

HOLZBAU DER ZUKUNFT

Teilprojekt 19
Konstruktionsgrundlagen für
Fenster, Türen und Fassadenelemente
aus Verbundwerkstoffen und Holz

Teilprojekt 19

Konstruktionsgrundlagen für
Fenster, Türen und Fassadenelemente
aus Verbundwerkstoffen und Holz



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Kurzfassung.....	2
Summary	6
1 Ziel des Projektes	8
2 Stand der Forschung.....	10
3 Für die Zukunft notwendige Aufgaben	12
4 Schwachstellen	16
5 Folgerungen für die Weiterentwicklung	28
6 Experimentelle Untersuchungen.....	29
6.1 Raumklima	29
6.2 Wasseraufnahme von Holz.....	31
6.3 Quellungskoeffizienten.....	34
6.4 Untersuchung der Tauwasserbildung in den Falzen von Fenstern	36
7 Theoretische Betrachtungen	61
7.1 Fenster und Türen im Differenzklima.....	61
7.2 Tauwasser in den Falzen.....	74
8 Ausführung.....	77
8.1 Allgemeines	77
8.2 Raumseitige Oberflächentemperaturen am Glas	79
8.3 Wärmebrücken im Falz	81
8.4 Tauwasser im Falz.....	83
8.5 Tauwasser im Glasfalz.....	86
8.6 Verklebte Kanteln aus unterschiedlichen Holzarten	86
Literaturverzeichnis	90
Abbildungsverzeichnis.....	94
Tabellenverzeichnis	100
Begriffserklärung	101

Kurzfassung

Für die Sicherstellung und Weiterentwicklung der Marktanteile der Holzfenster auf dem Deutschen Markt ist es notwendig, die Erfahrungen der Vergangenheit auszuwerten und vorausschauend technisches Wissen zur Verfügung zu stellen. Der Fensterhersteller wird dadurch in seiner Konstruktionsarbeit unterstützt, um innovative Fenster zu entwickeln und dem Markt anzubieten.

Die normative Beschreibung der Konstruktion und Ausführung von Holzfenstern, wie sie z. B. in DIN 68121 vorliegt, hat sich in der Vergangenheit nicht bewährt. Sie hat sich als Hemmnis bei der Entwicklung neuer Produkte gezeigt. Die konstruktiven Vorgaben in der Norm wurden häufig als verbindlich betrachtet und als Maßstab für die Bewertung neuer Produkte angesehen. Damit wurde die Entwicklung neuer Produkte erschwert und die Bereitschaft der Hersteller, sich durch ein Markenprodukt mit innovativen Alleinstellungsmerkmalen am Markt zu positionieren, negativ beeinträchtigt.

Bei der Aufbereitung neuer Erkenntnisse muss der Mensch im Mittelpunkt stehen und sich das Fenster in Gestaltung, Handhabung und Funktion an seinen Bedürfnisse orientieren. Auch muss den Wünschen der Architektur unter Beachtung technischer Grenzen ein Freiraum gegeben werden.

Bei der Bewertung technischer Eigenschaften kann auf die derzeit gültigen Regelwerke wie DIN EN 14351-1 „Fenster und Außentüren – Produktnorm“ zurückgegriffen werden. DIN EN 14351-1 trifft gemeinsame europäische technische Festlegungen zur Prüfung, Klassifizierung und Kennzeichnung.

Die Produktnorm gibt ausreichend Freiraum, um landesübliche Wünsche und Bedürfnisse bei der Konstruktion, den Holzarten und der Oberflächenbehandlung zu berücksichtigen. Für die sich im deutschsprachigen Raum abzeichnende Entwicklung der Einbeziehung der Fenster in das Wohnumfeld sind in den europäischen Normen für Fenster keine Hemmnisse erkennbar.

Da im Wohnumfeld dekorative Holzarten erwünscht sind, die sich nicht immer für die Außenanwendung und die damit verbundene Witterungseinwirkung eignen, ist ein Schichtaufbau der Profilquerschnitte unter Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe erforderlich. Dies gibt auch die Möglichkeit, die einzelnen Schichten hinsichtlich ihrer Aufgaben zu optimieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Eignung und das Verhalten verschiedener Holzarten innerhalb eines Profilquerschnittes untersucht und die Verwendung verschiedener Werkstoffe als Option beschrieben.

Derzeit ist die Marktentwicklung für Holzfenster gekennzeichnet durch eine Verringerung der Marktanteile, die schon über Jahre anhält und deren Ursachen vielschichtig sind. Der Aufwand an Instandhaltung und die Veränderung des Aussehens sind dabei wesentlich.

Aus der Beobachtung, dass sowohl Bewohner als auch Architekten Holz verstärkt in die Gestaltung der Wohnräume einbeziehen, lässt sich die Möglichkeit einer Trendwende ableiten. Erreichbar ist die Trendwende, wenn die notwendigen Maßnahmen zur Instandhaltung auf einem zumutbaren Niveau gehalten werden und die Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum sichergestellt ist. Als Nutzungszeitraum geht man beim Holzfenster im Durchschnitt von 40 Jahren aus. Der Nutzungszeitraum wird in der Regel dadurch beendet, dass das Fenster den technischen Anforderungen nicht mehr entspricht oder der Bedienungskomfort nicht mehr akzeptiert wird.

Eine Beendigung des Nutzungszeitraums ist teilweise auch durch einen Substanzabbau als Folge des Befalls durch holzerstörende Pilze, gegeben. Der Befall durch holzerstörende Pilze setzt immer eine anhaltende Durchfeuchtung des Holzes voraus, deren Ursachen in den Klimaeinwirkungen von der Raumseite und von der Außenseite gegeben sind. Diese Einwirkungen können durch bauliche Maßnahmen und durch die Gebäudetechnik zwar gemindert werden. Im Grundsatz sind sie aber nicht zu vermeiden und deshalb bei der weiteren Entwicklung der Fenster als Störgröße zu berücksichtigen.

Begünstigt wird der Feuchtigkeitseintritt in die Konstruktion und Holzquerschnitte sehr häufig durch vermeidbare Konstruktions- und Herstellungsmängel, aber auch durch eine Vorschädigung des Holzes, die für den Verarbeiter durch Inaugenscheinnahme nicht erkennbar ist.

Für die Berücksichtigung der Feuchtigkeitseinwirkung ist die Kenntnis des Außenklimas und des Raumklimas notwendig. Das Außenklima ist als unbeeinflussbares Kriterium zu betrachten, wobei die direkten Witterungseinwirkungen durch bauliche Maßnahmen gemindert werden können.

Die Einwirkungen des Raumklimas auf das Fenster haben sich mit den Anforderungen an die Dichtheit der Außenhülle eines Gebäudes verstärkt, da der bisher über die Undichtheit der Gebäudehülle erfolgte Luftaustausch nicht mehr gegeben ist. Damit ist auch der Feuchtigkeitshaushalt des Gebäudes beeinträchtigt, so dass die relative Luftfeuchte im Gebäude ansteigt. Die erhöhte Belastung der Fenster durch das Raumklima zeigt sich durch Tauwasserbildung am Randbereich des Isolierglases und in den Falzen der Fenster.

Aus der Messung des Raumklimas in 27 Wohnungen in den Monaten November 2007 bis April 2007 wurde die relative Luftfeuchtigkeit über einen Messzeitraum von jeweils 2 Wochen zwischen 40 und 60 % im Durchschnitt ermittelt. Die Werte fügen sich gut in den Jahresgang der relativen Luftfeuchtigkeit ein, wenn auf der Raumseite von einer normalen bis hohen Feuchtlast ausgegangen wird.

Die Auswertung der Messung zeigt weiter, dass bei zwei Lüftungsvorgängen pro Tag durch das Öffnen der Fenster die relative Luftfeuchtigkeit nur kurzzeitig gesenkt werden kann. Nach dem Schließen der Fenster wird die ursprüngliche Luftfeuchtigkeit schnell wieder erreicht. Dies ist damit zu erklären, dass die Feuchtigkeit, die in den Wandflächen und in der Einrichtung gespeichert wird, die über die Lüftung abgeführte Feuchtigkeit wieder ausgleicht. Die Messungen zeigen, dass wenn alle Bewohner berufstätig sind, zwei Lüftungsvorgänge pro Tag die Regel sind.

Die in Verbindung mit der Messung des Raumklimas durchgeführte Überprüfung der Falze zwischen Flügel und Blendrahmen zeigt, dass während der Heizperiode ein häufiger Tauwasseranfall im Falz vorliegt und es in den unteren Falzen zu einer anhaltenden Ansammlung von Tauwasser und damit zu einer erhöhten Belastung des Holzes kommt. Die Tauwasserbildung in den Falzen wurde in Feldversuchen bestätigt. In den Feldversuchen konnten auch Einflüsse auf die Tauwasserbildung und Bedingungen zur Vermeidung des Tauwassers erarbeitet werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Druckverteilung in Gebäuden bestätigten den Einfluss des Innendruckes der Gebäude auf die Tauwasserbildung im Falz. Durch die Versuche konnten nicht alle Einflüsse auf die Tauwasserbildung geklärt werden. Die Anbringung einer raumseitigen Dichtung zwischen Flügel und Blendrahmen bestätigte sich dennoch als unabdingbare Maßnahme zur Vermeidung von Tauwasser.

Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens von verklebten Querschnitten unter Verwendung unterschiedlicher Holzarten wurden zunächst drei Rechenmodelle miteinander verglichen. Dabei zeigte sich eine relativ gute Übereinstimmung der durchgeführten Berechnungen zwischen allen Modellen, so dass das Modell des freiausfliegenden Einfeldträgers mit der Einwirkung von Momenten an den Trägerenden für die weitere Betrachtung ausgewählt wurde. Das ausgewählte Modell ermöglicht die Berechnung der Verformung im Differenzklima unter Berücksichtigung des Jahresganges der relativen Luftfeuchtigkeit auf der Raum- und auf der Außenseite.

Die wesentlichen Einflüsse auf die Verformung sind die Luftfeuchtigkeit des Umgebungsklimas und die Längsquellung des Holzes, die durch den Quellungskoeffizienten „h“ in [% / %] beschrieben wird. Die Quellungskoeffizienten zeigten sich als die größte Unsicherheit in den Annahmen der Berechnungen, da die in der Literatur angegebenen Werte sehr stark streuen. Dies ist dadurch bedingt, dass die Längsquellung nur in Ausnahmen durch eine direkte Messung ermittelt wird. Zum Teil sind die Streuungen auch durch die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften innerhalb einer Holzart bedingt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden die Koeffizienten der Längsquellung „h“ an 10 Holzarten bestimmt. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, wurden für die Messung von DIN 52184 abweichende Probekörper gewählt.

Die Auswertung der Berechnungen der Verformung im Differenzklima zeigt, dass die Quellungskoeffizienten der Außenlamellen das Verformungsverhalten des Rahmenprofils stärker beeinflussen als die Quellungskoeffizienten der Innenlamellen.

Entsprechend der Zielsetzung wurden die gewonnenen Erkenntnisse als Orientierungswissen aufbereitet, so dass es den Anwendern in folgenden Punkten zur Verfügung steht.

a) Raumseitige Oberflächentemperatur am Glas

Die raumseitige Oberflächentemperatur im Randbereich des Isolierglases wird durch den Glaseinstand, die Ausführung des Abstandhalters des Isolierglases und durch die Lage des Isolierglases über die Rahmentiefe bestimmt.

Die niedrigsten Oberflächentemperaturen treten auf, wenn das Isolierglas mit der Außenseite des Rahmens bündig ist oder wenn die Außenscheibe des Isolierglases über den Rahmen vorsteht. Je größer der Glaseinstand ist, um so günstiger ist die Oberflächentemperatur.

b) Wärmebrücken im Falz

Wenn die Mitteldichtung direkten Kontakt zur metallischen Wetterschutzschiene hat, kommt es im Falzraum zu einer stärkeren Abkühlung der Fläche im unteren Falz, als wenn die Dichtung am Holz anliegt.

Wärme gedämmte Wetterschutzschienen, bei welchen zur Raumseite ein Kunststoffprofil den Anschlag bildet und die Wetterschutzschienen bündig mit der Ausfräsung des Holzes enden, verbessern das Temperaturverhalten nicht wesentlich.

Anzustreben ist deshalb, dass die Mitteldichtung an einer Holzfläche anliegt und kein Kontakt zu einer Metallfläche besteht.

c) Tauwasser im Falz

Zur Vermeidung der Tauwasserbildung in den Falzen, ist die Anbringung einer raumseitigen Dichtung notwendig. Diese Dichtung muss umlaufend sein und darf durch Beschlagteile weder unterbrochen noch durch Ausnehmungen für Beschläge umgangen werden.

Bei dem derzeitigen Marktangebot von Beschlägen werden diese Forderungen nur von verdeckt liegenden Beschlägen, bei denen alle Beschlagteile im Falz angebracht sind, erfüllt.

Die Mitteldichtung muss in ihrer Wirkung luftdurchlässiger sein als die Dichtung am raumseitigen Überschlag, damit ein Druckausgleich mit dem Außenklima möglich und der Kennwert des dimensionslosen Dampfdruckes „p“ möglichst klein ist.

d) Tauwasser im Glasfalz

Die Verglasung muss von der Raumseite her dicht sein, damit keine feuchte Raumluft in den Falz eindringen kann. Die übliche Befestigung mit Nägeln oder Klammern ist hierfür in der Regel nicht ausreichend, so dass zusätzliche Maßnahmen der Abdichtung notwendig sind.

Die notwendigen Öffnungen des Glasfalzes zur Außenseite sollten nicht in die Schlitzzapfen der Eckverbindungen integriert sein, sondern mit Abstand von der Ecke angebracht werden.

e) Verklebte Kanteln aus unterschiedlichen Holzarten

Bei der Herstellung von verklebten Kanteln aus unterschiedlichen Holzarten ist bei der Auswahl der Holzarten darauf zu achten, dass für die Außenlamellen Holz mit einem niedrigen Quellungskoeffizienten eingesetzt und bei Innenlamellen Holz mit hohem Quellungskoeffizienten vermieden wird.

Vor der Verklebung sind die Hölzer in gleichem Ausgleichsklima, das heißt bei gleicher relativer Luftfeuchtigkeit, zu lagern. Die in der Praxis geläufige Holzfeuchtigkeit ist für den Vergleich des Zustandes der verschiedenen Holzarten ungeeignet. Der Klebstoff und die Verklebung müssen auf die Eigenschaften der Hölzer abgestimmt sein. Eine allgemein gültige Empfehlung für die Verklebung kann zur Zeit nicht gegeben werden.

Summary

To maintain and enlarge the market share of wood windows in Germany it is of essential importance to both evaluate past experience and to provide technical know-how for the future. The normative description for the construction of wood windows as outlined in DIN 68121 has not proven useful. The specifications defined therein were often considered compulsory and thus used as a benchmark for the evaluation of new products.

The interpretation of new findings will have to focus on customers' needs with respect to design, handling and functionality. Within certain technical limitations, window construction will further need to accommodate architects' demands.

Current rules and regulations such as DIN EN 14351-1 "Windows and external pedestrian doorsets - Product standard" serve as a reference for the evaluation of physical properties. DIN EN 14351-1 defines common European standards for testing, classification and labeling. Such product standards allow for sufficient flexibility to meet local requirements with regard to design, types of wood and surface treatment.

Decorative types of wood are preferred in a residential environment. However, these may not necessarily be suitable for outdoor use as they tend to be sensitive to weather. Thus, a layer composition of different materials is required. For this study, the suitability of different types of wood and their respective behavior in a cross section has been examined. Further, it outlines the optional usage of different materials.

For various complex reasons there has been a decline in the market share of wood windows for several years, the major issues being the necessary maintenance effort and the materials' change in appearance.

Studies have shown that both residents and architects have begun to use wood more frequently for interior design, thus indicating a possible reversal of the trend. A change in trend can only be achieved if the necessary maintenance effort is kept at an acceptable level and the fitness for use can be maintained for an adequate use period. The average use period for wood windows is 40 years.

The actual use period is usually determined by the fact that the windows no longer meet technical requirements or are no longer considered comfortable to use. In some cases, the use period is terminated by wood decomposition as a result of wood-destroying fungi. Infestation of wood-destroying fungi requires persistent moisture penetration of the wood, mostly caused by the climate either on the indoor or on the outdoor face.

Taking into consideration the influence of humidity requires detailed knowledge of the respective climate conditions both in the outdoor and indoor environment. Weather conditions cannot be controlled. Structural adaptations can, however, reduce the extent of direct weather influence.

Due to the air tightness of the outer walls of the building the air exchange supported by lack of air tightness of the outer shell is no longer given. As a result, the effects on windows caused by indoor environment have increased. The indoor environment causes increased stress on windows which in turn results in condensate on the margin of insulation glass and window rebates.

Tests in rooms showed a relative humidity between 40% to 60%. These figures resemble the annual change in humidity based on a normal to high indoor humidity. Test results further showed that airing a room twice a day by opening the window the relative humidity can only be lowered temporarily.

During the indoor climate tests the window rebates between the wing and the frame were checked. It became evident that during the heating period condensate in the window rebates was a common problem. Increased stress on the wood was caused by persistent condensate in the lower rebates.

The formation of condensate in the rebates was confirmed in field studies. Factors leading to the formation of condensate and conditions for the avoidance of condensate could be determined.

Tests regarding pressure distribution in buildings confirmed the influence of the interior pressure of a building on the development of condensate in window rebates. Tests did not provide a complete explanation regarding influences on the formation of condensate. The use of sealing on the inside between wings and frames proved to be a vital aspect for avoiding condensate.

Three mathematical models were compared to study the deformation behavior of laminated wood-profiles made from different types of wood. The correlation of the results was similar for all models, therefore the model "single-span girder suspended in two points and influenced by a momentum at the end of the girders" was chosen. In this case, it is possible to calculate the distortion caused by different climates both on the inside and the outside respectively, taking into consideration the relative humidity throughout the year.

Environmental humidity and longitudinal swelling of wood – specified by the swelling coefficient "h" in [% / %] - influence the distortion considerably. The swelling coefficient was the greatest factor of uncertainty in the calculations since other sources provided a great variety of strongly deviating figures.

During the research project the coefficient for longitudinal swelling of wood „h“ was determined for 10 different types of wood. For greater accuracy a work piece not meeting the DIN 52184 standard was selected.

Evaluating the calculations of the distortion in differential climates revealed that the swelling coefficient of the outer segments of the laminated wood-profiles had a greater influence on the distortion of the than the swelling coefficient of the inner segments of the laminated wood-profiles.

Following the objectives of this study, the findings provide several guidelines for users focusing on the following aspects:

- Indoor glass surface temperature
- Condensate on thermal bridges of the notch
- Laminated wood-profiles of different types of wood
- Condensate in rebates
- Condensate in glass rebates

1 Ziel des Projektes

Die Beobachtung der Marktentwicklung [VFF 2005] und das Verhalten der Bauherrn bei der Kaufentscheidung für Fenster lassen den Schluss zu, dass das heutige Holzfenster den Vorstellungen des Marktes nicht mehr gerecht wird [Thaler 1999]. Die Nachfragen nach Oberflächen in Holzdekor bei anderen Rahmenwerkstoffen für Fenster lassen aber den Wunsch der Bewohner und Nutzer von Gebäuden erkennen, ihr Umfeld mit Holz zu gestalten. Dies lässt erwarten, dass mit der Entwicklung eines innovativen Fensters auch auf der emotionalen Ebene beim Bauherrn Interesse für Holzfenster zu wecken ist.

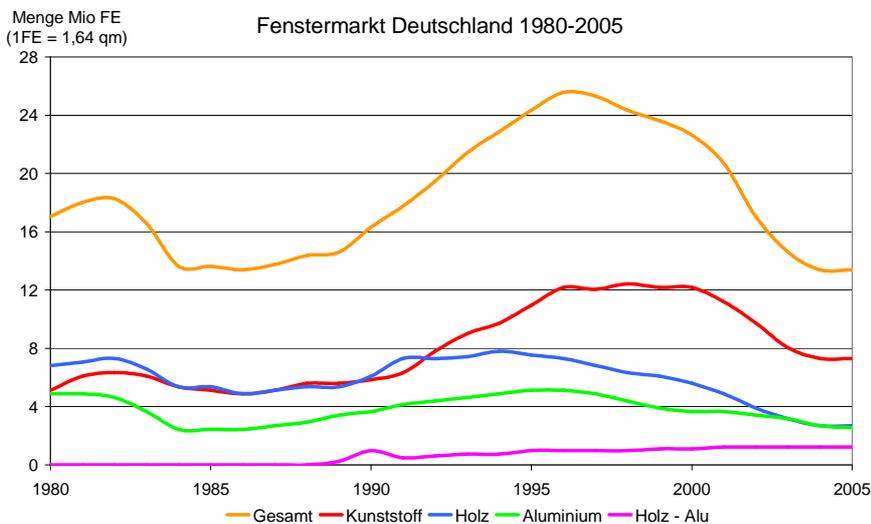


Abbildung 1: Entwicklung der Marktanteile in Deutschland

Das Teilprojekt 19 des Projekts „Holzbau der Zukunft“ hat deshalb das Ziel, Grundlagen dafür zu erarbeiten, dass wirtschaftliche Konstruktionen mit einer angemessenen Nutzungsdauer [IEMB 2004] bei vertretbarem Aufwand für die Wartung [Schröder 2005] unter Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen hergestellt werden können. Der Wunsch der Bauherrn, bei den Fensterrahmen dekoratives Holz, welches in die Raumgestaltung mit einbezogen wird, zu nutzen, ist dabei zu berücksichtigen.

Soweit es technisch sinnvoll erscheint, werden auch Kombinationen mit anderen Werkstoffen wie Kunststoff und Metall mit einbezogen. Der Vorteil der einfachen Bearbeitung des Holzes und damit der Freizügigkeit in der Gestaltung und Profilgebung ist dabei zu erhalten.

Es ist nicht das Ziel, ein genormtes Standardfenster [DIN 68121 1984] zu entwickeln. Vielmehr soll durch das Projekt den Fensterherstellern Orientierungswissen für innovative Fenster zur Verfügung gestellt werden. Dieses soll individuell und ggf. objektbezogen angewandt werden.

Innovative Ansätze in Verbindung mit dem Projekt sind unter anderem:

- die bessere Nutzung der Werkstoffeigenschaften durch die Abkehr von der monolithischen Bauweise der Profile und die Anwendung einer Schichtenbauweise [Schmid 1999];
- die Entwicklung der Grundlagen für ein Baukastensystem, bei dem die technischen Eigenschaften objektbezogen angepasst werden können und auch die Möglichkeit einer Modernisierung besteht;
- die Schaffung von Voraussetzungen für die Einbindung des Fensters in die moderne Gebäudetechnik.

Die Arbeitsteilung zwischen den Teilprojekten 19 und 20 besteht darin, dass in TP 19 schwerpunktmäßig für Werkstoffe, Werkstoffkombinationen und Systeme die grundsätzliche Eignung – auch des Verhaltens im Differenzklima – und die Grundlagen für die Konstruktion von Fenstern und Türen untersucht werden. TP 20 befasst sich im Wesentlichen mit den Bauteilen Fenster und Türen und deren Eignung.

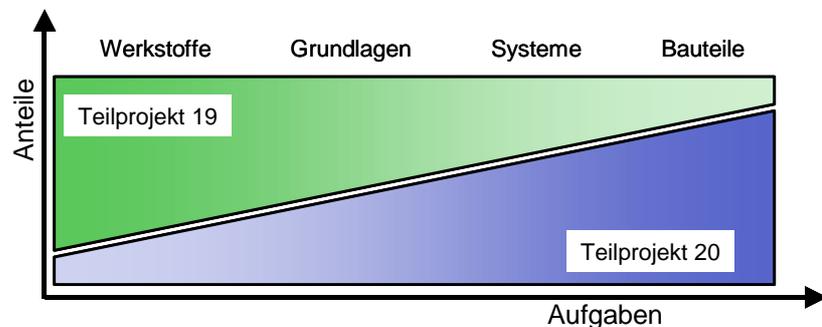


Abbildung 2: Arbeitsteilung zwischen den Teilprojekten 19 und 20

Der Weg zum Ziel ist im Teilprojekt 19 durch den Arbeitsplan mit folgenden Hauptpunkten beschrieben:

- 1) Erarbeitung und Zusammenfassung der in Zukunft notwendigen Aufgaben
- 2) Einflüsse auf Konstruktion und Gestaltung
- 3) Schwachstellenanalyse
- 4) Bewertung konstruktionsspezifischer Ausführungen
- 5) Auswahl von Materialkombination mit Prüfung und Bewertung
- 6) Grundlagen zur Bewertung innovativer Konstruktionen
- 7) Einsatzempfehlungen
- 8) Fertigungstechnologie
- 9) Wissenstransfer

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den Punkten 2 bis 6 des Arbeitsplans. Die Notwendigkeit der Schwerpunktbildung ergibt sich unter anderem daraus, dass bei einem geänderten baulichen Umfeld und mit neuen Werkstoffen auch mit der Verwendung vergüteter Hölzer [Schmid 2006] die in der Praxis vorliegenden Erfahrungen in Frage gestellt werden müssen. Dies gilt auch für Profilquerschnitte, die z. B. aus Schichten unter Verwendung verschiedener Holzarten oder aus Holz und anderen Werkstoffen hergestellt sind.

Die Verknüpfung mit weiteren Teilprojekten ist in Abbildung 3 dargestellt.

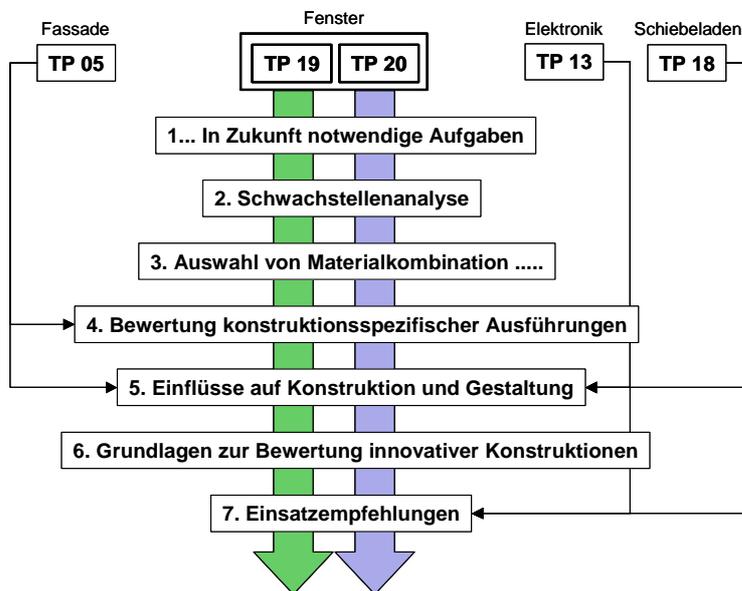


Abbildung 3: Beispiele der Verknüpfung der Teilprojekte Fenster mit anderen Teilprojekten bis zum Arbeitspunkt 7

2 Stand der Forschung

Die Impulse zur Entwicklung des Holzfensters kamen in der Vergangenheit im Wesentlichen aus der Fertigungstechnik mit dem Ziel einer wirtschaftlichen und kostengünstigen Herstellung. Die im Bauwesen notwendigen Voraussetzungen und die Erwartung einer Nutzungsdauer von 30 bis 60 Jahren bei Holzfenstern [IEMB 2004] wurden dabei nicht immer ausreichend beachtet.

Auch der Versuch, ab 1973 den Kenntnisstand zur Konstruktion von Holzfenstern in DIN 68121 zu dokumentieren und fortzuschreiben, war nur bis in die 80iger Jahre erfolgreich, weil in der Folgezeit grundsätzliche Fragen zur Konstruktion nicht geklärt werden konnten. Auch im Rahmen der RAL Gütesicherung Holzfenster [RAL 1989] konnte das vorliegende Wissen zur Herstellung von Holzfenstern nicht immer vermittelt und umgesetzt werden.

Die Forschung reagierte letztlich nur auf die Entwicklung der Fertigungstechnik [Schmid 1975] und die Entwicklungen der Zulieferindustrie [Seifert 1972] [Schmid 1975] [Schmid 1984-1] [Schmid 1984-2]. Auch konnte die Übernahme des in DIN 68121 beschriebenen Fensters zum Standardfenster und damit zum Maßstab der Bewertung aller Holzfenster des deutschen Marktes nicht verhindert werden. Dies ist noch heute ein wesentlicher Hemmschuh für die Weiterentwicklung und für Innovationen bei Holzfenstern.

Darüber hinaus gab es Umsetzungsprobleme bei den vorliegenden Erkenntnissen, so zum Beispiel bei der Verleimung der Rahmenverbindungen und der Abdichtung von Fugen, mit weitreichenden Folgen für die Nutzungsdauer und die Gebrauchstauglichkeit von Holzfenstern [ift Seminar 1987].

Werkzeughersteller und Maschinenhersteller favorisieren die Herstellung von Holzfenstern mit der Profilausbildung IV 68, obwohl eine kritische Hinterfragung zur Gebrauchstauglichkeit und Nutzungsdauer des Fensters notwendig wäre. Das Holzfenster mit der Profilausbildung IV 68 nach DIN 68121-1 gilt auch noch heute über die Grenzen Deutschland hinaus als ein technisch hoch entwickeltes Bauteil.

3.4.3 Profil-Kurzzeichen IV 68

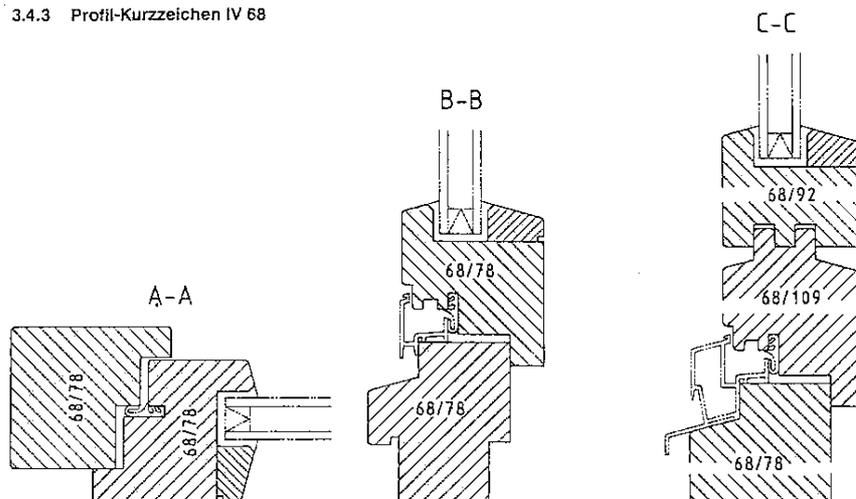


Abbildung 4: Holzfensterprofil IV 68 nach DIN 68121-1

DIN 68121 orientiert sich mit den Anforderungen am baulichen Umfeld sowie an den Wohnbedürfnissen zwischen 1970 und 1990 und wird deshalb insbesondere den geänderten Nutzerbedürfnissen und der erhöhten Anforderung an die Dichtigkeit der Gebäudehülle bei Wohn- und Wirtschaftsgebäuden nicht gerecht [Hegner 2002]. Die damit verbundenen Auswirkungen auf das Fenster verlangen einen neuen Ansatz, der diesen geänderten Anforderungen gerecht wird und vorausschauend die Bedürfnisse der Nutzer und die technische und architektonische Entwicklung berücksichtigt.

Die Erfahrung, dass das Holzfenster im Hochhausbau der 70iger Jahre überfordert war, führt zur Einführung des in der Schweiz entwickelten Holz-Aluminium-Fensters. Nach einer zunächst positiven Entwicklung im Schulbau und im Verwaltungsbau stagnierte die Entwicklung und so konnte sich das Holz-Aluminium-Fenster auf dem deutschen Markt gegen Fenster aus anderen Rahmenwerkstoffen nicht weiter durchsetzen. Der derzeitige Marktanteil wird mit unter 5 % angegeben [VFF 2005].

3 Für die Zukunft notwendige Aufgaben

Bei der Entwicklung von neuen Fenstern muss der Mensch im Mittelpunkt stehen [Scharioth 2004]. Aus dieser Forderung ergeben sich unter anderem Auswirkungen auf die Behaglichkeit des Raumklimas und Anforderungen an die Nutzersicherheit [Hohenstein 2002]. Weiter wird ein einfacher und erfassbarer Bedienungsablauf vorausgesetzt, dessen Merkmale bei der Festlegung der Beschläge zu beschreiben sind.

Bei der Bewertung technischer Eigenschaften kann auf derzeit gültige Regelwerke zurückgegriffen werden. So sind in DIN EN 14351-1 „Fenster und Außentüren – Produktnorm“ [DIN EN 14351-1 2006] die gemeinsamen europäischen technischen Festlegungen zur Prüfung, Klassifizierung und Kennzeichnung geregelt. Im Gegensatz zur bisherigen Praxis in deutschen Normen beschreibt die europäische Produktnorm DIN EN 14351 aber nur die Bauteileigenschaften ohne Hinweis auf die Eignung bzw. den möglichen Einsatz im konkreten Anwendungsfall.

Die Vorgaben für den konkreten Anwendungsfall sind für baurechtlich relevante Bereiche national geregelt, so z. B. in der Energieeinsparverordnung oder durch die Bauaufsicht in sicherheitsrelevanten Bereichen. Für die übrigen nicht geregelten Eigenschaften wird die Entscheidung dem Bauplaner als Aufgabe zugeordnet. Durch Regelwerke außerhalb von Normen soll aber die verbleibende Lücke durch Einsatzempfehlungen [ift-Richtlinie 2005] abgedeckt werden.

Für die nächsten Jahre ist zu erwarten, dass die Anforderungen an den Wärmeschutz [EnEV 2007], zum Teil auch an den Schallschutz, die Einbruchhemmung und die Lüftung [DIN 1946-6 1998] weiter fortgeschrieben werden, so dass die Entwicklung innovativer Fenster auch die Möglichkeiten der Modernisierung und Nachrüstung vorhandener Fenster berücksichtigt muss.

Weiter ist ein einfacher Austausch der Fenster am Gebäude notwendig, um die Renovierung und die Modernisierung von Gebäuden zu erleichtern, die bei der steigenden Mobilität der Bewohner in kürzeren Abständen als in der Vergangenheit anfallen wird.

Für die Sicherstellung und Verbesserung der Marktanteile des Holzfensters, ist die Pflege und Weiterentwicklung bestehender Konstruktionen zwar notwendig aber nicht ausreichend.

Das heute übliche Holzfenster wird aus verschiedenen Gründen als anfällig und pflegebedürftig eingestuft. Eine Verbesserung der Akzeptanz wird nur dann möglich sein, wenn unter wirtschaftlichen Bedingungen Holzfenster angeboten werden können, die – bezüglich des Aufwands an Instandhaltung – den Vorstellungen der Bauherren entgegenkommen. Diese Vorstellungen gehen davon aus, dass der Aufwand am Fenster zur Sicherung der Gebrauchstauglichkeit minimiert sein muss und auch nach einer vorübergehenden groben Vernachlässigung die Funktionsfähigkeit, die Sicherheit und ein ansprechende Aussehen mit vertretbarem Aufwand wiederhergestellt werden kann.

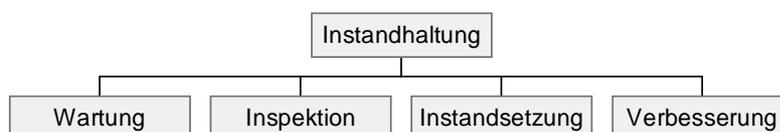


Abbildung 5: Umfang der Instandhaltung [Schröder 2005]

Bei der Verwendung von Holz als einem nachwachsenden und biologisch abbaubaren Werkstoff wird diese Forderung nicht ohne besondere Maßnahmen erfüllt werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn die ökologische Bewegung die Verwendung nachwachsender Werkstoffe und damit auch die Verwendung von heimischem Holz erwartet.

Diese Erwartung kann nur mit grundsätzlichen Überlegungen in Verbindung mit entsprechendem Forschungsbedarf erfüllt werden. Weiter sind Überlegungen unter anderem zur Verbesserung des Wärmeschutzes notwendig, da durch die zu erwartende Fortschreibung der Verordnungen zur Energieeinsparung [Hegner 2002] bei den heute üblichen Konstruktionen von Fenstern und Fassaden aus Holz die derzeitigen Möglichkeiten nicht ausreichend sind.

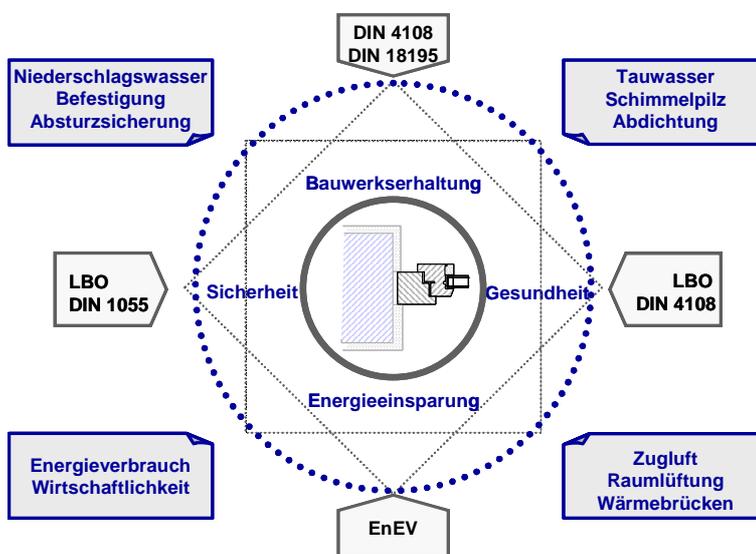


Abbildung 6: Notwendige Schutzziele bei der Konstruktion von Fenstern

Dabei handelt es sich um:

- die Möglichkeit der Anpassung von Fenstern und Fassaden an die Wünsche der Architektur,
- das Aussehen und die Nutzerfreundlichkeit aus der Sicht des Bauherrn und Nutzers,
- das Preis-/Leistungsverhältnis,
- der zumutbare Aufwand für Instandhaltung und Instandsetzung verbunden mit einfach durchzuführenden Maßnahmen,
- die Ökologie unter Berücksichtigung der Wiederverwertung und Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer.

Neben diesen grundsätzlichen Anforderungen sind es die Anforderungen an:

- den Wärmeschutz im Interesse der Energieeinsparung,
- den Schallschutz zur Sicherung eines angenehmen Umfelds im Gebäude,
- den Einbruchschutz, um das Gefühl der Sicherheit und Geborgenheit in den „eigenen vier Wänden“ zu gewährleisten.

Andere funktionelle Eigenschaften werden als selbstverständlich vorausgesetzt. Sie sind auch unausgesprochen unabdingbarer Bestandteil der Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum.

Ansätze zur Entwicklung neuer Fenster müssen sich auch an den Erfahrungen der vergangenen Jahre orientieren, um die Wiederholung von Fehlern zu vermeiden. Eine Analyse von Schadensfällen an Holzfenstern [ift Seminar 1987] [ift Seminar 1993] [Seifert 1970] [Willeitner 1981] war deshalb notwendig.

Die Diskussion der Eignung bestimmter Holzarten und Holzqualitäten geht ebenfalls weit zurück und wurde mit jeder sich andeutenden Schadenswelle des Holzfensters neu belebt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse [Schmid 1993] konnten bisher nur teilweise umgesetzt werden, da die Auswahl geeigneter Holzarten [VFF HO.06 2004] [VFF HO.02 2003] und Holzqualitäten begrenzt war.

Eine pauschale Bewertung der Summe der Eigenschaften der Konstruktion im direkten Vergleich zu den betrachteten Holzarten zeigt Abbildung 7 als erste Näherung. Die Abbildung vermittelt, dass sich die Summe der notwendigen Eigenschaften eines gebrauchstauglichen Fensters [Schmid 2006] aus den natürlichen Holzeigenschaften und den zusätzlichen technischen Maßnahmen bildet.

Dabei ist mit dem Anstieg der natürlichen Holzeigenschaften ein geringerer zusätzlicher technischer Aufwand notwendig. Bei einem Abfall der natürlichen Holzeigenschaften steigt der notwendige zusätzliche technische Aufwand, um die Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum sicherzustellen. Der in Abbildung 7 eingetragene Grenzfall des Kiefernspiltholzes lässt die Zusammenhänge aus der praktischen Erfahrung verständlich werden.

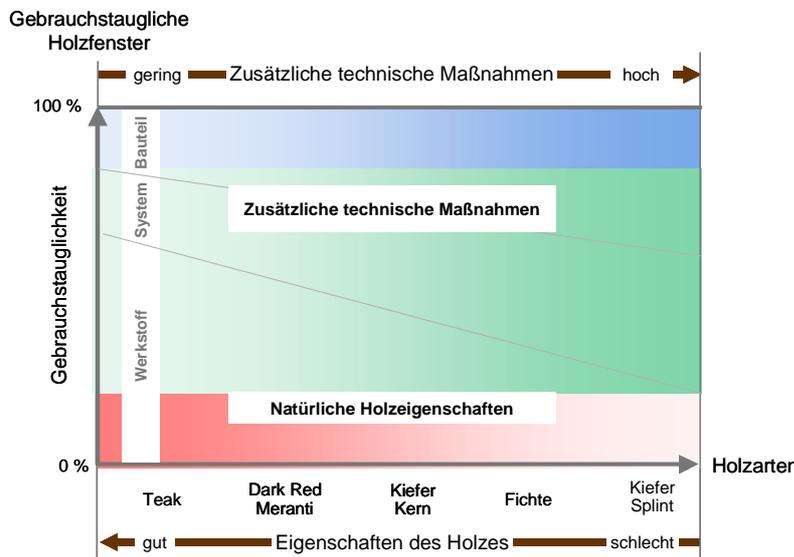


Abbildung 7: Wechselwirkung der natürlichen Holzeigenschaften und der zusätzlichen technischen Maßnahmen in Abhängigkeit der Holzart

In Verbindung mit der Forderung, auf der Außenseite der Fenster ein witterungsbeständiges Holz einzusetzen und für die Raumseite ein dekoratives Aussehen sicherzustellen, stellt sich zwangsläufig die Frage, ob der monolithische Aufbau der Profile der Holzfenster zukünftig nicht durch einen Schichtenaufbau (Abbildung 8) ersetzt werden sollte.

Bei einem Schichtenaufbau können die Eigenschaften der einzelnen Schichten optimiert werden und z. B. für die äußere Schicht gegebenenfalls durch Verzicht auf andere Eigenschaften die Witterungsbeständigkeit erhöht werden. Die Anzahl und die Verbindung der Schichten kann dabei zunächst offen bleiben (Abbildung 9).

Was fehlt, ist Orientierungswissen [Schmid 2006], welches vom Konstrukteur abgerufen werden kann, um ein gebrauchstaugliches Fenster vorzubereiten und um die Voraussetzungen für die Herstellung zu schaffen. Die Nutzungserwartung des Bauherrn muss dabei im Mittelpunkt stehen. Auch sind die Gestaltungsvorgaben der Architektur, soweit sie technisch möglich sind, zu beachten.

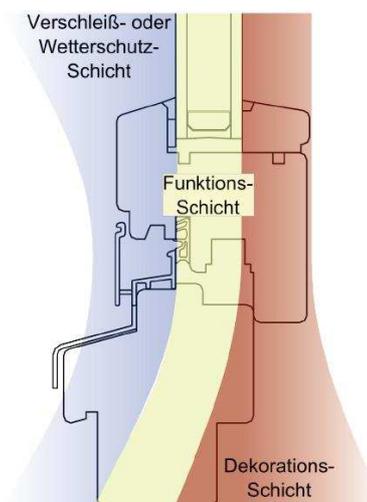


Abbildung 8: Struktur der Fensterprofile in Schichten mit Zuweisung der Aufgaben

Profil	Aufbau	Verbund
Vollholz		voll
Verbundholz alle Lagen aus Holz		verklebt
Sandwich Decklagen aus Holz Mittellage aus verschiedenen Werkstoffen		verklebt
Schichten Decklagen aus Holz Mittellage aus verschiedenen Werkstoffen		mechanisch verbunden

Abbildung 9: Schichtenmodell für den Aufbau von Fensterprofilen unter Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen

4 Schwachstellen

Die Erfahrungen mit Holzfenstern zeigen, dass verschiedene und in der Regel überlagerte Einflüsse die Gebrauchstauglichkeit und Nutzungsdauer ungünstig beeinträchtigen. Bei der Entwicklung neuer Fenster muss deshalb dafür Sorge getragen werden, dass diese Einflüsse so weit zurückgedrängt werden, dass sie auf die Gebrauchstauglichkeit und Nutzungsdauer keinen wesentlichen Einfluss nehmen. Für eine systematische Aufbereitung ist deshalb eine Schwachstellenanalyse notwendig.

Schwachstellen an Holzfenstern ergeben sich aus

- der Herstellung,
- der Konstruktion,
- den eingesetzten Werkstoffen.

Die Schwachstellen zeigen sich in der Regel in Verbindung mit Feuchtigkeitseinwirkungen, wobei das Auftreten von Feuchtigkeit unterschiedliche Ursachen und Erscheinungen haben kann (Abbildung 10). Bei Holz als hygroskopischem Werkstoff wirkt sich im Vergleich zu anderen Werkstoffen die Feuchtigkeit besonders ungünstig aus.

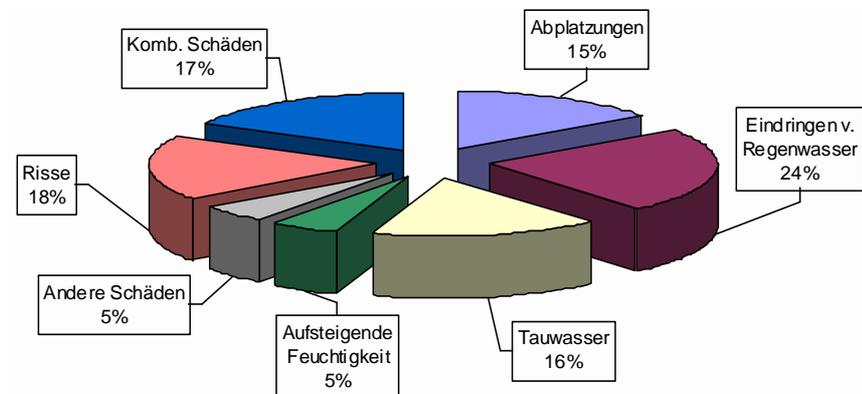


Abbildung 10: Zusammenstellung der Einwirkungen auf Gebäude nach Kupfer mit einem überwiegenden Anteil aus Feuchtigkeitsbeanspruchung

Insofern konzentriert sich die Schwachstellenanalyse auf die Einwirkung von Feuchtigkeit und auf die Schwachpunkte im System, welche die Schäden aus Feuchtigkeitseinwirkung begünstigen oder ermöglichen.

Bezüglich der Feuchtigkeit sind dabei folgende Einwirkungen zu beachten:

- die Luftfeuchtigkeit des Raumklimas und des Außenklimas,
- die Tauwasserbildung an der Oberfläche, im Innern der Konstruktion und in den Falzen,
- die Einwirkungen von Niederschlagswasser.

Das Zusammenwirken von Werkstoff, System und Bauteil führt in Verbindung mit Feuchtigkeit zu folgendem Ablauf:

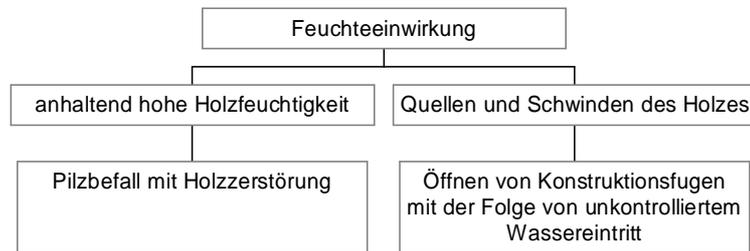


Abbildung 11: Folgen bei Feuchtigkeitseinwirkung

Eine Analyse der mit Feuchtigkeitseinwirkungen verbundenen Schäden erleichtert die Erarbeitung von Lösungsansätzen für neue Konstruktionen.

Die Abschätzung des Risikos beschränkt sich auf bisherige Holzfensterkonstruktionen. Die Analyse erfolgt an Fenstern aus verschiedenen Holzarten und zeigt in Tabelle 1 eine Zusammenfassung von Schadensfällen aus dem Zeitraum nach 1983 [Schmid 1993] [Schmid 1997] [Schmid 2007].

Nr.	Aufgetretene Schäden	Häufigkeit	Ermittelte Ursachen	Anteil
1	Offene Brüstungsfugen an den Rahmenverbindungen	82 %	Zu feuchtes Holz Verleimfehler Oberflächenbeschichtung	8 % 51 % 41 %
2	Fehlerhafte Abdichtung	73 %	Glasabdichtung, Ablösung Bauanschlüsse, Ablösung	55 % 45 %
3	Oberflächenbeschichtung	68 %	UV-Schutz Schichtdicke Verarbeitung Unverträglichkeit Holzinhaltsstoffe	38 % 33 % 19 % 7 % 3 %
4	Kantenausbildung	39 %	Unzureichende Rundung	100 %
5	Wetterschutzschiene	39 %	Tiefe der Schiene Abdichtung der Schiene	48 % 52 %
6	Gängigkeit der Flügel	27 %	Fehlende Ausrichtung	100 %
7	Glashalteleisten	20 %	Passung im Eckbereich / unzureichende Befestigung	100 %
8	Holzqualität	15 %	Fehlerhafte Ausdübelungen	100 %
9	Glasfalzöffnung	11 %	Zur Raumseite hin offen	100 %

Tabelle 1: Auswertung von Gutachten aus dem Zeitraum von 1983 bis 1993 zu Schäden an Holzfenstern [Schmid 1993]

Die Auflistung in Tabelle 1 zeigt, dass sich die allgemeinen Schäden und ihre Ursachen nach 1983 nicht wesentlich verändert haben, wenngleich Verschiebungen der Häufigkeit festzustellen sind.

Die häufigsten Schäden heute sind Schäden aus Feuchtigkeitseinwirkungen an Holzfenstern, wie sie in Abbildung 12 skizziert und in Tabelle 2 mit Stichworten erläutert sind.

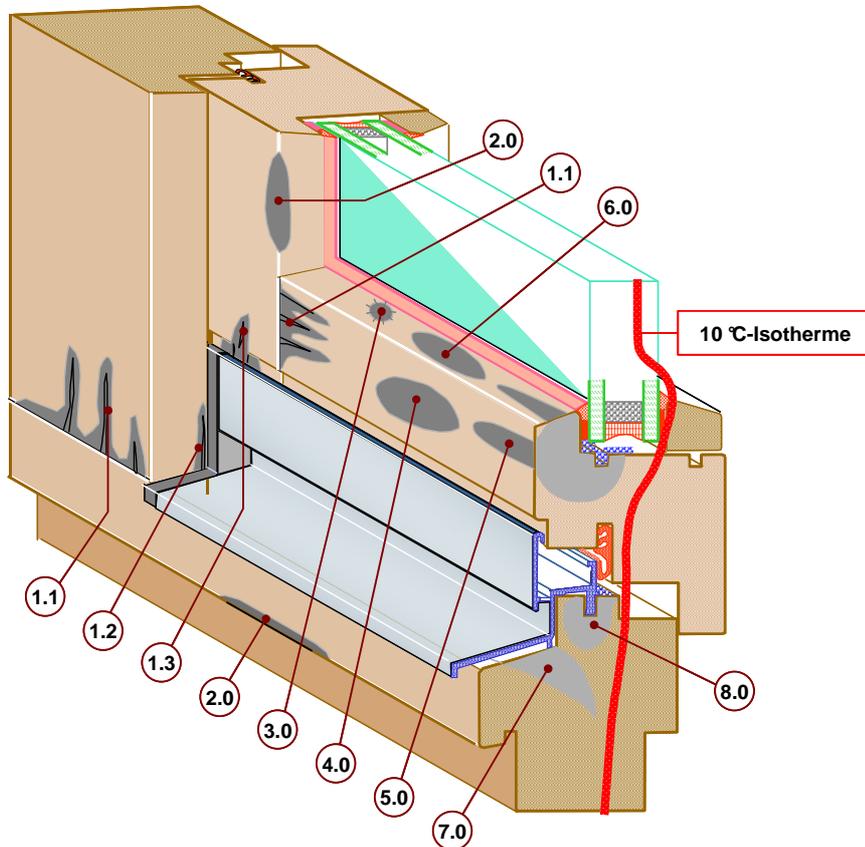


Abbildung 12: Darstellung von Schäden an Holzfenstern, die sich in der Regel durch die Veränderung der Oberfläche zeigen

Nr.	Schadensbeschreibung
1.1	Wassereintritt in die Konstruktion
1.2	Wasseransammlung in Feuchtenestern
1.3	Wasseraufnahme über Hirnholz
2.0	Kantenschaden
3.0	Stoßbelastung (z. B. Hagelschlag)
4.0	Abwitterung
5.0	Tauwasserbildung im Glasfalz durch konvektiven Feuchtetransport
6.0	UV-Schaden
7.0	Inhomogenitäten im Holz
8.0	Tauwasserbildung im Falz zwischen Flügeln und Blendrahmen

Nr.	Schadensbeschreibung	
	Schadensbild	Ursachen
1.1	Wassereintritt in die Konstruktion	
	Von der Fuge ausgehende Ablösung des Anstrichfilms Rissbildung im Holz Vergrauung der Holzoberfläche	Kapillarer Wassereintritt über offene Konstruktionsfugen Eintritt von Feuchtigkeit in die Grenzschicht zwischen Holz und Anstrichfilm Tritt sehr häufig an unzureichend verleimten Rahmenverbindungen auf.
1.2	Wasseransammlung in Feuchtenestern	
	Von einem „Feuchtigkeitsnest“ ausgehende Anstrichablösung Rissbildung im Holz Vergrauung der Holzoberfläche	Störung des Feuchtgleichgewichts ausgehend von Fugen im Eckbereich Das angesammelte Wasser kann in Trockenzeiten nicht wieder abgegeben werden.
1.3	Wasseraufnahme über Hirnholz	
	Vom Hirnholz ausgehende Ablösung des Anstrichfilms Rissbildung im Holz Vergrauung der Holzoberfläche	Nicht ausreichend beschichtetes Hirnholz, so dass Wasser über offene Kapillaren ins Holz eindringen kann.
2.0	Kantenschaden	
	Von der Profilkante ausgehende Ablösung des Anstrichfilms Vergrauung der Holzoberfläche	Unzureichende Dicke des Anstrichfilms an der Profilkante, im Regelfall verursacht durch eine unzureichende Rundung der Kanten
3.0	Stoßbelastung (z. B. Hagelschlag)	
	Rissbildung im Anstrichfilm Feuchtigkeitshinterwanderung des Anstrichfilms Anstrichablösung Vergrauung der Holzoberfläche	Durch mechanische Einwirkungen verursachte Risse im Anstrichfilm
4.0	Abwitterung	
	Zu dünner Anstrichfilm Feuchtigkeitshinterwanderung des Anstrichfilms Anstrichablösung Rissbildung im Holz Vergrauung der Holzoberfläche	Unzureichende Schichtdicke des Anstrichfilms als Folge unzureichender Beschichtung oder zu langer Instandhaltungsintervalle
5.0	Tauwasserbildung im Falz durch konvektiven Feuchtetransport	
	Vergrauung des Anstrichfilms Flächige Ablösung des Anstrichfilms	Konvektiver Feuchtetransport im Glasfalz und im Flügelfalz Beeinträchtigung der Anstrichhaftung durch rückwärtige Feuchtebelastung (Flüssigwassertransport im Holz)
6.0	UV-Schaden	
	Vergrauung des Holzes unter dem Anstrichfilm Flächige Ablösung des Anstrichfilms	Unzureichende oder fehlende UV-Schutzwirkung des Anstrichfilms

Nr.	Schadensbeschreibung	
	Schadensbild	Ursachen
7.0	Inhomogenitäten im Holz	
	Anstrichablösung durch Hinterwanderung, ausgehend von erhöhter Holzfeuchtigkeit	Veränderungen im Holz durch Bakterien- oder Pilzbefall erhöhen das kapillare Saugvermögen und führen damit zu hohen Holzfeuchtigkeiten.
8.0	Tauwasser im Falz zwischen Flügel und Blendrahmen	
	Durchfeuchtung des Holzes Flächige Ablösung des Anstrichfilmes Schimmelpilzbildung	Konvektiver Feuchtetransport im Falz zwischen Flügel und Blendrahmen Fehlende Abstimmung der inneren Dichtebene mit der Mitteldichtung

Tabelle 2: Beschreibung der Schäden am Holzfenster und Zuordnung der Schwachstellen

Die in der Zeile 1 beschriebenen Schäden stehen in direktem Zusammenhang mit dem kapillaren Wassertransport im Holz.

Der Wassereintritt über offene Fugen (1.1) ist bei den heutigen Holzfenstern sowohl auf Mängel in der Herstellung als auch auf Schwachpunkte in der Konstruktion zurückzuführen. Die Schlitz-Zapfenverbindungen, wie sie im heutigen Fensterbau als Rahmenverbindungen zur Anwendung kommen, sind ausführungsempfindlich und verleiten aufgrund der fertigen Oberflächenbearbeitung der Profile vor dem Zusammenbau der Rahmen dazu, Brüstungen und Zapfenflächen nicht vollflächig zu verleimen, damit die bearbeitete Rahmenoberfläche nicht durch ausgetretenen Klebstoff verunreinigt wird. Die Verunreinigung der Oberfläche durch Klebstoff führt zu einer veränderten Aufnahme des Anstrichmittels, die sich bei Lasuranstrichen durch partielle Farbveränderungen zeigt.



Abbildung 13: Offene Fugen an Rahmenverbindungen aufgrund unzureichender Verleimung als häufige Schadensursache bei Fenstern

Die Umsetzung des Grundsatzes, dass bei der Verleimung aus der Fuge Leim austreten soll, wird damit nicht beachtet, mit der Folge, dass sich die Fugen der unzureichend verklebten Verbindung öffnen und Wasser eindringen kann.

Die Anstrichschäden im Bereich offener Fugen sind in der Regel die Folge des Wassereintritts. Durch die Unterwanderung des Anstrichfilms mit Wasser wird die Anstrichhaftung am Holz gemindert, so dass Ablösungen auftreten. Damit handelt es sich nicht um Schäden, die vom Anstrich ausgehen, sondern um Schäden, die ihre Ursachen in der Konstruktion und in der Herstellung haben.



Abbildung 14: Beginnende Feuchtigkeitsschäden etwa 1 Jahr nach dem Einbau durch Eindringen von Feuchtigkeit über eine ungeschützte Konstruktionsfuge. Wegen der geringen Schichtdicke des Anstrichs sind keine Anstrichschäden, sondern nur Wasserbeeinträchtigungen am Holz erkennbar.

Wasseransammlungen in Feuchtenestern (1.2) werden durch konstruktive Schwachpunkte verursacht, bei denen der Grundsatz, dass anfallendes Wasser unmittelbar und kontrolliert abgeführt werden muss, nicht beachtet wurde. Die Feuchtigkeitseinwirkung auf den Anstrichfilm ist damit anhaltend, so dass Feuchtigkeit über den Anstrich in das Holz eindringt. Die damit verbundene Feuchtebelastung führt durch Überbeanspruchung auch zum Versagen von Klebstoff- und Dichtstoffugen und ermöglicht zusätzlich den unkontrollierten Eintritt von Wasser in das Holz.

Der Wasseraufnahme über freiliegendes Hirnholz (1.3) kann durch eine ausreichende Beschichtung des Holzes entgegengewirkt werden. Zum Teil ist dies nur durch Nacharbeit am fertigen Rahmen erreichbar, da durch die Beschichtungsverfahren das Hirnholz in der Regel nicht ausreichend geschützt wird. Freiliegendes Hirnholz wird auch durch eine schlechte Bearbeitung mit Holzausrissen begünstigt.

Die Anstrichschäden im Kantenbereich (2.0) sind durch Profilierung des Holzes bzw. durch gleichmäßigen Auftrag des Anstrichfilms weitgehend zu vermeiden. Werden die Kanten gerundet, so hat sich ein Radius von 2 mm als ausreichend erwiesen, um eine zur Fläche vergleichbare Schichtdicke zu erhalten und einen vorzeitigen Abbau des Anstrichfilms an der Kante zu vermeiden. Den Kanten-schäden zugeordnet sind aber auch Schäden, die durch die Quetschung von Holzfasern bei der Bearbeitung aufgrund ungeeigneter Werkzeuge entstehen.

Anstrichschäden durch Stoßbelastung (3.0) an horizontalen Profilflächen entstehen in vielen Fällen durch Hagelschlag (Abbildung 15). Die Schadensentwicklung ist sowohl von der Belastbarkeit des Holzes als auch von der Rissanfälligkeit des Anstrichfilms abhängig. Die Auswirkungen können durch eine regelmäßige Nachbehandlung beanspruchter Flächen gemindert werden. Dabei ist zur Kenntnis zu nehmen, dass Hagelschlag zwar durch bauliche Maßnahmen gemindert, durch die Konstruktion des Fensters aber nicht verhindert werden kann.



Abbildung 15: Anstrichschäden durch Hagelschlag

Anstrichschäden, die durch die Abwitterung des Anstrichfilms (4.0) entstehen, sind mit Ausnahme bei Dünnschichtlasuren nach vorliegenden Erkenntnissen nicht häufig anzutreffen. Schäden, die der Abwitterung zugeordnet werden, sind vielfach Schäden, bei denen sich der Anstrichfilm vom Holz ablöst. In diesen Fällen wandert Feuchtigkeit in den Grenzbereich zwischen Anstrichfilm und Holz und schwächt die Anstrichhaftung auf dem Holz, so dass es zu Ablösungen kommt. Die Erfahrung zeigt, dass die bisherige Auffassung, dass der notwendige Oberflächenschutz von Fenstern und Fassaden nur über eine große Schichtdicke des Anstrichfilms und damit bei Lasuranstrich nur über Dickschichtlasuren erreicht wird, nicht haltbar ist.

Es ist zwar zutreffend, dass sich mit der Schichtdicke die Schutzwirkung erhöht und der Zeitraum bis zur notwendigen Nachbehandlung verlängert. Die notwendigen Voraussetzungen, um die Eigenschaften der Beschichtung im System zu nutzen, können aber am Bauteil nicht sichergestellt werden.

Wie auch die Schadensanalyse zeigte, sind die häufigsten Schadensursachen in Verbindung mit der Unterwanderung des Anstrichfilms zu sehen.

Die Aufgaben, die der Schichtdicke zugeordnet werden, sind in der Regel:

- Verlängerung der Wartungsintervalle,
- Vermeidung der Vergrauung der Holzoberfläche,
- Schutz des Holzes vor zu großer Wasseraufnahme,
- Vermeidung einer zu schneller Austrocknung bzw. Auffeuchtung des Holzes,
- Vermeidung der Entstehung von Oberflächenrissen.

Der konvektive Feuchtigkeitstransport (5.0) und (8.0), wie er in den Fugen und Falzen der Fenster auftritt, führt zu einer hohen und häufig unterschätzten Feuchtigkeitsbelastung des Holzes.

Die treibende Kraft für den konvektiven Feuchtetransport in Fugen und in den Falzen der Fenster sind Druckunterschiede zwischen den Innenräumen eines Gebäudes und der Außenatmosphäre. Mit zunehmender Dichtheit der übrigen Gebäudehülle und der fehlenden kontrollierten Führung der Abluft verstärkt sich der konvektive Feuchtigkeitseintrag über feuchte und warme Raumluft in Fugen und Spalten.

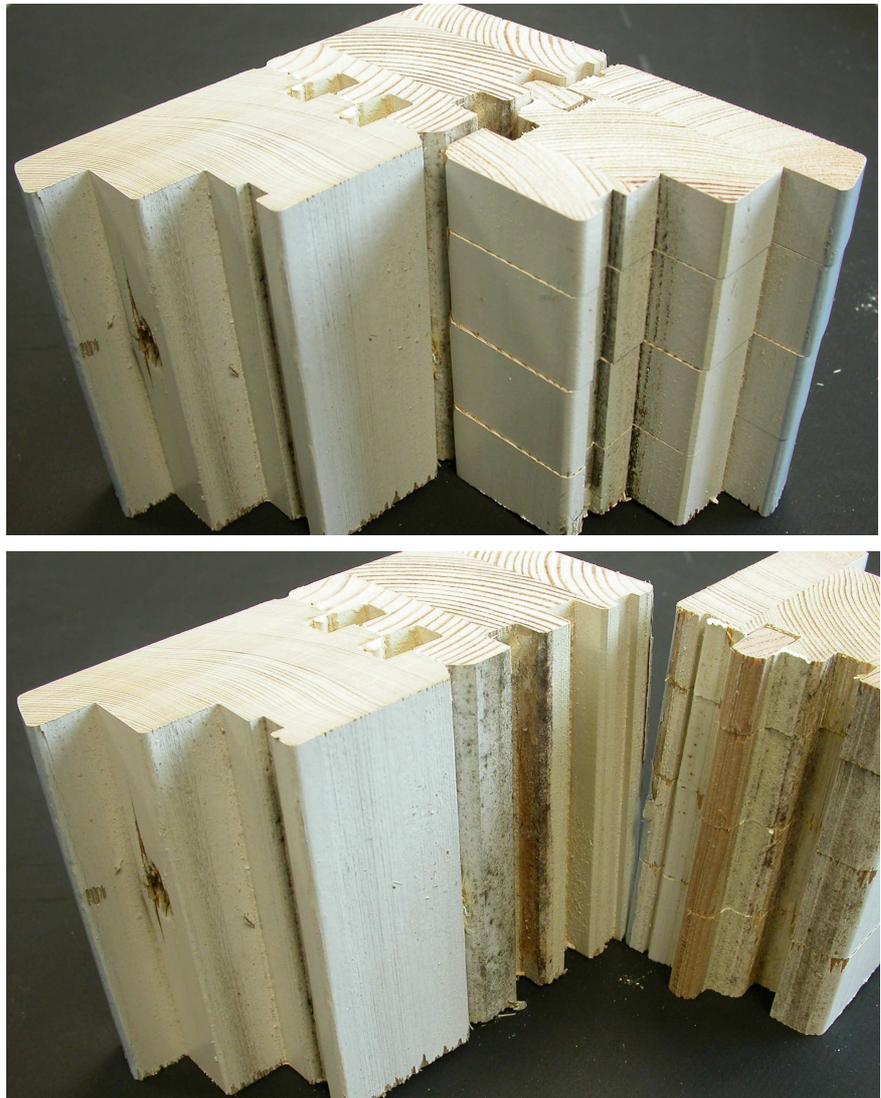


Abbildung 16: Schimmelpilzbildung aufgrund des Eintritts von warmer Raumluft in eine von der Raumseite offene Konstruktionsfuge



Abbildung 17: Schimmelpilzbildung und Holzerstörung durch Pilzbefall als Folge von Tauwasser in den Falzen

Soweit keine definierten Abluftöffnungen vorhanden sind, verbleiben an den Fenstern, z. B. in den Falzen zwischen Flügel und Blendrahmen, nur die Undichtigkeiten der Falzdichtung als Abströmöffnungen.

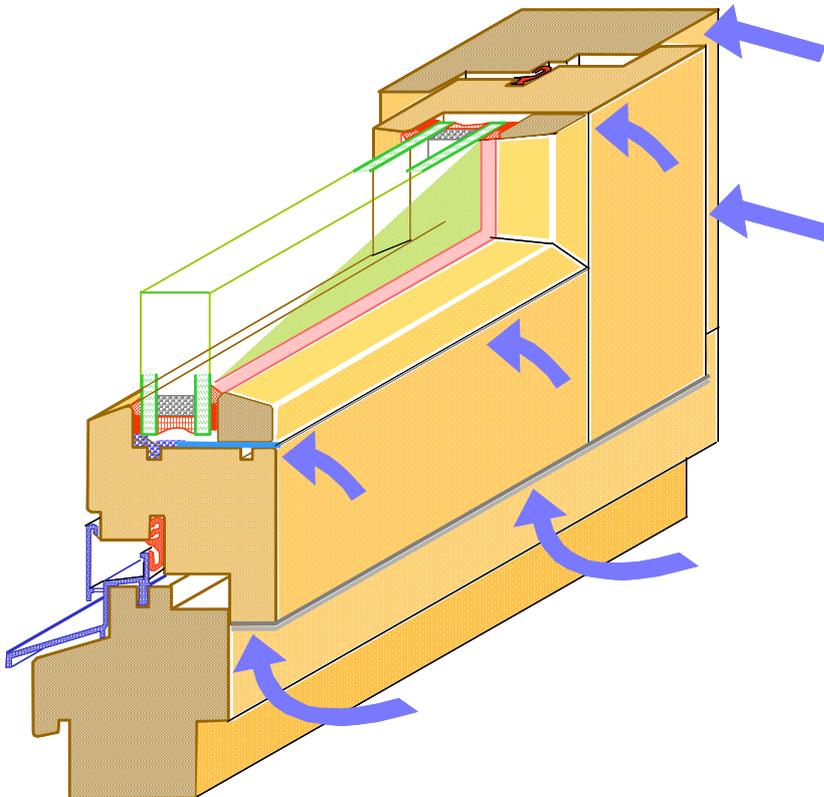


Abbildung 18: Andeutung der Luftströmung in die Falze der Fenster von der Raumseite durch Luftdruckunterschiede zwischen der Raumseite und der Außenseite

Wegen der Wirkung der Falzdichtung ist eine direkte und unmittelbare Durchströmung nicht möglich. Deshalb kommt es zur Umströmung des Fensterrahmens längs des Falzraums. Damit verbleibt ausreichend Zeit zur Abkühlung der warmen Raumluft an den kalten Falzflächen und insbesondere an den Witterschutzschienen, die unter der Taupunkttemperatur liegen, um Tauwasser zu bilden. In den Eckbereichen verstärkt sich nach den bisherigen Beobachtungen der Tauwasseranfall durch die Wirbelbildung abgerissener Stromlinien.

Den Temperaturverlauf und die Feuchtigkeitsverteilung in einem Holzfenster der Profilausbildung IV 68 in Anlehnung an DIN 68121 zeigen Abbildung 19 und Abbildung 21. Die rote Linie beschreibt die 10 °C-Isotherme, die etwa der Taupunkttemperatur des Raumklimas 20 °C/50 % entspricht. Die blaue Linie beschreibt die 0 °C-Isotherme.

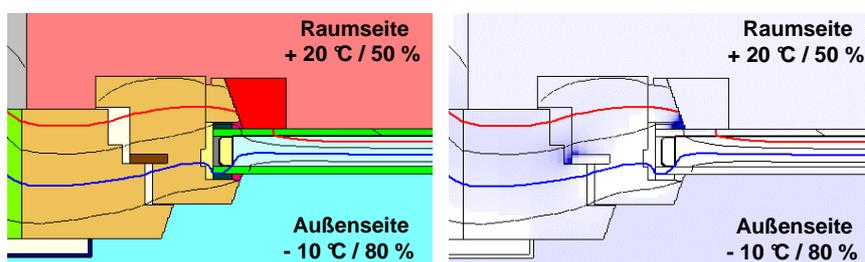


Abbildung 19: Holzfenster IV 68 mit den Temperaturfeldern und der zu erwartenden Verteilung der Feuchtigkeit (rechts im Bild) im seitlichen Querschnitt



Abbildung 20: Tauwasserbildung im Randbereich des Isolierglases

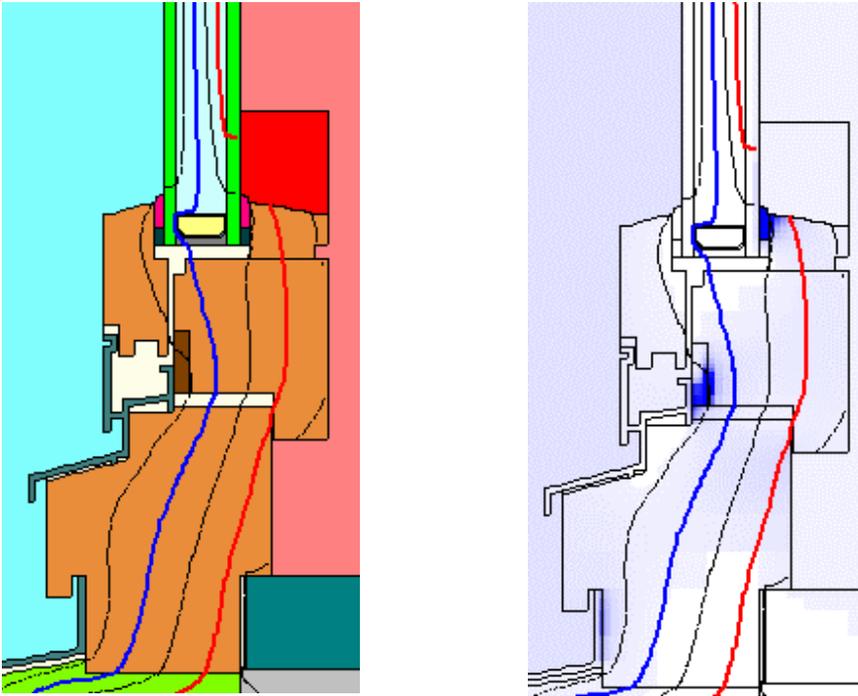


Abbildung 21: Holzfenster IV 68 mit den Temperaturfeldern und der zu erwartenden Verteilung der Feuchtigkeit (rechts im Bild) im unteren Querschnitt der Wetterschutzschiene

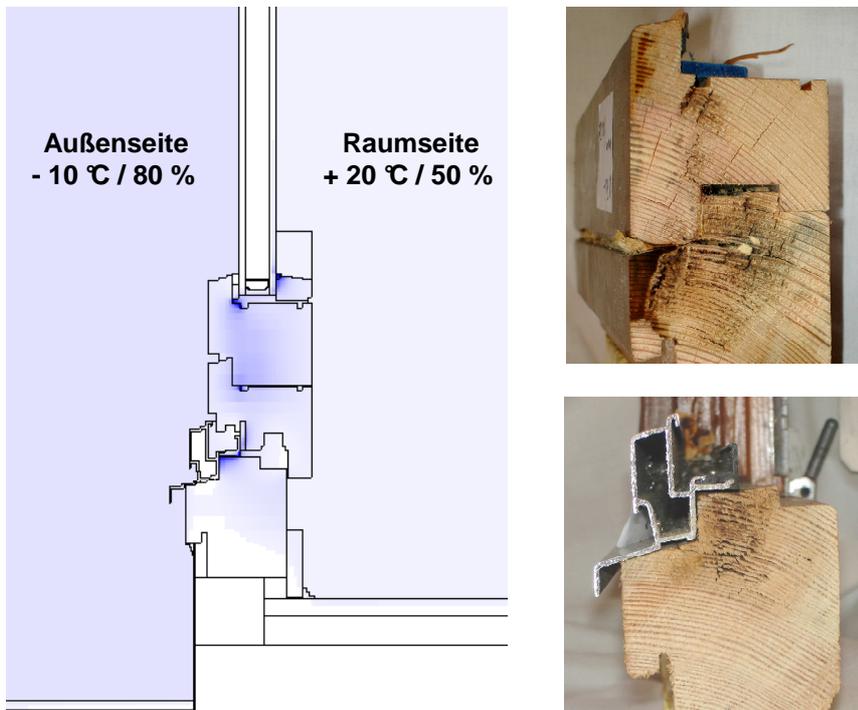


Abbildung 22: Gegenüberstellung der Feuchtigkeitsverteilung nach der Isothermenrechnung mit dem tatsächlichen Schadensfall bei holzerstörender Feuchtigkeitseinwirkung

Die Vergrauerung des Holzes (6.0) unter dem Anstrichfilm ist auf eine unzureichende UV-Schutzwirkung des Anstrichfilms zurückzuführen. Durch die UV-Lichteinwirkung auf das Holz wird Lignin abgebaut und der Verbund der Holzfasern untereinander zerstört. Damit wird auch die Verbindung des Anstrichfilms zum Holz beeinträchtigt. Dies führt zu einem Ablösen des Anstrichfilms, wobei als typisches Merkmal für den Holzabbau ein Faserbelag auf der Rückseite des Anstrichfilms erkennbar ist.

Inhomogenitäten im Holz (7.0) durch den Befall von Mikroorganismen oder durch Pilzbefall führen in den befallenen Bereichen zu einer erhöhten und lang anhaltenden Feuchtigkeitsaufnahme [Willeitner 1971]. Die Inhomogenität ist für das Auge zunächst nicht erkennbar. Erst bei einem direkten Kontakt mit Wasser zeigt sie sich durch eine erhöhte Wasseraufnahme.

Die Folgen sind starke Durchfeuchtungen, die partiell auftreten und bereits bei kurzzeitigem Wasserangebot die Voraussetzungen für das Wachstum von holzzerstörenden Pilzen schaffen. Nach den zwischenzeitlich gewonnenen Erkenntnissen sind die beschriebenen Inhomogenitäten eine häufige Ursache für Schäden an Fenstern. Durch sie wirken sich bereits geringe Feuchtebelastungen nachhaltig auf die Nutzungsdauer aus.



Abbildung 23: Feuchtigkeitsverteilung an einem Blendrahmenquerschnitt als Folge der Vorschädigung des Holzes

Während man Flächen und Kanten von Fensterhölzern mit Anstrichen vor dem Wassereintritt wirksam schützen kann, erweisen sich die Konstruktionsfugen des Fensters als besonders kritisch. Die Flanken dieser Fugen sind in der Regel im äußeren Bereich nicht verleimt und daher für einen Wassereintritt offen. Das Regenwasser dringt über die offene Fugenflanke in das Innere der Konstruktion ein und wird sowohl in Faserrichtung des Holzes als auch quer zur Faser kapillar weitertransportiert. Durch die damit verbundenen Quellvorgänge kommt es in der Konstruktionsfuge zu einer nicht mehr reversiblen Stauchung der Holzfasern, so dass nach der Austrocknung eine offene Fuge bleibt, welche beim nächsten Regen den Wassereintritt in das Innere des Profilquerschnitts weiter begünstigt.

5 Folgerungen für die Weiterentwicklung

Aus der Schwachstellenanalyse folgt, dass sich die Schäden an Holzfenstern überwiegend als Schäden der Oberflächenbehandlung zeigen. Erst bei einer näheren Betrachtung wird deutlich, dass die Anstrichschäden in der Regel Sekundärschäden sind. Die primären Schadensursachen sind auf Schwachpunkte und auf Mängel bei den eingesetzten Werkstoffen, in der gewählten Konstruktion und in der nicht fachgerechten Herstellung zurückzuführen. Das unkontrollierte Eindringen von Feuchte in das Holz wird dadurch ermöglicht.

Dabei handelt es sich um:

- unzureichend verleimte Rahmenverbindungen,
- offene Fugen in Anschlüssen,
- schmale offene Konstruktionsfugen,
- Risse im Holz,
- unzureichend geschütztes Hirnholz,
- Fehlstellen im Anstrich.

Für die Weiterentwicklung der Fenster und Türen ist dies zu berücksichtigen und in Verbindung mit geeigneten Konstruktionen und einer kontrollierten Herstellung die Mängel und damit als Folge auch die Schäden zu vermeiden.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass

- durch das Raumklima und durch die Durchströmung des Gebäudes die Tauwasserbildung an der Oberfläche und die Tauwasserbildung in den Falzen nicht begünstigt wird.
- die wärmetechnischen Eigenschaften des Fensters häufig im Zielkonflikt mit der Vermeidung von Tauwasser stehen.
- die Wasseraufnahme des Holzes nicht über offene Rahmenverbindungen und über Konstruktionsfugen begünstigt wird
- die Verformung von Rahmenhölzern bei Verwendung von Holz unterschiedlicher Struktur und bei unterschiedlichen Holzarten ohne Auswirkung auf die Gebrauchstauglichkeit bleibt.

6 Experimentelle Untersuchungen

6.1 Raumklima

Die Belastung der Fenster durch Feuchtigkeit von der Raumseite steht in direktem Zusammenhang mit dem Raumklima, wobei im Allgemeinen davon ausgegangen wird, dass ein Raumklima mit einer Temperatur von 20 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 50 % aus gesundheitlichen und hygienischen Gründen anzustreben ist.

Durch Messungen des Raumklimas in Wohnungen wurde ein Überblick über die tatsächlichen Verhältnisse angestrebt. In den Jahren 2007 und 2008 wurde das Raumklima in 27 Wohnungen vorwiegend im Großraum München gemessen, wobei die Messung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit in Intervallen von 1 bzw. 5 bzw. 10 Minuten jeweils über 2 Wochen erfolgte. Die überwiegende Anzahl der Messungen erfolgte in Intervallen von 5 Minuten. Für die Messung wurden die autonomen Messgeräte „Data-Logger-EL-USB-2“ eingesetzt.

Je Wohnung wurden die Messungen in mindestens zwei Räumen durchgeführt. In den meisten Fällen wurden dabei zwei Messgeräte je Raum aufgestellt, wovon ein Gerät in unmittelbarer Nähe des Fensters und ein Gerät in der Nähe einer Innenwand platziert wurde.

Die Aufzeichnung einer der Messstellen für eine der gemessenen Wohnungen ist in Abbildung 24 wiedergegeben. Die Aufzeichnung zeigt durch die Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit und der Taupunkttemperatur die Lüftungsintervalle und die Lüftungszeiträume bei Fensterlüftung. Erkennbar aus der Aufzeichnung ist weiter, dass sich nach dem Schließen der Fenster die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb einer kurzen Zeitspanne wieder auf das ursprüngliche Niveau erhöht. Dies ist durch die Speicherung der Feuchtigkeit in den Wänden und in der Einrichtung der Wohnung bedingt.

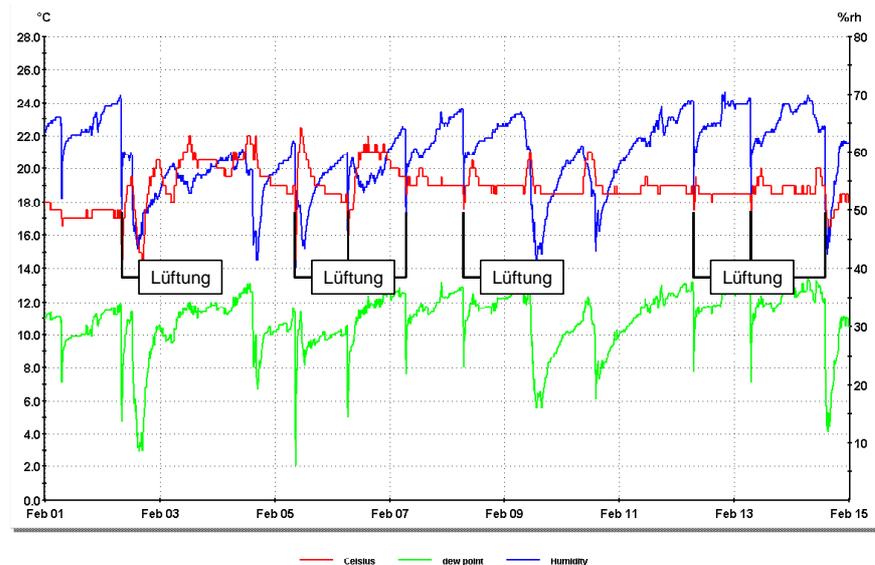


Abbildung 24: Auswertung der Klimaaufzeichnung einer Wohnung für den Zeitraum vom 01.02. – 16.02.2008 mit Angabe der Raumlufttemperatur (rot), der relativen Luftfeuchtigkeit der Raumluft (blau) und der Taupunkttemperatur für das gemessene Raumklima (grün)

In Abbildung 25 sind die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit über der Raumlufttemperatur der Räume in denen durchgeführten Messungen aufgetragen. In der Auswertung zeigen die angegebenen Werte jeweils die Mittelwerte über den gesamten Messzeitraum. Die Auswertung lässt erkennen, dass die größte Anhäufung der Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 60 % bei einer Raumlufttemperatur um 20 °C liegt.

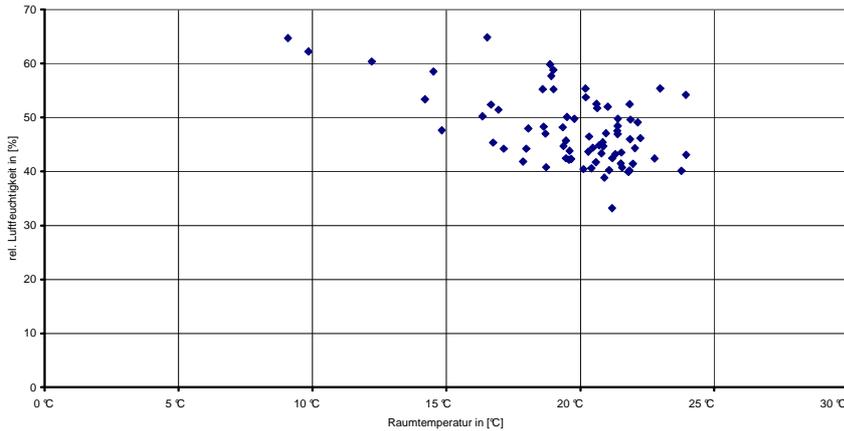


Abbildung 25: Darstellung der Mittelwerte der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit über den jeweiligen Messzeitraum

In Abbildung 26 sind die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit über den jeweiligen Messzeitraum den Monaten, in denen die Messungen durchgeführt wurden, zugeordnet. Die Darstellung zeigt die Tendenz, dass die relative Luftfeuchtigkeit in den Räumen im Dezember am höchsten ist und mit steigender Außentemperatur abfällt.

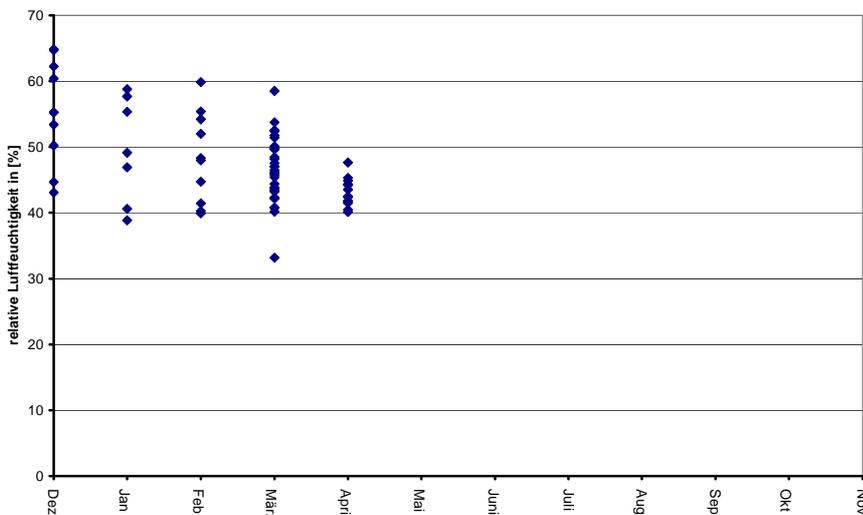


Abbildung 26: Darstellung der Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den gemessenen Räumen, aufgetragen über die Monate, in welchen die Messungen durchgeführt wurden.

In Abbildung 27 sind die Ergebnisse aus Messungen in den Wohnungen in den Jahresgang der relativen Luftfeuchtigkeit des Innen- und Außenklimas eingetragen.

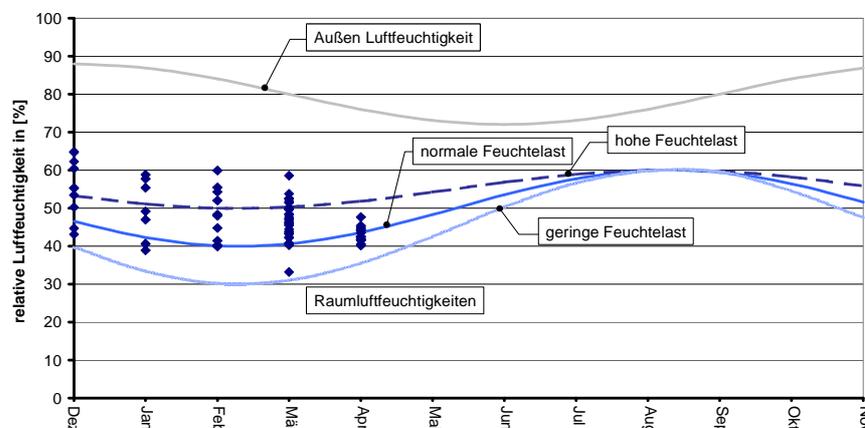


Abbildung 27: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit der gemessenen Wohnungen mit dem Jahresgang der relativen Luftfeuchtigkeit auf der Raumseite und auf der Außenseite nach [Künzel 2006]

Die Auswertung der durchgeführten Messungen des Raumklimas in verschiedenen Wohnungen zeigt bezüglich der relativen Luftfeuchtigkeit eine gute Übereinstimmung mit den Veröffentlichungen Künzel [Künzel 2006], so dass die Veröffentlichungen Anwendung finden können für die Betrachtung

- der Feuchtigkeitsbelastung der Fenster von der Raumseite und damit der Gefahr der Tauwasserbildung an der Oberfläche und in der Konstruktion.
- der Feuchtigkeitsbelastung der Fenster von der Außenseite.
- der Verformung der Rahmen der Fenster und Türen im Differenzklima.

6.2 Wasseraufnahme von Holz

Aus der Schwachstellenanalyse ergibt sich, dass die Wasseraufnahme des Holzes sehr unterschiedlich ist, ohne dass dies für den Verarbeiter am Holz erkennbar ist. Es ist zu vermuten, dass die Bereiche mit erhöhter Wasseraufnahme länger anhaltend durchfeuchtet sind und den Befall des Holzes durch holzerstörende Pilze begünstigen. Aufgrund dieser Feststellung wurden im Rahmen des Projektes Versuche an neuem, nicht verbauten Holz und an Holz von ausgebauten Fenstern durchgeführt.

Für die Beurteilung der Wasseraufnahme wurde der Wasseraufnahmekoeffizient w [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$] bestimmt. Untersucht wurde die Wasseraufnahme in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung, wobei die Wasseraufnahme in Faserrichtung das über das Hirnholz aufgenommene Wasser beschreibt.

Die nach DIN EN ISO 15148 [DIN EN ISO 15148 2002] ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten w lassen im Vergleich mit Literaturwerten eine Beurteilung der Wasseraufnahme des vorliegenden Holzes und damit eine Aussage über die Eignung für den Fensterbau zu. Die Abbildung 28 eingetragenen Werte wurden an Probekörpern aus Hemlock gemessen, die aus 5 Bauteilen entnommen wurden. Die Bauteile wurden nach einer Nutzung zwischen 10 und 15 Jahren, unter anderem wegen Schäden durch Pilzbefall, erneuert.

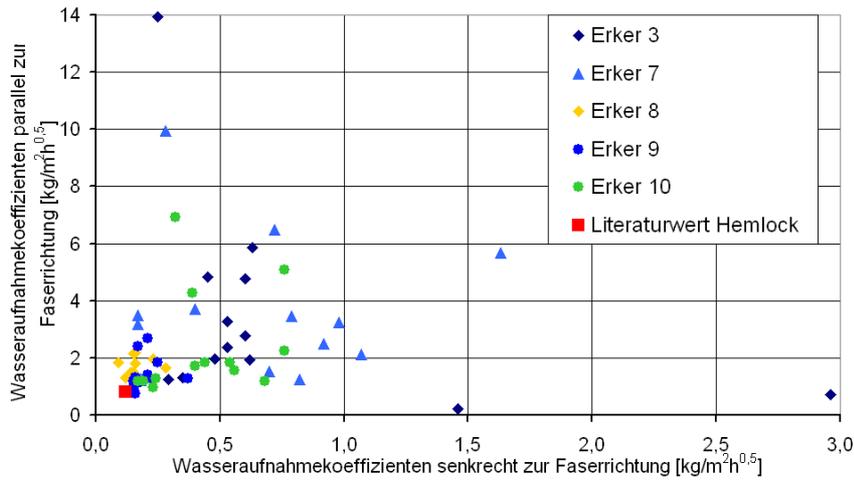


Abbildung 28: Wasseraufnahmekoeffizient von aus Bauteilen entnommenen Proben aus Hemlock [Troidl 2007] in den Abmessungen Länge 60 mm, Breite 35 mm, Dicke 15 mm

Aufgetragen ist jeweils der Wasseraufnahmekoeffizient des selben Probekörpers senkrecht und längs zur Faserrichtung. Die Streuung der Werte und die große Abweichung vom Literaturwert lassen den Schluss zu, dass teilweise von einer Vorschädigung des Holzes [Willeitner 1971] auszugehen ist. Eine mikroskopische Untersuchung des Holzes wurde nicht durchgeführt.

Die in Abbildung 29 eingetragenen Werte wurden an Kiefer gemessen und sind aus einem Bauteil entnommen. Das Bauteil wurde ebenfalls nach einer Nutzung zwischen 10 und 15 Jahren, unter anderem wegen Schäden durch Pilzbefall, erneuert. Für die Auswertung und die Bewertung der Ergebnisse kann auf Abbildung 28 verwiesen werden.

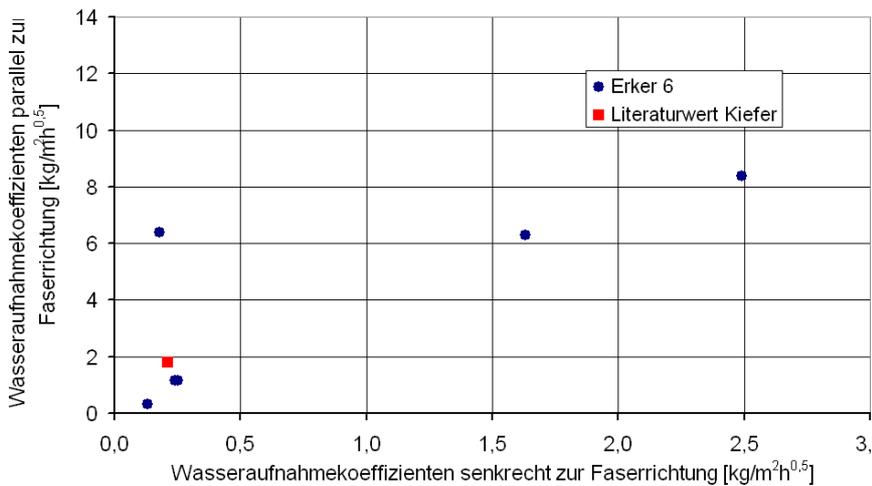


Abbildung 29: Wasseraufnahmekoeffizient von aus einem Bauteil entnommenen Proben aus Kiefer [Troidl 2007] in den Abmessungen Länge 60 mm, Breite 35 mm, Dicke 15 mm

Die erhöhte Wasseraufnahme führt nachweislich zu Schäden, da die Konstruktion nicht mehr beherrschbar ist und dem Holz angebotenes Wasser sowohl als Niederschlag als auch aus Tauwasser unmittelbar aufgenommen wird. Das Wasser verteilt sich im Holz und kann nur sehr langsam wieder an die Umgebung abgegeben werden. Nach Untersuchungen von Willeitner [Willeitner 1971] und Untersuchungen im Rahmen des Projektes di-sta [Schmid 2006] ist die erhöhte Wasseraufnahme auf die Schädigung der Zellwände oder der Hoftüpfel zurückzuführen, wobei die Schädigung sowohl durch Mikrobenbefall als auch durch Pilzbefall verursacht werden kann.

Durch Augenschein erkennbar ist die Vorschädigung des Holzes nur dann, wenn die gehobelte Oberfläche benässt wird, weil in den geschädigten Bereichen das Wasser im Vergleich zu den ungeschädigten Bereichen sofort „wegsackt“. Diese Methode ist aber nicht geeignet, um vorgeschädigtes Holz im Fertigungsprozess zu erkennen und auszusortieren.

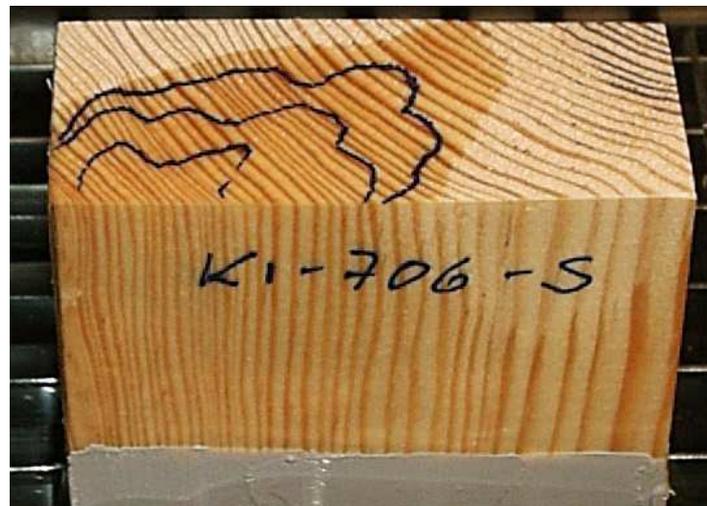


Abbildung 30: Holzprobe nach der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten mit Kennzeichnung der Bereiche des Wasserdurchtritts an der Oberfläche nach 5, 10, 15 und 30 Minuten

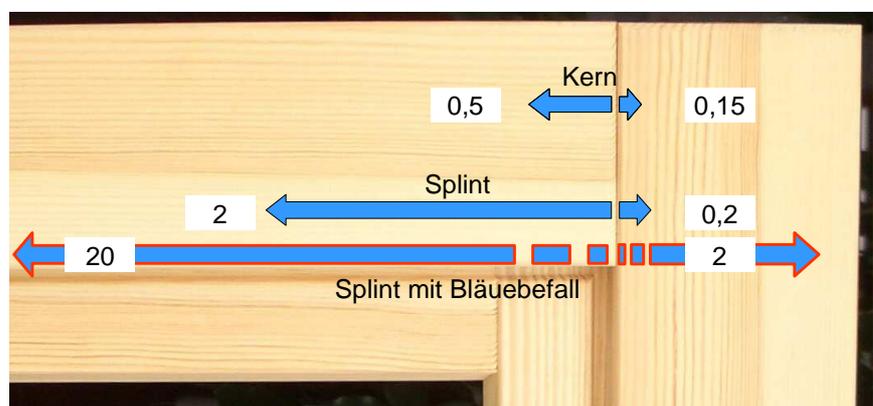


Abbildung 31: Gegenüberstellung der Wasseraufnahme zwischen ungeschädigtem und geschädigtem Holz senkrecht und quer zur Faser. Die angegebenen Zahlenwerte beschreiben die kapillare Wasseraufnahme (Wasseraufnahmekoeffizient) in $\text{kg/m}^2 \text{h}^{0,5}$

6.3 Quellungskoeffizienten

Für die Abschätzung der Verformung der Profile senkrecht zur Fensterebene ist die Kenntnis des Quellens und Schwindens parallel zur Holzfaser notwendig. Da sich im Allgemeinen bei Bauteilen das Quellen und Schwinden parallel zur Faserrichtung nicht auf die Funktion und Gebrauchstauglichkeit auswirkt, findet man in der Literatur überwiegend nur Angaben für das Quellen und Schwinden in den anatomischen Richtungen radial und tangential [Stiller 2007]. Bei neueren Werten kann dabei davon ausgegangen werden, dass diese nach DIN 52184 [DIN 52184 1979] bestimmt wurden.

Aus den Literaturangaben zur Längsquellung [Mörath 1931] [Fortuin 2003] ist in der Regel nicht erkennbar, ob die Quellung direkt gemessen oder ob sie aus der Volumenquellung berechnet wurde. Die Bestimmung der Längsquellung aus der Volumenquellung stellt eine Näherung dar, da für die Berechnung vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen.

Da die direkte Messung unter Berücksichtigung der Vorgaben nach DIN 52184 in der Praxis mit Problemen der Messgenauigkeit verbunden ist, wird in vielen Fällen von den Probekörpern abgewichen [Issifou-Samarou 2007].

Aus diesem Grund wurden auch im vorliegenden Fall von DIN 52184 abweichende Probekörper für die Bestimmung der Längsquellung festgelegt mit:

- einer Länge von 650 mm - Dies entspricht auch der Messlänge.
- einer Breite von 60 mm
- einer Dicke von 10 mm

Für die Probekörper wurde ein ausgesuchtes Holz mit parallel laufenden Jahrringen gewählt. Abweichungen liegen bei einem Probekörper aus Kiefer Kernholz und bei zwei Probekörpern aus Thermo-Kiefer vor.

Als Holzarten für die Untersuchungen wurden ausgewählt:

Anzahl	Laubholz	Anzahl	Nadelholz	Anzahl	Vergütetes Holz
3	Ahorn	3	Fichte	3	Thermo-Kiefer
3	Birke	4	Kiefer Kernholz		
3	Dark Red Meranti	3	Kiefer Splintholz		
3	Eiche	3	Lärche		
3	Esche				
3	Nussbaum				

Vor Versuchsbeginn wurden die Proben bei einem Klima von 20 °C / 50 % gelagert.

Die Messung der Längenänderungen wurde bei folgenden Klimaten durchgeführt:

Lagerungsfolge	Quellung	Schwindung
1		20 °C / 50 % 23 °C / 30 %
2		23 °C / 30 % 23 °C / 23 %
3	23 °C / 23 % 23 °C / 82 %	
4		23 °C / 82 % 20 °C / 50 %
5		20 °C / 50 % 20 °C / 0 %

Tabelle 3: Lagerungsfolgen zur Bestimmung der Quellungskoeffizienten

Die Abmessungen und das Gewicht der Proben wurden zu Beginn der Lagerung und bei jedem Wechsel der Lagerung bestimmt. Die Längenänderungen wurden mit der in Abbildung 32 dargestellten Vorrichtung mit einer Genauigkeit von ± 0,002 mm ermittelt.

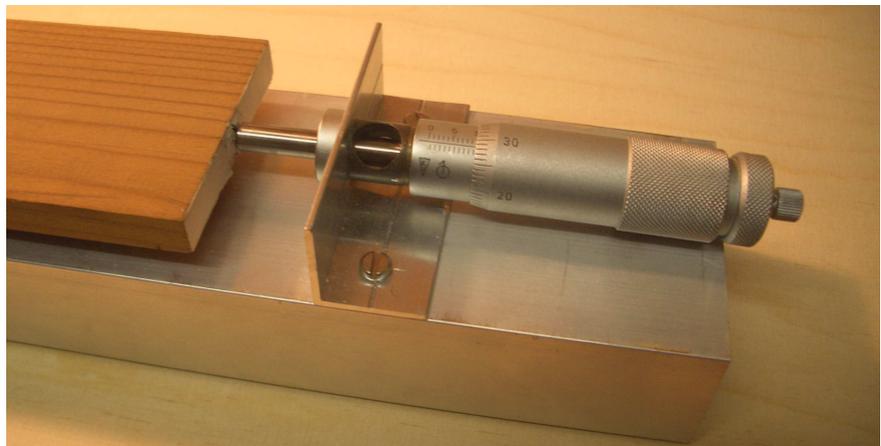


Abbildung 32: Messeinrichtung zur Bestimmung der Quellung in Faserlängsrichtung

Die Auswertung der Messung der Längsquellung und die Bestimmung des Quellungskoeffizienten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (\varphi_F - \varphi_T)} \cdot 100$$

- h Quellungskoeffizient in [% / %]
- l_F Maß des Holzes im Feuchtklima 80 ≤ φ_F ≤ 90 % in [mm]
- l_T Maß des Holzes im Trockenklima 30 ≤ φ_T ≤ 40 % in [mm]
- l₀ Probenmaß bei u = 0 % in [mm]

Botanische Bezeichnung	Handelsbezeichnung	Kurzzeichen (nach DIN 4076)	Rohdichte in [g/cm ³] bei (u = 0 %)	Quellungs- koeffizient in [% / %]
Picea spp.	Fichte	FI	0,44	0,0018
Pinus spp.	Kiefer - Kernholz	KI	0,54	0,0011
Pinus spp.	Kiefer - Spintholz	KI	0,49	0,0027
Larix spp.	Lärche	LA	0,53	0,0011
Pinus spp.	Thermowood Kiefer		0,41	0,0009
Acer spp.	Ahorn	AH	0,59	0,0021
Betula spp.	Birke	BI	0,53	0,0016
Quercus spp.	Eiche	EI	0,52	0,0033
Fraxinus spp.	Esche	ES	0,58	0,0054
Shorea spp.	Dark Red Meranti	MER	0,42	0,0016
Juglans spp.	Nussbaum	NB	0,70	0,0022

Tabelle 4: Zusammenstellung durch Versuche ermittelter Quellungskoeffizienten

Die durch Versuche ermittelten Quellungskoeffizienten sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 den in der Literatur veröffentlichten Werten gegenübergestellt.

6.4 Untersuchung der Tauwasserbildung in den Falzen von Fenstern

6.4.1 Ziel der Untersuchungen

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in den Falzräumen unterschiedlicher Fensterkonstruktionen zu ermitteln und dabei zu klären, unter welchen Bedingungen in den Falzbereichen Tauwasser oder Eis entsteht und welche Einflussfaktoren dabei maßgebend sind. Aus den Messergebnissen sollen Hinweise für die Konstruktion Tauwasserfreier Fenster abgeleitet werden.

Aus der Baupraxis ist bekannt, dass unter Winterbedingungen in den Falzen zwischen Flügel und Blendrahmen aber auch im Glasfalz gelegentlich Tauwasser auftritt und hier zu Feuchteschäden führen kann. Unklar ist, warum in einigen Fällen ein massiver Tauwasserausfall zu beobachten ist, während in anderen Fällen unter vergleichbaren Randbedingungen die Falze völlig trocken bleiben.

Tauwasser wird in den Falzen der Fenster immer dann auftreten, wenn an den Oberflächen der Falze, speziell an Wärmebrücken, der Taupunkt der eingeschlossenen Luft erreicht oder unterschritten wird. Welche Temperatur- und Feuchteverhältnisse sich in den Falzräumen einstellen, hängt von den Klimabedingungen zu beiden Seiten des Fensters ab. Es ist zu erwarten, dass auch die Druckdifferenzen zwischen Innenraum und Außenatmosphäre und auch die Dichtigkeit der Fugen zwischen Flügel und Blendrahmen bzw. zwischen Glasleiste und Flügel einen Einfluss haben.

6.4.2 Durchführung der Untersuchungen

a) Messdurchführung

Die Untersuchungen wurden unter Freilandbedingungen an unterschiedlichen Holzfensterkonstruktionen mit dem Profil IV 68 und mit heute üblicher Zweischeiben-Isolierverglasung durchgeführt. Die Vergleichsmessungen unter realen Außenklimabedingungen fanden am Standort Rosenheim in einem eigens errichteten Experimentierhaus (Abbildung 33) statt.



Abbildung 33: Ansicht des Experimentierhauses mit den beiden Versuchsfenstern

In dem Experimentierhaus konnten definierte Raumklimabedingungen und Drücke eingestellt werden. Auf diese Weise ließen sich sowohl die Temperatur- und Feuchteverhältnisse, aber auch die an einem Fenster wirksamen Druckdifferenzen entsprechend den realen Verhältnisse eines Wohnhauses simulieren. Die beiden Versuchsfenster befanden sich auf der Nordseite des Experimentierhauses und waren so vor einer direkten Sonneneinstrahlung geschützt.

In der Regel wurden die Messungen unter folgenden Randbedingungen durchgeführt:

Temperatur der Raumluft	20 °C
Relative Luftfeuchtigkeit im Raum	50 %
Druckdifferenz am Fenster zwischen Raum und Außenatmosphäre	+ 5 Pa oder - 5 Pa

Als Messaufnehmer für Temperaturen und Luftfechtigkeiten dienten Miniatursensoren SHT75 des Fabrikats Sensirion, Staefa (Schweiz). Abbildung 34 zeigt einen eingebauten Sensor, welcher im Falzbereich gleichzeitig Temperaturen und relative Luftfechtigkeiten mit hoher Präzision (Genauigkeit im relevanten Messbereich: Temperatur $\pm 0,3$ K; relative Feuchte ± 2 %) erfasst und die Messdaten in digitaler Form einem Datenlogger zuleitet.



Abbildung 34: Messaufnehmer für Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Falzraum des Versuchsfensters

In den Glasfalz des Flügels sind jeweils 5 Messstellen, in den Falzraum zwischen Flügel und Blendrahmen 6 Messstellen eingebaut. Die Anordnung der Messstellen in den Falzräumen der Fenster geht aus Abbildung 35 hervor.

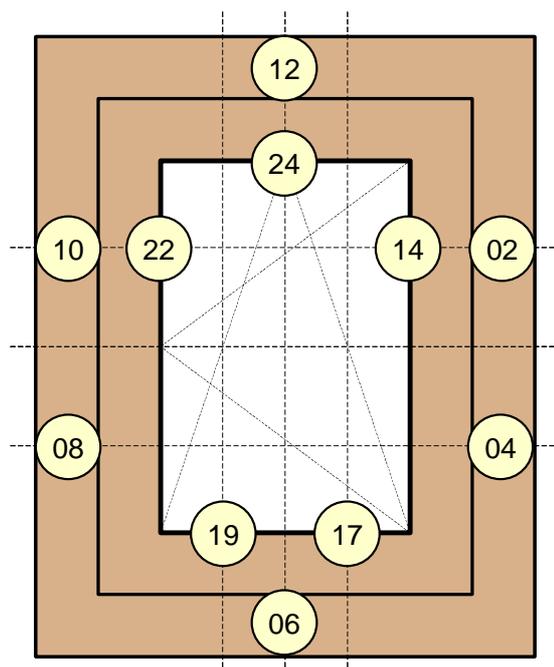


Abbildung 35: Messstellen in den Falzräumen der Versuchsfenster

Zur einfacheren Beschreibung sind die Messstellen in den Fensterfalzen entsprechend dem Zifferblatt einer Uhr gekennzeichnet. Dabei haben die Messpunkte des Blendrahmens die Ziffern 02, 04 bis 12, die Messpunkte des Flügels die Ziffern 14, 17 bis 24. An den bezeichneten Messpunkten erfassen die eingebauten Sensoren jeweils die Temperatur und die relative Feuchtigkeit der Luft im Falzraum. Zwei weitere Sensoren an den Positionen 06 und 12 erfassen zusätzlich die Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten an den Oberflächen des Falzes.

Die Differenzdrücke zwischen dem Raum und der Außenatmosphäre wurden in der Mitte der Fassade des Experimentierhauses mit einem Druckmessumformer P92 der Fa. Halstrup, Kirchzarten aufgenommen. Die Untersuchungen wurden bei Differenzdrücken von ± 5 Pascal an verschiedenen Fensterkonstruktionen durchgeführt. Ähnliche Differenzdrücke sind bei eigenen Messungen in verschiedenen Wohngebäuden ermittelt worden. Ein Beispiel gibt Abbildung 36.

Es handelt sich dabei um ein dichtes Gebäude (n_{50} -Wert um $1,5 \text{ h}^{-1}$) mit einem offenen Grundriss. Bei Windstille stellt sich im Gebäudeinneren als Folge des thermischen Auftriebes ein Druckgefälle ein. Bei durchschnittlichen Winterbedingungen entstehen so im Obergeschoss Überdrücke von 3 Pascal, im Erdgeschoss 0,7 Pascal gegenüber der Außenatmosphäre. Diesen Drücken überlagern sich noch die Drücke aus einer Windanströmung des Gebäudes.

Derartige Druckverhältnisse treten nicht nur bei Maisonettewohnungen auf. Sie sind auch in Einfamilienhäusern gemessen worden, welche keinen offenen Grundriss hatten, bei denen jedoch über einen offenen Treppenraum die einzelnen Stockwerke miteinander verbunden waren.

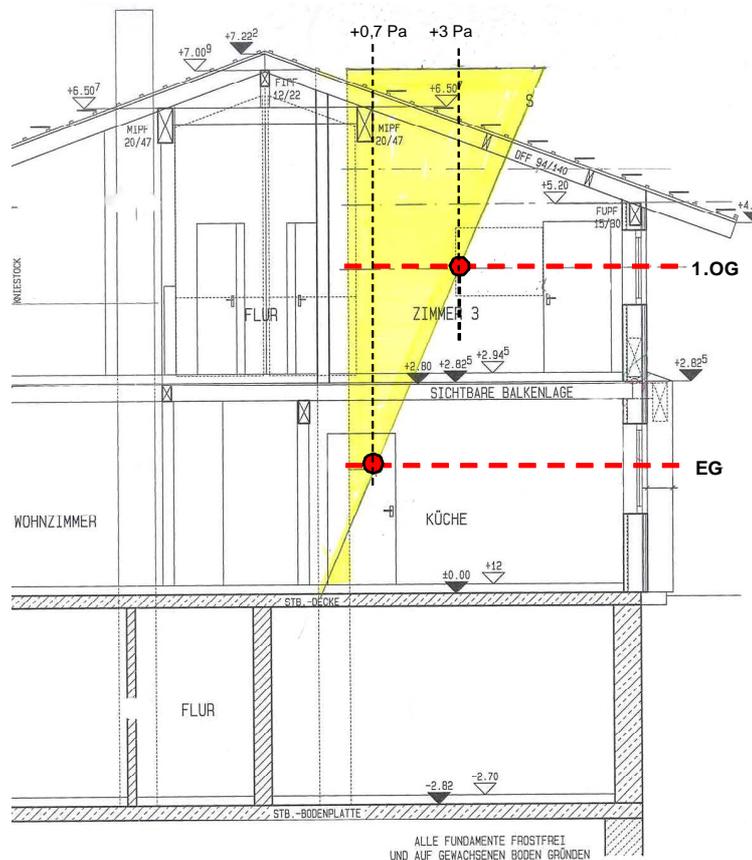


Abbildung 36: Druckverteilung im Innern eines Gebäudes als Folge des thermischen Auftriebes

In die experimentellen Untersuchungen sind verschiedene Fensterkonstruktionen aufgenommen worden, welche sich durch folgende Konstruktionsdetails unterscheiden:

Konstruktionsdetails	Varianten
Anzahl und Lage der Dichtebenen im Fenster	<ul style="list-style-type: none"> eine Mitteldichtung Mitteldichtung und innere Anschlagdichtung eine innere Anschlagdichtung
Raumseitige Abdichtung des Glasfalzes	<ul style="list-style-type: none"> offene Fugen zwischen Glasleisten und Flügelrahmen abgedichtete Fugen zwischen Glasleisten und Flügelrahmen
Belüftungsöffnungen für den Glasfalz	<ul style="list-style-type: none"> über Öffnungen in der Schlitz-Zapfenverbindung über Bohrungen im Fensterflügel
Wetterschutzschienen	<ul style="list-style-type: none"> aufgesetzte, in den Falzbereich reichende Wetterschutzschiene vorgesetzte Wetterschutzschiene
Griffolive	<ul style="list-style-type: none"> übliche Griffolive luftdichter Abschluss der Griffolive

Eine Übersicht über die unterschiedlichen Abdichtungen zwischen Flügel und Blendrahmen gibt Abbildung 37.

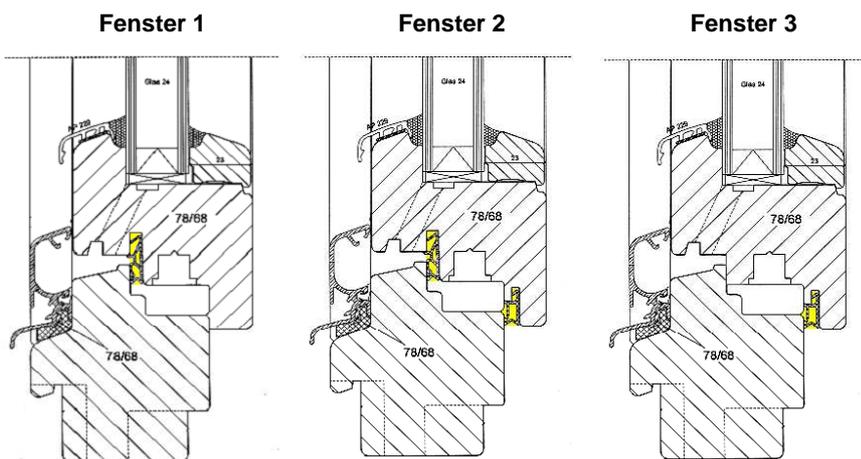


Abbildung 37: Gegenüberstellung der untersuchten Fenster (System Huber & Sohn) mit unterschiedlichen Dichtungen

- Fenster 1 mit einer Mitteldichtung
- Fenster 2 mit einer Mitteldichtung und einer Überschlagsdichtung im Flügel
- Fenster 3 mit einer Dichtung im Flügelüberschlag

Fenster 1 besitzt nur eine Dichtung in der Mittelebene des Fensters. Am Überschlag hat der Flügel einen mittleren Luftabstand zum Blendrahmen von 0,5 mm. Die Glasleisten haben übliche Fertigungstoleranzen. Die Fugen zwischen Glasleiste und Flügelrahmen sind nicht zusätzlich abgedichtet.

Fenster 2 hat neben der Mitteldichtung eine zusätzliche Dichtung im Flügelüberschlag. Beide Dichtungen sind umlaufend. Im Bereich der Eckbänder greift der Beschlag über die Dichtung. An dieser Stelle treten örtliche Undichtheiten in der raumseitigen Dichtungsebene auf. Die Fugen zwischen Glasleiste und Flügelrahmen wurden für einige Messungen zusätzlich durch Überklebung abgedichtet.

Fenster 3 besitzt nur eine nahtlos umlaufende Dichtung im Überschlag. Die Glasleisten sind auf der Raumseite zusätzlich gegen den Flügelrahmen abgedichtet worden.

Die Fenster 1 bis 3, an denen die Versuche durchgeführt wurden, wurden von der Firma Huber & Sohn, Bachmehring zur Verfügung gestellt.

b) Auswertungen der Messdaten

Die Feuchtebelastung der Falzräume lässt sich am deutlichsten über absolute Feuchtwerte beschreiben und bewerten. In Frage kommen die absolute Feuchte der Luft (angegeben in Gramm Wasser je Kubikmeter Luft bzw. je Kilogramm Luft) oder der Partialdruck des Wasserdampfes (angegeben in Pascal). Dem Partialdruck des Wasserdampfes wird hier der Vorzug gegeben, weil in diesem Fall auch Diffusionsvorgänge (DIN 4108) im Holz in die Bewertung mit einbezogen werden können.

Für Vergleichszwecke bieten sich auch hier dimensionslose Kennwerte an, welche mit nur einer Zahl die Feuchteverhältnisse im Falzbereich beschreiben und diese in Beziehung setzen zu den jeweils herrschenden Randbedingungen. Als Beispiel für eine solche Kennzahl sei hier der Temperaturfaktor zur thermischen Bewertung von Wärmebrücken genannt. In DIN EN ISO 10211-2 wird ein dimensionsloser Temperaturfaktor definiert, welcher Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann und welcher mit einer einzigen Zahl beschreibt, ob sich die Temperatur der Wärmebrücke mehr der Raumtemperatur oder mehr der Außenlufttemperatur annähert bzw. einen bestimmten Grenzwert unterschreitet.

In Anlehnung an diesen dimensionslosen Temperaturfaktor wird hier ein dimensionsloser Dampfdruckfaktor definiert, welcher angibt, ob sich die eingeschlossene Luft im Falzraum mehr den Feuchteverhältnissen im Raum oder denen in der Außenatmosphäre annähert. Der Dampfdruckfaktor, welcher sich auch als dimensionsloser Dampfdruck bezeichnen lässt, beschreibt das Verhältnis von zwei Dampfdruckdifferenzen:

- der Dampfdruckdifferenz zwischen Falzraum und Außenatmosphäre und
- der Dampfdruckdifferenz zwischen Raum und Außenatmosphäre.

$$p^* = \Delta p_1 / \Delta p_2 = p_F - p_a / p_i - p_a$$

- mit:
- p_F Dampfdruck im Falzraum [Pa]
 - p_a Dampfdruck in der Außenatmosphäre [Pa]
 - p_i Dampfdruck im Raum [Pa]

In Abbildung 38 werden diese Zusammenhänge grafisch dargestellt.

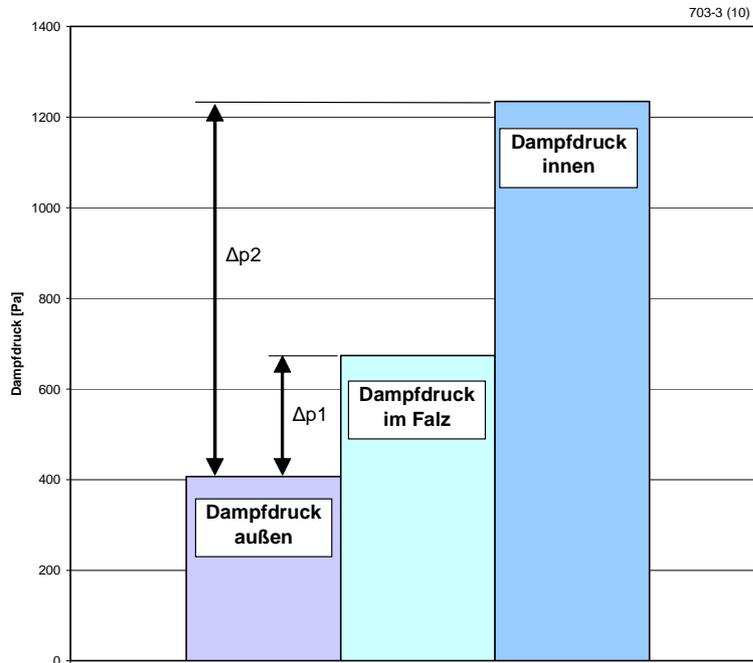


Abbildung 38: Definition des dimensionslosen Dampfdruckfaktors als Verhältnis der zwei Differenzdrücke: $p^* = \Delta p_1 / \Delta p_2$

Gemäß dieser Definition kann der dimensionslose Dampfdruck Werte zwischen Null und Eins annehmen. Je mehr der Wert gegen Null strebt, umso mehr nähert sich der Dampfdruck den Außenklimabedingungen an. Bei Werten nahe Eins herrschen im Falzraum die gleichen Dampfdrücke wie im Innenraum. Der Dampfdruckfaktor beschreibt also das Feuchteniveau im Falzraum im Vergleich zu den beiden angrenzenden Dampfdrücken im Raum und auf der Außenseite.

Er erlaubt aber keine Aussage darüber, ob im Falzbereich tatsächlich Tauwasser ausfällt oder nicht. Das hängt allein von der örtlichen Temperatur und der Taupunkttemperatur ab bzw. vom örtlichen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck. Für die Beurteilung der Tauwassergefahr ist der Dampfdruckfaktor dennoch gut einsetzbar. Je größer der Zahlenwert ist, umso höher ist die Gefahr einer Tauwasserbildung. Zur Vermeidung von Tauwasserniederschlägen sind daher möglichst kleine Werte des Dampfdruckfaktors anzustreben.

6.4.3 Ergebnisse der Untersuchungen

a) Einfluss des Differenzdruckes zwischen Raum und Außenatmosphäre auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Falzbereich

Aus den Langzeitmessungen in drei Winterperioden (2006 bis 2008) werden exemplarisch die Messperioden für eine detaillierte Auswertung ausgewählt, in denen typische winterliche Außenbedingungen herrschten und quasistationäre Bedingungen vorlagen. In einem ersten Schritt werden die Einflüsse unterschiedlicher Differenzdrücke am Fenster auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den Falzräumen der Fenster ermittelt und in Gegenüberstellungen verdeutlicht.

Die Zeitverläufe der Außenlufttemperatur und der Raumlufttemperatur im Experimentierhaus gehen aus Abbildung 39 hervor. In das Diagramm sind zusätzlich die Druckverhältnisse im Raum angegeben. In der ersten Phase herrschte im Raum ein konstanter Unterdruck von 5 Pascal, dann ein Überdruck 5 Pascal.

Für Vergleiche bieten sich in dem genannten Zeitraum zwei 24-stündige Messperioden mit vergleichbaren Außenklimabedingungen an:

- Messperiode 1 zwischen 17. und 18.02.2007, im Raum herrscht Unterdruck;
- Messperiode 2 zwischen 19. und 20.02.2007, im Raum herrscht Überdruck.

Für eine momentane Vergleichsmessung eignen sich die Morgenstunden des 18. und 20. Februars. In Abbildung 40 sind diese beiden Zeitpunkte markiert und mit Messung 1 und Messung 2 bezeichnet. Zu diesen Zeitpunkten herrschen vergleichbare Außenklimabedingungen. Wie sich ein Überdruck bzw. ein Unterdruck von 5 Pascal im Raum auf Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Fensterfalz von Fenster 1 (Fenster mit nur einer Dichtebene in der Mittelebene) auswirkt, wird aus Abbildung 40 erkennbar. In den beiden Diagrammen dieser Abbildung sind die Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen im Falzraum bei unterschiedlichen Druckverhältnissen im Raum gegenüber gestellt.

Wie sich ein Überdruck bzw. ein Unterdruck von 5 Pascal im Raum auf Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Fensterfalz von Fenster 1 (Fenster mit nur einer Dichtebene in der Mittelebene) auswirkt, wird aus Abbildung 40 erkennbar. In den beiden Diagrammen dieser Abbildung sind die Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen im Falzraum bei unterschiedlichen Druckverhältnissen im Raum gegenüber gestellt.

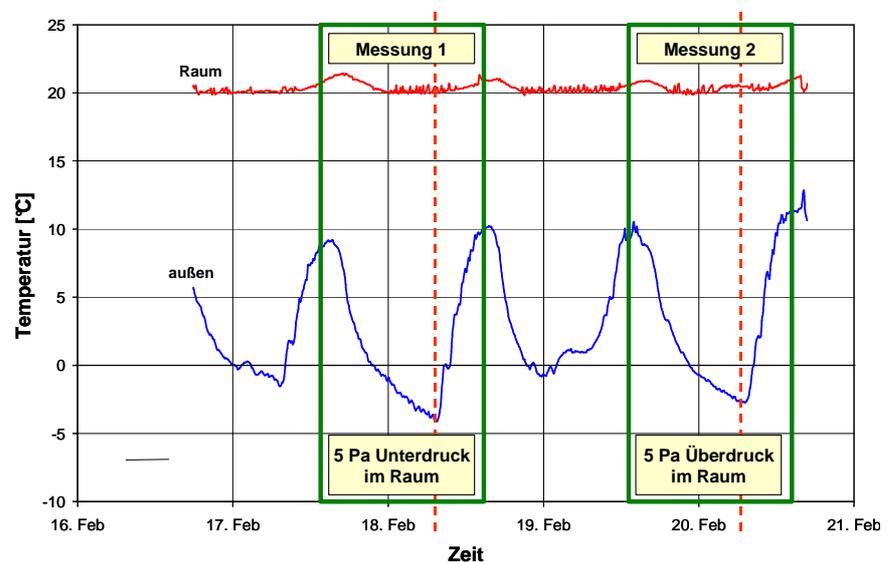


Abbildung 39: Zeitverläufe der Außenlufttemperatur und der Raumlufttemperatur während des betrachteten Messzeitraumes mit zwei ausgewählten 24-stündigen Messperioden mit vergleichbaren Außenbedingungen. In dem Diagramm sind mit gestrichelten Linien zwei Messzeitpunkte (Messung 1 und Messung 2) für Momentanmessungen eingezeichnet.

Bemerkenswert ist, dass die Temperaturen an den verschiedenen Messstellen in den seitlichen und oberen Falzräumen in einem schmalen Band zusammen fallen, jedoch die Temperaturen im Falz des unteren Querstückes (Messstelle T06) jeweils bis zu 5 Kelvin darunter liegen. Die gleiche Tendenz zeigt sich auch bei den Taupunkttemperaturen. In den seitlichen und oberen Falzräumen erreichen sie in den Nachtstunden Werte zwischen 8 °C und 9 °C. Dagegen liegen sie im unteren Querstück bei 2 °C bzw. 4 °C.

Als Ursache für die deutlich tieferen Temperaturen im unteren Bereich des Fensters ist die Geometrie des unteren Querstückes anzusehen. Während seitlich und oben das Flügelholz durch den Blendrahmen überdeckt wird, liegt das untere Flügelquerstück völlig frei und ist daher den Außenklimabedingungen stärker ausgesetzt. Hinzu kommt noch der Kaltluftabfall an der kalten Glasfläche, welche die raumseitige Temperatur im unteren Bereich der Fensterleibung um bis zu 2 Kelvin gegenüber der Raumtemperatur absenkt. Auch Wärmebrückeneinflüsse durch die eingebauten oder angebauten Metallbauteile wie Wetterschutzschiene und Fensterbank senken die Temperatur im untern Querstück des Blendrahmens weiter ab.

Wie aus Abbildung 40 weiter zu erkennen ist, haben die Druckverhältnisse zu beiden Seiten des Fensters einen geringen Einfluss auf die Temperaturen und Taupunkttemperaturen im Falzraum. Bei einem Überdruck von 5 Pascal im Raum gegenüber der Außenatmosphäre erhöhen sich die Temperaturwerte um einige Zehntel Grad, weil mehr warme Luft in den Falzraum gelangt. Bei einem Unterdruck von 5 Pascal im Raum wird mehr kältere Außenluft über die Undichtheiten in der äußeren Dichtungsebene in den Falzraum gesaugt. Damit sinken die Lufttemperaturen im Falz etwas ab und auch die Taupunkttemperaturen gehen zurück.

Zwischen den Lufttemperaturen im Falzraum und den jeweiligen Taupunkttemperaturen liegt ein relativ großer Abstand. Das heißt, sowohl bei einem Überdruck als auch bei einem Unterdruck im Raum bleibt bei den untersuchten Fenstern der Falzraum zwischen Flügel und Blendrahmen tauwasserfrei.

Die Auswertungen der Messdaten zeigen, dass sich in den Falzräumen ein eigenes Kleinklima einstellt, welches zwischen dem Außen- und dem Raumklima liegt und durch die anliegenden Differenzdrücke in die eine oder andere Richtung verschoben wird. Im unteren Falzbereich zwischen Flügel und Blendrahmen wird das besonders deutlich. Abbildung 41 zeigt für diesen Falzraum die Temperaturen und Taupunkttemperaturen in Abhängigkeit von der Außentemperatur bei einem Überdruck im Raum.

Aus dem Diagramm geht hervor, dass bis zu Außentemperaturen um den Gefrierpunkt sowohl die Lufttemperatur als auch die Oberflächentemperatur im Falzraum unterhalb der Taupunkttemperatur der Raumluft liegt. Daher müsste Tauwasser immer dann ausfallen, wenn im Falzraum die gleichen Feuchteverhältnisse herrschen wie im Innenraum.

Wie Abbildung 41 zeigt, liegt aber die tatsächliche Taupunkttemperatur an den Oberflächen des Falzes deutlich tiefer in einem großen Temperaturabstand zur herrschenden Oberflächentemperatur. Daraus ist zu schließen, dass bei einem Differenzdruck zwischen Raum und Außenatmosphäre im Falzraum keine Verdrängungsströmung (Kolbenströmung) von innen nach außen oder umgekehrt stattfindet, sondern dass es im Falzraum stattdessen zu einer Durchmischung von Raumluft und Außenluft kommt.

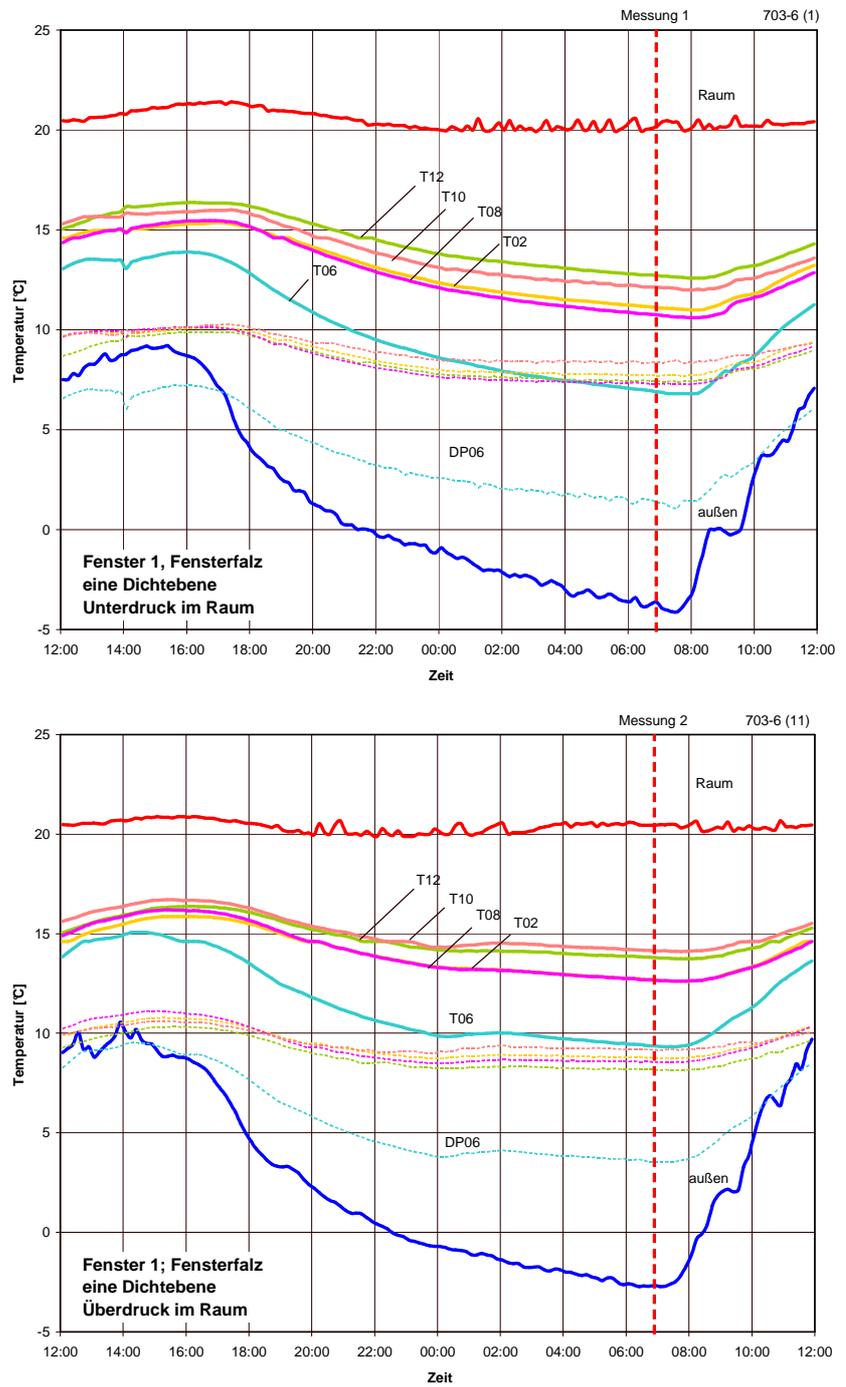


Abbildung 40: Zeitverläufe der Temperaturen in den Falzräumen von Fenster 1 (Fenster mit einer Mitteldichtung) bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Diagramm oben) und bei 5 Pascal Überdruck im Raum (Diagramm unten).

Zusätzlich sind die entsprechenden Taupunkttemperaturen im Falzraum eingetragen. Sie sind jeweils mit der Kurzbezeichnung DP markiert und in gleicher Farbe, aber in gestrichelter Form eingetragen.

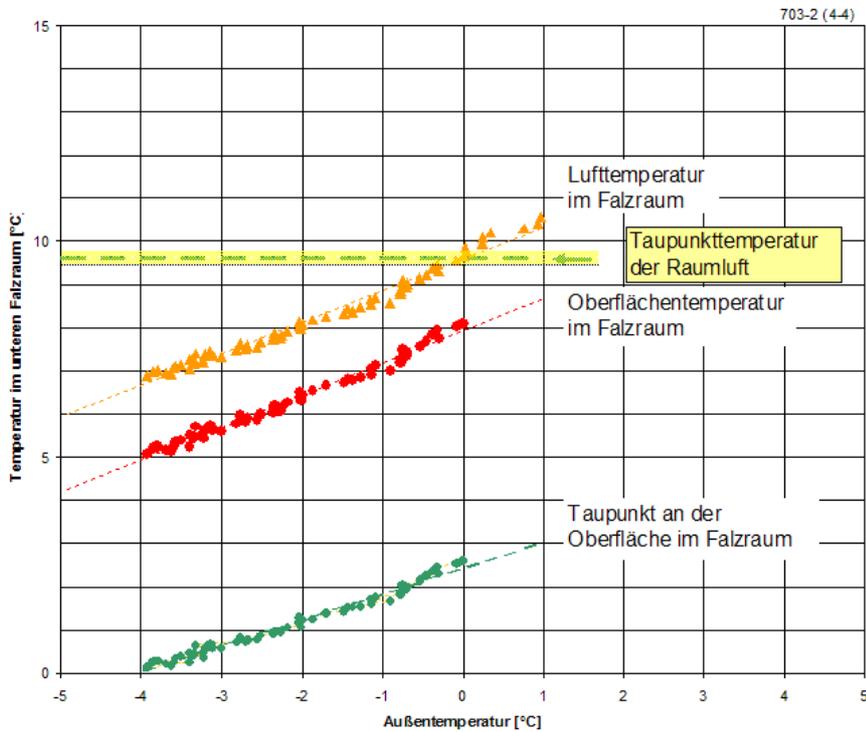


Abbildung 41: Zusammenhang zwischen den Temperaturen im unteren Falzraum und der Außenlufttemperatur. Bei der Messung herrschte im Raum ein Überdruck von 5 Pascal gegenüber der Außenatmosphäre.

Welche Auswirkung eine Druckänderung im Raum auf die Dampfdrücke in den Falzräumen hat, wird aus Abbildung 42 ersichtlich. In den Diagrammen sind die Zeitverläufe der Wasserdampfdrücke in den Falzräumen von Fenster 1 bei einem Unterdruck und bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal dargestellt. Zur Orientierung sind auch die Dampfdrücke der Raumluft und der Außenluft eingetragen.

Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Temperaturen. Mit einem Druckanstieg im Raum erhöhen sich auch die Dampfdrücke in den Falzräumen. Dabei liegen die Dampfdrücke in den seitlichen und oberen Falzräumen des Blendrahmens nahe an den Dampfdrücken der Raumluft. Die Dampfdrücke im unteren Falzraum (Messstelle 06) weichen davon deutlich ab. Sie liegen deutlich näher am Dampfdruck der Außenluft.

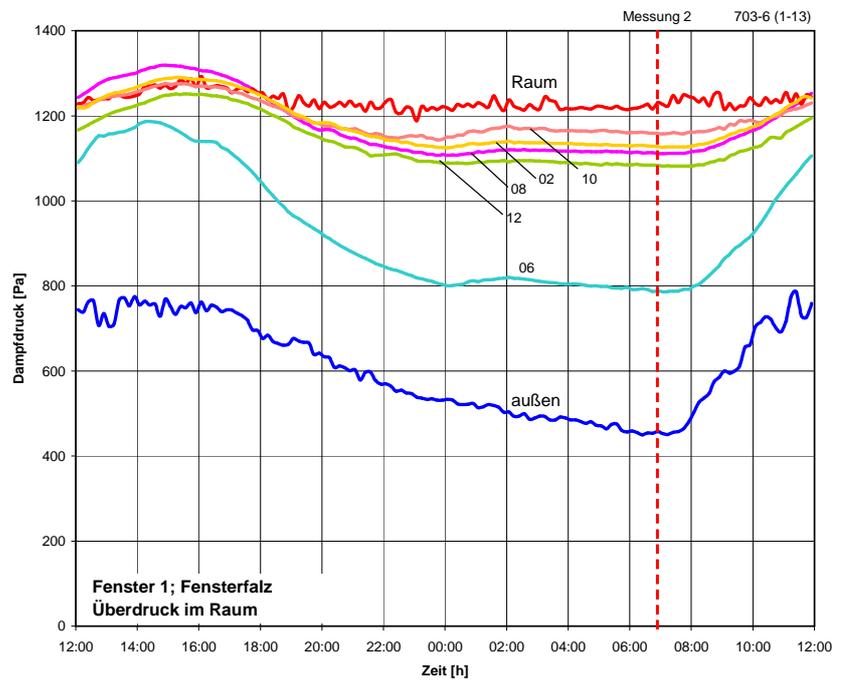
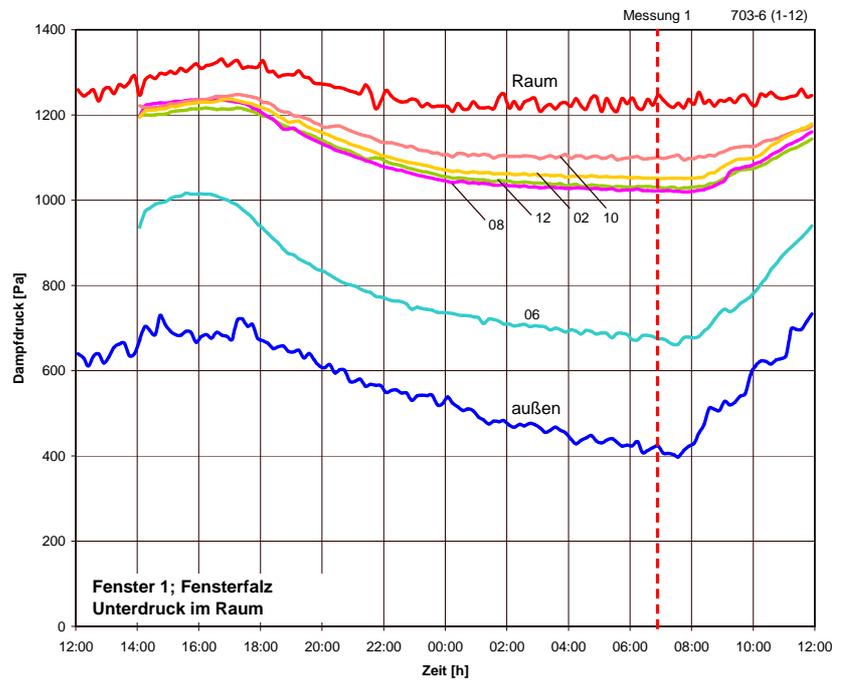


Abbildung 42: Zeitverläufe der Dampfdrücke im Falzraum des Fensterfalzes von Fenster 1 (Fenster mit einer Mitteldichtung) bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Diagramm oben) und bei 5 Pascal Überdruck im Raum (Diagramm unten). Zum Vergleich sind auch die Wasserdampfdrücke in der Raumluft und in der Außenluft eingetragen.

b) Einfluss der Abdichtung auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den Falzbereichen

Einfluss einer zweiten Dichtung im Falzüberschlag

Welchen Einfluss eine zweite Dichtebene im Flügelüberschlag auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Falzraum zwischen Flügel und Blendrahmen hat, ist in Abbildung 43 und Abbildung 44 beispielhaft dargestellt.

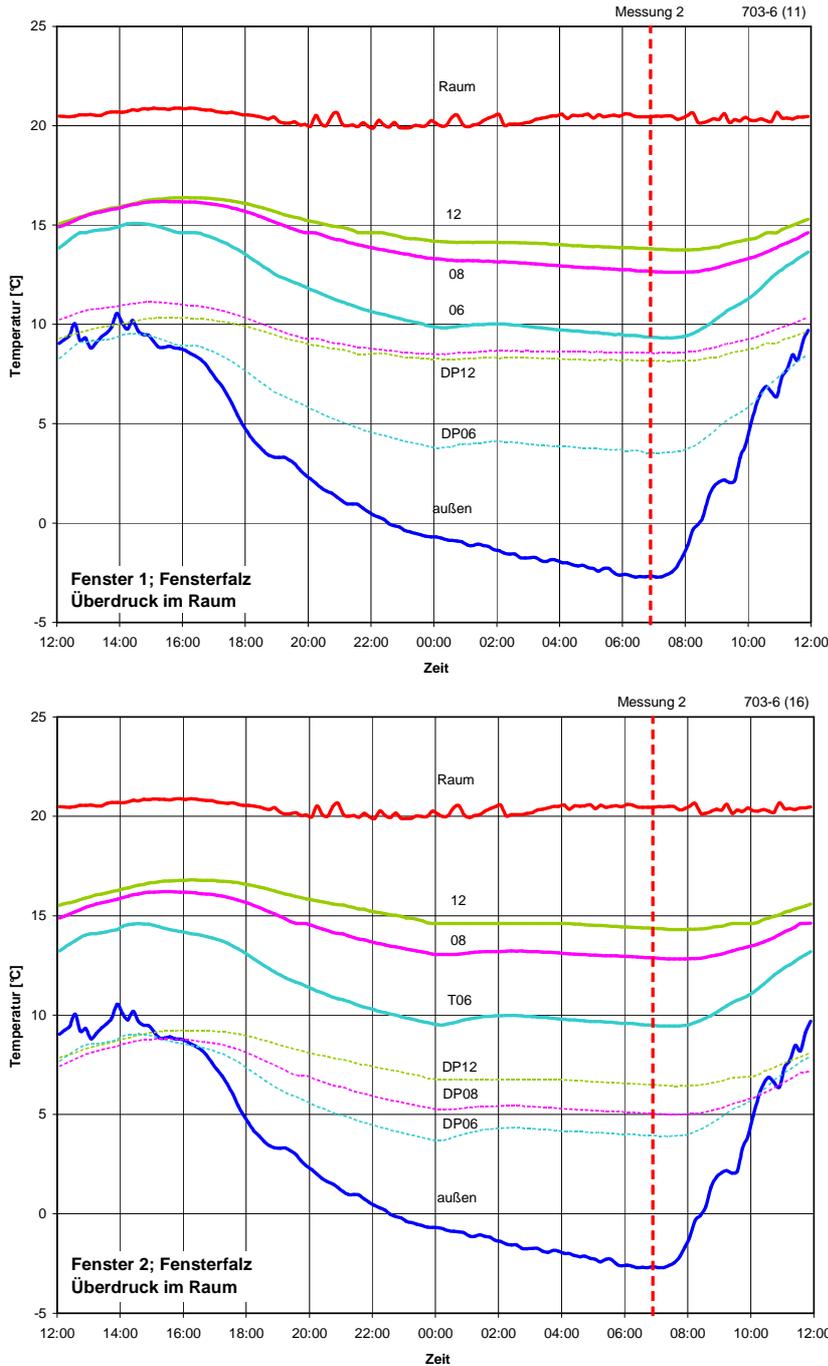


Abbildung 43: Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal. Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung), das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 2 (mit einer Mittel- und einer Überschlagsdichtung)

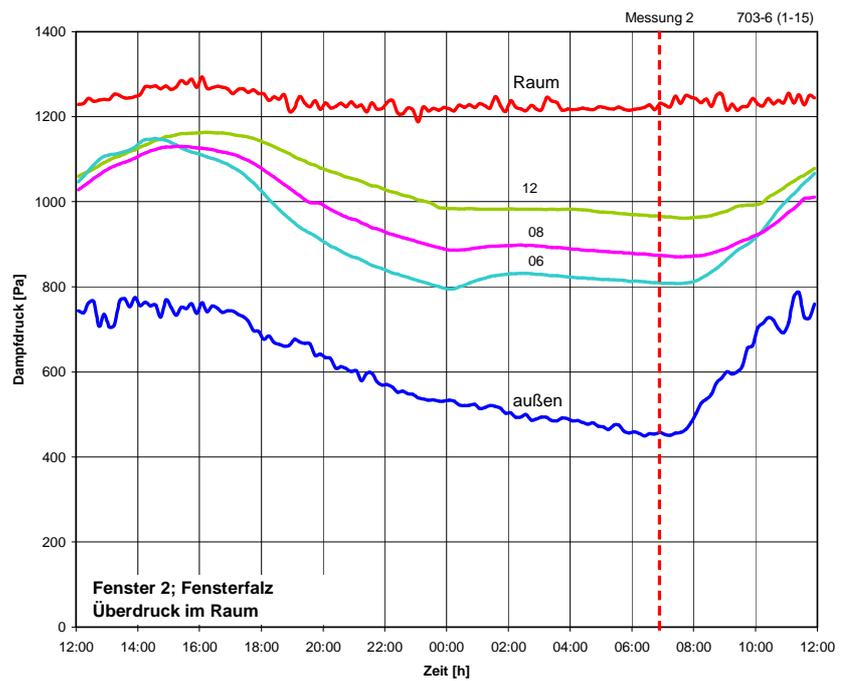
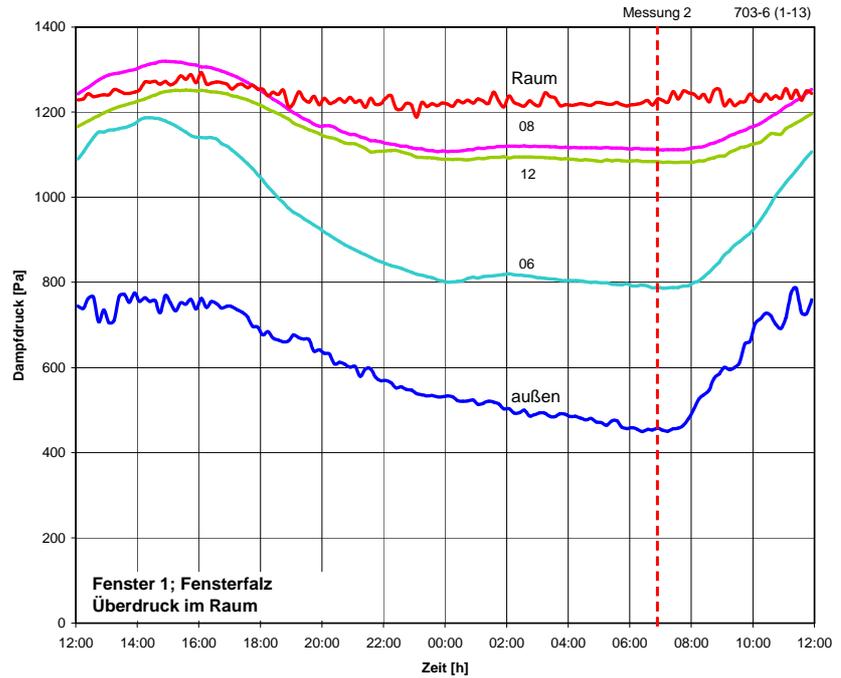


Abbildung 44: Zeitverläufe der Dampfdrücke an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal. Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung) das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 2 (mit einer Mitteldichtung und einer Überschlagsdichtung).

In den Diagrammen sind die Zeitverläufe der Temperaturen, der Taupunkttemperaturen und der Dampfdrücke unter typischen Winterbedingungen vergleichend für zwei Fenster gegenübergestellt. Fenster 1 besitzt nur eine Mitteldichtung. Fenster 2 hat neben der Mitteldichtung eine zusätzliche Flügelüberschlagsdichtung.

Dargestellt sind hier die Verhältnisse bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal. Unter diesen Randbedingungen sind die Auswirkungen der beiden Dichtvarianten deutlicher ausgeprägt als bei einem Unterdruck im Raum.

Aus den Diagrammen in Abbildung 43 wird ersichtlich, dass die zusätzliche raumseitige Überschlagsdichtung nur geringe Auswirkungen auf die Temperaturen im Falzbereich hat. Bei beiden Fenstern liegen die Temperaturen der oberen Falzräume in einem engen Band zusammen. Der untere Falzraum hat dagegen erwartungsgemäß ein etwas niedrigeres Temperaturniveau.

Wie aus Abbildung 44 erkennbar wird, zeigt sich bei den Dampfdrücken ein ähnliches Bild. Die zweite Dichtung im Überschlag hat keine nennenswerten Auswirkungen auf die Dampfdruckwerte im unteren Fensterfalz (Messstelle 06). In den übrigen Falzbereichen nähern sich aber die Dampfdrücke aneinander an. Dabei stellen sich mit der zweiten Dichtung im seitlichen und im oberen Falzbereich niedrigere Dampfdrücke ein.

In allen untersuchten Fällen liegen jedoch die Lufttemperaturen in den Falzräumen mit einem deutlichen Temperaturabstand über den entsprechenden Taupunkttemperaturen. Unter durchschnittlichen Winterbedingungen ist an den beiden untersuchten Fenstern im Falzbereich kein Tauwasserausfall zu erwarten.

Für einen Vergleich werden in Abbildung 45 die unter quasstationären Bedingungen bei Messung 1 und Messung 2 gewonnenen Daten gegenübergestellt.

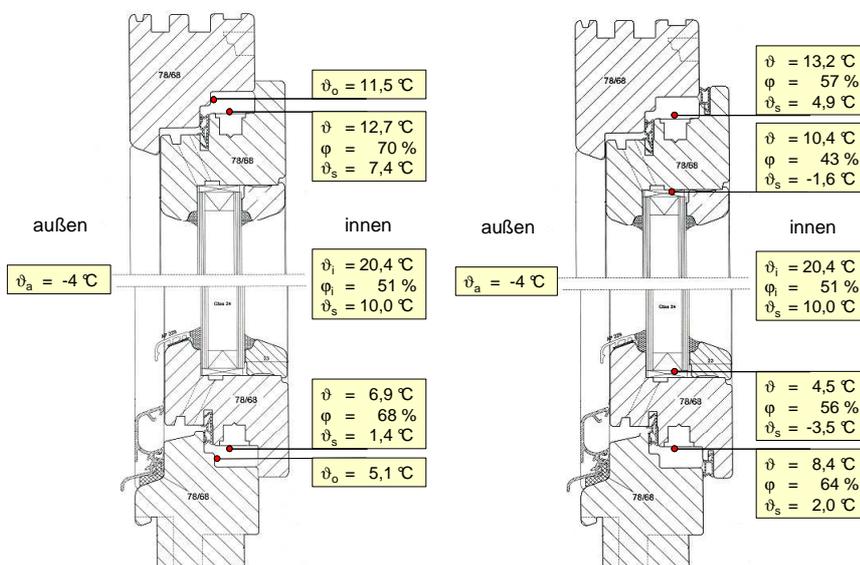


Abbildung 45: Typische Temperatur- und Feuchtwerte in den Falzräumen von Fenster 1 (linkes Bild) und Fenster 2 (rechtes Bild). Fenster 1 besitzt nur eine Mitteldichtung, Fenster 2 hat neben der Mitteldichtung eine weitere Dichtung im Überschlag.

- ϑ - Lufttemperatur im Falzraum [°C]
- ϑ_s - Taupunkttemperatur der Luft im Falzraum [°C]
- ϑ_o - Oberflächentemperatur im Falz [°C]
- φ - Relative Luftfeuchtigkeit der Luft im Falzraum [%]

Die Gegenüberstellung zeigt, dass sich mit einer zweiten Dichtung im Flügelüberschlag die Lufttemperaturen in den Falzräumen nur unwesentlich erhöhen. Im oberen Falz erhöht sich die Temperatur um 0,5 Kelvin, im unteren Falz um 1,5 Kelvin. Bemerkenswert sind jedoch die relativ großen Temperaturunterschiede zwischen den Oberflächentemperaturen im oberen und unteren Falzraum von Fenster 1. Im unteren Falz liegt die Oberflächentemperatur um 6 Kelvin niedriger als im oberen Falzraum.

Eine zusammenfassende Übersicht über die typischen Feuchteverhältnisse während der Winterperiode in den Falzräumen liefert Abbildung 46. Die Feuchteverhältnisse sind hier durch den dimensionslosen Kennwert, den Dampfdruckwert, gemäß Abbildung 38 gekennzeichnet. Je näher sich dieser Kennwert dem Wert 1 nähert, umso stärker nähert sich auch der Dampfdruck im Falzraum den Innenraumbedingungen an. Zur Vermeidung von Tauwasser sind möglichst kleine Dampfdruckwerte anzustreben.

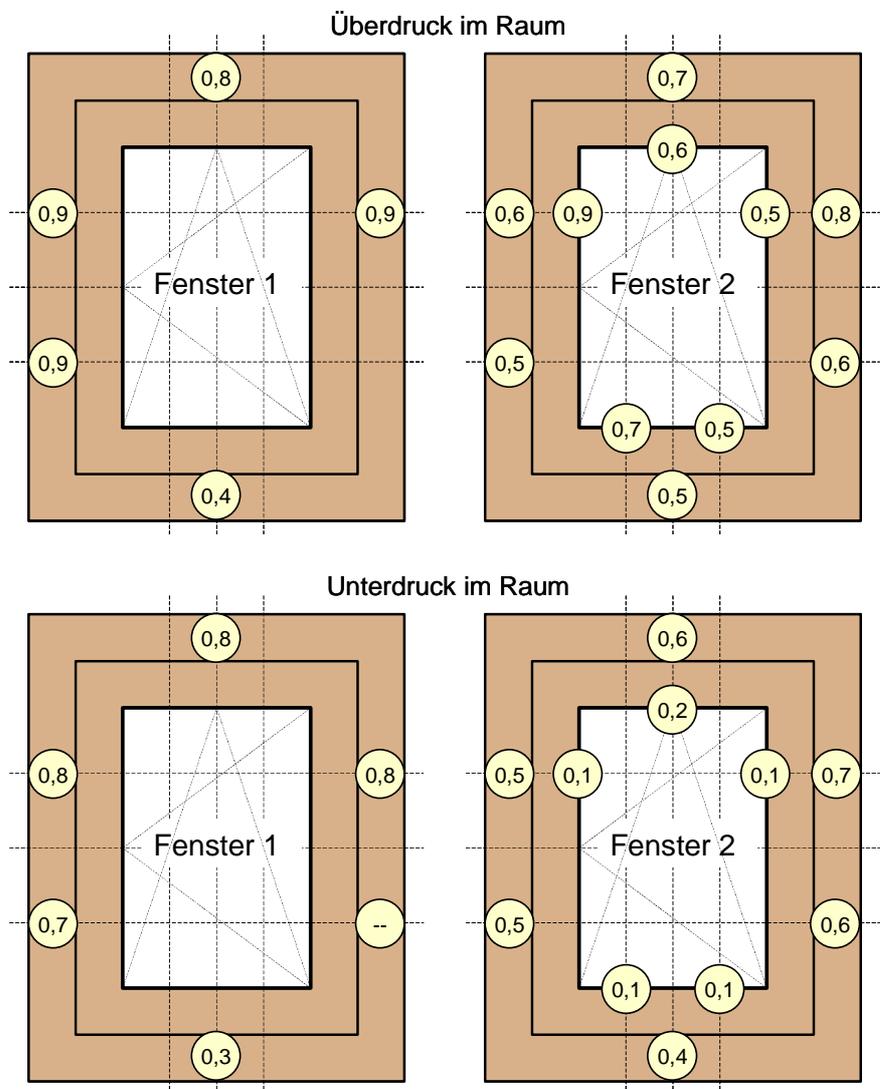


Abbildung 46: Gegenüberstellung typischer Feuchteverhältnisse in den Falzräumen für zwei Fenster mit einer bzw. zwei Dichtebenen sowie bei einem Überdruck von 5 Pascal und einem Unterdruck von 5 Pascal im Raum. Die Feuchteverhältnisse werden entsprechend Abbildung 38 durch einen dimensionslosen Kennwert, den Dampfdruckfaktor, gekennzeichnet.

Ein Vergleich der Dampfdruckfaktoren in Abbildung 46 zeigt, dass ein Unterdruck im Raum in allen Falzräumen zu geringeren Feuchtebelastungen führt. Besonders ausgeprägt ist diese Änderung in den Glasfalzen von Fenster 2. Eine zweite Dichtungsebene im Flügelüberschlag führt tendenziell zu kleineren Dampfdruckfaktoren, jedoch nicht zu einer grundlegenden Verbesserung der Feuchtesituation in den Flügelfalzen. Insgesamt ergibt sich kein systematischer Zusammenhang. Die zweite Dichtung im Fensterfalz führt an einzelnen Stellen des Falzraumes zu einer größeren, an anderen Stellen zu einer kleineren Absenkung der Feuchtebelastung.

Einfluss einer anderen Lage der Fensterdichtung

Im heutigen Holzfensterbau wird in der Regel die Mitteldichtung als Hauptdichtung angesehen. Allenfalls kommt eine weitere Dichtung im Flügelüberschlag hinzu. Es stellt sich die Frage, welche Auswirkungen die Verlagerung der einzigen Dichtung aus der Mittelebene des Fensters weiter in den raumseitigen Bereich hat.

Das entspricht dem Dichtungsprinzip im skandinavischen Fensterbau, bei dem die Winddichtung so weit wie möglich auf der Raumseite liegt, während die Regendichtung so weit wie möglich nach außen verlagert ist. Die sichere Regendichtung wird dabei ausschließlich durch konstruktive Maßnahmen, wie Tropfkanten und umlaufende Wasserablaufnuten, erreicht. Dieses Dichtungsprinzip ist bei Fenstern, die nach außen zu öffnen sind, einfacher zu realisieren, weil der Beschlag im Außenbereich liegt. Bei dem Fensterprofil IV 68 ist dieses Dichtungsprinzip nur bei Einsatz eines verdeckt liegenden Beschlages möglich. Weiterhin muss vorausgesetzt werden, dass die raumseitige Dichtung nahtlos um den Flügel umläuft, damit sie allein in der Lage ist, die Winddichtung des Fensters sicherzustellen.

Zur Klärung der Frage, welche Auswirkungen die Verlagerung der Dichtung aus der Mittelebene in den raumseitigen Falzüberschlag hat, wurden in einer Messperiode Vergleichsuntersuchungen an Fenster 3 und Fenster 1 (Referenz) bei typischen winterlichen Umgebungsbedingungen mit geringen Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Ergebnisse der Freilandmessungen sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 dargestellt. Die Messungen sind in den ersten Stunden ohne eine Druckdifferenz zwischen Raum und Außenatmosphäre abgelaufen. In der zweiten Hälfte wurde dann im Raum ein Überdruck von 5 Pascal eingestellt und für die Dauer der Messung konstant gehalten.

Ein Vergleich der Lufttemperaturen in den Falzräumen der beiden Fenster in Abbildung 47 zeigt, dass die Lage der Dichtung nur geringe Auswirkungen hat. Die Lufttemperaturen im Falz liegen in einem Bereich von 10 bis 15 °C. Lediglich in der nach außen „offenen“ Fensterkonstruktion von Fenster 3 erreichen die Temperaturen im unteren Falzraumbereich (Messstelle 06 und 08) um 2 bis 3 Kelvin niedrigere Werte im Vergleich zu Fenster 1. Die Temperaturabstände zu den jeweiligen Taupunkttemperaturen liegen bei dem Vergleichsfenster (Fenster 1) bei rund 5 Kelvin, bei Fenster 3 mit der raumseitigen Dichtung bei 10 Kelvin und darüber. Bereits diese Werte zeigen, dass die raumseitige Dichtung der Mitteldichtung überlegen ist, weil größere Sicherheitsreserven gegenüber einem Tauwasserausfall gegeben sind.

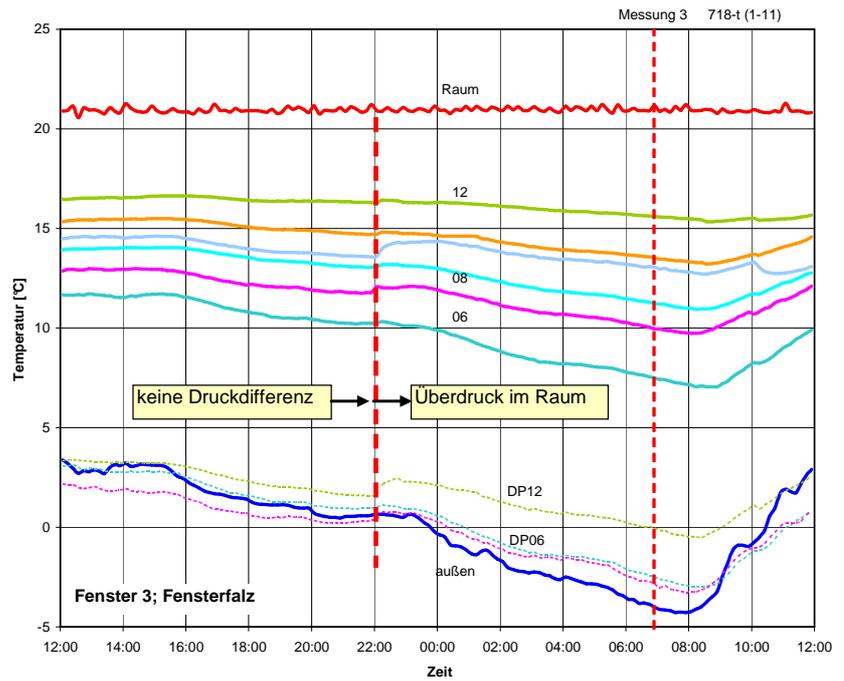
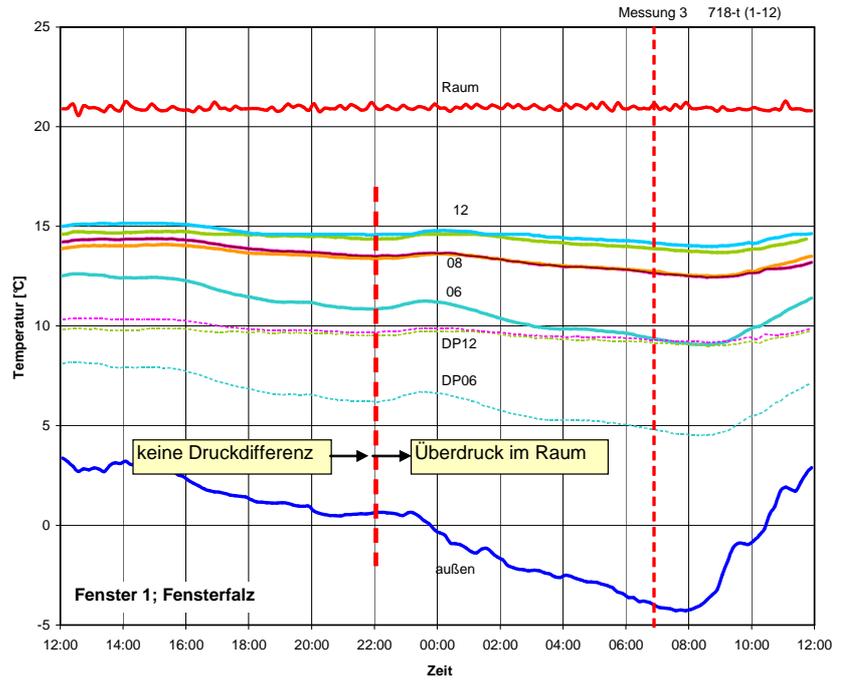


Abbildung 47: Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen. Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung), das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 3 (mit einer Überschlagsdichtung). Die Druckdifferenzen am Fenster variieren.

Vergleicht man in Abbildung 48 die Dampfdrücke in den Falzbereichen von Fenster 3 mit denen des Vergleichsfensters, dann werden die Unterschiede noch deutlicher. Während die Dampfdrücke des Vergleichsfensters (Fenster 1) nahe an den Dampfdrücken des Raumes liegen, nähern sich die Dampfdrücke von Fenster 3 den Werten der Außenluft.

Bemerkenswert sind die Auswirkungen eines Überdrucks im Raum in der zweiten Messphase um 22:00 Uhr. Lediglich an zwei Stellen im Falz, an den Messpunkten 10 und 12, erhöhen sich beim Druckanstieg im Raum auch die Dampfdrücke um Werte über 200 Pascal. Ursache für diesen augenblicklichen Druckanstieg sind Leckagen im Bereich der Griffolive. Nach einer Demontage der Griffolive und einer Ablebung der Bohrungen um 10:00 Uhr sinken die Dampfdruckwerte und nähern sich den anderen Werten an.

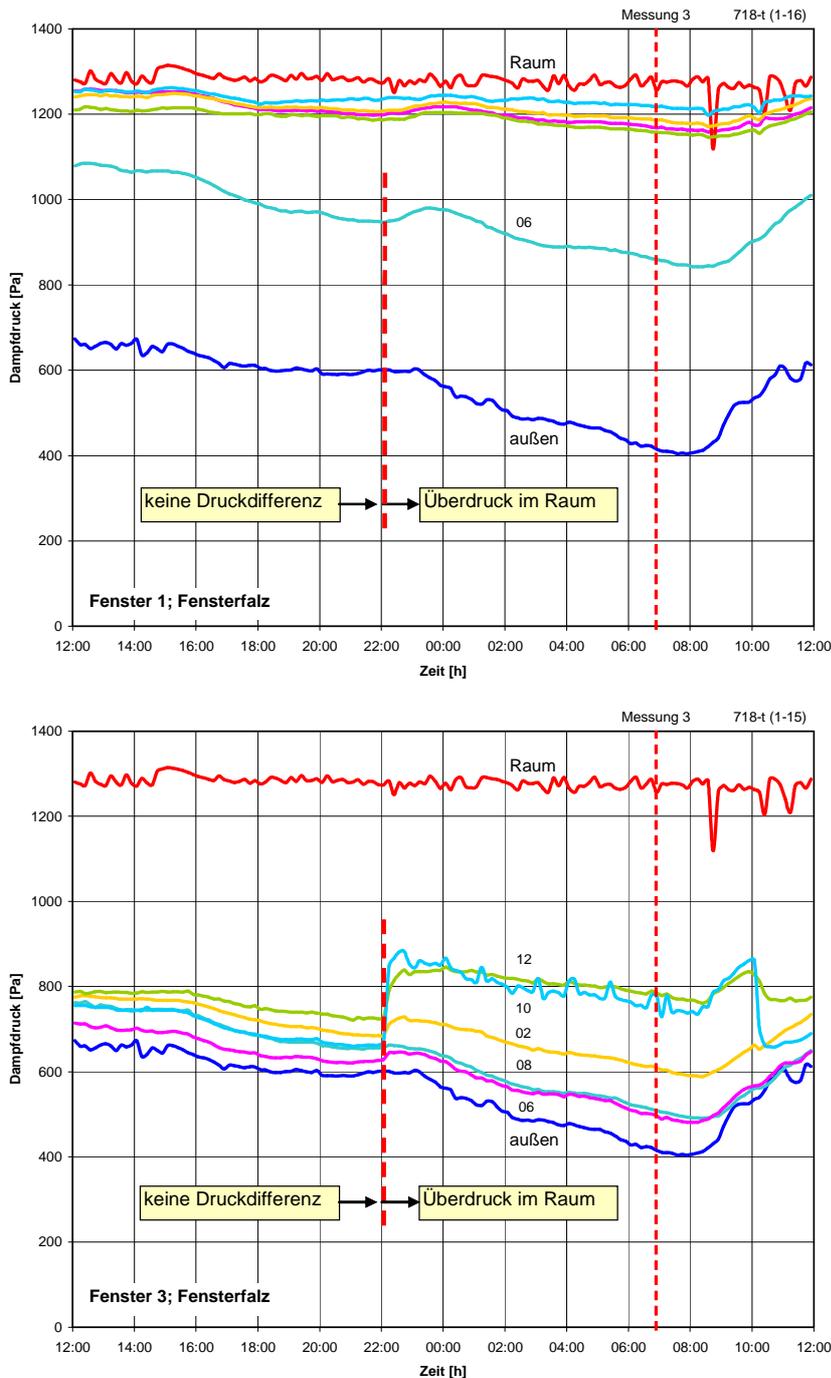


Abbildung 48: Zeitverläufe der Dampfdrücke an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung) das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 3 (mit einer Überschlagsdichtung). Die Druckdifferenzen am Fenster variieren.

Abbildung 49 zeigt in einer Gegenüberstellung typische Temperatur- und Feuchtwerte in den Falzräumen von Fenster 1 und Fenster 3. Auch in dieser Darstellung wird erkennbar, dass die Verlagerung der Dichtung aus der Mittelebene in den Flügelüberschlag nur geringe Auswirkungen auf die Temperaturwerte im Falzraum hat jedoch die Feuchtwerte (relative Luftfeuchtigkeit und Taupunkttemperatur) signifikant kleiner werden.

Deutlicher werden diese Unterschiede in der Gegenüberstellung der Dampfdruckfaktoren in Abbildung 50. Es zeigt sich, dass bei einer bauphysikalisch richtigen Anordnung der Dichtung im Falz (Fenster 3) die Dampfdruckfaktoren im Falzraum Werte von 0,1 und 0,2 annehmen. Die etwas erhöhten Werte im oberen rechten Eckbereich von Fenster 3 (Messstellen 10 und 12) sind auf Luftundichtheiten im Bereich der Fensterolive zurückzuführen. Nach Abklebung der Bohrungen im Flügel haben sich auch diese beiden Werte den anderen Werten angepasst.

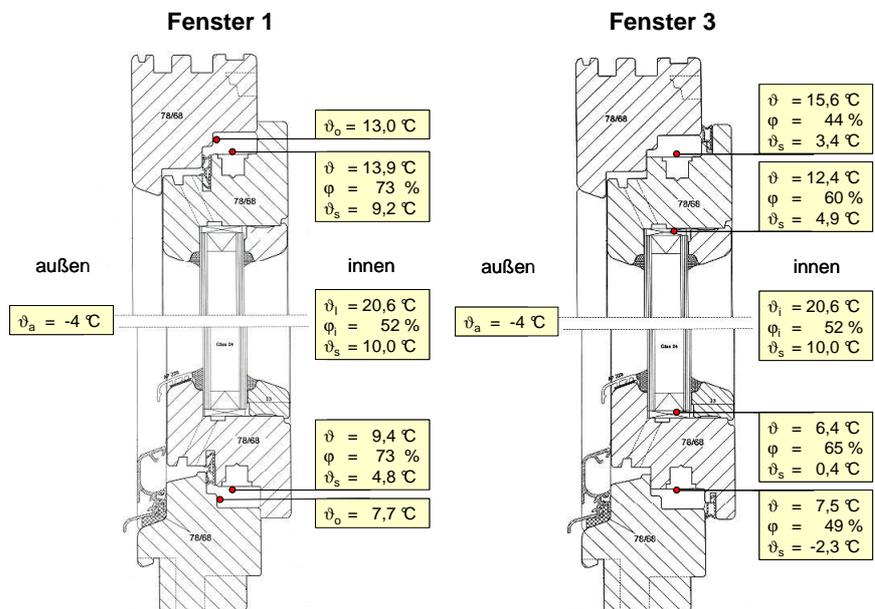


Abbildung 49: Typische Temperatur- und Feuchtwerte in den Falzräumen von Fenster 1 (linkes Bild) und Fenster 3 (rechtes Bild). Fenster 1 besitzt nur eine Mitteldichtung, Fenster 2 hat nur eine Dichtung im Überschlag.

- t - Lufttemperatur im Falzraum [°C]
- t_s - Taupunkttemperatur der Luft im Falzraum [°C]
- t_o - Oberflächentemperatur im Falz [°C]
- ϕ - Relative Luftfeuchtigkeit der Luft im Falzraum [%]

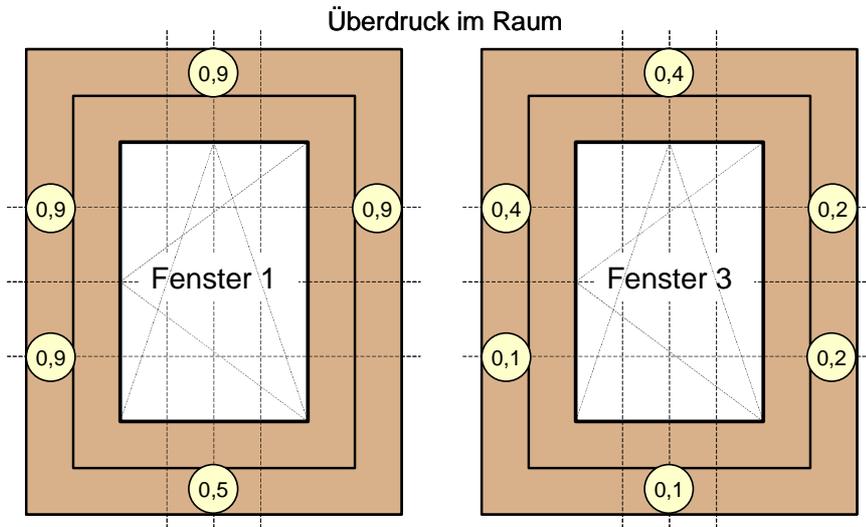


Abbildung 50: Typische Feuchteverhältnisse in den Falzräumen für Fenster 1 und Fenster 3 bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal. Beide Fenster besitzen nur eine Dichtungsebene. Bei Fenster 1 liegt diese in der Mittelebene, bei Fenster 3 im Flügelüberschlag. Die Feuchteverhältnisse in den Falzräumen werden durch den dimensionslosen Dampfdruckfaktor (Abbildung 38) gekennzeichnet.

Einfluss der Abdichtung zwischen Glasleiste und Flügelrahmen

Aus der Baupraxis ist bekannt, dass die raumseitigen Fugen zwischen Glasleisten und Flügel sehr undicht sein können. Abbildung 51 zeigt ein typisches Beispiel. Die Fugen können durch Fertigungstoleranzen, aber auch durch Quellschwindungsvorgänge der Glasleiste entstehen. Über die offenen Fugen kann Raumluft in den Glasfalz eindringen und hier an kalten Stellen zu Tauwasserniederschlägen führen. Zudem ist im Glasfalz mit Längsströmungen entlang der kalten Glaskanten dann zu rechnen, wenn die raumseitige Fehlstelle und die außenseitige Ausblasöffnung gegeneinander versetzt sind.



Abbildung 51: Offene Fuge zwischen der Glasleiste und dem Flügelrahmen

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 52 und Abbildung 53 dargestellt.

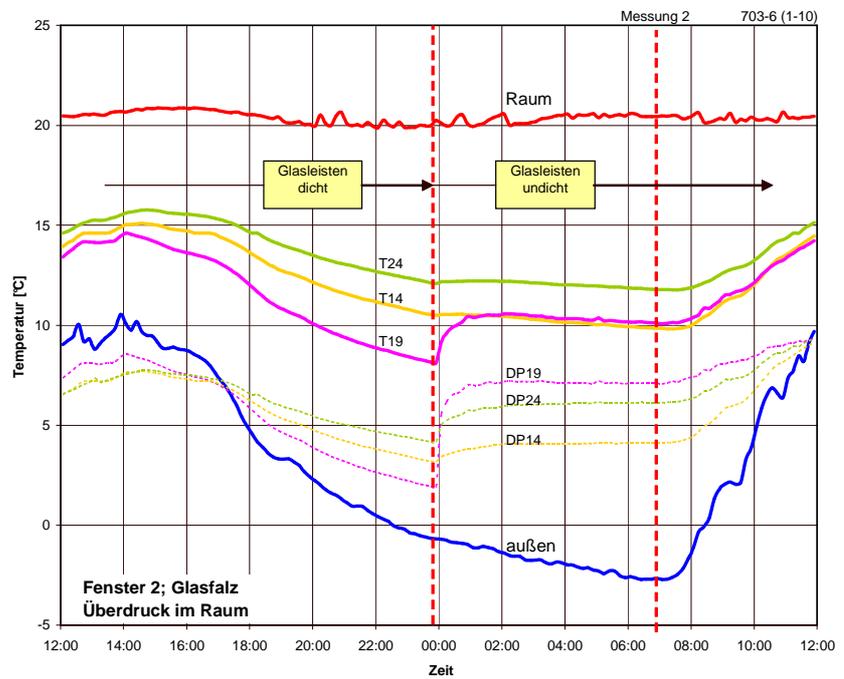
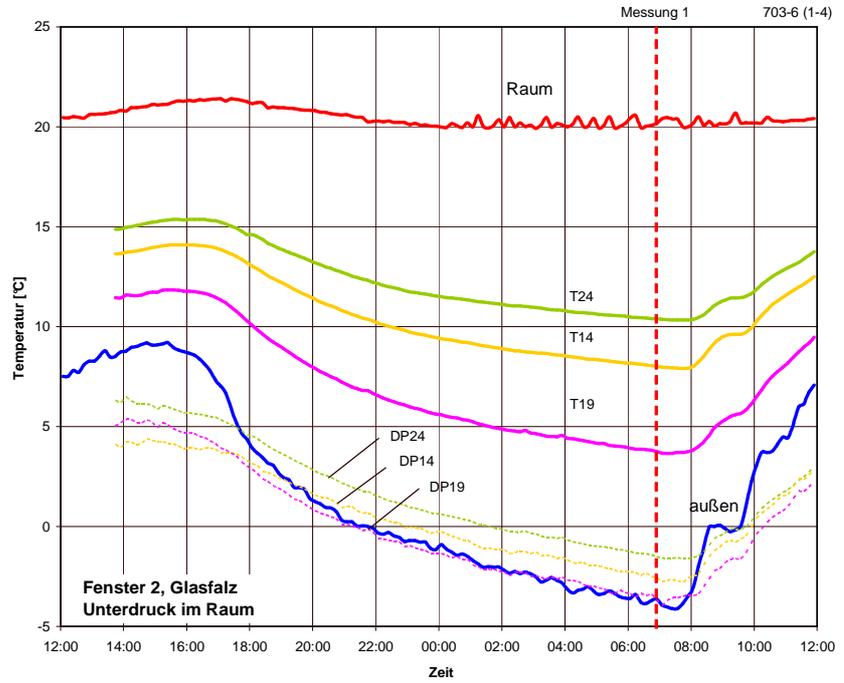


Abbildung 52: Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen im Glasfalz bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Diagramm oben) und bei 5 Pascal Überdruck im Raum (Diagramm unten). Zusätzlich sind die entsprechenden Taupunkttemperaturen (mit DP bezeichnet) eingetragen.

Abbildung 52 zeigt für eine 24-stündige Periode die Temperaturverhältnisse im Glasfalz bei Unterdruck und Überdruck im Raum. Zeitweise wurden die Fugen zwischen Glasleiste und Flügelrahmen durch eine Abklebung vollständig abgedichtet. In die Diagramme sind auch die Taupunkttemperaturen der Luft im Glasfalz eingetragen. An den unterschiedlichen Temperaturen ist erkennbar, dass der Glasfalz an einigen Stellen bevorzugt durchströmt wird. So z. B. an der Messstelle 19. Hier entstehen auch die größten Temperaturänderungen nach der Fugenabdichtung.

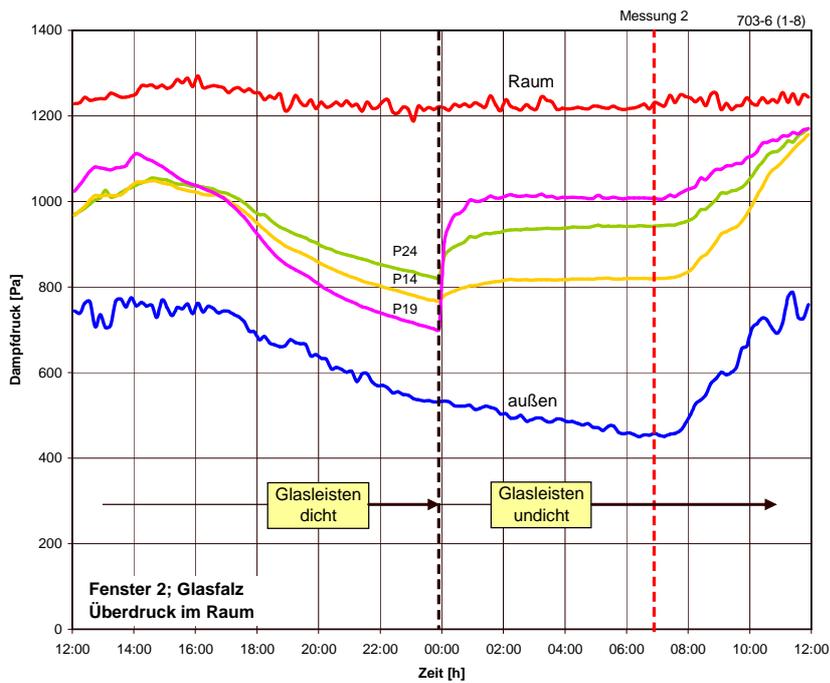
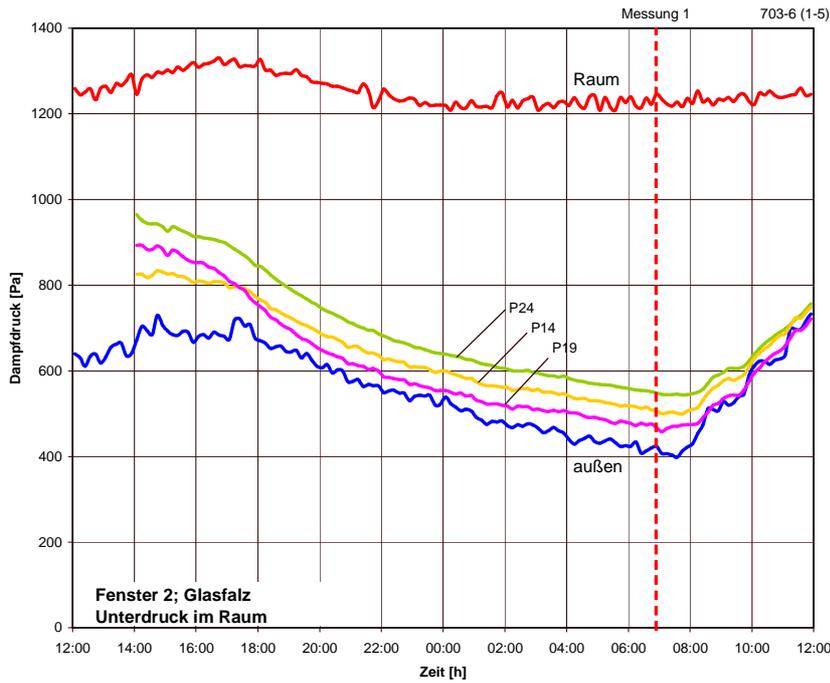


Abbildung 53: Zeitverläufe der Dampfdrücke im Glasfalz bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Bild oben) und 5 Pascal Überdruck im Raum (Bild unten).

Bemerkenswert ist, dass die Eisbildung nicht nur punktuell auf den Ausblasbereich beschränkt bleibt, sondern dass Feuchtigkeit über die ganze Länge der unteren Öffnungsfuge zwischen Flügel und Blendrahmen in das Innere der Fensterkonstruktion gelangt und sich hier als Wassertropfen oder Eis niederschlägt.



Abbildung 55: Eisablagerungen in der Dichtungsebene eines Fensters. Der Pfeil markiert die Lage der Belüftungsöffnung für die Glasfalzbelüftung.

Wie Abbildung 55 eindrucksvoll belegt, kann offenbar die Gummidichtung die Fuge zwischen Flügel und Blendrahmen nicht hermetisch dicht abschließen, so dass die aus dem Glasfalz ausströmende, sehr feuchte Luft über die elastische Dichtung auf die Raumseite vordringt und es im kalten Bereich des Falzes zu einer massiven Tauwasserbildung kommt.

Im Rahmen dieses Projektes konnte nicht geklärt werden, welcher Mechanismus für den Feuchtetransport über das elastische Dichtungsprofil wirksam ist. Zu vermuten ist, dass Kapillarkräfte, aber auch die Pulsation des Windes, eine Rolle spielen. Die Gefahr einer Tauwasser- oder Eisbildung ist umso größer, je tiefer die Temperaturen im Bereich der Ausblasöffnungen sind. Besonders problematisch sind deshalb Wetterschutzschienen, die bis in die Dichtungsebene des Fensters reichen und hier über ihre Wärmebrückenwirkung die Temperaturen fast auf Außenniveau absenken.

Bei einer Glasfalzbelüftung über Bohrungen im Flügelholz (rechtes Bild in Abbildung 54) ist dagegen auch bei tiefsten Temperaturen kein Feuchteeintrag über die Belüftungsbohrungen des Flügels in das Innere der Fensterkonstruktion beobachtet worden. Unter extremen Bedingungen, wie undichte Glasleisten in Verbindung mit einem Überdruck im Raum, bilden sich allenfalls am oberen Überhang des Blendrahmens über dem Flügel Wassertropfen, welche jedoch abtropfen und nicht in das Innere des Fensters vordringen können. Wird jedoch der raumseitige Anschluss der Glasleiste an den Rahmen luftdicht abgeschlossen, ist kein Tauwasser mehr am oberen Querstück des Blendrahmens zu erwarten.

7 Theoretische Betrachtungen

7.1 Fenster und Türen im Differenzklima

Fenster und Türen sind als Außenbauteile dem Differenzklima zwischen der Raumseite und der Außenseite ausgesetzt. Damit wirkt auf der Raumseite und auf der Außenseite ein unterschiedliches Klima auf das Holz der Rahmenkonstruktion ein. Für die Bewertung der Beanspruchung durch das Differenzklima kann der von Künzel ermittelte Verlauf des Klimas [Künzel 2006] als Grundlage gelten. Die Belastung durch das Raumklima für die Monate Dezember bis Mai wurde durch eigene Messungen bestätigt.

Der Jahrgang der Luftfeuchtigkeit für das Raum- und Außenklima ist in Abbildung 56 für 24 Monate dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen der Belastung der Fenster und Türen wird für das Raumklima die normale Feuchtelast zu Grunde gelegt.

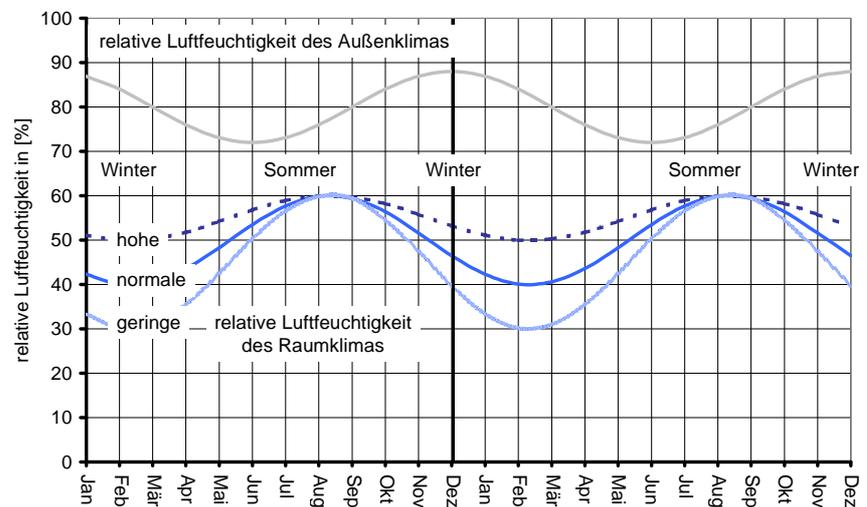


Abbildung 56: Verlauf des Raum- und Außenklimas [Künzel 2006]

Da das Holz während der gesamten Nutzungsdauer der Fenster und Türen auf das Umgebungsklima reagiert, kommt es zum Quellen und Schwinden und damit zu einer Formänderung der Rahmenkonstruktion während der gesamten Nutzungsdauer.

Der Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Holzfeuchtigkeit wird durch die Sorptionsisothermen beschrieben, wobei sich – wie in Abbildung 57 dargestellt – der Verlauf der Sorptionsisothermen bei Feuchtigkeitsaufnahme (Adsorption) und Feuchtigkeitsabgabe (Desorption) unterscheidet. Den weiteren Betrachtungen und dem Abschätzen des Verhaltens der Rahmenkonstruktion wird die Adsorption zu Grunde gelegt.

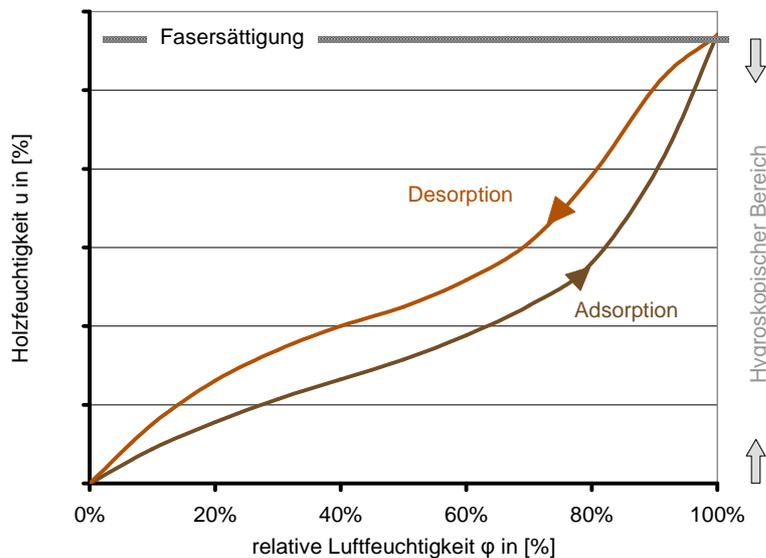


Abbildung 57: Typischer Verlauf der Adsorption und Desorption mit Darstellung des Zusammenhangs zwischen Holzfeuchtigkeit und relativer Luftfeuchtigkeit [Stiller 2007]

Aus der Literatur [Stiller 2007] ergibt sich, dass für den Baubereich der Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsisothermen gering ist, so dass für die Betrachtung des Verhaltens der Rahmenkonstruktion im Differenzklima der Temperatureinfluss vernachlässigt werden kann.

Die Sorptionsisothermen sind spezifisch für die Holzarten und unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Holzarten in ihrem Verlauf zum Teil erheblich (Abbildung 58) [Stiller 2007]. Damit stellen sich in der Ausgleichsfeuchte von 50 % relativer Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Holzarten unterschiedliche Holzfeuchtigkeiten ein. So ergibt sich nach Abbildung 58 für eine Ausgleichsfeuchtigkeit von 50 % bei

- Thermowood-Kiefer eine Holzfeuchtigkeit von $u = 5$ %,
- Afzelia eine Holzfeuchtigkeit von $u = 7$ %,
- Tanne eine Holzfeuchtigkeit von $u = 9$ %,
- Traubeneiche eine Holzfeuchtigkeit von $u = 11$ %.

Dies hat Auswirkungen auf die praktische Anwendung insbesondere dann, wenn in einer Konstruktion verschiedene Holzarten zusammen wirken, z. B. durch eine Verleimung.

Im konkreten Anwendungsfall der Verklebung von Profilquerschnitten ist die relative Luftfeuchtigkeit die bestimmende Größe für den Zustand des Holzes und nicht die in der Baupraxis geläufige Holzfeuchtigkeit. Dies bedeutet, dass bei der Verklebung von Profilquerschnitten aus unterschiedlichen Holzarten nicht die Holzfeuchtigkeit, sondern die relative Luftfeuchtigkeit des Ausgleichsklimas maßgebend und zu beachten ist.

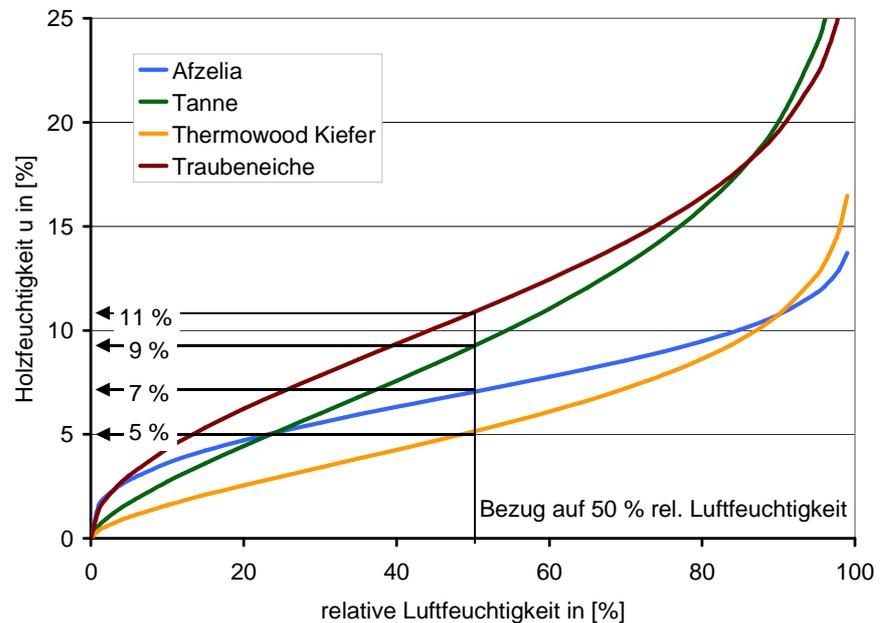


Abbildung 58: Verlauf der Sorptionsisothermen für verschiedene Holzarten und die Zuordnung der Holzfeuchtigkeit für die Ausgleichsfeuchtigkeit von 50 %. [Stiller 2007]

Aus dem Verlauf des Raumklimas und des Außenklimas (Abbildung 56) folgt durch die Änderung der relativen Luftfeuchte und der dadurch bedingten Längsquelle eine Verformung senkrecht zur Bauteilebene. Diese Verformung wird bei der Verwendung unterschiedlicher Holzarten in einem Profilquerschnitt noch durch die unterschiedlichen Quellungskoeffizienten beeinflusst.

Für die praktische Anwendung kann eine Verformung der einzelnen Rahmenprofile nur in dem Umfang zugelassen werden, wie sie durch Dichtsysteme überbrückt werden kann, da die Funktion des Bauteils im Vordergrund steht. Insofern ist es notwendig, die zu erwartende Verformung in ihrer Größenordnung abzuschätzen. Der Genauigkeit der Vorbestimmung der Verformung sind durch Einflussparameter aus den Holzeigenschaften und der Holzqualität Grenzen gesetzt. Die einer Berechnung zugrunde gelegten Werte der Quellungskoeffizienten und des Umgebungsklimas sind nur Mittelwerte mit unterschiedlichen Abweichungen im Einzelfall.

Für die rechnerische Abschätzung der Verformung von Rahmenkonstruktionen wurden verschiedene Rechenmodelle [Stiller 2007], [Engels 2006-1], [Ahrens 1974] verglichen. Die Rechenmodelle sind mit den wesentlichen Eingangsgrößen in Abbildung 59 gegenübergestellt.

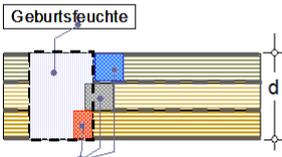
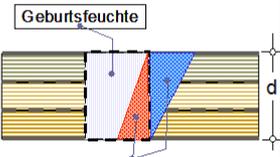
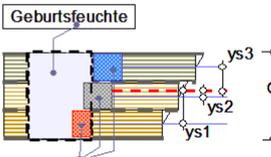
1. FEM-Modell	2. Ungleiche Feuchte (vgl. ungleiche Temperatur)	3. Resultierendes Moment
 <p>Geburtsfeuchte</p> <p>Klimaänderungen während der Nutzung</p>	 <p>Geburtsfeuchte</p> <p>Klimaänderungen während der Nutzung</p>	 <p>Geburtsfeuchte</p> <p>Klimaänderungen während der Nutzung</p>
<p>f = Durchbiegung des Profils in mm l = Länge des Profils in mm h = Quellungskoeffizient in %/%(φ) φ = relative Luftfeuchtigkeit in % d = Gesamtdicke des Profils in mm E = E-Modul in N/mm² G = Schubmodul in N/mm²</p> <p>Einfach-Symmetrischer Querschnitt</p>	<p>f = Durchbiegung des Profils in mm l = Länge des Profils in mm h = Quellungskoeffizient in %/%(φ) φ = relative Luftfeuchtigkeit in % d = Gesamtdicke des Profils in mm</p> <p>Einfach-Symmetrischer Querschnitt</p>	<p>f = Durchbiegung des Profils in mm l = Länge des Profils in mm h = Quellungskoeffizient in %/%(φ) φ = relative Luftfeuchtigkeit in % d = Gesamtdicke des Profils in mm I = Trägheitsmoment in mm⁴</p> <p>Einfach-Symmetrischer Querschnitt</p>

Abbildung 59: Zusammenstellung der verschiedenen Rechenmodelle, die für die Abschätzung der Verformung verglichen wurden.

Bei der Betrachtung der Eingangsgrößen für die Berechnung zeigt sich, dass beim Quellungskoeffizienten „h“ von einer sehr großen Streuung ausgegangen werden muss [Stiller 2007] [Engels 2006-2]. Dies ist zum Teil durch die unterschiedlichen Holzeigenschaften und zum Teil durch die unterschiedliche Bestimmungsmethode bedingt. Die Quellungskoeffizienten „h“ für die wichtigsten Hölzer, soweit sie für die Dickenverleimung von Rahmenprofilen zur Anwendung kommen, sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Gruppe	Quelle	Holzart	Quellungskoeffizient „h“ in [% / %] Luftfeuchte / longitudinal		
			von	m	bis
NH	Niemz	Fichte	0,002	0,003	0,004
NH	Niemz	Kiefer	0,002	0,003	0,004
NH	Niemz	Lärche	0,001	0,002	0,003
NH	Niemz	Oregon Pine	0,001	0,002	0,003
NH	Niemz	W. R. Ceder	0,002	0,004	0,005
LH	Niemz	Abachi	0,002	0,003	0,003
LH	Niemz	amerik. Mahagoni			

Tabelle 5: Zusammenstellung ausgewählter Quellungskoeffizienten „h“ mit Angabe der Quellen [Niemz 2006]

Handelsname	Kurzzeichen	Rohdichte ($\rho = 0\%$)	Dauerhaftigkeitsklasse nach DIN EN 350-2	Longitudinaler Quellungskoeffizient h			E-Modul in [N/mm ²]
				Mörath	Schwarz (Mittelwert)	Niemz (Mittelwert)	
Fichte	FI	0,45	4	0,0032	0,0018	0,0030	10800
Gemeine Kiefer	KI	0,45	3 – 4	0,0060	0,0011 und 0,0027	0,0030	11800
Grüne Douglasie	DGA	0,49	3	0,0030			11300
Hemlock	HEM	0,47	4				10300
Lärche	LA	0,54	3 – 4	0,0030	0,0011	0,0020	13500
Lodgepole pine		0,40	3 – 4				7400
Sitka-Fichte	FIS	0,35	4 – 5	0,0039			10800
Tanne	TA	0,43	4	0,0040			10800
Western Red Cedar	SWW	0,34	2	0,0015		0,0040	7800
Western White Spruce	SWW	0,43	4				6800
Shortleaf Pine		0,45	3	0,0041			12200
Pitch Pine	PIP	0,55	3	0,0070			13700
Thermowood Kiefer		0,41	3		0,0009		11100
Afzelia	AFZ	0,73	1				13500
Amerik. Mahagoni	MAE	0,46	2	0,0027		0,0020	7800
Dark Red Meranti	MER	0,60	2 – 4	0,0017	0,0016	0,0030	14500
Eukalyptus		0,46					
Framire	FRA	0,46	2 – 3				9000
Heavy White Seraya	SEW	0,65					12500
Iroko	IRO	0,58	1 – 2			0,0050	12000
Light White Seraya	SEW	0,56					11500
Louro vermelho	LVE	0,57	2				12500
Makore	MAC	0,62	1				13700
Niangon	NIA	0,64	3				11000
Robinie	ROB	0,72	1 – 2	0,0016			13300
Sapelli	MAS	0,63	3				10000
Sipo	MAU	0,61	2 – 3			0,0030	11000
Teak	TEK	0,67	1	0,0057		0,0030	12800
Weißeiche	EIW	0,70	2 – 3				12300
Edelkastanie	EKE	0,53	2	0,0060			8800
Nussbaum	NB	0,63	3	0,0048	0,0022		12300
Wenge	WEN	0,79	2				16000
Merbau	MEB	0,77	1 – 2				16000
Stieleiche	EI	0,70	2	0,0006			11500
Traubeneiche	EI	0,70	2	0,0042	0,0033	0,0030	12800
Khaya Mahagoni	MAA	0,50	3	0,0020			9500

Tabelle 6: Holzarten der Kategorie 1
[Niemz 2006] [Mörath 1935] [Stiller 2007] [Schwarz]

Handelsname	Kurzzzeichen	Rohdichte ($u = 0\%$)	Dauerhaftigkeitsklasse nach DIN EN 350-2	Longitudinaler Quellungskoeffizient h			E-Modul in [N/mm ²]
				Mörath	Schwarz (Mittelwert)	Niemz (Mittelwert)	
Basken Kiefer	PIR	0,45	4 – 5				10500
Weymouthskiefer	KIW	0,36	4	0,0048			8800
Bergahorn	AH	0,59	5	0,0059			9200
Bird Cherry		0,50		0,0040			10000
Erle	ER	0,49	5	0,0050			7600
Gemeine Birke	BI	0,66	5	0,0040	0,0016		16200
Kirschbaum	KB	0,56		0,0032			10200
Rotbuche	BU	0,70	5	0,0030		0,0040	15700
Roteiche	EIR	0,65	4	0,0090			12600
Balsaholz	BAL	0,12		0,0056			2500
Birnbaum	BB	0,69		0,0041			7800
Flatterulme		0,72		0,0046			10800
Gemeine Esche	ES	0,69	5	0,0026	0,0045		13100
Oregon Ahorn		0,57		0,0024	0,0021		7800
Rüster	RU	0,62	4	0,0029			10800
Schwarzerle	ER	0,51	5	0,0050			7600
Silberpappel	PA	0,46	5	0,0070			8600
Sommerlinde	LI	0,55	5	0,0032			7300
Weißesche	ESA	0,64		0,0036			11600
Winterlinde	LI	0,51	5	0,0027			7300

Tabelle 7: Holzarten der Kategorie 2
[Niemz 2006] [Mörath 1935] [Stiller 2007] [Schwarz]

Die zu erwartenden Verformungen für den Jahresgang der Luftfeuchte sind für einen Rechteckquerschnitt (Abbildung 62, Form B) aus Esche, Fichte, Eiche mit der raumseitigen Lamelle in Esche dargestellt für die Rechenmodelle

- 1) FEM [Stiller 2007],
- 2) Ungleiche Feuchte entsprechend dem Lastfall ungleiche Temperatur [Ahrens 1974],
- 3) Resultierendes Moment [Ahrens 1974].

Bei der Berechnung der Modelle 2 und 3 wurde die Quellung aus Quellungskoeffizient „h“ und Änderung der Luftfeuchtigkeit im Schwerpunkt der jeweils betrachteten Teilfläche als Kraft angesetzt.

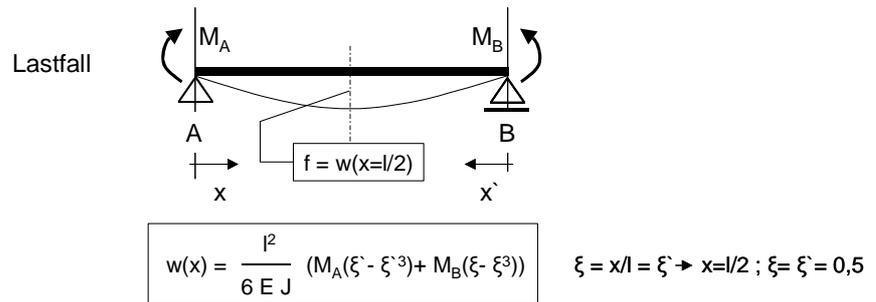


Abbildung 60: Der als vereinfachte Annahme der Berechnung der Verformung im Differenzklima zu Grunde gelegte Lastfall

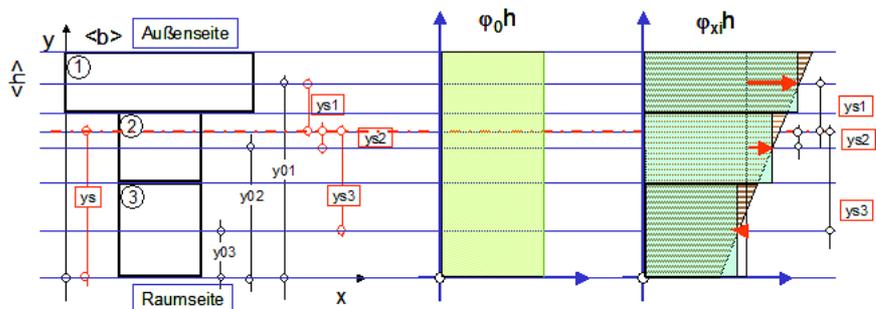


Abbildung 61: Darstellung der Momente aus den Quellungskoeffizienten und den Änderungen der Luftfeuchtigkeit zwischen der Herstellung und der Nutzung

Die vereinfachten Modelle bringen eine ausreichende Genauigkeit im Vergleich zur Berechnung mit dem FEM-Modell. Eine gesicherte Bestätigung der Berechnung durch Felduntersuchungen war im Rahmen des Projektes nicht möglich. Dennoch sind die durch Berechnungen gewonnenen Erkenntnisse ausreichend, um geeignete Kombinationen von Holzarten und die für die Verklebung notwendigen Bedingungen festzulegen.

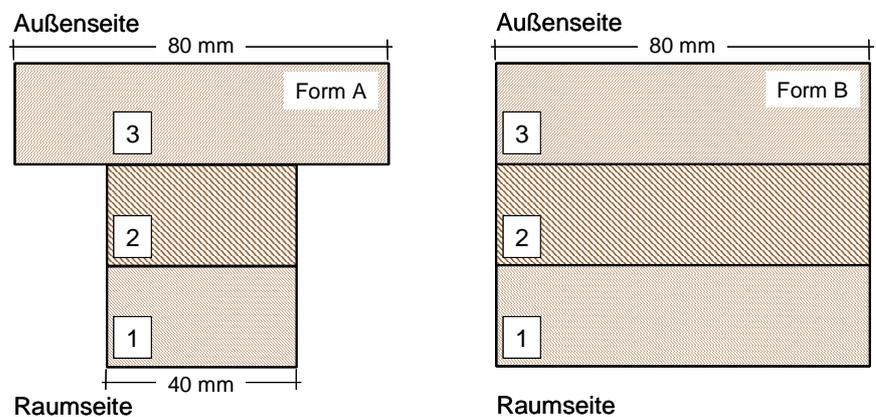


Abbildung 62: Für die Verformung im Differenzklima untersuchte Profilquerschnitte

Der Vergleich für ein Rechteckprofil zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den drei Rechenmodellen, so dass unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Quellungskoeffizienten „h“ und der Luftfeuchte für die weitere Betrachtung das Modell (3) „resultierende Momente“ verwendet werden kann.

Das Rechenmodell 3 erlaubt im Gegensatz zum Rechenmodell 2 auch die Berechnung einfacher symmetrischer Querschnitte, wobei neben unterschiedlichen Quellungskoeffizienten und Abmessungen zwischen den einzelnen Lamellen auch unterschiedliche E-Moduls berücksichtigt werden können.

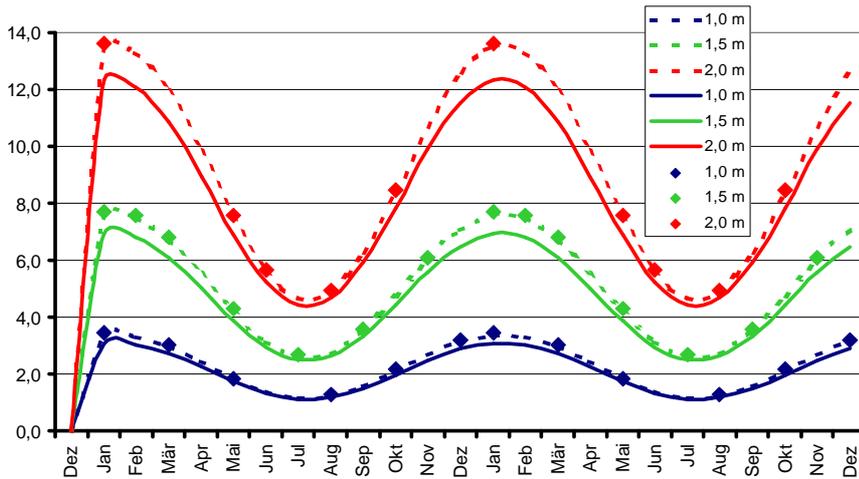


Abbildung 63: Vergleich der Verformung eines Rechteckprofils (Profilform B, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten für verschiedene Rechenmodelle mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 50 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00, 1,50, 2,00 m / Profildicke: 66 mm / Profilbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

- (2) Vereinfachtes Modell (gestrichelte Linie)
- (3) Delta M Modell (volle Linie)
- (1) FEM Modell (Punkte)

Der Vergleich der in Abbildung 64 und Abbildung 65 dargestellten Berechnung der Verformung zeigt, dass beim Rechteckquerschnitt (Profilform B) ein anderes Verformungsverhalten zu erwarten ist wie beim T-förmigen Querschnitt (Profilform A).

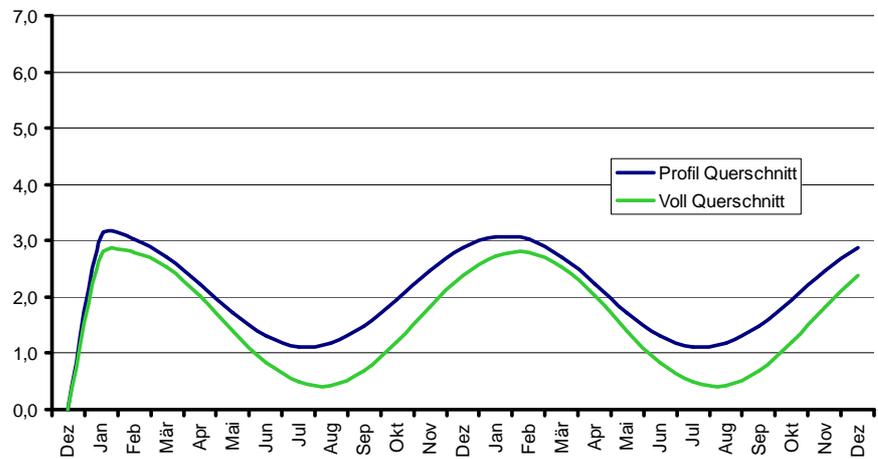


Abbildung 64: Verformung eines T-Profiles (Profilform A) und eines Rechteckprofils (Profilform B, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 50 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00 m / Profildicke: 66 mm / Profilbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

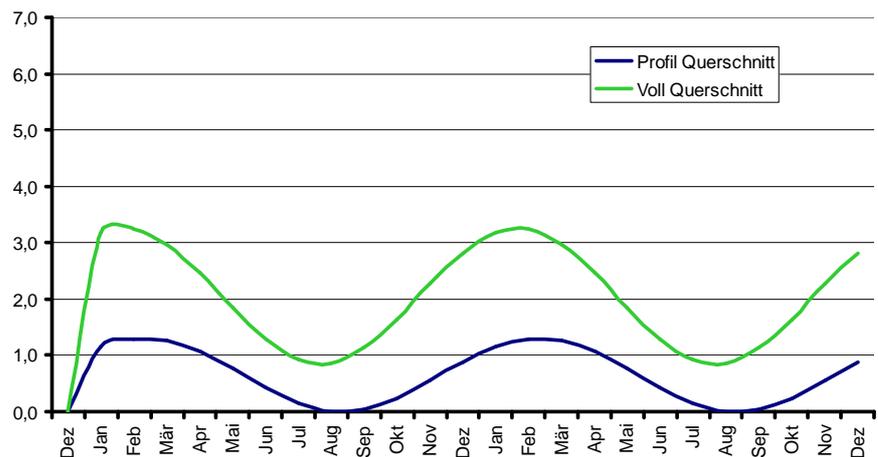


Abbildung 65: Verformung eines T-Profiles (Profilform A) und eines Rechteckprofils (Profilform B, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 60 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00 m / Profildicke: 66 mm / Profilbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

Im direktem Vergleich zeigt sich auch, dass das Ausgleichsklima bei der Herstellung unterschiedlichen Einfluss nimmt. Für die Verformung der in Abbildung 64 dargestellten Profile wurde angenommen, dass die einzelnen Lamellen der Profile vor der Verklebung bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % gelagert wurden.

Bei der Darstellung in Abbildung 65 ist von einer Lagerung der Lamellen vor der Verklebung von 60 % ausgegangen worden. Der Vergleich zeigt einen Einfluss des Ausgleichsklimas vor der Verklebung auf das Verformungsverhalten der Profile bei der Anwendung.

Der Vergleich für ein T-Profil bei unterschiedlicher Ausgleichsfeuchte vor der Verklebung der einzelnen Lamellen zeigt einen geringen Einfluss auf das Verformungsverhalten bei der Nutzung. Vorausgesetzt ist aber, dass die einzelnen Lamellen, die verklebt werden, eine gleiche Ausgleichsfeuchtigkeit haben.

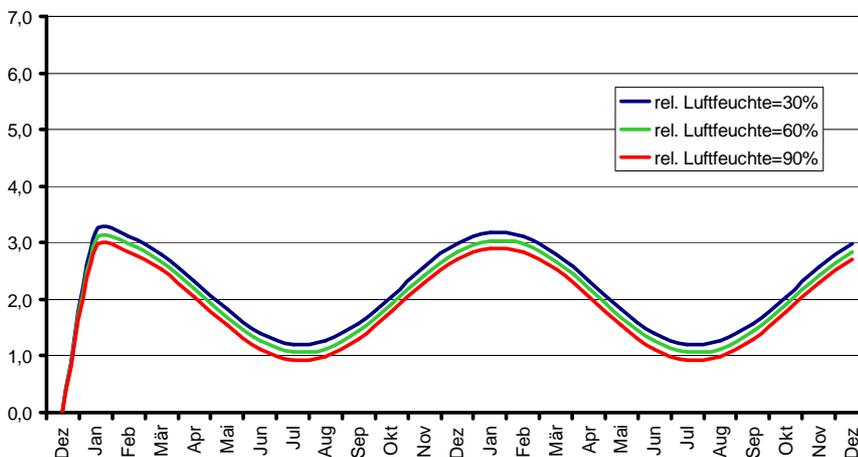


Abbildung 66: Einfluss der Ausgleichsfeuchte der Lamellen eines T-Profiles (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 30 / 60 / 90 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00 m / Profildicke: 66 mm / Profilbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

Einen deutlichen Einfluss zeigt der Quellungskoeffizient bei unterschiedlichem Aufbau (Abbildung 67) insbesondere dann, wenn der Quellungskoeffizient der Außenlamelle stark von dem der übrigen Lamellen abweicht. Dies gilt sowohl für die innere als auch für die äußere Lamelle (Abbildung 68), wobei der Quellungskoeffizienten „h“ der Außenlamelle einen größeren Einfluss nimmt.

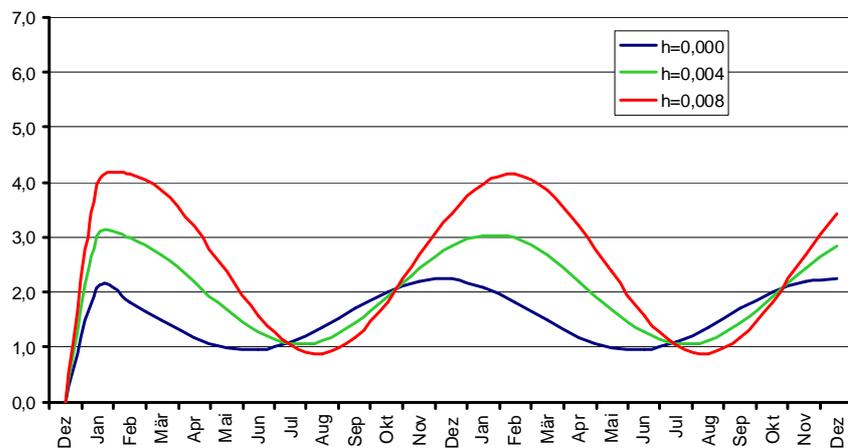


Abbildung 67: Einfluss des Quellungskoeffizienten auf der Raumseite auf die Verformung eines T-Profiles (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Holzart ($h = 0,000 - 0,008$), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 60 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00 m / Profildicke: 66 mm / Profilbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

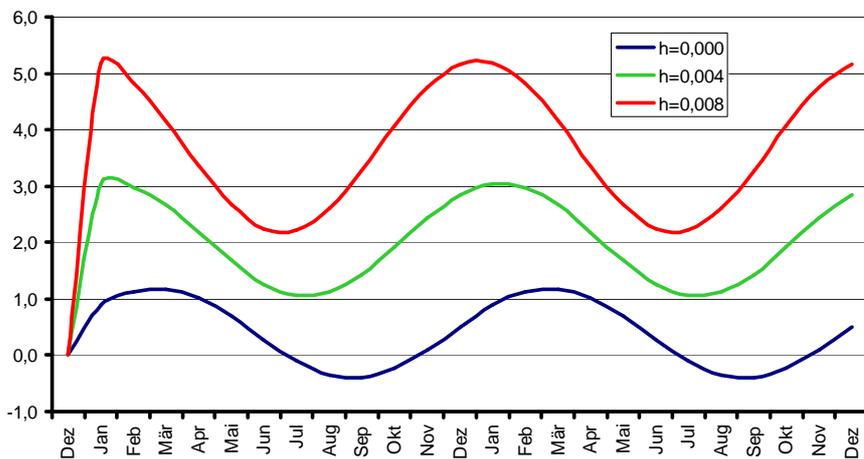


Abbildung 68: Einfluss des Quellungskoeffizienten der Außenlamellen auf die Verformung eines T-Profiles (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Holzart ($h = 0,000 - 0,008$), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 60 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00 m / Profildicke: 66 mm / Profilbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

Unabhängig vom Aufbau und von der Querschnittsform ist die Verformung im Differenzklima von der Profillänge abhängig, wie dies aus Abbildung 69 deutlich wird, wobei die Verformung quadratisch mit der Länge ansteigt.

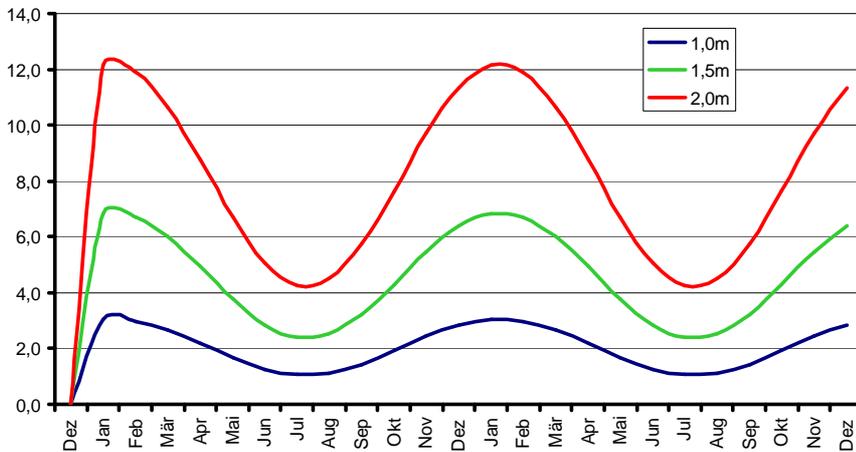


Abbildung 69: Einfluss der Länge auf die Verformung eines T-Profiles (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 60 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00, 1,50, 2,00 m / Profildicke: 66 mm / Profillbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

Deutlich wird auch der Einfluss der Profildicke auf die Verformung, wobei mit wachsender Profildicke die Verformung geringer wird (Abbildung 70).

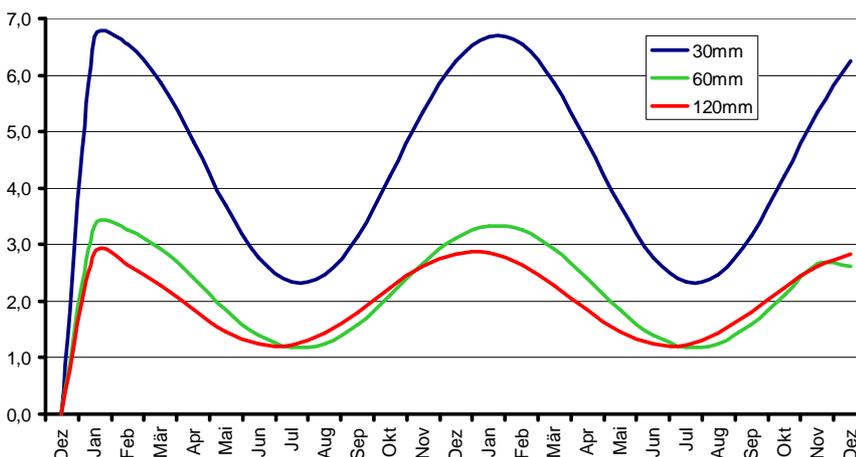


Abbildung 70: Verformung eines T-Profiles (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite

Ausgleichsfeuchte: 60 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00 m / Profildicke: 30 / 60 / 120 mm / Profillbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

Im Folgenden werden verschiedene Einflüsse auf das Verformungsverhalten der Profilquerschnitte im Differenzklima untersucht, wobei ein Rechteckquerschnitt mit einer Breite von 80 mm und einer Dicke von 66 mm, bestehend aus 3 Lamellen von je 22 mm Dicke, betrachtet wird. Der Rechteckquerschnitt wurde deshalb gewählt, weil bei der Herstellung von verleimten Profilen in der Regel Rechteckquerschnitte hergestellt werden, die nach der Verklebung und einer angemessenen Zwischenlagerung weiterbearbeitet werden und der Rechteckquerschnitt mit allen drei Rechenmodellen untersucht werden kann.

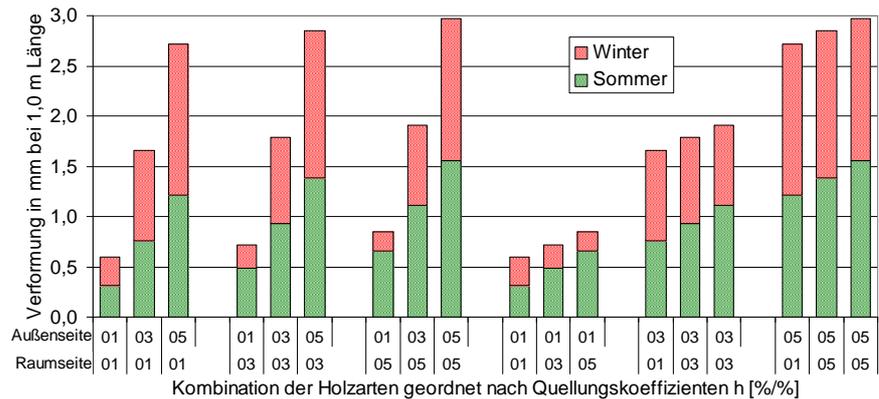


Abbildung 71: Einfluss der Quellungskoeffizienten h auf das Verformungsverhalten eines Rechteckprofils (Profilform B nach Abbildung 62) für die Klimabedingungen:

Winter: November - Luftfeuchtigkeit 86,9 % außen / 51,6 % innen
 Sommer: Juni - Luftfeuchtigkeit 72,0 % außen / 53,5 % innen

mit dem Profilaufbau Quellungskoeffizienten 0,001, 0,003, 0,005 auf der Raumseite und auf der Außenseite

Ausgleichsfeuchte: 60 % Luftfeuchtigkeit bei der Herstellung

Profillänge: 1,00 m / Profildicke: 66 mm / Profilbreite: 80 mm

Grundlage der Berechnung:

(3) Delta M Modell

Die Auswertung der in Abbildung 71 dargestellten Parameterstudie zeigt deutlich, den Einfluss des Quellungskoeffizienten der Außenlamelle auf das Verformungsverhalten. In Abbildung 71 ist die Verformung im Sommer vor den Balken der Verformung im Winter gestellt. Damit wird die Differenz der Verformung zwischen Sommer und Winter verdeutlicht. Deutlich zeigt sich, je geringer der Quellungskoeffizient der Außenlamelle ist, um so geringer ist die Verformung, die am Profil im Differenzklima auftritt.

Damit steht mit dem Rechenmodell 2 ein einfaches Verfahren zur Verfügung, um die zu erwartende Verformung von Profilquerschnitten im Jahresgang der Luftfeuchtigkeit des Innen- und Außenklimas abzuschätzen.

7.2 Tauwasser in den Falzen

Die in der Praxis beobachtete Tauwasserbildung in den Falzen von Fenstern und Türen konnte im Feldversuch nachvollzogen werden.

Dabei zeigten sich Einflüsse aus:

- der Anordnung und Wirkung der Falzdichtungen,
- der Feuchtigkeitsbelastung von der Raum- und Außenseite,
- der Druckbeanspruchung von der Raum- und Außenseite.

Diese Tauwasserbildung kann bei Holzfenstern zu einer kritischen Durchfeuchtung des Holzes mit der Gefahr der Holzzerstörung durch Pilzbefall führen. Einer erhöhten Belastung ist auch der Randverbund des Isolierglases ausgesetzt, so dass unabhängig vom Werkstoff der Rahmen bei Anfall von Tauwasser auch mit einem vorzeitigen Ausfall des Isolierglases gerechnet werden muss.

Die Einflüsse, die zur Tauwasserbildung in den Falzen führen, wurden im Rahmen des Projektes an Fenstern untersucht und die gewonnenen Erkenntnisse im Abschnitt 6.4 beschrieben. Dennoch sind noch nicht alle Fragen hinreichend geklärt, so dass auch die notwendigen Maßnahmen zur Vermeidung noch nicht mit der notwendigen Sicherheit beschrieben werden können.

Zur Vermeidung einer unkontrollierten Feuchtebelastung am Fenster ist es notwendig, das Umfeld so zu gestalten, dass Tauwasser nicht oder nur in geringen Mengen auftritt. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Grundlagen zur Bewertung von Wärmebrücken bekannt sind und deshalb Tauwasser an Wärmebrücken beherrschbar ist. Bei den Wärmebrücken besteht allenfalls Handlungsbedarf.

Erkenntnisbedarf besteht aber hinsichtlich:

- der Druckverhältnisse im Gebäude,
- der Luftströmung am Fenster,
- dem Einströmen von Raumluft in offene Konstruktionsräume,
- dem Durchströmen von Fugen und Falzen durch Raumluft.

Diese Fragen sind in Labor- und Feldversuchen untersucht. Dabei zeigte sich unter anderem, dass bereits geringe Undichtheiten, z. B. im Bereich der Griffölvnen, zu Tauwasserbildung im Falz führen.

Für eine Verallgemeinerung fehlt noch die Beschreibung der theoretischen Zusammenhänge, die so zu formulieren sind, dass eine Berechnung der Abläufe und damit eine Abschätzung der Maßnahmen zur Vermeidung von Tauwasser möglich ist. Diese Möglichkeit muss auch bei der Anwendung von Fenstern der heutigen Generation und bei der Sanierung des Bestandes gegeben sein.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen können die zur Vermeidung von unkontrollierter Feuchtigkeitsbelastung notwendigen Randbedingungen beschrieben werden für:

- das Fenster,
- das Raumklima,
- die Gebäudehülle.

Ein Erfolg der Bemühungen Tauwasser in den Falzen zu vermeiden und das Holzfenster damit zu entlasten, ist aber nur dann zu erwarten, wenn die Erkenntnisse durchgängig vom Planer, vom Bauherrn, von den ausführenden Firmen und vom Nutzer umgesetzt werden.

Vorrangig ist zunächst die Klärung der bauphysikalischen Zusammenhänge, die zur Belastung des Fensters führen. Die bisherigen experimentelle Untersuchungen sind durch theoretische Ansätze zu bestätigen. Im Wesentlichen geht es dabei um die Druckdifferenzen innerhalb des Gebäudes und im Verhältnis zur Umgebung und deren Auswirkungen auf die Feuchtigkeitsbelastung der Fenster [Geißler 1997] [Benz 2007]. Darauf aufbauend ist dann ein abgesichertes Verfahren zur Berechnung der Feuchtebelastung an eingebauten Fenstern zur Verfügung zu stellen. Auf der Grundlage der Berechnungen sind dann für häufig wiederkehrende Anwendungsfälle die Bedingungen zu beschreiben, die für die Vermeidung kritischer Belastungen am Fenster zu beachten sind.

Die für die Umsetzung vorgesehene Bedingungsmatrix ist so aufzubauen, dass der Bauplaner und die ausführenden Firmen die notwendigen Entscheidungsgrößen für die Planung und Ausführung der Fenster und deren Umfeld entnehmen können. Sie soll auch Informationen für den Bauherrn enthalten, die begründen, weshalb die vorgesehenen Maßnahmen notwendig sind. Weiter sollen Informationen für den Nutzer abgeleitet werden können.

In einem weiteren Abschnitt sind dann die Kenngrößen für Konstruktionselemente des Fensters wie Spalten, Falze, Dichtungen und Beschläge zu beschreiben und in ihrer Größe experimentell zu bestimmen. Damit ist es dann möglich, das Verhalten von Konstruktionselementen zu beschreiben und Anforderungen an Falze, Dichtungen und Beschläge zu formulieren. Diese Erkenntnisse sind dann Grundlage für die Entwicklung und Konstruktion von Fenstern.

Es sind Auswirkungen der dichten Gebäudehülle auf die Tauwasserbildung als gesichert anzunehmen. Auch der Einfluss der Dichtheit der Fenster kann in Verbindung mit der Lage der Dichtung und dem Verlauf der Isotherme der Taupunkttemperatur als gesichert unterstellt werden. Durch Versuche bestätigt ist auch der Einfluss des Wasserdampfdruckes im Falz im Verhältnis zur Umgebung. Der Einfluss der Druckverteilung im Gebäude im Vergleich zur Umgebung wird vermutet, kann aber noch nicht genauer beschrieben werden. Weiter geklärt werden muss der Einfluss der Durchströmung der Falze und der Hohlräume als Folge der Druckdifferenz zwischen dem Außenklima und dem Raumklima.

Die durch Versuche zum Teil bekannten und durch theoretische Betrachtungen zu klärenden Einflussgrößen sind in Abbildung 72 dargestellt.

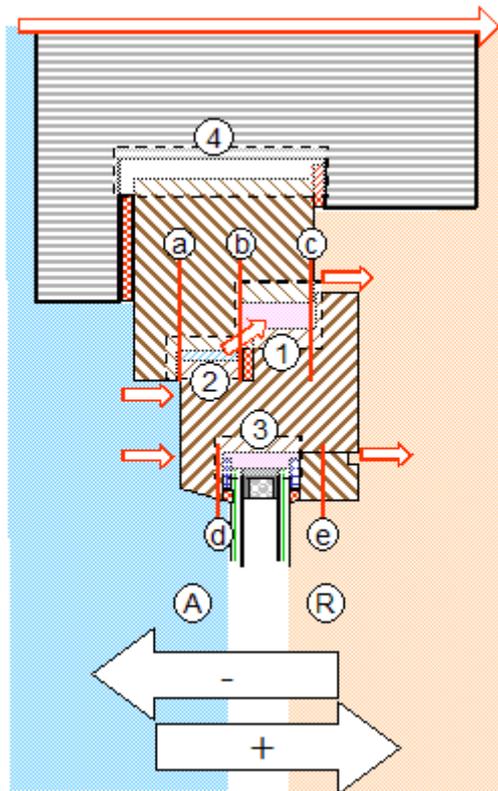


Abbildung 72: Bezeichnung und Definition der Dichtebenen am Fenster in der Außenwand

Umfeld	A = Außenklima / R = Raumklima
Vorzeichen	+ = dem Raum zugeführt / - = vom Raum abgeführt
Durchströmte Bereiche	1) Raumseitiger Falzraum 2) Außenseitiger Falzraum 3) Glasfalzraum 4) Wandanschluss
Dichtebenen	a) Äußere Dichtung b) Mitteldichtung c) Innere Dichtung d) Verglasung nach außen e) Glashalteleiste

8 Ausführung

8.1 Allgemeines

Ansätze für die Entwicklung innovativer Fenster und Türen müssen sich an den Schutzziele (Abbildung 6) orientieren und die notwendigen Eigenschaften, wie sie z. B. in DIN EN 14351-1 [DIN EN 14351-1 2006] formuliert sind, beachten. Ein Zielkonflikt ist dabei nicht immer zu vermeiden. Der häufigste Konflikt besteht zwischen der Energieeinsparung und der Vermeidung von Tauwasser an Bauteiloberflächen.

Die Beobachtung der Entwicklung der letzten Jahre lässt weiter erkennen, dass vielfach Fenster als Energiesparfenster angeboten werden, bei denen der Wärmeschutz im Vordergrund steht und alle übrigen notwendigen und unabdingbaren Eigenschaften in zum Teil unzulässiger Weise nachgeordnet wurden. Die Funktionsfähigkeit solcher Fenster über einen angemessenen Nutzungszeitraum ist im praktischen Gebrauch häufig nicht gegeben.

Im Nachfolgenden werden deshalb verschiedene notwendige Eigenschaften der Fenster behandelt und das vorhandene Wissen als Orientierungswissen [Schmid 2006] dargestellt, so dass die behandelten konstruktiven Einflüsse auf Fenster und Türen nicht in allen Fällen schlüssig miteinander verbunden bzw. aufeinander abgestimmt sind.

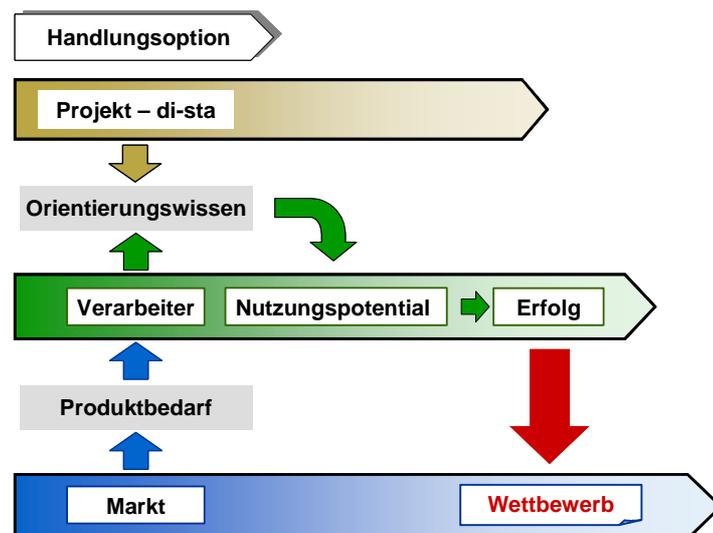


Abbildung 73: Handlungsoption – abgeleitet aus den Szenarien zur Darstellung und Anwendung des Orientierungswissens [Schmid 2006]

Wesentliche Ziele bei der Entwicklung sind dabei:

- Erhaltung des Charakters und des Aussehens des Holzes,
- Sicherstellung der notwendigen Eigenschaften,
- Verbesserung der Dauerhaftigkeit und des Erhaltens bei mechanischen Eigenschaften,
- Verlängerung der Wartungsintervalle für Instandhaltung und Instandsetzung,
- Verbesserung der Instandhaltungs- und Instandsetzungsfreundlichkeit.

Die Betrachtung der Bauteileigenschaften zeigt, dass nur durch ein abgestimmtes Zusammenwirken von Werkstoff und Systemen in Bauteilen das Ziel der Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit über einen angemessenen Nutzungszeitraum, erreicht werden kann.

Die Betrachtung der Struktur Werkstoff – System – Bauteil erleichtert die Arbeit an der Gesamtaufgabe Fenster und Türen, da mit der Struktur die Zusammenhänge verdeutlicht werden und eine Abgrenzung der einzelnen Komponenten erleichtert wird.

Eine Verknüpfung der Fenstersysteme mit den verschiedenen Möglichkeiten des Aufbaus von Profilen als Grundlage einer Fensterkonstruktion ist in Abbildung 74 dargestellt.

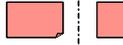
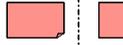
Profile		Fenster			
Aufbau	Werkstoff	Einfachfenster	Verbundfenster Innen – Flügel - außen	Kastenfenster Innen – Flügel - außen	
Schichtholz 	gleiche Holzart				
	unterschiedliche Holzarten				
Sandwich Decklagen aus Holz 	mit Holzwerkstoff				
	mit Dämmstoff				
	mit anderen Werkstoffen				
Verbund lösbarer Verbund 	mit Holz				
	mit anderen Werkstoffen				

Abbildung 74: Darstellung der Anwendung unterschiedlicher Profilaufbauten auf die Fensterkonstruktionen Einfach-, Verbund- und Kastenfenster

Im vorliegenden Fall werden schwerpunktmäßig die Profilaufbauten aus Schichtholz behandelt. Die Sandwich-Aufbauten unterscheiden sich bei der praktischen Anwendung vom Schichtholz insbesondere in der Bewertung des mechanischen Tragverhaltens. Die Profilaufbauten „lösbarer Verbund“ werden in der vorliegenden Arbeit durch das Holz-Aluminiumfenster abgedeckt.

Die weitere Betrachtung zeigt, dass in Abhängigkeit des Konstruktionskonzeptes die Zusammenhänge zwischen den natürlichen Holzeigenschaften und den zusätzlichen technischen Maßnahmen weiter zu spezifizieren sind. Erst danach ist die Entscheidung zu treffen, welche Holzart und welcher Profilaufbau notwendig ist, um das angestrebte Ziel der Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit bei vertretbarem Aufwand an Wartung zu erreichen.

Die Eigenschaften des Bauteils werden durch im System berücksichtigte Eigenschaften des Werkstoffes bestimmt. Verdeutlicht wird dies z. B. durch die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes. Über die Systemeigenschaften werden, z. B. durch die Abweisung von Wasser die Eigenschaften des Werkstoffes über den Nutzungszeitraum sichergestellt und damit die Erarbeitung einer Konstruktion ermöglicht.

Im Bereich Bauteil muss unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften, der Konstruktion und der Herstellung deren Zusammenwirken abgestimmt werden, um bei den planmäßigen Umgebungseinwirkungen sowie bei einer zumutbaren Instandhaltung die Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen. Wesentlich ist es, die Schnittstellen zwischen Werkstoff, System und Bauteil zu definieren, ihre Leistungsgrenzen festzulegen und das Risiko abzuschätzen, welches mit dem Versagen von Schnittstellen verbunden sein kann.

8.2 Raumseitige Oberflächentemperaturen am Glas

Eine wichtige Konstruktionsmaßnahme ist die Vermeidung von Tauwasser auf der raumseitigen Oberfläche, in den Falzen und in den Hohlräumen der Konstruktion. Im Zusammenwirken von Glas und Rahmen stellt dabei der Randverbund des Mehrscheiben-Isolierglases eine Schwachstelle dar. Durch die Notwendigkeit, den Randverbund beim Mehrscheiben-Isolierglas dicht zu gestalten, sind die wärmetechnischen Eigenschaften im Randbereich ungünstiger als in der Scheibenmitte. Bei der Beurteilung der wärmetechnischen Eigenschaften des Isolierglases wird nach den Regelwerken [DIN 4108 2003] der Randverbund deshalb besonders behandelt.

Auch bei der Bewertung der raumseitigen Oberflächentemperatur ist der Randbereich des Isolierglases aufgrund des konstruktiven Aufbaus ungünstiger als die Scheibenmitte. Die Oberflächentemperatur auf der Raumseite wird darüber hinaus noch von der Anordnung des Glases im Rahmen beeinflusst, wie sich dies aus Abbildung 75 für eine Rahmendicke von 68 mm und aus Abbildung 76 für eine Rahmendicke von 100 mm ergibt.

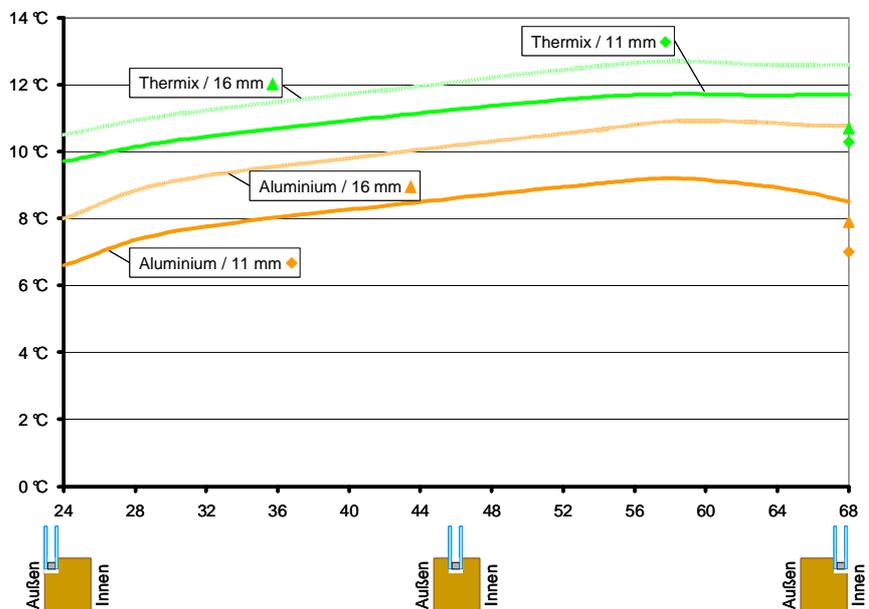


Abbildung 75: Niedrigste Oberflächentemperatur am Rand des Mehrscheiben-Isolierglases bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C und einer Außentemperatur von -10 °C auf der raumseitigen Scheibenoberfläche des Fensters mit einer Rahmendicke von 68 mm

Scheibenaufbau: 4 / 16 / 4 mm - U = 1,1

Glaseinstand: 11 mm (Linie) / 16 mm (gestrichelt)

Abstandhalter: Aluminium (braun) / Thermix (grün)

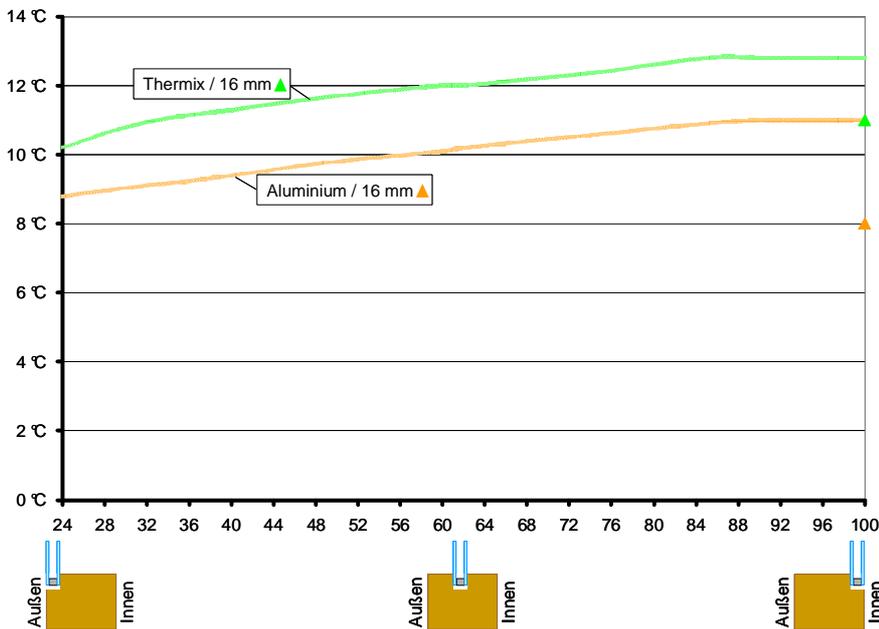


Abbildung 76: Niedrigste Oberflächentemperatur bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C und einer Außentemperatur von -10 °C auf der raumseitigen Scheibenoberfläche des Fensters mit einer Rahmendicke von 100 mm

Scheibenaufbau: 4 / 16 / 4 mm - U = 1,1

Glaseinstand: 16 mm (gestrichelt)

Abstandhalter: Aluminium (braun) / Thermix (grün)

Das Ergebnis der Betrachtung in Abbildung 75 und Abbildung 76 zeigt deutlich, dass eine mit der Außenseite bündige Isolierglasscheibe zu einer niedrigeren raumseitigen Oberflächentemperatur und damit zu einer größeren Gefahr der Tauwasserbildung führt wie bei einer Isolierglasscheibe, die innerhalb des Rahmens angeordnet ist. Die günstigste Position hinsichtlich der raumseitigen Oberflächentemperatur liegt im ersten Drittel des Profils von der Raumseite gesehen.

Begünstigt wird die Oberflächentemperatur zusätzlich durch:

- zunehmenden Glaseinstand,
- die Verwendung von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern.

Die Umsetzung dieser Erkenntnisse in die praktische Anwendung hat ihre Grenzen zunächst in den derzeitigen Wünschen der Architektur nach flächigen Elementen. Darüber hinaus ist bei der optimalen Lage der Isolierglasscheibe im Rahmen die der Witterungsseite zugewandte Profiloberfläche groß und damit die Notwendigkeit und der Aufwand zur Wartung höher als bei den heute üblichen Konstruktionen.

8.3 Wärmebrücken im Falz

Bei den heute üblichen Fensterkonstruktionen ist am unteren Querstück des Blendrahmens eine Wetterschutzschiene aus Metall eingebaut, um

- in den äußeren Falz eingedrungenes Wasser zu sammeln und kontrolliert zur Außenseite abzuleiten.
- das Holz vor Beschädigungen bei mechanischen Einwirkungen zu schützen.
- an den außenliegenden Profilflächen die Witterungseinwirkungen auf das Holz zu mindern.

Durch die Wetterschutzschienen entsteht eine Wärmebrücke, die in Verbindung mit der Zuströmung von Raumluft in den Falzbereich zu einer Tauwasserbelastung führen kann. In Abbildung 77 bis Abbildung 79 ist der Isothermenverlauf für heute übliche Wetterschutzschienen aus Aluminium-Strangpressprofilen gezeigt. Die Abbildungen verdeutlichen, dass unabhängig von der Ausbildung der Wetterschutzschiene vor der Falzdichtung im raumseitigen Teil des Falzes sowohl mit Tauwasser als auch mit Eisbildung gerechnet werden muss.



Abbildung 77: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einer „einteiligen Wetterschutzschiene“ aus Aluminium-Strangpressprofilen und Holzanschlag.

Die 10 °C-Isotherme der Taupunkttemperatur (rot) verläuft im Beschlagbereich des Falzraumes. Die 0 °C-Isotherme verläuft im Falzbereich raumseitig vor der Wetterschutzschiene. Mit Tauwasser und Eisbildung ist zu rechnen.

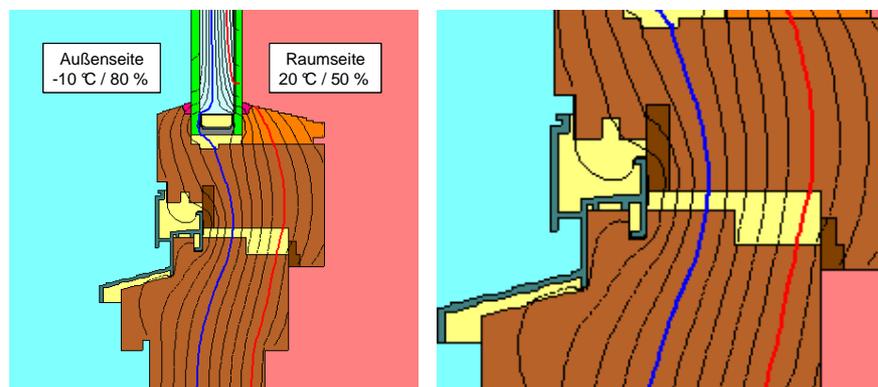


Abbildung 78: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einer „einteiligen Wetterschutzschiene“ aus Aluminium-Strangpressprofilen.

Die 10 °C-Isotherme der Taupunkttemperatur (rot) verläuft im Beschlagbereich des Falzraumes. Die 0 °C-Isotherme verläuft im Falzbereich raumseitig vor der Wetterschutzschiene. Mit Tauwasser und Eisbildung ist zu rechnen.

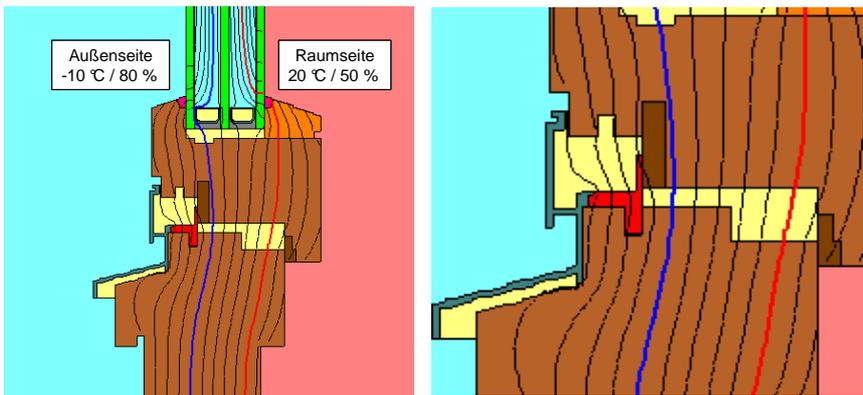


Abbildung 79: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einer „wärmegeprägten Wetterschutzschiene“ aus Aluminium-Strangpressprofilen

Die 10 °C-Isotherme der Taupunkttemperatur (rot) verläuft im Beschlagbereich des Falzraumes. Die 0 °C-Isotherme verläuft im Falzbereich raumseitig vor der Wetterschutzschiene. Mit Tauwasser und Eisbildung ist zu rechnen.

Die Ausführung der Wetterschutzschiene, bei der die Falzdichtung am Holz anliegt (Abbildung 77) und die wärmegeprägte Ausführung der Wetterschutzschiene mit einem Profilanteil aus Kunststoff (Abbildung 79) zeigen nach den durchgeführten Berechnungen keine wesentliche Verbesserung im Hinblick auf Tauwasser- und Eisbildung.

Es sind deshalb neue Ansätze notwendig, um das Temperaturverhalten im Falzbereich des Fensters wesentlich zu verbessern. Einen entsprechenden Ansatz zeigt Abbildung 80, bei der zwar auch mit Tauwasser im Falzbereich zu rechnen ist, Eisbildung aber nach dem berechneten Isothermenverlauf unter den Klimabedingungen -10 °C / 80 % und 20 °C / 50 % ausgeschlossen bleibt.

Nach den vorliegenden Erkenntnissen ist die Wetterschutzschiene zur Vermeidung von Wärmebrücken im Falzbereich so zu gestalten, dass das Aluminiumprofil nicht in den Falzbereich hineinragt.

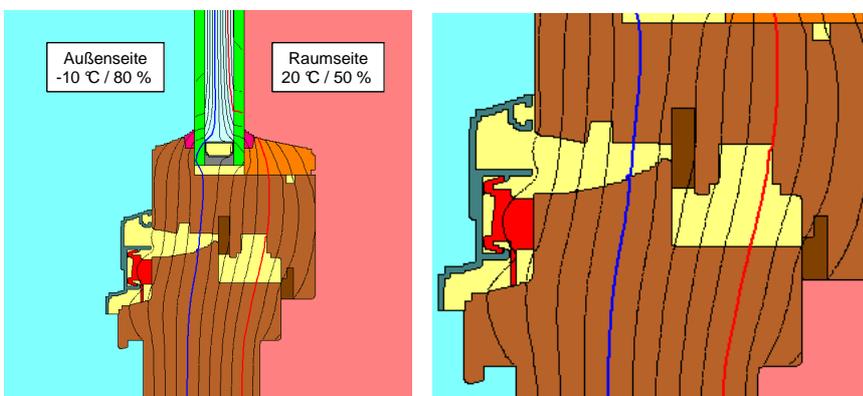


Abbildung 80: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einem vorgesetzten Wetterschutzprofil aus Aluminium-Strangpressprofilen

Klimabedingungen: Raumseite 20 °C / 50 % / Außen seite: -10 °C / 80 %

Die 10 °C-Isotherme der Taupunkttemperatur (rot) verläuft im Beschlagbereich des Falzraumes. Die 0 °C-Isotherme verläuft im Falzbereich auf der Außenseite vor der Mitteldichtung. Mit Tauwasser im Falzbereich ist zu rechnen. Eisbildung ist nicht zu erwarten.

8.4 Tauwasser im Falz

Der Tauwasseranfall in den Falzen der Fenster führt zu einer hohen Belastung des Holzes und birgt die Gefahr, dass die Nutzungserwartung des Fensters ungünstig beeinflusst wird. Die im Abschnitt 6.4 beschriebenen Ergebnisse der Feldversuche zeigen die Belastung und geben zugleich Anhalt für notwendige Maßnahmen, um Tauwasser im Falz zu vermeiden.

Ursache der Tauwasserbildung im Falz ist der Zugang von feuchter warmer Raumluft. Die Verweildauer der Raumluft im Falz ist in vielen Fällen ausreichend, um der Luft so viel Energie zu entziehen, dass die Taupunkttemperatur unterschritten wird und sich Tauwasser an den kalten Flächen der Falze niederschlägt. Das Tauwasser sammelt sich in der Regel im unteren Falz und bildet sich verstärkt an der Wetterschutzschiene.

Um Tauwasser im Falz zu vermeiden, ist es notwendig, den Wasserdampfdruck im Falz so zu beeinflussen, dass der als Kennwert eingeführte dimensionslose Dampfdruck sehr klein ist ($p < 1,0$) (Abbildung 81).

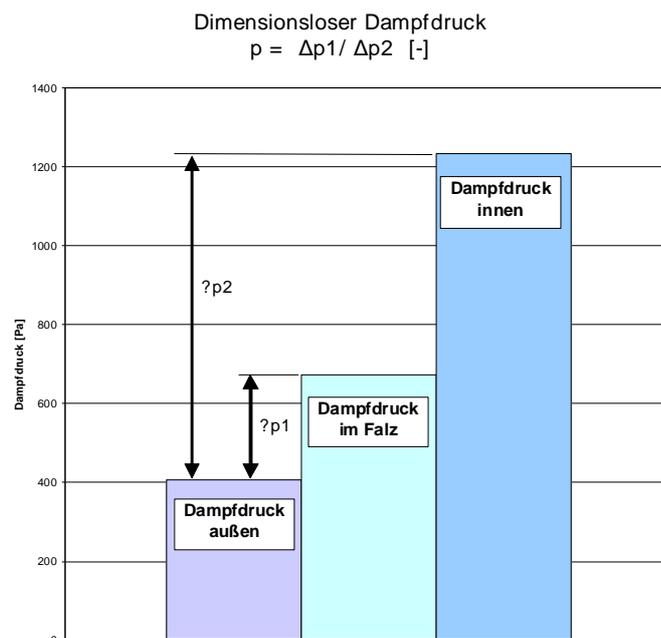


Abbildung 81: Notwendige Verhältnisse des Dampfdruckes innen im Falz und außen

Der Idealfall ist dann gegeben, wenn der dimensionslose Dampfdruck gegen null geht ($p \rightarrow 0$). Erreichbar ist dies durch die Anordnung und die Wirkung der Dichtung, wobei anzustreben ist, dass der Dampfdruck im Falz im Bereich des Dampfdrucks auf der Außenseite liegt. Dies wird dann erreicht, wenn die raumseitige Überschlafdichtung eine ausreichende Wirkung hat (c) und die Mitteldichtung (b) einen geringeren Widerstand aufweist, so dass ein Ausgleich zur Außenseite (A) möglich ist (Abbildung 72).

Bei den heute üblichen und auch in DIN 68121 beschriebenen Holzfensterkonstruktionen ist die Ausführung ohne raumseitige Überschlafdichtung (c) der Regelfall. Mit der fehlenden raumseitigen Überschlafdichtung ist auch die Häufung von Tauwasserbildung in den Falzen zu erklären.

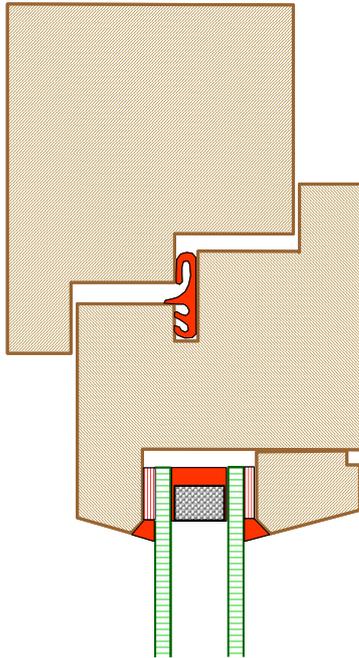


Abbildung 82: Profilausbildung des Holzfensters IV 68 nach DIN 68121 mit Mitteldichtung, aber ohne raumseitige Überschlagdichtung

Zur Vermeidung von Tauwasser im Falz ist eine raumseitige Überschlagdichtung notwendig (Abbildung 83), wobei eine ausreichende Sicherheit zur Tauwasserfreiheit nur dann erreicht wird, wenn die Dichtung nicht durch Beschlagteile oder durch Ausnehmungen für Beschlagteile unterbrochen wird.

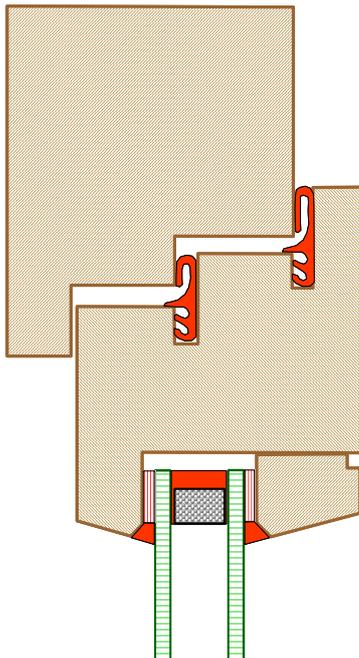


Abbildung 83: Profilausbildung für Holzfenster IV 68 nach DIN 68121 mit raumseitiger Überschlagdichtung

Für eine kontrollierte raumseitige Abdichtung bieten sich verdeckt liegende Beschläge an, bei denen die Beschlagteile im Falz angeordnet sind und die raumseitige Dichtebene nicht durchbrechen (Abbildung 84). Die Mitteldichtung muss in ihrer Wirkung so ausgerichtet sein, dass ein Druckausgleich zum Außenklima möglich ist, so dass die beschriebenen Bedingungen für den Kennwert des dimensionslosen Dampfdrucks erfüllt werden. Nach den durchgeführten Untersuchungen sind unter Umständen bereits kleine Leckstellen, z. B. im Bereich der Griffolive oder im Eckbereich der Dichtungen ausreichend, um den Dampfdruck im Falz ungünstig zu beeinflussen.

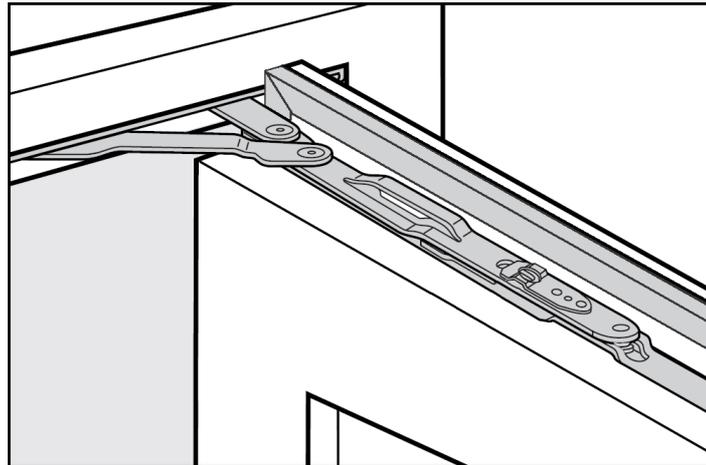


Abbildung 84: Verdeckt liegender Beschlag für Holzfenster mit der Möglichkeit des Einbaus einer umlaufenden Dichtung, die durch Beschlagteile nicht unterbrochen wird [Quelle: Roto-Frank].

Die Sicherstellung der Kenngröße mit einem kleinen dimensionslosen Dampfdruck ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für die Gebrauchstauglichkeit des Fensters, da auch die übrigen Funktionen wie z. B. Schlagregendichtheit und Schalldämmung erfüllt sein müssen.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand werden die Dampfdruckverhältnisse im Falz mit beeinflusst von:

- den Druckverhältnissen im Gebäude und der Luftströmung am Fenster,
- dem Einströmen von Raumluft in offene Konstruktionsräume,
- dem Durchströmen von Fugen und Falzen durch die Raumluft.

Die Einflussgrößen im Einzelnen konnten im Rahmen des Vorhabens nicht abschließend geklärt werden, so dass hier weiterer Handlungsbedarf besteht. Die durchgeführten Versuche haben aber gezeigt, dass die umlaufende raumseitige Überschlagnichtung ein Schritt in die richtige Richtung ist und einen Beitrag zur Vermeidung der Tauwasserbildung im Falz zwischen Flügel und Blendrahmen, leistet.

8.5 Tauwasser im Glasfalz

Vergleichbare Bedingungen gelten auch für die Ausführung der Verglasung mit raumseitiger Glashalteleiste. Auch hier ist es notwendig, die raumseitige Dichtebene ausreichend abzudichten, um das Eindringen von feuchter warmer Raumluft in den Glasfalz zu vermeiden. Die bisher übliche Befestigung der Glashalteleisten wird dieser Anforderung ohne zusätzliche Maßnahmen in der Regel nicht gerecht.

Die Anordnung der nach außen gerichteten Öffnungen des Glasfalzes zum Feuchtigkeitsausgleich mit dem Außenklima konnte im Rahmen des Vorhabens ebenfalls nicht abschließend geklärt werden. Auch hier sind weitere Versuche notwendig. Die bisherigen Öffnungen in Verbindung mit dem Schlitzzapfen der Eckverbindungen zeigten in den Versuchen kritische Merkmale, die Ausgangspunkt für Durchfeuchtungen sein können.

8.6 Verklebte Kanteln aus unterschiedlichen Holzarten

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung des Verformungsverhaltens von Rahmenprofilen im Differenzklima sind in Abschnitt 7.1 des Berichtes zusammengefasst. In Abbildung 71 ist der Einfluss der Quellungskoeffizienten „h“ auf das Verformungsverhalten eines Rechteckprofils untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass unter den angegebenen Klimabedingungen (Abbildung 56) der Einfluss des Quellungskoeffizienten „h“ der Außenlamelle größer ist als der Einfluss des Quellungskoeffizienten der Innenlamelle. Insofern ist anzustreben, bei der Auswahl der Holzarten die Quellungskoeffizienten zu beachten.

Diese Grundsätze gelten auch für Holz-Aluminium-Fenster, da davon auszugehen ist, dass im Außenbereich des Holzes unter dem Aluminiumprofil die relative Luftfeuchte und die Temperatur dem Außenklima ähnlich ist.

Für den praktischen Gebrauch erscheint es sinnvoll, für die Bewertung der Verformung von verklebten Kanteln aus unterschiedlichen Holzarten drei Klassen einzuführen und die zu erwartende Verformung wie folgt zu begrenzen:

Klasse	Rechnerische Verformung in mm bezogen auf eine Profillänge von 1 m
1	$0 < f \leq 1$
2	$1 < f \leq 2$
3	$2 < f$

Bei der Auswahl der Klassen steht die Gebrauchstauglichkeit des Fensters im Vordergrund. Das heißt, die tatsächliche Durchbiegung darf nur so groß sein, dass die Funktion des Fensters bzw. der Tür gegeben ist. Daraus folgt, dass z. B. die Falzdichtung die Verformung der Rahmenprofile ausgleichen muss.

Die Übersicht in Tabelle 8 gibt einen Anhalt für die richtige Paarung von Holzarten bei einem dreischichtigen Aufbau, wobei für die Mittellamelle Fichtenholz mit einem Quellungskoeffizienten „h“ = 0,003 % / % angesetzt wurde.

Nr.	Holzart	Mittellamelle Fichte h = 0,003 in [% / %]													
		Innenlamelle													
		h bis 0,003	a	b	c	d	e	0,003 < h < 0,004	f	g	h	i	h größer 0,004	j	k
	Ahorn	Winterlinde	Birke	Rüster	Fichte		Kirschbaum	Rotbuche	Esche	Nussbaum		Birnbaum	Erl		
h bis 0,002															
1	Thermo-Kiefer		1	1	1	1	1		1	1	1	1		1	1
2	Stieleiche		1	1	1	1	1		1	1	1	1		1	1
3	Robinie		1	1	1	1	1		2	2	2	2		2	2
0,002 < h < 0,004															
4	Khaya Mahagoni		2	2	2	2	2		2	2	2	2		2	2
5	Lärche		2	2	2	2	2		2	2	2	2		2	2
6	Dark Red Meranti		2	2	2	2	2		2	2	2	2		2	2
7	Fichte		2	2	2	2	2		2	2	2	2		2	2
8	Western Red Cedar		2	2	2	2	2		2	2	2	2		2	2
9	Douglasie		2	2	2	2	2		2	2	2	2		2	2
10	Traubeneiche		2	3	3	3	3		3	3	3	3		3	3
h größer 0,004															
11	Tanne		3	3	3	3	3		3	3	3	3		3	3
12	Shortleaf Pine		3	3	3	3	3		3	3	3	3		3	3
13	Teak		3	3	3	3	3		3	3	3	3		3	3
14	Gemeine Kiefer		3	3	3	3	3		3	3	3	3		3	3
15	Edelkastanie		3	3	3	3	3		3	3	3	3		3	3
16	Pitch Pine		3	3	3	3	3		3	3	3	3		3	3

Tabelle 8: Zuordnung von Holzarten für Innenlamellen und Außenlamellen bei der Verklebung von Profilquerschnitten in der Dicke aus drei Schichten

Die Klasse 1 (grüne Felder) zeigt günstige Paarungen.

Die Klasse 2 (orange Felder) zeigt Paarungen, die noch als ausreichend gelten können.

Die Klasse 3 (rote Felder) zeigt Paarungen, die hinsichtlich der Verformung als kritisch zu bewerten sind.

Wegen der großen Streuung der Quellungskoeffizienten (Tabelle 6 und Tabelle 7) wird empfohlen, im Anwendungsfall mit dem zum Einsatz vorgesehenen Holz die Empfehlungen der Tabelle 8 durch eigene Versuche zu bestätigen.

Für die Verklebung der einzelnen Lamellen kann eine pauschale Empfehlung für einen geeigneten Klebstoff nicht gegeben werden, da sich die Klebstoffe in ihrer Benetzung und ihrer Abbindezeit bei den verschiedenen Holzarten unterschiedlich verhalten können [Schmid 2006]. Insofern ist eine Abstimmung im Einzelfall notwendig.

Die vorliegenden Erfahrungen zeigen, dass bei den im Fensterbau häufig eingesetzten PVAc-Klebstoffen die geringsten Erfolgsaussichten auf eine gute Verklebung bestehen. Bei PUR-Klebstoffen sind die besten Ergebnisse zu erwarten, aber auch hier ist eine Abstimmung notwendig.

Die Qualität der Ausführung der Verklebung ist durch eine Fertigungskontrolle sicherzustellen [ift Richtlinie 2002]. Dabei wird u. a. eine Wasserlagerung und ein Spaltversuch durchgeführt.

Vor der Verklebung ist darauf zu achten, dass die verschiedenen zu verklebenden Holzlamellen im gleichen Umgebungsklima so lange gelagert werden, bis sich die Ausgleichsfeuchte einstellt.

Die sonst in der Praxis geläufige Holzfeuchtigkeit ist als Kenngröße für den Vergleich der verschiedenen Holzarten untereinander ungeeignet, weil sich die Sorptionsisothermen der einzelnen Holzarten wesentlich unterscheiden können, wie dies in Abschnitt 7.1 beschrieben ist. Dies zeigen auch die unterschiedliche Werte der Holzfeuchtigkeit, die für das Ausgleichsklima mit einer relativen Luftfeuchte von 50 % in Tabelle 9 zusammengestellt sind.

Holzart / Holzwerkstoffe	Holzfeuchtigkeit „u“ in %	Relative Luftfeuchtigkeit in % des Ausgleichsklimas
Thermowood Kiefer	5	50
Afzelia	7	50
Tanne	9	50
Trauben-Eiche	11	50
Spanplatte	11,5	50
Fichte	9,5	50
MDF	7	50
Esche	9	50
Teak	8	50
Lärche	11	50
Nussbaum	9	50

Tabelle 9: Zusammenstellung ausgewählter Holzarten mit Angabe der Holzfeuchtigkeit „u“ in % für die Lagerung in einem Ausgleichsklima mit einer Luftfeuchtigkeit von 50 %

Bei Fenstern und Türen werden im Allgemeinen Profilquerschnitte mit drei Lamellen eingebaut, so dass eine Homogenisierung der Eigenschaften in den einzelnen Lamellen, die bei einer höheren Anzahl von Schichten erreicht werden kann, nicht zu erwarten ist.

Insofern ist es notwendig, für die Innen- und Außenlamellen ausgesuchtes Holz einzusetzen, damit Unregelmäßigkeiten im Wuchs und im Jahrringverlauf nicht zu zusätzlichen Spannungen und damit zu unkontrollierten Verformungen führen.

Für die Festlegung des Profilaufbaus und die Herstellung der Profile sind deshalb folgende Grundsätze zu beachten:

Profilaufbau	Symmetrischer Profilaufbau
Holzarten	<p><u>Außenseite:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Für Fenster und für die Außenanwendung geeignete Holzart verwenden • Niedrigen Quellungskoeffizienten anstreben <hr/> <p><u>Raumseite:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Dekorative und für Rahmenkonstruktionen geeignete Holzart verwenden • Hohen Quellungskoeffizienten vermeiden
Holzqualität	<ul style="list-style-type: none"> • Paralleler Jahrringverlauf mit gleichmäßiger Struktur
Holzfeuchte	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgleichsfeuchte bei Lagerung im Klima mit gleicher relativer Luftfeuchte
Klebstoff	<ul style="list-style-type: none"> • Holzartenbezogene Auswahl unter Beachtung der Anforderungen und der Verarbeitungsbedingungen
Zwischenlagerung vor der Verklebung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Überschreitung der maximalen Zwischenzeit nach der Oberflächenbehandlung
Herstellung Verklebung	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung der durch den Klebstoff und die Holzarten gegebenen Verarbeitungsbedingungen wie Umgebungstemperatur oder Presszeit
Zwischenlagerung nach der Verklebung	<ul style="list-style-type: none"> • Ausreichende Zwischenlagerung in der Ausgleichsfeuchte, in der die Lamellen gelagert wurden.
Bearbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Symmetrischen Profilaufbau in der Dicke beibehalten • Ungleiche Breiten auf der Außen- und auf der Raumseite beeinflussen die Verformung im Differenzklima

Literaturverzeichnis

[Ahrens 1974]	Ahrens, H.; Duddeck, H.: Statik der Stabtragwerke: Betonkalender 1974; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn; Berlin; 1974
[Benz 2007]	Benz, H.: Untersuchung der Druckverhältnisse in Gebäuden auf Grund des thermischen Auftriebes und der Windbelastung zur Abschätzung der Tauwasserbildung in den Falzen der Fenster; Diplomarbeit; Fachhochschule Rosenheim; 2007
[DIN 1946-6 1998]	DIN 1464-6: Raumluftechnik: Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Anforderungen, Ausführung, Abnahme; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg); Beuth Verlag; Berlin; 1998
[DIN 4108 2003]	DIN 4108: Wärmeschutz und Energieeinsparung von Gebäuden; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg); Beuth Verlag; Berlin; 2003
[DIN 52184 1979]	DIN 52184: Bestimmung der Quellung und Schwindung; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg); Beuth Verlag; Berlin; 1979
[DIN 68121 1984]	DIN 68121: Holzfensterprofile für Fenster und Fenstertüren: Maße und Qualitätsanforderungen; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg); Beuth Verlag; Berlin; 1984
[DIN EN 14351-1 2006]	DIN EN 14351-1: Fenster und Türen – Produktnorm: Leistungseigenschaften: Teil 1 – Fenster und Außentüren ohne Eigenschaften bezüglich Feuerschutz und/oder Rauchdichtheit; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg); Beuth Verlag; Berlin; 2006
[DIN EN ISO 15148 2002]	DIN EN ISO 15148: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg); Beuth Verlag; Berlin; 2002
[EnEV 2007]	Energieeinsparverordnung; Beuth Verlag; Berlin; 2007
[Engels 2006-1]	Engels, I.: Simulation des Verformungsverhaltens von geklebten Verbundquerschnitten; Studienarbeit; Fachhochschule Rosenheim; 2006
[Engels 2006-2]	Engels, I.: Untersuchung zur Bandbreite des Quell- und Schwindmaßes von Holz; Projektarbeit; Fachhochschule Rosenheim; 2006
[Fitl 2005]	Fitl, R.; Schober, K. P.: Hochleistungsprofile – Holzartenkombinationen und thermische Optimierung; Holzforschung Austria; Wien; 2005
[Fortuin 2003]	Fortuin, G.: Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz; Dissertation; Universität Hamburg; 2003

-
- [Geißler 1997] Geißler, A.: Dichtheit von Gebäuden: Luftdichtheit von Gebäuden – Betrachtung zur Messgenauigkeit; Dissertation; Universität Kassel; 1997
-
- [Hegner 2002] Hegner, H.-D.; Vogler, I.: Energieeinsparverordnung: EnEV für die Praxis kommentiert; Ernst & Sohn Verlag; Berlin; 2002
-
- [Hohenstein 2002] Hohenstein, H.; Lass, J.; Grünheid, R.; Moarcas, O.; Feugt, T.: Holzfenster der Zukunft; Forschungsbericht; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 2002
-
- [IEMB 2004] IEMB Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e. V. an der TU Berlin: Info-Blatt Nr. 9.9: Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten; September 2004
-
- [ift Richtlinie 2002] ift-Richtlinie HO-10/1: Massive, keilgezinkte und lamellierte Profile für Holzfenster – Anforderung und Prüfung; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 2002
-
- [ift Richtlinie 2005] ift-Richtlinie FE-05-2: Einsatzempfehlung für Fenster und Außentüren: Richtlinie zur Ermittlung der Mindestklassifizierung in Abhängigkeit der Beanspruchung – Teil 1 Widerstandsfähigkeit, Schlagregendichtheit und Luftdurchlässigkeit; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 2005
-
- [ift Seminar 1987] 1. ift-Sachverständigensymposium: Aus der Forschung für die Praxis: Schäden aus Feuchteeinwirkung im Fensterbereich; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 1987
-
- [ift Seminar 1993] ift-Seminar: Schäden an Fenstern aus Konstruktion, Verglasung und Baukörperanschluss; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 1993
-
- [Issifou-Samarou 2007] Issifou-Samarou, Z.; Wittmann, F. H.; Sasse, H. R.: Vergleichende Bestimmung der hygri-schen Eigenschaften unterschiedlicher Holzarten: Teil II – Schwinden und Quellen: Bauinstandsetzung und Denkmalpflege; Aedificatio Publishers; 13. Jahrgang; Heft 2; Freiburg; 2007
-
- [Künzel 2006] Künzel, H. M.: Raumlufffeuchte in Wohngebäuden: Randbedingungen für die Feuchteschutzbeurteilung; wksb 56/2006; S. 31 – 41; 2006
-
- [Mörath 1931] Mörath, E.: Beiträge zur Kenntnis der Quellungserscheinungen des Buchenholzes; Dissertation; Technische Hochschule Darmstadt; Theodor Steinkopff Verlagsbuchhandlung; Dresden; 1931
-
- [Mörath 1932] Mörath, E.: Studie über die hygroskopischen Eigenschaften und die Härte der Hölzer; Habilitation; Mitteilungen der Holzforschungsstelle an der Technischen Hochschule Darmstadt; 1932
-
- [Niemz 2006] Niemz, P.: Holzphysik; Skriptum; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2006
-

[RAL 1989]	RAL-RG-607/9: Güteprüfbestimmungen für Holzfenster; Beuth Verlag; Berlin; März 1989
[Scharioth 2004]	Scharioth, J.; Huber, M.; Schlu, K.; Pallas, M.: Horizonts2002: Ein Szenario als Denkanstoß für die Zukunft; Untersuchungsbericht der TNS Infratest Wirtschaftsforschung; München; 2004
[Schmid 1975]	Schmid, J.; Stiell, W.: Untersuchung zur Ausbildung der Entwässerungsöffnungen in Wetterschutzschienen für Holzfenster; ift Forschungsbericht; Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V.; München; 1975
[Schmid 1984-1]	Schmid, J.; Frank, R.; Rief, G.: Untersuchung über die Möglichkeit der Qualitätsverbesserung von Holzfensterprofilen durch den Einsatz von Querschnitten aus Schichtholz unter Verwendung einheimischer Hölzer; ift Forschungsbericht; Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr; 1984
[Schmid 1984-2]	Schmid, J.; Einfeld, T.; Stiell, W.: Untersuchung über den wirksamen Dampfdruckausgleich von Verglasungen an Fensterelementen der Fa. Gartner; ift Forschungsbericht; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 1984
[Schmid 1993]	Schmid, J.; Laurich, H.: Alterung und Instandhaltung von Holzfenstern; ift Forschungsbericht; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 1993
[Schmid 1997]	Schmid, J.; Götz, M.; Höckl, C.; Krause, H.; Laurich, H.; Lechner, S.: Innovation Holzfenster: Wartung und Pflege; ift Forschungsbericht; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 1997
[Schmid 1999]	Schmid, J.; Leuschner, I.; Hoeckel, C.: Mit Holzfenstern in die Zukunft; Holz-Zentralblatt Nr. 142; Stuttgart; 1999
[Schmid 2006]	Schmid, J.; Militz, H.; Illner, M.; Schwarz, B.; Stetter, K.: dista – Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster und Fassadenbau; Forschungsbericht; Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V.; München; 2006
[Schmid 2007]	Schmid, J.; Götz, M.; Stiller, M.: Auswertung von Schadensfällen an Fenstern und Fassaden aus Holz; nicht veröffentlichter Bericht; isp Rosenheim; Rosenheim; 2007
[Schröder 2005]	Schröder, M.: Der Wartungsvertrag: Vertragsgestaltung, Inspektion, Wartung, Instandsetzung von baulichen Anlagen und Rechtsfolgen; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.); Beuth Verlag; Berlin; 2005
[Seifert 1970]	Seifert, E.; Froelich, H.; Schmid, J.; Laun, K.: Untersuchung über die Ursachen von Schäden an Holzfenstern durch holzerstörende Pilze; Forschungsbericht; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 1970
[Seifert 1972]	Seifert, E.; Schmid, J.; Rauch, D.: Untersuchung über die Eignung von Rahmenverbindungen und Holzfenstern; ift Forschungsbericht; Institut für Fenstertechnik e. V.; Rosenheim; 1972

-
- [Stiller 2007] Stiller, M.: Hygroskopisches Verhalten von Profilquerschnitten in Schichtbauweise; Diplomarbeit; Fachhochschule Rosenheim; 2007
-
- [Thaler 1999] Thaler, M.: Rahmenmaterialwahl beim Fensterkauf: Eine Marktstudie; Diplomarbeit; Fachhochschule Rosenheim – Fachbereich Holztechnik; 1999
-
- [Troidl 2007] Troidl, A.: Konstruktionsgrundlagen für Rahmenverbindungen bei Fenstern aus Holz-Material-Verbundwerkstoffen; Diplomarbeit; Fachhochschule Rosenheim; 2007
-
- [VFF 2005] VFF: Jahresbericht 2005; Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e. V.; Frankfurt; 2005
-
- [VFF HO.02 2003] VFF Merkblatt HO.02: Auswahl der Holzqualität für Holzfenster und -haustüren; Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e. V.; Frankfurt; 2003
-
- [VFF HO.06 2004] VFF Merkblatt HO.06: Holzarten für den Fensterbau: Anforderungen, Holzartentabelle; Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e. V.; Frankfurt; 2004
-
- [Willeitner 1971] Willeitner, H.: Anstrichschäden infolge von Überaufnahmefähigkeit des Holzes; Holz-Zentralblatt Nr. 157; Stuttgart; S. 2291; 1971
-
- [Willeitner 1981] Willeitner, H.; Schwab, E.: Holz – Außenverwendung im Hochbau; Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH; Stuttgart; 1981
-

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Entwicklung der Marktanteile in Deutschland
- Abbildung 2: Arbeitsteilung zwischen den Teilprojekten 19 und 20
- Abbildung 3: Beispiele der Verknüpfung der Teilprojekte Fenster mit anderen Teilprojekten bis zum Arbeitspunkt 7
- Abbildung 4: Holzfensterprofil IV 68 nach DIN 68121-1
- Abbildung 5: Umfang der Instandhaltung [Schröder 2005]
- Abbildung 6: Notwendige Schutzziele bei der Konstruktion von Fenstern
- Abbildung 7: Wechselwirkung der natürlichen Holzeigenschaften und der zusätzlichen technischen Maßnahmen in Abhängigkeit der Holzart
- Abbildung 8: Struktur der Fensterprofile in Schichten mit Zuweisung der Aufgaben
- Abbildung 9: Schichtenmodell für den Aufbau von Fensterprofilen unter Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen
- Abbildung 10: Zusammenstellung der Einwirkungen auf Gebäude nach Kupfer mit einem überwiegenden Anteil aus Feuchtigkeitsbeanspruchung
- Abbildung 11: Folgen bei Feuchtigkeitseinwirkung
- Abbildung 12: Darstellung von Schäden an Holzfenstern, die sich in der Regel durch die Veränderung der Oberfläche zeigen
- Abbildung 13: Offene Fugen an Rahmenverbindungen aufgrund unzureichender Verleimung als häufige Schadensursache bei Fenstern
- Abbildung 14: Beginnende Feuchtigkeitsschäden etwa 1 Jahr nach dem Einbau durch Eindringen von Feuchtigkeit über eine ungeschützte Konstruktionsfuge. Wegen der geringen Schichtdicke des Anstrichs sind keine Anstrichschäden, sondern nur Wasserbeeinträchtigungen am Holz erkennbar.
- Abbildung 15: Anstrichschäden durch Hagelschlag
- Abbildung 16: Schimmelpilzbildung aufgrund des Eintritts von warmer Raumluft in eine von der Raumseite offene Konstruktionsfuge
- Abbildung 17: Schimmelpilzbildung und Holzerstörung durch Pilzbefall als Folge von Tauwasser in den Falzen
- Abbildung 18: Andeutung der Luftströmung in die Falze der Fenster von der Raumseite durch Luftdruckunterschiede zwischen der Raumseite und der Außenseite
- Abbildung 19: Holzfenster IV 68 mit den Temperaturfeldern und der zu erwartenden Verteilung der Feuchtigkeit (rechts im Bild) im seitlichen Querschnitt

- Abbildung 20: Tauwasserbildung im Randbereich des Isolierglases
- Abbildung 21: Holzfenster IV 68 mit den Temperaturfeldern und der zu erwartenden Verteilung der Feuchtigkeit (rechts im Bild) im unteren Querschnitt der Wetterschutzschiene
- Abbildung 22: Gegenüberstellung der Feuchtigkeitsverteilung nach der Isothermenrechnung mit dem tatsächlichen Schadensfall bei holzerstörender Feuchtigkeitseinwirkung
- Abbildung 23: Feuchtigkeitsverteilung an einem Blendrahmenquerschnitt als Folge der Vorschädigung des Holzes
- Abbildung 24: Auswertung der Klimaaufzeichnung einer Wohnung für den Zeitraum vom 01.02. – 16.02.2008 mit Angabe der Raumlufttemperatur (rot), der relativen Luftfeuchtigkeit der Raumluft (blau) und der Taupunkttemperatur für das gemessene Raumklima (grün)
- Abbildung 25: Darstellung der Mittelwerte der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit über den jeweiligen Messzeitraum
- Abbildung 26: Darstellung der Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit in den gemessenen Räumen, aufgetragen über die Monate, in welchen die Messungen durchgeführt wurden.
- Abbildung 27: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit der gemessenen Wohnungen mit dem Jahresgang der relativen Luftfeuchtigkeit auf der Raumseite und auf der Außenseite nach [Künzel 2006]
- Abbildung 28: Wasseraufnahmekoeffizient von aus Bauteilen entnommenen Proben aus Hemlock [Troidl 2007] in den Abmessungen Länge 60 mm, Breite 35 mm, Dicke 15 mm
- Abbildung 29: Wasseraufnahmekoeffizient von aus einem Bauteil entnommenen Proben aus Kiefer [Troidl 2007] in den Abmessungen Länge 60 mm, Breite 35 mm, Dicke 15 mm
- Abbildung 30: Holzprobe nach der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten mit Kennzeichnung der Bereiche des Wasserdurchtritts an der Oberfläche nach 5, 10, 15 und 30 Minuten
- Abbildung 31: Gegenüberstellung der Wasseraufnahme zwischen ungeschädigtem und geschädigtem Holz senkrecht und quer zur Faser. Die angegebenen Zahlenwerte beschreiben die kapillare Wasseraufnahme (Wasseraufnahmekoeffizient) in $\text{kg/m}^2 \text{h}^{0,5}$
- Abbildung 32: Messeinrichtung zur Bestimmung der Quellung in Faserlängsrichtung
- Abbildung 33: Ansicht des Experimentierhauses mit den beiden Versuchsfenstern
- Abbildung 34: Messaufnehmer für Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Falzraum des Versuchsfensters
- Abbildung 35: Messstellen in den Falzräumen der Versuchsfenster
- Abbildung 36: Druckverteilung im Innern eines Gebäudes als Folge des thermischen Auftriebes

- Abbildung 37: Gegenüberstellung der untersuchten Fenster (System Huber & Sohn) mit unterschiedlichen Dichtungen
- Abbildung 38: Definition des dimensionslosen Dampfdruckfaktors als Verhältnis der zwei Differenzdrücke: $p^* = \Delta p_1 / \Delta p_2$
- Abbildung 39: Zeitverläufe der Außenlufttemperatur und der Raumlufttemperatur während des betrachteten Messzeitraumes mit zwei ausgewählten 24-stündigen Messperioden mit vergleichbaren Außenbedingungen. In dem Diagramm sind mit gestrichelten Linien zwei Messzeitpunkte (Messung 1 und Messung 2) für Momentanmessungen eingezeichnet.
- Abbildung 40: Zeitverläufe der Temperaturen in den Falzräumen von Fenster 1 (Fenster mit einer Mitteldichtung) bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Diagramm oben) und bei 5 Pascal Überdruck im Raum (Diagramm unten).
- Abbildung 41: Zusammenhang zwischen den Temperaturen im unteren Falzraum und der Außenlufttemperatur. Bei der Messung herrschte im Raum ein Überdruck von 5 Pascal gegenüber der Außenatmosphäre.
- Abbildung 42: Zeitverläufe der Dampfdrücke im Falzraum des Fensterfalzes von Fenster 1 (Fenster mit einer Mitteldichtung) bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Diagramm oben) und bei 5 Pascal Überdruck im Raum (Diagramm unten). Zum Vergleich sind auch die Wasserdampfdrücke in der Raumluft und in der Außenluft eingetragen.
- Abbildung 43: Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal. Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung), das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 2 (mit einer Mittel- und einer Überschlagsdichtung)
- Abbildung 44: Zeitverläufe der Dampfdrücke an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal. Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung) das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 2 (mit einer Mitteldichtung und einer Überschlagsdichtung).
- Abbildung 45: Typische Temperatur- und Feuchtwerte in den Falzräumen von Fenster 1 (linkes Bild) und Fenster 2 (rechtes Bild). Fenster 1 besitzt nur eine Mitteldichtung, Fenster 2 hat neben der Mitteldichtung eine weitere Dichtung im Überschlag.
- Abbildung 46: Gegenüberstellung typischer Feuchteverhältnisse in den Falzräumen für zwei Fenster mit einer bzw. zwei Dichtebenen sowie bei einem Überdruck von 5 Pascal und einem Unterdruck von 5 Pascal im Raum. Die Feuchteverhältnisse werden entsprechend Abbildung 38 durch einen dimensionslosen Kennwert, den Dampfdruckfaktor, gekennzeichnet.

- Abbildung 47: Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen. Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung), das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 3 (mit einer Überslagsdichtung). Die Druckdifferenzen am Fenster variieren.
- Abbildung 48: Zeitverläufe der Dampfdrücke an verschiedenen Stellen im Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen. Das obere Diagramm beschreibt die Verhältnisse bei Fenster 1 (mit einer Mitteldichtung), das untere Diagramm die Verhältnisse bei Fenster 3 (mit einer Überslagsdichtung). Die Druckdifferenzen am Fenster variieren.
- Abbildung 49: Typische Temperatur- und Feuchtwerte in den Falzräumen von Fenster 1 (linkes Bild) und Fenster 3 (rechtes Bild). Fenster 1 besitzt nur eine Mitteldichtung, Fenster 2 hat nur eine Dichtung im Überschlag.
- Abbildung 50: Typische Feuchteverhältnisse in den Falzräumen für Fenster 1 und Fenster 3 bei einem Überdruck im Raum von 5 Pascal. Beide Fenster besitzen nur eine Dichtungsebene. Bei Fenster 1 liegt diese in der Mittelebene, bei Fenster 3 im Flügelüberschlag. Die Feuchteverhältnisse in den Falzräumen werden durch den dimensionslosen Dampfdruckfaktor (Abbildung 38) gekennzeichnet.
- Abbildung 51: Offene Fuge zwischen der Glasleiste und dem Flügelrahmen
- Abbildung 52: Zeitverläufe der Temperaturen und Taupunkttemperaturen im Glasfalz bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Diagramm oben) und bei 5 Pascal Überdruck im Raum (Diagramm unten). Zusätzlich sind die entsprechenden Taupunkttemperaturen (mit DP bezeichnet) eingetragen.
- Abbildung 53: Zeitverläufe der Dampfdrücke im Glasfalz bei 5 Pascal Unterdruck im Raum (Bild oben) und 5 Pascal Überdruck im Raum (Bild unten).
- Abbildung 54: Möglichkeiten der Glasfalzbelüftung gemäß DIN 68121 mit:
- Abbildung 55: Eisablagerungen in der Dichtungsebene eines Fensters. Der Pfeil markiert die Lage der Belüftungsöffnung für die Glasfalzbelüftung.
- Abbildung 56: Verlauf des Raum- und Außenklimas [Künzel 2006]
- Abbildung 57: Typischer Verlauf der Adsorption und Desorption mit Darstellung des Zusammenhangs zwischen Holzfeuchtigkeit und relativer Luftfeuchtigkeit [Stiller 2007]
- Abbildung 58: Verlauf der Sorptionsisothermen für verschiedene Holzarten und die Zuordnung der Holzfeuchtigkeit für die Ausgleichsfeuchtigkeit von 50 %. [Stiller 2007]
- Abbildung 59: Zusammenstellung der verschiedenen Rechenmodelle, die für die Abschätzung der Verformung verglichen wurden.
- Abbildung 60: Der als vereinfachte Annahme der Berechnung der Verformung im Differenzklima zu Grunde gelegte Lastfall

- Abbildung 61: Darstellung der Momente aus den Quellungskoeffizienten und den Änderungen der Luftfeuchtigkeit zwischen der Herstellung und der Nutzung
- Abbildung 62: Für die Verformung im Differenzklima untersuchte Profilquerschnitte
- Abbildung 63: Vergleich der Verformung eines Rechteckprofils (Profilform B, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten für verschiedene Rechenmodelle mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 64: Verformung eines T-Profils (Profilform A) und eines Rechteckprofils (Profilform B, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 65: Verformung eines T-Profils (Profilform A) und eines Rechteckprofils (Profilform B, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 66: Einfluss der Ausgleichsfeuchte der Lamellen eines T-Profils (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 67: Einfluss des Quellungskoeffizienten auf der Raumseite auf die Verformung eines T-Profils (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Holzart ($h = 0,000 - 0,008$), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 68: Einfluss des Quellungskoeffizienten der Außenlamellen auf die Verformung eines T-Profils (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Holzart ($h = 0,000 - 0,008$), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 69: Einfluss der Länge auf die Verformung eines T-Profils (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 70: Verformung eines T-Profils (Profilform A, nach Abbildung 62) über den Verlauf von 24 Monaten mit dem Profilaufbau Esche (0,004), Fichte (0,003), Eiche (0,004), mit Esche auf der Raumseite
- Abbildung 71: Einfluss der Quellungskoeffizienten h auf das Verformungsverhalten eines Rechteckprofils (Profilform B nach Abbildung 62) für die Klimabedingungen:
- Abbildung 72: Bezeichnung und Definition der Dichtebenen am Fenster in der Außenwand
- Abbildung 73: Handlungsoption – abgeleitet aus den Szenarien zur Darstellung und Anwendung des Orientierungswissens [Schmid 2006]

- Abbildung 74: Darstellung der Anwendung unterschiedlicher Profilaufbauten auf die Fensterkonstruktionen Einfach-, Verbund- und Kastenfenster
- Abbildung 75: Niedrigste Oberflächentemperatur am Rand des Mehrscheiben-Isolierglases bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C und einer Außentemperatur von -10 °C auf der raumseitigen Scheibenoberfläche des Fensters mit einer Rahmendicke von 68 mm
- Abbildung 76: Niedrigste Oberflächentemperatur bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C und einer Außentemperatur von -10 °C auf der raumseitigen Scheibenoberfläche des Fensters mit einer Rahmendicke von 100 mm
- Abbildung 77: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einer „einteiligen Wetterschutzschiene“ aus Aluminium-Strangpressprofilen und Holzanschlag.
- Abbildung 78: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einer „einteiligen Wetterschutzschiene“ aus Aluminium-Strangpressprofilen.
- Abbildung 79: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einer „wärme gedämmten Wetterschutzschiene“ aus Aluminium-Strangpressprofilen
- Abbildung 80: Isothermenverlauf an einem Holzfenster IV 78 mit einem vorgesetzten Wetterschutzprofil aus Aluminium-Strangpressprofilen
- Abbildung 81: Notwendige Verhältnisse des Dampfdruckes innen im Falz und außen
- Abbildung 82: Profilausbildung des Holzfensters IV 68 nach DIN 68121 mit Mitteldichtung, aber ohne raumseitige Überschlafdichtung
- Abbildung 83: Profilausbildung für Holzfenster IV 68 nach DIN 68121 mit raumseitiger Überschlafdichtung
- Abbildung 84: Verdeckt liegender Beschlag für Holzfenster mit der Möglichkeit des Einbaus einer umlaufenden Dichtung, die durch Beschlagteile nicht unterbrochen wird [Quelle: Roto-Frank].

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Auswertung von Gutachten aus dem Zeitraum von 1983 bis 1993 zu Schäden an Holzfenstern [Schmid 1993]
- Tabelle 2: Beschreibung der Schäden am Holzfenster und Zuordnung der Schwachstellen
- Tabelle 3: Lagerungsfolgen zur Bestimmung der Quellungskoeffizienten
- Tabelle 4: Zusammenstellung durch Versuche ermittelter Quellungskoeffizienten
- Tabelle 5: Zusammenstellung ausgewählter Quellungskoeffizienten „h“ mit Angabe der Quellen [Niemz 2006]
- Tabelle 6: Holzarten der Kategorie 1 [Niemz 2006] [Schwarz 2008] [Mörath 1935] [Stiller 2007]
- Tabelle 7: Holzarten der Kategorie 2 [Niemz 2006] [Schwarz 2008] [Mörath 1935] [Stiller 2007]
- Tabelle 8: Zuordnung von Holzarten für Innenlamellen und Außenlamellen bei der Verklebung von Profilquerschnitten in der Dicke aus drei Schichten.
- Tabelle 9: Zusammenstellung ausgewählter Holzarten mit Angabe der Holzfeuchtigkeit „u“ in % für die Lagerung in einem Ausgleichsklima mit einer Luftfeuchtigkeit von 50 %

Begriffserklärung

Begriff / Kurzzeichen	Einh.	Beschreibung
Adsorption		Adsorption ist die Anlagerung von Stoffen (Adsorbat) an der Oberfläche fester Körper (Adsorbens).
Desorption		Als Desorption werden alle Vorgänge bezeichnet, bei denen ein Stoff, welcher in einem anderen Stoff aufgenommen ist, abgegeben wird.
Differentielles Quellmaß „q“	% / %	<p>Beschreibt die Änderung der Abmessung bei einer Änderung der Holzfeuchte (u %) um 1 %.</p> <p>Der Quellungsverlauf zwischen u = 0 % (darrtrocken) und u = Fasersättigung kann als linear angenommen werden.</p> $q = \frac{\alpha}{l_{Fs} - l_0} \cdot 100$ <p>q Differentielle Quellung in [% / %] α Maximales Quellmaß in [%] l_{Fs} Probenmaß bei Fasersättigung in [mm] l₀ Probenmaß bei u = 0 % in [mm]</p>
Fasersättigungsbereich		<p>Der Fasersättigungsbereich kennzeichnet den höchstmöglichen Gehalt an gebundenem Wasser in den Zellwänden. Der Wassergehalt ist unterschiedlich bei den verschiedenen Holzarten (nachfolgende Werte nach Niemz).</p> <p>Der Fasersättigungsbereich wird bei der Lagerung im Klima mit 100 % Luftfeuchte erreicht.</p> <p>32 bis 35 % Zertreutporige Laubhölzer ohne Farbkern (Linde, Wiede, Pappel, Erle, Buche, Birke); Splint von verkerneten ring- und halbringporigen Laubhölzern</p> <p>30 bis 34 % Nadelhölzer ohne Farbkern (Tanne, Fichte); Splint von Farbkernhölzern (Kiefer, Lärche)</p> <p>26 bis 28 % Nadelhölzer mit Farbkern und mäßigem Harzgehalt (Kiefer, Lärche, Douglasie)</p> <p>22 bis 24 % Nadelhölzer mit Farbkern und hohem Harzgehalt (Weymouthskiefer, sehr harzreiche Kiefer, Lärche)</p> <p>22 bis 24 % Ringporige und halbringporige Laubhölzer mit ausgeprägtem Farbkern (Robinie, Edelkastanie, Eiche, Esche, Nussbaum)</p>
Finite-Element-Methode		Die Finite-Element-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung von Differentialgleichungen. Die FEM stellt ein modernes Berechnungsverfahren im Ingenieurwesen dar.

Begriff / Kurzzeichen	Einh.	Beschreibung
Hoftüpfel		Als Tüpfel werden Aussparungen in den Zellwänden von Pflanzen bezeichnet, welche eine Verbindung zwischen den einzelnen Zellen ermöglichen und dabei verschiedenen Aufgaben erfüllen. Hoftüpfel treten bei verholzten Zellen auf.
Holzausgleichsfeuchtigkeit		Holz als hygroskopischer Werkstoff besitzt die Eigenschaft, Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen. Als Holzausgleichsfeuchtigkeit wird die Holzfeuchtigkeit bezeichnet, welche sich im Gleichgewichtszustand bei einer relativen Luftfeuchtigkeit einstellt.
Isotherme		Linie gleicher Temperatur
Kapillare		Als Kapillare werden sehr feine und langgestreckte Hohlräume bezeichnet. Durch die im Vergleich zu größeren Hohlräumen stark in den Vordergrund tretenden Oberflächeneffekte tritt in Kapillaren der physikalische Effekt Kapillarität auf. Flüssigkeiten mit hoher Oberflächenspannung steigen in Kapillaren auf; sie kondensieren auf den Kapillarwänden auch oberhalb ihres Siedepunktes. Der Zellaufbau von Holz weist Kapillaren auf.
Longitudinal		Allgemein „in Längsrichtung verlaufend“. In diesem Bericht „in Faserrichtung, Längsrichtung des Holzes verlaufend“.
Maximales Quellmaß „ α “	%	Maximale Änderung der Abmessung von darrtrocken ($u = 0\%$) bis zum Fasersättigungsbereich. Dies entspricht der Lagerung bei einer relativen Luftfeuchte von 0 % bis 100 %. $\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_0} \cdot 100$ α Maximales Quellmaß in [%] l_0 Probenmaß bei $u = 0\%$ in [mm] l_1 Probenmaß bei u_1 in [mm] l_2 Probenmaß bei u_2 in [mm]
Maximales Schwindmaß „ β “	%	Maximale Änderung der Abmessung vom Fasersättigungsbereich bis zu darrtrocken ($u = 0\%$). Dies entspricht der Lagerung bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % bis 0 %. $\beta = \frac{l_2 - l_1}{l_w} \cdot 100$ β Maximales Schwindmaß in [%] l_1 Probenmaß bei u_1 in [mm] l_2 Probenmaß bei u_2 in [mm] l_w Probenmaß bei wassergelagerter Probe in [mm]

Begriff / Kurzzeichen	Einh.	Beschreibung
Orientierungswissen		<p>Orientierungswissen ist Wissen, das jemand erwirbt, um sich auf einem Gebiet zurechtzufinden, ohne schon in spezifischer Weise tätig zu werden.</p> <p>Es gibt einen ersten Überblick über das Gebiet und seinen Kontext.</p>
Quellungskoeffizient „h“	% / %	<p>Beschreibt die Änderung der Abmessung bei einer Änderung der relativen Luftfeuchte um 1 %.</p> <p>Der Quellungsverlauf zwischen einer relativen Luftfeuchte von 0 bis 100 % kann als linear angenommen werden (Skaar).</p> <p><u>Quellungskoeffizient:</u></p> $h = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (\varphi_F - \varphi_T)} \cdot 100$ <p>h Quellungskoeffizient in [% / %] l_F Maß des Holzes im Feuchtklima $80 \leq \varphi_F \leq 90$ % in [mm] l_T Maß des Holzes im Trockenklima $30 \leq \varphi_T \leq 40$ % in [mm] l_0 Probenmaß bei u = 0 % in [mm]</p> <p><u>Quellungskoeffizient aus maximaler Quellung:</u></p> $h = \frac{\alpha}{100}$ <p>h Quellungskoeffizient in [% / %] α Maximales Quellmaß in [%]</p> <p><u>Quellungskoeffizient aus Versuchen:</u></p> $h = \frac{\alpha}{\varphi_F - \varphi_T}$ <p>h Quellungskoeffizient in [% / %] α Maximales Quellmaß in [%] φ_F rel. Luftfeuchtigkeit im Feuchtklima in [%] φ_T rel. Luftfeuchtigkeit im Trockenklima in [%]</p>
Sorptions		<p>Sorption stellt einen Oberbegriff für alle Vorgänge dar, bei welchen ein Stoff durch einen mit ihm in Berührung stehenden anderen Stoff selektiv aufgenommen wird.</p> <p>Der aufnehmende (sorbierende) Stoff wird als Sorbens bezeichnet, der aufgenommene (sorbierete) Stoff Sorbat.</p>

Begriff / Kurzzeichen	Einh.	Beschreibung
Sorptionisotherme		Sorptionisotherme ist die graphische Darstellung des Sorptionsverhaltens eines Stoffes. Sie stellt den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt eines Stoffes und der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft (Gleichgewicht) bei einer bestimmten Temperatur dar.
Wasseraufnahmekoeffizient „w“	kg/m^2 $\text{h}^{0,5}$	<p>Der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) gibt an, wie viel Wasser von einem Stoff in einer bestimmten Zeit aufgenommen wird.</p> $w = \frac{m}{A \cdot \sqrt{t}}$ <p>w Wasseraufnahmekoeffizient in $[\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}]$ m Masse der Probe in [mm] A Grundfläche der Probe in $[\text{m}^2]$ t Zeitdauer der Wasseraufnahme in [h]</p>
Wasserdampfdruck „p“	Pa	Mit Wasserdampfdruck bezeichnet man den Anteil des Wasserdampfdruckes am Gesamtdruck des Gasgemisches Luft. Eine weitere Bezeichnung lautet Wasserdampfpartialdruck.