechend da diese Methode hier am schlechtesten abschneidet und keine der PHI Klassen erreicht. Auch ist das Verbesserungspotential dieser Methode sehr begrenzt. Die Methode 2 (Injektion mit Begrenzung) erweist sich im Zuge der Untersuchungen ebenfalls als nicht vielversprechend. Sowohl in der Handhabung als auch bei der Rissabdichtung erweist sich dieser Lösungsansatz als ungenügend.

Eine weitere Erkenntnis dieser Untersuchungen ist, dass sich die Verwendung einer Dichtmasse im Sinne der hier verwendeten als flexibel einsetzbar und geeignet für

die verschiedenen Orientierungen (nach oben und unten gerichtete Rissöffnungen) und Formate der Risse erweist. Im Gegensatz zu anderen Abdichtungsmitteln ist die Dichtmasse ohne Nachlaufen nach dem Injizieren ein zuverlässiges Abdichtungsmittel.

10.2 Weitergehende Forschungsfragen

Aufgrund der erfolgten Analysen stellt sich die Frage, ob der Injektionsdübel unter der Berücksichtigung der genannten Optimierungshinweise bei großen Risstypen wie in Prüfkörper 3 (10/120 mm) bezüglich der Abdichtung besser abschneidet.

Weiterhin bleibt zu klären, ab welchen Abmessungen Leckagen durch Kleinstrisse, die kleiner sind als der in dem Prüfkörper 1 abgebildete Riss (2/50 mm), einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Luftdichtheit haben und wie solche nicht vernachlässigbaren Kleinstrisse wirksam abgedichtet werden könnten.

Es ist auch zu prüfen, inwieweit die für die Methoden 1 (Injektionskanal) und Methode 4 (Injektionsdübel) erforderlichen Bohrungen im Hinblick auf die Tragfähigkeit der Balken anwendbar und zulässig sind. Hinsichtlich des Bohrvorganges ist zu prüfen, ob beim Injektionsverfahren das Bohren mit einem konischen Bohrer zielführender ist als das Bohren mit den hier verwendeten zylindrischen Bohrern, da auch die Kartuschen-spitzen der Dichtmassen konisch ausgeführt sind. Vorteile könnten ein rascherer Bohrvorgang und eine geringere Schwächung des Balkenquerschnittes sein.

11 Literaturverzeichnis

Bastian, Z./Feist Wolfgang/Baumgärtner, C./et al. (2009): Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten, Darmstadt 2009.

BISCHOFF + SCHÄFER Holz GmbH (2012): Sortierhilfen und Erläuterungen zur Anwendung der DIN 4074 in der Praxis. Sortierung von Nadel-schnittholz, https://www.bischoff-schaefer.de/fileadmin/editor/PDF/DE/Datenblaetter/erlaeute-rungen_zur_din_4074_1.pdf, am 18.4.2024.

Colling, F. (1999): Analyse und Bewertung von Schäden bei Holzkonstruktionen, https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/forschung_wissen-schaft/0217600265.pdf, am 21.4.2024.

DIN 4074-1 (2012): Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadel-schnittholz. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 10772 Berlin (Onlineveröffent-lichung aus dem Jahr 2012).

DIN EN 12114 (2000): Luftdurchlässigkeit von Bauteilen Laborprüfverfahren. Deut-sches Institut für Normung e. V., 10772 Berlin (Onlineveröffentlichung aus dem Jahr 2000).

Feist, W. [Hrsg.] (2003): Wärmebrücken und Verbesserung der Luftdichtheit im Alt-bau. Auszug aus Protokollband [AkkP 24], Darmstadt 2003.

Feist, W. (2006): Passivhäuser immer mit Komfort-Wohnungslüftung, https://pas-siv.de/former_conferences/Passivhaus_D/Lueftung_06.html#:~:text=Mo-dernte%20L%C3%BCftungstechnik%20erlaubt%20heute%20W%C3%A4rmebe-reitstellungsgrade,15%20fache%20des%20Stromverbrauchs%20betr%C3%A4gt., am 31.3.2024.

Frech, P. (1998): Beurteilung für Rißbildungen im konstruktiven Holzbau, Stuttgart 1998.

GEG (2020): Gebäudeenergiegesetz. Bundesamt für Justiz, https://www.gesetze-im-internet.de/Teilliste_G.html (Onlineveröffentlichung aus dem Jahr 2020, am 12.12.2023).

Gloß P./Böhner G./Wagner L. (1989): Einfluß der Einschnittart auf die Rißbildung von Fichtenbauholz, München.

IsoverGH (2021): Risse im Balken anbohren. ISOVER Quick-Tipp #87, Düsseldorf 2021.

Müller, P. (2021): Wohnungslüftung und Wärmerückgewinnung. Ein Beitrag zur Wohngesundheit und zum Klimaschutz, Wiesbaden/Heidelberg 2021.

Müller, U. [Hrsg.] (2011): Holzbalkenköpfe in historischem Mauerwerk. Zwischen Luftumspülung und Innendämmung, Leipzig 2011.

Neuhaus, H. (2017): Ingenieurholzbau. Grundlagen – Bemessung – Nachweise – Beispiele, 4. Aufl., Wiesbaden 2017.

- Passivhaus Institut** (2022): Grundprinzipien für die Realisierung der Luftdichtheit. Prinzipien, https://passipedia.de/planung/luftdichtheit/grundprinzipien/grundprinzipien_fuer_die_verbesserung_der_luftdichtheit, am 18.4.2024.
- Passivhaus Institut** (2023): Gebäudekriterien. Passivhaus – EnerPHit – PHI-Energiesparhaus, 10. Aufl. 2023.
- Peper, S.** (2019): Prüfbericht „Zertifizierte Passivhaus Komponente“. System “Finsa superPan Tech P5 VapourStop 12mm“, Darmstadt (Onlineveröffentlichung aus dem Jahr 2019).
- Peper, S.** (2023): Prüfbericht „Zertifizierte Passivhaus Komponente“, Darmstadt (Onlineveröffentlichung aus dem Jahr 2023).
- Peper, S./Bangert, A./Bastian, Z.** (2014): Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene, 2014.
- Peper, S./Feist, W./Sariri, V.** (1999): Luftdichte Projektierung von Passivhäusern. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 7, Darmstadt 1999.
- SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG** (2024): Anwendung Vario DoubleFit +. Pastöse Klebe-Dichtmasse für innen und außen, Ludwigshafen .
- Schild, K./Willems, W. M.** (2022): Wärmeschutz. Grundlagen – Berechnung – Bewertung, 3. Aufl., Wiesbaden/Heidelberg 2022.
- Solcher, O./Hauser, G./Bischof, W./et al.** (2012): Gebäude-Luftdichtheit. Band 1, 2. Aufl., Berlin 2012.
- Stahr, M. [Hrsg.]** (2022): Bausanierung. Erkennen und Beheben von Bauschäden, 7. Aufl., Wiesbaden/Heidelberg 2022.
- Umweltbundesamt** (2023): Kohlendioxid-Emissionen im Bedarfsfeld „Wohnen“, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/kohlendioxid-emissionen-im-bedarfsfeld-wohnen>, am 11.12.2023.
- Uwe Wild** (2008): Sachverständigenbüro für Baudiagnostik. Der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrymans*), <https://www.baudiagnostik-leipzig.de/begriffe/echter-hausschwamm/>, am 20.4.2024.

Anhang 1: Ergebnisdiagramm Methode 1 (Injektionskanal)

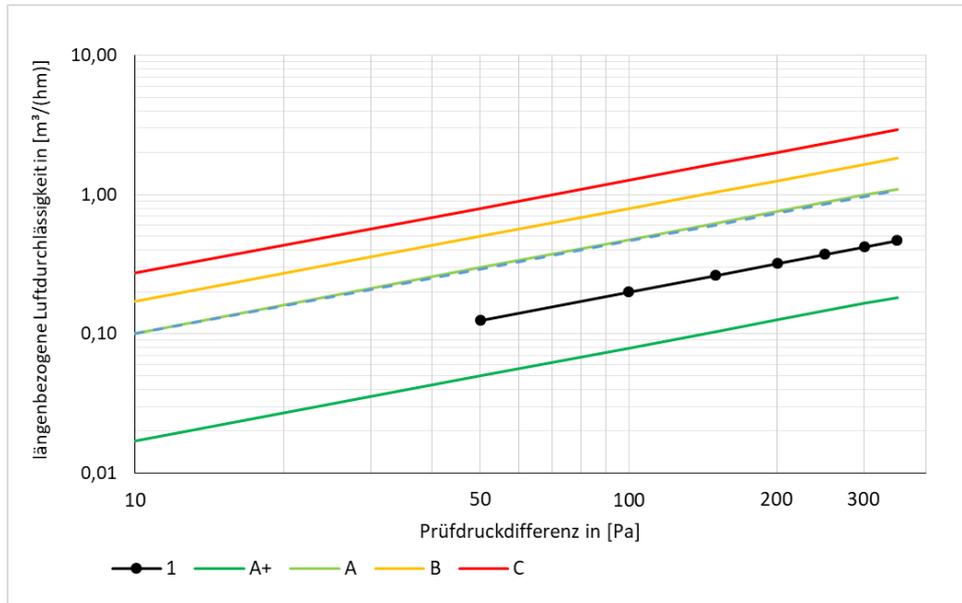


Abbildung 38: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 1 mit den Zertifikatsklassen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)

Anhang 2: Ergebnisdiagramm Methode 2 (Injektion mit Begrenzung)

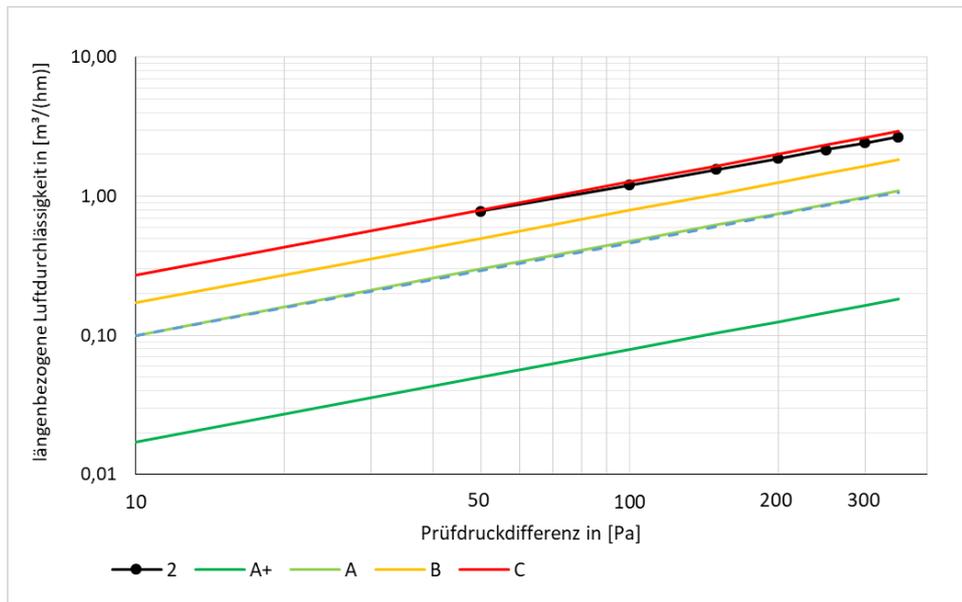


Abbildung 39: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 2 mit den Zertifikatsklassen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)

Anhang 3: Ergebnisdiagramm Methode 3 (Injektion mit Klinge)

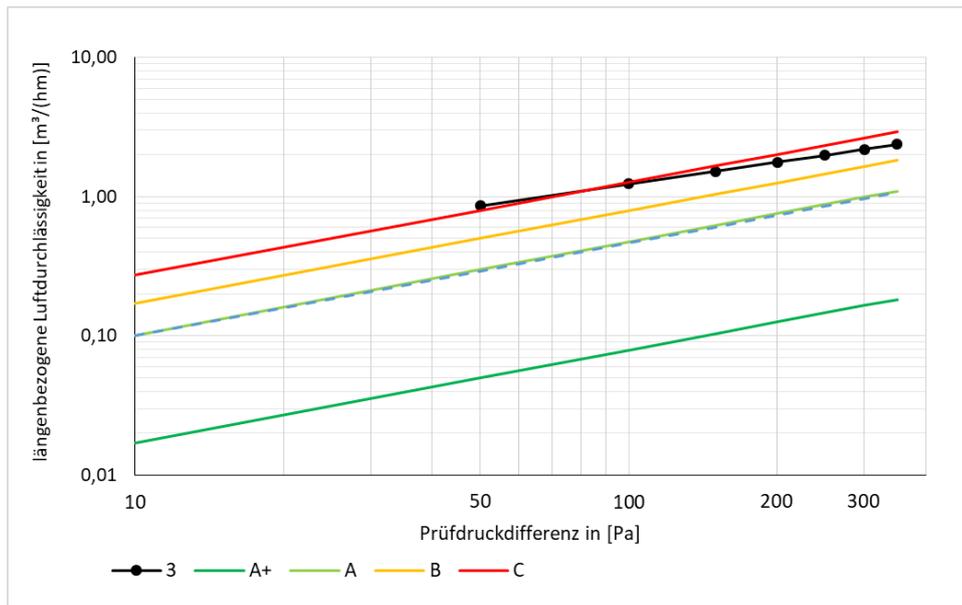


Abbildung 40: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 3 mit den Zertifizierungsstufen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)

Anhang 4: Ergebnisdiagramm Methode 4 (Injektionsdübel)

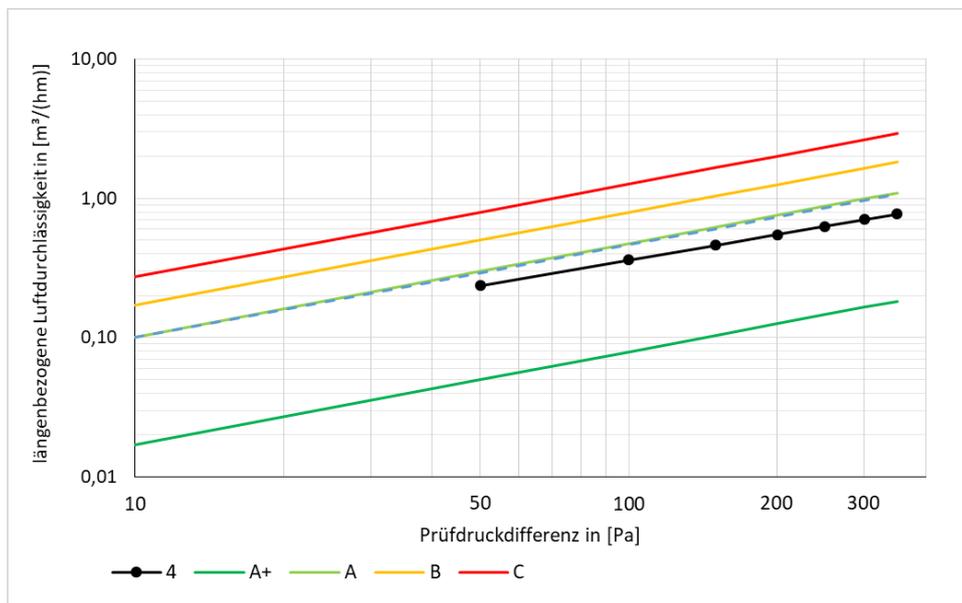


Abbildung 41: Messreihe der gemeinsam gemessenen Prüfkörper der Methode 4 mit den Zertifizierungsstufen A+ bis C nach PHI sind ergänzend eingetragen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)

Anhang 5: Überblick Auswertung

Methode #	Prüfkörper	Messdatum [dd.mm.yyyy]	Balken Umfang [m]	Luftdichte Ebene	Leckage des Messstandes [m³/h] @ 50 Pa	Messwert [m³/h] @ 50 Pa	Messwert (abzüglich Leckage (spezifische Ausgleichskurve) [m³/h] @ 50 Pa
1	Alle	19.03.2024	5,16	OSB	0,15	0,79	0,64
1	P1	19.03.2024	1,20	OSB	0,15	0,47	0,32
1	P2	19.03.2024	1,26	OSB	0,15	0,49	0,34
1	P3	19.03.2024	1,50	OSB	0,15	0,41	0,27
1	P4	19.03.2024	1,20	OSB	0,15	0,78	0,63
2	Alle	15.03.2024	5,16	OSB	0,15	4,18	4,03
2	P1	15.03.2024	1,20	OSB	0,15	1,98	1,84
2	P2	15.03.2024	1,26	OSB	0,15	1,99	1,84
2	P3	15.03.2024	1,50	OSB	0,15	0,75	0,60
2	P4	15.03.2024	1,20	OSB	0,15	0,76	0,62
3	Alle	22.03.2024	5,16	OSB	0,15	4,59	4,44
3	P1	22.03.2024	1,20	OSB	0,15	0,99	0,84
3	P2	22.03.2024	1,26	OSB	0,15	1,34	1,19
3	P3	22.03.2024	1,50	OSB	0,15	1,62	1,48
3	P4	22.03.2024	1,20	OSB	0,15	3,65	3,50
4	Alle	21.03.2023	5,16	OSB	0,15	1,37	1,23
4	P1	21.03.2023	1,20	OSB	0,15	0,42	0,27
4	P2	21.03.2023	1,26	OSB	0,15	0,31	0,17
4	P3	21.03.2023	1,50	OSB	0,15	1,09	0,94
4	P4	21.03.2023	1,20	OSB	0,15	0,52	0,37

Abbildung 42: Übersicht der gemessenen und berechneten Werte der Messungen (Quelle: Eigene Abbildung erstellt mithilfe einer Vorlage des PHI)