

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Untersuchungen zu Feuchtetransportvorgängen und feuchteinduzierten Verformungen sowie Spannungen bei Betrachtung verschiedener Holzarten und unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen

Dipl.-Ing. (Univ.) Jörg Schaffrath

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan Willem G. van de Kuilen
3. Univ.-Prof.-Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz (i. R.)
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz

Die Dissertation wurde am 24.02.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 22.06.2015 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, an der Holzforschung München und am MPA BAU der Technischen Universität München. Die grundsätzliche Idee zu dieser Arbeit entwickelte sich dabei aus meinen Aufgaben an der Prüfstelle Holzbau des MPA BAU.

An erster Stelle möchte ich meinem akademischen Leiter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter für die Möglichkeit, die Dissertation mit dem notwendigen Freiraum durchführen zu können, danken. Von Beginn an wurde mir großes Vertrauen von seiner Seite entgegengebracht. Insbesondere durch die Übertragung des Verantwortungsbereiches der Klebstoffprüfung an der Prüfstelle Holzbau und dem damit verbundenen Mitwirken in verschiedenen Gremien kann ich auf interessante und ereignisreiche Jahre zurückblicken. Die gesammelten Erfahrungen waren wie die Anstöße und Ermutigung zur Vollendung der Arbeit von großer Bedeutung für die Durchführung der Dissertation und ergaben stetig neue Motivation.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan Willem G. van de Kuilen. Die Einrichtungen und das Umfeld der Holzforschung München jederzeit mitnutzen zu können, trugen zum Gelingen dieser Arbeit nennenswert bei. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit bekräftigte mein Interesse am Material Holz und gab mir darüber hinaus neue Einblicke in die ganzheitliche Betrachtung des Themas Holz.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz für sein sehr geschätztes Interesse an meiner Arbeit und die umgehende Bereitschaft zur Übernahme des Korreferates. Sein großer Erfahrungsschatz zeigte sich mir durch seine wertvollen Hinweise und Anmerkungen.

Weiterhin gebührt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission, für die freundliche Leitung der mündlichen Prüfung sowie für die unkomplizierte und zeitnahe Abwicklung des Verfahrens.

Für die freundschaftliche Zusammenarbeit bedanke ich mich bei meinen Kollegen von dem Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, dem MPA BAU sowie von der Holzforschung München.

Ein ganz herzliches Dankeschön sage ich meiner Familie, meiner Partnerin Ines und meinen Freunden. Hier weiß ich, dass ich mich auf grundsätzliche Unterstützung immer verlassen kann – für mich von unschätzbarem Wert. Für die kritische Durchsicht des Skriptes dieser Arbeit möchte ich mich namentlich bei Dominik Scholz bedanken.

München, Juni 2015

Jörg Schaffrath

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Feuchtetransportvorgängen und den daraus resultierenden indirekten Beanspruchungen im Holz. Hintergrund der Untersuchungen ist die baurechtliche Forderung, dass jede Holzart in Verbindung mit dem vorgesehenen Klebstoff einer Delaminierungsprüfung zu unterziehen ist. Allerdings sieht das Prüfverfahren der Delaminierungsprüfung selbst keine Differenzierung zwischen den Holzarten vor, lediglich bei einer Laubholzart gelten abgeminderte Leistungsanforderungen. Neben den holzartenspezifischen Merkmalen, die den Feuchtetransport beeinflussen, unterscheiden sich die Prüfkörper einer Delaminierungsprüfung auch hinsichtlich der Transportmechanismen und Umgebungsbedingungen wesentlich von realen Holzbauteilen. Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist es, baupraktische Klimaszenarien mit einer Delaminierungsprüfung anhand des holzartenspezifischen Verhaltens zu vergleichen.

Insgesamt sechs verschiedene Nadelhölzer und Laubhölzer, die aufgrund ihrer zunehmenden forstwirtschaftlichen Bedeutung und ihrer Materialeigenschaften für eine Anwendung im Ingenieurholzbau prädestiniert sind, finden im Rahmen dieser Arbeit Berücksichtigung. Die messtechnische Erfassung des Sorptions- und Desorptionsverhaltens dient als Grundlage für Regressionsanalysen zur Bestimmung von Feuchtetransportkennwerten. Die Messbilder eines optischen Messsystems visualisieren die Deformationen und Dehnungen bei Feuchtewechseln in den unterschiedlichen Klimata. Anschließende Finite-Elemente-Berechnungen basieren auf diesen Versuchsreihen. Die Versuchsergebnisse werden einerseits als Eingangsparameter verwendet und dienen andererseits der Validierung der numerischen Systeme. Die errechneten feuchteinduzierten Spannungen lassen eine Beurteilung des Einflusses der betrachteten Umgebungsbedingungen auf die verschiedenen Hölzer zu.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass die Feuchtewechsel in einer Delaminierungsprüfung verglichen mit den gewählten baupraktischen Feuchtebereichen zu Rissbildung und zu einer signifikant höheren Beanspruchung im Holz führen. Das Spannungsniveau in einer Delaminierungsprüfung hängt dabei vergleichsweise stark von der Holzart ab. Das Prüfverfahren spiegelt daher die holzartenspezifische Beanspruchung in einem Holzbauteil nicht gleichermaßen wider. Die Hürde, die Leistungsanforderungen zu erfüllen, ist somit für manche Holzarten unverhältnismäßig hoch. Eine skizzierte, überarbeitete Delaminierungsprüfung kann dazu beitragen, dass sich innovative Bauprodukte aus Laubhölzern oder anderen Nadelhölzern als Fichte etablieren werden. Voraussetzung dafür ist, dass mit der Delaminierungsprüfung ein angemessenes und prinzipiell gleiches Sicherheitsniveau für alle Holzarten geschaffen wird.

Abstract

The present thesis deals with moisture transport and the resulting internal load in timber elements. The background for these research studies is the requirement of building regulations that each wood species in combination with the chosen adhesive has to be proven in a delamination test. The test procedure itself doesn't differentiate among wood species, except for one hardwood species, which can comply with less strict requirements. Besides the wood characteristics, which have an influence on the moisture transport, test specimens of a delamination test differ from timber elements regarding transport mechanism and their surrounding conditions. The scope of these research studies has been to compare the moisture related behavior of various wood species under the conditions of a delamination test to that of wood species subjected to service conditions in buildings.

In total, six different softwood and hardwood species have been included in the studies. Because of their material characteristics and increasing importance in forestry the chosen wood species are predestined for application in timber engineering. Measurement of the sorption and desorption behavior in the wood serves as the basis of a regression analysis for the determination of the moisture transport values. Photographic images of an optical measurement system are used to visualize the resulting deformations from moisture transport under the different climatic conditions. Finite element models are then computed based upon the tested species and conditions. The test results serve as both information for the needed input parameters of the numerical study, through the moisture transport coefficients obtained from the regression analysis, as well as validation results for the numerical models. The calculated moisture induced stresses allow for an evaluation of the impact of the different climatic conditions on the different types of wood.

The present research work reveals that moisture change in a delamination test cause cracks and significantly higher stresses in timber when compared with moisture conditions in buildings. The stress levels in a delamination test also vary greatly depending on the type of wood. Thus the test conditions do not reflect in equal measure the stresses in each type of wood under their normal specific conditions of use. The hurdle to meet the requirements is for some wood types, in this respect, disproportionally high. A proposed revision of the delamination test method could thus help to establish the innovative use of timber elements made out of other wood species than spruce. The primary assumption here is that the delamination test should guarantee an adequate and similar safety level for all species of wood.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
1 Einleitung.....	13
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	13
1.2 Vorgehensweise.....	15
2 Stand des Wissens, der Forschung und der Technik	16
2.1 Forst- und holzwirtschaftliche Aspekte.....	16
2.2 Mikro- und Makrostruktur des Werkstoffes Holz.....	18
2.3 Feuchtigkeit und Holz	20
2.3.1 Definition der Holzfeuchtigkeit.....	20
2.3.2 Holzfeuchtigkeitsbereiche.....	20
2.3.3 Sorption und Desorption.....	21
2.3.4 Quellen und Schwinden	24
2.4 Feuchtigkeitsbewegung im Holz.....	26
2.4.1 Allgemeine Beschreibung der Transportvorgänge	26
2.4.2 Feuchtetransport des freien Wassers	27
2.4.3 Grundlagen zur Theorie der Diffusion	29
2.4.4 Analytische Lösungen der Diffusionsgleichungen	31
2.4.5 Verschiedene Aspekte der Diffusion im Holz.....	37
2.5 Feuchteinduzierte Spannungen und Dehnungen im Holz.....	44
2.5.1 Spannungs-Dehnungsbeziehung.....	44

2.5.2	Kriechen, Relaxation und mechano-sorptives Verhalten des Holzes	48
2.5.3	Spannungen aufgrund von Feuchtewechseln in verklebten Holzlamellen.....	48
2.5.4	Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode.....	49
2.6	Verkleben von Holz	51
2.6.1	Geschichtlicher Rückblick.....	51
2.6.2	Bindungskräfte in Klebefugen.....	51
2.6.3	Verschiedene Aspekte der Holzverklebung	54
2.6.4	Technische Regeln und Prüfverfahren für Klebstoffe im tragenden Holzbau.....	54
2.6.5	Dauerhaftigkeit von verklebten Holzkonstruktionen	56
2.7	Optische Messsysteme.....	57
2.7.1	Grundsätzliches zur Photogrammetrie	57
2.7.2	Beschreibung eines optischen Messsystems.....	58
2.7.3	Verwendung optischer Messsysteme für Forschungszwecke im Holzbau.....	60
3	Versuche.....	62
3.1	Grundsätzliche Angaben zum Material und zur Methodik	62
3.1.1	Vorbemerkung.....	62
3.1.2	Klimabedingungen	62
3.1.3	Geometrie und Vorbereitung der Prüfkörper	64
3.1.4	Holzarten.....	65
3.2	Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“	68
3.2.1	Material und Methode.....	68
3.2.2	Versuchsergebnisse.....	74
3.2.3	Diskussion.....	84
3.3	Versuchsreihe „optische Messungen“	89
3.3.1	Material und Methode.....	89

3.3.2	Versuchsergebnisse.....	95
3.3.3	Diskussion.....	111
4	Bestimmung der Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten	114
4.1	Methode.....	114
4.2	Ergebnisse	121
4.3	Diskussion.....	129
5	Finite-Elemente-Berechnungen.....	131
5.1	Methode.....	131
5.1.1	Vorbemerkung.....	131
5.1.2	Grenzen des Modells	132
5.1.3	Geometrie und Netzgenerierung.....	133
5.1.4	Berechnung der Holzfeuchtigkeit.....	135
5.1.5	Statische Berechnungen.....	137
5.1.6	Materialkennwerte und Eingabeparameter	138
5.2	Ergebnisse	140
5.2.1	Vergleich des Finite-Elemente-Modells mit der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ und der analytischen Lösung der Diffusionsdifferentialgleichung	140
5.2.2	Vergleich des Finite-Elemente-Modells mit der Versuchsreihe „optische Messungen“	143
5.2.3	Vergleich der Holzarten anhand feuchteinduzierter Spannungen.....	151
5.3	Diskussion.....	157
6	Zusammenfassung und Fazit	160
7	Ausblick.....	163
8	Symbole, Abkürzungen	164
9	Abbildungsverzeichnis	167

10 Tabellenverzeichnis	178
11 Literaturverzeichnis	180
12 Anhang	197
12.1 Anhang zur Versuchsreihe „Sorption/Desorption“	197
12.2 Anhang zur Versuchsreihe „optische Messungen“	201
12.3 Anhang zur Bestimmung der Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten	205
12.4 Anhang zu den Finite-Elemente-Berechnungen	209

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Weiterverarbeitung zu einem Holzwerkstoff steigert die Wertschöpfung eines Baumstamms. In dieser Prozesskette spielt das Verkleben eine Schlüsselrolle. Die moderne Fügetechnik ermöglicht die Herstellung vergleichsweise homogener Bauteile, nachdem Fehl- und Schwachstellen im Holz entfernt wurden. Die Leistungsfähigkeit des Klebstoffs ist dabei von entscheidender Bedeutung: Ein Versagen einer Klebeverbindung im tragenden Holzbau kann zu wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Katastrophen führen, insbesondere wenn Menschenleben zu Schaden kommen. Zuverlässige Prüfmethode sind daher notwendig, um einen Klebstoff hinsichtlich seiner Tragfestigkeit und Dauerhaftigkeit beurteilen zu können. Die Langzeitfestigkeit einer Klebeverbindung wird üblicherweise mit den Ergebnissen aus Kurzzeitversuchen überprüft. Bislang stützen langjährige Erfahrungswerte diese Vorgehensweise, zumindest für herkömmliche Polykondensationsklebstoffe und die Holzart Fichte. An empirischen Daten für andere Holzarten mangelt es jedoch weitgehend.

Durch den seit Jahren praktizierten Waldumbau werden Monokulturen durch artenreiche Mischwälder ersetzt. Die standortgerechte Auswahl führt zu einem vielfältigen Holzartenbestand, der künftig für eine wirtschaftliche Verwertung zur Verfügung steht. Neben den Standortvorteilen weisen die aufgeforsteten Nadel- und Laubhölzer gegenüber der Fichte oftmals günstigere Materialeigenschaften auf. Daher zeigt der Ingenieurholzbau ein zunehmendes Interesse an einer vielseitigeren Verwendung des Baustoffs, vor allem in Form von verklebten Produkten.

Voraussetzung für den Einsatz eines Produktes ist die Bestätigung seiner Verwendbarkeit durch die Einhaltung technischer Regeln und das Erfüllen von vorgegebenen Leistungsanforderungen. Zahlreiche Regelwerke beschreiben verschiedene Prüfverfahren zur Beurteilung des Leistungsverhaltens einer Holzklebeverbindung. Neben den Kochprüfungen soll vor allem die Delaminierungsprüfung die Dauerfestigkeit einer Klebstoffuge unter Temperatur- und Feuchtigkeitseinfluss belegen. Bei der Beurteilung der Verwendbarkeit von Klebstoffsystemen erweist sich die Delaminierungsprüfung oft als die maßgebliche Hürde. Ihr besonderer Stellenwert zeigt sich auch darin, dass das Prüfverfahren bei der Herstellungsüberwachung von Brettschichtholz angewendet wird. Zudem wird gemäß der derzeit gültigen Normung für Klebstoffe für den tragenden Holzbau ausschließlich mit einer Delaminierungsprüfung festgestellt, ob ein Produkt für die Flächenverklebung von Laubhölzern oder speziell behandelten Hölzern geeignet ist.

Unabhängig von der verwendeten Holzart bleibt die zu erfüllende Leistungsanforderung bei der Delaminierungsprüfung in den Mitgliedsstaaten des Europäischen Komitees für Normung (CEN) fast immer dieselbe. Nur für Eiche gilt seit Ausgabe 2013 der maßgeblichen Norm DIN EN 301 eine Ausnahme. Diese normative Festlegung bedarf jedoch nach Auffassung des Autors einer kritischen Auseinandersetzung, da sich die prüfungsrelevanten Eigenschaften bei annähernd allen Holzarten merklich unterscheiden. Hier sind vor allem das Sorptions- und Desorptionsverhalten sowie das Schwind- und Quellverhalten zu nennen, die holzartenspezifisch zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Feuchtegradienten und Spannungsintensitäten führen.

Im Bauwesen basiert das Sicherheitskonzept üblicherweise auf der Einhaltung eines Sicherheitsabstandes zwischen berechneter Beanspruchung und Beanspruchbarkeit. Das Leistungskriterium der Delaminierungsprüfung ist der Schädigungsgrad der Klebstoffuge, der visuell beurteilt wird. Die Vorgänge, die sich in einem Prüfkörper der Kurzzeitprüfung im Vergleich zu einem Bauteil im Gebrauch abspielen, sind weitgehend ungeklärt. Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der auftretenden, feuchteinduzierten Beanspruchung unter den Randbedingungen des Prüfverfahrens und im baupraktischen Holzfeuchtebereich bei Betrachtung verschiedener Holzarten. Die vorliegende Arbeit liefert hierzu einen Beitrag, der die Relation der Auswirkungen einer Delaminierungsprüfung und der Umgebungsbedingungen eines Bauteils anhand des Holzfeuchteverlaufes, der feuchteinduzierten Verformungen, Dehnungen und Spannungen aufzeigt.

1.2 Vorgehensweise

Aufeinander aufbauende Untersuchungen, siehe Abbildung 1-1, stellen die Unterschiede der Feuchtetransportvorgänge und der resultierenden Beanspruchungen in definierten Klimata bei sechs Holzarten dar. Die Umgebungsbedingungen orientieren sich an einer Delaminierungsprüfung und an den Nutzungsklassen der Holzbaunorm. Berücksichtigung finden Baumarten, die aufgrund verschiedener Eigenschaften im Forstsektor und im Ingenieurholzbau von besonderem Interesse sind: Buche, Eiche und Esche als Laubhölzer sowie die Nadelhölzer Douglasie, Lärche und zusätzlich Fichte als Referenz.

Die Versuchsreihe „Sorption/Desorption“, siehe Abschnitt 3.2, zeigt das Wasseraufnahme- und Wasserabgabevermögen der Hölzer. Die Untersuchungen bilden die Grundlage für die Bestimmung der Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten im Abschnitt 4. Die Versuchsreihe „optische Messungen“, siehe Abschnitt 3.3, gibt Aufschluss über auftretende Deformationen bei Feuchtewechsel und diesbezügliche Unterschiede bei den betrachteten Hölzern. Mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) lassen sich bei Berücksichtigung der holzarten-spezifischen Parameter die Spannungszustände bei verschiedenen Randbedingungen berechnen, siehe Abschnitt 5. Die Ergebnisse der Versuchsreihen „Sorption/Desorption“ und „optische Messungen“ ermöglichen das Validieren der Finite-Elemente-Modelle.



Abbildung 1-1: Bezug der analytischen und numerischen Berechnungen sowie der Versuchsreihen zueinander.

2 Stand des Wissens, der Forschung und der Technik

2.1 Forst- und holzwirtschaftliche Aspekte

Die prognostizierte Klimaveränderung wirkt sich bereits auf unsere Umgebung aus. Durch Anhäufung von extremen Wettersituationen, zunehmender Durchschnittstemperatur und steigender Kohlendioxid-Konzentration ist die Vegetation heute anderen Bedingungen ausgesetzt als noch vor Jahrzehnten. Um dem Klimawandel, einer der bedeutendsten aktuellen Herausforderung für die Forstwirtschaft, gerecht zu werden, ist die Schaffung standortgerechter, strukturreicher Mischwälder ein forstpolitisches Ziel (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Die noch häufig vorhandenen Nadelbaumreinbestände haben ihren Ursprung in der Aufforstung nach intensiver Waldnutzung, die im Mittelalter beziehungsweise vor der industriellen Revolution begonnen hat. Zuvor bestimmten Laubbäume das Erscheinungsbild der Urwälder in Deutschland. Infolge der forstpolitischen Zielsetzung und aufgrund waldbaulicher Erfordernisse wird der Anbau von Laubhölzern und auch fremdländischen Baumarten, vor allem Douglasie, heute intensiv beworben. Wissenschaft und Forst empfehlen artenreiche Ökosysteme und Baumarten, die den zu erwartenden Bedingungen und Belastungen angepasst sind. Verstärkt durch Sturmereignisse und Trockenjahre geht der Anteil der Nadelbäume, insbesondere Fichte und Kiefer, in Deutschland merklich zurück, der Anteil der Laubbäume hingegen steigt, siehe Abbildung 2-1.

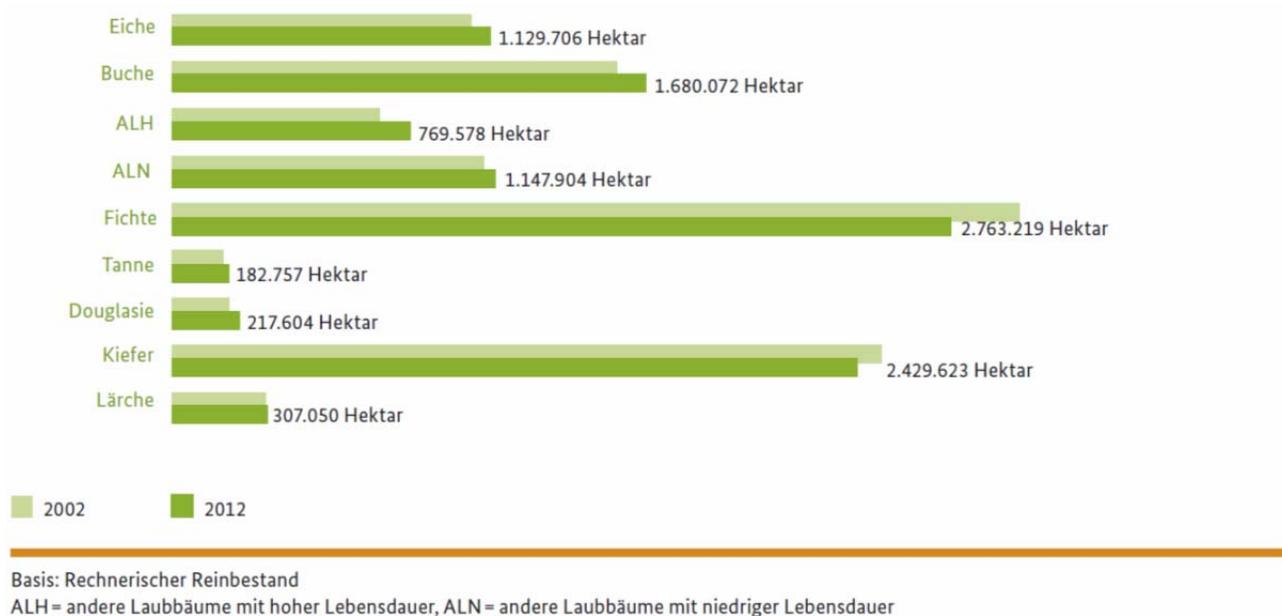


Abbildung 2-1: Veränderung der Waldfläche nach Baumartengruppen (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Laut Bundeswaldinventur bedecken Fichte, Kiefer, Buche, Traubeneiche und Stieleiche derzeit fast drei Viertel der Waldfläche in Deutschland und sind somit die wichtigsten Baumarten.

Zusammen mit Birke, Esche, Schwarzerle, Europäischer Lärche, Douglasie und Bergahorn beträgt der Anteil der elf häufigsten Baumarten an dem vorhandenen Holzboden etwa 90 % (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014). Die Fichte, die in Bayern am weitesten verbreitet ist, gilt als besonders klimaanfällige Baumart. Gemäß dem Modell der Klimahüllen werden viele Standorte in Bayern daher zu problematischen Wuchsgebieten (Brosinger und Tretter 2007; Kölling 2007). So teilen die Bayerische Staatsforsten (2011) mit, dass die Fichte dort, wo es der Klimawandel erlaubt und kein unkalkulierbares Betriebsrisiko entsteht, zwar weiterhin Bestandteil von stabilen und strukturreichen Mischwäldern sein wird. Insgesamt aber soll der Anteil der Fichte in den nächsten fünf Jahrzehnten von 44 % auf 36 % sinken.

Fast die Hälfte der deutschen Waldfläche ist in privater Hand. Im Rahmen einer vom Verfasser betreuten Bachelorarbeit befragte Weingärtner (2009) insgesamt 37 Betriebe in ganz Bayern zum Thema Waldumbau. Der weitaus größte Anteil der Waldbesitzer war über das Thema „Klima-
veränderung und Forst“ informiert, wobei die Besitzer großer Waldflächen einen besseren Informationsstand zeigten. Weit über 80 % aller Teilnehmer planen Maßnahmen oder haben bereits Maßnahmen als Reaktion auf die prognostizierten beziehungsweise bereits festgestellten Veränderungen im Wald ergriffen. Zu diesen Maßnahmen gehört in erster Linie der vermehrte Anbau von Laubholz.

Trotz Rückgang bleibt die Fichte noch eine Zeit lang die Holzart mit dem größten Vorkommen und daher von maßgeblicher Bedeutung für die Forst- und Holzwirtschaft. Windwurf und der Umbau nicht standortgerechter Fichtenreinbestände führten jedoch dazu, dass die Holzvorräte vor allem bei der Fichte wesentlich abgenommen haben. Die Förderung des Struktureichtums waren in jüngster Vergangenheit die Schwerpunkte des waldbaulichen Handelns. Buche, Douglasie, Eiche und Lärche sind Beispiele für Baumarten, deren Anteil an der Waldfläche zugenommen hat. Wie auch die Esche besitzen diese Hölzer gegenüber der Fichte Materialeigenschaften, die sich bei einer Verwendung im Ingenieurholzbau vorteilhaft auswirken. Für die Holzbaubetriebe ergeben sich daraus Herausforderungen und auch Chancen. Heutzutage werden noch viele Produkte aus Fichtenholz hergestellt, das Nutzen anderer Hölzer mag allerdings wegweisend sein. Aufgrund einer weniger restriktiven Rechtssituation gibt es in der Schweiz bereits langjährige Erfahrung mit Brettschichtholz aus Laubhölzern. Als ein Beispiel für das offensichtliche Interesse der Bauindustrie an der Etablierung verklebter Laubholzprodukte auch in Deutschland sei die Firma Pollmeier genannt, die viel Kapital und Zeit in die Entwicklung von Furnierschichtholz aus Buche steckte (Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG 2014). Einen kurzen Überblick zum Potenzial von Laubhölzern für lastabtragende Bauteile und regulative Aspekte im deutschsprachigen Raum gibt Hübner (2009).

2.2 Mikro- und Makrostruktur des Werkstoffes Holz

Holz ist aufgrund seiner komplexen Mikro- und Makrostruktur ein Werkstoff, der schon seit Jahrhunderten und bis heute offene und interessante Fragestellungen für Wissenschaft und Forschung bietet. Die gesamtgesellschaftliche Bedeutung des natürlichen nachwachsenden Rohstoffes resultiert aus diversen ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten.

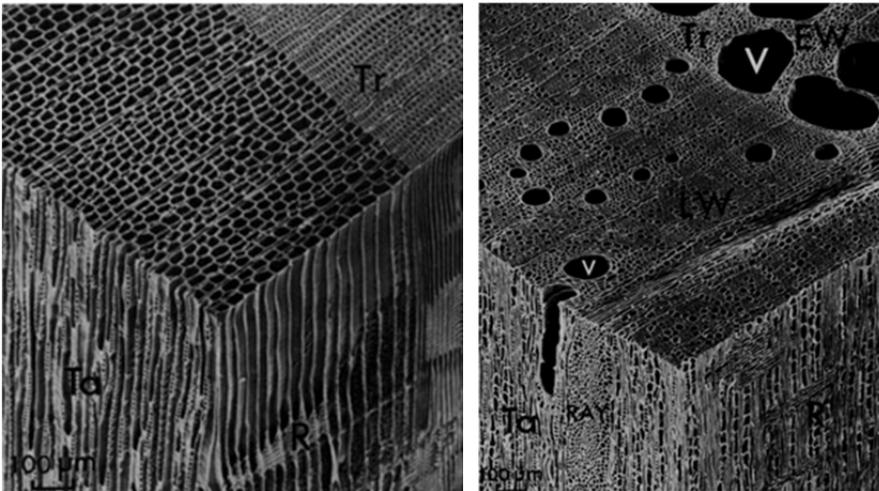


Abbildung 2-2: Zellstruktur eines Nadelholzes, Westamerikanische Lärche (*Larix occidentalis*) links, und eines Laubholzes, Roteiche (*Quercus rubra*) rechts. Die Aufnahmen eines Rasterelektronenmikroskops zeigen Hirn- (Tr), Radial- (R) und Tangentialfläche (Ta), die dünn- und dickwandigen Holzzellen sowie die unterschiedlichen Durchmesser der Gefäße (V) im Früh- (EW) und Spätholz (LW) (Siau 1984).

Mikroskopisch betrachtet, siehe Abbildung 2-2, besteht Holz aus Zellen und Gefäßen, wobei die Tracheiden als Urform der Holzzellen überwiegend das Holz der Nadelbäume bestimmen. Bei den entwicklungsgeschichtlich jüngeren Laubhölzern haben sich aus den Tracheiden verschiedene, den Aufgaben angepasste Zellen gebildet. Tracheiden sind geschlossene Zellen mit einer durchschnittlichen Länge kleiner als 1,5 mm bei Laubhölzern und von mehreren Millimetern bei Nadelhölzern. Der Durchmesser ist deutlich geringer und misst, mit großen Schwankungen, etwa ein Hundertstel der Länge. Zwecks guter Wasserversorgung ist beim Frühholz das Lumen, das heißt der von der Zellwand eingeschlossene Hohlraum einer Zelle, der Tracheiden weiter als beim Spätholz und die Anzahl der Aussparungen in der Zellwand, die sogenannten Tüpfel, siehe Abbildung 2-3, deutlich größer. Die Wasserleitung im lebenden Baum verläuft über die Tracheiden und, insbesondere bei Laubhölzern, über die Gefäße. Die Länge der Gefäße variiert zwischen mehreren Zentimetern und einigen Metern bei sehr unterschiedlichen Durchmessern, die Enden der Gefäße sind perforiert. Die typische Holzzellwand besteht aus mehreren, verschieden aufgebauten Schichten. Hauptbestandteile sind Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Hinzu kommen, holzartenabhängig, Extraktstoffe, die die Holzchemie wesentlich beeinflussen können und zur Komplexität des Holzes beitragen. Die ungefähre Zusammensetzung der chemischen Elemente besteht aus 50 % Kohlenstoff, 44 % Sauerstoff und 6 % Wasserstoff sowie mineralischen Bestandteilen, sprich Aschengehalt, und Stickstoff mit einem deutlich geringeren Anteil als 1 % (Kollmann 1951).

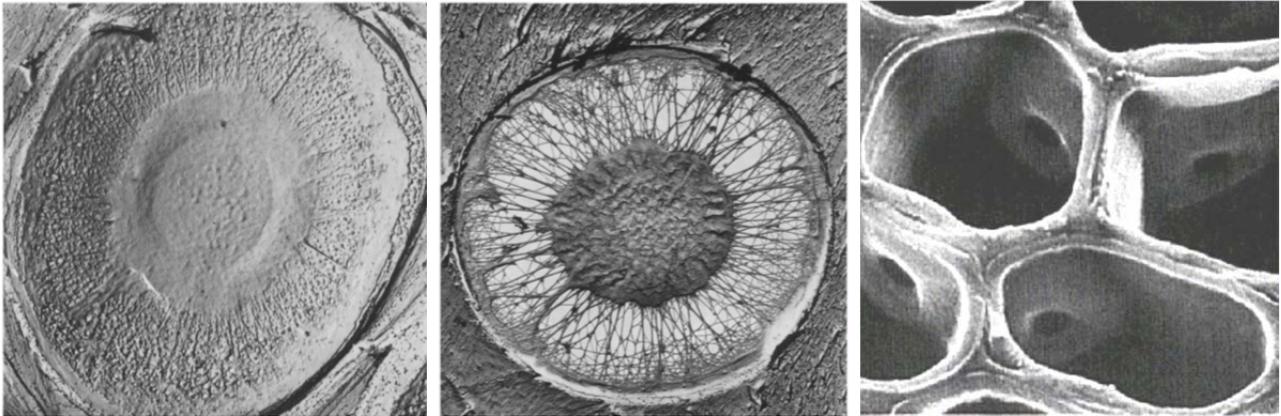


Abbildung 2-3: Darstellung einzelner Tüpfel, links und mittig (Comstock und Côté, Jr. 1968), und mehrerer Tüpfel in den Zellwänden, rechts (Butterfield 2006).

Bei makroskopischer Betrachtungsweise sind Jahrringe, Splint- und Kernholz Gründe dafür, dass die Holzeigenschaften stark von der Anatomie des Baumes abhängen. Holz muss daher allgemein als ein anisotroper und inhomogener Werkstoff betrachtet werden. Technisch relevante Eigenschaften wie Elastizitätsmodul, Festigkeit und Leitfähigkeit ändern sich richtungsabhängig. Aus praktischen Erwägungen ist es jedoch bei einer statischen Berechnung im Regelfall üblich, Holz vereinfachend als einen homogenen Baustoff mit unterschiedlichen Eigenschaften in transversaler und longitudinaler Hauptrichtung anzunehmen.

2.3 Feuchtigkeit und Holz

2.3.1 Definition der Holzfeuchtigkeit

Die Holzfeuchtigkeit, auch Feuchtegehalt u genannt, ist definiert als das Verhältnis der Masse des im Holz enthaltenen Wassers zu der Trockenmasse des Holzes und wird in Prozent angegeben:

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (2-1)$$

mit

- u Holzfeuchtegehalt in Prozent, %
- m_u Masse des Holzes vor dem Trocknen bei einem Feuchtegehalt u , in kg
- m_0 Masse des darrtrockenen Holzes bei einem Feuchtegehalt $u=0\%$, in kg

Die Bestimmung des Feuchtegehaltes u ist in DIN EN 13183-1 geregelt.

2.3.2 Holzfeuchtigkeitsbereiche

Beinahe jede Fragestellung des Ingenieurholzbaus lässt sich nur dann exakt und detailliert beantworten, wenn der Aspekt der Holzfeuchtigkeit mitberücksichtigt wird. Eine erste Beurteilung hinsichtlich des Einflusses der Feuchtigkeit auf die wesentlichen Eigenschaften des Holzes kann anhand des Fasersättigungspunktes, siehe Abbildung 2-4, erfolgen: Bei Vorhandensein von freiem, flüssigem Wasser bewegt sich die Holzfeuchtigkeit in dem sogenannten kapillaren Bereich oberhalb des Fasersättigungspunktes. Die Zellwände haben bis zur Sättigung Wassermoleküle gebunden, frei tropfbares, ungebundenes Wasser befindet sich in den Zellhohlräumen. Der sogenannte hygroscopische Bereich, unterhalb des Fasersättigungspunktes, ist vor allem durch die Wasserspeicherung in den Zellwänden gekennzeichnet. Wasser kommt nur noch dampfförmig in den Lumen vor und die Zellwände sind nicht mehr mit gebundenen Wassermolekülen gesättigt (Kollmann 1951).

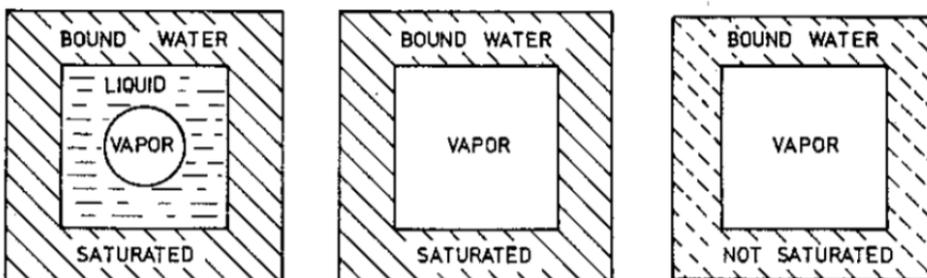


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der vorhandenen Feuchtigkeit innerhalb einer Holzzelle. Links über, mittig bei und rechts unterhalb der Fasersättigung (Skaar 1988).

Viele physikalische und technische Eigenschaften des Holzes hängen im hygroskopischen Bereich von der Holzfeuchtigkeit ab. So nehmen beispielsweise E-Modul und Festigkeitswerte unterhalb des Fasersättigungspunktes mit sinkender Holzfeuchtigkeit zu. Im kapillaren Bereich ändern sich die Materialkennwerte des Holzes praktisch nicht mehr. Daher ist der Fasersättigungspunkt, der den hygroskopischen von dem kapillaren Bereich abgrenzt, von großer praktischer Bedeutung. Bei genauerer Betrachtung ist allerdings statt von einem Punkt von einem engen Bereich zu sprechen, siehe Abbildung 2-6. Der Fasersättigungspunkt variiert mit der angewendeten Bestimmungsmethode, eine genaue Quantifizierung ist dadurch nicht möglich.

Die in den Zellhohlräumen eines lebenden Baumes enthaltene Wassermenge hängt unter anderem von der Rohdichte ab, schwankt von Baumart zu Baumart, Stamm zu Stamm und innerhalb eines Stammes, die Zellwände sind allerdings immer wassergesättigt. Grünes, waldfrisches Holz weist im Kern Holzfeuchten auf, die nicht weit über dem Fasersättigungspunkt liegen. Im Splint sind je nach Holzart deutlich höhere Werte möglich, bei Fichte beispielsweise über 200 % (Kollmann 1951; Larsen et al. 2010). Der Fasersättigungspunkt für gewöhnliche europäische Hölzer bewegt sich zwischen etwa 22 % und 35 % Holzfeuchtigkeit, als ungefährender Kennwert wird häufig verallgemeinernd 28 % oder 30 % Holzfeuchtigkeit angesetzt.

2.3.3 Sorption und Desorption

Sorption bezeichnet die Anreicherung von Molekülen, beispielsweise Wasser, wobei zwischen einer Aufnahme innerhalb einer Substanz, der Absorption (lateinisch: verschlucken, aufsaugen), und der Haftung an einer Ober- beziehungsweise Grenzfläche, der Adsorption, unterschieden wird. Die Desorption beschreibt den Umkehrprozess der Sorption.

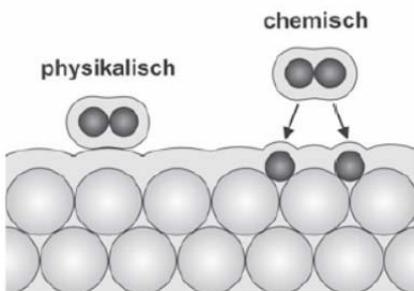


Abbildung 2-5: Unterschied zwischen Physisorption und Chemisorption (Job und Rüffler 2011).

Der Vorgang der Adsorption lässt sich in eine physikalische Adsorption, Physisorption, und einer chemischen Adsorption, Chemisorption, unterteilen, siehe Abbildung 2-5. Die Physisorption bewirkt die Bildung einer polymolekularen Wasserschicht. Die Moleküle werden hierbei physikalisch gebunden, beispielsweise durch van der Waals'sche Kräfte. Bei der Chemisorption bilden sich Molekülbindungen in einer Monoschicht aus. Die physikalische Adsorption hat den Charakter einer Kondensation, die chemische Adsorption den Charakter einer chemischen Reaktion (Job und Rüffler 2011).

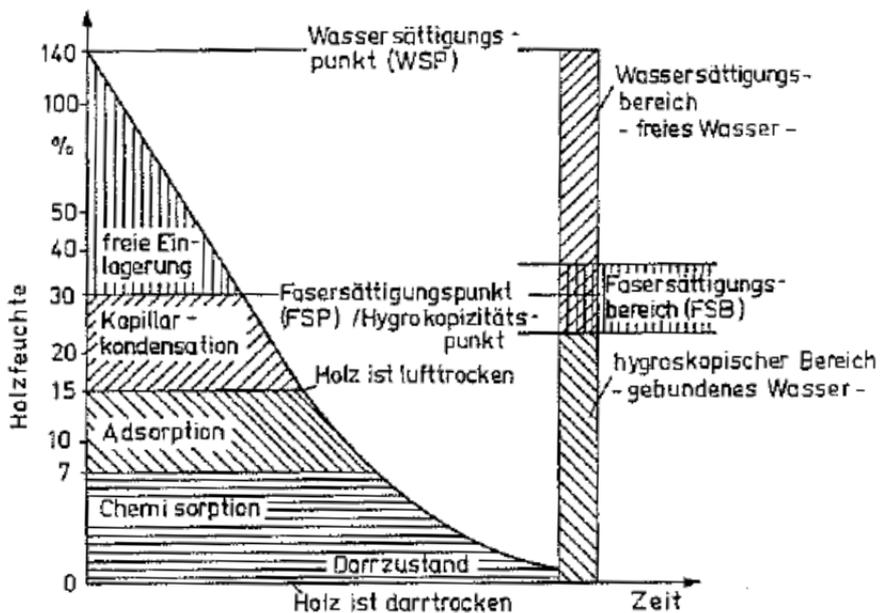


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz (Niemz 1993).

Sorption findet generell bei porigen Körpern statt. Holz ist ein kapillarporöser Stoff mit einem Porenanteil, der je nach Rohdichte im Mittel bei etwa 50 % bis 60 % liegt (Niemz 1993). Somit weist Holz eine große innere Oberfläche auf und nimmt stets so lange Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf oder gibt sie an diese ab, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Neben der Adsorption sorgen Kapillarkräfte für eine Änderung des Holzfeuchtegehalts. Basierend auf der Kondensation von Wasserdampf in den Hohlräumen des Holzes wird dieser Vorgang als Kapillarkondensation bezeichnet. Chemisorption, Physisorption und Kapillarkondensation sind weitgehend parallel laufende Prozesse, wobei zwischen 0 % und etwa 6 % Holzfeuchtigkeit ausschließlich Chemisorption, zwischen 6 % und ungefähr 15 % Holzfeuchtigkeit vor allem physikalische Adsorption und darüber hinaus Kapillarkondensation die Feuchtezunahme bestimmen, siehe Abbildung 2-6 und (Kollmann 1944).

Zur Beschreibung der Sorptionseigenschaft von Holz sind sowohl der Fasersättigungspunkt als auch die Ausgleichsfeuchtigkeit bei Umgebungsklima von besonderer Bedeutung. Die Ausgleichsfeuchtigkeit, auch als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet, beschreibt das holzartenabhängige Feuchtespeichervermögen, das sich bei Sorptionsgleichgewicht mit dem Dampfdruck der Atmosphäre einstellt. In der Praxis wird die Ausgleichsfeuchtigkeit beispielsweise mit Diagrammen, den Sorptionsisothermen, bestimmt. Diese beruhen meist auf den Messdaten, die an Probekörpern aus Sitka-Fichte von W. K. Loughbrough ermittelt und von Hawley (1931) veröffentlicht wurden.

Die Sorptionsisotherme stellt eine materialspezifische Kennfunktion dar, die im hygrokapitiven Feuchtebereich den Gleichgewichtszustand der Holzfeuchtigkeit mit der relativen Luftfeuchte bei einer bestimmten Temperatur beschreibt. Die praktische Anwendung dieser Sorptionsisotherme geschieht häufig unter der Vernachlässigung der Eigenart des Holzes, dass sich bei Trocknung,

Desorption, eine höhere Ausgleichsfeuchtigkeit als bei Feuchtezunahme, Sorption, einstellt, siehe Abbildung 2-7. Dieser Effekt wird als Hysterese bezeichnet. Über weite Bereiche der Hystereseschleife beträgt das Verhältnis der Ausgleichsfeuchtigkeit in der Adsorptionsphase zur Desorptionsphase etwa 0,85 (Skaar 1988). Mit steigender Temperatur wird die Hysterese generell kleiner und ist bei Temperaturen über 75 °C nicht mehr feststellbar (Weichert 1963). Der S-förmige Verlauf der Sorptionsisothermen ist durch die nacheinander verlaufenden, nicht scharf voneinander abgrenzbaren Vorgänge der chemischen, physikalischen Adsorption und anschließender Kapillarkondensation bedingt (Kollmann 1959).

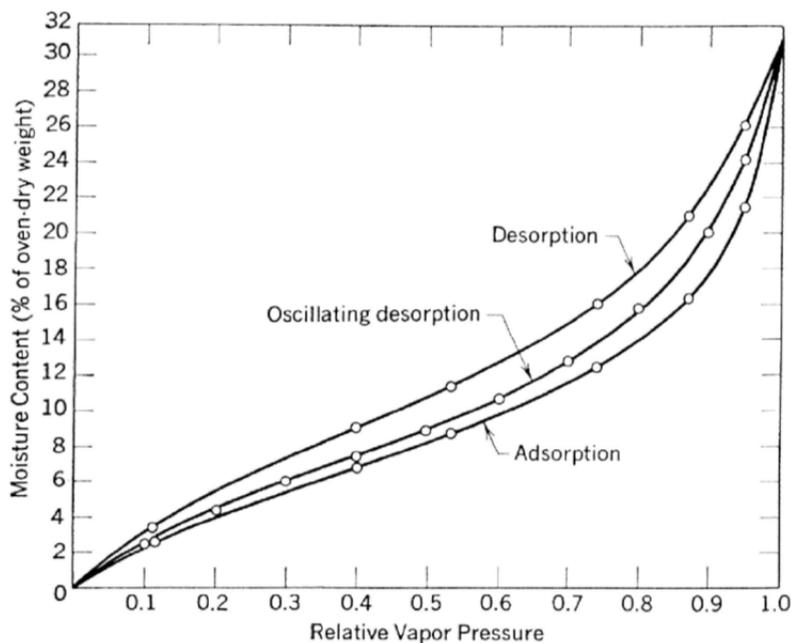


Abbildung 2-7: Sorption-Desorption Isotherme für Fichte bei 25 °C (Stamm 1964).

Die Ausgleichsfeuchte ist zwar in erster Linie von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur der Umgebungsluft abhängig, jedoch beeinflussen viele weitere Aspekte den baupraktischen Kennwert. Diese sind neben Gattung, Rohdichte, Kern-/Splintholz und Extraktstoffgehalt unter anderem auch mechanische Beanspruchung sowie Klimahistorie, siehe Abbildung 2-7. Über den gesamten Querschnitt erreicht Holz im Bauwesen praktisch nie seine Ausgleichsfeuchtigkeit, da die Querschnittsmaße recht groß sind und die Umgebungsluft kein konstantes Klima aufweist. Genaue Zahlen über die Angleichgeschwindigkeit der Holzfeuchte, der Sorptionsgeschwindigkeit, sind bislang kaum bekannt. Im Allgemeinen nimmt diese Größe mit abnehmender Rohdichte und Menge an Extraktstoffen zu (Sell 1997).

Verschiedene Theorien und Modellansätze versuchen, Sorptionsvorgänge mathematisch zu beschreiben. Brunauer et al. (1938) stellen eine Gleichung auf, die zusätzlich zu den starken monomolekularen Bindungen eine schwächere, mehrschichtige Adsorption berücksichtigt. Neben diesem sogenannten BET-Modell ist das Hailwood-Horrobin-Modell (Hailwood und Horrobin 1946) als wegweisende Arbeit zu nennen. So halten beispielsweise Stamm (1964) und Weichert (1963) das BET-Modell als das seinerzeit geeignetste und gebräuchlichste. Neuere Veröffent-

lichungen bevorzugen das Hailwood-Horrobin-Modell, welches sich durch eine gute Übereinstimmung mit Messdaten gegenüber anderen Modellen hervorhebt (Fortuin 2003; Popper et al. 2009).

2.3.4 Quellen und Schwinden

„Aus der Technikgeschichte des Altertums ist bekannt, dass die Ägypter Felsblöcke für ihre Kolossalbauten aus den Felsengebirge des Assuantales sprengten, indem sie stark getrocknete Hartholzkeile in natürliche oder erzeugte Felsspalten schlugen und sie mit Wasser so lange übergossen, bis die Quellungskraft des Holzes den Felsblock losbrach.“ (Vorreiter 1965)

Während das Quellen und Schwinden des Holzes meist ein nicht gewünschter Vorgang ist, so konnte er der Menschheit doch offensichtlich auch schon einen großen Nutzen erweisen. Durch die Anreicherung von gebundenem Wasser innerhalb der Zellwände nimmt Holz merklich an Volumen zu, welches bei einer Behinderung zu erheblichen Kräften führen kann. Eine Volumenänderung aufgrund einer Änderung des Feuchtegehaltes findet ausschließlich im hygroskopischen Bereich statt, sodass sich die besondere technische Bedeutung des Fasersättigungspunktes nochmals bestätigt. Quellen bezeichnet die Volumenzunahme, Schwinden beschreibt den umgekehrten Vorgang. Je nach Holzart kann die Änderung des Volumens dabei größer oder kleiner als das aufgenommene Wasservolumen sein (Keylwerth 1962a).

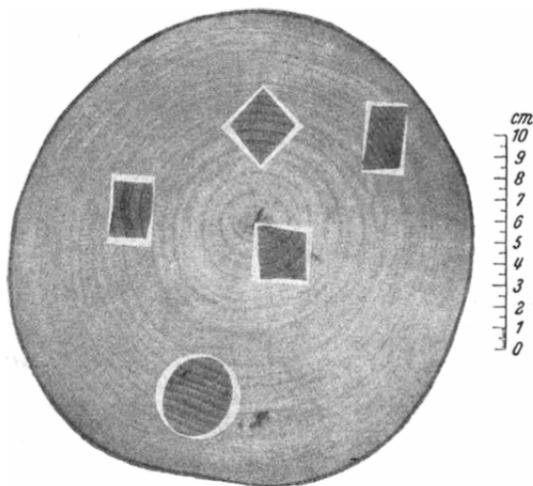


Abbildung 2-8: Schwinden von einer Stammscheibe entnommenen Buchenholzproben (Keylwerth 1951).

Abbildung 2-8 zeigt die Formänderungen an Holzquerschnitten, die aus einer Stammscheibe einer Buche herausgeschnitten wurden. Die Stammscheibe ist nass und die ausgeschnittenen Proben sind gedarrt fotografiert. An der Form der Proben ist zu erkennen, dass das Ausmaß des Schwindens richtungsabhängig ist. Üblicherweise ist das Quellen und Schwinden in tangentialer Richtung ungefähr doppelt so groß wie in radialer Richtung. In longitudinaler Richtung ist die Längenänderung bei gewöhnlichen Holzarten etwa um den Faktor 1/10 kleiner als in radialer Richtung und praktisch meist vernachlässigbar.

Die holztypischen Richtungsbezeichnungen sind Raumachsen eines kartesischen Koordinatensystems und basieren auf der Anatomie eines Baumquerschnitts. Die Achse in longitudinaler Richtung verläuft dabei parallel zur Längsfaser, in radialer Richtung parallel zu dem Radius eines Jahrrings und in tangentialer Richtung parallel zur der Tangente eines Jahrrings, siehe Abbildung 2-9.

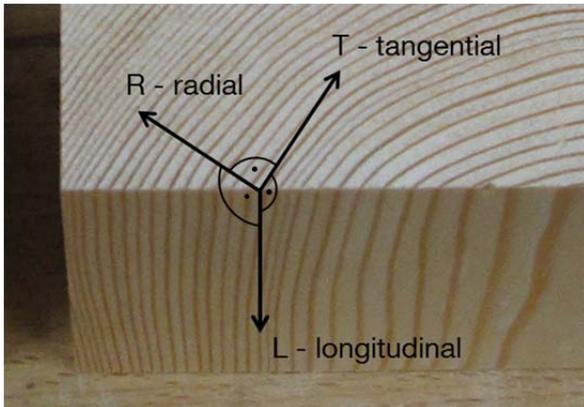


Abbildung 2-9: Holzprobe mit Kennzeichnung der drei anatomischen Hauptrichtungen – longitudinal, radial und tangential.

Die Maßzahlen für das Quellen gegenüber dem Schwinden unterscheiden sich kaum voneinander, hängen jedoch von der Holzart ab und streuen auch innerhalb einer Gattung. Generell nimmt das Quell- und Schwindmaß mit wachsender Rohdichte zu. Die auftretenden Verformungen sind weitgehend reversibel, vereinfachend kann ein linearer Zusammenhang zwischen Quellen beziehungsweise Schwinden und der Holzfeuchte angenommen werden (Keylwerth 1962a; Neuhaus 2011). Die Verformung bei einer Temperaturzunahme von 1 °C gegenüber einer Feuchtezunahme von 1 % ist etwa um den Faktor 100 kleiner und somit oftmals vernachlässigbar.

Bei der feuchtebedingten Volumenänderung des Holzes lässt sich äußerlich zwischen freiem und behindertem Quellen beziehungsweise Schwinden unterscheiden. Nach Keylwerth (1962b) kann es eine spannungsfreie, unbehinderte Quellung im Inneren des Holzes schon aufgrund seiner Anatomie weder im submikroskopischen, mikroskopischen noch makroskopischen Bereich geben. Makroskopisch führen beispielsweise die Dichteunterschiede in den Jahrringzonen und zwischen den Jahrringen immer zu einer Behinderung der Quellung oder Schwindung und damit zu inneren Spannungen im Holz. In der Praxis verursachen die zwangsläufig auftretenden Feuchtegradienten in einem Holzbauteil stets eine gegenseitige Behinderung der Volumenänderung in verschiedenen Zonen des Querschnitts. Weitere Ursachen von Quell- oder Schwindspannungen sind die verklebten Lagen bei Werkstoffen wie Brettsperr- und Brettschichtholz, die eine unbehinderte Verformung nicht ermöglichen.

2.4 Feuchtigkeitsbewegung im Holz

2.4.1 Allgemeine Beschreibung der Transportvorgänge

„The drying technology of wood is largely an art rather than a science, because fundamental knowledge about the wood-drying process is still lacking.“ (Nadler et al. 1985)

Der Transportvorgang von Feuchtigkeit im Holz ist ein komplexer Vorgang und schon seit Langem Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Kontroverse Auseinandersetzungen über die physikalisch richtige Beschreibung der Vorgänge erwähnt bereits Kollmann (1951) und nennt als Grund für die gegensätzlichen Auffassungen, dass die exakte wissenschaftliche Darstellung der Prozesse mit mathematischen Modellen kaum möglich ist. Trotz vieler neuer Erkenntnisse und rechentechnischer Entwicklungen ist die Aussage bis heute im Kern zutreffend.

Beim Feuchtetransport im Holz wird zwischen Wasserdampf, kapillarem und gebundenem Wasser unterschieden. Holz besitzt als ein poröser Werkstoff die Eigenschaft, Wasser oder Wasserdampf aufzunehmen oder abzugeben. Trockenes Holz bindet Feuchtigkeit aus der Atmosphäre in oder an den Zellwänden bis maximal der Fasersättigungspunkt erreicht ist. Nimmt das Holz darüber hinaus weiter Feuchtigkeit auf, liegt nicht mehr nur gebundenes Wasser sondern auch freies Wasser in der kapillarporösen Struktur des Holzes vor. Bei der Beschreibung des Feuchtetransportes im Holz lässt sich grundsätzlich zwischen den Vorgängen im hygroskopischen und im kapillaren Feuchtebereich unterscheiden. Bei Vorhandensein von freiem Wasser oberhalb des Fasersättigungspunktes findet in den Kapillaren eine Feuchtigkeitsbewegung statt, im Bereich unterhalb des Fasersättigungspunktes wird Wasserdampf und hygroskopisch gebundenes Wasser transportiert. Ein Beispiel für den Transport von Flüssigkeit durch die miteinander verbundenen Hohlräume ist das Imprägnieren von Holz. Wasserdampf und gebundenes Wasser werden beim technischen Trocknen durch das Zellsystem hindurch an die Umgebungsluft abgegeben.

Mit Blick auf das Verständnis des im Bauwesen maßgeblichen Feuchtetransports ist eine nähere Betrachtung der Vorgänge unterhalb des Fasersättigungspunktes erforderlich. Im hygroskopischen Bereich erfolgt der Feuchtigkeitstransport einerseits als Dampf durch die Zellhohlräume und Tüpfel und andererseits als gebundenes Wasser in der Zellwand (Choong 1962). Aufgrund ihrer Größe bedeuten die Tüpfel einen Widerstand für die Gasmoleküle und verringern die Bewegungsgeschwindigkeit. Abbildung 2-10 skizziert die Transportvorgänge durch das Zellsystem in transversaler Richtung, also quer zur Längsfaser. Pfad 1 kennzeichnet den Feuchtetransport des gebundenen Wassers ausschließlich durch die Zellwand, Pfad 2 die Strömung des Wasserdampfes durch das Lumen, Pfad 3 die Absorption und Bindung des Wassers in der Zellwand mit anschließendem Transport durch die Zellwand hindurch und Pfad 4 beschreibt den Weg der Feuchtigkeit von Tüpfel zu Tüpfel durch den Zellhohlraum.

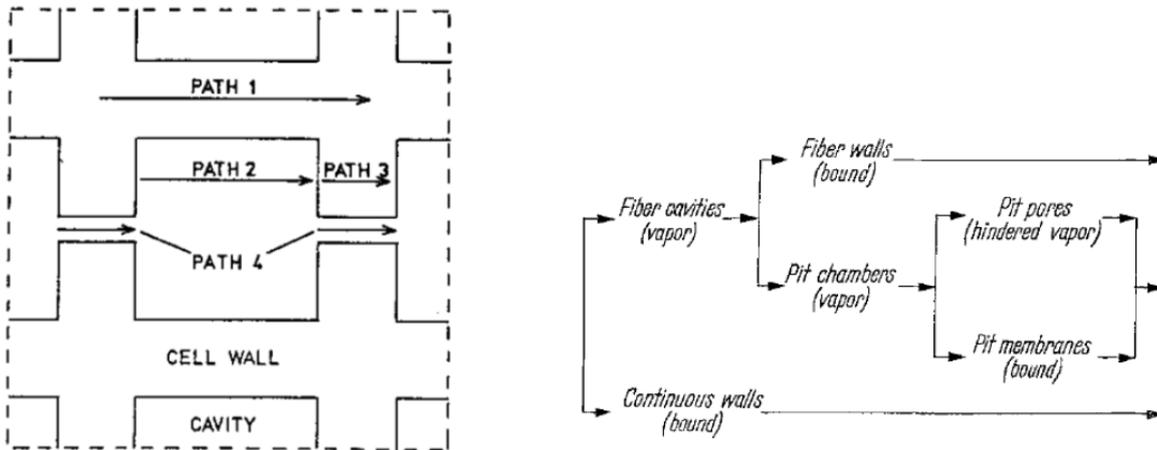


Abbildung 2-10: Schematische Darstellungen von prinzipiellen Pfaden bei transversalem Feuchtetransports durch eine Holzzelle, (Skaar 1988) links und (Stamm 1967a) rechts.

Im hygroskopischen Bereich lässt sich der Feuchtetransport vereinfachend mit den Gesetzen der Diffusion beschreiben (Siau 1984; Skaar 1988). Die meisten mathematischen Modelle basieren dabei auf den Fickschen Gesetzen. Allerdings erfassen die zugehörigen Gleichungen den komplexen Aufbau des Holzes und die verschiedenen parallel oder in Reihe ablaufenden Transportvorgänge keinesfalls vollumfänglich. Jedoch beteiligen sich auch nicht alle Transportmechanismen gleichbedeutend am Diffusionsprozess. So erläutert Skaar (1988), dass die Bewegung des gebundenen Wassers in den Zellwänden der maßgebende Vorgang ist. Damit gewinnt die Vereinfachung des Prozesses durch Anwendung der Fickschen Gesetze an Gültigkeit.

Ursachen für die Diffusionsvorgänge können Gradienten der Feuchtigkeitskonzentration beziehungsweise der Holzfeuchtigkeit, der relativen Luftfeuchtigkeit, des Dampfdrucks, des chemischen Potentials, des Wasserpotentials und des Spreitdrucks sein. Die jeweils zugehörigen Diffusionskoeffizienten sind von unterschiedlichem skalaren Wert und unterschiedlicher Einheit, können aber ineinander überführt werden (Siau 1984). Mit dem Vorhandensein von freiem Wasser bei Holzfeuchten über Fasersättigung nimmt die Bedeutung von kapillaren Kräften beim Feuchtigkeitstransport zu. Dennoch weist Kollmann (1951) auf verschiedene Untersuchungen hin, die die Transportvorgänge über den gesamten Feuchtigkeitsbereich als Diffusion beschreiben.

2.4.2 Feuchtetransport des freien Wassers

Stationäre Strömungen in porösen Medien lassen sich allgemein mit dem Darcy-Gesetz beschreiben:

$$Q = \frac{dV}{dt} = -\frac{k \cdot A}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (2-2)$$

mit

Q	Volumenstrom, in m ³ /s
V	Volumen, in m ³
t	Zeit, in s
k	Permeabilität, Durchlässigkeit, in m ²
A	Querschnitt des durchströmten Körpers, in m ²
p	Druck, in Pa = N/m ²
η	dynamische Viskosität der strömenden Flüssigkeit, in Pa·s
x	Fließlänge, in m

Allerdings sind Vorgänge, die auf stationäre Strömungen im Holz beruhen, in der praktischen Anwendung kaum von Bedeutung. Banks (1981) erläutert, dass das Darcy-Gesetz die instationären Transportvorgänge von Flüssigkeiten im Holz nur mit einer hohen Ungenauigkeit wiedergibt. Auch wenn grundlegende Annahmen für den Wassertransport im Holz nicht zutreffen, beschreibt das Darcy-Gesetz dennoch zweckdienlich den Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Druckgefälle (Siau 1984; Zillig 2009).

Stamm (1967b) beschreibt den Flüssigkeitstransport durch die Kapillaren des Holzes als laminare Strömung mit dem Gesetz von Hagen-Poiseuille. Dabei werden ebenfalls die Unzulänglichkeiten des Gesetzes für eine Anwendung auf den Werkstoff Holz angesprochen und weiter festgestellt, dass bei der Trocknung von Holz mit noch vorhandenem freien Wasser die Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsabnahme durch die Diffusion unterhalb des Fasersättigungspunktes bestimmt wird.

Bei Betrachtung der Strömung einer newtonschen Flüssigkeit, beispielsweise Wasser, durch ein Rohr oder eine Kapillare lässt sich das Darcy-Gesetz, Gleichung (2-2), in das Gesetz von Hagen-Poiseuille überführen:

$$Q = \frac{n\pi r^4 \Delta p}{8\eta l} \quad (2-3)$$

mit

n	Anzahl der parallelen Kapillaren
r	Innenradius der Kapillare, in m
Δp	Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kapillaren, in Pa
l	Länge der Kapillare, in m

2.4.3 Grundlagen zur Theorie der Diffusion

Der Feuchtetransport des Wasserdampfes und des gebundenen Wassers lässt sich im hygroskopischen Feuchtebereich vereinfachend mit den Gesetzen der Diffusion darstellen. Diffusion findet in einem Medium statt, wenn ein Konzentrationsunterschied zwischen zwei Orten besteht, und endet, wenn ein Ausgleich durch zufällige Bewegung von Atomen oder Molekülen stattgefunden hat. Die grundlegende Annahme zur Beschreibung von Diffusionsvorgängen ist, dass zwischen der Menge der in beziehungsweise aus einem Volumen transportierten Masse und dem vorherrschenden Konzentrationsgefälle ein proportionales Verhältnis besteht.

Für den eindimensionalen, stationären Fall gilt das 1. Ficksche Gesetz:

$$J = -D_c \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2-4)$$

mit

J	Stromdichte, in kg/(m ² ·s); Feuchtemenge, die in der Zeit t auf die Fläche A bezogen transportiert wird
D _c	Diffusionskoeffizient, in m ² /s
c	Konzentration der diffundierenden Masse, in kg/m ³
x	Raumkoordinate, in m

Das 1. Ficksche Gesetz gleicht mathematisch dem Darcy-Gesetz, Gleichung (2-2), das eine laminar strömende Wassermenge mit dem hydraulischen Gradienten proportional in Beziehung setzt. Bei Anwendung der Gleichung (2-4) wird der Werkstoff Holz als ein homogenes Material betrachtet. Das negative Vorzeichen ergibt sich, da die Diffusionsrichtung einer zunehmenden Konzentration entgegengesetzt ist.

Auf dem 1. Ficksche Gesetz basierend gilt das 2. Ficksche Gesetz für den instationären, isothermen Fall. Die Annahme eines konstanten, das heißt feuchte- und ortsunabhängigen, Diffusionskoeffizienten D entspricht zwar nicht der Realität, ist aber für die analytische Lösung der Differentialgleichung ein hilfreicher Ansatz:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \Delta c = \nabla(D \nabla c) = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (2-5)$$

mit

D	Diffusionskoeffizient, in m ² /s
$\Delta = \nabla \cdot \nabla$ = ∇^2	Laplace-Operator, entspricht dem Quadrat des Nabla-Operators
x, y, z	Raumkoordinaten, in m

Die allgemeine Diffusionsgleichung (2-5) setzt die zeitliche Änderung der Konzentration c an einem Ort und die räumlichen Variation der Konzentration c miteinander in Beziehung. Mathematisch wird der Zusammenhang mit einer Differentialgleichung erster Ordnung bezüglich der Zeit und zweiter Ordnung bezüglich des Ortes ausgedrückt. Die Lösung der Differentialgleichung ist nur für bestimmte Rand- und Anfangsbedingungen analytisch möglich. Andernfalls sind numerische Verfahren zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs anzuwenden.

Bei Feuchtetransportvorgängen in einer Holzkonstruktion liegt unter realen Umgebungsbedingungen nahezu immer der instationäre Fall vor, der durch zeitlich und räumlich veränderliche Gradienten gekennzeichnet ist. Verschiedene Potenziale können als Ursache für den Diffusionsprozess betrachtet werden, siehe Abschnitt 2.4.1. Statt einer Änderung der Feuchtekonzentration c , wie in den Gleichungen (2-4) und (2-5) angesetzt, wird in dieser Arbeit die Änderung der Holzfeuchtigkeit u als Ursache für den Feuchtetransport verwendet. Im Vergleich zu anderen Größen ist die Holzfeuchtigkeit u ein praktischer Wert und messtechnisch leicht zu erfassen. Die auf verschiedenen Ursachen basierenden Diffusionskoeffizienten lassen sich bei Berücksichtigung der jeweiligen Einheit ineinander überführen. Für den eindimensionalen Fall lässt sich Gleichung (2-5) daher folgendermaßen umformulieren:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) = D \frac{d^2 u}{dx^2} \quad (2-6)$$

Die mathematische Beschreibung der Diffusion basiert auf den Gleichungen der Wärmeleitung. Beide Phänomene beschreiben den Transport einer Größe aufgrund eines Gradienten. Fick (1855) übertrug als Erster die von Fourier (1822) aufgestellten Gesetze der Wärmeleitung auf Diffusionsvorgänge (Crank 1975). In Abbildung 2-11 sind Wärmeleitung und Diffusion einander gegenübergestellt.

Die Fourier-Gleichung lautet für den eindimensionalen, instationären Fall:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda(T)}{c\rho} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2-7)$$

mit

T	Temperatur, in K
ρ	Dichte, in kg/m ³
λ	Wärmeleitfähigkeit, in W/(K·m)
c	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen, in J/(kg·K)

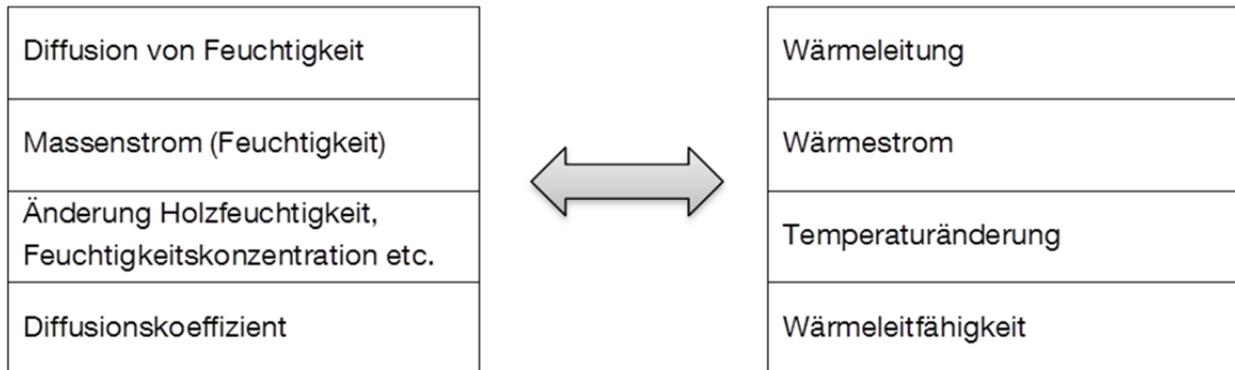


Abbildung 2-11: Gegenüberstellung Diffusion und Wärmeleitung.

An der Oberfläche eines Körpers zur Umgebung tritt bei der Diffusion, analog zur Wärmeleitung, ein Übergangswiderstand auf, der den Feuchtetransport beeinflusst. Der Oberflächenemissionskoeffizient S , multipliziert mit der Differenz aus Oberflächenfeuchtigkeit u_s und einer sich bei Annahme eines konstanten Klimas einstellenden Ausgleichsfeuchtigkeit u_1 , beschreibt den an der Grenzfläche zwischen Körper und Luftschicht herrschenden Diffusionsstrom:

$$D \frac{\partial u}{\partial x} = S(u_1 - u_s(t)) \quad (2-8)$$

mit

S	Oberflächenemissionskoeffizient, in m/s
u_1	Oberflächenfeuchtigkeit zum Zeitpunkt $t = \infty$ (Ausgleichsfeuchte), in %
u_s	Oberflächenfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit t , in %

2.4.4 Analytische Lösungen der Diffusionsgleichungen

Eine Vorgehensweise zur analytischen Lösung der Differentialgleichung für das Diffusionsproblem bei vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen wird nachstehend wiedergegeben. Das Diffusionsproblem wird hierbei mit Hilfe des Separationsansatzes gelöst. Weitere mögliche Verfahren sind die Laplace-Transformation oder numerische Methoden. Grundlegende und aus-

fürliche Arbeiten zu den mathematischen Lösungsmethoden sind unter anderem von Crank (1975), Baehr und Stephan (2010) sowie Carslaw und Jaeger (2011) veröffentlicht.

Gemäß 2. Fickschen Gesetz beschreibt eine lineare partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung, Gleichung (2-6), den eindimensionalen Feuchtigkeitstransport zu den Randflächen eines Körpers unter der Voraussetzung eines konstanten Diffusionskoeffizienten. Der Körper sei ein Quader, dessen Dicke im Vergleich zu seiner Länge und Höhe gering ist.

Mit Anwendung des Separationsansatzes und Trennung der Variablen werden Produktansätze der Form

$$u(x, t) = X(x) \cdot T(t) \tag{2-9}$$

zur Lösung der Differentialgleichung gewählt.

Durch Einsetzen der Gleichung (2-9) in (2-6) folgt

$$X(x) \cdot \frac{dT(t)}{dt} = D \cdot T(t) \cdot \frac{d^2X(x)}{dx^2} \tag{2-10}$$

und nach Umformung:

$$\frac{1}{T(t)} \cdot \frac{dT(t)}{dt} = \frac{D}{X(x)} \cdot \frac{d^2X(x)}{dx^2} \tag{2-11}$$

Damit ergeben sich zwei Gleichungen, die nur von einer Variablen, x oder t, abhängig sind und derselben Konstante $-\lambda^2 D$ gleichgesetzt werden:

$$\frac{1}{T(t)} \cdot \frac{dT(t)}{dt} = -\lambda^2 D \tag{2-12}$$

$$\frac{D}{X(x)} \cdot \frac{d^2X(x)}{dx^2} = -\lambda^2 D \tag{2-13}$$

Lösungen der Gleichungen (2-12) und (2-13) sind:

$$T(t) = e^{-\lambda^2 Dt} \quad (2-14)$$

$$X(x) = A \sin \lambda x + B \cos \lambda x \quad (2-15)$$

Eingesetzt in (2-9) ergibt sich die Lösung:

$$u(x, t) = (A \sin \lambda x + B \cos \lambda x) \cdot e^{-\lambda^2 Dt} \quad (2-16)$$

mit A und B als Integrationskonstanten.

Da Gleichung (2-6) linear ist, sind ebenfalls alle Linearkombinationen von (2-16) Lösungen der Differentialgleichung. Daraus resultiert die allgemeine Lösung:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin \lambda_n x + B_n \cos \lambda_n x) \cdot e^{-\lambda_n^2 Dt} \quad (2-17)$$

A_n , B_n und λ_n werden aus den Anfangs- und Randbedingungen bestimmt.

Für einen quaderförmigen Prüfkörper der Länge l und eindimensionale Diffusion in x -Richtung ergeben sich bei einer Verteilung der diffundierenden Substanz im Inneren zum Zeitpunkt $t = 0$ nach einer Funktion $f(x)$ und konstanter Oberflächenfeuchtigkeit u_1 und u_2 an den Stellen $x = 0$ und $x = l$ folgende Anfangs- und Randbedingungen:

$$u = f(x) \quad 0 < x < l, \quad t = 0$$

$$u = u_1 \quad x = 0, \quad t > 0$$

$$u = u_2 \quad x = l, \quad t > 0$$

Die zugehörige Lösung lautet nach Crank (1975) beziehungsweise Carslaw und Jaeger (2011):

$$\begin{aligned}
 u(x, t) = & u_1 + (u_2 - u_1) \frac{x}{l} \\
 & + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_2 \cos n\pi - u_1}{n} \sin \frac{n\pi x}{l} e^{-Dn^2 \pi^2 \frac{t}{l^2}} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} g_n \sin \frac{n\pi x}{l} e^{-Dn^2 \pi^2 \frac{t}{l^2}}
 \end{aligned} \tag{2-18}$$

mit

$$g_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} dx \tag{2-19}$$

und

- u_1 Oberflächenfeuchtigkeit an der Stelle $x = 0$ zum Zeitpunkt $t = \infty$, in %;
Ausgleichsfeuchte
- u_2 Oberflächenfeuchtigkeit an der Stelle $x = l$ zum Zeitpunkt $t = \infty$, in %;
Ausgleichsfeuchte

Die mittlere Feuchtigkeit des Körpers ergibt sich aus dem Integral über die Prüfkörperlänge:

$$w(t) = \frac{1}{l} \int_0^l u(x, t) dx \tag{2-20}$$

Für einen quaderförmigen Prüfkörper der Länge $l = 2 \cdot a$ und eindimensionale Diffusion in x -Richtung ergeben sich bei konstanter Verteilung der diffundierenden Substanz im Inneren zum Zeitpunkt $t = 0$ und einer konstanten Oberflächenfeuchtigkeit an den Stellen $x = \pm a$ folgende Anfangs- und Randbedingungen:

$$u = u_0 \qquad -a < x < a, \quad t = 0$$

$$u = u_1 \qquad x = -a, \quad x = a, \quad t > 0$$

Die zugehörige Lösung lautet (Crank 1975):

$$\frac{u(x, t) - u_0}{(u_1 - u_0)} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-D(2n+1)^2 \pi^2 \frac{t}{4a^2}} \cdot \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2a} \quad (2-21)$$

mit

u_0 Feuchtigkeit des Prüfkörpers zum Zeitpunkt $t = 0$, in %

Die mittlere Feuchtigkeit des Körpers ergibt sich bei Anwendung von Gleichung (2-20) zu:

$$\frac{w(t) - u_0}{(u_1 - u_0)} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-D(2n+1)^2 \pi^2 \frac{t}{4a^2}} \quad (2-22)$$

Newman (1931a) berücksichtigt bei der analytischen Lösung der Diffusionsgleichung (2-6) zusätzlich zu einer parabelförmigen Anfangsverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$ noch einen Oberflächenemissionskoeffizienten S . Bei Betrachtung eines eindimensionalen Diffusionsvorgangs eines quaderförmigen Körpers der Länge $l = 2 \cdot a$ zu zwei gegenüberliegenden Oberflächen an den Stellen $x = \pm a$ und Berücksichtigung eines Übergangswiderstandes lauten die Anfangs- und Randbedingungen:

$$u = u_1 + (u_M - u_1) - \frac{u_M - u_S}{a^2} x^2 \quad -a < x < a, t = 0, \quad \text{siehe} \quad (2-23)$$

Parabelgleichung

$$D \frac{\partial u}{\partial x} = \pm S(u_1 - u_S) \quad x = \pm a, t > 0, \text{ siehe Gleichung (2-8)}$$

mit

u_1 Ausgleichsfeuchtigkeit bei konstanter Temperatur/relativer Luftfeuchtigkeit der Umgebung, in %

u_M Feuchtigkeit in Körpermitte, in %

u_S Feuchtigkeit an den Oberflächen, in %

In Anlehnung an Newman (1931a) lautet die Lösung:

$$u(x, t) = u_1 + (u_M - u_1) \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cdot e^{-\left(\frac{D \cdot t}{a^2} \cdot \beta_n^2\right)} \cdot A_n \cdot \cos \frac{\beta_n \cdot x}{a} - (u_M - u_S) \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cdot e^{-\left(\frac{D \cdot t}{a^2} \cdot \beta_n^2\right)} \cdot B_n \cdot \cos \frac{\beta_n \cdot x}{a} \quad (2-24)$$

mit

$$A_n = \frac{ha}{((ha)^2 + \beta_n^2 + ha) \cdot \cos \beta_n} \quad (2-25)$$

$$B_n = \frac{2\beta_n^2 + ha\beta_n^2 - 2ha}{\beta_n^2((ha)^2 + \beta_n^2 + ha) \cdot \cos \beta_n} \quad (2-26)$$

hierin ist

$$h = S/D \quad (2-27)$$

$$\cot \beta_n = \beta_n/ha \quad (2-28)$$

Durch Integration gemäß Gleichung (2-20) erhält man den mittleren Feuchtegehalt w des Körpers zum Zeitpunkt t :

$$w(t) = u_1 + (u_M - u_1) \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cdot e^{-\left(\frac{D \cdot t}{a^2} \cdot \beta_n^2\right)} \cdot \frac{(ha)^2}{\beta_n^2((ha)^2 + \beta_n^2 + ha)} - (u_M - u_S) \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cdot e^{-\left(\frac{D \cdot t}{a^2} \cdot \beta_n^2\right)} \cdot \frac{ha(2\beta_n^2 + ha\beta_n^2 - 2ha)}{\beta_n^4((ha)^2 + \beta_n^2 + ha)} \quad (2-29)$$

Bei Annahme eines unendlich großen Oberflächenkoeffizienten S lässt sich die Lösung nach Newman (1931a), Gleichung (2-24), in die Gleichung (2-18) beziehungsweise Gleichung (2-21) überführen.

2.4.5 Verschiedene Aspekte der Diffusion im Holz

Nach dem Fällen und Sägen eines Baumstammes folgt mit der technischen Trocknung ein Arbeitsschritt, der eine nicht zu unterschätzende wirtschaftliche Bedeutung für die holzverarbeitende Industrie hat. Der Trocknungsvorgang soll die Holzfeuchtigkeit in möglichst kurzer Zeit, bei geringem Energieeinsatz und ohne Rissbildung reduzieren. Diese Aufgabe erfordert die Kenntnis über eine Vielzahl von Einflussfaktoren, sodass das Thema der Holz Trocknung und speziell die mathematische Beschreibung des Feuchtigkeitstransports schon früh Bestandteil der Forschungsaktivitäten war und immer noch ist (Fortuin 2003).

Voigt et al. (1940) nehmen Anfang der 1940er Jahre Unklarheiten bezüglich der Holz Trocknung zum Anlass, die Gesetzmäßigkeiten der Feuchtigkeitsbewegung unterhalb und oberhalb des Fasersättigungspunktes genauer zu ergründen. Die Versuchsergebnisse bestätigen, dass Diffusion die Feuchtigkeitsbewegung im hygrokopischen Bereich bestimmt und bei höherer Holzfeuchte eine kapillare Wasserbewegung stattfindet. Über die mathematische Beschreibung der Diffusionsvorgänge und der treibenden Kräfte herrscht allerdings Uneinigkeit. Während Voigt et al. (1940) das Ficksche Gesetz für nicht maßgebend erklären, beschreibt beispielsweise Skaar (1954) die stationären und instationären Diffusionsvorgänge im Holz mit dem 1. und 2. Fickschen Gesetz.

Historisch bedingt basieren die meisten Diffusionsberechnungen auf den Fickschen Gesetzen (Skaar 1988). Deren Anwendbarkeit auf den Werkstoff Holz ist jedoch, vor allem aufgrund der vereinfachenden Annahmen, bis heute noch Gegenstand kontroverser Auseinandersetzungen. Ein wesentlicher Kritikpunkt ist die Annahme eines konstanten, von der Holzfeuchte unabhängigen Diffusionskoeffizienten. Diese Vereinfachung ermöglicht die analytische Lösung der Fickschen Differentialgleichung 2. Ordnung bei unterschiedlichen Rand- und Startbedingungen (Skaar 1954; Crank 1975). Nakano (1994a; 1994b) hält die Fickschen Gesetze für nicht anwendbar und erläutert eine mathematische Beschreibung der Sorptionsvorgänge, die auf der Wasseraufnahme als chemische Reaktion basiert. Die Ausführungen lehnt Babiak (1995) entschieden ab.

Wadsö (1993a; 1994b) stellt in seinen Untersuchungen an Proben aus Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) fest, dass sich Sorption zwischen 54 % und 75 % relativer Luftfeuchtigkeit mit den Fickschen Gesetzen beschreiben lässt, in einem Bereich zwischen 75 % und 84 % hingegen nicht mehr. Der Begriff „non-Fickian“ wird zur Charakterisierung des letztgenannten Vorgangs verwendet. Ferner deuten Versuchsergebnisse einen Einfluss der Prüfkörperdicke auf die Diffusionskoeffizienten an. Im Gegensatz zu Choong und Skaar (1972) sowie Avramidis und Siau (1987) vertritt Wadsö (1993a) die Ansicht, dass der Effekt wegen der hohen Luftgeschwindigkeit während der Versuche nicht auf den Oberflächenwiderstand zurückzuführen sei. Als Ursache für Unterschiede bei ermittelten äußeren Widerständen nennt Wadsö (1993c) allgemein das mangelnde Wissen über den inneren Widerstand des Holzes und in diesem Zusammenhang unter anderem das „non-Fickian“ Verhalten. Die von Tremblay et al. (2000b) dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass bis zu einer Holzfeuchtigkeit von etwa 70 % bis 110 % die Trocknungsrate konstant ist. Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit steigt die Trockengeschwindigkeit und in

Nähe der Oberfläche sind steilere Holzfeuchteprofile feststellbar. Trotz hoher Luftgeschwindigkeit existiert allerdings weiterhin ein Übergangswiderstand.

Frandsen et al. (2007a) beschreiben ebenfalls, dass der Diffusionsprozess in unterschiedlichen Phasen abläuft. Bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit wird der Vorgang durch Wasserdampfdiffusion bestimmt, bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit nimmt die Bedeutung der Diffusion des gebundenen Wassers zu. Das vorgestellte „multi-Fickian“ Modell eignet sich zur Darstellung des in den Versuchen von Wadsö (1994b) festgestellten „non-Fickian“ Verhaltens. Frandsen et al. (2007; 2007b) geben weitere Informationen über die Entwicklung von „multi-Fickian“ Modellen und deren Güte. Auch Avramidis und Siau (1987) sowie Liu und Simpson (1999) stellen anhand von Messdaten an Westlicher Weymouth-Kiefer (*Pinus monticola*) und Roteiche (*Quercus rubra*) ein zweistufiges Verhalten bei den Sorptions- beziehungsweise Trocknungsprozessen fest. Stamm (1967a) bringt indessen ein von den Fickschen Diffusionsgleichungen abweichendes Verhalten mit einer einhergehenden Spannungsrelaxation des Holzes in Verbindung.

Bei der Ermittlung von Diffusionskoeffizienten besteht prinzipiell die Möglichkeit, eine stationäre oder eine instationäre Versuchsmethodik anzuwenden. Erstgenannte Methode lässt sich durch das 1. Ficksche Gesetz mathematisch beschreiben. Der Versuchsaufbau sieht üblicherweise vor, dass zwei gegenüberliegende, gleichgroße und parallele Flächen eines ansonsten abgedichteten Prüfkörpers jeweils einer unterschiedlichen, konstanten relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind. Stationäre Bedingungen herrschen dann, wenn die Holzfeuchteverteilung unverändert bleibt und ein linearer Zusammenhang zwischen der Gewichtsänderung des Probekörpers und der Zeit besteht. Ausführliche Erläuterungen zum Versuchsprinzip sind beispielsweise in (Vanek und Teischinger 1989; DIN EN ISO 12572) zu finden. DIN EN 15026, die die praktische Anwendung von Software für die wärme- und feuchtetechnische Simulation definiert und die bei der Vorhersage der eindimensionalen transienten Wärme- und Feuchteübertragung in Bauteilen von mehrschichtigen Gebäudehüllen eingesetzt wird sowie Informationen zur Gefahr feuchtebedingter Probleme in Bauteilen bietet, verweist zur Bestimmung des Dampftransport-Koeffizienten auf stationäre Messverfahren gemäß DIN EN ISO 12572.

Praxisnäher sind instationäre Versuche, die durch eine zeitliche Feuchtigkeitsänderung und eine lokale Variation der Feuchtigkeit im Prüfkörper gekennzeichnet sind. Diese Vorgänge werden mathematisch mit dem 2. Fickschen Gesetz beschrieben. Bei instationären Versuchen wird eine Probe in eine klimatische Umgebung gebracht, die eine Änderung des Feuchtezustands im Probekörper bewirkt. Stationäre Versuche sind zeitaufwendiger, dafür gelten gegenüber der instationären Methode einfachere mathematische Gleichungen (Skaar 1954). Üblicherweise weichen die Diffusionskoeffizienten, die mit den unterschiedlichen Methoden bestimmt wurden, voneinander ab (Moschler, Jr. und Martin 1968; Martin und Moschler, Jr. 1970). Wadsö (1993b) führt die beobachteten Unterschiede einerseits auf Messfehler und andererseits auf das „non-Fickian“ Verhalten zurück.

Mit den stationären Dry- und Wet-Cup-Verfahren bestimmen beispielsweise Volkmer et al. (2012) an verklebten Holzproben den Einfluss der Klebstofffuge auf den Diffusionswiderstand des Holzes. Den radialen und tangentialen Feuchtetransport im Holz untersuchen Tremblay et al.

(2000a) unter Anwendung der instationären Methode. Der Gradient des Wasserpotenzials, experimentell aus dem Feuchtegehalt des Holzes bestimmt, wird hierbei als treibende Kraft angesetzt. Cai und Wang (1994) wenden bei der Bestimmung der Diffusionskoeffizienten von Spanplatten sowohl die stationäre als auch die instationäre Methode an und kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Kollmann (1951) führt auf, dass die Diffusionskoeffizienten stark mit der Holzfeuchtigkeit ansteigen, mit steigender Rohdichte abnehmen und temperaturabhängig sind. Böhner (1976) bestätigt in Versuchen den Zusammenhang bezüglich der Rohdichte für die Holzarten Buche, Eiche und Kiefer und stellt fest, dass unterschiedliche Diffusionskoeffizienten vor allem durch die Holzart geprägt sind. Das Maß der Änderung des Koeffizienten mit der Rohdichte ist bei den genannten Holzarten in etwa gleich und in Faserlängsrichtung deutlich stärker ausgeprägt als senkrecht zur Faser. Die Abhängigkeit des Sorptionsverhaltens und des Fasersättigungspunktes vom Extraktstoffgehalt zeigen Wangaard und Granados (1967) anhand verschiedener Holzarten.

Generell verläuft der Feuchtigkeitstransport im Holz in Längsrichtung schneller als in transversaler Richtung. Bei Auswertung von Versuchsdaten sieht Stamm (1967a) nur einen geringen Einfluss von strukturellen Unterschieden des Holzes, wie beispielsweise ein Verschluss der Tüpfel, sowie von Splint- und Kernholz unterhalb des Fasersättigungspunktes. Choong und Skaar (1969; 1972) ermitteln in ihren Versuchen im Splintholz einen etwas höheren Diffusionskoeffizienten als im Kernholz, radial einen höheren als tangential. Wadsö (1993a) kann dagegen keinen Unterschied zwischen Splint- und Kernholz hinsichtlich des Diffusionskoeffizienten feststellen. Aufgrund der Anatomie der Hölzer, der Marktstrahlen und der Anordnung der Zellwandungen ist die Diffusionsgeschwindigkeit in tangentialer Richtung etwas langsamer als in radialer Richtung. Die Unterschiede sind aber häufig vernachlässigbar, wie Messergebnisse beispielsweise bei Fichte (Häglund 2006) zeigen. Gereke (2009) merkt jedoch an, dass, im Vergleich zu Fichtenholz, die Diffusionskoeffizienten bei Laubhölzern in radialer und tangentialer Richtung verschieden sind.

Stamm (1959; 1960) untersucht die Diffusion von gebundenem Wasser innerhalb der Zellwände. Dazu wurden die Lumen der Prüfkörper mit geschmolzenem Metall gefüllt. Die Ergebnisse von verschiedenen, in den USA heimischen Baumarten wiesen für Nadelhölzer mit geringem Anteil an Extraktstoffen annähernd gleiche Diffusionskoeffizienten in Faserlängsrichtung aus. Für Laubhölzer wurden generell etwas höhere Werte ermittelt. Radial ergaben sich in den Versuchen etwas höhere Diffusionskoeffizienten als in tangentialer Richtung.

Ein konstant angenommener Diffusionskoeffizient repräsentiert einen Mittelwert über einen betrachteten Holzfeuchtebereich. Generell nehmen Diffusionskoeffizienten exponentiell mit steigender Holzfeuchte zu (Stamm 1964; Avramidis und Siau 1987; Droin-Josserand et al. 1988; Simpson und Liu 1991). Als Grund für den Anstieg nennt Siau (1984) eine geringe Bindungsenergie bei einer höheren Holzfeuchtigkeit. Rozas et al. (2009) untersuchen den Diffusionskoeffizienten als Funktion der Holzfeuchtigkeit unter Verwendung eines konstanten, eines linearen und zweier exponentieller Ansätze, stellen jedoch bei einem Vergleich der auf Basis der 2. Fickschen Diffusionsgleichung berechneten Holzfeuchtigkeitsverläufe mit Messwerten keinen merklichen Einfluss fest. Mounji et al. (1991), Kouali und Vergnaud (1991) sowie Kouali et al.

(1992) verwenden konstante Diffusionskoeffizienten in ihren auf der 2. Fickschen Differentialgleichung basierenden, numerischen Berechnungen und finden sowohl unterhalb als auch oberhalb des Fasersättigungspunktes eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Bei Annahme eines von der Holzfeuchtigkeit unabhängigen Diffusionskoeffizienten vergleichen Langrish und Bohm (1997) Holzfeuchtigkeit und Dampfdruck als Potential für den Feuchte-transport. Mit dem Ansatz der Holzfeuchtigkeit stimmen Messwerte und Rechenwerte besser überein.

Die Annahmen zu den Feuchtetransportkoeffizienten variieren also in der Literatur. Daten aus Trocknungsversuchen vergleicht auch Hukka (1999) mit Rechenergebnissen, die auf dem 2. Fickschen Diffusionsgesetz basieren. Funktionen mit insgesamt sechs Parametern bilden den Diffusionskoeffizienten und Oberflächenwiderstand in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit und Temperatur ab. Die ermittelten Parameter seien jedoch lediglich in dem Kontext des angewendeten Modells nutzbar. Weiter wird angemerkt, dass die gute Übereinstimmung der Mess- und Rechenwerte eher auf einer genauen Bestimmung der Eingangsparameter und akkuraten Versuchsdurchführung basiert als auf dem anspruchsvollen mathematischen Modell. Bei einem Vergleich mit Rechenergebnissen eines nochmal komplexeren Modells lässt sich feststellen, dass das einfachere Modell eine bessere Übereinstimmung liefert.

Zillig (2009) beschreibt in seiner Arbeit den Feuchtigkeitstransport unter besonderer Berücksichtigung der Vorgänge in der Mikrostruktur des Holzes. Dabei zeigen Röntgenaufnahmen die Feuchtigkeitsverteilung des kapillaren Wassers, ein Finite-Elemente-Modell bildet Holzzellen innerhalb der Jahrringe ab. Die Berücksichtigung aller maßgebenden Einflüsse bleibt jedoch bei einer detaillierten Modellierung eine Herausforderung.

Eine Methode zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten mittels Neutronenradiographie auf Basis der 2. Fickschen Gleichung stellen Mannes et al. (2009) vor. Die zerstörungsfreie Methode bietet die Möglichkeit, den Diffusionsprozess über die Zeit und die Feuchteverteilung über den Querschnitt darzustellen. Sonderegger et al. (2010) nutzen dieses Verfahren, um den Einfluss verschiedener Klebstoffe auf den Diffusionsprozess zu untersuchen. Der Einfluss verschiedener Klebstofffamilien wird auch von Volkmer et al. (2012) beschrieben. Eine wasserdampfsperrende Wirkung ist bei den verwendeten EPI (Emulsion-Polymer-Isocyanat) und PUR (Polyurethan) Klebstoffsystemen feststellbar, eine MUF (Melamin-Harnstoff-Formaldehyd) Klebefuge beeinflusst den Dampfdiffusionswiderstand praktisch nicht. Generell lassen sich aber wenige Untersuchungen zu Diffusionskoeffizienten für verschiedene Klebstoffe in der Literatur finden (Gereke et al. 2011).

Eine einfache Bestimmung eines konstant angenommenen Diffusionskoeffizienten, basierend auf dem 2. Fickschen Gesetz und einer Lösung nach Boltzmann, schlägt Stamm (1964; 1967a) als erste, gute Annäherung vor. Unter der Annahme eines eindimensionalen Diffusionsstroms in einer Platte von gleichbleibendem Volumen mit anfänglich konstanter Feuchteverteilung, unmittelbarem Erreichen der Ausgleichsfeuchtigkeit an den Oberflächen in dem neuen Umgebungsklima, jedoch konstant bleibender Feuchtigkeit in Körpermitte gilt näherungsweise nachfolgende Beziehung:

$$D' = \frac{\pi l^2 E^2}{16t} \quad (2-30)$$

hierin ist

$$E = \frac{u - u_0}{u_1 - u_0} \quad \text{Sorption, Feuchtezunahme} \quad (2-31)$$

$$E = \frac{u - u_1}{u_0 - u_1} \quad \text{Desorption, Trocknung} \quad (2-32)$$

mit

D'	„scheinbarer“ Diffusionskoeffizient bei gemittelter Holzfeuchtigkeit, in m^2/s ; der „scheinbare“ Diffusionskoeffizient wird unter Vernachlässigung eines Übergangswiderstandes bestimmt
l	Abstand der feuchtigkeitsaufnehmenden Oberflächen, in m
t	Zeit, in s
E	Verhältnis der zum betrachteten Zeitpunkt t zu-/abgenommenen Holzfeuchtigkeit zur maximal möglichen Zu-/Abnahme
u	mittlere Holzfeuchtigkeit zum Zeitpunkt t , in %
u_0	mittlere Holzfeuchtigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$, in %
u_1	Ausgleichsfeuchtigkeit zum Zeitpunkt $t = \infty$, in %

Daran anknüpfend erwies sich ebenfalls die sogenannte „half-time technique“ in der Vergangenheit, bei fehlenden elektronischen Rechenhilfen, als einfache und häufig verwendete Methode, um aus Messwerten den Diffusionskoeffizienten zu ermitteln. Der Begriff „half-time technique“ leitet sich aus der Vorgehensweise ab, dass die Zeit $t_{0,5}$ gemessen wird, bis eine Probe die Hälfte der maximal möglichen Feuchtigkeit, $E = 0,5$, aufgenommen beziehungsweise abgegeben hat. Mit den zuvor genannten Annahmen ergibt nachstehende Gleichung eine gute Annäherung für den konstanten „scheinbaren“ Diffusionskoeffizienten D' (Crank 1975):

$$D' = \frac{0,049 \cdot l^2}{t_{0,5}} \quad (2-33)$$

mit

$t_{0,5}$	Zeit bis $E = 0,5$, in s; „half-time technique“
-----------	--

Der „scheinbare“ Diffusionskoeffizient wird unter Vernachlässigung eines Übergangswiderstandes bestimmt. Durch Einsetzen von $E = 0,5$ lässt sich Gleichung (2-30) in Gleichung (2-33) überführen.

Des Weiteren beschreibt Stamm (1964) eine graphische Methode zur näherungsweise Bestimmung des „scheinbaren“ Diffusionskoeffizienten. Dazu ist eine Darstellung des natürlichen Logarithmus von E , $\ln E$, über die Zeit t erforderlich. Ist ein Material mit dem Fickschen Diffusionsgesetz beschreibbar, wird sich, ausgenommen einer sehr kurzen Zeit t , ein linearer Zusammenhang ergeben. Anhand der Steigung des Graphen ist der Mittelwert des Diffusionskoeffizienten für den betrachteten Holzfeuchtebereich ablesbar. Die vereinfachte Lösung der Fickschen Diffusionsgleichung lautet dabei:

$$D' = \frac{l^2}{\pi^2} \frac{d(\ln E)}{dt} \quad (2-34)$$

Die Annahme eines sofortigen Angleichens der Oberflächenfeuchtigkeit an die Umgebungsfeuchtigkeit, die oftmals der theoretischen Behandlung der Diffusion zugrunde liegt, ist tatsächlich nicht zutreffend (Böhner 1976). Die Bestimmung des „scheinbaren“ Diffusionskoeffizienten D' unter der Annahme, dass die Oberfläche eines Körpers bei einem Klimawechsel unmittelbar Ausgleichsfeuchtigkeit annimmt, vernachlässigt einen an der Oberfläche wirkenden Widerstand. Die Geschwindigkeit eines Sorptions- oder Desorptionsprozesses wird durch den inneren Widerstand, ausgedrückt durch den Diffusionskoeffizienten D , und dem äußeren Widerstand, ausgedrückt durch den Oberflächenemissionskoeffizient S , bestimmt. Der auf materialspezifische Merkmale basierende innere Widerstand beeinflusst den Transport von Feuchtigkeit im Inneren eines Körpers, während der äußere Widerstand darüber hinaus vom Umgebungsklima und Luftströmungsgeschwindigkeit abhängt und den Feuchtigkeitsaustausch der Holzoberfläche mit der Umgebung beschreibt (Skaar 1954; Choong und Skaar 1969). Der Oberflächenemissionskoeffizient sollte bei der Bestimmung des Diffusionskoeffizienten allenfalls dann vernachlässigt werden, das heißt einen unendlich großen Wert annehmen, wenn eine ausreichend starke Luftzirkulation im Bereich der Oberflächen herrscht oder aufgrund der Geometrie der Widerstand der Oberfläche gegenüber dem inneren Widerstand vernachlässigbar ist. Ab einer Luftgeschwindigkeit von etwa 3 m/s kann wohl auf eine Berücksichtigung des Übergangswiderstandes verzichtet werden (Siau 1984).

Die Feuchtigkeit, die durch die Grenzschicht einer Oberfläche transportiert wird, berechnet sich aus der Differenz der Feuchtekonzentration an der Holzoberfläche und der Konzentration, die der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft zugeordnet ist, multipliziert mit dem als konstant angenommenen Oberflächenemissionskoeffizient S , siehe Gleichung (2-8). Den mathematischen Zusammenhang berücksichtigt Newman (1931a) als Randbedingung bei der analytischen Lösung der Diffusionsdifferentialgleichung 2. Ordnung, siehe Abschnitt 2.4.4. Auf Basis dieser Lösung entwickeln Choong und Skaar (1969; 1972) eine vereinfachte Methode, mit der sich innerer und äußerer Widerstand im hygroskopischen Bereich bestimmen lassen. Dazu sind identische Versuche an mindestens zwei Prüfkörpern mit unterschiedlichen Dicken durchzuführen. Der

Diffusionskoeffizient D und der Oberflächenemissionskoeffizient S werden anschließend anhand folgender Gleichung näherungsweise ermittelt:

$$\frac{t_{0,5}D}{a^2} = 0,2 + \frac{0,7}{h a} \quad (2-35)$$

mit

$h = S / D$ siehe Gleichung (2-27), in $1/m$

a $a = l/2$, halbe Prüfkörperlänge, in m

Liu (1989) stellt eine Methode und Lösung zur Bestimmung der Koeffizienten D und S unter Anwendung von Gleichung (2-35) und der „half-time technique“ vor, bei der die Messdaten nur eines Probekörpers notwendig sind:

$$D = \frac{-0,1654a^2}{0,701 \frac{dt}{dE} + 2,05t_{0,5}} \quad (2-36)$$

$$S = \frac{0,701}{\frac{t_{0,5}}{a} - 0,1963 \frac{a}{D}} \quad (2-37)$$

Die analytische Methode der „half-time technique“, gemäß Gleichungen (2-36) und (2-37), nutzen Simpson und Liu (1991) zur Bestimmung eines von der Feuchtigkeit abhängigen Diffusionskoeffizienten in einem numerischen Verfahren. Olek und Weres (2007) evaluieren die verschiedenen Methoden mittels einer Fehlerfunktion, indem Messergebnisse mit Rechenergebnissen verglichen werden. Hierfür werden die Gleichung (2-30), ohne Berücksichtigung eines Oberflächendiffusionskoeffizienten, die Gleichungen (2-36) und (2-37) sowie ein numerisches Verfahren bei Betrachtung von drei empirischen Ansatzfunktionen für den Diffusionskoeffizienten verwendet. Das Fazit ist, dass die numerische Methode die beste Übereinstimmung liefert.

Cai und Deku (1992) sowie Cai und Wang (1994) verwenden die Gleichungen (2-30) und (2-35) zur Bestimmung der Koeffizienten von Spanplatten, die erstgenannten Autoren modellieren anschließend die Feuchtebewegung mit der Finite-Elemente-Methode. Allerdings merken Cai und Avramidis (1997) zur Anwendung der „half-time technique“ kritisch an, dass nicht zwangsläufig der Wert $E = 0,5$ zu der besten Anpassung von Messdaten eines Zeitraums führt. Siau und Avramidis (1996) beschreiben Faktoren, die den Oberflächenemissionskoeffizient S beeinflussen, und vergleichen unterschiedliche, von verschiedenen Autoren veröffentlichte Übergangswiderstände. Eine weitere Gegenüberstellung ermittelter Oberflächenkoeffizienten ist in (Söderström und Salin 1993) zu finden.

2.5 Feuchteinduzierte Spannungen und Dehnungen im Holz

2.5.1 Spannungs-Dehnungsbeziehung

Spannungen in einem Körper entstehen aufgrund behinderter Dehnungen. Für den hygroskopischen, zellbasierten Werkstoff Holz kann sich die Gesamtdehnung unter Ausschluss rein plastischer Anteile beispielsweise folgendermaßen zusammensetzen:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_u + \varepsilon_{ms} + \varepsilon_{cr} \quad (2-38)$$

mit

ε_{el}	elastische Dehnung
ε_{th}	Dehnung aufgrund einer Temperaturänderung
ε_u	Dehnung aufgrund einer Feuchteänderung, Schwinden und Quellen
ε_{ms}	Dehnung aufgrund des mechano-sorptiven Kriechens
ε_{cr}	Dehnung aufgrund des Kriechens unter mechanischer Last

Bei Vernachlässigung des Einflusses der Temperatur sowie der Zeit, und somit der rheologischen Eigenschaften, reduziert sich der Ansatz zur Beschreibung der Dehnung eines Stückes Holz unter mechanischer und feuchteinduzierter Einwirkung zu:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_u \quad (2-39)$$

Hierin ist:

$$\varepsilon_{el} = D^{-1} \sigma_{el} \quad (2-40)$$

$$\varepsilon_u = \alpha_u \Delta u \quad (2-41)$$

mit

σ_{el}	mechanische Spannung, in N/mm ²
D	Steifigkeitsmatrix
α_u	Differentielles Quell- und Schwindmaß, in % je % Holzfeuchteänderung
Δu	Holzfeuchteänderung, in %

Die Spannung in einem Werkstoff mit linear-elastischem Verhalten lässt sich mit dem Gesetz von Hooke beschreiben. Durch Umformung der Gleichung (2-40) ergibt sich folgende Spannungs-Dehnungsbeziehung:

$$\sigma_{el} = D \varepsilon_{el} \quad (2-42)$$

Die Steifigkeitsmatrix D stellt die proportionale Beziehung zwischen elastischer Dehnung und mechanischer Spannung her:

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

mit

D	Steifigkeitsmatrix
E_x	E-Modul in x-Richtung, in N/mm ²
ν_{xy}	Poissonzahl, Querkontraktionszahl, dimensionslos
G_{xy}	Schubmodul in x-y-Ebene, in N/mm ²

Des Weiteren gilt:

$$\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T \quad (2-44)$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}]^T \quad (2-45)$$

$$\varepsilon_{th} = \Delta T [\alpha_{T,x} \ \alpha_{T,y} \ \alpha_{T,z} \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2-46)$$

$$\varepsilon_u = \Delta u [\alpha_{u,x} \ \alpha_{u,y} \ \alpha_{u,z} \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2-47)$$

mit

σ_x	Normalspannung in x-Richtung, in N/mm ²
σ_{xy}	Schubspannung in x-y-Ebene, in N/mm ²
ε_x	Dehnung in x-Richtung, dimensionslos
ε_{xy}	Schubverzerrung in x-y-Ebene, dimensionslos
$\alpha_{T,x}$	Temperaturdehnzahl, in 1/°C
$\alpha_{u,x}$	Differentielles Quell- und Schwindmaß, in 1/‰

Analoges gilt für die anderen Richtungen und Ebenen, siehe auch Abbildung 2-12.

Die Verwendung des Kurzzeichens σ sowohl für die Normal- als auch für die Schubspannungen basiert auf der Nomenklatur der benutzten Berechnungssoftware (ANSYS, Inc. 2013), siehe Abschnitt 5. Statt des griechischen Buchstabens σ kennzeichnet häufig der Buchstabe τ die Schubspannung.

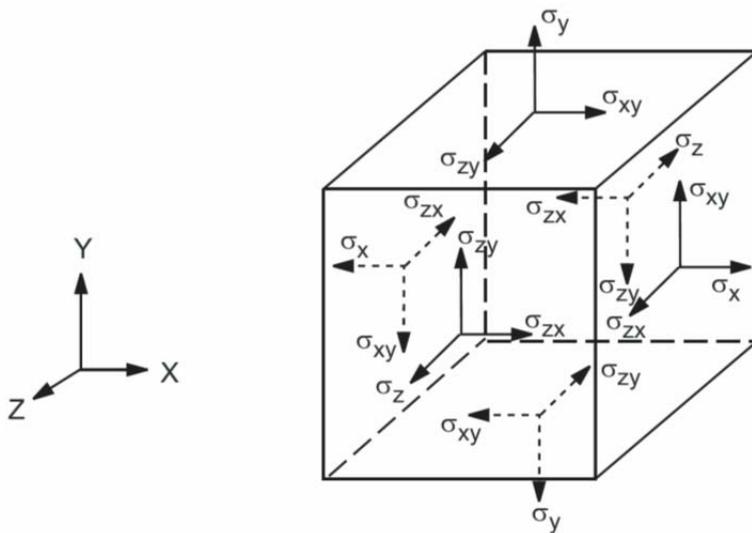


Abbildung 2-12: Definition der Spannungsvektoren (ANSYS, Inc. 2012).

Die Steifigkeitsmatrix D wird zur Beschreibung eines orthotropen Materials allgemein als symmetrisch angenommen. Somit gilt:

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x}; \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x}; \frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{yz}}{E_y} \quad (2-48)$$

Für die Dehnung, beispielsweise in x-Richtung, lässt sich aus den Gleichungen (2-39), (2-40), (2-41), (2-43) und (2-48) folgende Beziehung ermitteln, siehe auch (ANSYS, Inc. 2012):

$$\varepsilon_x = \alpha_{u,x}\Delta u + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy}\sigma_y}{E_x} - \frac{\nu_{xz}\sigma_z}{E_x} \quad (2-49)$$

Analoge Beziehungen gelten für ε_y und ε_z .

Für die Schubverzerrung, beispielsweise in xy-Ebene, gilt folgende Beziehung:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}} \quad (2-50)$$

Analoge Beziehungen gelten für ε_{yz} und ε_{xz} .

Daraus folgt für die Spannung σ_x und die Schubspannung σ_{xy} :

$$\begin{aligned} \sigma_x = \frac{E_x}{h} \left(1 - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_{u,x}\Delta u) + \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_{x,y}\Delta u) \\ + \frac{E_z}{h} \left(\nu_{xz} + \nu_{yz}\nu_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_z - \alpha_{u,z}\Delta u) \end{aligned} \quad (2-51)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy}\varepsilon_{xy} \quad (2-52)$$

hierin ist

$$h = 1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{xz} \frac{E_z}{E_x} \quad (2-53)$$

Analoge Beziehungen gelten für σ_y , σ_z , σ_{yz} , und σ_{xz} , siehe auch Abbildung 2-12.

Der räumliche Spannungszustand lässt sich mit einer Vergleichsspannung σ_V , der sogenannten von Mises Spannung, anhand eines skalaren Wertes darstellen:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} \left((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right)} \quad (2-54)$$

2.5.2 Kriechen, Relaxation und mechano-sorptives Verhalten des Holzes

Das Abbilden des Werkstoffs Holz mit einem rein linear-elastischen Materialmodell dient der vereinfachten Beschreibung mechanischer Zusammenhänge. Komplexere Materialgesetze sind für Spannungsberechnungen im Holzbau üblicherweise nicht notwendig. Die Annahme eines viskoelastischen Baustoffs kann die Realität allerdings dann besser wiedergeben, wenn die rheologischen Eigenschaften des Werkstoffs Holz sein Verformungsverhalten bestimmen. Unter diesen Umständen gelten für die Beziehung von Spannungen und Dehnungen Gesetzmäßigkeiten, die unter anderem von der Zeit und der Holzfeuchtigkeit abhängen. Ist eine mit der Zeit abnehmende, mechanische Spannung bei konstanter Dehnung zu beobachten, wird der Begriff Relaxation verwendet. Unter Kriechen versteht man eine mit der Zeit zunehmende Verformung unter einer konstanten Last, die sich aus reversiblen und irreversiblen Anteilen zusammensetzt.

Eine besondere, zeitabhängige Eigenschaft des Baustoffs Holz sind die auf Feuchtwechsel zurückführbaren Verformungen. Das sogenannte mechano-sorptive Verhalten des Holzes bewirkt bei Feuchteschwankungen ein stärkeres Kriechen als bei konstantem Klima. Hierbei haben vor allem die irreversiblen Verformungen einen großen Anteil an der Gesamtverformung eines Trägers (Leicester 1971).

In den von Toratti und Svensson (2000) sowie Svensson und Toratti (2002) beschriebenen Versuchen verursachen Feuchteschwankungen, dass der mechano-sorptive Anteil das Kriechen bestimmt. Ein erster Wechsel des Feuchtegehalts führt sowohl bei Feuchtezunahme als auch Feuchteabnahme zu einer Zunahme der Kriechdehnungen. Anschließend, bei mehrmaligen Feuchtwechseln, löst nur noch das Trocknen eine Zunahme, Feuchtezunahme hingegen eine Abnahme der Kriechdehnungen aus. Der Effekt von aufeinanderfolgenden Feuchtwechseln bewirkt insgesamt, dass die Kriechdehnungen zunehmen (Ranta-Maunus 1975). Ein Vernachlässigen des mechano-sorptiven Effekts kann bei einer Spannungsberechnung das Ermitteln zu hoher Werte bedeuten (Ranta-Maunus 2003).

2.5.3 Spannungen aufgrund von Feuchtwechseln in verklebten Holzlamellen

Feuchtwechsel führen zu einer Volumenänderung des hygroskopischen Werkstoffs Holz. Dabei treten schon aufgrund der Makro- und Mikrostruktur Zwangsspannungen auf. Bedingt durch die Anisotropie des Materials, makroskopisch an dem Jahrringverlauf sichtbar, verformt sich ein Stück Holz beim Quellen und Schwinden richtungsabhängig. So weist eine zunächst rechteckige Lamelle nach einer Änderung der Holzfeuchtigkeit einen gebogenen Querschnitt auf. Während des Trocknens beziehungsweise der Feuchtezunahme bildet sich innerhalb des Querschnitts ein Feuchtegradient aus. Infolge der örtlich unterschiedlichen Feuchtigkeit werden Quell- und Schwindverformungen durch angrenzende Stellen behindert, dabei entstehen Spannungen. Die feuchteinduzierten Spannungen nehmen zu, wenn zusätzlich Klebefugen eine Verformung der Lamellen behindern, siehe Abbildung 2-13. Quell- und Schwindkräfte können zu einer Überschreitung der Materialfestigkeit führen, sodass Risse entweder im Holz oder in der Klebefuge entstehen.

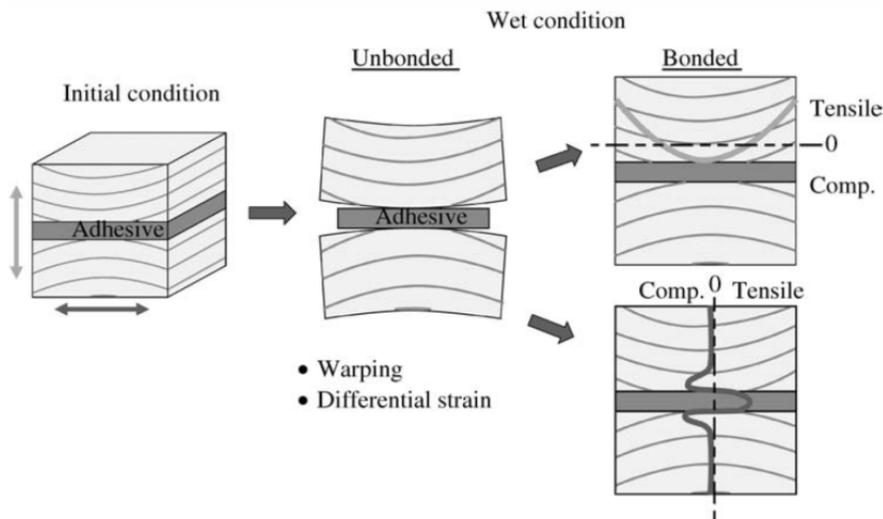


Abbildung 2-13: Unterschiede im Verformungsverhalten bei nicht verklebten und verklebten Holzlamellen durch Quellen und Darstellung von Spannungen parallel und senkrecht zur Klebefuge (Frihart 2009).

Im Regelfall berücksichtigt eine statische Berechnung feuchteinduzierte Spannungen, Relaxation und Kriechen nicht explizit. Stattdessen sorgen Beiwerte dafür, dass mögliche negative Einflüsse das Sicherheitsniveau nicht wesentlich abmindern. In der europäischen Normung zur Bemessung und Konstruktion von Holzbauten (DIN EN 1995-1-1; DIN EN 1995-1-1/NA) sind drei Nutzungsklassen und fünf Klassen der Lasteinwirkungsdauer definiert, die unterschiedliche Holzfeuchtebereiche und Zeiträume, in der eine Last wirkt, umfassen. Ein Bauteil ist gemäß geplanter Nutzung und Ausführung einer Klasse zuzuordnen. Mit den zugehörigen Modifikationsbeiwerten werden dann Materialparameter angepasst, sodass der Einfluss der Feuchtigkeit und der Lastdauer auf eine einfache, jedoch praktikable Art und Weise in eine Bemessung eingehen. Allerdings kann das Ansetzen der normativ festgelegten Beiwerte bei Querspannungen gegebenenfalls unzureichend sein, sodass eine Berechnung der feuchteinduzierten Spannungen in einer Baustatik den Autoren Jönsson und Thelandersson (2002) notwendig erscheint.

2.5.4 Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode

Feuchteinduzierte Spannungen bilden sich aufgrund zahlreicher Interaktionen und unter dem Einfluss vieler maßgeblicher Parameter aus. Das Modellieren der komplexen Vorgänge mit der Finite-Elemente-Methode stellt ein bewährtes Mittel dar, die Größenordnung und Form der auftretenden Beanspruchung zu berechnen. In den unterschiedlichen Untersuchungen der vergangenen Jahre standen verschiedene Aspekte im Vordergrund. Die Herangehensweise und die getroffenen Annahmen bei der Modellierung richteten sich dabei an der jeweiligen Aufgabenstellung aus.

Aicher und Dill-Langer (1996; 2005), Jönsson (2005) sowie Lasserre et al. (2000) weisen auf den merklichen Einfluss der Jahrringlage bei einer Simulation der Spannungen senkrecht zur Faserichtung hin. An einem Brettschichtholzquerschnitt untersuchen Aicher und Dill-Langer (1997) Querspannungen bei Feuchtwechseln mit der Finite-Elemente-Methode. Unter vereinfachter

Berücksichtigung der Rheologie des Holzes ergeben sich Maximalwerte der Querkzugspannungen in der Größenordnung von etwa zwei Drittel der charakteristischen Festigkeit des Holzes. Ein zu hohes Querkzugspannungsniveau aufgrund baupraktischer Feuchtigkeitsschwankungen stellen Zhou et al. (2010) bei gebogenen Brettschichtholzträgern fest. Fortino und Toratti (2010) ermitteln in Stabdübelverbindungen feuchteinduzierte Spannungen senkrecht zur Faser, die den charakteristischen Festigkeitswert ebenfalls überschritten haben.

Die Notwendigkeit zur Modellierung einer Klebefuge bei einer Finite-Elemente-Berechnung scheint im Wesentlichen von deren Dicke abhängig zu sein. Müller und Groth (2007) empfehlen bei geringen Schichtdicken, die Klebefuge zunächst zu vernachlässigen und bei der Ergebnisauswertung zu beurteilen, ob die Klebverbindung die auftretenden Kräfte aufnehmen kann. Lasserre et al. (2000) stellen in ihrem Finite-Elemente-Modell keinen wesentlichen Einfluss einer Klebefuge auf die auftretenden Spannungen bei verklebten Holzlamellen fest. Srpčič et al. (2009) untersuchen den Einfluss einer Klebstofffuge auf die Feuchtigkeitsverteilung im Holz, indem die beiden Extremfälle einer diffusionsoffenen und diffusionsdichten Schicht modelliert werden. Für den Querschnitt eines Balkens ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich der Feuchteverteilung und auftretender Spannungen. Des Weiteren merken Srpčič et al. (2009) kaum einen Einfluss des mechano-sorptiven Effekts auf die berechneten Verformungen. Ormarsson et al. (1999) zeigen hingegen mit der Simulation der Trocknung eines Brettes, dass die Verformungen von der akkuraten Annahme der Materialparametern, im Wesentlichen von dem Schwindmaß und dem mechano-sorptiven Effekt, abhängen. Häglund (2010) erwähnt im Zusammenhang mit einer durchgeführten Parameterstudie, dass bei der Berechnung von feuchteinduzierten Spannungen eine nur geringe numerische Änderung eines Eingangswertes zu einer großen Änderung des Spannungsniveaus führen kann. Das normale, zeitabhängige Kriechen wird in dem Modell nicht berücksichtigt, da es gegenüber dem mechano-sorptiven Kriechen vernachlässigbar sei.

Mirianon et al. (2008) stellen ein Finite-Elemente-Modell vor, das die Auswirkung von wechselnder Last und Feuchte auf Holz darstellt. Implementierte Subroutinen berücksichtigen die Feuchtebewegung im Holz und die Rheologie des Holzes. Eine solche Vorgehensweise wendet auch Gereke (2009) an, um den Einfluss von Feuchteänderungen auf Brettsperrholzplatten zu untersuchen, und betont auch die Bedeutung, sorgfältig ermittelte Materialdaten in der Simulation des mechano-sorptiven Verhaltens zu verwenden.

2.6 Verkleben von Holz

2.6.1 Geschichtlicher Rückblick

„Quaedam et inter se et cum aliis insociabilia glutino, sicut robur, nec fere cohaerent nisi similia natura, ut si quis lapidem lignumque coniungat.“ (Gaius Plinius Secundus)

Der oben zitierte Satz entstammt dem Buch „Naturalis Historiae“, das der römische Historiker und Schriftsteller Gaius Plinius Secundus etwa in dem Jahr 79 n. Chr. fertiggestellt hat. Übersetzt lautet die bemerkenswerte Feststellung, die auch heute noch für Klebstoffe und diverse Holzarten gilt: „Einige Hölzer lassen sich sowohl untereinander als auch mit anderen nicht verleimen, wie z. B. die Steineiche, und sie haftet fast nie aneinander, außer wenn sie von Natur aus ähnlich sind. Dies gilt auch für Stein und Holz“ (Brockmann et al. 2005). Die Verleimung von Holz war eine der ersten Anwendungen der Fügetechnik Kleben. Die Ägypter verwendeten bereits 1500 v. Chr. tierische Leime für Furnierarbeiten, wie eine Tafel Hautleim im Grab des Königs Tutanchamun bewiesen hat (Brockhaus Enzyklopädie online). Auch die ersten geklebten technischen Konstruktionen Anfang des letzten Jahrhunderts wurden mit schon lang bekannten Leimen hergestellt, die noch auf natürlichen Rohstoffen basierten. So verklebte die Firma Schütte-Lanz die Holzkonstruktion ihrer Luftschiffe mit Kaseinleim. Kaseinleime fanden bereits im Jahr 950 n. Chr. Erwähnung (Brockmann et al. 2005).

Einen maschinell hergestellten Kaseinleim verwendete auch Otto Hetzer für die Herstellung seiner verklebten Konstruktionen. Hetzer erhielt 1906 für seine Erfindung das Patent „Gebogener Holz-Bauteil für vereinigte Dach-Pfosten und -sparren“, das die Entwicklung des Ingenieurholzbaus entscheidend geprägt hat. Mit den sogenannten „Hetzer-Trägern“ entwickelte sich die industrielle Herstellung von Brettschichtholzkonstruktionen zu einem großen Erfolg. Die Herstellung der Bauteile erfolgte damals schon unter Beachtung sehr hoher Qualitätsmerkmale, wie Festigkeits-sortierung, gezielte Anordnung des Holzes, sorgfältig gehobelte Oberflächen und ausreichend lange Presszeit zur Vermeidung von Fehlverklebungen. Dennoch galt die Bauweise als sehr wirtschaftlich und konnte durch kurze Lieferfristen gegenüber anderen Baustoffen Vorteile bieten. Viele herausragende Bauwerke, die mit dem Namen Otto Hetzer und der nach ihm benannten Bauweise verbunden sind, wurden Anfang des 20. Jahrhunderts gebaut. Ein bekanntes Beispiel ist die Reichsbahnhalle mit einer Spannweite von 43 Metern, die 1910 bei der Weltausstellung in Brüssel zu sehen war (Rug 2006).

2.6.2 Bindungskräfte in Klebefugen

Gemäß DIN EN 923 ist ein Klebstoff ein nichtmetallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit besitzt. Die Wirkungsweise einer Klebeverbindung basiert also prinzipiell auf Kohäsions- und Adhäsionskräften. Kohäsion, „innere Festigkeit“, bezeichnet die Kräfte innerhalb eines Werkstoffes, sprich Klebefuge oder Füge-teil, die auf molekularen Anziehungskräften beruhen. Adhäsion, „Oberflächenhaftung“, beschreibt die Bindungskräfte zwischen einem Füge-teil und dem Klebstoff. Gegenüber Kohäsionskräften sind adhäsive Bindungen wesentlich komplexer und

es gibt bis heute keine universal anwendbare Theorie zur Beschreibung der Adhäsionsvorgänge. Zwei wesentliche Adhäsionsarten lassen sich jedoch unterscheiden: Spezifische Adhäsion, die auf chemischen, physikalischen und thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten mit einem Wirkungsbereich von 0,2 bis 1 nm beruht, und mechanische Adhäsion, die vorwiegend auf einer Verankerung der Klebschicht in der Oberfläche basiert (Habenicht 2009).

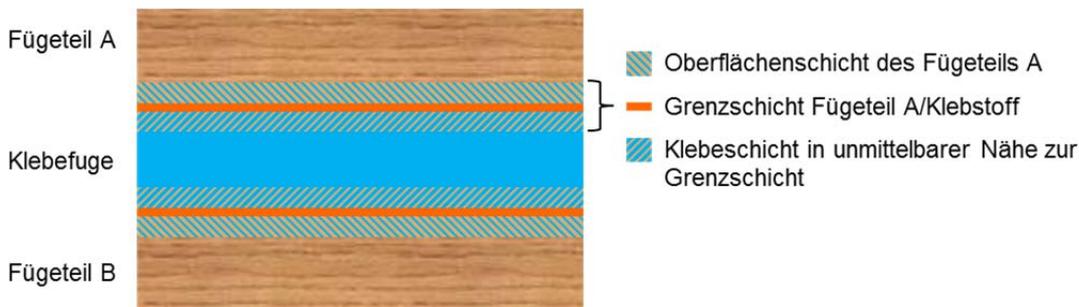


Abbildung 2-14: Schichten einer Holzklebeverbindung. Zeichnung nicht maßstäblich, Darstellung in Anlehnung an Marra (1992).

Grundsätzlich gilt für die Planung und Herstellung von Verbindungen, dass das Verbindungsmittel nicht das schwächste Glied in der Kette der miteinander verbundenen Bauteile beziehungsweise Materialien sein darf. Das bedeutet für verklebtes Holz, dass die Festigkeit der Klebefuge und der Grenzschichten größer als die Festigkeit des Holzes sein muss. Verschiedene Schichten sind an der Klebefugenfestigkeit beteiligt, siehe Abbildung 2-14. Die Mittelschicht ist die Klebschicht, in der die Kohäsionskräfte wirken. Die Adhäsionsmechanismen wirken in der Grenzschicht, die sich gemäß Modellvorstellung nochmals unterteilen lässt. In unmittelbarer Nähe zur Grenzschicht bilden sich zwei weitere Schichten aus, deren Struktur durch die gegenseitige Wechselwirkung mit dem Fügeteil und Klebstoff beeinflusst wird. Diese Schichten werden auch „weak boundary layer“ genannt, da hier oftmals ein Versagen der Klebeverbindung seinen Ursprung hat. Die Darstellung in Abbildung 2-14 ist nicht maßstäblich. Die Dicke der Klebefuge beträgt bei Brett-schichtholz etwa 0,1 mm, die Grenzschichtdicke liegt hingegen in der Größenordnung eines Nanometers. Diese geringen Schichtdicken sind auch ein Grund dafür, weshalb Adhäsionsvorgänge trotz moderner Technik bislang wissenschaftlich nicht abschließend beschreibbar und rechnerisch modellierbar sind. So bewerten Fachleute den Einfluss der mechanischen Adhäsion, also das Verzahnen des Klebstoffs mit dem Fügeteil, in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit unterschiedlich. Bei Metallverklebungen wird der mechanischen Adhäsion kaum Bedeutung beigemessen, bei porösen Werkstoffen wie Holz bleibt der Einfluss jedoch unklar.

Generell besitzen Klebstoffe andere mechanische Kennwerte und weisen ein anderes Quell- und Schwindverhalten als Holz auf, sodass eine Klebefuge die Formänderung eines Holzbauteils behindert. Hinsichtlich der Ausbildung von Spannungen im Holz lassen sich Klebstoffe in zwei Gruppen unterteilen, siehe Abbildung 2-15, die auf ihrer chemischen Vernetzung und Struktur basieren (Frihart und Wescott 2008; Frihart 2009): Die eine Klebstoffgruppe ist starr und spröde, hierzu gehören PRF- (Phenol-Resorzin-Formaldehyd) und MUF-Klebstoffe. Diese wenig flexiblen Klebstoffe haben lediglich eine eingeschränkte Möglichkeit, sich gemeinsam mit dem Holz auszu-

dehnen oder zu schrumpfen. Die andere Klebstoffgruppe, hierzu zählen PUR- und EPI-Klebstoffe, ist deutlich flexibler. Um Spannungen, beispielsweise infolge Quellen und Schwinden, aufzunehmen und ihre Dauerhaftigkeit in Test und Gebrauch zu beweisen, ist für die erstgenannte Gruppe die Fähigkeit, in das Holz und die Zellen einzudringen, von ausschlaggebender Bedeutung, siehe Abbildung 2-16. Durch das Eindringen werden die Holzzellen am Quellen und Schwinden gehindert, die Holzoberfläche in unmittelbarer Nähe zur Klebefuge wird dadurch stabilisiert. Die entstehende Spannung nimmt zu einem großen Teil das Holz auf. Die Spannungsverteilung erfolgt somit im Holz und nicht in der Klebefuge. PUR- und EPI-Klebstoffe können zwar ebenfalls in das Holz eindringen, besitzen aber nicht die Möglichkeit, die Zellwände zu stabilisieren. Die maximalen Spannungen und Dehnungen müssen innerhalb der flexiblen Klebstoffschicht aufgenommen werden.

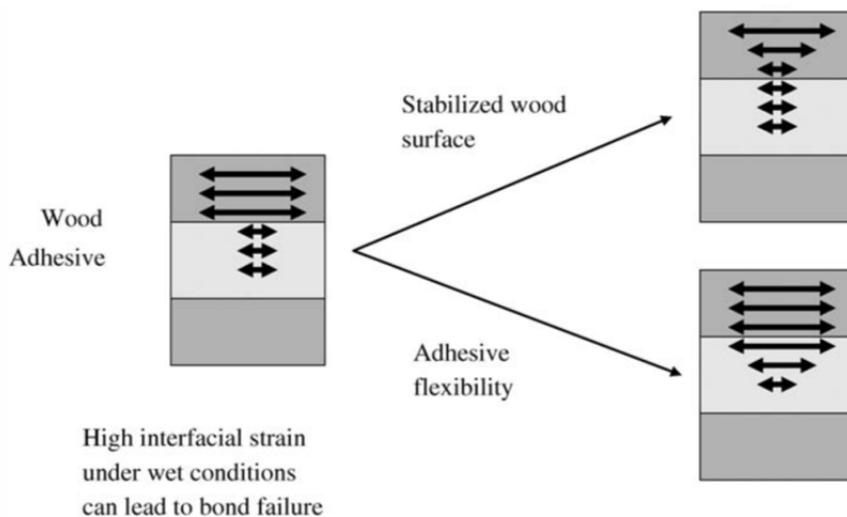


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung der Spannungsverteilung – im Holz bei Stabilisierung der Holzoberfläche durch den Klebstoff oder in der Klebstofffuge bei Vorhandensein eines flexiblen Klebstoffs (Frihart 2009).

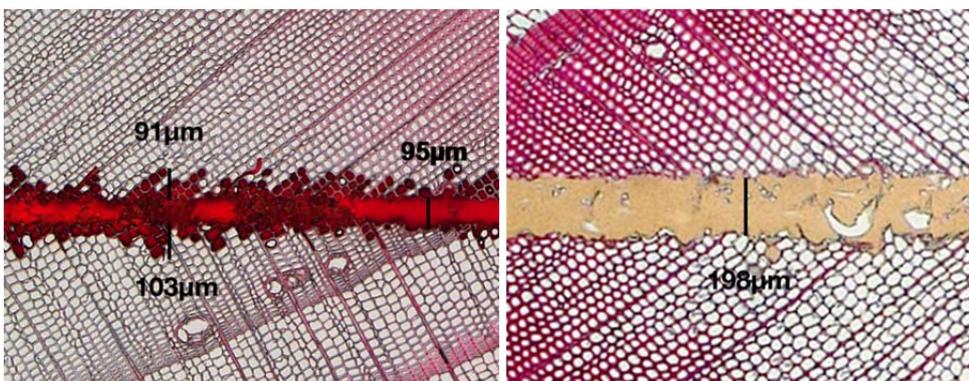


Abbildung 2-16: Mikroskopische Aufnahme einer Fichtenholzverklebung mit einem PRF-Klebstoff, links, und einem PUR-Klebstoff, rechts (Jiang et al. 2014).

Neben dem Klebstoff beeinflussen verschiedene Holzeigenschaften die Dauerhaftigkeit einer verklebten Verbindung. Frihart et al. (2008) benennen drei Hauptaspekte: Interaktion des Holzes mit dem flüssigen Klebstoff, Dimensionsstabilität und Festigkeit des Holzes. So kann beispielsweise eine Holzart geringer Festigkeit weniger Kraft auf eine Klebstoffuge übertragen als eine Holzart hoher Festigkeit.

2.6.3 Verschiedene Aspekte der Holzverklebung

Es gibt zahlreiche Gründe, Holzlamellen miteinander zu verkleben. Zum Beispiel Brettschichtholz: Das verklebte Produkt besteht aus festigkeitssortierten und homogenisierten Lamellen, dadurch erhöhen sich Qualität und die ansetzbaren Festigkeitseigenschaften. Hochwertiges Material lässt sich an den Stellen anordnen, wo die höchsten Beanspruchungen auftreten, schwächeres Holz dazwischen. Des Weiteren kann die Bauteilform der Beanspruchung angepasst werden. Und vor allem sind ohne Weiteres Querschnittsabmessungen und Bauteillängen möglich, die deutlich größer als die eines Baumstammes, der Rohstoffquelle, sind.

Damit ein verklebtes Produkt dauerhaft eine hohe Qualität aufweist, müssen die Güte und Unversehrtheit der Klebefuge über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet sein. Allerdings stellt das Verkleben von Holz keine problemlose Füge-technik dar, die Anwendung erfordert Erfahrung und technisches Wissen. Viele Ursachen können zu einer mangelhaften Verbindung führen, und das Erkennen dieser Ursachen ist oftmals nicht leicht. Auf den Werkstoff Holz bezogen nennt Frihart (2009) drei wesentliche Gründe dafür: Die Komplexität der Holzstruktur und die Verschiedenartigkeit der Holzoberflächen innerhalb und zwischen den Holzarten; die Zusammensetzung des Holzes aus drei verschiedenen Polymeren, Cellulose, Hemicellulose und Lignin, und zusätzlichen Extraktstoffen; das Eindringen des Klebstoffs in die Lumen des Holzes.

Für das technische Verkleben von Fichtenholz existieren seit über einem Jahrhundert empirische Erfahrungswerte. Um aber verklebte Produkte auch aus anderen Holzarten sicher herstellen zu können, ist eine vertiefte Kenntnis über Mechanismen und Interaktionen beim Verkleben erforderlich. Daher untersuchten beispielsweise Jiang et al. (2014) in einem Forschungsprojekt die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Klebstoffen und Holzarten mit besonderem Augenmerk auf den Einfluss des pH-Wertes, der Extraktstoffe und der Oberflächenbeschaffenheit des Holzes.

2.6.4 Technische Regeln und Prüfverfahren für Klebstoffe im tragenden Holzbau

Ein Bauprodukt benötigt in Deutschland einen Nachweis seiner Verwendbarkeit. Die Herstellung von Brettschichtholz, Balkenschichtholz und Verbundbauteilen regelt unter anderem die DIN EN 14080. Die Normen, die Klebstoffe für tragende Holzbauteile klassifizieren und Leistungsanforderungen enthalten, lauten: DIN EN 301 für Klebstoffe auf Phenoplast- und Aminoplastbasis, DIN EN 15425 für Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe und DIN EN 16254 für Emulsionspolymerisiertes Isocyanat. Anerkannte Prüfstellen führen verschiedene Prüfverfahren, je nach Klebstofffamilie beispielsweise der Normenreihen DIN EN 302 oder EN 15416, durch, um die Eignung des Klebstoffs und die Einhaltung der Leistungsanforderungen festzustellen.

Einen besonderen Stellenwert hat die Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2 erlangt, die oftmals eine unüberwindbare Hürde für Klebstoffsysteme und diverse Klebstoff-Holzart-Kombinationen bei einem Verwendbarkeitsnachweis darstellt. Die praktische Bedeutung des Prüfverfahrens zeigt sich in seiner Anwendung bei der werkseigenen Produktionskontrolle. Die Durchführung der Prüfung erfolgt dabei beispielsweise nach DIN EN 14080, Anhang C, mit einem Verfahren, das analog zur DIN EN 302-2 abläuft.

Eine Delaminierungsprüfung besteht aus Nass-Trocken-Zyklen, bei denen Prüfkörper zunächst unter Druck bis zur Wassersättigung bewässert und anschließend bei Luftzirkulation und hoher Temperatur getrocknet werden. Durch das Quellen und Schwinden findet eine Schädigung des Prüfkörpers statt. Nach Ende der Prüfungszeit wird die Delaminierung der Klebstoffugen ermittelt. Unter Delaminierung versteht man gemäß DIN EN 923 die Trennung von Schichten in einem Schichtstoff. Die Delaminierung eines Prüfkörpers ist also das Ergebnis eines Versagens in der Klebschicht, entweder im Klebstoff selbst oder an der Grenzfläche zum Füge teil.

Für die Herstellung von Brettschichtholz wird üblicherweise die Holzart Fichte verwendet. Falls Laubholz oder auch andere Nadelhölzer für ein verklebtes Bauteil vorgesehen sind, stellt das Prüfverfahren nach DIN EN 302-2 die einzige zusätzlich zu bestehende Anforderung an eine Klebstoff-Holzart-Kombination dar. Nur hinsichtlich der zu erfüllenden Leistungsanforderungen gibt es seit Ausgabe 2013 der DIN EN 301 eine Differenzierung, die holzartenspezifische Eigenschaften berücksichtigt. So wurde mit der aktuellen Ausgabe für bestimmte Gattungen der Holzart Eiche eine Erhöhung der maximal möglichen Delaminierung eingeführt. In der entsprechenden amerikanischen Prüfnorm ASTM D2559 gelten für Laubhölzer generell niedrigere Anforderungen an den Höchstprozentsatz der Delaminierung als für Nadelhölzer.

Ein Delaminierungstest simuliert extreme Feuchteschwankungen in kurzer Zeit. Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts weisen Truax und Selbo (1948) auf die Notwendigkeit hin, einen Kurzzeittest zur Beurteilung der Langlebigkeit einer Klebeverbindung zu entwickeln. Trotz erfolgreich bestandener Scherversuche mit hohen Festigkeitswerten führt eine Wetterbeanspruchung bei den untersuchten Hölzern zu einer deutlichen Schädigung der Klebefugen. Daher wurden Prüfkörper nun einer Bewässerung mit anschließender Trocknung unterzogen und mit Langzeitversuchen verglichen. Bei den immerhin noch 21 Tage andauernden Kurzzeitversuchen lässt sich als genereller Trend beobachten, dass eine hohe Delaminierung der Klebfugen in dem Bewässerungs-Trocknungs-Zyklus mit einer hohen Delaminierung bei freier Bewitterung einhergeht. Die Daten geben jedoch auch damals schon Anlass zur Annahme, dass zwischen verschiedenen Holzarten unterschiedliche Zusammenhänge bestehen. Die von Truax und Selbo (1948) vorgestellten Bewässerungs-Trocknungs-Versuche können als Vorläufer der heutigen Delaminierungstests gelten. Allerdings wird bei der heutigen Versuchsdurchführung in einem extremeren Trocknungsklima bei einer wesentlich kürzeren Trocknungszeit geprüft.

Die Vorgehensweise, durch Kurzzeittests ein Langzeitverhalten abzubilden, bestätigen auch Versuche von Ranta-Maunus (2003). Bei gekrümmten Holzträgern unter konstanter Last und wechselnder Luftfeuchtigkeit ließ sich feststellen, dass ein Versagen vor allem von der Größe der

feuchteinduzierten Spannungen abhängig war und nicht von der Anzahl der Feuchtwechsel oder der Lasteinwirkungsdauer.

Frihart et al. (2008) haben verschiedene Holzarten unter anderem in Delaminierungsversuchen geprüft. Anschließend hinterfragen die Autoren kritisch, ob die extremen Spannungen, die in einem einzelnen oder wenigen Nass-Trocken-Zyklen eines Kurzeittests entstehen, die Beanspruchung bei langsamer ablaufenden Feuchtwechseln während der Nutzungsdauer repräsentieren. Letztendlich ist das Fazit, dass der bestehende Konsens, konservative Beurteilungskriterien für Tragstrukturen zu verwenden, dazu führen kann, dass Klebstoffe, die im Gebrauch gut funktionieren würden, nicht verwendet werden dürfen.

Eine neue Vorgehensweise zur Klassifizierung von Klebstoffen für Holz in tragenden Anwendungen schlagen Pizzo et al. (2003) vor. Die vorgestellte Bewertungsmethode kombiniert die Ergebnisse von absolvierten Scherversuchen und Delaminierungstests zu einem Vergleichswert, der in Abhängigkeit von der vorgesehenen Nutzungsklasse einen Grenzwert unterbieten muss.

2.6.5 Dauerhaftigkeit von verklebten Holzkonstruktionen

Schäden treten in Holzkonstruktionen häufig dann auf, wenn die Bauteile während ihrer Nutzung starken Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt sind. Planmäßig sollten Lamellen in etwa mit einer Holzfeuchtigkeit verklebt werden, die sich später auch im Gebrauch einstellt. Bei üblicher Nutzung kann die Holzfeuchte im Innenbereich im Sommer auf etwa 14 % steigen und im Winter auf etwa 5 % sinken. Die Schwankungen gegenüber dem Einbauzustand sollte dabei nicht mehr als etwa ± 5 % Holzfeuchtigkeit im Laufe eines Jahres betragen (Keylwerth 1968). Werner und Steck (1991) empfehlen eine Einbaufeuchte für Brettschichtholz von 8 % bis 9 % bei geheizten, geschlossenen Bauwerke und 12 % bis 14 % für der Witterung ausgesetzte Bauteile. Risse im Holz oder in der Klebefuge deuten allerdings darauf hin, dass oftmals ungenügend geschützte Bauteile einer deutlich höheren Feuchtigkeit nach Verlassen des Werkes ausgesetzt sind. Mit Inbetriebnahme eines Objektes kann dann ein Trocknen zu einer merklichen Schädigung der verklebten Holzelemente führen.

Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit eines Bauwerks fordert DIN EN 1990 das Tragwerk so zu bemessen, dass zeitabhängige Veränderungen das Verhalten des Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer nicht unvorhergesehen beeinflussen. Darüber hinaus verlangt DIN EN 301, dass die Festigkeit und Unversehrtheit der Klebung während der Lebensdauer eines Bauteils erhalten bleibt.

Die natürliche Dauerhaftigkeit, die nach DIN EN 350-1 als die dem Holz eigene Widerstandsfähigkeit gegen einen Angriff durch holzerstörende Organismen definiert ist, hat bei normal trockenem Bauholz keine Relevanz. Erst bei Holzfeuchten, die im Bereich oder oberhalb des Fasersättigungspunktes liegen, besteht eine Gefahr durch holzerstörende Pilze. In Bauwerken sollte die Holzfeuchtigkeit daher immer deutlich unterhalb des Fasersättigungspunktes, möglichst unter 20 %, bleiben.

2.7 Optische Messsysteme

2.7.1 Grundsätzliches zur Photogrammetrie

Mitte des 19. Jahrhunderts, nur wenige Jahre nach Erfindung der Fotografie, entwickeln Laussedat in Frankreich und Meydenbauer in Deutschland etwa zeitgleich Methoden, um aus fotografischen Bildern die Lage und die Form von Objekten messen zu können (Luhmann 2003; Kraus 2004). Heute werden für photogrammetrische Aufgaben in der Regel digitale Kameras in Kombination mit spezieller Bildauswertesoftware eingesetzt. Das charakteristische Merkmal der Photogrammetrie ist dabei unverändert geblieben: Es wird nicht am Objekt selbst, sondern im Bild gemessen. Selbst Bewegungen des Aufnahmeegerätes sind daher nicht zwangsläufig problematisch, sodass bei der sogenannten Luftbildphotogrammetrie Messobjekte von Fluggeräten aus erfasst werden können.

In Hinblick auf eine Anwendung in der Industrie ist die sogenannte terrestrische oder digitale Nahbereichsphotogrammetrie von größerer Bedeutung. Für die Erfassung von Bauteilverformungen und Passgenauigkeiten, bei Crash-Tests und Online-Überwachung eines Prozesses in Echtzeit sowie bei der Objekt- und Gebäudevermessung haben sich photogrammetrische Messsysteme schon seit Langem etabliert. Einen Überblick über die Anwendungen und die Möglichkeiten digitaler Photogrammetrie in der Industrie beschreibt Luhmann (2010).

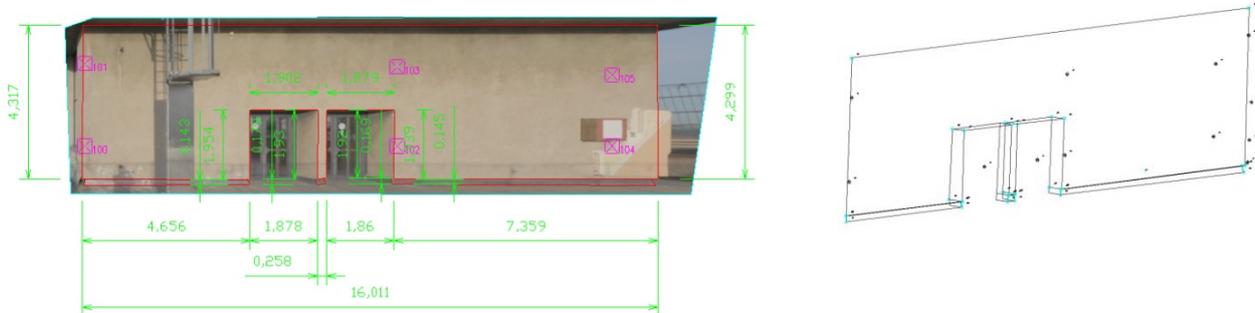


Abbildung 2-17: Entzerrtes und bemaßtes Foto einer Fassade, Einzelbild-Photogrammetrie links, Kantenmodell aus Mehrbildphotogrammetrie desselben Objekts rechts (Schaffrath et al. 2010).

Im Bauwesen können optische Messsysteme beispielsweise bei der Erfassung von Gebäudefassaden von großem Nutzen sein. Die Fassade, siehe Abbildung 2-17, wurde für die passgenaue Anfertigung von Fertigteilelementen im Rahmen eines Forschungsvorhabens photogrammetrisch aufgenommen und ausgewertet (Henke und Schaffrath 2010; Schaffrath et al. 2010). Die angewendete Nahbereichsphotogrammetrie lässt sich dabei in Einzelbildphotogrammetrie und Mehrbildphotogrammetrie unterteilen. Bei der Einzelbildphotogrammetrie wird ausschließlich in der Fassadenebene gemessen. Zu diesem Zweck wird das perspektivische Bild so umgewandelt, dass die zu betrachtende Ebene unverzerrt und maßstäblich erscheint. Bei der Mehrbildphotogrammetrie können aus mehreren Bildern desselben Objektes Raumkoordinaten errechnet werden.

Für Prüf- und Forschungszwecke im Bauwesen bietet sich der Einsatz von optischen Messsystemen an, wenn Informationen über flächenhafte oder dreidimensionale Verformungen gewünscht sind. Gegenüber anderen Systemen, wie beispielsweise induktive Wegaufnehmer oder Dehnmessstreifen, ermöglichen photogrammetrische Systeme ohne großen Mehraufwand das Erfassen einer nahezu beliebigen Anzahl von Messpunkten beziehungsweise ein flächenhaftes Messen. Dieser Vorteil erlangt unter anderem bei der Untersuchung maßgebender Bereiche, die aber erst zum Ende eines Versuches genau lokalisierbar sind, große Bedeutung. Beispiel hierfür ist die Auswertung von Rissen, Brüchen und anderen Versagensmechanismen. Ein weiterer Anwendungsbereich der berührungslosen Messmethode liegt in der Bestimmung von Materialparametern. Zudem lassen sich die Ergebnisse von optischen Messsystemen nutzen, um Finite-Elemente-Modelle zu kalibrieren beziehungsweise zu verifizieren. Die Verwendung von optischen Messbildern kann aber auch eine Finite-Elemente-Berechnung ersetzen. Das stellt insbesondere bei Materialien mit komplexen Werkstoffgesetzen eine praktische Alternative dar, um realistische Ergebnisse zu ermitteln.

2.7.2 Beschreibung eines optischen Messsystems

In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen mit dem optischen Messsystem Aramis, siehe Abbildung 2-18, der Firma Gom durchgeführt. Nachstehende Angaben zu der Funktionsweise und den Kennwerten des optischen Messsystems entstammen im Wesentlichen den zugehörigen Handbüchern (GOM mbH 2009a, 2009b). Die grundlegenden Prinzipien sind aber auch auf andere Systeme, die auf digitaler Bildkorrelation (digital image correlation, DIC) basieren und dreidimensionale Verformungen flächenhaft erfassen, übertragbar.



Abbildung 2-18: Aramis 5M Kamerasystem vor Kalibrierplatte.

Die wesentlichen Hardware- und Softwarekomponenten des Messsystems Aramis 5M sind der Sensor mit zwei Kameras, die LED-Probenbeleuchtung, das Sensor-Steuergerät und der Rechner mit der installierten Steuerungs- und Auswertesoftware. Die messbaren Objektgrößen liegen zwischen wenigen Millimetern und einem einstelligen Meterbereich bei einer Kameraauflösung von 2448 x 2050 Pixel. Der Dehnungsbereich beginnt bei 0,02 % und reicht bis weit über 100 %. Die Dehnungsgenauigkeit liegt gemäß Herstellerangabe bei bis zu 0,01 %.

Die Bildaufnahme erfolgt in vorgegebenen Zeitschritten oder nach manueller Auslösung und wird als sogenannte Laststufe der Messprobe mit „Stage“ bezeichnet. In den digitalen Kamerabildern erkennt das Messsystem die Oberflächenstruktur, die Grauwerte, eines Objektes. Ist die Oberflächenstruktur zu kontrastarm, kann durch das Aufbringen eines stochastischen Sprühmusters, auch Specklemuster genannt, die Oberflächengüte verbessert werden, siehe Abbildung 2-19. Durch einen Vergleich des Oberflächenmusters in den zeitlich versetzten Aufnahmen berechnet die Software die Verschiebung und Verformung flächenhaft. Mit der Verwendung eines Stereokamerasystems lassen sich die Koordinaten eines Messpunktes in den synchron aufgenommenen, linken und rechten Kamerabildern mit photogrammetrischen Methoden dreidimensional bestimmen. Bei der Berechnung unterteilt das Messsystem das Oberflächenmuster in eine Vielzahl von Bildausschnitten, den sogenannten Facetten, und ordnet den Bildpixeln Koordinaten zu. Jede gültige Facette stellt nach der Berechnung einen Messpunkt dar, siehe Abbildung 2-19.

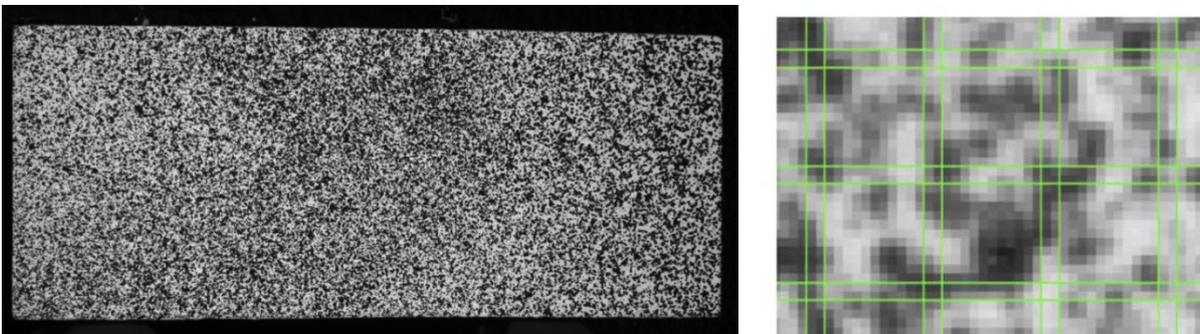


Abbildung 2-19: Mit Sprühtechnik aufgebrachttes Oberflächenmuster, links. 15 x 15 Pixelfacetten mit zwei Pixeln Randüberlappung, rechts (Quelle linkes Bild Autor, rechtes Bild GOM mbH 2009a).

Abbildung 2-20 zeigt ein Facettenpaar der linken und rechten Kamera in zwei Laststufen. „Stage 0“ stellt den nicht verformten Referenzzustand dar und „Stage 5“ einen verformten Zustand nach fünf Zeitschritten. Das verformte grüne Viereck ergibt sich aus dem Vergleich des Referenzmusters mit dem deformierten Muster. Über die Eckpunkte der Facetten werden aus dem linken und rechten Kamerabild die dreidimensionalen Koordinaten des Facetten-Mittelpunktes bestimmt. Nach sukzessiver Berechnung aller Stufen sind die Verschiebungen der erfassten Messpunkte zu den jeweiligen Zeitpunkten bekannt.

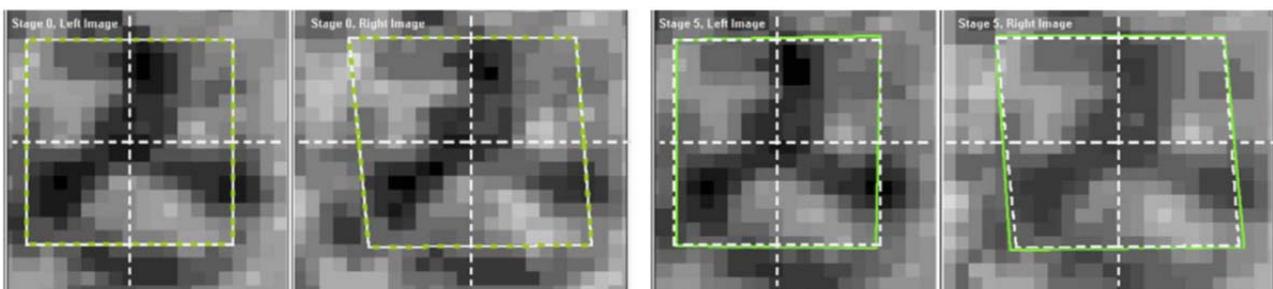


Abbildung 2-20: Facettenpaar des linken und rechten Kamerabildes. Das weiß gestrichelte Viereck visualisiert den nicht verformten Zustand, das grüne Viereck zeigt zunächst ebenfalls den Referenzzustand, links, und dann den verformten Zustand nach fünf Zeitschritten, rechts (GOM mbH 2009a).

Eine Bestimmung der relativen Verschiebungen der Punkte zueinander ermöglicht die Dehnungsberechnung. In Abbildung 2-21 wird für einen Messpunkt die Dehnungsberechnung schematisch dargestellt, die unter der Einbeziehung benachbarter Messpunkte stattfindet. Alle Messpunkte werden dabei aus den Facetten abgeleitet.

Mit dem anschließenden Auswerten der Messdaten beginnt das Postprocessing. Hierbei kann beispielsweise das Messrauschen noch reduziert oder eine Bewegungskorrektur durchgeführt werden. Die Messergebnisse sind auf unterschiedliche Art und Weise darstellbar, zum Beispiel flächig auf der Oberfläche, in Schnitten oder lokal an einzelnen Stellen, als statistische Auswertung und als Verformung oder Dehnung.

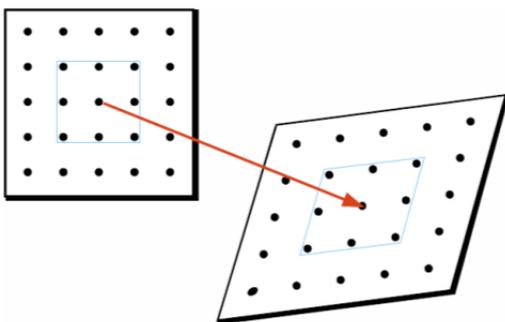


Abbildung 2-21: Schematische Darstellung einer Messprobe im Referenzzustand und im verformten Zustand. Die Dehnungsberechnung für einen Messpunkt, roter Pfeil, findet in Verbindung mit den umgebenden Messpunkten, blaues Viereck, statt (GOM mbH 2009a).

2.7.3 Verwendung optischer Messsysteme für Forschungszwecke im Holzbau

Die Nützlichkeit und Anwendbarkeit eines optischen Messsystems im Holzbau beweisen eine Vielzahl bereits erfolgreich durchgeführter Versuche. Die aufgeführte Literatur zeigt eine Auswahl von Beispielen zu einer ganzen Reihe von Fragestellungen. Hierbei führte die Anwendung der optischen Messmethode zu vielfältigen Erkenntnissen. Die Untersuchungen behandeln Problemstellungen der Technischen Mechanik, Versagensprozesse, Risse und Rissentwicklung, komplexe Lastzustände, Werkstoffeigenschaften, Holzverklebungen, Steifigkeitsverteilung sowie das Verformungs- und Tragverhalten des Holzes.

Enquist (2005) sowie Serrano und Enquist (2005; o. J.) analysieren mit dem Messsystem Aramis Zug- und Blockscherversuche und werten Ergebnisse aus, die sich als wertvoll für eine weitere Untersuchung mit der Finite-Elemente-Methode erweisen. Ebenfalls unter Anwendung des Messsystems Aramis und einer Auswertung mit der Finite-Elemente-Methode wurden Versuche zu stiftförmigen Verbindungsmitteln (Sjödín et al. 2006; Johansson und Sjödín 2010; Schoenmakers und Svensson 2011), zur Druckfestigkeit von Brettsperrholz (Serrano und Enquist 2010), Zugversuchen bei Hölzern mit Ästen (Oscarsson et al. 2010) und Scherversuche mit auf Holz aufgeklebten, carbonfaserverstärkten Kunststofflamellen (Vessby et al. 2010) durchgeführt. Untersuchungen zu feuchteinduzierten Verformungen und Dehnungen an Querschnitten eines Baumstammes beschreiben Larsen et al. (2010) sowie Larsen und Ormarsson (2013).

Keunecke et al. (2008) sowie Hering et al. (2012) verwenden ein Bildkorrelationssystem unter anderem zur Bestimmung von Materialkennwerten verschiedener Holzarten. Mit einem 2D-beziehungsweise 3D-Kamerasystem, jedoch punktuell aufgebrachten Messmarken, wurden Untersuchungen zu ausgeklinkten Trägern, Drei- und Vier-Punktbiegeträgern, Prüfkörpern mit Beanspruchungen in unterschiedlichen Winkeln zur Faser, Stabdübelverbindung und Schwalbenschwanzverbindung durchgeführt (Franke et al. 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; Schwark et al. 2004; Rautenstrauch et al. 2010).

Feuchteinduzierte Verformungen wurden punktuell am oberen und unteren Ende eines in Streifen geschnittenen Brettschichtholzquerschnitts gemessen und ausgewertet, um die inneren Dehnungs- und Spannungszustände eines Trägers aufgrund von Feuchtewechseln beurteilen zu können (Jönsson 2001; Jönsson und Svensson 2004; Jönsson 2004, 2005). Einen ähnlichen Versuchsaufbau verwenden Angst und Malo (2012), die für die Dehnungsmesser einen Videoextensometer, ebenfalls ein berührungslos arbeitendes, kamerabasiertes Messsystem, nutzen. Mittels Videoextensometer, jedoch unter Verwendung eines Specklemusters, untersuchen Niemz et al. (2007) den Einfluss der Klebstoffart und der Fugendicke flächenhaft bei Längszugscherversuchen.

Anhand von Anwendungsbeispielen aus dem Bereich des Holzes und der Holzwerkstoffe stellen Müller et al. (2005a) die Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) vor. ESPI ist eine berührungslose Messmethode, bei der ein Laserstrahl zur Deformationsmessung Anwendung findet. Müller et al. (2005b) visualisieren mit dieser Methode in Längszugscherversuchen und bei Deformationsmessungen die Unterschiede zweier verschiedener Klebstoffarten.

3 Versuche

3.1 Grundsätzliche Angaben zum Material und zur Methodik

3.1.1 Vorbemerkung

Feuchteinduzierte Spannungen und Verformungen entstehen im Holz aufgrund von Feuchte-transportvorgängen unterhalb des Fasersättigungspunktes. Im sogenannten hygroskopischen Feuchtebereich führen Feuchteschwankungen zu einer Volumenänderung des Holzes, dem Quellen und Schwinden. Diffusionsvorgänge prägen dabei den Feuchtetransport, siehe Abschnitt 2.4.1. Der hygroskopische Bereich ist baupraktisch besonders relevant. Unter anderem wegen der natürlichen Dauerhaftigkeit des Holzes sollte der Feuchtegehalt in einem Bauteil jederzeit deutlich unter dem Fasersättigungspunkt liegen, siehe Abschnitt 2.6.5.

Die Oberflächenemissions- und Diffusionskoeffizienten sind die maßgeblichen Materialparameter zur Beschreibung der Transportvorgänge unterhalb des Fasersättigungspunktes. Es gibt zahlreiche Untersuchungen, in denen die Koeffizienten in unterschiedlichen Klimata, mit verschiedenen Probengeometrien und unter Anwendung stationärer und instationärer Methoden ermittelt wurden, siehe Abschnitt 2.4.5. Die unterschiedlichen Randbedingungen und die Verwendung verschiedener Berechnungsansätze, mit und ohne Berücksichtigung eines Oberflächenemissionskoeffizienten, führen zu ungleichen Werten. Trotz der Vielzahl an Versuchen ist der von der Holzart abhängige Diffusionskoeffizient bislang nicht für alle Gattungen gleich gut dokumentiert. Versuchsreihen mit vergleichbaren Umgebungsbedingungen umfassen gewöhnlich nur eine oder eine geringe Anzahl an Holzarten. Die vorliegende Arbeit erfordert jedoch die Kenntnis der Feuchtetransportkoeffizienten von sechs ausgewählten Holzarten.

Die Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ dient der messtechnischen Erfassung der Feuchte-transportvorgänge innerhalb der Prüfkörperquerschnitte. Die Untersuchungen basieren auf einer instationären Versuchsmethodik, mit der die Feuchtegradienten in einem Bauteil und während einer Delaminierungsprüfung dargestellt werden können. Mit der gemessenen Holzfeuchtigkeit lassen sich die Feuchtetransportkoeffizienten rechnerisch bestimmen, siehe Abschnitt 4. Die Graphen und Messbilder der Versuchsreihe „optische Messungen“ visualisieren, bei gleichen Umgebungs- und Randbedingungen wie in der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“, die aus den holzartenspezifischen Transportvorgängen resultierenden, feuchteinduzierten Verformungen und Dehnungen.

3.1.2 Klimabedingungen

Die gewählten Klimabedingungen der Versuchsreihen „Sorption/Desorption“ und „optische Messungen“ basieren auf den in der Holzbaunorm DIN EN 1995-1-1 definierten Nutzungsklassen. Darüber hinaus bilden die Versuchsreihen die Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2 ab. Die simulierten Klimata ermöglichen somit den Vergleich der Prüfkörper im baupraktischen und im prüftechnischen Holzfeuchtebereich.

Gemäß der Definition in DIN EN 1995-1-1 ist die Nutzungsklasse 1 beziehungsweise 2 durch einen Feuchtegehalt des Holzes gekennzeichnet, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit entspricht, die nur für einige Wochen im Jahr einen Wert von 65 % beziehungsweise 85 % übersteigt. In einem solchen Klima stellt sich im Regelfall eine Holzfeuchtigkeit unter 12 % beziehungsweise unter 20 % ein. Nutzungsklasse 3 repräsentiert Klimabedingungen, die zu einer höheren Holzfeuchtigkeit führen. Tragwerke in Innenräumen sind der Nutzungsklasse 1 zuzuordnen. Durch ein Dach geschützte Tragwerke, die der Außenluft ausgesetzt sind, gehören der Nutzungsklasse 2 an. Der Witterung ungeschützt ausgesetzte Tragwerke werden der Nutzungsklasse 3 zugewiesen. In Tabelle 3-1 sind die Gleichgewichtsfeuchten wiedergegeben, die sich gewöhnlich in einer Holzkonstruktion nach einer gewissen Zeit in der jeweiligen Nutzungsklasse einstellen.

Tabelle 3-1: Gleichgewichtsfeuchten von Holzbaustoffen, in % (DIN EN 1995-1-1/NA).

Nutzungsklasse	1	2	3
Gleichgewichtsfeuchte	5 bis 15 ¹⁾	10 bis 20 ²⁾	12 bis 24 ³⁾
1) In den meisten Nadelhölzern wird in der Nutzungsklasse 1 eine mittlere Gleichgewichtsfeuchte von 12 % nicht überschritten. 2) In den meisten Nadelhölzern wird in der Nutzungsklasse 2 eine mittlere Gleichgewichtsfeuchte von 20 % nicht überschritten. 3) Die Nutzungsklasse 3 schließt auch Bauwerke ein, in denen sich höhere Gleichgewichtsfeuchten einstellen können			

Die Feuchtezunahme, Sorption, erfolgte bei den Prüfkörpern mit baupraktischem Bezug in Klimata, die der zuvor genannten Definition der Nutzungsklassen der DIN EN 1995-1-1 entsprachen. Die Wahl der Trocknungsbedingungen, Desorption, orientierte sich an ein warmes, trockenes Klima, das sich beispielsweise unterhalb des Daches eines wenig gedämmten, nicht klimatisierten Gebäudes im Sommer einstellen kann. Versuche von Meierhofer und Sell (1979b) zeigen, dass bei sommerlichen Temperaturen von maximal etwa 30 °C die Holztemperaturen in 10 Millimeter Tiefe 40 °C kaum überschreiten. Aufgrund der Strahlungseinwirkung liegen die Temperaturen im Holz zeitweise über der Lufttemperatur. Das in dieser Arbeit gewählte Trocknungsklima führt zu einer niedrigeren Holzfeuchtigkeit als das vorgegebene, künstliche Klima nach DIN EN 14080 für eine Langzeitbelastungsprüfung von querzugbeanspruchten Prüfkörpern, dem sogenannten „Glashaustest“.

Bei der Bewässerung analog zur Delaminierungsprüfung sind Prüfkörper unter Wasser abwechselnd hohem und niedrigem Druck ausgesetzt. Das Prozedere führt zu einer möglichst vollständigen Wassersättigung des Holzes. Anschließend trocknen die Hölzer gemäß dem Verfahren für den Klebstofftyp I bei hoher Temperatur.

Die vier gewählten Klimafolgen, bezeichnet mit K1, K2, K3 und KD, spiegeln also Klimabedingungen wider, die sich entweder an Nutzungsklassen von Bauwerken oder an die Delaminierungsprüfung anlehnen. Eine Klimafolge setzt sich aus einer Sorptions- und einer Desorptionsphase

zusammen. Nach mehrwöchiger Konditionierung der Hölzer im Normalklima 20/65 bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit wurde jeder Prüfkörper einer Klimafolge zugeteilt und in die vorgesehenen Klimabedingungen für die Feuchtezunahme überführt. Unmittelbar nach der Sorptionsphase begann die Trocknungsphase. Tabelle 3-2 fasst die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Klimafolgen zusammen. Tabelle 3-5 und Tabelle 3-6, siehe Abschnitt 3.2.1 und 3.3.1, geben spezifische Informationen zu den Klimata in den jeweiligen Versuchsreihen. Die Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“ umfasst nicht die Klimafolge K1, da das Klima zur Konditionierung auf die Ausgangsholzfeuchte im Normalklima dem Klima der Sorptionsphase glich. Eine zu messende Veränderung der Holzfeuchtigkeit entfiel daher. Die Verformungsmessungen fanden ausschließlich in der Trocknungsphase und daher bei Berücksichtigung der Klimafolge K1 statt.

Tabelle 3-2: Bezeichnungen der gewählten Klimafolgen und vergleichbare Klimabedingungen.

Bezeichnung Klimafolge	Klimabedingungen in Anlehnung an
K1	Nutzungsklasse 1, DIN EN 1995-1-1
K2	Nutzungsklasse 2, DIN EN 1995-1-1
K3	Nutzungsklasse 3, DIN EN 1995-1-1
KD	Delaminierungsprüfung – Verfahren bei hoher Temperatur für Klebstofftyp I, DIN EN 302-2

3.1.3 Geometrie und Vorbereitung der Prüfkörper

Die beiden Versuchsreihen „Sorptions/Desorption“ und „optische Messungen“ stimmen hinsichtlich der Vorbereitung, Herstellung und Geometrie der Prüfkörper prinzipiell überein. Jede Versuchsreihe beinhaltet zwei Serien, die die gewählten Klimafolgen und Prüfkörper aus sechs Holzarten jeweils umfassen. Der Aufbau der Prüfkörper der beiden Serien der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“ besteht ausschließlich aus einer Lamelle. Bei der Versuchsreihe „optische Messungen“ unterscheiden sich die Serien durch die Lamellenanzahl der Prüfkörper. Neben den zuvor erwähnten Prüfkörpern sind auch verklebte Prüfkörper mit einem Aufbau aus zwei Lamellen Gegenstand der Untersuchungen.

Die Prüfkörper einer Serie wurden aus demselben Brett der jeweiligen Holzart hergestellt. Bei der Wahl der Bretter und beim Zuschnitt der Prüfkörper wurde auf die Verwendung von nahezu astfreiem und geradfaserigem Material mit liegenden Jahrringen geachtet. Die Maße eines Prüfkörpers der Breite 150 mm, Dicke 30 mm und Länge 75 mm lehnen sich an die Endmaße einer Lamelle eines zugeschnittenen Prüfkörpers nach DIN EN 302-2 an. Die Höhe der verklebten Prüfkörper aus zwei Lamellen beträgt 60 mm, siehe Abbildung 3-1. Das Verkleben der Prüfkörper erfolgte gemäß den Herstellerangaben mit dem Klebstoffsystem Dynea Prefere 4040/5839, einem handelsüblichen PRF-Klebstoff. Die Wahl eines flexibel einsetzbaren Klebstoffsystems ermöglichte die Anwendung der gleichen Verklebungsparameter bei allen ausgesuchten Holzarten.

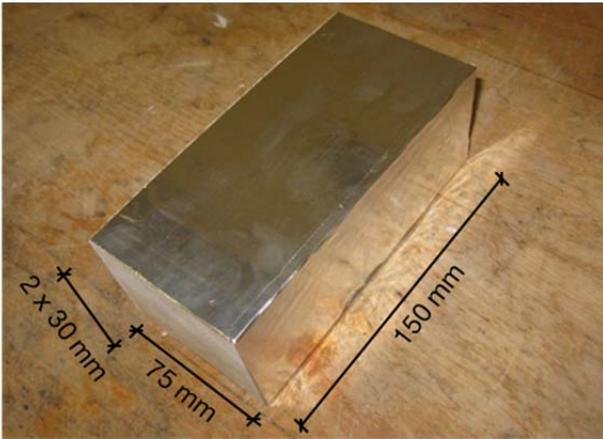


Abbildung 3-1: Abmessungen eines aus zwei Lamellen verklebten Prüfkörpers der Versuchsreihe „optische Messungen“. Oberflächen teilweise mit Aluminiumfolie abgeklebt.

Das Aufbringen einer selbstklebenden, diffusionssperrenden Aluminiumfolie, siehe Abbildung 3-1, bewirkte, dass der Feuchtigkeitstransport je nach simulierter Umgebungssituation entweder ausschließlich in transversaler oder hauptsächlich in longitudinaler Richtung erfolgte. In Anlehnung an einen Brettschichtholzträger in einem Bauwerk verlief der Diffusionsstrom bei den Prüfkörpern mit abgeklebten Ober-, Unter- und Stirnseiten nur zu den Schmalseiten hin. Zur Simulation der Feuchtetransportvorgänge während einer Delaminierungsprüfung wurden lediglich die Ober- und Unterseiten eines Prüfkörpers diffusionsdicht abgeklebt. Die maßgebliche Feuchtebewegung fand daher in Faserlängsrichtung statt.

3.1.4 Holzarten

In den Versuchsreihen „Sorption/Desorption“ und „optische Messungen“ wurden Untersuchungen mit sechs verschiedenen Holzarten, drei Nadelhölzer und drei Laubhölzer, durchgeführt.

Ausgewählt wurden Douglasie (DG, *Pseudotsuga menziesii*), Fichte (FI, *Picea abies*) und Lärche (LA, *Larix decidua*) als Nadelholzarten sowie Buche (BU, *Fagus sylvatica*), Eiche (EI, *Quercus robur*) und Esche (ES, *Fraxinus excelsior*) als Laubholzarten.

Die Fichte ist die Holzart, die am häufigsten im konstruktiven Holzbau verwendet wird. Der sogenannte „Brotbaum“ dient daher als Referenz. Die weiteren ausgewählten Holzarten besitzen verschiedene positive Eigenschaften, sodass Industrie und Forschung ein Interesse am vermehrten Einsatz im konstruktiven Bereich zeigen. Das Potenzial für diese Holzarten ergibt sich beispielsweise aus Wuchsleistung, künftiger Verfügbarkeit, natürlicher Dauerhaftigkeit und Festigkeit, siehe Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4.

Die Holzartenbeschreibung in Tabelle 3-3 gibt in Anlehnung an Grosser (2007) einen kurzen Überblick zu allgemeinen Eigenschaften wie Wuchshöhe, Stammdurchmesser und Vorkommen der Baumarten.

Tabelle 3-3: Beschreibung ausgesuchter Holzarten (Grosser 2007).

Holzart	Allgemeines
Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)	Hoher Baum, mit Höhen bis 30 m bei Stammdurchmessern von 1,0 bis 1,5 m; gelegentlich auch bis über 40 m hoch. Über weite Gebiete West-, Mittel- und Südeuropas bis zum Kaukasus verbreitet. Baum des atlantischen Klimas und die wirtschaftlich wichtigste einheimische Laubholzart.
Douglasie (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Sehr hoher Baum; in seiner Heimat 55 bis 75 m hoch werdend, Einzelstämme erreichen Höhen von 90 bis 100 m und Durchmesser bis 3 m und mehr. In Europa mit Höhen zwischen 30 und 40 m. Beheimatet in Nordamerika und kommt dort entlang der Pazifikküste von British Columbia bis Nordmexiko und ostwärts bis fast an die Prärie vor. 1827 von D. Douglas nach England eingeführt, in Deutschland erstmals 1879 bestandweise angebaut und heute zu einem wichtigen Forstbaum geworden. Hat neben Pappel die höchste Wuchsleistung und kann auf gleichem Standort die Wuchsleistung der Fichte um über 100 % übertreffen.
Eiche (<i>Quercus robur</i>)	Stattliche Bäume, mit Höhen von 20 bis 40 m bei Stammdurchmessern bis über 1 m, auf günstigen Standorten auch bis 50 und mehr Meter hoch und bis 2,0 m stark. Beide Arten, Stieleiche und Traubeneiche, sind über fast ganz Europa bis Kleinasien verbreitet, sie fehlen nur in Mittel- und Nordskandinavien sowie in Teilen Spaniens, wobei das Verbreitungsgebiet der Stieleiche sowohl nach Norden als auch nach Osten weiter reicht als das der Traubeneiche. Seit alter Zeit in Kultur und nach der Rotbuche forst- und holzwirtschaftlich die wichtigste einheimische Laubholzart.
Esche (<i>Fraxinus Excelsior</i>)	Großer Baum, mit Höhen bis 30 bis 40 m und Durchmessern um 1,0 m, mitunter auch bis 1,7 m stark. Über ganz Europa bis zum Kaukasus und Vorderasien verbreitet. Baum der Ebene und des niedrigen Berglandes. In Niederungen und Auewäldern stellenweise in größeren Horsten oder kleinen Beständen, häufiger Straßen- und Alleebaum. Seit langem und mit vielen Formen in Kultur.
Fichte (<i>Picea abies</i>)	Großer Baum, 30 bis 50 (selten bis 60) m hoch und maximal bis 1,5 m stark. Beheimatet in Nordeuropa und in den Gebirgen Mitteleuropas. Durch forstliche Kultur auch im übrigen Europa weit verbreitet.
Lärche (<i>Larix decidua</i>)	Sommergrüner Baum, einziger Nadelbaum, der regelmäßig im Spätherbst seine Nadeln abwirft, im Mittel 20 bis 40 m, zuweilen auch über 50 m hoch werdend, Stammdurchmesser bis etwa 1 m. Kommt natürlich nur in den Alpen, Karpaten, Sudeten und in Polen vor; durch Kultur jedoch über ganz Mittel- und Nordeuropa bis nach Schottland und Norwegen verbreitet.

Tabelle 3-4 fasst wesentliche physikalische und mechanische Kenngrößen sowie Angaben zur natürlichen Dauerhaftigkeit zusammen, die die Unterschiede zwischen den Gattungen verdeutlichen. Die Daten basieren auf den Angaben von Sell (1997).

Tabelle 3-4: Kenngrößen und Eigenschaften ausgesuchter Holzarten, Angaben nach (Sell 1997).

Holzname	Buche	Douglasie	Eiche	Esche	Fichte	Lärche
Botanischer Name	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Larix decidua</i>
Physikalische Kenngrößen						
Rohdichte r_0 (darr-trocken) in g/cm^3	0,64-0,72	0,47-0,53	0,60-0,70	0,64-0,70	0,40-0,43	0,50-0,58
Dimensions- und Formstabilität	gering	gut	mittel	mittel	gut	gut
Angleichgeschwindigkeit Holzfeuchte	mittel bis groß	groß	gering	gering bis mittel	groß	mittel bis groß
Mechanisch-technologische Kenngrößen						
E-Modul E_{II} in N/mm^2	12.300-16.400	11.000-13.200	10.500-14.500	11.900-13.900	10.000-12.000	10.600-14.500
Zugfestigkeit σ_{ZBII} in N/mm^2	100-135	82-105	88-110	130-160	80-90	92-110
Natürliche Dauerhaftigkeit						
Kernholz gegen Pilze	nicht dauerhaft	mäßig bis wenig dauerhaft	dauerhaft	nicht dauerhaft	wenig dauerhaft	mäßig bis wenig dauerhaft

Anmerkungen: E-Modul aus Biegeversuchen, Festigkeitswerte aus Prüfungen an fehlerfreien Kleinproben, Splintholz sollte grundsätzlich als nicht dauerhaft eingestuft werden.

3.2 Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“

3.2.1 Material und Methode

Die Untersuchungen der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“ beinhalteten zwei Serien mit je 18 Prüfkörpern, siehe Abbildung 3-2. Jede Serie umfasste drei Klimabedingungen und sechs Holzarten, vergleiche Abschnitte 3.1.2 und 3.1.4 sowie Tabelle 12-1 im Anhang 12.1. Die Kennzeichnung der Serien erfolgte mit den römischen Zahlen I und II. Die Vorbereitung der Prüfkörper und das Erfassen der Messwerte der Serie II fand zum Teil im Rahmen von zwei vom Verfasser betreuten Studienarbeiten (Rott 2012; Thomas 2012) statt. Die zweite Serie diente unter anderem auch zum Vergleich der Messdaten.

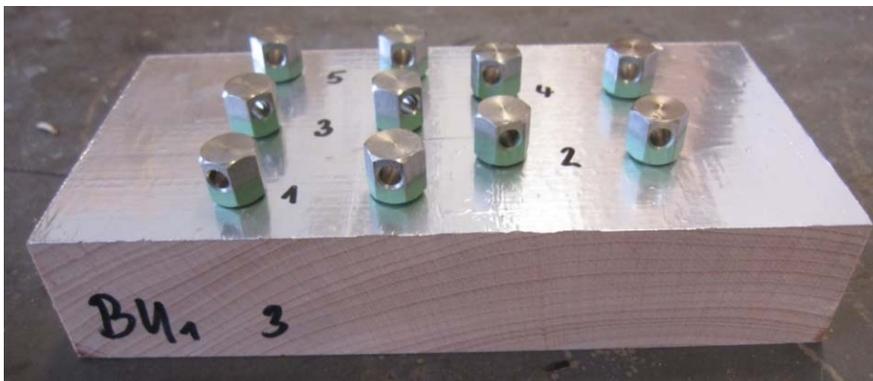


Abbildung 3-2: Prüfkörper der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“.

Die Rohdichte ρ_u der Hölzer, siehe Tabelle 12-2 im Anhang 12.1, wurde nach Lagerung im Normalklima 20/65 mittels Massewägung und Volumenbestimmung durch Ausmessen ermittelt. Die Umrechnung auf die Rohdichte ρ_0 bei 0 % beziehungsweise ρ_{12} bei 12 % Holzfeuchte erfolgte nach den Gleichungen (12-1) und (12-2), siehe Anhang 12.1. Eine Holzfeuchte von 12 % gilt für technische Vergleiche und statische Berechnungen als Normalfeuchtigkeit (Kollmann 1951).

Tabelle 3-5: Klimafolgen und Klimabedingungen der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“.

Bezeichnung Klimafolge	Klimabedingung „Sorptions“	Klimabedingung „Desorption“
K2	20 °C/85 %rF (20/85)	40 °C/12,5-30 %rF (40/12,5-30)
K3	20 °C/100 %rF (20/100)	40 °C/12,5-30 %rF (40/12,5-30)
KD	Wasserlagerung (H ₂ O)	65 °C/10-15 %rF (65/12,5)

Tabelle 3-5 gibt die Bezeichnungen der Klimafolgen und die zugehörigen Klimata für die Phase der Feuchtezunahme, Sorption, und die Trocknungsphase, Desorption, wieder. In Klammern stehen die Abkürzungen für die jeweilige Klimabedingung. Die Lagerung erfolgte bei den Klimafolgen K2 und K3 ohne beziehungsweise mit geringer Luftzirkulation, bei Klimafolge KD trockneten die Prüfkörper in dem nach DIN EN 302-2 vorgeschriebenen Luftstrom. Zur Kontrolle

des sich einstellenden Klimas wurden Datenlogger der Firma Testo genutzt. Angaben zu den gemessenen Klimadaten und verwendeten Versuchseinrichtungen befinden sich im Anhang 12.1, siehe Tabelle 12-3, Abbildung 12-1, Abbildung 12-2 und Abbildung 12-3.

Bei den Versuchen der Klimafolgen K2 und K3 lagerten die Prüfkörper je nach Serie zwischen 21 und 28 Wochen in der Klimabedingung „Sorptions“ und zwischen 5 und 6 Wochen in der Klimabedingung „Desorption“. Bei der Klimafolge KD dauerte die vollständige Bewässerung der Prüfkörper über mehr als zwei Stunden an, die anschließende Trocknungsdauer betrug je nach Serie zwischen 24 und 27 Stunden. Der Zeitabstand zwischen zwei Messungen betrug bei den Klimafolgen K2 und K3 maximal 8 Tage, mit anfangs deutlich kürzeren Intervallen. Die Anzahl der Holzfeuchtemessungen und die Dauer der Lagerung der Prüfkörper in dem jeweiligen Klima gibt Tabelle 12-4 im Anhang 12.1 wieder.



Abbildung 3-3: Delaminierungsanlage „ULWA-E“, Ulrich Lübbert Warenhandel GmbH & Co.KG, mit Trocknungskammer, links, und Druckkessel, rechts.

Die Wässerung der Prüfkörper der Klimafolge KD erfolgte gemäß DIN EN 302-2 in einem Druckkessel, siehe Abbildung 3-3, in einer Abfolge von Unter- und Überdruck. Während der anschließenden Trocknungsphase der Klimafolge KD wurden die Prüfkörper zum Messen der Holzfeuchte aus der Trocknungskammer genommen. Gegenüber einer Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2 verringerte sich dadurch die Trocknungsgeschwindigkeit. Des Weiteren wurde die Messung der Holzfeuchte bei Serie I über Nacht unterbrochen. Die aus der Trocknungskammer genommenen Prüfkörper lagerten in diesem Zeitraum luftdicht bei Raumtemperatur. Bei der Auswertung der Messdaten blieb die nächtliche Unterbrechung unberücksichtigt, sodass der angenommene Zeitabstand zwischen zwei Messungen bei beiden Serien der Klimafolge KD maximal drei Stunden betrug. Bei Serie II verlief die Trocknungsphase ohne nächtliche Unterbrechung.

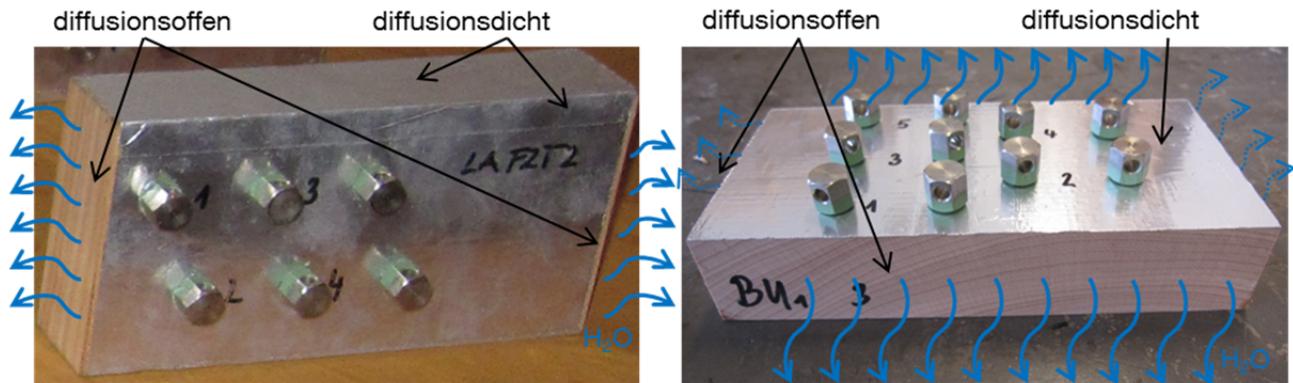


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des Diffusionsstroms. Präparierte Prüfkörper der Klimafolgen K2 und K3, links, und der Klimafolge KD, rechts.

Das Aufbringen einer selbstklebenden, diffusionsdichten Aluminiumfolie bewirkte eine Lenkung des Diffusionsstroms innerhalb der Prüfkörper, siehe Abbildung 3-4. Bei den Klimafolgen K2 und K3 sollte der Feuchtigkeitstransport in Analogie zu einem gewöhnlichen Brettschichtholzträger senkrecht zu den Schmalseiten erfolgen. Aufgrund der Verhältnisse der Breite zur Höhe und zur Länge verläuft die Diffusion in einem Holzbauteil über weite Bereiche eindimensional zu den Seitenflächen hin. Mit den diffusionsdichten Ober-, Unter- und Stirnseiten der Prüfkörper stellte sich die gewünschte Diffusionsrichtung ein. Die abgeklebten Flachseiten der Prüfkörper der Klimafolge KD verhinderten den Feuchtetransport in Dickenrichtung. Im Gegensatz zu den abgeklebten Prüfkörpern aus einer Lamelle besteht ein Delaminierungsprüfkörper nach DIN EN 302-2 aus sechs Lamellen. Aufgrund der Prüfkörpergeometrie und der vergleichsweise hohen Trocknungsgeschwindigkeit in Faserlängsrichtung erfolgt der maßgebliche Feuchtetransport bei einer Delaminierungsprüfung zu den Stirnseiten hin.

Zur Dokumentation der Feuchteänderung umfassten die über mehrere Wochen aufgenommenen Messdaten sowohl die Masse der Prüfkörper als auch die Holzfeuchtigkeit an verschiedenen Stellen des Querschnitts. Das Anordnen der Elektroden zum Messen der Holzfeuchte erforderte die Einhaltung sowohl eines Mindestrandabstandes als auch eines definierten Abstandes der einzelnen Elektroden zueinander. Vorgebohrte Löcher und Schablonen erleichterten das Einschlagen der Elektroden an den vorgesehenen Stellen. Insgesamt wurden bei den Probekörpern der parallel laufenden Klimafolgen K2 und K3 72 teflonisierte Elektroden gleichzeitig je Serie verbaut. Die Messpunkte befanden sich dabei nur auf einer Prüfkörperhälfte, siehe Abbildung 3-5. Die Annahme von prinzipiell spiegelgleichen Messergebnissen war Voraussetzung für die zeit- und materialsparende Vorgehensweise. Bei den Prüfkörpern der Versuchsreihe KD, siehe Abbildung 3-6, erfolgte die Anordnung der Messstellen in Faserlängsrichtung, die Annahme von spiegelbildlichen Messergebnissen war nicht notwendig.

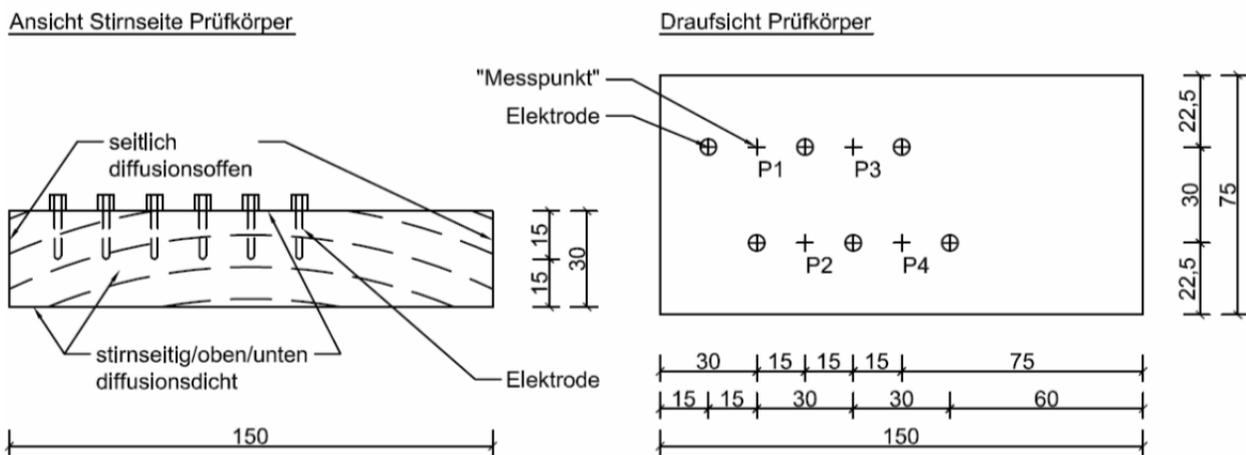


Abbildung 3-5: Skizze eines Prüfkörpers der Klimafolgen K2 und K3. Maße in mm.

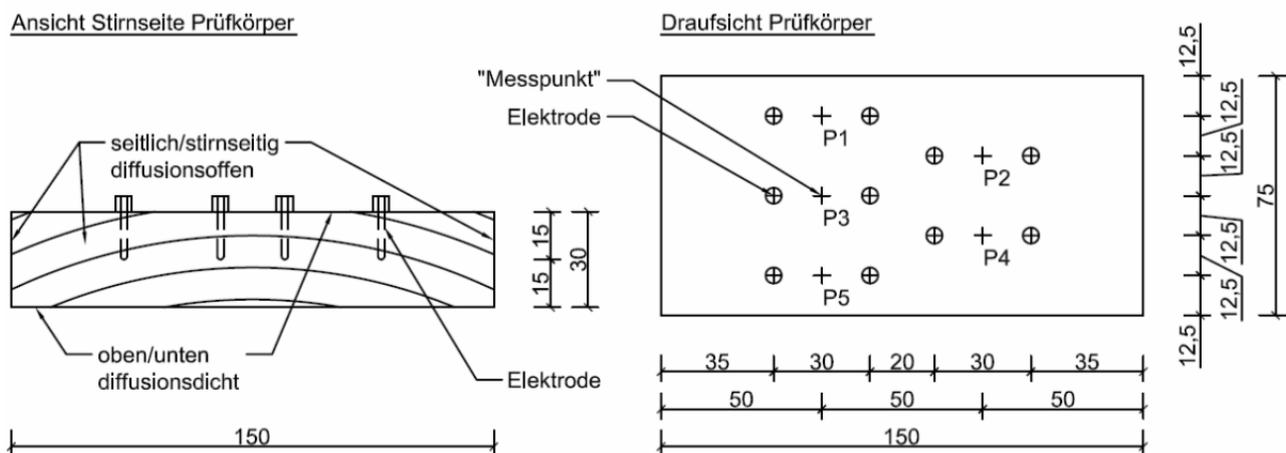


Abbildung 3-6: Skizze eines Prüfkörpers der Klimafolge KD. Maße in mm.

Die mittlere Holzfeuchte eines Prüfkörpers wurde mittels Massewägung nach der Darmmethode gemäß DIN EN 13183-1, siehe auch Gleichung (2-1), bestimmt. Die Ablesegenauigkeit der verwendeten Waage, Sartorius U4600, betrug 0,01 g. Das Ermitteln der Holzfeuchte an den durch die Einschlagelektroden vorgegebenen Stellen erfolgte mit elektrischen Holzfeuchtemessgeräten der Firma Gann und der Firma Greisinger. Zahlreiche Messungen wurden zu Kontroll- und Vergleichszwecken mit den Geräten beider Hersteller durchgeführt. Bei dem Holzfeuchtemessgerät Greisinger GMH 3850 ließ sich zum Zweck der Temperaturkompensation ein Thermoelement anschließen, sodass die zugehörigen Messwerte der Versuchsreihe K2 und K3 auf der auf ein Grad genau gemessenen Umgebungstemperatur basierten. Bei der Serie II der Versuchsreihe KD erfolgte die Temperaturmessung mittig im Probekörper. Hierzu wurde ein Thermoelement in ein zuvor gebohrtes Loch von geringem Durchmesser eingebracht. Bei dem Holzfeuchtemessgerät Gann Hydromette HT 95 digital ließ sich die Temperatur in Schritten von 5 °C einstellen.

Bei der elektronischen Widerstandmessung nimmt die Genauigkeit je nach Holzart, Rohdichte und Holztemperatur mit zunehmender Holzfeuchte ab. Die elektrische Leitfähigkeit von trockenem

Holz ist gering, mit zunehmender Feuchtigkeit nimmt die Leitfähigkeit zu und der elektrische Widerstand wird deutlich kleiner (Gann 2002). Gründe für ein ungenaues Messen können unter anderem in dem geringen elektrischen Widerstand bei hoher Holzfeuchtigkeit, in der Temperaturkompensation und in den Holzkennlinien liegen. Die Kontrolle der mit den Holzfeuchtemessgeräten ermittelten Werte erfolgte anhand eines Vergleichs mit der mittleren, nach der genauen Darmmethode bestimmten Holzfeuchte u_{darr} . Für jeden Messzeitpunkt wurden dazu die über den Prüfkörper verteilten Messwerte und eine nach Gleichung (3-1) zusätzlich berücksichtigte Oberflächenfeuchtigkeit mittels Gleichung (3-2) zu einem Mittelwert $u_{P,MW}$ zusammengefasst, siehe Abbildung 3-7.

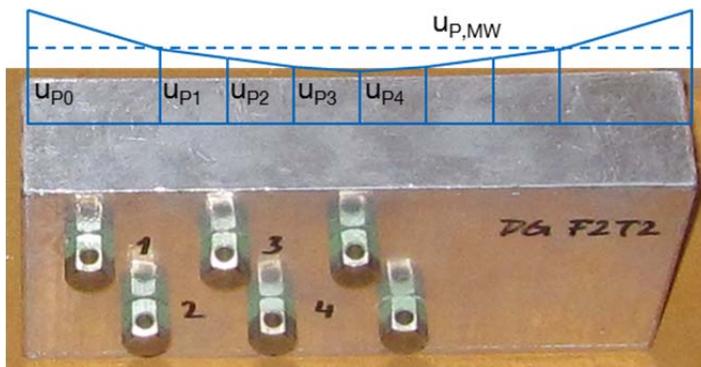


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Holzfeuchteverlaufs über den Querschnitt eines Prüfkörpers der Klimafolgen K2 und K3.

Unter der Annahme, dass der Holzfeuchteverlauf über den Querschnitt einer Parabelfunktion folgt, lässt sich die Holzfeuchte u_{P0} am Rand näherungsweise ermitteln. Für die Prüfkörper der Klimafolgen K2 und K3 gilt:

$$u_{P0} = \frac{u_{P1} - u_{P4}}{a_{P1}^2} \cdot a_{P0}^2 + u_{P4} \quad \begin{array}{l} u_{P1}, \quad x = \pm a_{P1} \\ u_{P4}, \quad x = a_{P4} = 0 \end{array} \quad (3-1)$$

mit

- u_{P0} Holzfeuchtigkeit an der Stelle $x = a_{P0}$, in %; Holzfeuchtigkeit am Rand
- u_{P1} Holzfeuchtigkeit an der Stelle $x = a_{P1}$, in %; Holzfeuchtigkeit Messstelle P1
- u_{P4} Holzfeuchtigkeit an der Stelle $x = a_{P4} = 0$, Körpermitte, in %; Holzfeuchtigkeit Messstelle P4

Bei Verwendung der Gleichung (3-1) für die Prüfkörper der Klimafolge KD ist u_{P4} durch u_{P3} zu ersetzen. Bei Anwendung auf Messwerte der Klimafolge KD führte Gleichung (3-1) teilweise zu kleineren Randwerte u_{P0} als der angenommene Wert für die Ausgleichsfeuchtigkeit. Ab diesem

Messzeitpunkt wurde die Ausgleichsfeuchte nach Popper und Niemz (2009) für den Randwert u_{P0} eingesetzt.

Die mittlere Holzfeuchte $u_{P,MW}$, bestimmt aus den Messwerten u_{P1} bis u_{P4} und der berechneten Holzfeuchtigkeit u_{P0} am Rand, ergibt sich für die Prüfkörper der Klimafolgen K2 und K3 aus nachstehender Gleichung:

$$u_{P,MW} = \frac{\frac{(u_{P0} + u_{P1})}{2}(a_{P0} - a_{P1}) + \dots + \frac{(u_{P3} + u_{P4})}{2}(a_{P3} - a_{P4})}{a_{P0}} \quad (3-2)$$

Analoges gilt für die Prüfkörper der Klimafolge KD.

Die Differenz zwischen dem Mittelwert der Holzfeuchte $u_{P,MW}$ und der mittleren Holzfeuchte u_{darr} wies an verschiedenen Messzeitpunkten auf erhebliche Messungenauigkeiten hin. Daher erfolgte eine Korrektur der Rohmessdaten. Für jeden Messzeitpunkt wurde ein entsprechender Korrekturwert u_{korr} aus der Differenz der mittleren Holzfeuchte $u_{P,MW}$ der Messwerte und der Holzfeuchte u_{darr} ermittelt. Der Korrekturwert u_{korr} wurde zu der gemessenen Holzfeuchte eines jeden Messpunktes addiert, sodass anschließend der gewichtete Mittelwert $u_{P,MW}$ mit der mittleren Holzfeuchte u_{darr} übereinstimmte.

$$u_{korr} = u_{darr} - u_{P,MW} \quad (3-3)$$

mit

u_{korr}	Korrekturwert, in %
u_{darr}	mittlere Holzfeuchtigkeit nach der Darmmethode bestimmt, in %
$u_{P,MW}$	gewichteter Mittelwert der Holzfeuchtigkeit an den Messstellen und am Rand, in %

Mit der Anpassung der Messwerte ließ sich die Holzfeuchtigkeit an den Messstellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und bei verschiedenen Holzarten vergleichen und auswerten. Fehler, die bei der elektrischen Widerstandsmessung auftraten, wurden zu einem gewissen Teil rechnerisch gemindert. Grundlage für die Vorgehensweise war die vereinfachende Annahme, dass die Differenz der Holzfeuchte zwischen den einzelnen Messpunkten zu einem Messzeitpunkt prinzipiell richtig ermittelt wurde.

3.2.2 Versuchsergebnisse

Die mit den verschiedenen Holzfeuchtemessgeräten zum gleichen Zeitpunkt ermittelten Werte unterschieden sich zum Teil deutlich. Beispielhaft sind in Abbildung 3-8 zwei Holzfeuchteverläufe derselben Messstelle dargestellt. Bei Klimafolge KD erfolgte die Messung mit beiden Messgeräten stichprobenartig. Als Ausreißer wurde an einem Messpunkt eine maximale Differenz von etwa 30 % Holzfeuchte ermittelt. Dazu fiel im Vergleich bei den Klimafolgen K2 und K3 die maximale Abweichung merklich geringer aus.

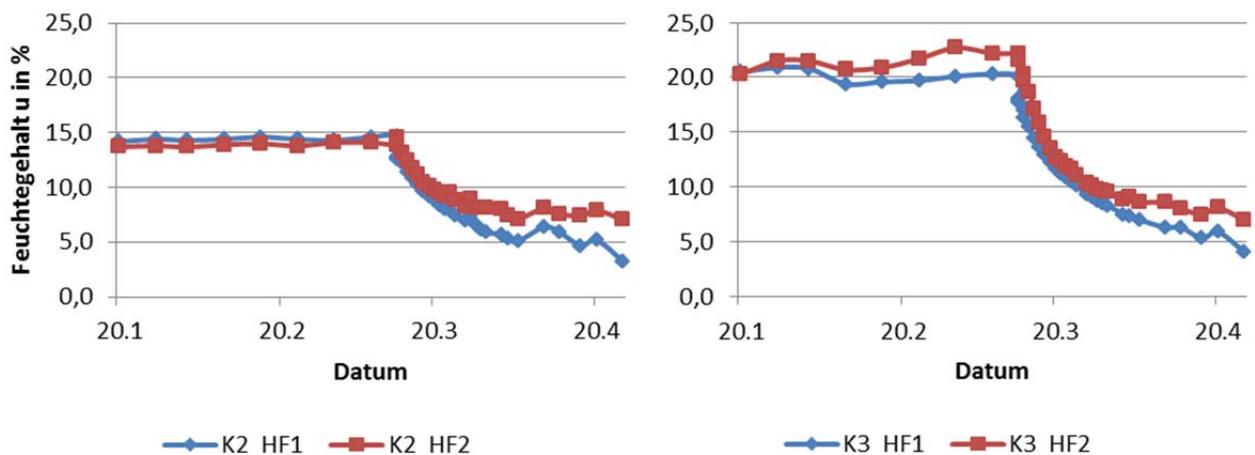


Abbildung 3-8: Mit Messgeräten von zwei Herstellern, HF1/2, am Messpunkt P1 ermittelte Holzfeuchte u_{P1} zu verschiedenen Zeitpunkten. Klimafolge K2, links, und K3, rechts. Fichte, Serie I.

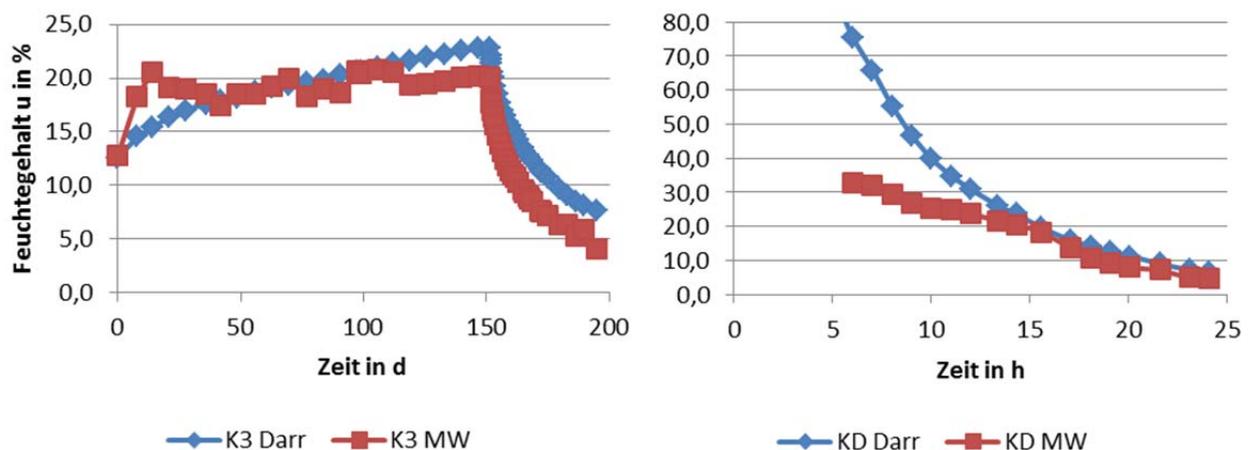


Abbildung 3-9: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} und Mittelwert $u_{P,MW}$ über die Zeit t . Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Fichte, Serie I.

Ebenfalls wich der Mittelwert $u_{P,MW}$ der über den Querschnitt verteilten Messwerte, siehe Gleichung (3-2), zeitweise deutlich von der mittleren, nach der Darrmethode bestimmten Holzfeuchte u_{darr} ab, siehe exemplarisch Abbildung 3-9. Bei Klimafolge KD zeigte das Messgerät bei zu

hoher Holzfeuchte zunächst keine Werte an, sondern erst mit fortgeschrittener Trocknungsdauer. Danach ließen sich bei noch hohem Wassergehalt und einhergehender Ungenauigkeit der elektrischen Widerstandsmessung maximale Abweichungen von über 50 % Holzfeuchte feststellen. Bei den Klimafolgen K2 und K3 fiel die Differenz moderater aus. Die maximale Abweichung lag bei etwa 6 %, wobei Klimafolge K3 insgesamt höhere Differenzen als K2 aufwies.

Wegen den an den Messstellen der elektrischen Widerstandsmessung festgestellten Ungenauigkeiten wurden die offensichtlich fehlerhaften Messwerte mit Gleichung (3-3) korrigiert. Die weiteren Angaben beziehen sich auf die mit der Darrmethode bestimmte mittlere Holzfeuchte beziehungsweise auf die mit dem Korrekturwert u_{korr} angepasste Holzfeuchte.

Die Menge an aufgenommener beziehungsweise abgegebener Feuchtigkeit variierte erwartungsgemäß an den einzelnen Messstellen, siehe exemplarisch Abbildung 3-10. Je näher der Messpunkt in Richtung zur Körpermitte lag, desto geringer war die Feuchtedifferenz zwischen den aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten. Die Gegenüberstellung der Kurven von Eiche und Fichte verdeutlichte den Einfluss der Holzart auf das Sorptions- und Desorptionsverhalten. Der langsamere Feuchtetransport bei der Eiche zeigte sich an den flacher verlaufenden Kurven. Während bei der Fichte die Kurven im Vergleich annähernd parallel verliefen, nahmen bei der Eiche die Feuchteunterschiede zwischen den einzelnen Messstellen mit fortschreitender Dauer merklich zu. Der Feuchtegehalt an Messstelle P1 glich näherungsweise der mittleren Holzfeuchte des Probekörpers, die berechnete Oberflächenfeuchte ist in Abbildung 3-10 nicht dargestellt.

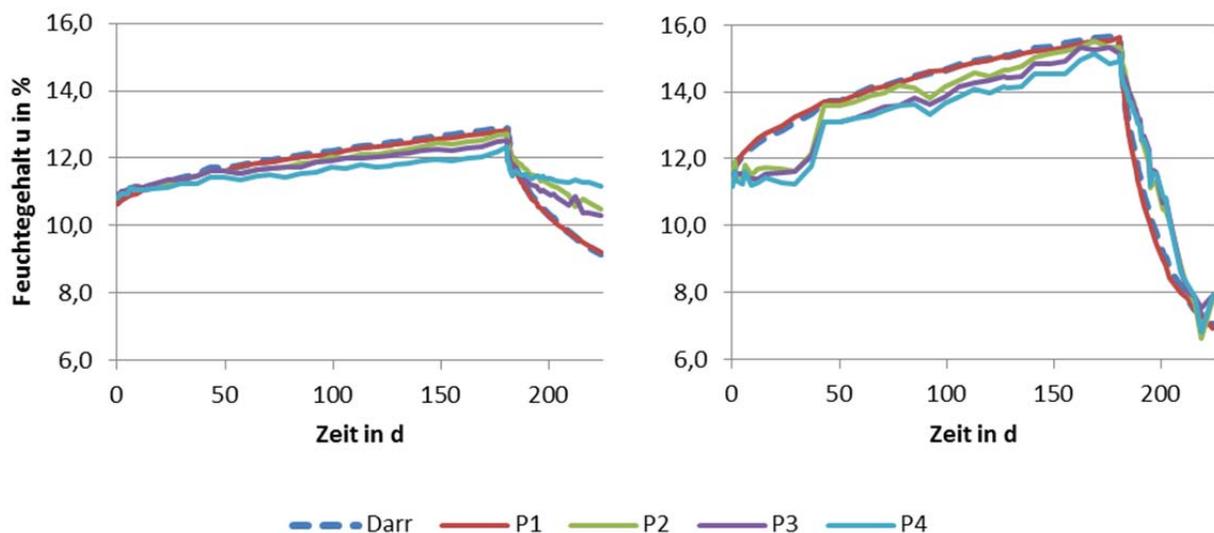


Abbildung 3-10: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} und Holzfeuchte $u_{\text{P,korr}}$ an den Messstellen P1 bis P4 über die Zeit t . Eiche, links, und Fichte, rechts. Klimafolge K2, Serie I.

Abbildung 3-11 stellt die mittlere Holzfeuchtigkeit der Probekörper für die Klimafolgen K2, K3 und KD im Anschluss an die einzelnen Klimaphasen in einem Säulendiagramm dar. Die Holzfeuchten sind als Zahlenwerte in Tabelle 12-5 im Anhang 12.1 gelistet.

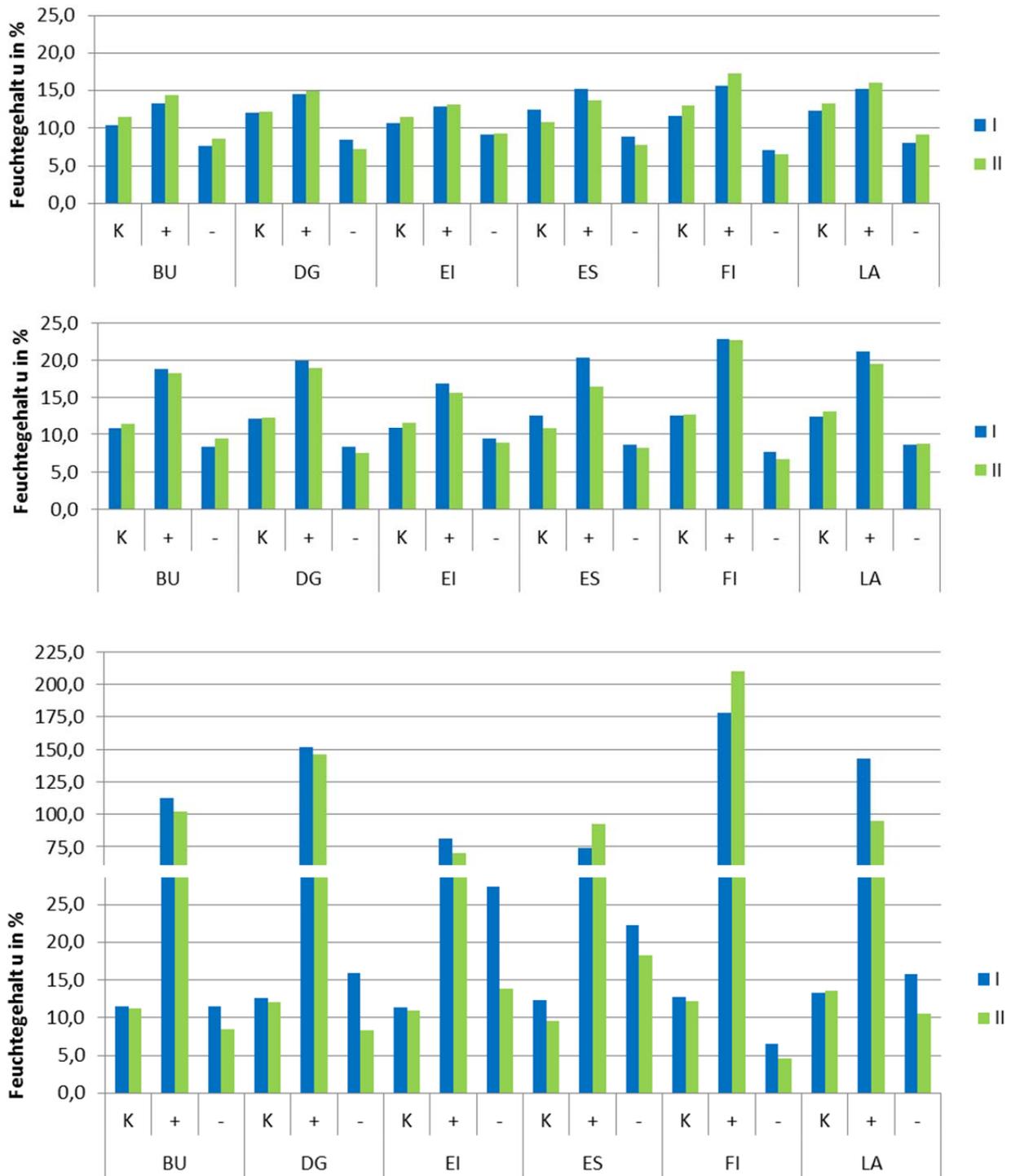


Abbildung 3-11: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} der Prüfkörper der Serie I und II nach Beendigung der Konditionierung, K, der Feuchtezunahme, +, und der Trocknung, -. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.

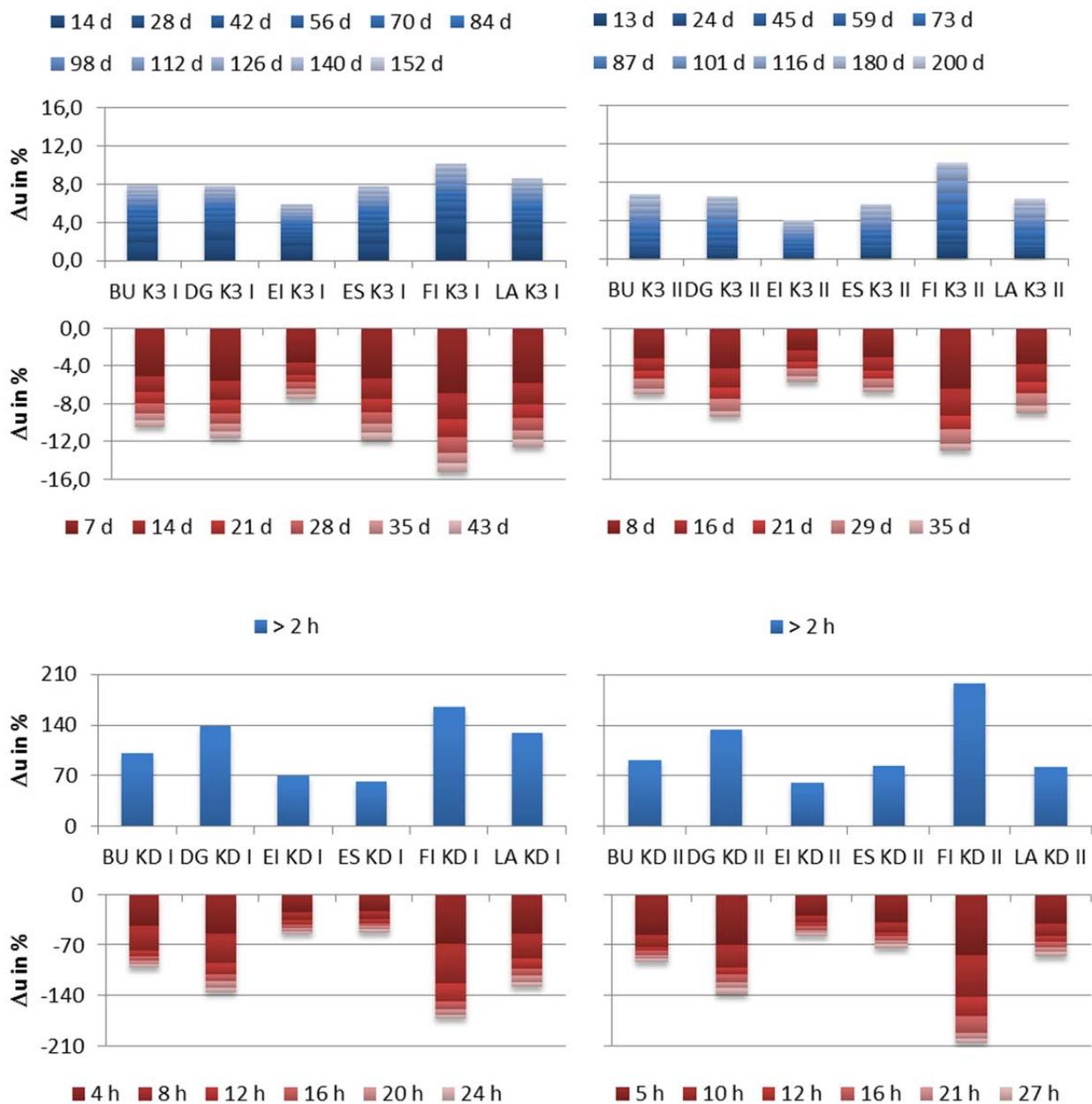


Abbildung 3-12: Differenz der Holzfeuchte Δu nach Feuchtezunahme, blau, und Trocknung, rot. Zusammengefasste Zeitschritte in einem gestapelten Säulendiagramm. Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K3, oben, und KD, unten.

Abbildung 3-12 zeigt die Feuchtedifferenz der Prüfkörper der Klimafolgen K3 und KD zur Ausgangsfeuchte nach Konditionierung im Normalklima 20/65. Klimafolge K2 führte bei geringeren Differenzen zu einem vergleichbaren Bild. Die Zu- beziehungsweise Abnahme der Feuchtigkeit war zu Beginn der jeweiligen Klimaphase am größten. Eiche war insgesamt die Holzart, die die geringsten Feuchteschwankungen zeigte, Fichte die höchste. Die Lagerung während der Sorptionsphase dauerte bei Serie II etwas länger als bei Serie I. Dennoch war nur bei den wenigsten Hölzern der Serie II eine höhere Feuchtezunahme feststellbar. Die durchschnittliche Feuchtezunahme betrug bei Klimafolge K2 etwa 3 % Holzfeuchtigkeit, bei Klimafolge K3 etwa

7 %. Die Dauer der Trocknungsphase war bei Serie II etwas kürzer als bei Serie I und erfolgte in einem Klima mit etwas geringerer relativer Luftfeuchtigkeit, siehe Tabelle 12-3 und Abbildung 12-3 im Anhang 12.1. Es ergaben sich im Durchschnitt ungefähr gleiche Feuchtedifferenzen bei den beiden Serien. Bei Klimafolge K2 nahm die Holzfeuchtigkeit etwa 7 %, bei Klimafolge K3 etwa 11 % ab. Bei Klimafolge KD variierte die Holzfeuchtigkeit nach der Wässerung zwischen den jeweiligen Holzarten und, insbesondere bei den Prüfkörpern aus Lärche, zwischen Serie I und II stark. Dementsprechend unterschiedlich war auch der Verlust an Holzfeuchtigkeit bei der anschließenden Trocknung. In Tabelle 12-6 im Anhang 12.1 sind die jeweiligen Differenzen der Holzfeuchtigkeit zwischen dem Beginn und Ende einer Lagerung in den einzelnen Klimaphasen gelistet.

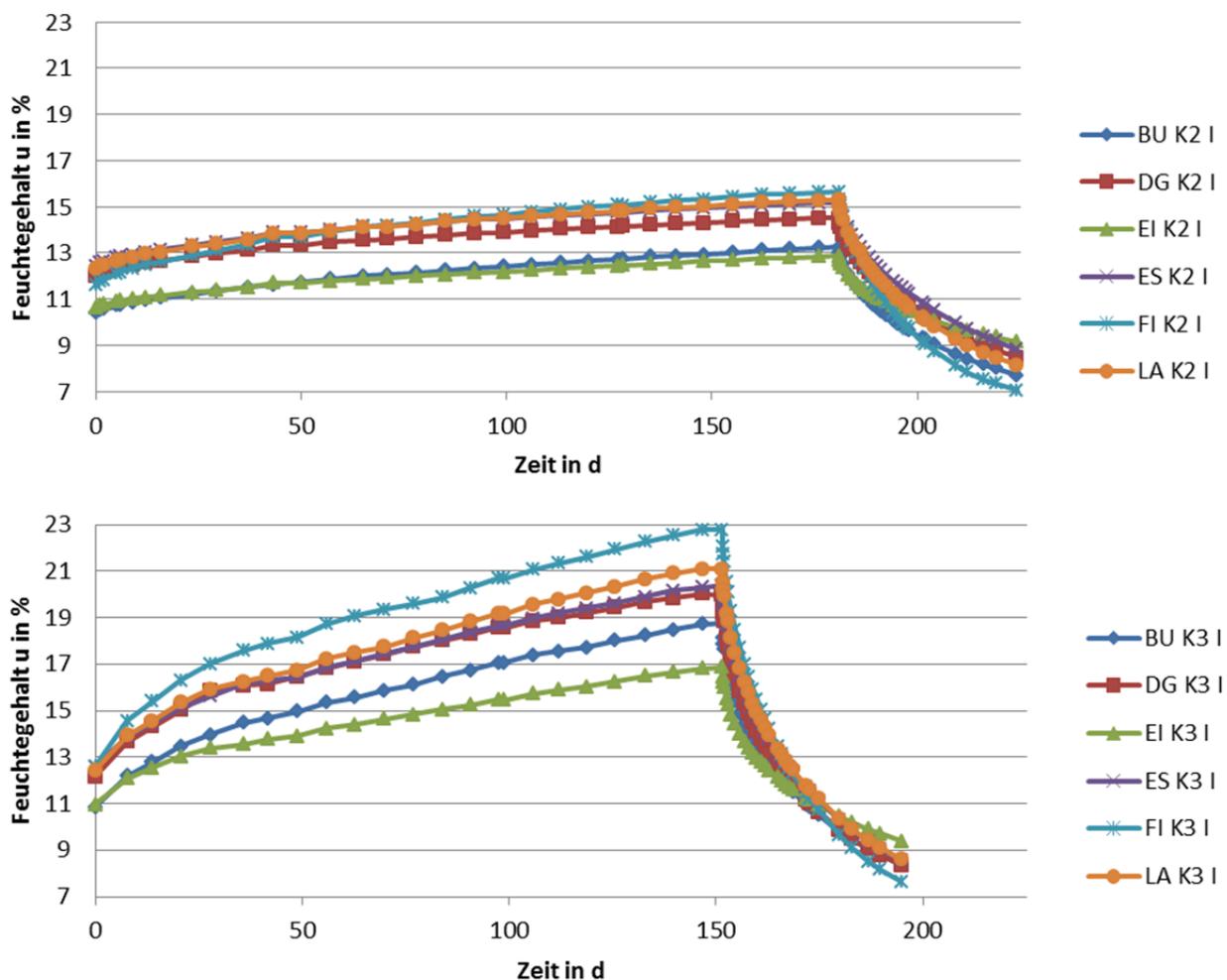


Abbildung 3-13: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} der Prüfkörper der Klimafolge K2, oben, und K3, unten, jeweils Serie I, über die Zeit t .

Die Graphen in Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 stellen die zeitliche Feuchteänderung der Prüfkörper vergleichend dar. Die Abbildungen beschränken sich auf die Ergebnisse der Serie I, Serie II zeigte generell analoge Graphen. Aufgrund der geringen Zunahme an Holzfeuchtigkeit verliefen die Kurven der Klimafolge K2 gegenüber Klimafolge K3 merklich flacher.

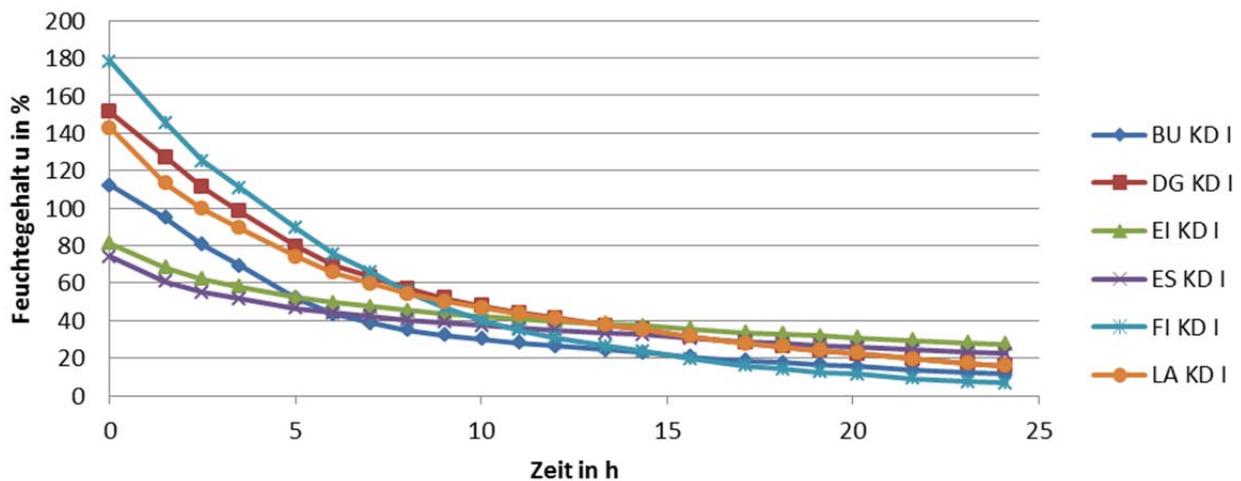


Abbildung 3-14: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} der Prüfkörper der Klimafolge KD, Serie I, über die Zeit t .

Zu Beginn der Trocknungsphase der Klimafolge KD, nach vollständiger Wassersättigung der Probekörper, enthielten die drei Nadelholzarten mit geringerer Rohdichte einen deutlich höheren Wasseranteil als die drei Laubhölzer. Der Prüfkörper mit der höchsten Rohdichte, Buche, zeigte jedoch nicht den geringsten Holzfeuchtegehalt. Bei allen Klimafolgen galt, dass die Steigungen der Graphen bei der Fichte am größten waren. Demgegenüber ergaben die Prüfkörper aus Eiche flache Kurven.

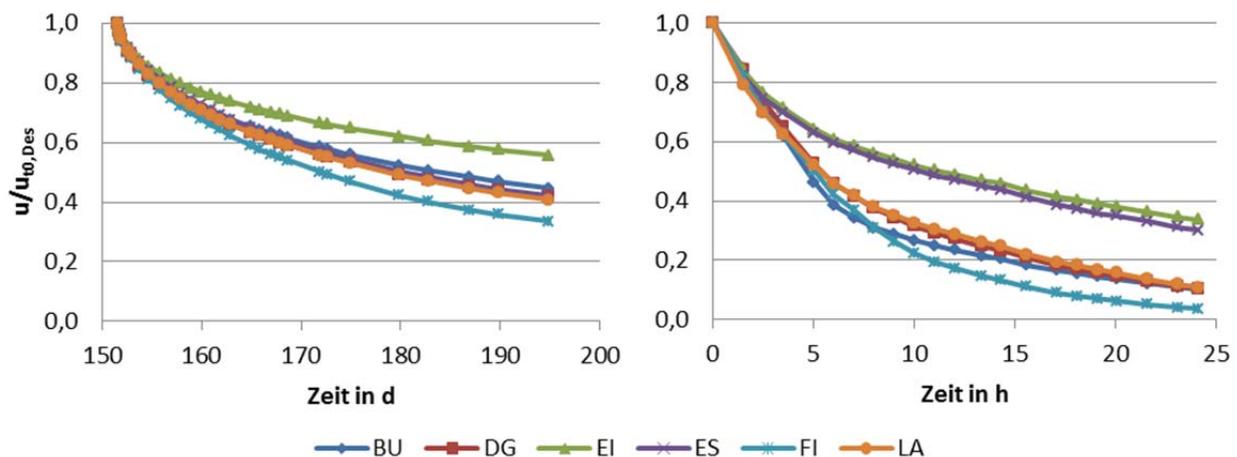


Abbildung 3-15: Verhältniswert der mittleren Holzfeuchten $u_{darr}/u_{t0,Des}$ über die Zeit t . Klimafolge K3, links, und KD, rechts, jeweils Serie I.

Mit Bezug des sich ändernden Feuchtegehalts auf seinen Anfangswert $u_{t0,Des}$ zu Beginn der Trocknungsphase ließen sich die Unterschiede zwischen den Holzarten bei der Feuchteabgabe weiter verdeutlichen, siehe Abbildung 3-15. Fichte und Eiche hüllten die Trocknungskurven der anderen Holzarten ein. Die unterschiedliche Trocknungsrate der untersuchten Hölzer war bei der Klimafolge KD in den ersten Trocknungsstunden und bei Holzfeuchten über dem Fasersättigungspunkt deutlich geringer ausgeprägt als am Ende der Trocknungsphase.

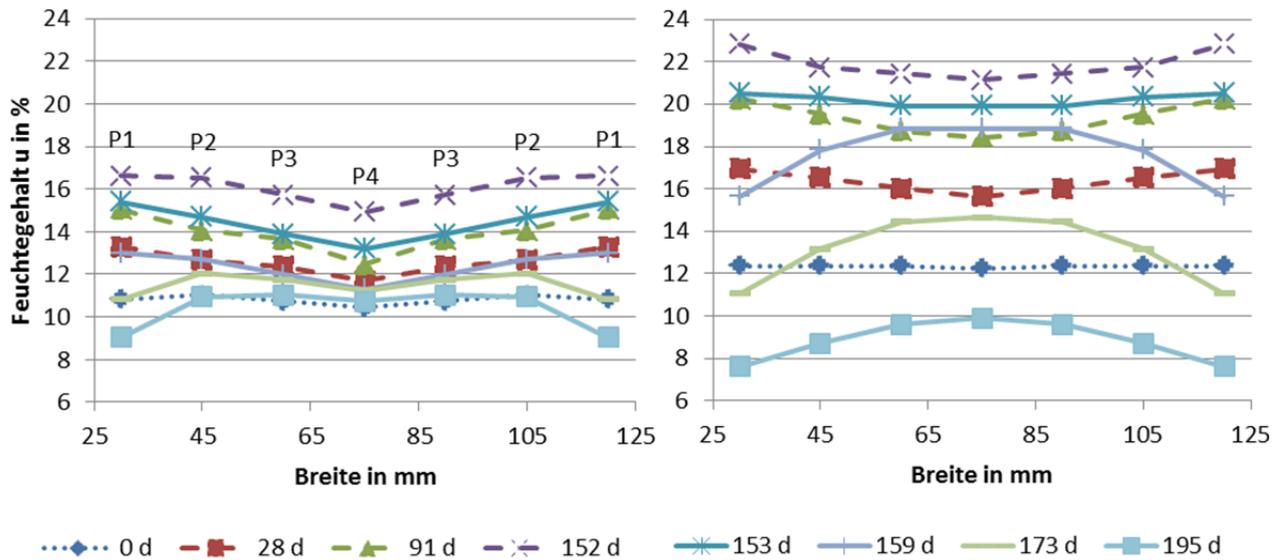


Abbildung 3-16: Feuchtegehalt $u_{P,korr}$ an vier Messstellen und zu acht Zeitpunkten. Klimafolge K3, Serie I. Eiche, links, und Fichte, rechts. Phase nach Konditionierung, gepunktete Linie, der Feuchtezunahme, gestrichelte Linie, und der Trocknung, durchgezogene Linie.

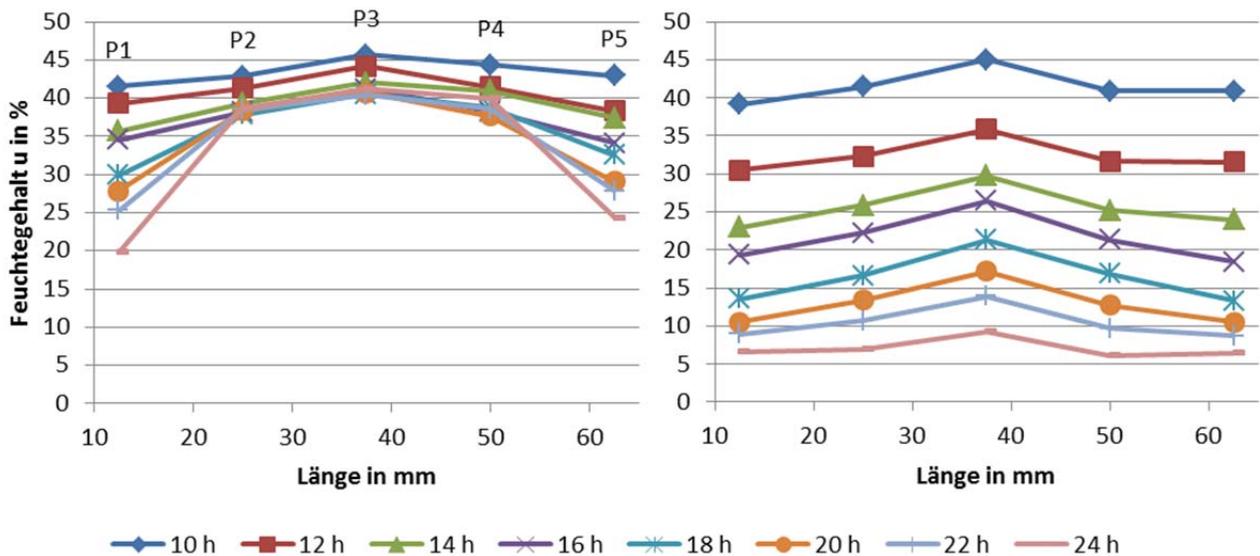


Abbildung 3-17: Feuchtegehalt $u_{P,korr}$ an fünf Messstellen und zu acht Zeitpunkten. Klimafolge KD, Serie I. Eiche, links, und Fichte, rechts.

Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 zeigen die Verteilung des Holzfeuchtegehalts über den Querschnitt am Beispiel von Eiche und Fichte. Die Darstellungen beschränken sich somit auf die beiden Holzarten mit der größten beziehungsweise geringsten Wasserzunahme und -abgabe. Linien, die die einzelnen, angepassten Messdaten linear verbinden, bildeten den Verlauf des Feuchtegehalts über den Querschnitt ab. Die Kurven und Messdaten der Klimafolge K3 wurden an der angenommenen Symmetrieachse in Querschnittsmittte gespiegelt. Die jeweils äußeren Messpunkte geben nicht die Oberflächenfeuchte wieder, siehe auch Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6. Während Fichte bei der Klimafolge KD insgesamt mehr Feuchtigkeit abgab, verliefen die

zugehörigen Feuchtegradienten vor allem zum Ende der Trocknung deutlich flacher als bei der Eiche. Die Abgabe der höheren Menge an Feuchtigkeit erfolgte also im hygrokopischen Bereich bei einer gleichmäßigeren Verteilung des Feuchtegehalts über den Querschnitt. Die Darstellung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt zu einem früheren Zeitpunkt der Trocknungsphase erschien bei der Klimafolge KD nicht sinnvoll, da bei hoher Holzfeuchtigkeit oftmals keine oder nicht verlässliche Daten gemessen wurden.

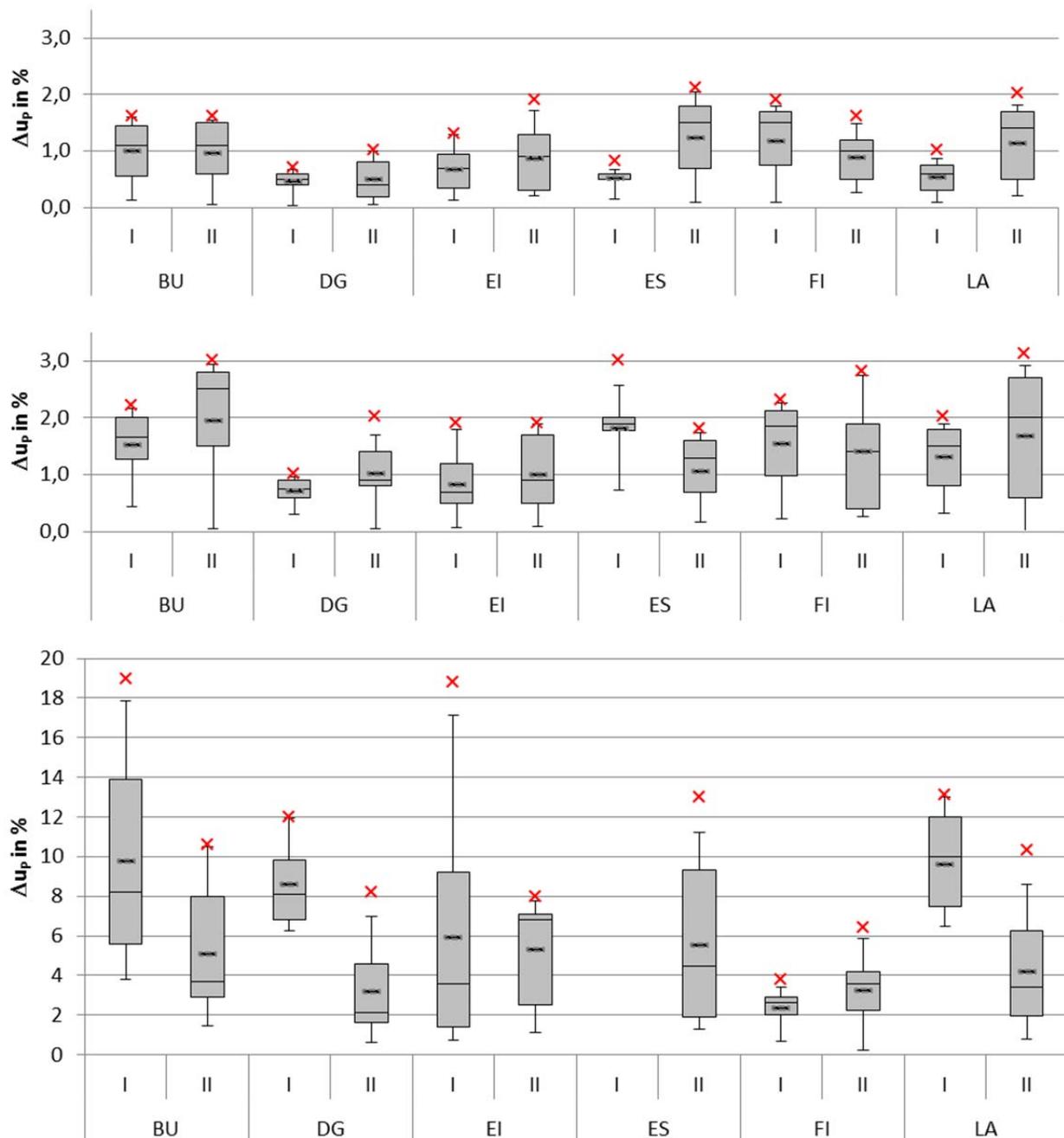


Abbildung 3-18: Betragmäßige Differenz der Holzfeuchte $\Delta u_{p,korr}$ zwischen Messpunkt P1 und P2 zu den Messzeitpunkten während der Trocknungsphase der Serie I und II. Darstellung der 5 %- und 95 %-Quantile als Whisker, der oberen und unteren Quartile, und der Mediane als Boxplot sowie der Mittelwerte, —, und der Maximalwerte, rotes x. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.

Feuchtegradienten verursachen feuchteinduzierte Spannungen. Als ein Maß für die Größe der Gradienten diene zunächst die betragsmäßige Holzfeuchtedifferenz zwischen benachbarten Messstellen zu den jeweiligen Messzeitpunkten, siehe Abbildung 3-18. Allerdings ergab die Auswertung der Holzfeuchtedifferenzen große, unrealistisch wirkende Schwankungen an aufeinanderfolgenden Zeitpunkten. Dies galt für die Sorptionsphase noch mehr als für die Desorptionsphase. Der Vergleich der Hölzer anhand der Mediane und Quantile schloss die Maxima und Ausreißer aus, sodass die Aussagekraft der Auswertung zunimmt.

Naturgemäß waren die Holzfeuchtedifferenzen und somit die Gradienten zwischen den nah am Rand gelegenen Messstellen am größten. Die betragsmäßige Holzfeuchtedifferenz zwischen den Messpunkten war in der Sorptionsphase der Klimafolge K2, mit Ausnahme eines Prüfkörpers aus Douglasie, geringer als in der Desorptionsphase. Klimafolge K3 zeigte diesbezüglich ein uneinheitliches Bild. Die Auswertung der 95 %-Quantile für die Trocknungsphase ergab innerhalb der Klimafolge K2 Differenzen zwischen den Messstellen kleiner als etwa 2 % und innerhalb der Klimafolge K3 kleiner als etwa 3 % Holzfeuchte. Die Prüfkörper mit dem geringsten und dem höchsten Absolutwert waren bei Klimafolge K2 beide aus Esche. Bei Klimafolge K3 wies ein Prüfkörper aus Douglasie die geringste und ein Prüfkörper aus Buche die höchste Holzfeuchtedifferenz auf. Wesentlich deutlichere Unterschiede folgten aus der Auswertung der Klimafolge KD, wobei die Daten des Prüfkörpers aus Esche der Serie I aufgrund der wenigen, unzureichenden Messdaten unberücksichtigt blieben. Die minimale Holzfeuchtedifferenz wurde bei einem Prüfkörper aus Fichte ermittelt. Der Höchstwert der 95 %-Quantile betrug bei einem Prüfkörper aus Buche zwischen den Messpunkten P1 und P2 etwa 18 % Holzfeuchte.

Die Differenz des Feuchtegehalts nebeneinanderliegender Messpunkte Δu_P dividiert durch den zugehörigen Messstellenabstand a ergab den zugehörigen Gradienten. In Abbildung 3-19 ist der Gradient über die Dauer der Trocknungsphase für die Holzfeuchtedifferenz der beiden randnächsten Messpunkte P1-P2 dargestellt. Um die Messausreißer zu dämpfen und den zeitlichen Verlauf zu glätten, geben die Graphen den Messwert als gleitenden Durchschnitt wieder. Der gleitende Mittelwert umfasste drei aufeinanderfolgende Messwerte:

$$u_{gMW}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} u(t-i) \quad (3-4)$$

mit

- u_{gMW} gleitender Mittelwert der Holzfeuchte, in %
- t betrachteter Zeitpunkt
- n Anzahl Datenpunkte, hier $n = 3$

Aufgrund der vorangegangenen Feuchtigkeitsaufnahme war der Gradient zu Beginn der Trocknungsphase noch positiv. Anschließend wechselte der Gradient das Vorzeichen und der Betrag nahm je nach Holzart unterschiedlich rasch zu. Für die Prüfkörper aus Eiche wurden in

allen Klimafolgen über einen vergleichsweise langen Zeitraum geringe Gradienten ermittelt, die zunächst nur langsam anstiegen. Die Gradienten der Fichte erreichten in den Klimafolgen K2 und K3 vergleichsweise schnell ein Minimum. Die Kurven nahezu aller Holzarten wiesen einen Tiefpunkt innerhalb der Trocknungsdauer auf. Nur bei den Prüfkörpern aus Eiche war auch noch zum Ende des Versuchszeitraums eine Zunahme der Gradienten feststellbar. Die Minima der Serie I und II unterschieden sich in der Trockenphase der Klimafolge KD deutlich. Im Gegensatz zur Serie I wurden zur Messung der Holzfeuchte bei Serie II anfangs alle Prüfkörper gleichzeitig aus dem Trockenofen genommen und erst gemeinsam wieder zurückgelegt. Wie in Abbildung 3-18 wurde auch in Abbildung 3-19 auf eine Darstellung der Werte des Prüfkörpers aus Esche der Serie I verzichtet.

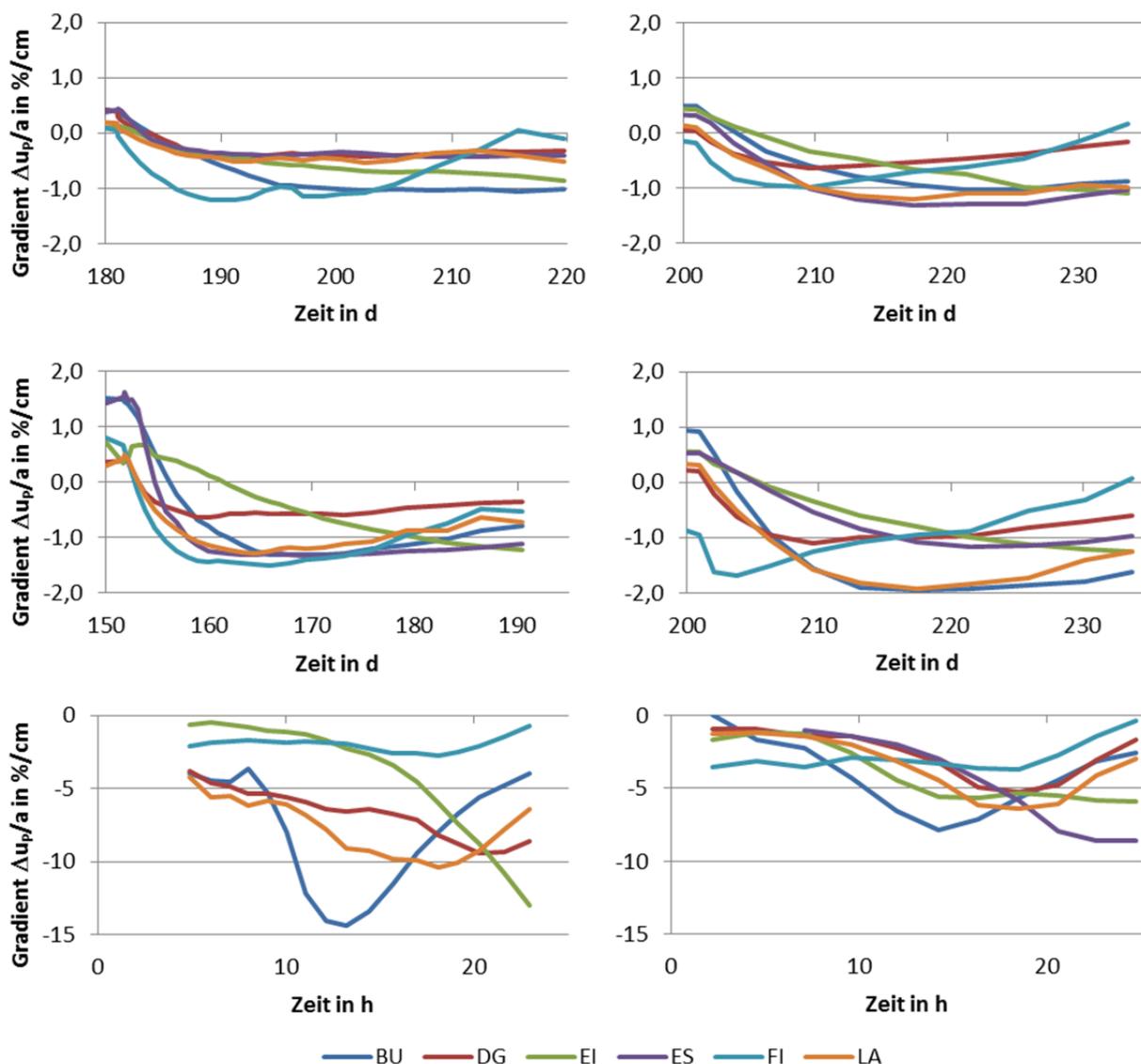


Abbildung 3-19: Gradient der Holzfeuchte $\Delta u_p/a$ zwischen Messpunkt P1 und P2 als gleitender Durchschnitt von drei aufeinanderfolgenden Messdaten über die Zeit t . Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.

3.2.3 Diskussion

Die Differenzen der mittleren Holzfeuchtigkeit zwischen Beginn und Ende einer Klimaphase waren für die Fichtenprüfkörper in jeder Klimafolge einer Serie am höchsten und für die Eichenprüfkörper mit einer Ausnahme am geringsten. Für die Ausbildung von feuchteinduzierten Spannungen sind allerdings die Feuchtegradienten über den Querschnitt von größerer Bedeutung. Bei der Betrachtung der Holzfeuchtedifferenzen der am nächsten zum Rand liegenden Messstellen fielen die zum Teil erheblichen Schwankungen bei zeitlich aufeinanderfolgenden Messdaten auf. Daher wurden zur Auswertung der Daten unter anderem Quantilwerte verwendet. Bei Betrachtung der 95 %-Quantile der Holzfeuchtedifferenz zeigte sich, dass bei den Klimafolgen K2 und K3 im Gegensatz zur Klimafolge KD nur geringe Unterschiede zwischen den Holzarten auftraten und insgesamt deutlich kleinere Gradienten ermittelt wurden. Bei Klimafolge KD verfügten die Prüfkörper aus Fichte trotz des größten und raschen Verlustes an gesamter Holzfeuchtigkeit über die kleinsten Holzfeuchtedifferenzen. Eiche und Buche, mit vergleichsweise geringem Verlust an gesamter Holzfeuchtigkeit, wiesen hingegen hohe Gradienten auf.

Ein genereller Einfluss der Rohdichte auf die Gradienten und den Feuchtigkeitstransport war bei den untersuchten Prüfkörpern nicht zu erkennen. So unterschied sich das Verhalten der Laubhölzer Buche, Eiche und Esche bei vergleichbarer Rohdichte von etwa 700 kg/m^3 und Betrachtung aller Klimafolgen deutlich voneinander. Die Trocknungskurven der Prüfkörper aus Buche verliefen jedoch ähnlich wie die Kurven der Holzarten Douglasie und Lärche mit deutlich geringerer Rohdichte.

Der zeitliche Verlauf der Gradienten zeigte, dass die Fichte bei allen Klimafolgen vergleichsweise rasch ein Minimum erreichte. Vor allem bei der Eiche war augenscheinlich mehr Zeit notwendig, bis sich die maximalen Gradienten ausbildeten. Praktisch kann dieses Feuchtetransportverhalten bedeuten, dass Fichte in einem Bauwerk sehr schnell auf Luftfeuchtewechsel reagieren und daher schon recht bald eine merkliche Veränderung der Feuchtegradienten aufweisen wird. Demgegenüber muss bei einem Eichentragwerk über eine längere Zeitdauer ein ungünstiges Klima herrschen, bis die maximalen Gradienten auftreten.

Mit Einführung der DIN EN 302-2:2013 wurde die maximale Trockenzeit bei der Delaminierungsprüfung begrenzt. Am Ende einer 30-stündigen Trocknung darf die Masse des Prüfkörpers die Ausgangsmasse vor der Wässerung um nicht mehr als 8 % übersteigen, ansonsten ist der Prüfkörper zu verwerfen. Die Versuche mit 24-stündiger und 27-stündiger Trocknungsdauer zeigten, dass Esche und Eiche am langsamsten trockneten und diese Bedingung wohl am schwersten erfüllen können. Um die Forderung der DIN EN 302-2:2013 sicher zu erfüllen, müssen daher gegebenenfalls manche Holzarten mit einer höheren als der empfohlenen Luftgeschwindigkeit getrocknet werden. Dies führt allerdings zu noch höheren Gradienten und das Erfüllen der Anforderungen hinsichtlich der Delaminierung wird weiter erschwert.

Die Klimabedingungen der Klimafolgen K2 und K3 führten zu einer Holzfeuchtigkeit, die in den gewünschten, baupraktischen Bereichen lag. Der Vergleich mit Messdaten von Meierhofer und Sell (1979a; 1979b) bestätigte die gewählten Umgebungsbedingungen. Die Vergleichsdaten basierten auf Holzfeuchtemessungen an Fichtenholzträgern mit im Bauwesen üblichen Abmessungen, die

im Freien unter Dach und bei direkter Wetterbeanspruchung in einem mitteleuropäischen, kontinentalen und von alpinen Einflüssen geprägten Außenklima über ein Jahr lang lagerten. Klimafolge K2 korrespondierte hierbei mit erstgenannter Lagerungsbedingung, Klimafolge K3 mit letztgenannter. Im Unterschied zu einem konstanten, künstlichen Klima schwanken in einem natürlichen Klima Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ständig. Bei dem Vergleich der Holzfeuchteverteilungen über den Querschnitt verklebter Fichtenlamellen bei transversaler Feuchtezunahme zeigten die Ergebnisse von Jönsson (2001), dass in einem Außenklima die Zunahme der Holzfeuchtigkeit im Inneren des Querschnitts deutlich geringer war als in einem künstlichen Klima. Am Querschnittsrand ergaben sich jedoch im Außenklima höhere Holzfeuchtedifferenzen. Die Differenz in dem künstlichen Klima lag in einer zu den Klimafolgen K2 und K3 vergleichbaren Größenordnung. Qualitativ ähnliche Feuchtigkeitsverteilungen ermittelten Möhler und Steck (1977; 1980) bei Randbedingungen, die mit Klimafolge K3 vergleichbar war.

Der Verhältnswert E gibt das Verhältnis der zum betrachteten Zeitpunkt t zu-/abgenommenen Holzfeuchtigkeit zur maximal möglichen Zu-/Abnahme wieder, siehe Gleichungen (2-31) und (2-32). Choong und Skaar (1972) untersuchten in Wasser getränkte Prüfkörper und stellten eine lineare Beziehung zwischen dem Verhältnswert E und der Zeit t zu Beginn der Trocknung fest. Prüfkörper, die ausschließlich im hygroskopischen Bereich trockneten, zeigten keine konstante Trocknungsrate. Als Grund wurde der abnehmende Oberflächendampfdruck bei sinkender Oberflächenfeuchtigkeit genannt. Das von Choong und Skaar (1972) beschriebene Verhalten ließ sich bei Klimafolge KD wiedererkennen, siehe Abbildung 3-15.

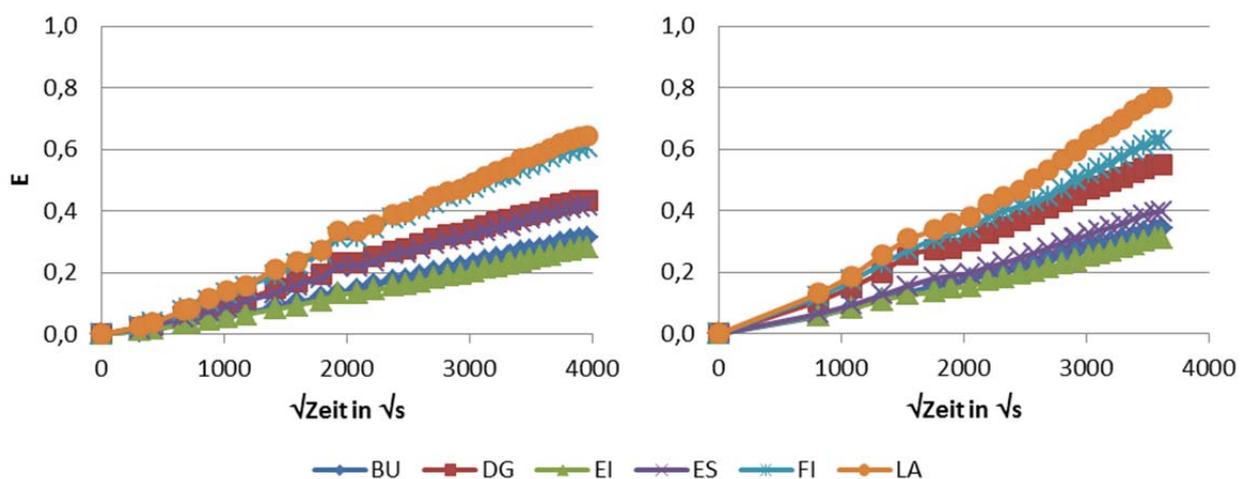


Abbildung 3-20: Darstellung des Verhältnswertes E über die Wurzel der Zeit t . Klimafolge K2, links, und K3, rechts, jeweils Serie I.

Die Darstellung der Bruchzahl E über die Wurzel der Zeit t führte bei Choong und Skaar (1969; 1972) im hygroskopischen Bereich, zumindest zu Beginn einer Sorptions- oder Desorptionsphase, hingegen zu einem linearen Zusammenhang. Unter der Voraussetzung einer erkennbaren vorhandenen, linearen Beziehung nahmen Avramidis und Siau (1987) an, dass der Diffusionsprozess mit den Fickschen Gesetzen beschreibbar war. Wadsö (1994b) merkte dazu an, dass der anfängliche lineare Zusammenhang mindestens bis $E = 0,6$ gelten sollte. Folgte der Diffusionsvorgang den

Fickschen Gesetzen, konnte der Diffusionskoeffizient aus der Steigung des Graphen berechnet werden, siehe (Stamm 1964; Crank 1975) und Gleichung (2-30).

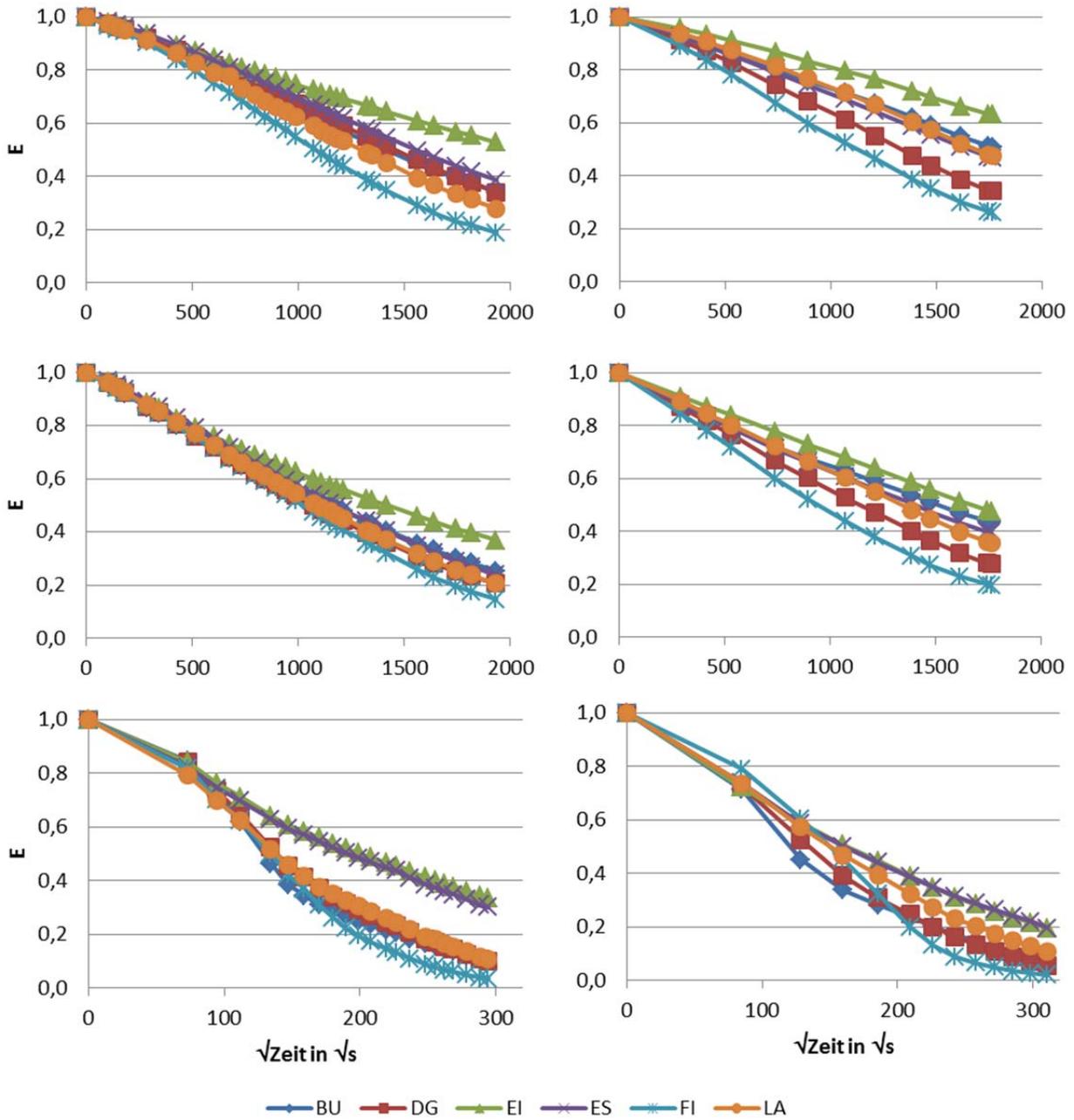


Abbildung 3-21: Darstellung des Verhältniswertes E über die Wurzel der Zeit t. Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.

Die in dieser Arbeit ermittelten Daten zeigten einen in weiten Bereichen linearen Verlauf der Verhältniszahl E über die Wurzel der Zeit t, siehe Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt Auskunft über die Anpassungsgüte der Graphen an eine Regressionsgerade. Für die Klimafolgen K2 und K3 wurden für das Bestimmtheitsmaß R^2 Werte zwischen 0,9899 und 0,9999 in der Desorptionsphase berechnet. In der Sorptionsphase der Klimafolgen K2 und K3

ergaben sich lediglich bei Serie II etwas geringere Bestimmtheitsmaße, der Minimalwert lag bei 0,92.

Der Knick in den Kurven der Klimafolge KD bei Feuchtigkeitsabnahme, siehe Abbildung 3-21, deutete auf die unterschiedlichen Transportmechanismen oberhalb und unterhalb des Fasersättigungspunktes hin. Nach einer gewissen Trocknungszeit, das heißt bei Vernachlässigung einer von der Holzart abhängigen Anzahl von Anfangszeitmesspunkten, ließen sich die Messdaten unterhalb des Fasersättigungspunktes gut mit einer Regressionsgerade abbilden. Das Bestimmtheitsmaß R^2 lag bei Serie I bei Nichtberücksichtigung der ersten acht Trocknungsstunden bei Fichte über dem Wert 0,95, bei den anderen Hölzern über 0,99. Bei Serie II zeigte sich möglicherweise der Einfluss der langen Dauer der Holzfeuchtemessung, die Thomas (2012) in seiner Studienarbeit beschrieb. Die Messungen fanden außerhalb der Trockenkammer statt. Bei Vernachlässigung der ersten vierzehn Trocknungsstunden war bei Fichte das Bestimmtheitsmaß 0,93, bei den anderen Hölzern größer oder gleich dem Wert 0,99.

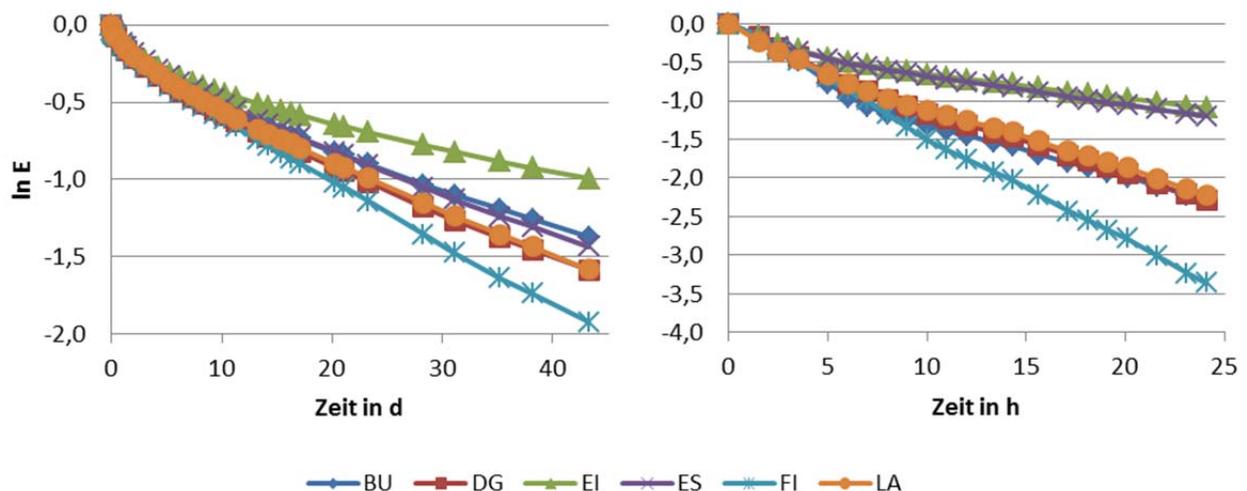


Abbildung 3-22: Darstellung des natürlichen Logarithmus des Verhältniswertes E über die Zeit t . Klimafolge K3, links, und KD, rechts, jeweils Serie I.

Analog zur Darstellung der Verhältniszahl E über die Wurzel der Zeit t ergeben sich gemäß der Lösung nach Newman (1931a; 1931b) Geraden bei Darstellung des Logarithmus der Verhältniszahl E über die Zeit t . Der lineare Zusammenhang soll zumindest ab einer gewissen Anfangszeit gelten. Aus der Steigung der Geraden lässt sich dann der Diffusionskoeffizient bestimmen, siehe Gleichung (2-34) sowie (Stamm 1967a; Choong und Skaar 1972). Bei den hier betrachteten Klimafolgen verdeutlichte das Bestimmtheitsmaß R^2 , dass sich die ermittelten Kurven $\ln E$ über die Zeit t , siehe Abbildung 3-22, gut an Regressionsgeraden anpassen. Das Bestimmtheitsmaß lag bei allen Hölzern über dem Wert 0,99, sofern die Messdaten nicht von Beginn an sondern ab maximal sechs Tagen Trocknungsphase bei den Klimafolgen K2 und K3 beziehungsweise fünf Stunden bei der Klimafolge KD ausgewertet wurden. Das Bestimmtheitsmaß der Fichte war, anders als bei der Darstellung des Verhältniswertes E über die Wurzel der Zeit t , von Beginn an

relativ hoch. Die Beobachtung lässt sich wohl mit der Güte der unterschiedlichen Lösungsansätzen begründen, die zu den Annahmen der linearen Zusammenhänge führten.

Insgesamt ließ sich mit der grafischen Darstellung der Messdaten für alle Klimafolgen bestätigen, dass die Ficksche Diffusionsgleichung zur Beschreibung der in den präparierten Hölzern gelenkten Feuchtetransportvorgänge anwendbar ist. Anhand der Steigungen ließ sich sowohl in Abbildung 3-21 als auch in Abbildung 3-22 qualitativ bereits ablesen, dass Eiche den geringsten und Fichte den höchsten Diffusionskoeffizienten während der Trocknung aufwies.

3.3 Versuchsreihe „optische Messungen“

3.3.1 Material und Methode

Die Messergebnisse der Versuchsreihe „optische Messungen“ basieren auf den Aufnahmen des optischen Messsystems Aramis 5M der Firma Gom, siehe Abbildung 3-23 und Abschnitt 2.7.2, das als zentrales Messinstrument zur Verfügung stand.

Die Ausleuchtung des Messobjektes erfolgte mit den systemeigenen LED-Strahlern, eine Zusatzbeleuchtung war nicht erforderlich. Die verwendete Kalibrierplatte war vom Typ CP20 350x280, in Verbindung mit der Sensoranordnung ergab sich ein Messvolumen beziehungsweise ein Messraum von Höhe x Breite x Tiefe = 285 x 240 x 240 mm³. Die Standardeinstellungen der Software, Version Aramis v6.1.1 64 bit, blieben bei der Messung und Auswertung der Ergebnisse grundsätzlich unverändert.



Abbildung 3-23: Optisches Messsystem Aramis 5M.

In Analogie zur Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“, siehe Abschnitt 3.2, beinhaltet die Versuchsreihe „optische Messungen“ Untersuchungen an den sechs Holzarten Buche, Douglasie, Eiche, Esche, Fichte und Lärche. Weitere Angaben zur Geometrie und Herstellung der Prüfkörper sowie eine nähere Beschreibung der Holzarten befinden sich in den Abschnitten 3.1.3 und 3.1.4. In Tabelle 12-7 und Tabelle 12-8 im Anhang 12.2 sind die verwendeten Prüfkörper mit Angaben zur Lamellenanzahl und Rohdichte aufgeführt.

Die hier ausgewerteten Messungen umfassen sowohl Prüfkörper aus einer Lamelle als auch verklebte Prüfkörper aus zwei Lamellen. Die aus zwei Lamellen hergestellten Prüfkörper repräsentieren den Mittelteil eines aus mehreren Lamellen verklebten Querschnitts. Die gestrichelten Linien in Abbildung 3-24 kennzeichnen den gedachten Trennschnitt eines Prüfkörpers aus einem Brettschichtholzträgers beziehungsweise aus einem Delaminierungsprüfkörper.

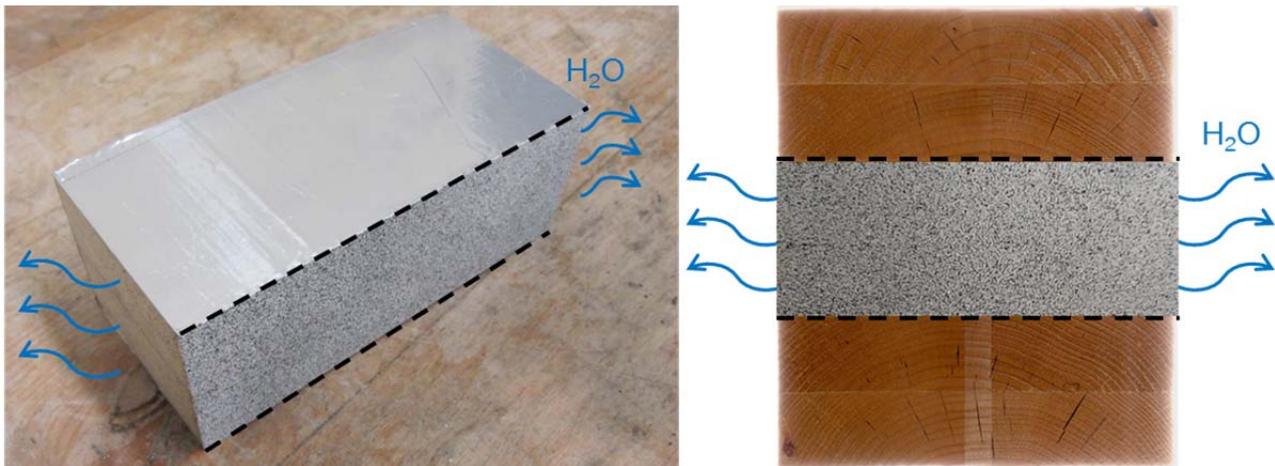


Abbildung 3-24: Abgeklebter Prüfkörper mit stochastischem Sprühmuster und Darstellung des Diffusionsstroms sowie der gedachten Lage in einem Brettschichtholzträger.

Die Prüfkörper lagen während der Sorptionsphase zwischen drei und sechs Monate in den gewählten Klimabedingungen der jeweiligen Klimafolge, siehe Tabelle 3-6. Datenlogger zeichneten das herrschende Klima zur Kontrolle auf, vergleiche auch Abschnitt 3.2.1 sowie die äquivalenten Klimadaten der Sorptionsphase der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“ in Abbildung 12-1 und Abbildung 12-2 im Anhang 12.1. Die aufgenommenen Klimadaten während der 24-stündigen Trocknungsphase der Versuchsreihe „optische Messungen“ gibt Abbildung 12-4 im Anhang 12.2 wieder. Die Trocknung erfolgte bei einem Luftstrom mit einer Geschwindigkeit von etwa 2 m/s bis 3 m/s.

Tabelle 3-6: Klimafolgen und Klimabedingungen der Versuchsreihe „optische Messungen“.

Bezeichnung Klimafolge	Klimabedingung „Sorptions“	Klimabedingung „Desorption“
K1	20 °C/65 %rF	40 °C/25 %rF
K2	20 °C/85 %rF	40 °C/25 %rF
K3	20 °C/100 %rF	40 °C/25 %rF
KD	Wasserlagerung	65 °C/10 %rF

Das berührungslos arbeitende optische Messverfahren teilt die Oberfläche des Prüfkörpers in eine Vielzahl sogenannter Facetten ein. Jede Facette ergibt einen diskreten Messpunkt, dessen Koordinaten zu jeder Zeitstufe ermittelt wird. Die hier verwendete Standardfacette mit 15 x 15 Pixel stellt einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungszeit dar. Eine möglichst optimale Auswertung von Messbildern setzt das Vorhandensein eines Grauwertemusters voraus. Bei den kontrastarmen Holzoberflächen lässt sich durch das Aufsprühen eines schwarzen Prüfmusters auf weißem Untergrund, siehe Abbildung 3-24, die Genauigkeit der Messungen verbessern. Im Rahmen einer vom Verfasser betreuten Studienarbeit untersuchte Moldan (2011) die Genauigkeit des Messsystems Aramis bei Betrachtung verschiedener Verfahren der Musteraufbringung. Die „Sprühdosentechnik“, das heißt das Aufbringen unregelmäßig, stochastisch verteilter Sprengel mit

einer Sprühdose, zeigte in Verbindung mit einem weißen Anstrich als Untergrund die besten Ergebnisse.

Analog zur Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ erfolgte eine Lenkung des Diffusionsstroms unter Berücksichtigung der simulierten Randbedingungen, siehe Abschnitte 3.1.3 und 3.2.1. Die Stirnflächen der Prüfkörper wurden hier jedoch nicht beidseitig mit einer diffusionsperrenden Aluminiumfolie abgeklebt, da auf einer Seite eine kontrastreiche, reflexionsarme Oberfläche mit Grauwertemuster für das optische Messen notwendig war. In den Klimafolgen K1, K2 und K3, die eine Analogie zu einem Brettschichtholzträger herstellten, sollte der Feuchtetransport ausschließlich zu den Schmalseiten erfolgen, siehe Abbildung 3-24. Durch mehrfaches Auftragen eines weißen Grundanstrichs entstand eine wirksame Dampfsperre auf den Stirnseiten. Ein zusätzlich aufgesprühter matt-weißer Lack half, ungünstige Lichtreflexionen aufgrund des mehrfachen Anstrichs zu vermeiden. Die nochmalige Versiegelung der Oberfläche war ein weiterer positiver Effekt des Sprühlacks. Die einzuhaltenden Randbedingungen der Prüfkörper der Klimafolge KD erforderten hingegen diffusionsoffene Stirnseiten, um den Feuchtetransport während der Trocknungsphase einer Delaminierungsprüfung zu simulieren. Bei diesen Prüfkörpern erfolgte ein einmaliger, geringer Farbauftrag auf der dem Messsystem zugewandten Stirnseite.

Die Ergebnisse zweier vom Verfasser betreuten wissenschaftlicher Arbeiten von Fleischhauer (2012) und Radovic (2012), die verschiedene Anstriche bei unterschiedlicher Auftragsanzahl hinsichtlich ihrer Diffusionseigenschaften betrachteten, bestätigten die hier gewählte Vorgehensweise. Versuche von Larsen et al. (2010) zeigten bezüglich der Diffusionseigenschaft einer Holzoberfläche ebenfalls, dass die Holzfeuchtigkeit trotz eines Anstrichs gut abtransportiert wurde.

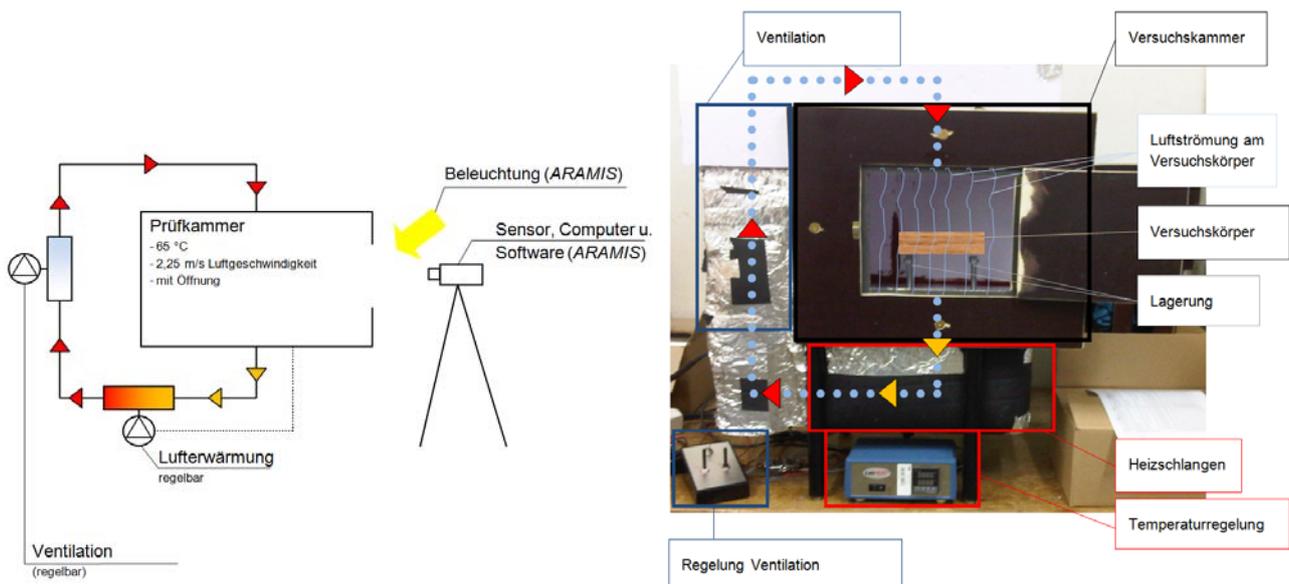


Abbildung 3-25: Trockenofen für die Desorptionsphase der Versuchsreihe „optische Messungen“ (Fleischhauer 2012).

Im Rahmen einer vom Verfasser betreuten Bachelor's Thesis fertigte Fleischhauer (2012) einen gedämmten Trocknungsöfen an, siehe Abbildung 3-25, der das berührungslose Messen von

Verformungen in Folge erhöhter Temperaturen ermöglichte. Um störende Einflüsse auf das Messergebnis aufgrund der hohen Temperaturen zu verringern, befand sich der Sensor des optischen Messsystems bei festgelegtem Abstand zum Trocknungsofen in einem nahezu konstanten Raumklima. Die Temperatur innerhalb der Trockenkammer ließ sich mittels Heizschlangen auf einen gewünschten Wert erhöhen. Ein Thermostat steuerte die Wärmezufuhr und Lüfter sorgten für einen regulierbaren Luftstrom. Die erwärmte Luft strömte durch zu den Prüfkörperoberflächen parallel angeordnete Schlitze im Boden und der Decke des Prüfraums mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich etwa 2 bis 3 m/s ein beziehungsweise aus. Abbildung 3-26 zeigt das optische Messsystem während eines Versuches. Auf ein Verschließen des Ofens zwischen den Aufnahmen wurde verzichtet, um jegliche Störungen zu vermeiden. Die Verwendung einer Glascheibe hätte zu einer ungewollten Lichtbrechung geführt. Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte punktuell, sodass keine Zwangsspannungen auftraten.

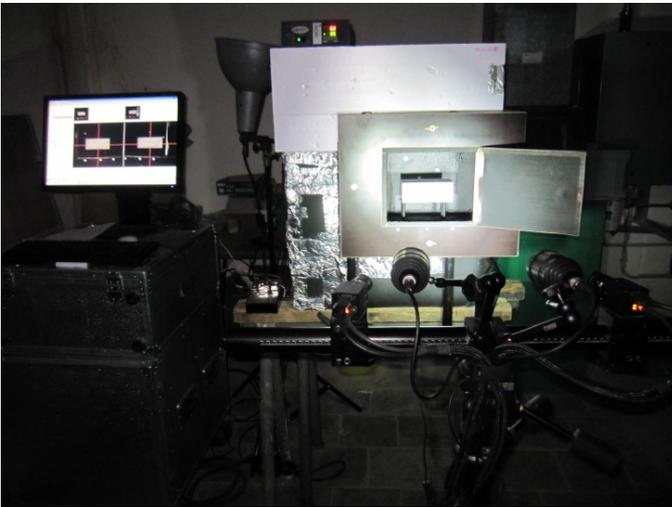


Abbildung 3-26: Optisches Messsystem mit Rechner, links, und Sensor vor dem Trocknungsofen, rechts.

Eine optische Messuntersuchung begann mit fünf Aufnahmen, Stufen 0 bis 4, die manuell innerhalb weniger Sekunden bei ausgeschalteter Heizung und Lüftung ausgelöst wurden. Zur weiteren Kontrolle des Messrauschens und der Güte der Messungen folgten, wiederum in einem kurzen Zeitintervall, fünf Bilder bei eingeschalteter Heizung und Lüftung. Die anschließenden 96 Bilder, Stufe 10 bis 105, wiesen einen zeitlichen Abstand von etwa 15 Minuten auf. Das Zeitintervall dauerte tatsächlich einige Sekunden länger als die vorgegeben Sollzeit von 900 Sekunden. Somit betrug die Dauer eines Versuches insgesamt in etwa 24 Stunden. Vor Herausnahme der Prüfkörper aus dem Messraum wurden abschließend weitere fünf Bilder in einem kurzen Zeitintervall aufgenommen. Bei möglichst kleiner Blendenöffnung ergab sich eine sinnvolle Belichtungszeit von 75 ms. Ein Datenlogger zeichnete das Prüfraumklima während einer Messung auf, zugehörige Daten sind in Abbildung 12-4 im Anhang 12.1 dargestellt. Zur zusätzlichen, unmittelbaren Kontrolle gab ein Handmessgerät, Testo 435, Informationen über Klima und Luftgeschwindigkeit.

Die Software Aramis bietet die Möglichkeit zur Nutzung einer Filterfunktion, um das Rauschen der Messdaten zu verringern. Der behutsam arbeitende Filtervorgang fand bei Verwendung der Voreinstellungen einmal statt. Die Filterfunktion beeinflusste nur die Auswahl und Anzahl der Ergebnisdaten, veränderte dabei aber nicht die Koordinaten der 3D-Punkte. Die Koordinatenmessgenauigkeit des verwendeten Messsystems liegt unter Laborbedingungen laut Auskunft des Herstellers bei 1/50 Pixel oder höher (Fleischhauer 2012), gemäß Untersuchungen von Jesse und Kutzner (2013) ist bei Wahl optimaler Bedingungen eine Messgenauigkeit von 1/100 Pixel bis zu 1/1000 Pixel erreichbar. Für das Messvolumen dieser Arbeit ließe sich demnach eine Genauigkeit von 0,001 mm bis 0,0001 mm erreichen.

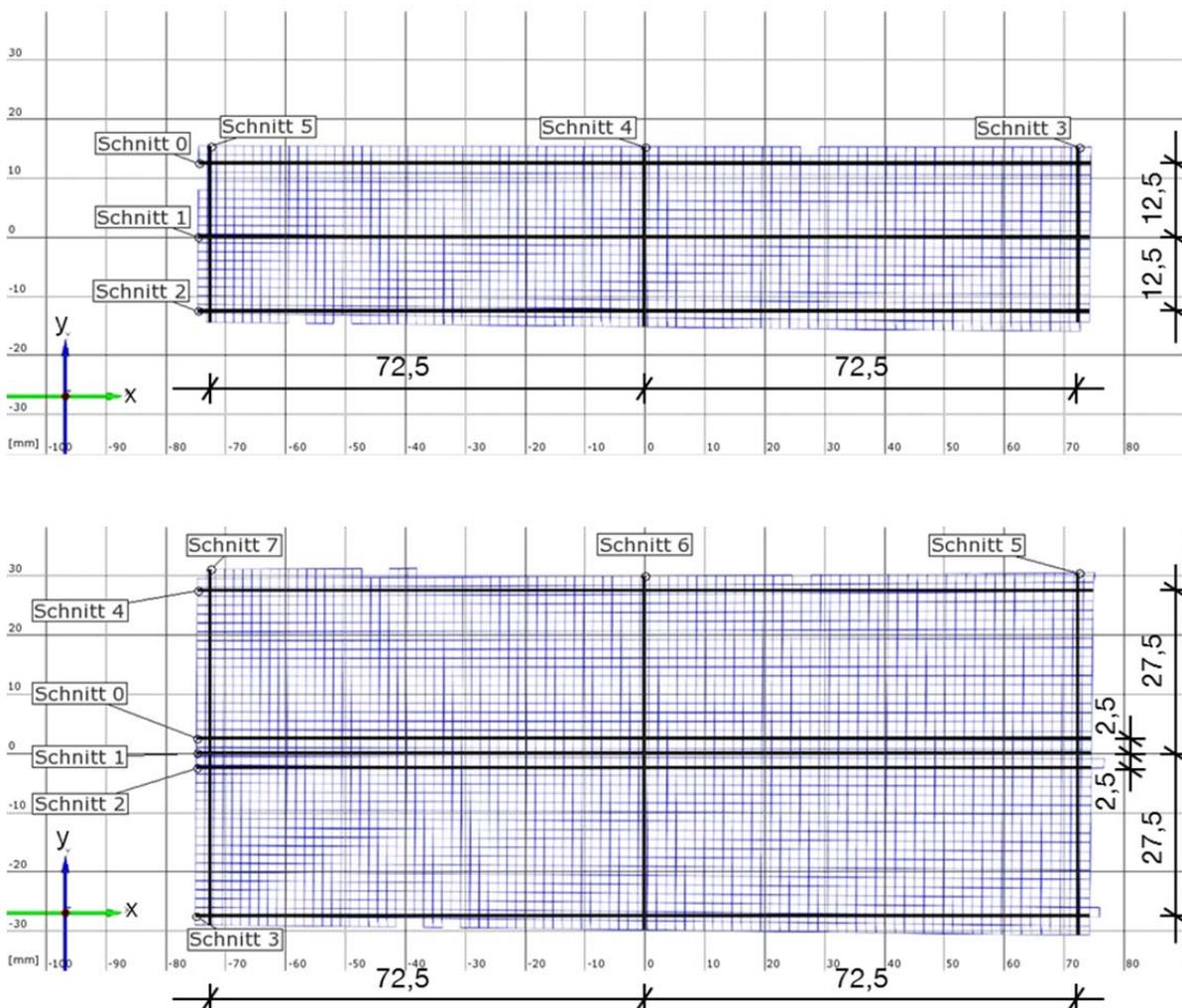


Abbildung 3-27: Schnittführung in dem Messfeld der Prüfkörper aus einer Lamelle, oben, und aus zwei Lamellen, unten. Maße in mm.

Das Aufbereiten der Messergebnisse begann mit einer Transformation des Messfeldes in eine Lage, bei der sich das Zentrum des Prüfkörpers möglichst genau im Ursprung des Koordinatensystems befand. Die Messdaten wurden anschließend sowohl bei Betrachtung des gesamten Messbereichs als auch an zuvor definierten Schnitten ausgewertet. Die Software Aramis

ermöglichte die einfache Eingabe der drei beziehungsweise sechs horizontalen und der jeweils drei vertikalen Schnitte, siehe Abbildung 3-27. Bei den aus zwei Lamellen verklebten Prüfkörpern wurden drei horizontale Schnitte in Nähe der Klebstoffuge definiert. Der waagerechte Schnitt 1 und der senkrechte Schnitt 4 beziehungsweise Schnitt 6 kreuzten sich jeweils im Ursprung des Koordinatensystems. Alle randnahen Schnitte wiesen einen Abstand von 2,5 mm zu einer angenommenen Umgrenzungslinie auf, die die Sollabmessung des Prüfkörpers nach dem Zuschneiden wiedergab. Da die Facetten die Kanten des Prüfkörpers oftmals nicht exakt abbildeten und die Ränder nach der Feuchteaufnahme nicht gerade verliefen, war eine Schnittführung mit einem geringeren Randabstand nicht sinnvoll.

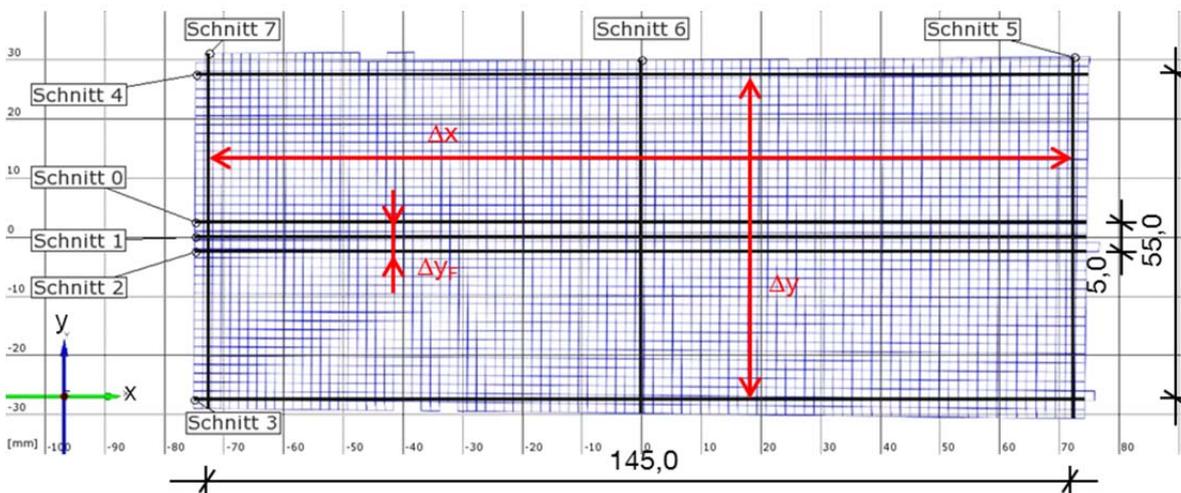


Abbildung 3-28: Lotrechte Abstände zwischen Schnitt 5–7, Δx , Schnitt 3–4, Δy , und Schnitt 0–2, Δy_F , am Beispiel eines Prüfkörpers aus zwei Lamellen im ursprünglichen Zustand der Referenzstufe 0. Analoge Bezeichnungen gelten bei Prüfkörper aus einer Lamelle mit $\Delta y = 25$ mm. Maße in mm.

Mit der Auswertung der Abstände paralleler Schnitte ließ sich ein Einfluss einer gemessenen Starrkörperverschiebung oder Starrkörperverdrehung weitgehend eliminieren. Mögliche Ursachen für solche Bewegungen waren eine veränderte Lage der Prüfkörper an den Auflagerpunkten und weitere Effekte aufgrund der Temperaturerhöhung, wie beispielsweise ein Verformen der Versuchseinrichtung oder eine Veränderung der optischen Verhältnisse. Die gewählten Abstände erfassten den Prüfkörper über seine Querschnittsbreite und -höhe, allerdings bei Vernachlässigung des Randbereichs. In Abbildung 3-28 werden die verwendeten Abstände am Beispiel eines Prüfkörpers aus zwei Lamellen dargestellt, analoges galt für einen Prüfkörper aus einer Lamelle.

3.3.2 Versuchsergebnisse

Messrauschen

Die Güte der optischen Messergebnisse hing von einer Vielzahl äußerer Einflussfaktoren ab. Das Messrauschen diente als Maß zur Kontrolle der Messdatenqualität. Dazu wurden die am Anfang und Ende einer Messung und innerhalb weniger Sekunden aufgenommenen Stufen analysiert. Die Differenz der Koordinatenwerte zum ursprünglichen Zustand, Referenzstufe 0, gab dabei Auskunft über die Messfehler bei praktisch unveränderter Prüfkörpergeometrie. In Abbildung 3-29 ist beispielhaft das Datenrauschen anhand der ersten zehn Messbilder eines verklebten Prüfkörpers dargestellt. Ohne Störeinflüsse sollte die y-Koordinate des Schnittes 1 in den Stufen 1 bis 9 nicht vom Wert 0 abweichen. Ein merklicher Sprung in den Messkurven der Schnitte von Stufe 4 nach 5 um etwa 0,005 mm fiel nach dem Einschalten der Heizung und Lüftung auf. Zum Ende einer Messreihe, Stufen 106 bis 110, ergab sich ein geringeres Messrauschen als bei den ersten zehn Stufen. Stichproben zeigten insgesamt, dass der Betrag der Koordinatenabweichungen über den gesamten Messbereich im Mittel deutlich kleiner als 0,02 mm war und bestätigten daher die ausreichende Genauigkeit der optischen Messungen für den vorgesehenen Anwendungsbereich.

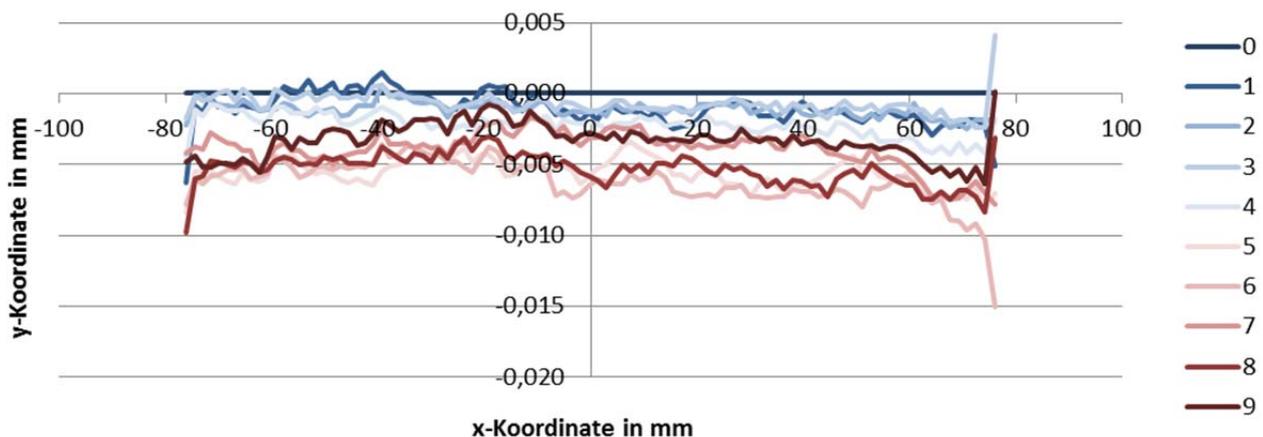


Abbildung 3-29: Messrauschen der y-Koordinaten des Schnittes 1, Stufe 0 bis 9. Darstellung der Kurven vor dem Einschalten der Heizung und Lüftung in Blau, nach dem Einschalten in Rot. Prüfkörper aus Buche, zwei Lamellen, Klimafolge K1.

Holzfeuchtigkeit

Die Veränderung des Volumens der Hölzer und die einhergehenden Dehnungen resultierten vor allem aus dem Verlust an Holzfeuchtigkeit im Trocknungssofen. Die Prüfkörper wiesen zu Beginn der optischen Messung in Abhängigkeit von der Holzart und jeweiliger Klimafolge eine unterschiedliche Holzfeuchtigkeit auf, siehe Abbildung 3-30. Bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit in der Sorptionsphase nahm die Anfangsholzfeuchtigkeit von Klimafolge K1 zu K3 merklich zu. Dazu analog verlief der Verlust an Holzfeuchtigkeit bei der anschließenden 24-stündigen Trocknung im Klima 40/25. Die maximale Differenz der mittleren Holzfeuchte zwischen Beginn und Ende der optischen Messung betrug in der Klimafolge K3 etwa 3 %.

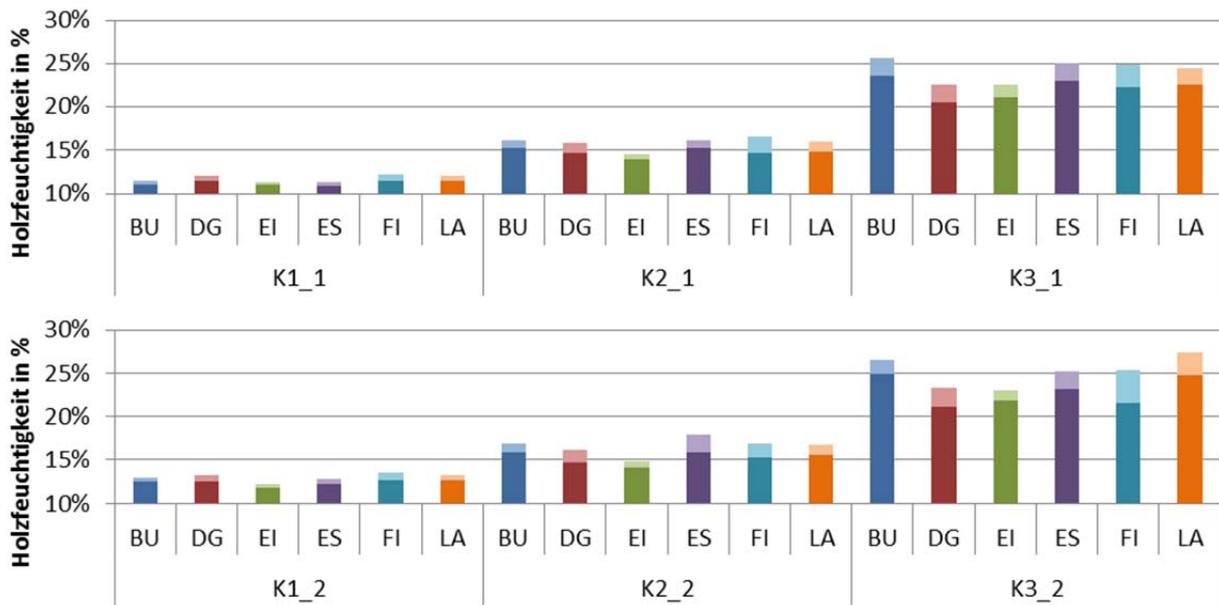


Abbildung 3-30: Mittlere Holzfeuchte zu Beginn/am Ende der Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3. Prüfkörper aus einer Lamelle, oben, und zwei Lamellen, unten.

Bei den Prüfkörpern der Klimafolge KD fielen die Unterschiede demgegenüber sehr viel höher aus, siehe Abbildung 3-31. Bei etwa 24-stündiger Trocknung im Klima 65/10 reduzierte sich der Wasseranteil zwischen 36 % und 139 % Holzfeuchte. Die Auswertung der mittleren Holzfeuchte in den Klimafolgen zeigte generell, dass die Prüfkörper aus Eiche nach der Sorptionsphase eine vergleichsweise geringe Holzfeuchtigkeit und nach der Trocknung die geringste Holzfeuchtedifferenz aufwiesen. Demgegenüber gaben vor allem die Hölzer aus Fichte bei hohen Anfangswerten viel Feuchtigkeit in der Trocknungsphase ab, siehe auch Tabelle 12-9 und Tabelle 12-10 im Anhang 12.2.

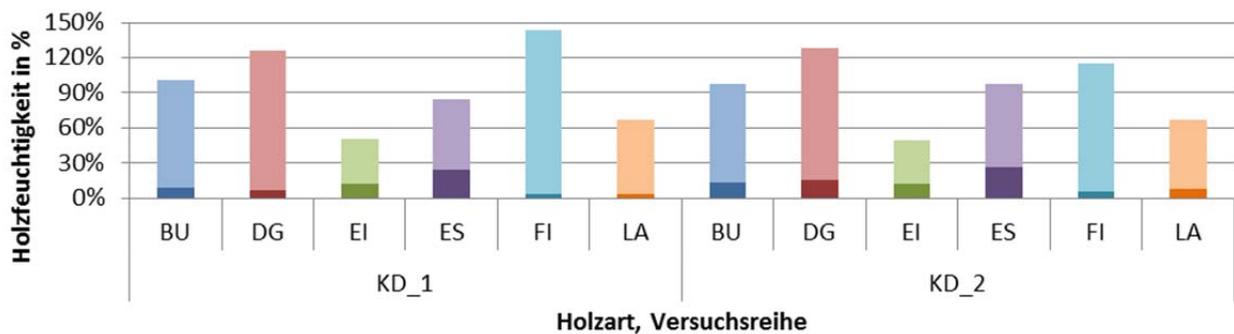


Abbildung 3-31: Mittlere Holzfeuchte zu Beginn/am Ende der Trocknungsphase der Klimafolge KD. Prüfkörper aus einer Lamelle und zwei Lamellen.

Verformungen der Schnittlinien

Die optischen Messungen veranschaulichten die Deformationen der dem Messsystem zugewandten Stirnseite der Prüfkörper. Die Verschiebungen wurden in einem kartesischen Koordinatensystem bestimmt. Eine Verformung in x-Richtung setzte sich daher aus einer tangentialen und radialen Komponente des Holzes zusammen. Analoges galt für eine Verformung in y-Richtung. Eine Verformung in z-Richtung, das heißt in Faserlängsrichtung, wurde nicht betrachtet.

Das Deformationsverhalten der Prüfkörper ließ sich in jeder Zeitstufe anhand der geänderten Koordinaten der Messpunkte analysieren. Aufgrund ihrer identisch definierten Lage im Koordinatensystem boten sich die Schnittlinien für einen Vergleich bei fortschreitender Trocknungsdauer an. Die Schnitte wiesen einen Randabstand zur Kante der Prüfkörper auf, vergleiche Abbildung 3-27, sodass nicht unbedingt die Höchstwerte der Verformung erfasst wurden. Die Verformung der Schnitte und damit das Schwinden des Prüfkörpers nach 24-stündiger Trocknung ist in Abbildung 3-32 exemplarisch dargestellt. Die Referenzstufe 0 markiert den ursprünglichen Zustand zu Beginn der optischen Messung. Die jetzt noch geraden Schnittlinien umgrenzen ein bei allen Prüfkörpern gleichgroßes Rechteck, verlaufen also parallel beziehungsweise orthogonal zueinander. Unterschiedliche Schnittlinienlängen ergeben sich bei mangelhaften Facetten am Rand und in Folge der deformierten Prüfkörpergeometrie. Die beiden Schnittpunkte der geraden und verformten Schnittlinie 3 befanden sich im Bereich der Auflager des Prüfkörpers. Generell erfolgte die Auswertung der Koordinaten der Schnittlinien, die die 24-stündige Messdauer umfasste, in Laststufen mit einem Zeitabstand von einer halben Stunde in den ersten sechs Stunden und anschließend mit einer Stunde Zeitabstand.

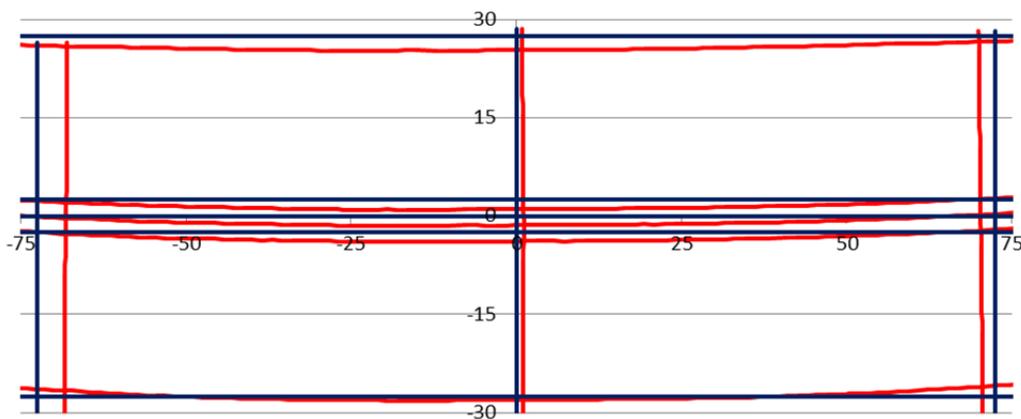


Abbildung 3-32: Schnitte 0 bis 7 bei Referenzstufe 0, blau, und nach 24 h Trocknung, rot. Klimafolge KD, Buche, 2 Lamellen.

Die Lage und die Form der Schnittlinien änderten sich bei abnehmender Holzfeuchtigkeit während der Trocknungsphase. In Abbildung 3-33 werden der horizontale Schnitt 0 und der vertikale Schnitt 3 von zwei Prüfkörpern zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Der vertikale Schnitt verformte sich bei beiden Hölzern zunächst in positiver x-Richtung. Trotz Trocknungslagerung verringerte sich anschließend der Abstand der Schnittlinie zum Koordinatenursprung nicht immer

gegenüber der Ausgangslage zum Zeitpunkt $t = 0$. Zudem war eine Zunahme des y -Koordinatenwertes über weite Teile des horizontalen Schnittes während der gesamten Trocknungsdauer erkennbar. An den Schnittenden verringerte sich der Wert der y -Koordinate hingegen erwartungsgemäß.

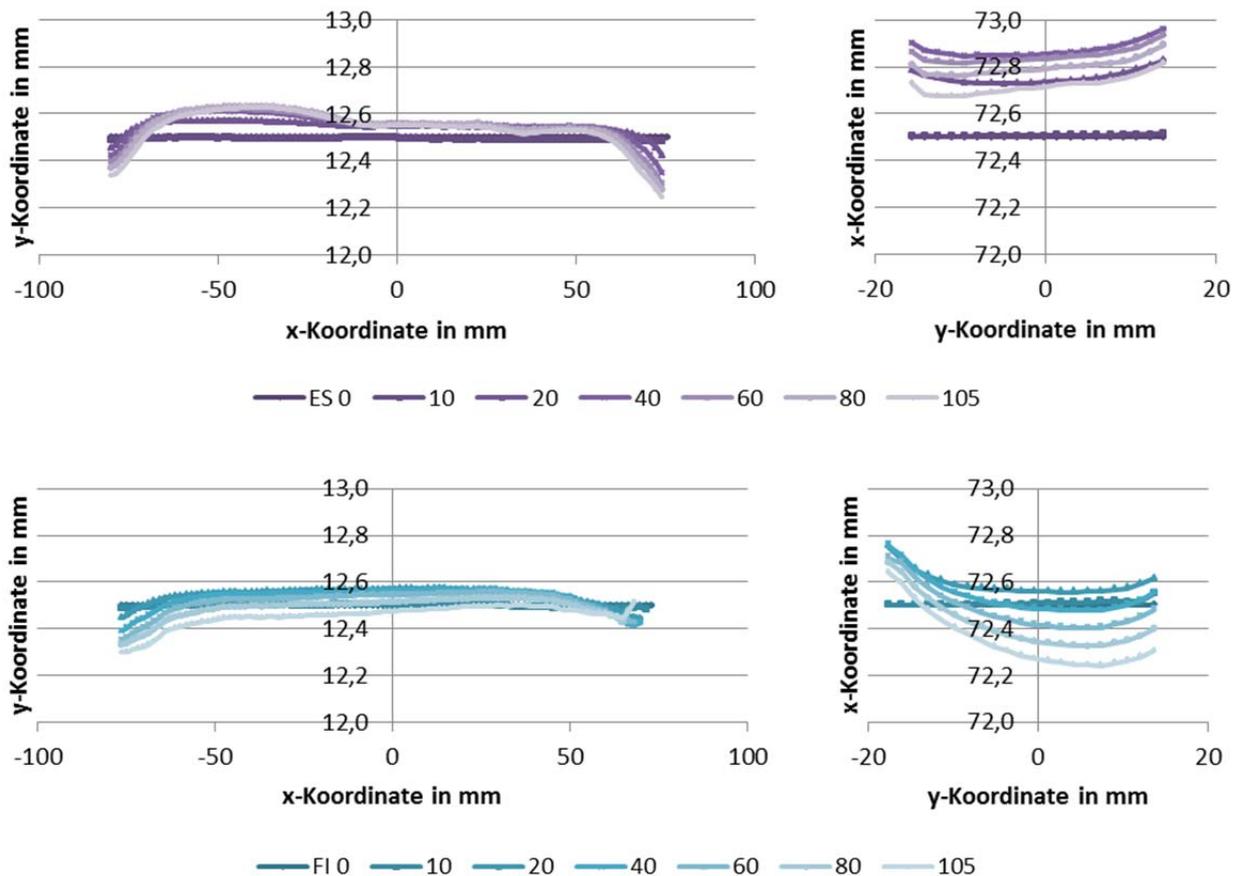


Abbildung 3-33: y-Koordinate des Schnittes 0, links, und x-Koordinate des Schnittes 3, rechts, bei Referenzstufe 0 und sechs weiteren Zeitstufen, 10 = 0 h bis 105 = 24 h, der Trocknungsphase K3. Prüfkörper aus Esche, oben, und Fichte, unten, jeweils aus einer Lamelle bestehend.

Die Betrachtung des Abstandes der Schnitte zueinander schloss einen möglichen Einfluss einer Starrkörperverschiebung oder Starrkörperverdrehung aus. Veränderungen des Querschnitts über die Breite und Höhe stellt Abbildung 3-34 anhand der Koordinatendifferenzen Δx und Δy dar. Die Reduzierung der Querschnittshöhe an dem linken und rechten Rand der Prüfkörper verlief zunächst zeitgleich mit einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Zunahme der Querschnittsbreite. Am Ende blieb der Abstand Δx bei diversen Hölzern größer als zu Beginn der Trocknungsphase, und zwar über die gesamte Querschnittshöhe.

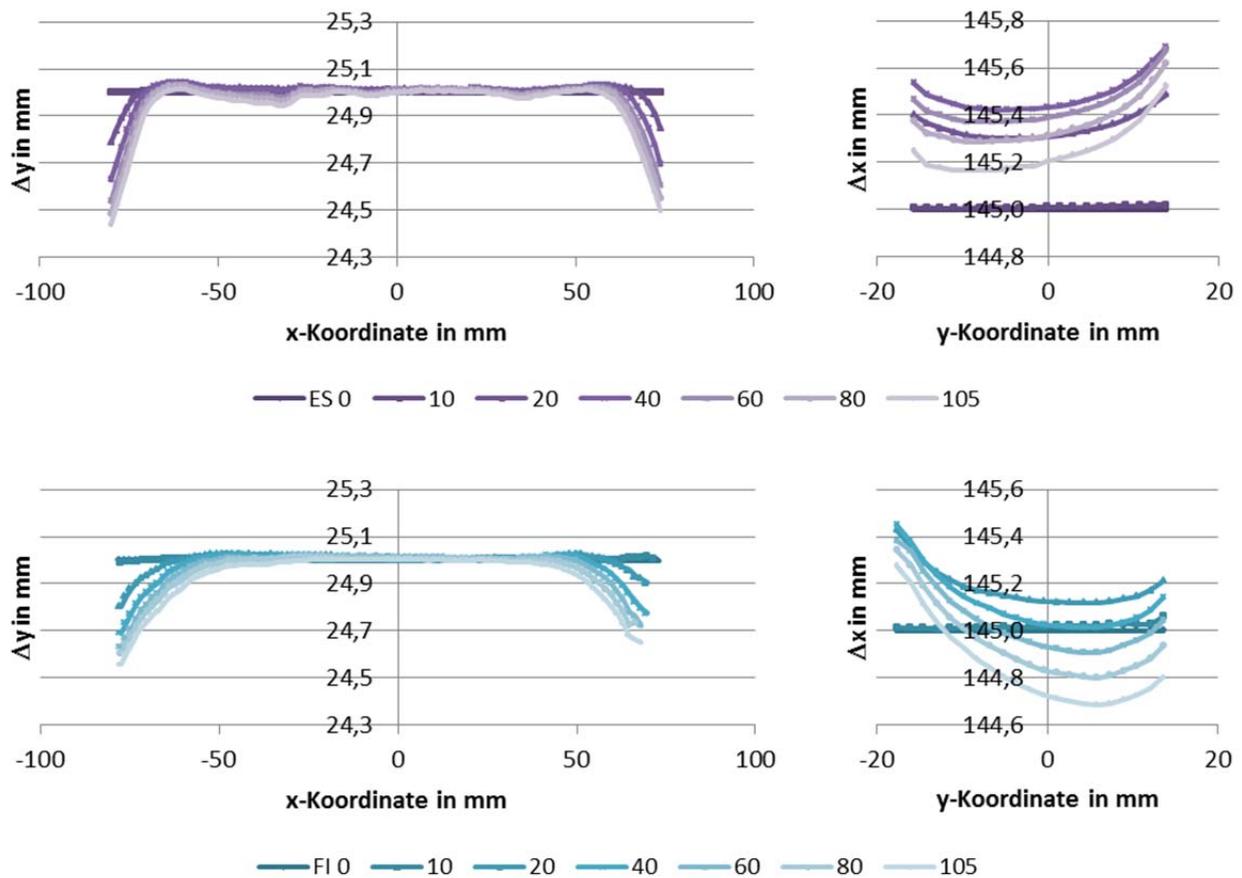


Abbildung 3-34: Abstand Δy , links, und Δx , rechts. Referenzstufe 0 und sechs Zeitstufen, 10 = 0 h bis 105 = 24 h, der Trocknungsphase K3. Prüfkörper aus Esche, oben, und Fichte, unten, jeweils aus einer Lamelle bestehend.

Um die zeitliche Veränderung der Querschnittsbreite weiter zu verdeutlichen, wurde der über die Höhe variierende Abstand Δx zu einem Mittelwert Δx_{MW} zusammengefasst. In Abhängigkeit von der Holzart und der Anfangsholzfeuchtigkeit fiel sowohl die Abstandsvergrößerung zwischen den vertikalen Schnittlinien als auch die anschließende Abstandsminderung unterschiedlich stark aus, siehe Abbildung 3-35. Die Vergrößerung und Verkleinerung des Abstandes Δx_{MW} verliefen dabei mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ab.

In den Klimafolgen K1 bis K3, also bei Diffusion in Richtung der Schmalseiten, vergleichsweise geringer Holzfeuchtigkeit und deutlich niedrigerer Temperatur als bei Klimafolge KD, wiesen nach 24-stündiger Trocknung vor allem die Laubhölzern einen im Mittel breiteren Querschnitt als zu Beginn auf, siehe Abbildung 3-36. Bei den Nadelhölzern lag der mittlere Abstand Δx_{MW} zum Ende der Trocknung meist unter dem Referenzabstand. Der Abstand der vertikalen, ursprünglich parallelen Schnittlinien zu Beginn der Messung definierte den Referenzabstand.

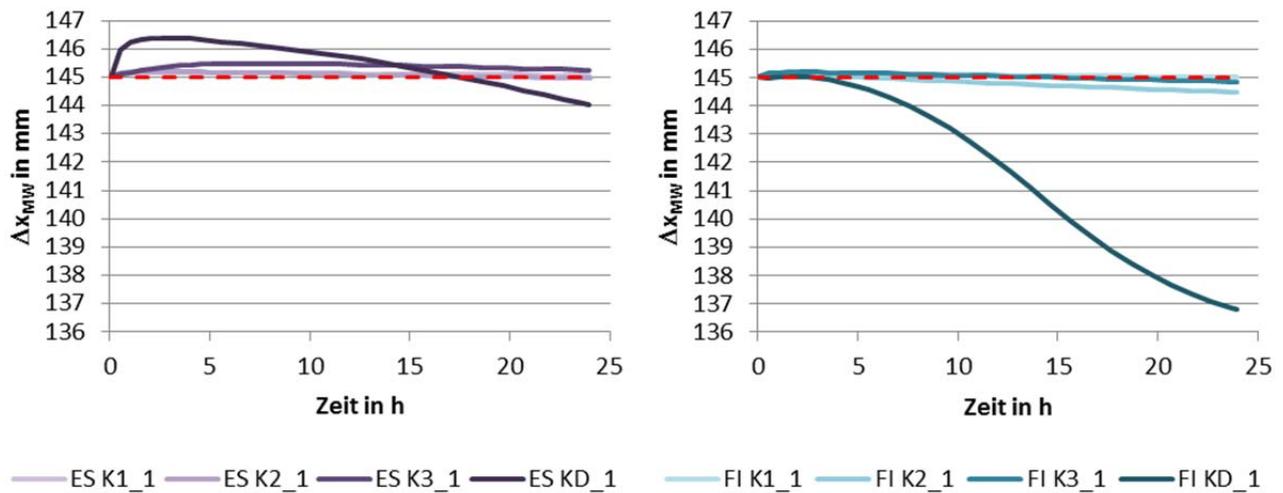


Abbildung 3-35: Zeitlicher Verlauf des mittleren Abstandes Δx_{MW} in den Trocknungsphasen K1, K2, K3 und KD. Prüfkörper aus Esche, links, und Fichte, rechts, jeweils aus einer Lamelle bestehend. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand von 145,0 mm zum Zeitpunkt $t = 0$.

Auffallend große Unterschiede ergaben sich bei Klimafolge KD, die jedoch keine Gruppierung nach Laubholz oder Nadelholz zuließ, siehe auch Abbildung 3-37. Abbildung 12-5 und Abbildung 12-6 im Anhang 12.2 geben die maximalen und minimalen Abstandsänderungen Δx der betrachteten Holzarten und Klimafolgen wieder.

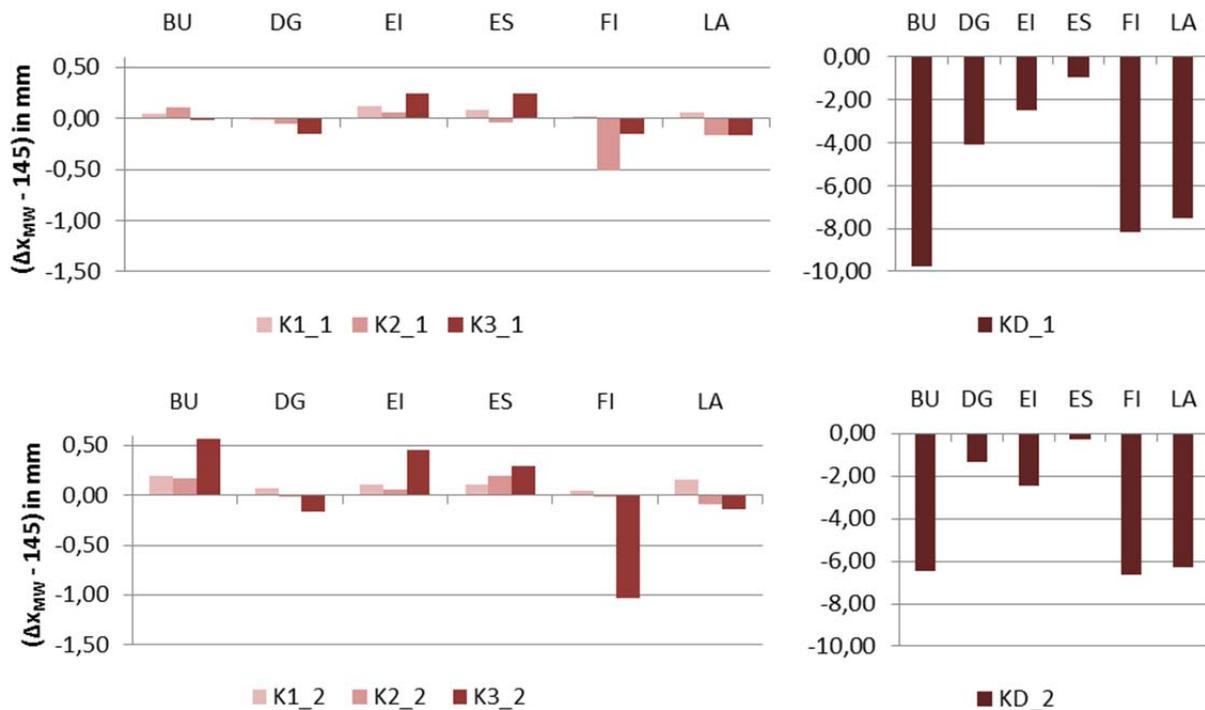


Abbildung 3-36: Mittlere Abstandsänderung Δx_{MW} zum Referenzabstand 145,0 mm nach 24 h Trocknung. Prüfkörper der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper aus einer Lamelle, oben, und aus zwei Lamellen, unten.

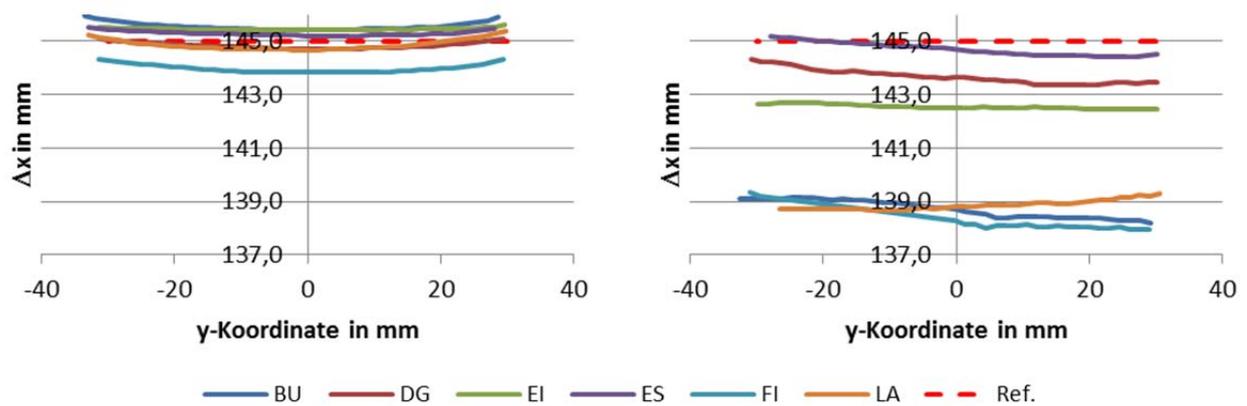


Abbildung 3-37: Abstand Δx nach 24 h Trocknung. Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand zum Zeitpunkt $t = 0$.

Abbildung 3-38 und Abbildung 3-39 geben Auskunft über die Änderung der Querschnittshöhe. Die negativen Abstandsänderungen Δy nahmen von der Trocknungsphase der Klimafolge K1 zu der Klimafolge KD merklich zu. Analog zu den Verformungen bei Klimafolge KD in Richtung der Querschnittsbreite verringerte sich bei den verklebten Hölzern aus Buche, Fichte und Lärche die Höhe deutlicher als bei Douglasie, Eiche und Esche.

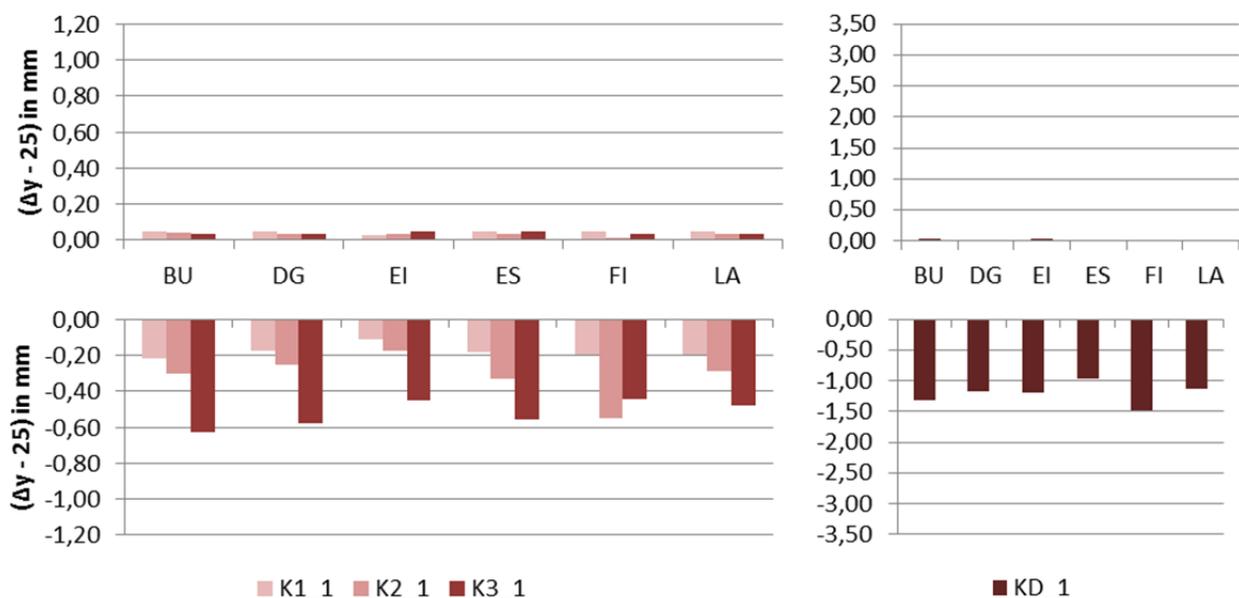


Abbildung 3-38: Abstandsänderung Δy zum Referenzabstand 25,0 mm. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten. Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus einer Lamelle.

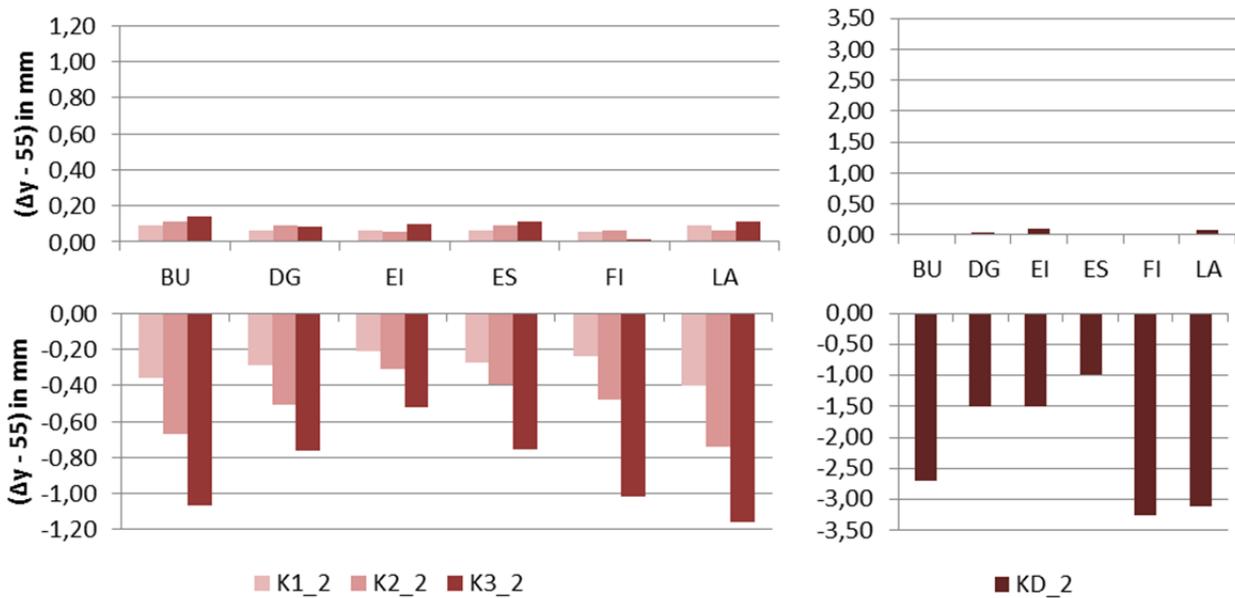


Abbildung 3-39: Abstandsänderung Δy zum Referenzabstand 55,0 mm. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten. Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen.

In der Trocknungsphase der Klimafolgen K1 bis K3 nahm die Querschnittshöhe am linken und rechten Prüfkörpertrand deutlich ab, mittig fiel die Veränderung merklich kleiner aus. Bei Klimafolge KD und Feuchtigkeitstransport zu den Stirnseiten zeigten vor allem Buche, Fichte und Lärche eine deutliche Abnahme der Querschnittshöhe am Rand. Eiche, Douglasie und Esche wiesen eine insgesamt gleichmäßigere und geringere Abnahme auf, siehe Abbildung 3-40.

Bei allen betrachteten Holzarten und Klimafolgen vergrößerte sich während der Trocknungsphase also die Querschnittsfläche zwischen den äußeren Schnitten zunächst unterschiedlich stark bevor sich dann Querschnittsbreite und -höhe verringerten.

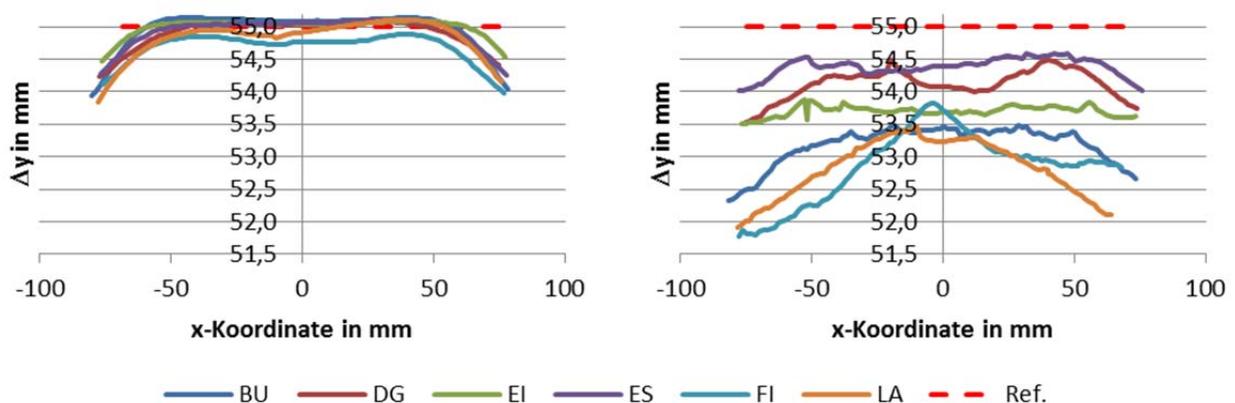


Abbildung 3-40: Abstand Δy nach 24 h Trocknung. Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand zum Zeitpunkt $t = 0$.

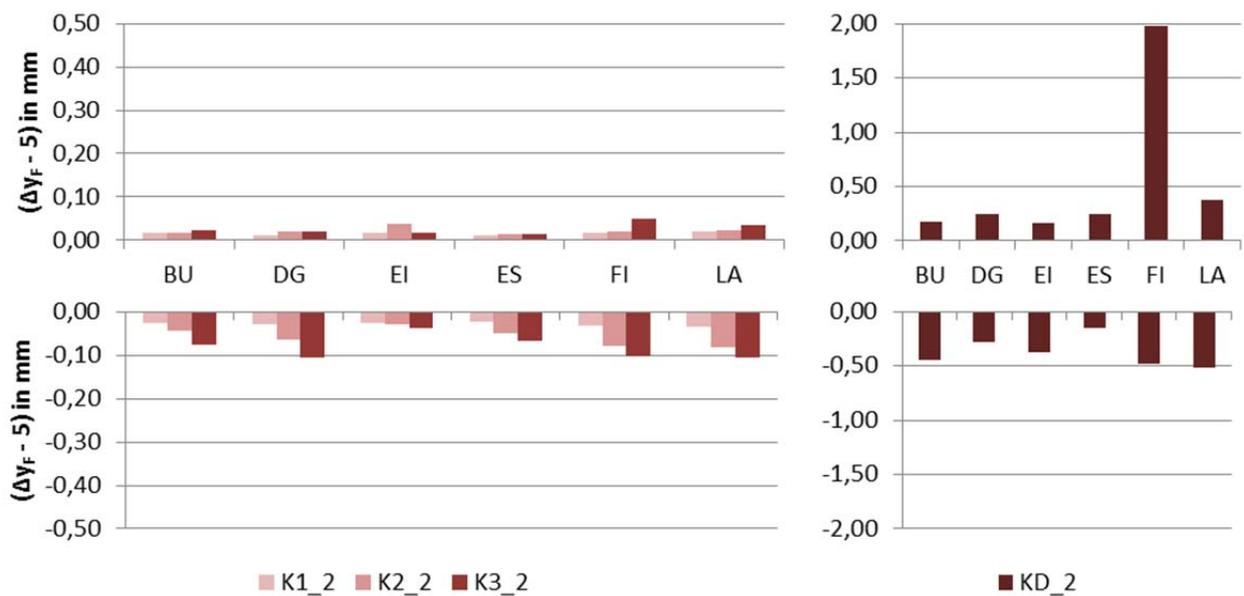


Abbildung 3-41: Abstandsänderung Δy_F zum Referenzabstand 5,0 mm. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten. Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen.

Auch im Bereich der Klebefuge war das Ausmaß der Verformungen bei den Klimafolgen K1 bis K3 im Vergleich zur Klimafolge KD wesentlich geringer ausgeprägt, siehe Abbildung 3-41. Bei Trocknung der wassergesättigten Prüfkörper prägten hohe Amplituden den Kurvenverlauf des Abstandswertes Δy_F . Besonders auffällig war der Graph der Fichte, der zur Prüfkörpermitte hin einen besonders starken, nahezu symmetrischen Anstieg der Verformung zeigte, siehe Abbildung 3-42.

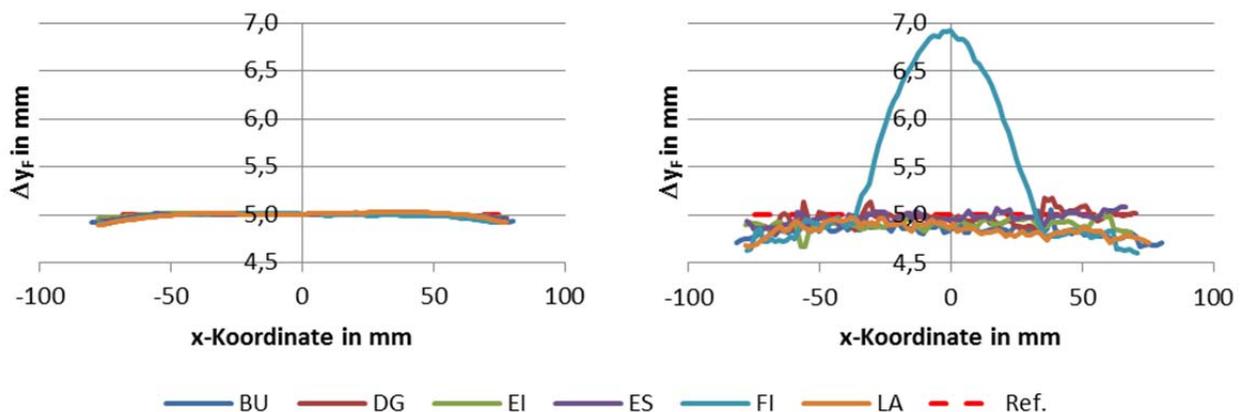


Abbildung 3-42: Abstand Δy_F nach 24 h Trocknung. Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand zum Zeitpunkt $t = 0$.

Dehnungen der Schnittlinien

Die betrachteten technischen Dehnungen geben die auf den Ursprungszustand bezogenen Verformungen wieder. Dehnungen ε_x beschreiben dabei die relativen Längenänderungen in Richtung der Querschnittsbreite, Dehnungen ε_y in Richtung der Querschnittshöhe. Die Schubverzerrungen ε_{xy} entsprechen dem Scherwinkel γ_{xy} . Die nachstehenden Auswertungen erfolgten am Schnitt 1, der in unmittelbarer Nähe zur Klebefuge verlief.

Bei den Klimafolgen K1 bis K3 zeigten die Graphen Dehnungen mit qualitativ gleichem Verlauf. Trotz Anisotropie führte das natürlich gewachsene Material zu annähernd symmetrischen beziehungsweise antimetrischen Kurven. Die Höchstwerte der Dehnungen und Verzerrungen traten erwartungsgemäß an den Rändern der Prüfkörper auf. Negative Dehnungswerte ε_x und ε_y ergaben sich an den Schnittenden, dazwischen waren hauptsächlich positive Werte feststellbar. Die Kurven der Klimafolge KD verliefen dagegen unregelmäßig mit hohen positiven und negativen Amplituden. Abbildung 3-43 stellt die Graphen der Dehnungen und Schubverzerrungen nach Ende der Klimafolgen K3 und KD dar. Risse im Prüfkörper der Klimafolge KD verursachten fehlende Messwerte und Lücken in den Kurven.

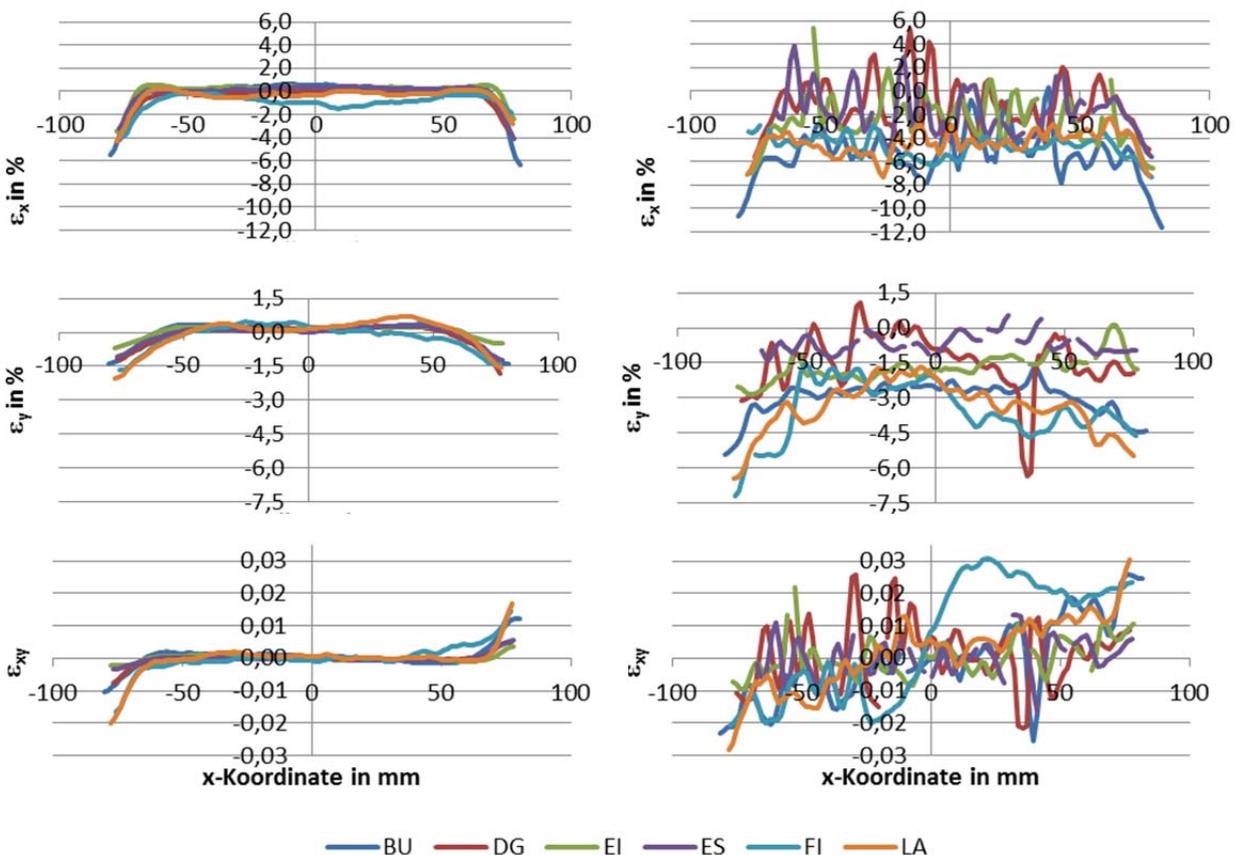


Abbildung 3-43: Dehnungen ε_x , ε_y und Schubverzerrung ε_{xy} im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, nach 24 h Trocknung in der Klimafolge K3, links, und KD, rechts.

In Abbildung 3-44 sind die maximalen und minimalen Dehnungswerte, in Abbildung 3-45 die maximalen Beträge der Schubverzerrung im Bereich der Klebefuge dargestellt. Die Auswertung umfasste fünf Zeitstufen der optischen Messung: 2 h, 4 h, 8 h, 16 h und 24 h. Eine deutliche Zunahme der Dehnungen und Schubverzerrungen ließ sich bei der Klimafolge KD gegenüber den Klimafolgen K1 bis K3 feststellen. Bei Betrachtung der Höchstwerte aller Klimafolgen fiel keine Holzart auf, die ausnahmslos die minimalsten oder maximalsten Dehnungswerte aufwies.

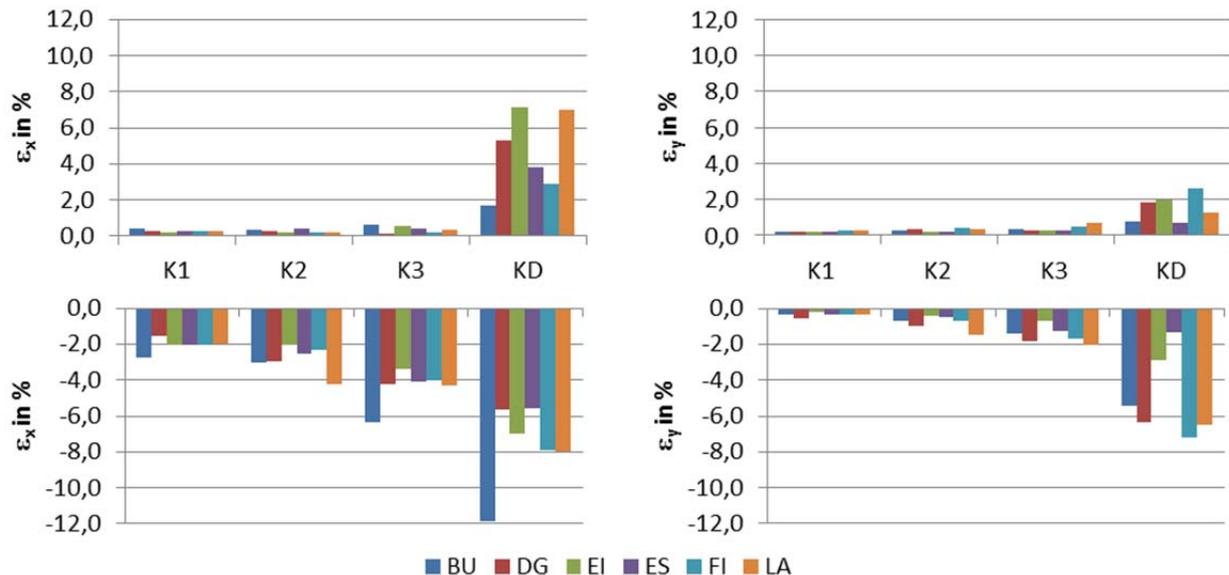


Abbildung 3-44: Dehnungen ϵ_x , links, und ϵ_y , rechts, im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, bei Auswertung von fünf Zeitschritten. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten.

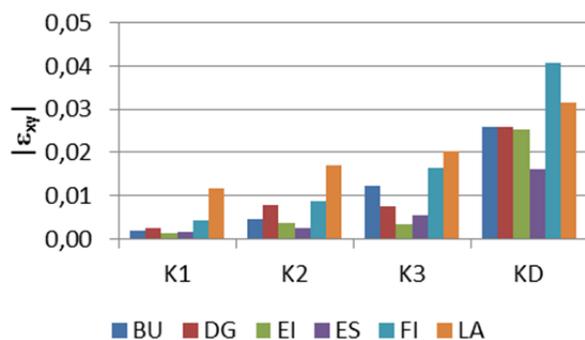


Abbildung 3-45: Maximaler Betrag der Schubverzerrung ϵ_{xy} im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, bei Auswertung von fünf Zeitschritten.

Bei Klimafolge KD erreichten die Hölzer teilweise bereits vor Ende der 24-stündigen Trocknung ihren Dehnungshöchstwert. Die Darstellung der Dehnungen ϵ_x offenbart das unterschiedliche Trocknungsverhalten zu verschiedenen Zeitpunkten, siehe Abbildung 3-46. Außer Eiche zeigten alle Hölzer nach zwei Stunden Trocknung noch regelmäßige Graphen, nach vier Stunden wiesen lediglich die Kurven der Buche und Douglasie noch keine ausgeprägten Dehnungsamplituden auf.

Zu diesem Zeitpunkt traten bei Eiche bereits die ermittelten Spitzenwerte auf. Nach 24-stündiger Trocknung ließen dann alle Hölzern hohe positive und negative Amplituden erkennen, die auf eine große Beanspruchung hindeuteten.

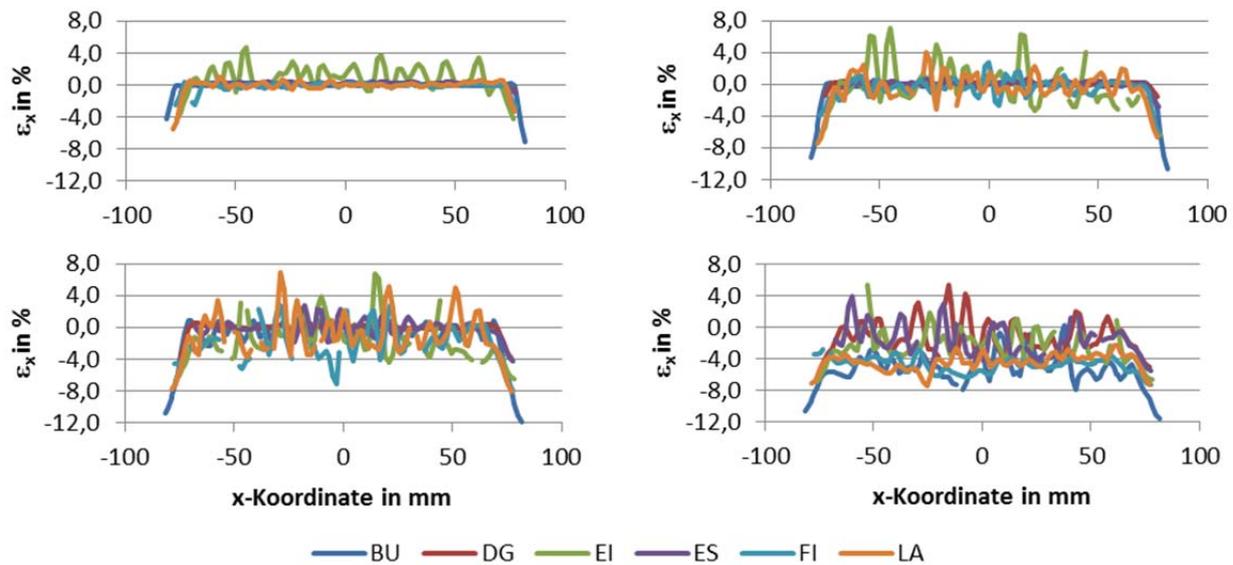


Abbildung 3-46: Dehnungen ε_x im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, nach 2 h, 4 h, 8 h und 24 h Trocknung in der Klimafolge KD. Anordnung der Diagramme mit aufsteigender Trocknungsdauer in Leserichtung von links nach rechts und oben nach unten.

Dehnungen im gesamten Messbereich

Die Dehnungswerte des gesamten Messbereichs schlossen die Ausreißer und Messwerte von einigen ungenügenden Facetten ein. Der Vergleich der Dehnungswerte und Verzerrungen ergab auch daher ein insgesamt sehr uneinheitliches Bild. Wie bei der Auswertung der Schnitte zeigte sich, dass über alle Klimafolgen die Minima und Maxima der unterschiedlichen Dehnungswerte nicht von derselben Holzart erreicht wurden. Lediglich die maximale negative Dehnung ε_x wurde mit einer Ausnahme durchweg bei den Prüfkörpern aus Buche gemessen, siehe Tabelle 12-11 im Anhang 12.2.

Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Dehnungsspitzenwerte führte zu Kurven, die das Verhalten der Prüfkörper wohl nur bedingt wiedergaben. Die Graphen in Abbildung 3-47 und Abbildung 3-48 bilden Messdaten ab, die auf dem gleitenden Median über fünf aufeinanderfolgende Zeitschritte basierten, siehe analog dazu Gleichung (3-4). Trotz der Glättung der Messergebnisse prägten bei manchen Hölzern Extremwerte die Graphen, die lokal nur sehr begrenzt auftraten. Beispielsweise verursachten bei dem Prüfkörper aus Eiche nur wenige, ungenügende Facetten die hohen maximalen Dehnungswerte ε_y in der Trocknungsphase der Klimafolge K3. Der zugehörige Bereich, die linke obere Ecke des Messbereichs, umfasste dabei nicht mehr als 0,2 % der Gesamtfläche, vergleiche auch Abbildung 3-52. Offenbar wurden mit der Filterfunktion der Software Aramis bei den verwendeten Voreinstellungen lokale Extremwerte nicht immer eliminiert.

So ließen sich die Kurvenschwankungen der Prüfkörper aus Buche und Douglasie der Klimafolge K3 ebenfalls auf Ausreißer zurückführen. Bei der überwiegenden Anzahl der Prüfkörper der Klimafolge K3 nahmen die Beträge der positiven und negativen Dehnungen mit fortschreitender Trocknungszeit zu und näherten sich stetig, asymptotisch einem Höchstwert. Bei der Klimafolge KD galt für manche Hölzer hingegen, dass der Maximalwert während und nicht am Ende der Trocknungsphase erreicht wurde. Ein solches Verhalten ließ sich unter anderem anhand der positiven Dehnungen von Fichte und Lärche ablesen. Bemerkenswert bei der Fichte war darüber hinaus, dass die Höchstwerte der Dehnungen am Ende der Trocknung negative Beträge aufwiesen. Damit war der Prüfkörper, bei Annahme eines anfänglich spannungslosen Zustandes, am Ende der optischen Messung frei von Zugspannungen.

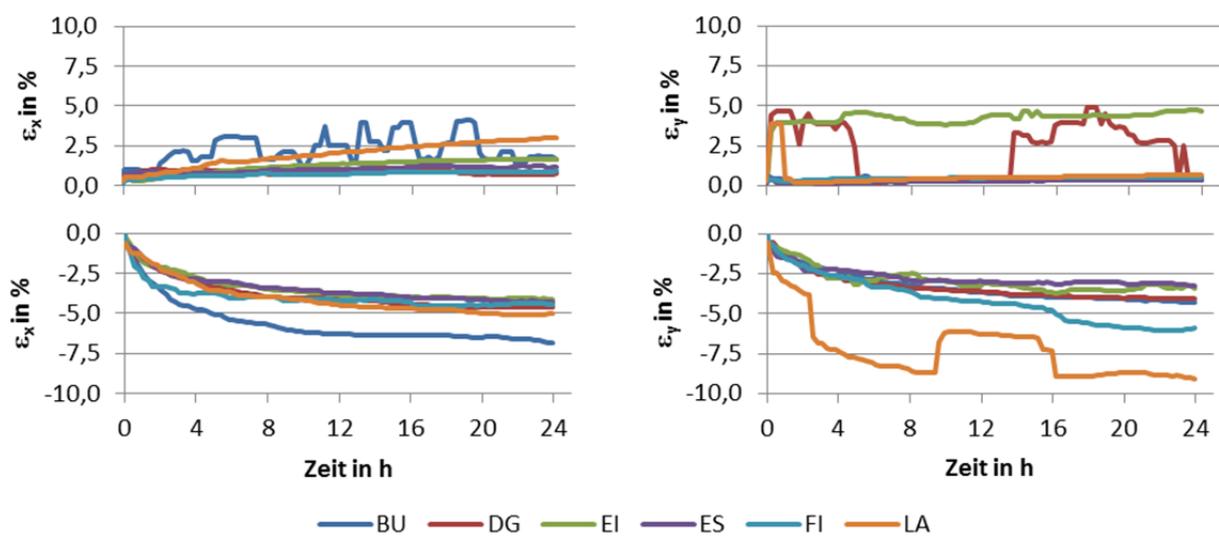


Abbildung 3-47: Dehnungen ε_x , links, und ε_y , rechts. Maximal-, oben, und Minimalwerte, unten, des gesamten Messbereichs. Trocknungsphase Klimafolge K3. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen.

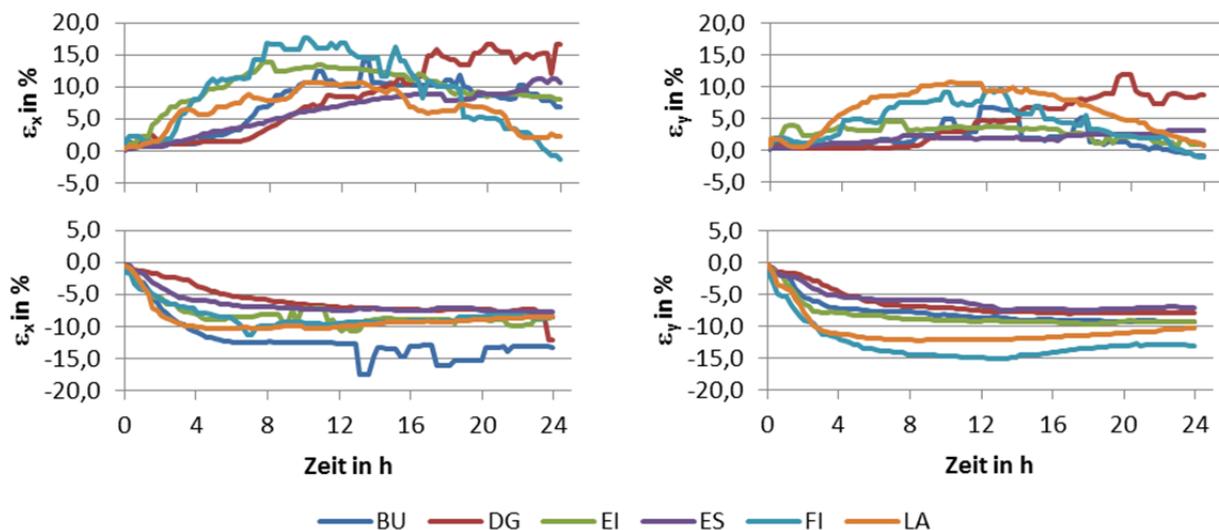


Abbildung 3-48: Dehnungen ε_x , links, und ε_y , rechts. Maximal-, oben, und Minimalwerte, unten, des gesamten Messbereichs. Trocknungsphase Klimafolge KD. Prüfkörper aus zwei Lamellen.

Die Messbilder der sechs betrachteten Hölzer verdeutlichen die vergleichsweise geringen Dehnungen der Prüfkörper aus Eiche, siehe Abbildung 3-49 und Abbildung 3-50. Buche, Fichte und Lärche ließen dagegen flächenhaft relativ hohe Dehnungswerte erkennen. Lokale Spitzenwerte traten bei allen Hölzern in Klimafolge KD im Bereich von Rissen auf.

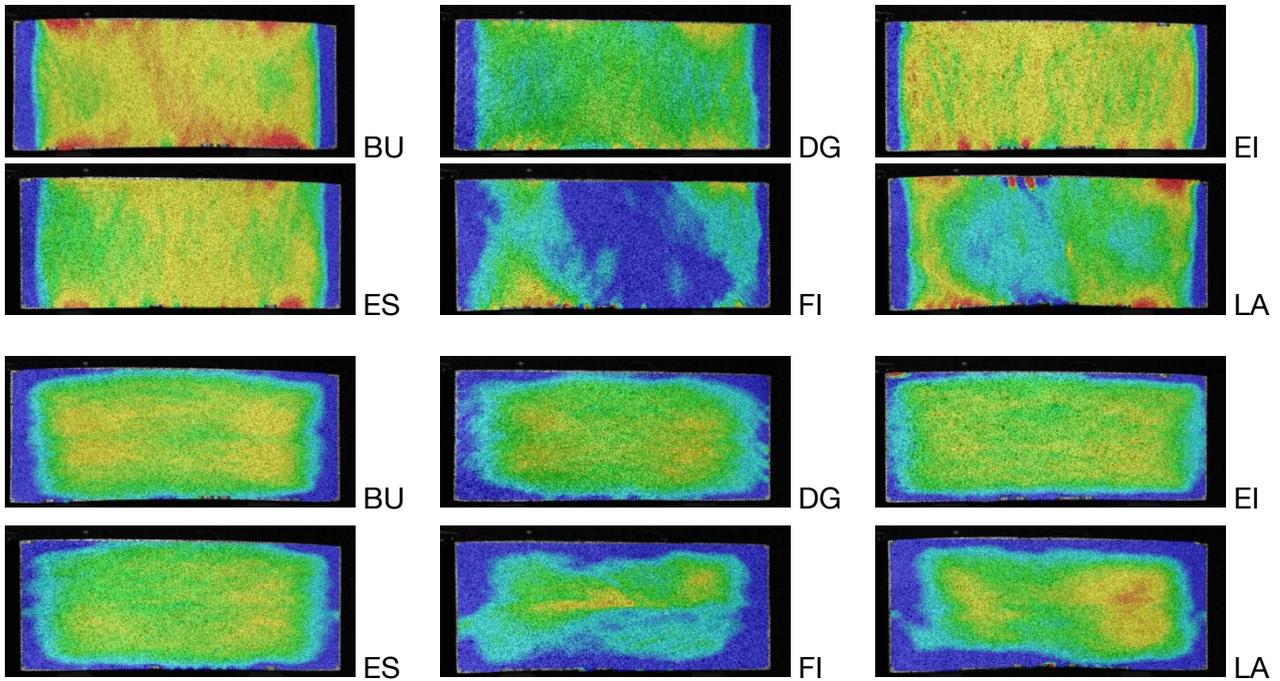


Abbildung 3-49: Dehnungen ϵ_x , oben, und ϵ_y , unten, nach 24 h Trocknung in der Klimafolge K3. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -1,0 %, blau, und 1,0 %, rot.

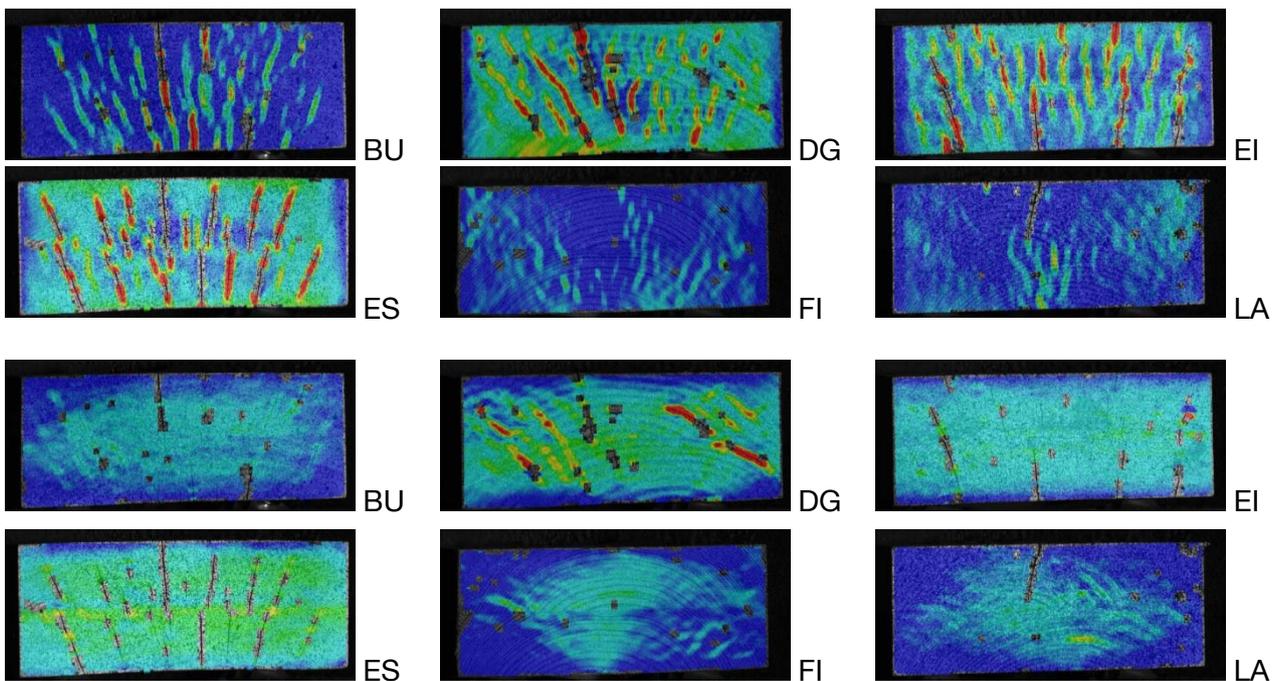


Abbildung 3-50: Dehnungen ϵ_x , oben, und ϵ_y , unten, nach 24 h Trocknung in der Klimafolge KD. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -5,0 %, blau, und 5,0 %, rot.

Die stetige Zunahme der negativen Dehnungen bei den an die Nutzungsklassen der Holzbaunorm DIN EN 1995-1-1 angelehnten Klimafolgen erfolgte vom Rand zur Prüfkörpermitte. In Abbildung 3-51 und Abbildung 3-52 zeigen drei Zeitstufen die Zunahme der Dehnungen am Rand mit fortschreitender Trocknungsdauer für die Prüfkörper aus Eiche und Fichte der Klimafolge K3. Die hohen Dehnungswerte ε_y am linken, oberen Eck deuteten bei dem Prüfkörper aus Eiche auf Fehlmessungen hin, die auf ungenügenden Facetten basierten. Der Einfluss der Fuge zwischen den zwei verklebten Lamellen ließ sich vor allem bei der Fichte anhand der Dehnungen ε_y erkennen.

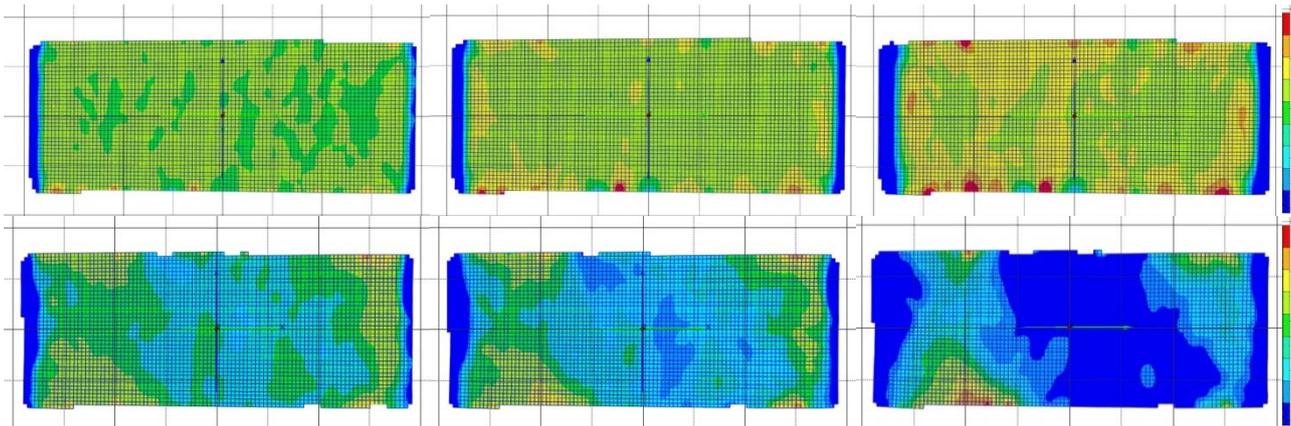


Abbildung 3-51: Dehnungen ε_x nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge K3. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -1,0 %, blau, und 1,0 %, rot.

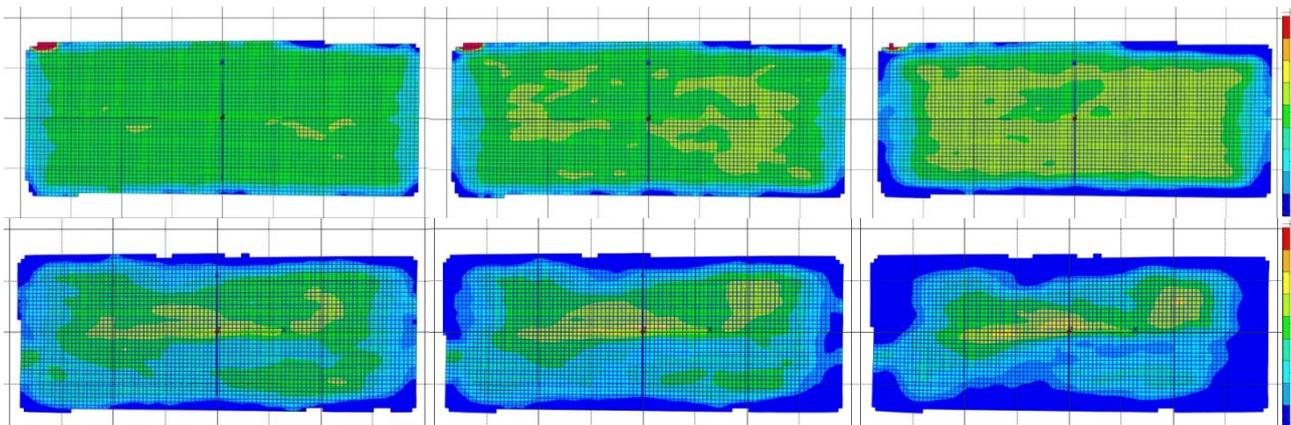


Abbildung 3-52: Dehnungen ε_y nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge K3. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -1,0 %, blau, und 1,0 %, rot.

In der Klimafolge KD, siehe Abbildung 3-53 und Abbildung 3-54, verteilten sich die maximalen und minimalen Dehnungswerte über den gesamten Messbereich des Prüfkörpers. Vor allem vor dem Entstehen eines Risses traten am Rissursprung Spitzenwerte auf, die dann mit dem Riss voranschritten. Die weißen Stellen in den Messbildern deuteten auf Risse sowie auf ungültige Facetten hin. Bei dem Prüfkörper aus Fichte offenbarte das Messbild nach 24-stündiger Trocknung

gegenüber dem Messbild nach 8-stündiger Trocknung deutlich weniger weiße Stellen und ausschließlich negative Dehnungen.

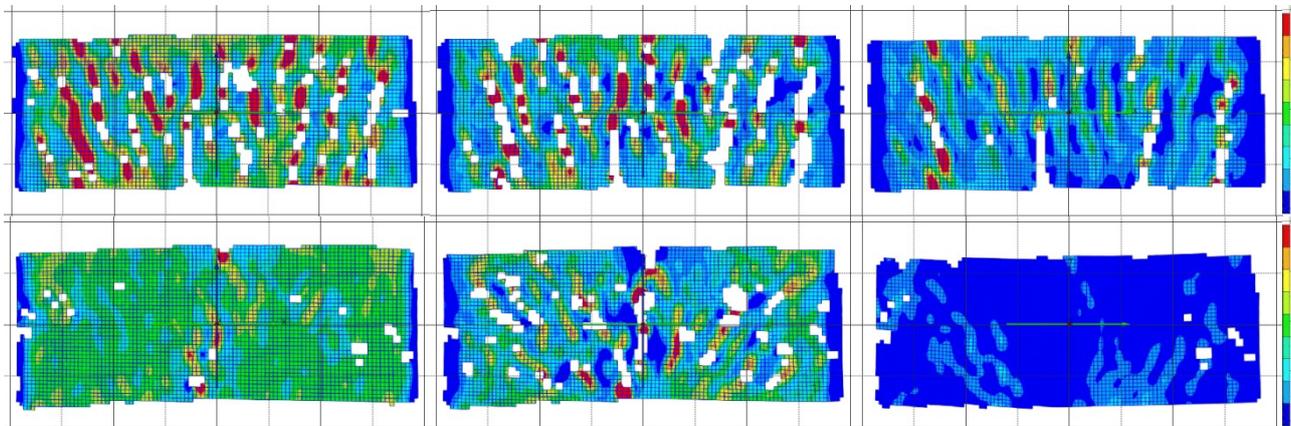


Abbildung 3-53: Dehnungen ϵ_x nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge KD. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -5,0 %, blau, und 5,0 %, rot.

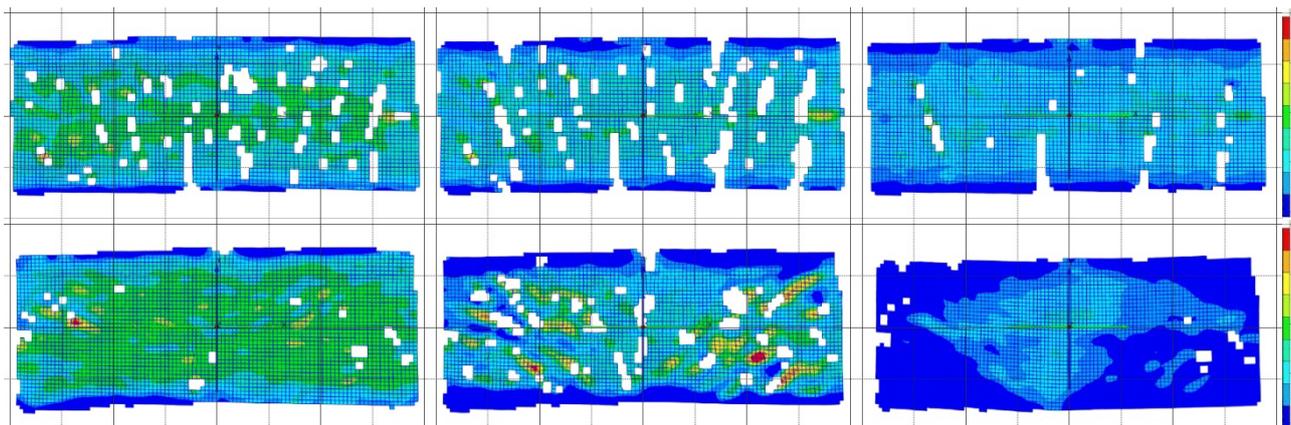


Abbildung 3-54: Dehnungen ϵ_y nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge KD. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -5,0 %, blau, und 5,0 %, rot.

Die Aufnahmen der Messkamera bestätigten häufig ein Materialversagen der Prüfkörper an den weißen Stellen der Dehnungsbilder von Klimafolge KD. So ließen sich Risse eindeutig auf der Stirnseite des Prüfkörpers aus Fichte während der Trocknung erkennen. Durch das weitere Trocknen und Schwinden des Prüfkörpers schlossen sich allerdings alle Risse wieder, sodass augenscheinlich nach 24 Stunden keine Öffnungen mehr vorhanden waren. Ähnlich verhielt sich der Prüfkörper aus Lärche, bei dem von einer Vielzahl deutlich erkennbarer Risse am Ende der Trocknung nur noch einer sichtbar blieb. Die anderen Holzarten zeigten dieses Verhalten deutlich weniger ausgeprägt. Abbildung 3-55 stellt den Unterschied hinsichtlich der Risschließungen anhand von Eiche und Fichte exemplarisch dar.

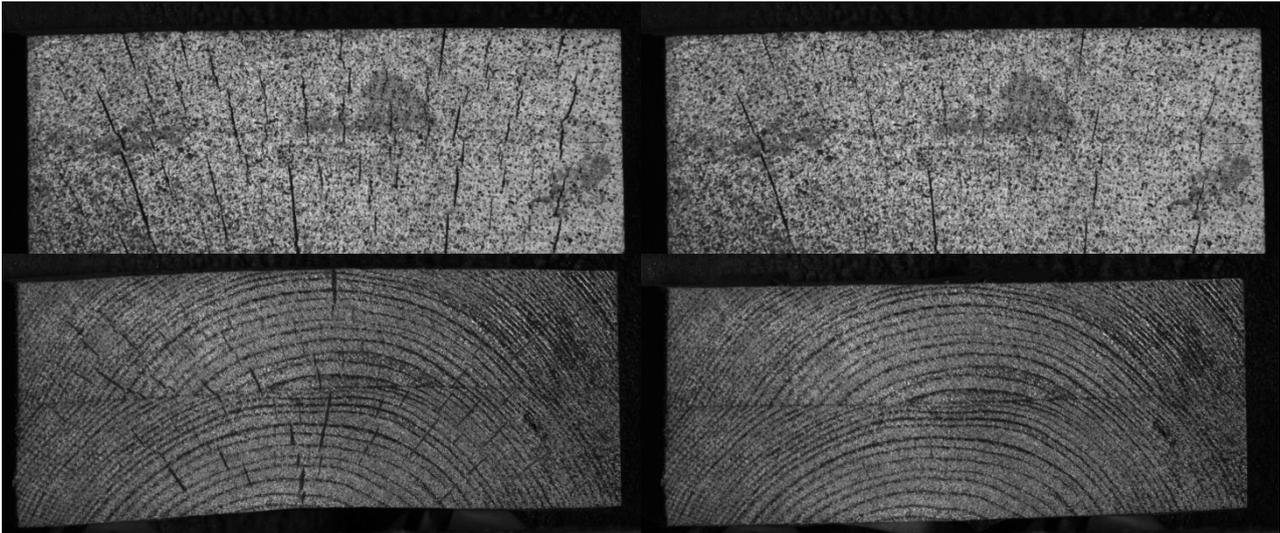


Abbildung 3-55: Linke Kamerabilder der Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, nach 8 h, links, und 24 h Trocknung, rechts, in Klimafolge KD. Prüfkörper aus zwei Lamellen.

3.3.3 Diskussion

Mögliche Messfehler beeinflussten die Vorgehensweise bei der quantitativen Auswertung der Messdaten. Aufgrund von Starrkörperverschiebungen, Temperatureinflüssen und offensichtlichen Messungenauigkeiten wurden zunächst Schnitte definiert und ausgewertet. Bei Betrachtung des gesamten Messbereichs fielen die teilweise unrealistisch hohen, lokalen Spitzenwerte auf. Diese Extremwerte traten oftmals bei ungenügenden Facetten am Rand und, insbesondere bei den gewässerten Probekörpern der Klimafolge KD, am Anfangspunkt eines Risses auf. Mittels Filtern der Daten und Glätten der Messkurven blieb eine gewisse Anzahl von Ausreißern unberücksichtigt. Ein Weiterverarbeiten der Messdaten mit einer Software, die große Datenmengen mit statistischen Funktionen bei geringer Rechenzeit auswertet, könnte mögliche Messfehler noch weiter eliminieren und die Darstellung der Daten vereinfachen. Nichtsdestotrotz ließ sich feststellen, dass es keine Holzart gab, die bei allen Dehnungs- und Verzerrungswerten und in allen Klimafolgen immer am oberen oder unteren Ende der Werteskala lag. Eine abschließende Beurteilung der betrachteten Hölzer hinsichtlich der klimatischen Einwirkungen erschien daher noch nicht sinnvoll. Ein einzelner maßgeblicher Wert, der die räumliche Beanspruchung der Prüfkörper zusammenfasst, vereinfacht die Darstellung der Auswirkungen der jeweiligen Klimabedingungen. Ein übergeordneter, verlässlicher Dehnungswert ließ sich jedoch anhand der optischen Messungen nicht bestimmen, siehe auch (Schaffrath und Winter 2013). Bei einer weiterführenden Betrachtung der Holzarten und klimatischen Randbedingungen unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode, siehe Abschnitt 5, ergibt sich mit Berechnung der Vergleichsspannung σ_v ein solcher Wert.

Mit dem Auftreten von Rissen im Holz fanden ein Abbau der maximalen Dehnungen und eine Spannungsumlagerung statt. Die auf der Prüfkörperoberfläche gemessenen Spitzenwerte lagen zeitweise, insbesondere bei der Klimafolge KD, deutlich über der Bruchdehnung der Hölzer. Dabei führte nicht jede gemessene Dehnung, die eine Überschreitung der Bruchdehnung signalisierte,

zwangsläufig zu einem Riss. Nur ein Teil der Deformationen bewirkte eine Zwangsbeanspruchung des Prüfkörpers, nicht das gesamte Maß der Schwindverformungen verursachte Spannungen im Holz. Die Gesamtdehnung setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen, siehe Gleichung (2-38), die hinsichtlich der Spannungsbildung getrennt zu betrachten sind. Die optische Messung lieferte die Gesamtdehnung und unterschied nicht, ob es sich um eine spannungsfreie Dehnung oder um eine Deformation, die eine mechanische Beanspruchung bedingte, handelte. Eine Möglichkeit zur genauen Differenzierung stellt die strukturmechanische Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode dar.

Zu Beginn einer optischen Messuntersuchung vergrößerte sich bei allen Holzarten die betrachtete Querschnittsfläche. Bei Berücksichtigung einer ungünstigen Wärmeausdehnungszahl gemäß (Vorreiter 1965) und nach überschlägiger Berechnung zeigte sich, dass die gemessenen Verformungen allenfalls zu einem gewissen Teil auf die thermische Dehnung des Holzes zurückgehen. Allgemein ist die Wärmedehnzahl je 1 °C Temperaturänderung um etwa zwei Größenordnungen kleiner als das Quell- und Schwindmaß je 1 % Holzfeuchtigkeitsänderung. Die Volumendehnung des Wassers bei Temperaturerhöhung mag allerdings noch einen gewissen Anteil an der Ausdehnung der Prüfkörper gehabt haben. Weitere Untersuchungen erscheinen notwendig, um die Beobachtungen eingehend zu erläutern.

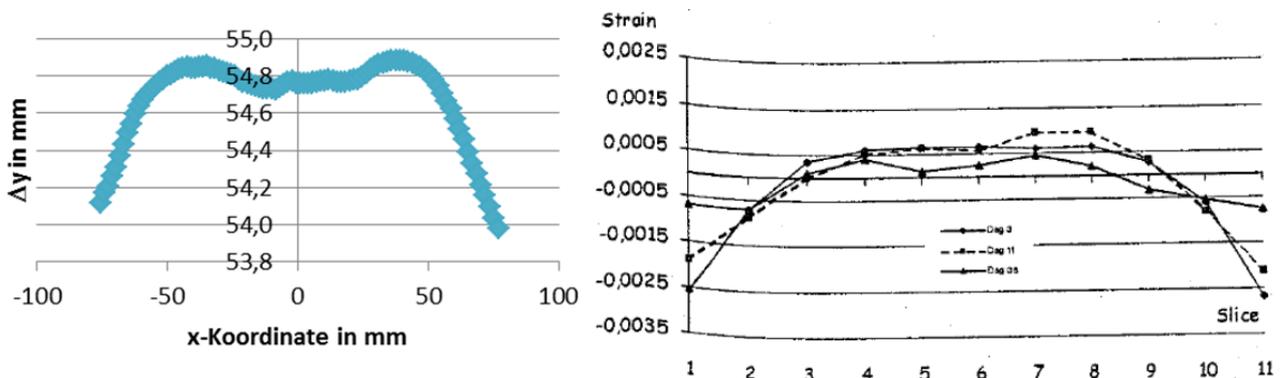


Abbildung 3-56: Links – Iotrichter Abstand Δy , Schnitt 3-4, nach 24 Stunden Trocknung in Klimafolge K3, Fichtenprobekörper aus zwei Lamellen. Rechts (Jönsson 2001) – Dehnungen über die Querschnittshöhe nach 3, 11 und 38 Tagen Trocknung in 20 °C/40 %rF nach Konditionierung in 20 °C/80 %rF. Fichtenprobekörper aus sechs Lamellen, Gesamtabmessung B x H x T = 90 x 270 x 16 mm³.

Jönsson (2001) hat die Verformung eines in Streifen geschnittenen Trägers punktuell an den oberen und unteren Streifenenden gemessen. Der qualitative Kurvenverlauf der Deformationen bei Trocknung stimmte prinzipiell mit den Messergebnissen der Klimafolgen in Anlehnung an die Nutzungsklassen der DIN EN 1995-1-1 überein, siehe Abbildung 3-56. Die von Jönsson (2001) gezeigten Kurvenverläufe bildeten eine aus den Verformungen gemittelte Dehnung über die Querschnittshöhe ab. Die Dehnungen sind wohlgermerkt beim Trocknen der Prüfkörper nicht gleichmäßig über die Querschnittshöhe verteilt, wie die vorliegende Arbeit zeigt. Bei den Versuchen von Jönsson (2001), die über mehrere Tage andauerten, nahmen die Deformationen nach einer gewissen Zeit ab. Bei schnellerer, 24-stündiger Trocknung stiegen bei den hier vor-

gestellten Untersuchungen die Verformungen weiter an. Die Rheologie des Holzes beeinflusste die Verformungen bei der langen Trocknungsdauer wohl deutlicher.

In der Trocknungsphase der Klimafolge KD nahmen bei einigen Prüfkörpern die Dehnungen mit der Zeit ab. Der abflachende Feuchtegradient über den Querschnitt führte wohl zu einem Dehnungs- beziehungsweise Spannungsabbau. Die Ergebnisse der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“, siehe Abschnitt 3.2, haben gezeigt, dass die Holzfeuchtegradienten bei der Fichte, anders als bei dem Prüfkörper aus Eiche, mit der Zeit deutlich abnahmen. Das Verhalten spiegelten die Kurven der maximalen Dehnungen wider.

Während der Trocknungsphase der Klimafolge KD zeigten die Kamerabilder deutlich erkennbare Risse. Vor allem bei den Prüfkörpern aus Fichte und Lärche waren die Risse aber am Ende der Prüfung mit dem bloßen Auge nicht mehr sichtbar. Die Klimafolge KD simulierte eine Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2. Die Beurteilung einer Delaminierung erfolgt gemäß Prüfnorm durch Sichtung der Klebstoffugen und dem Messen hierin vorhandener Öffnungen. Diese visuelle Vorgehensweise am Ende des Prüfverfahrens garantiert offensichtlich nicht, dass die Unversehrtheit der Klebefuge einwandfrei festgestellt wird. Das Phänomen des Schließens der Risse aufgrund der Schwindvorgänge trat bei den Prüfkörpern unterschiedlich stark auf. Auch wegen dieser Beobachtungen ist die Anwendbarkeit der Prüfnorm auf verschiedene Hölzer bei den vorgeschriebenen Beurteilungskriterien kritisch zu hinterfragen.

Die Delaminierungsprüfung unterscheidet nicht zwischen einer Schädigung der Klebstoffuge während des Wässerns und während der Trocknung der Prüfkörper. Der anfängliche Feuchtegehalt liegt weit über dem baupraktischen Bereich und resultiert aus einer Wasserlagerung bei Unter- und Überdruck. Die Vorbelastung einer Klebstoffuge infolge des Quellens kann einen deutlichen Einfluss auf die Entstehung von Delaminierungen haben, siehe hierzu auch Frihart (2009). Der Prüfkörper aus Buche zeigte bei Klimafolge KD anfangs die größte Querschnittsfläche. Bei dieser Holzart war die Vordehnung der Klebefuge offensichtlich größer als bei anderen Holzarten.

4 Bestimmung der Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten

4.1 Methode

Prinzipiell gibt es zwei Methoden zur Bestimmung von Diffusionskoeffizienten: Die stationäre „steady-state cup“ Methode und die instationäre „unsteady-state“ Methode. Untersuchungen verschiedener Autoren haben gezeigt, dass die nach den unterschiedlichen Methoden bestimmten Diffusionskoeffizienten voneinander abweichen, siehe Abschnitt 2.4.5. Die Feuchte-transportkoeffizienten wurden in dieser Arbeit anhand der praxisnäheren, instationären Versuchsmethodik ermittelt, bei der die Vorgänge üblicherweise mit dem 2. Fickschen Gesetz, siehe Gleichung (2-5), mathematisch beschrieben werden.

Die Messdaten der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ bildeten die Grundlage zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten D und der Oberflächenemissionskoeffizienten S für die sechs in dieser Arbeit betrachteten Holzarten. Aus praktischen Erwägungen sowie aus Gründen der Messdatengüte erfolgte die Ermittlung der Feuchtetransportkoeffizienten auf Basis der nach der Darmmethode bestimmten mittleren Holzfeuchtigkeit, siehe Gleichung (2-1). Die Verteilung der Holzfeuchte über den Querschnitt fand nur bei der Beschreibung der Anfangsbedingungen und bei der Evaluierung der Rechenergebnisse Berücksichtigung. Die Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten beschränkte sich auf die Trocknungsphase der Klimafolgen K2, K3 und KD, die Sorptionsphase blieb unbeachtet.

Die Darstellung der Messergebnisse über die Wurzel der Zeit und des Logarithmus der Verhältniszahl E über die Zeit ergaben annähernd lineare Kurvenverläufe, siehe Abschnitt 3.2.3, und rechtfertigten damit die Anwendung der Lösungen der Fickschen Diffusionsgleichung. Folgende generelle Annahmen galten dabei:

- Differenz der Ausgleichsfeuchte zur ursprünglichen Holzfeuchte als Ursache für den Feuchtetransport
- konstanter Diffusionskoeffizient
- Zusammenfassung des radialen und tangentialen zu einem transversalen Diffusionskoeffizienten
- isotherme Bedingungen

Die Voraussetzung von isothermen Bedingungen von Beginn an vernachlässigte den Einfluss der Temperaturänderung auf den Feuchtetransport. Die Eigenschaft, dass die Wärmeleitung im Holz gegenüber dem Feuchtetransport um ein Vielfaches schneller abläuft, rechtfertigte diese Annahme, siehe auch (Martin und Moschler, Jr. 1970; Liu und Simpson 1999).

Die Diffusionskoeffizienten D und Oberflächenemissionskoeffizienten S ließen sich durch die Anpassung der Messdaten an eine Ausgleichskurve, dem sogenannten „Curve Fitting“, bestimmen. Die Berechnungen umfassten drei verschiedene Gleichungen, die jeweils Lösungen der allgemeinen Diffusionsdifferentialgleichung auf Basis des 2. Fickschen Gesetzes, siehe Gleichung (2-5), darstellten. Die nachfolgend genannten Anfangs- und Randbedingungen führten

zu den drei unterschiedlichen Lösungen, siehe auch Abschnitt 2.4.4, die der mathematischen Beschreibung der Ausgleichskurven dienen:

- Bestimmung des Diffusionskoeffizienten D und des Oberflächenemissionskoeffizienten S bei einer parabelförmigen Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt und Berücksichtigung eines Übergangswiderstandes (p/\ddot{U}), siehe Gleichung (2-24)
- Bestimmung des „scheinbaren“ Diffusionskoeffizienten D' ohne Berücksichtigung eines Übergangswiderstandes bei einer parabelförmigen Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt (p/A), siehe Gleichung (2-18)
- Bestimmung des „scheinbaren“ Diffusionskoeffizienten D_k' ohne Berücksichtigung eines Übergangswiderstandes bei einer konstanten Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt (k/A), siehe Gleichung (2-21)

Die in Klammern stehenden Ausdrücke bezeichnen die gewählten Abkürzungen für die drei Ausgleichskurven. Die Diffusionskoeffizienten, die auf einen der drei Lösungsansätze p/\ddot{U} , p/A und k/A basieren, unterschieden sich in ihren Werten. Der Vergleich der jeweils berechneten Ausgleichskurve sowie der zugehörigen Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt mit den Messergebnissen zeigte die Güte der Koeffizienten. Je besser die Ausgleichskurve mit den Messdaten übereinstimmte, desto genauer ließ sich die tatsächliche Feuchtebewegung abbilden.

Die drei Lösungsansätze beschreiben Lösungen der Diffusionsgleichung in Abhängigkeit von der Ortskoordinate x und der Zeit t . Bei Verwendung des mittleren Holzfeuchtegehalts verbleibt durch Integration über die Ortskoordinate x lediglich die Zeit t als Variable übrig, siehe Gleichungen (2-20), (2-22) und (2-29). Die Anpassung der Messdaten basierte auf Regressionskurven, deren Funktionswerte zwischen maximal 1 und minimal 0 liegen. Die Darstellung der Messwerte erfolgte daher anhand der Verhältniszahl E , siehe Gleichung (2-32), die das Verhältnis der zum betrachteten Zeitpunkt t abgenommenen Holzfeuchtigkeit zur maximal möglichen Abnahme an Holzfeuchtigkeit wiedergibt.

Die „scheinbaren“ Diffusionskoeffizienten D' und D_k' fassten den Diffusionskoeffizienten D und den Oberflächenemissionskoeffizienten S in einem Wert zusammen. Aus der Vernachlässigung des Übergangswiderstandes folgte die Annahme einer konstanten Oberflächenfeuchtigkeit, die von Beginn der Trocknung an gleich dem Wert der Ausgleichsfeuchtigkeit u_1 war.

Tabelle 4-1: Angenommene Ausgleichsfeuchten u_1 in % nach (Popper und Niemz 2009, Siau 1984) für die Trocknungsphasen der Klimafolgen K2, K3 und KD.

Klima	BU	DG	EI	ES	FI	LA
40/12,5	2,6	3,1	2,8	2,6	2,8	2,9
40/30	4,8	5,4	5,0	4,9	5,1	5,4
65/12,5	0,1	0,6	0,3	0,1	0,3	0,4

Die Ausgleichsfeuchten u_1 basierten in Ermangelung der prüfkörperspezifischen Werte auf den Gleichgewichtsfeuchten nach Popper und Niemz (2009). Bei der Bestimmung der Werte, siehe

Tabelle 4-1, wurde der Einfluss der Temperatur unter der Annahme berücksichtigt, dass die Gleichgewichtsfeuchte um 0,1 % je 1 °C Temperaturzunahme abnahm (Stamm 1964; Siau 1984).

Die physikalische Voraussetzung für das Vernachlässigen eines Oberflächenwiderstandes erfordert einen gewissen Luftstrom, der die Feuchtigkeit an der Oberfläche ohne einen merklichen Übergangswiderstand abtrocknen lässt. Bei der baupraktischeren Annahme eines vorhandenen Oberflächenwiderstandes und unter der Voraussetzung einer parabelförmiger Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt entsprechend Lösungsansatz p/Ü ergab sich die Oberflächenholzfeuchte u_{P0} zum Zeitpunkt $t = 0$ näherungsweise aus der nachfolgenden Gleichung:

$$u_{P0} = 3 \cdot u_0 - 2 \cdot u_{P4} \quad (4-1)$$

mit

u_0	mittlere Holzfeuchtigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$, in %
u_{P0}	Holzfeuchtigkeit an der Stelle $x = a_{P0}$, in %; Holzfeuchtigkeit am Rand
u_{P4}	Holzfeuchtigkeit an der Stelle $x = a_{P4}$, in % Holzfeuchtigkeit; Messstelle P4, Körpermitte, siehe Abbildung 3-7

Bei Ermittlung des „scheinbaren“ Diffusionskoeffizienten D' mit Lösungsansatz p/A beschrieb eine Parabelgleichung, siehe Gleichung (2-23), die anfängliche Holzfeuchteverteilung. Die Lösung p/Ü der Diffusionsdifferentialgleichung zur gleichzeitigen Bestimmung der Diffusionskoeffizienten D und des Oberflächenemissionskoeffizienten S berücksichtigt ebenfalls diese parabelförmige Anfangsverteilung.

Das „Curve Fitting“, das heißt die Bestimmung der Feuchtigkeitstransportkenngrößen, erfolgte mit dem Softwareprodukt Maple, Version 15.01, der Firma Waterloo Maple Inc. Die Messdaten wurden als Eingangswerte aus einer Excel-Datei eingelesen und die gesuchten Kenngrößen mittels mathematischer Optimierungsmethoden durch Anpassung an die jeweilige Ausgleichkurve p/Ü, p/A und k/A ermittelt. Ein einzelner Rechengang berücksichtigte dabei neun statt unendlich vieler Glieder der jeweiligen Reihenentwicklung. Vergleichsrechnungen zeigten, dass die Reduzierung der Reihenglieder zu einer vernachlässigbaren Ungenauigkeit führte.

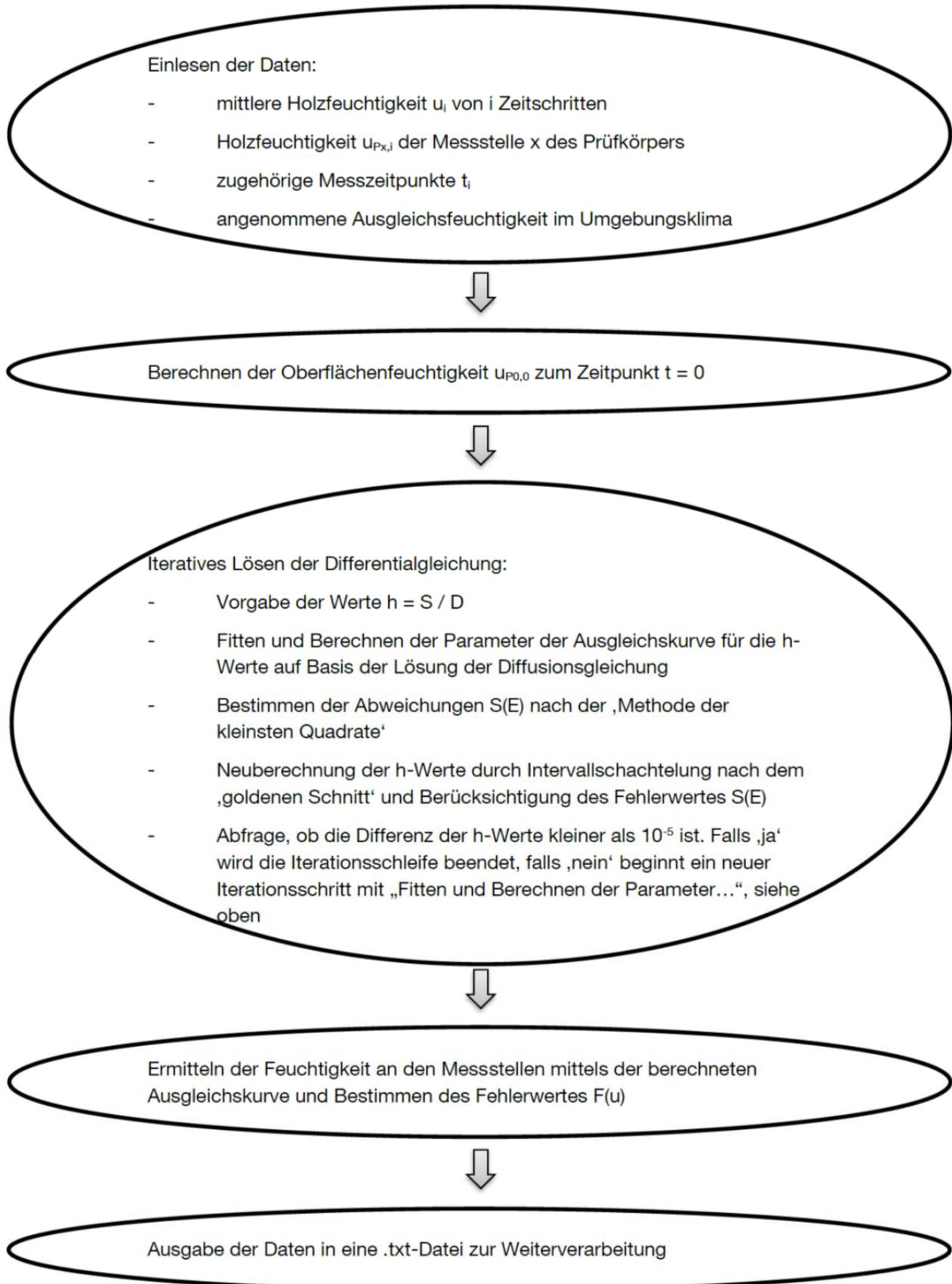


Abbildung 4-1: Struktogramm zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten D und Oberflächenemissionskoeffizienten S bei Verwendung des Lösungsansatzes p/\ddot{U} mit der Software Maple.

Die Lösungsansätze p/A und k/A enthielten lediglich eine unabhängige Variable, den Diffusionskoeffizienten D. Der Lösungsansatz p/Ü schloss zusätzlich den Oberflächenemissionskoeffizienten S ein. In Anlehnung an Newman (1931a; 1931b) berücksichtigte die Methode zur Lösung des Optimierungsproblems die Beziehung $h = S / D$, Gleichung (2-27), und die Substitution der Zeit t durch die dimensionslose Zeit τ :

$$\tau = \frac{Dt}{a^2} \quad (4-2)$$

mit

- τ dimensionslose Zeit
 a halbe Prüfkörperlänge, in m

Die gleichzeitige Ermittlung des Diffusionskoeffizienten D und des Oberflächenemissionskoeffizienten S erforderte eine iterative Vorgehensweise zur Bestimmung des Zielwertes $h = S / D$, siehe Abbildung 4-1 und das Beispiel für eine Maple-Eingabedatei im Anhang 12.3. Hierbei erwies sich eine Intervallschachtelung nach dem goldenen Schnitt, siehe Hartke (2008), als zielführend. Mittels Ausgleichsrechnung wurden nach einer erstmaligen Vorgabe von verschiedenen h-Werten die Parameter der Regressionskurve errechnet. Mit der anschließenden Neuberechnung der h-Werte reduzierte sich sukzessive die Summe der Abweichungsquadrate S(E), siehe Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3. Eine Differenz der vorgegebenen h-Werte kleiner als $1 \cdot 10^{-5}$ bestimmte das Ende der Iterationsschleife.

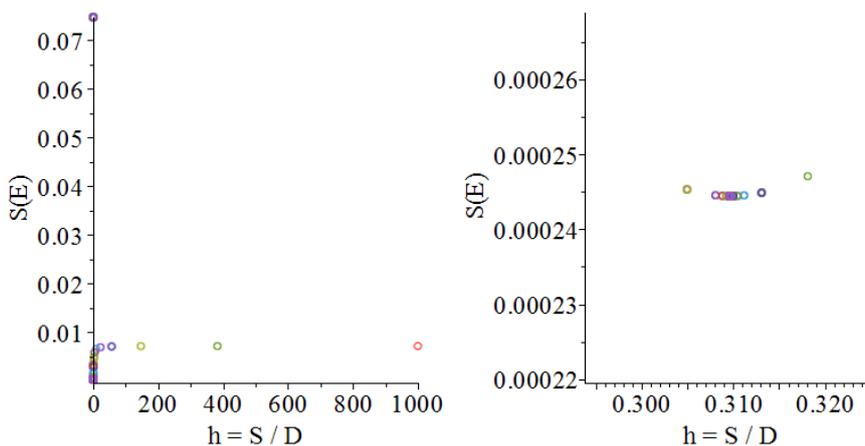


Abbildung 4-2: Summe der Abweichungsquadrate S(E) bei verschiedenen Verhältnissen $h = S / D$. Darstellung aller Iterationsschritte, links, und der Ergebnisse in der Nähe der Iterationsgrenzen, rechts.

Die Summe der Abweichungsquadrate $S(E)$ der gemessenen Daten von der berechneten Ausgleichskurve folgte der Beziehung:

$$S(E) = \sum_{i=1}^n (E_{R_i} - E_i)^2 \quad (4-3)$$

mit

$S(E)$ Summe der Abweichungsquadrate zwischen den mittels Ausgleichskurve berechneten Werten E_R und den Messdaten E über n Zeitschritte

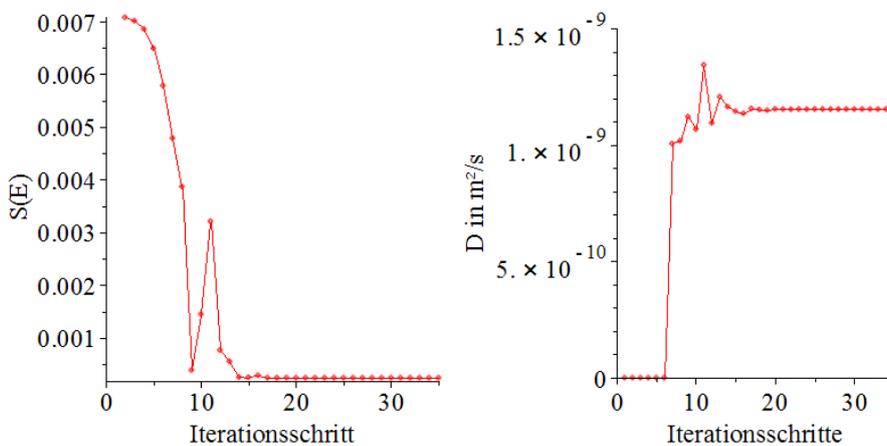


Abbildung 4-3: Summe der Abweichungsquadrate $S(E)$, links, und Veränderung des Diffusionskoeffizienten D , rechts, bei zunehmenden Iterationsschritten.

Die Güte des Ergebnisses zeigte sich sowohl in der Größenordnung der Summe der Abweichungsquadrate $S(E)$ als auch anhand der über den Querschnitt variierenden Holzfeuchtigkeit. Die Holzfeuchte ließ sich mit den ermittelten Feuchtetransportkoeffizienten und dem zugehörigen Lösungsansatz p/\bar{U} , p/A und k/A an den einzelnen Messstellen errechnen. Der Vergleich der Rechenwerte mit den zugehörigen Messwerten erfolgte durch Aufsummieren der Differenzen an den jeweiligen Mess- und Zeitpunkten:

$$F(u) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |u_{R_{ji}} - u_{ji}| \quad (4-4)$$

mit

$F(u)$ Fehlerwert, Mittelwert der Summe der betragsmäßigen Abweichungen zwischen den mittels Ausgleichskurve berechneten Holzfeuchten u_R und den Messwerten u über n Zeitschritte und m Messstellen, in % Holzfeuchte

Auf ein Quadrieren und eine einhergehende Wichtung der Abstände wurde verzichtet, da eine weitere Verwendung der Daten für eine Regressionsrechnung beziehungsweise Optimierungsaufgabe nicht anstand. Die „gemessene“ Holzfeuchte war allerdings nicht mit den Rohmessdaten an den einzelnen Messpunkten identisch, sondern beinhaltete, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, bereits den Korrekturwert u_{korr} .

Bei der Ermittlung der Koeffizienten D und S blieben die Daten der ersten Messzeitpunkte der Klimafolge KD unberücksichtigt, da derselbe Koeffizient die Transportvorgänge im kapillaren und hygrokopischen Bereich nur ungenügend beschrieb. Die Wahl des ersten verwendeten Messzeitpunktes erfolgte auf Basis niedriger Werte $S(E)$ und $F(u)$ allerdings so, dass die mittlere Holzfeuchtigkeit noch etwas über dem Fasersättigungspunkt lag.

4.2 Ergebnisse

Die nachstehenden Tabellen beinhalten die Diffusionskoeffizienten, die für die jeweilige Trocknungsphase der drei betrachteten Klimafolgen K2, K3 und KD ermittelt wurden. Tabelle 4-2 listet die Diffusionskoeffizienten D_k' auf, die eine Ausgleichsrechnung k/A unter der Annahme einer konstanten Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt und ohne Berücksichtigung eines Übergangswiderstandes ergab. Tabelle 4-3 gibt die Diffusionskoeffizienten D' wieder, die aus der Anpassung der Messdaten an eine Regressionskurve p/A bei Annahme einer parabelförmigen Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt und ohne Berücksichtigung eines Übergangswiderstandes folgte. Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5 geben Auskunft über die Diffusionskoeffizienten D und Oberflächenemissionskoeffizienten S , die bei einer parabelförmigen Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt und Berücksichtigung eines Übergangswiderstandes p/\bar{U} bestimmt wurden.

Tabelle 4-2: Diffusionskoeffizienten D_k' , Anfangs- und Randbedingung k/A .

Anfangs-/Randbed.	Klimafolge	Serie	Trocknungsklima	$D_k' \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$					
				BU	DG	EI	ES	FI	LA
k/A	K2	I	40/30	5,42	5,06	2,79	4,33	9,21	6,47
		II	40/12,5	3,36	6,19	1,81	3,94	8,60	3,62
	K3	I	40/30	8,03	9,26	5,63	7,85	10,5	8,93
		II	40/12,5	4,96	8,29	3,97	5,64	11,5	6,14
	KD	I	65/12,5	107	122	50,5	54,2	181	109
		II	65/12,5	100	155	67,0	68,8	220	119

Tabelle 4-3: Diffusionskoeffizienten D' , Anfangs- und Randbedingung p/A .

Anfangs-/Randbed.	Klimafolge	Serie	Trocknungsklima	$D' \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$					
				BU	DG	EI	ES	FI	LA
p/A	K2	I	40/30	4,55	4,37	2,50	3,80	8,73	6,05
		II	40/12,5	2,84	5,95	1,33	3,33	8,32	3,35
	K3	I	40/30	6,16	8,85	4,71	6,30	9,81	7,87
		II	40/12,5	4,45	7,63	3,04	4,72	10,9	5,50
	KD	I	65/12,5	107	122	50,5	54,2	191	109
		II	65/12,5	97,4	155	69,0	70,1	227	119

Tabelle 4-4: Diffusionskoeffizienten D, Anfangs- und Randbedingung p/Ü.

Anfangs-/ Randbed.	Klima- folge	Serie	Trocknungs- klima	D · 10 ⁻¹⁰ m ² /s					
				BU	DG	EI	ES	FI	LA
p/Ü	K2	I	40/30	5,86	6,35	2,68	5,77	11,6	7,75
		II	40/12,5	3,41	7,50	2,29	4,54	9,28	5,07
	K3	I	40/30	7,07	9,22	4,77	8,59	11,5	9,10
		II	40/12,5	4,45	8,23	3,75	4,98	11,2	6,30
	KD	I	65/12,5	135	213	97,5	77,6	350	169
		II	65/12,5	144	284	104	147	271	193

Tabelle 4-5: Oberflächenemissionskoeffizienten S, Anfangs- und Randbedingung p/Ü.

Anfangs-/ Randbed.	Klima- folge	Serie	Trocknungs- klima	S · 10 ⁻⁸ m/s					
				BU	DG	EI	ES	FI	LA
p/Ü	K2	I	40/30	15,1	10,1	34,7	8,38	19,4	17,1
		II	40/12,5	14,8	16,5	3,88	9,86	42,2	7,19
	K3	I	40/30	35,2	124	265	16,3	35,7	35,4
		II	40/12,5	44505	58,5	14,3	63,3	211	27,5
	KD	I	65/12,5	276	173	57,3	119	284	223
		II	65/12,5	275	194	143	80,9	696	175

Die Diffusionskoeffizienten, die den Feuchtetransport in transversaler Richtung in den Klimafolgen K2 und K3 beschrieben, waren um etwa eine Größenordnung kleiner als die Diffusionskoeffizienten in longitudinaler Richtung bei Klimafolge KD. Neben der unterschiedlichen Holzfeuchtigkeit und dem Trocknungsklima als Ursachen für den Feuchtetransport beeinflusste die Holzanatomie die Trocknungsgeschwindigkeit. Zwischen den Klimafolgen K2 und K3 waren die Unterschiede hinsichtlich des Diffusionskoeffizienten daher vergleichsweise gering, die Oberflächenemissionskoeffizienten S variierten hingegen deutlich, siehe auch Abbildung 4-4. Auffällig waren die oftmals wesentlich höheren Oberflächenemissionskoeffizienten S bei den Klimafolgen K3 und KD gegenüber der Klimafolge K2. Ein hoher Oberflächenemissionskoeffizient S bedeutete, dass für eine bestmögliche Anpassung der Ausgleichskurve an die Messdaten ein geringer Übergangswiderstand berücksichtigt wurde. Das Vernachlässigen des Übergangswiderstandes bei den Randbedingungen k/A und p/A war gleichbedeutend mit der Annahme eines unendlich hohen Oberflächenemissionskoeffizienten. So glichen sich folglich die Diffusionskoeffizienten des Prüfkörpers aus Buche der Klimafolge K3, Serie II, der einen außerordentlich hohen Oberflächenemissionskoeffizienten aufwies, bei den Randbedingungen p/A und p/Ü.

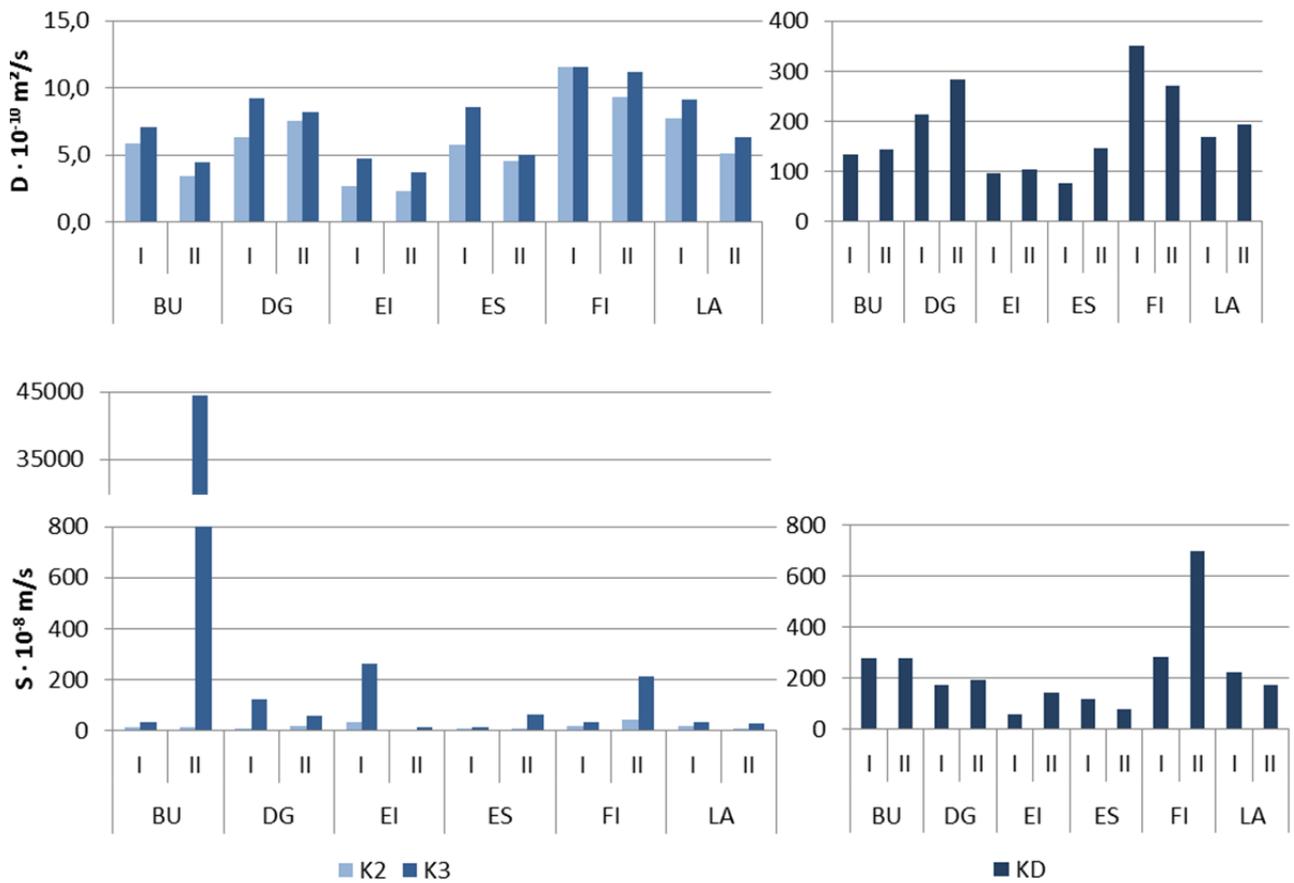


Abbildung 4-4: Diffusionskoeffizienten D und Oberflächenemissionskoeffizient S der Serien I und II, Anfangs- und Randbedingung p/Ü.

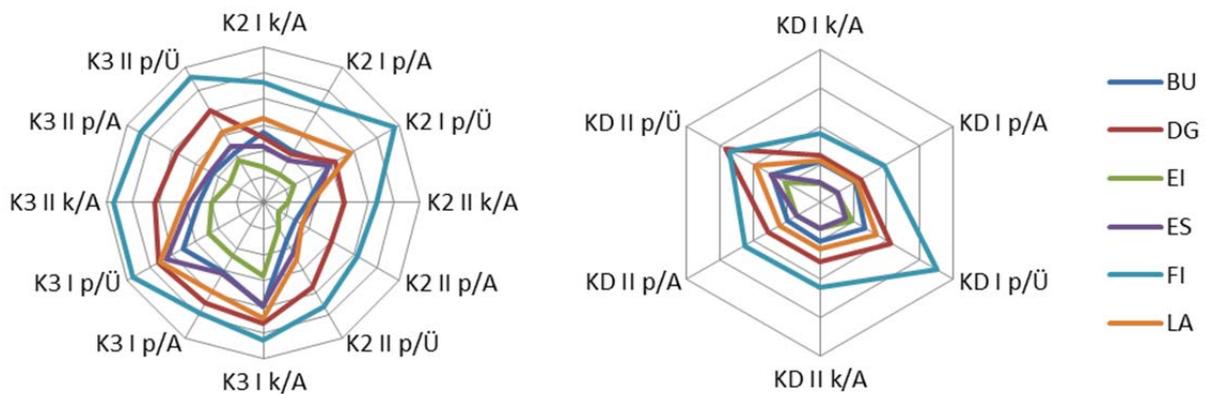


Abbildung 4-5: Darstellung der Diffusionskoeffizienten D mittels Netzdiagramm.

Nadelhölzer zeigten gegenüber den Laubhölzern generell die höheren Diffusionskoeffizienten. Insgesamt ergaben die Berechnungen für Fichte die höchsten, für Eiche die niedrigsten Werte, siehe

auch Abbildung 4-5. Bei den Oberflächenemissionskoeffizienten war kein eindeutiges, holzarten-spezifisches Muster erkennbar.

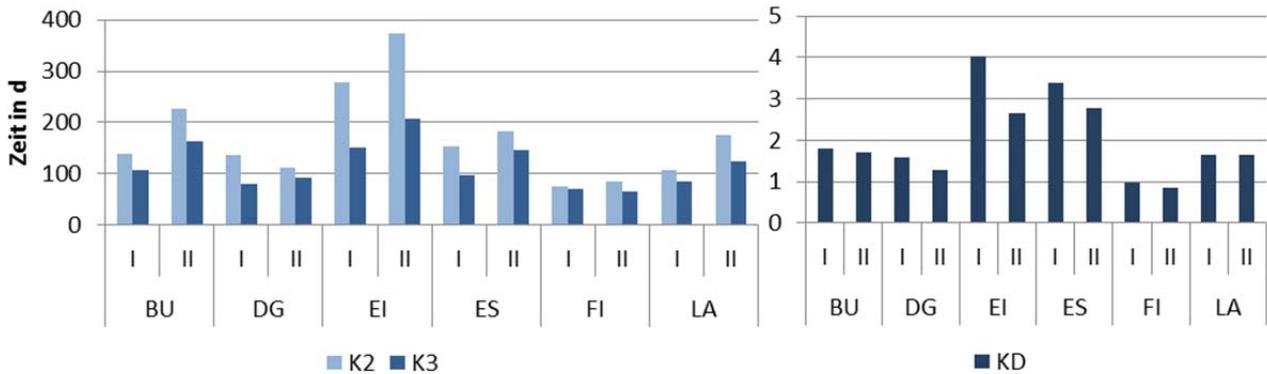


Abbildung 4-6: Berechnete Trocknungsdauer bis zum Erreichen von 95 % der maximal möglichen Holzfeuchtedifferenz, $E = 0,05$. Anfangs- und Randbedingung p/\bar{U} .

Die Trocknungsgeschwindigkeit variierte mit dem Diffusions- und dem Oberflächenemissionskoeffizienten. Je niedriger Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizient waren, desto langsamer verlor ein Prüfkörper an Feuchtigkeit. Ein Vergleich der Dauer bis zum Erreichen eines Verhältniswertes E von $0,05$ ergab, dass Fichte in allen Klimafolgen am schnellsten trocknete. Eiche benötigte hingegen eine deutlich längere Zeit, siehe Abbildung 4-6. Theoretisch dauert es unendlich lange, bis sich die Ausgleichsfeuchtigkeit über den gesamten Querschnitt einstellt. Wegen der Verwendung des Verhältniswertes E , der definitionsgemäß Werte zwischen 0 und 1 annimmt, wurden bei Klimafolge $K2$ mit insgesamt niedrigeren Diffusionskoeffizienten längere Trocknungszeiten als bei Klimafolge $K3$ berechnet.

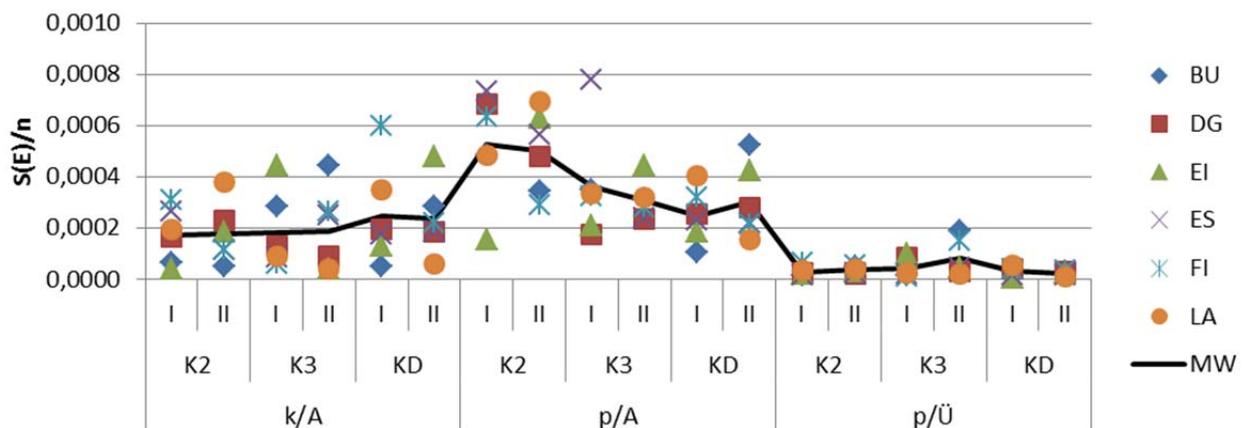


Abbildung 4-7: Mittlere Summe der Abweichungsquadrate $S(E) / n$ bei n Messzeitpunkten. Darstellung des Mittelwertes der Hölzer einer Serie als Linie.

Die Berechnungen unter Berücksichtigung einer parabelförmigen Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit und eines Übergangswiderstandes an den Oberflächen des Prüfkörpers wiesen im Mittel die geringste Summe der Abweichungsquadrate $S(E) / n$, siehe Gleichung (4-3), auf. Die Messdaten der mittleren Holzfeuchte u ließen sich folglich am besten mit einer Ausgleichskurve auf Basis einer Lösung mit den Anfangs- und Randbedingungen p/\ddot{U} anpassen, siehe Abbildung 4-7.

Gemäß den niedrigen Werten $S(E)$ lagen die Daten der mittleren Holzfeuchte, ausgedrückt als Verhältniswert E , zu den meisten Zeitpunkten in unmittelbarer Nähe zur Ausgleichskurve p/\ddot{U} . Abbildung 4-8 zeigt die Messdaten und die Ausgleichskurve exemplarisch für Prüfkörper aus Eiche und Fichte. Die Regressionskurven verdeutlichten anschaulich die langsamere Feuchtigkeitsabnahme der Eiche.

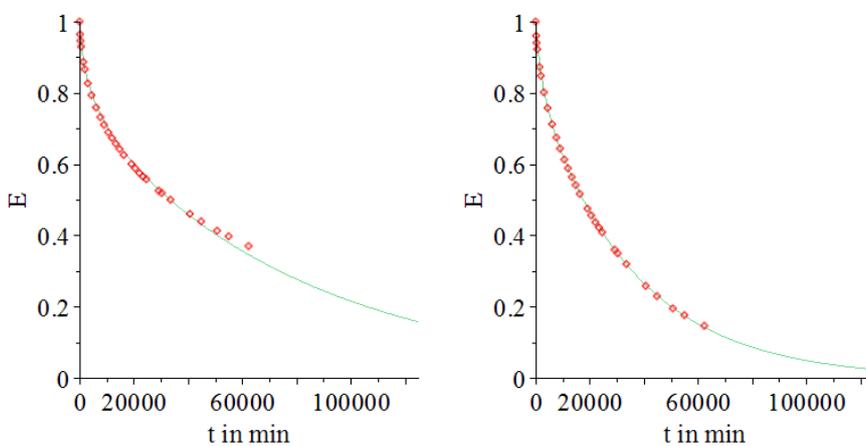


Abbildung 4-8: Messdaten, rot, und zugehörige Ausgleichskurven, grün, der Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U} . Eiche, links, und Fichte, rechts, in der Trocknungsphase der Klimafolge K3, Serie I.

Eine gute Anpassung des Verhältniswertes E an die Ausgleichskurve bedeutete nicht zwangsläufig eine gute Beschreibung der Verteilung der Holzfeuchte über den Querschnitt. Vor allem bei der Klimafolge KD zeigten sich anhand des Mittelwertes der Summe der betragsmäßigen Abweichungen $F(u)$ die zum Teil erheblichen Unterschiede zwischen gemessener und berechneter Holzfeuchte, siehe Abbildung 4-9. Die Messgenauigkeit der Holzfeuchtemessgeräte in den Bereichen hoher Feuchtigkeit wirkte sich hier sicherlich negativ aus. Des Weiteren unterschieden sich die verwendeten Anfangszeitpunkte bei der Berechnung der Feuchtetransportkoeffizienten für die Klimafolge KD. Bei Betrachtung der Daten der Ausgleichskurve p/\ddot{U} zeigte die Serie I, Klimafolge K2, die geringste Abweichung $F(u)$ mit einem mittleren Feuchteunterschied zwischen Mess- und Rechenwerten von 0,6 % und die Serie I, Klimafolge KD, die höchste mit einem Wert von 3,2 %. Die gemessenen Daten beinhalteten allerdings schon den Korrekturwert u_{korr} , sodass der Mittelwert der an den verschiedenen Querschnittstellen gemessenen Holzfeuchtigkeit mit dem nach der genauen Darmmethode berechneten Mittelwert übereinstimmte, siehe auch Abschnitt 3.2.1. Die beträchtlichen Abweichungen bei dem Prüfkörper aus Esche ließen sich bei der Serie KD dennoch als Ausreißer auffassen, da hier das Messgerät nur wenige und kaum verlässliche Messdaten anzeigte.

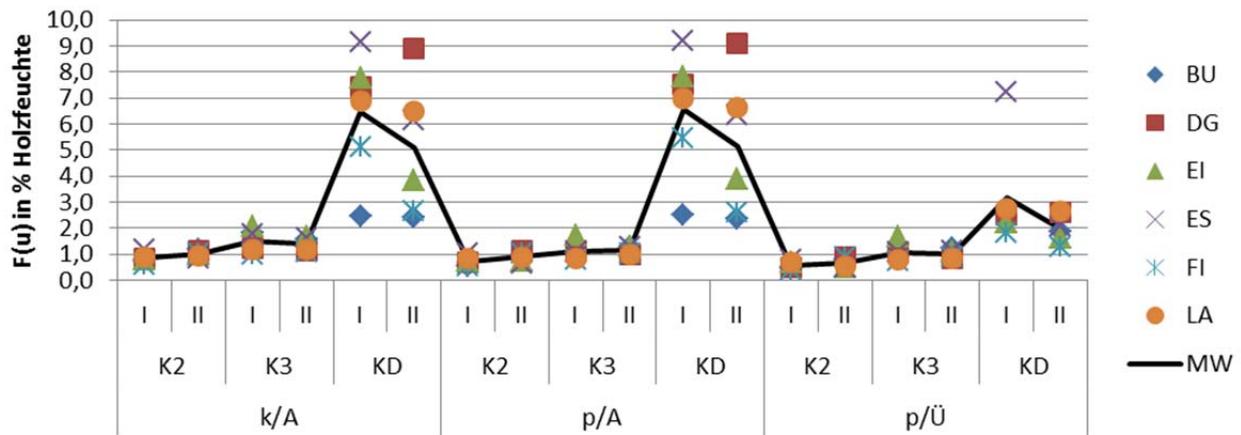


Abbildung 4-9: Mittelwerte der betragsmäßigen Abweichung $F(u)$ zwischen berechneter Holzfeuchtigkeit und zugehörigem Messwert an den über den Querschnitt verteilten Messstellen. Darstellung des Mittelwertes der Hölzer einer Serie als Linie.

Die Abweichungen $F(u)$ der gemessenen Holzfeuchtigkeit von dem berechneten Wert variierten an den verschiedenen Querschnittsstellen mit der Zeit. Bei Betrachtung der Daten der Ausgleichskurve p/\ddot{U} zeigte in der Klimafolge K3 der Prüfkörper aus Eiche, Serie I, die insgesamt höchste mittlere Abweichung $F(u)$. Die maximale Abweichung $F(u_n)$ blieb hierbei jedoch deutlich unter 3 % Holzfeuchtigkeit, siehe Abbildung 4-10.

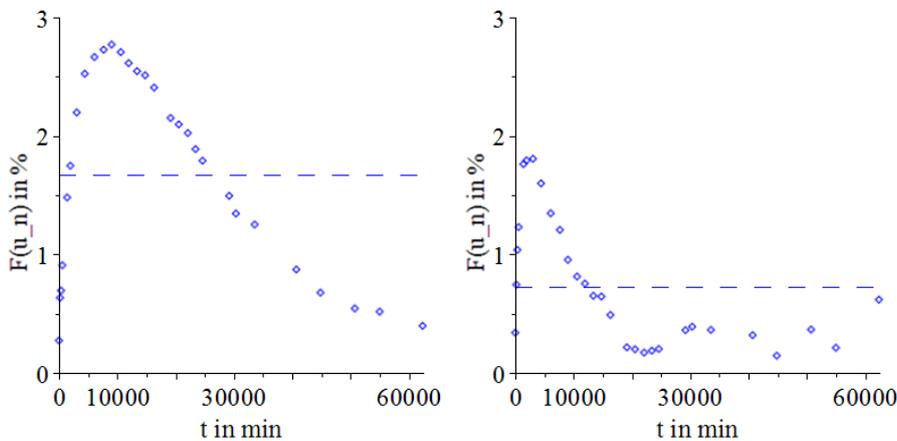


Abbildung 4-10: Mittlere betragsmäßige Differenz $F(u_n)$ zu verschiedenen Messzeitpunkten t . Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U} . Eiche, links, und Fichte, rechts, in der Trocknungsphase der Klimafolge K3, Serie I. Mittelwert über alle Messzeitpunkte als gestrichelte Linie.

Die mittlere Abweichung $F(u)$ der Fichte lag geringfügig unter dem Gesamtmittelwert der Klimafolge K3. Zu den meisten Zeitpunkten stimmte die an den Messpunkten ermittelte Holzfeuchte mit der berechneten Feuchteverteilung gut überein, siehe Abbildung 4-11.

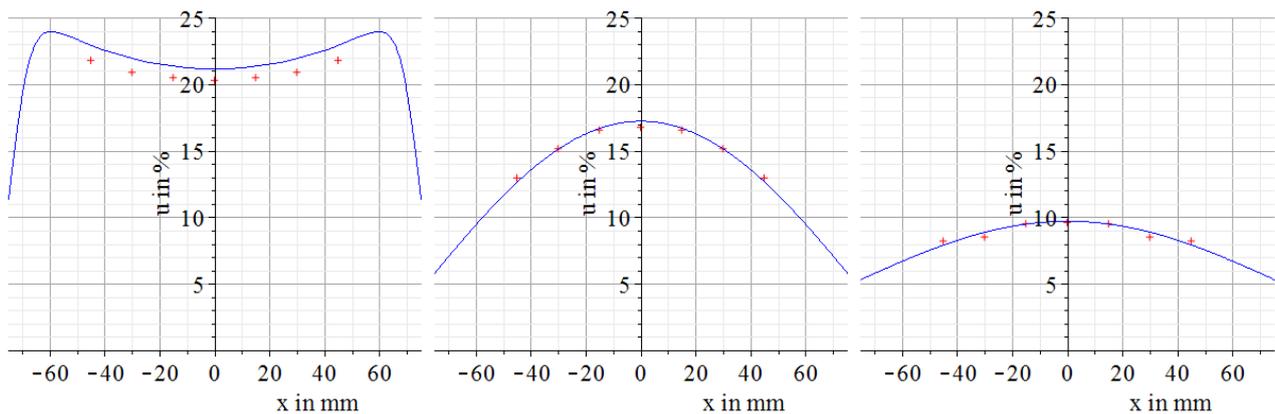


Abbildung 4-11: Messdaten, rot, und berechneter Verlauf der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt, blau. Anfangs- und Randbedingung p/Ü. Fichte nach 6 Stunden, links, 14 Tagen, mittig, und 38 Tagen, rechts, Lagerung in der Trocknungsphase der Klimafolge K3, Serie I.

Der größte Unterschied zwischen den drei betrachteten Ausgleichskurven k/A, p/A und p/Ü stellte sich hinsichtlich des Holzfeuchteverlaufs am Querschnittsrand ein. Während bei den beiden Regressionskurven k/A und p/A die Oberflächenfeuchte zwangsläufig von Beginn an den Wert der vorgegebenen Ausgleichsfeuchtigkeit annahm, reduzierte sich die Oberflächenfeuchtigkeit bei der Ausgleichskurve p/Ü mit fortschreitender Zeit, siehe Abbildung 4-12. Der zunächst noch wellige Verlauf der Kurven k/A und p/A ließe sich durch eine größere Anzahl an Reihenglieder der Regressionsgleichung mindern. Zu Beginn der Trocknungsphase führte zudem der konstante statt parabelförmige Holzfeuchteverlauf der Ausgleichskurve k/A zu deutlichen Abweichungen, siehe exemplarisch Abbildung 4-13.

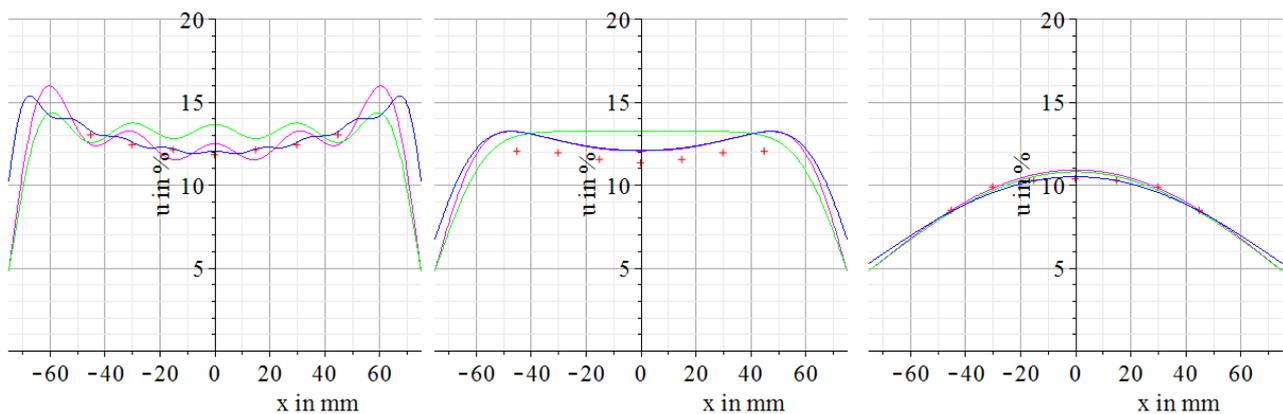


Abbildung 4-12: Messdaten, rot, und berechneter Verlauf der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt bei den Anfangs- und Randbedingungen k/A, grün, p/A, magenta, und p/Ü, blau. Buche nach 3 Stunden, links, 2 Tagen, mittig, und 28 Tagen, rechts, Lagerung in der Trocknungsphase der Klimafolge K2, Serie I.

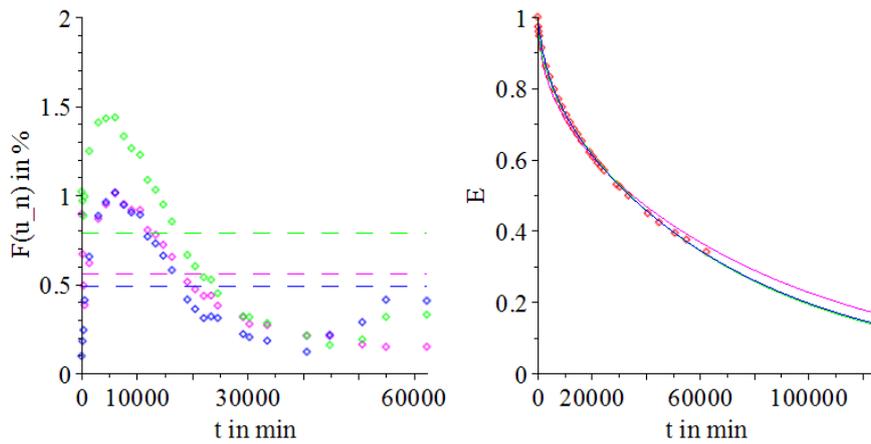


Abbildung 4-13: Links – mittlere betragsmäßige Abweichung $F(u)$ zu verschiedenen Messzeitpunkten t bei den Anfangs- und Randbedingungen k/A , grün, p/A , magenta, und p/\ddot{U} , blau. Mittelwert über alle Messzeitpunkte als gestrichelte Linie. Rechts – Messdaten, rot, und zugehörige Ausgleichskurven bei den Anfangs- und Randbedingungen k/A , grün, p/A , magenta, und p/\ddot{U} , blau. Buche in der Trocknungsphase der Klimafolge K2, Serie I.

4.3 Diskussion

Die durchgeführten Regressionsanalysen basieren auf drei unterschiedlichen Ausgleichskurven. Die Auswertung zeigt, dass der Lösungsansatz p/\bar{U} die Transportvorgänge in den Prüfkörpern am besten beschreibt. Im Gegensatz zu den beiden anderen betrachteten Lösungsansätzen führt die Anpassung der Messdaten an die Regressionskurve nicht nur zu Diffusions- sondern auch zu Oberflächenemissionskoeffizienten. Die Summe der Abweichungsquadrate $S(E)$ ergab Werte im Bereich von $1 \cdot 10^{-4}$, die oftmals um eine Größenordnung kleiner als die Abweichungen vergleichbarer Untersuchungen sind, siehe beispielsweise (Cai und Avramidis 1997; Langrish und Bohm 1997; Shi 2007). Die gute Übereinstimmung der Messdaten mit den Rechenwerten bestätigt die Gültigkeit der Fickschen Gesetze und der Randbedingungen für das betrachtete Diffusionsproblem.

Die verwendeten Lösungen der Diffusionsdifferentialgleichung beruhen auf der vereinfachenden Annahme, dass die Feuchtetransportkoeffizienten in den jeweiligen Klimaphasen konstant sind. Mit der Betrachtung von drei Klimafolgen wurde dennoch ein Einfluss der Feuchtigkeit auf die Koeffizienten berücksichtigt. Olek und Weres (2007) und Olek et al. (2011) haben verschiedene Ansätze verglichen, die den Diffusionskoeffizienten als Funktion des Wassergehaltes enthalten. In den Untersuchungen von Olek und Weres (2007) führt die Methode mit der scheinbar besten Anpassung an die Messdaten zu relativ niedrigen Koeffizienten. Während die Ergebnisse bei drei Ansätzen in einer üblichen, mit anderen Literaturquellen vergleichbaren Größenordnung liegen, ergibt die vierte Methode um mindestens einen Faktor 10^{-2} kleinere Werte. Der Ansatz berücksichtigt eine empirische Funktion zur Beschreibung des von der Holzfeuchtigkeit abhängigen Diffusionskoeffizienten. Die Summe der Abweichungsquadrate liegt etwa um den Faktor 10 über den entsprechenden Werten dieser Arbeit.

Verschiedene Autoren untersuchten die Feuchtetransportvorgänge im Holz bei unterschiedlichen Randbedingungen: Angst und Malo (2010) geben beispielsweise die Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten senkrecht zur Faser für Fichte aus verschiedenen Versuchen wieder. Chen und Choong (1994) sowie Liu und Simpson (1997) bestimmen die Feuchtetransportkoeffizienten von Roteiche. Chen et al. (1994) verwenden eine Optimierungsmethode nach dem goldenen Schnitt, um sechs amerikanische Laubhölzer anhand der Feuchtetransportkoeffizienten zu vergleichen. Diese Parameter ermitteln Choong und Skaar (1969; 1972) ebenfalls für amerikanische Laubhölzer. Avramidis und Siau (1987) sowie Siau und Avramidis (1996) stellen für verschiedene Hölzer Koeffizienten aus unterschiedlichen Literaturquellen zusammen. Die publizierten Oberflächenemissionskoeffizienten, die bei Luftgeschwindigkeit von 1 m/s, 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 80 % Werte kleiner als etwa $65 \cdot 10^{-8}$ m/s aufweisen, hält hingegen Wadsö (1994a) aus physikalischen Überlegungen für nicht plausibel.

Ein Ziel der Regressionsrechnungen der vorliegenden Arbeit lag in der Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten als Eingangsparameter für eine Finite-Elemente-Berechnung, siehe Abschnitt 5. Ein Rückgreifen auf die Literaturwerte stellte keine Option dar, da die Untersuchungen sechs vorgegebene Holzarten in unterschiedlichen, ausgewählten Klimata umfassen. Die voneinander abweichenden Literaturwerte lassen hier eine sinnvolle Differenzierung nicht zu.

Die in dieser Arbeit bestimmten Werte zeigen erwartungsgemäß (Stamm 1959; Siau 1984) mit zunehmender Holzfeuchtigkeit höhere Diffusionskoeffizienten und liegen bei den Klimafolgen K2 und K3 grundsätzlich in der Größenordnung der Werte zahlreicher Literaturquellen. Die Klimafolge KD unterscheidet sich hingegen deutlich von den in der Literatur beschriebenen Untersuchungen, sodass keine Vergleichswerte zur Verfügung standen. Eine Gegenüberstellung der Oberflächenemissionskoeffizienten erbrachte insofern wenig Erkenntnis, da diese von der meist nicht definierten Luftgeschwindigkeit abhängen und allgemein beträchtlich variieren.

Nach Kenntnis des Autors beinhaltet diese Arbeit erstmals ein rechnergestütztes Regressionsverfahren, das auf der Lösung nach Newman (1931a) mit einer parabelförmigen Feuchteverteilung als Anfangsbedingung und einem Übergangswiderstand als Randbedingung basiert. Die dabei ermittelten, vergleichsweise niedrigen Summen der Abweichungsquadrate $S(E)$ weisen darauf hin, dass die gewählte Lösung p/\ddot{U} bei Annahme eines konstanten Diffusionskoeffizienten den Feuchtetransport über die jeweils betrachteten Holzfeuchtebereiche hinreichend genau beschreibt. Dennoch verlangen insbesondere die Ergebnisse für die Oberflächenemissionskoeffizienten, die zwischen den Hölzern der verschiedenen Serien und Klimafolgen stark variierten, eine kritische Auseinandersetzung. Eine geringfügige Änderung der Anfangsfeuchtigkeit beeinflusste die Oberflächenemissionskoeffizienten recht stark, die zugehörigen Diffusionskoeffizienten hingegen wenig. Dieses Verhalten deutet auch an, dass der Einfluss des Übergangswiderstandes auf die Berechnung des Diffusionskoeffizienten relativ gering war. Folglich ergaben die Ausgleichskurven p/A und p/\ddot{U} bei Annahme eines unendlich hohen beziehungsweise endlichen Oberflächenemissionskoeffizienten vergleichbare Ergebnisse.

5 Finite-Elemente-Berechnungen

5.1 Methode

5.1.1 Vorbemerkung

Die Berechnung von feuchteinduzierten Verformungen und Spannungen erfolgte mittels der Finite-Elemente-Methode mit dem Ziel, das holzartenspezifische Verhalten in den unterschiedlichen Klimata aufzuzeigen. Dabei stellte die Software Ansys Workbench, Version 14.5.7 (ANSYS, Inc. 2013), die Umgebung und Oberfläche zur Modellierung der Geometrie und zur numerischen Simulation der Aufgabenstellung dar. Für allgemeine Informationen zu der Finite-Elemente-Methode und den Anwendungsmöglichkeiten des Programms Ansys Workbench sei auf (Gebhardt 2011) verwiesen.

Die in den Versuchsreihen „Sorption/Desorption“ und „optische Messungen“ betrachteten Prüfkörper bildeten die Grundlage für die Finite-Elemente-Modelle. Die Systeme verwendeten die mittels Regressionsanalyse berechneten Feuchtetransportkoeffizienten als Materialkenngrößen. Somit ließ sich der Holzfeuchteverlauf zu beliebigen Zeitpunkten als eine indirekte, aus den Trocknungsvorgängen resultierende Einwirkung aufbringen. Die Validierung des numerischen Modells erfolgte anhand von Vergleichen mit den Ergebnissen der beiden Versuchsreihen „Sorption/Desorption“ und „optische Messungen“.

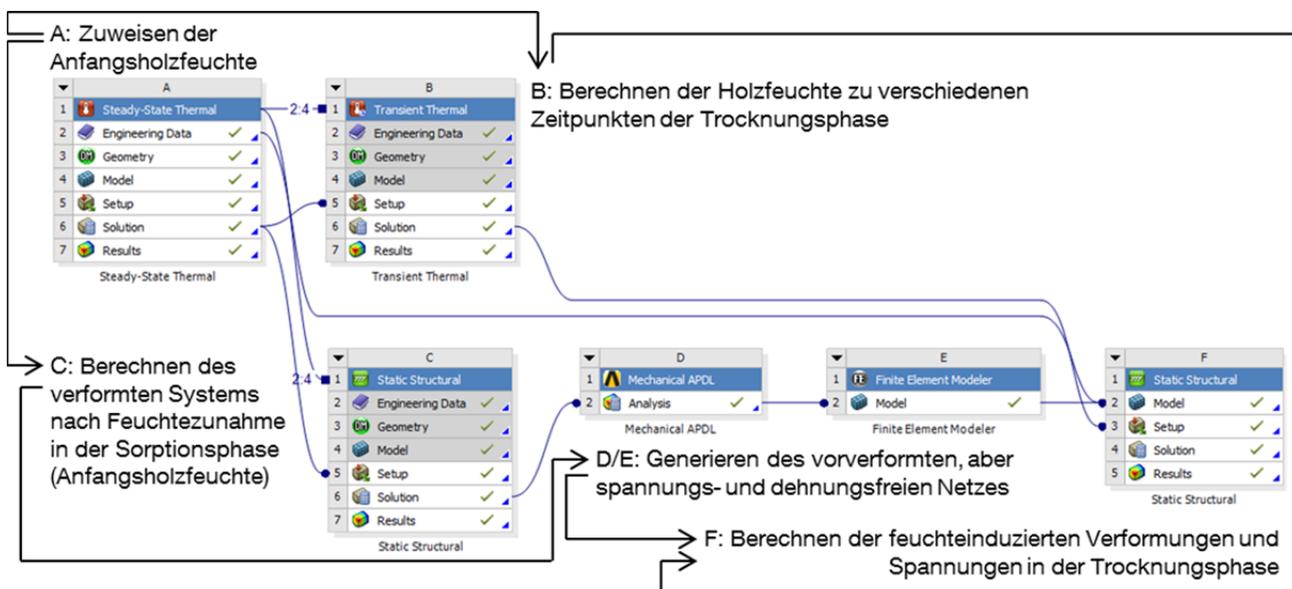


Abbildung 5-1: Fünf miteinander verknüpfte Analysensysteme/Module A bis F innerhalb der Ansys Workbench.

Das Rechenmodell verknüpft fünf Analysensysteme, die Module A bis F, miteinander, siehe Abbildung 5-1, die auf dieselbe Materialdatenbank und Geometrie zurückgriffen. Die Holzfeuchtigkeit, die nach der Sorptionsphase herrschte, wies das Analysensysteme A „Steady-State Thermal“

den einzelnen Volumenelementen als Anfangsholzfeuchte zu. Das Modul B „Transient Thermal“ übernahm die Holzfeuchte aus Modul A zum Startzeitpunkt der Berechnung, simulierte anschließend den Feuchtigkeitstransport und bildete den Holzfeuchteverlauf im System zu verschiedenen Zeitpunkten ab. Das Modul C „Static Structural“ berechnete das System infolge der indirekten Einwirkung, die sich aus der Differenz der Anfangsholzfeuchtigkeit nach der Sorptionsphase, Modul A, und der Referenzholzfeuchtigkeit nach der Konditionierung im Normalklima ergab. Die statischen Berechnungen sollten jedoch mit einem spannungs- und dehnungsfreien System beginnen. Daher übergaben die Module D „Mechanical APDL“ und E „Finite Element Modeler“ dem nachfolgend verknüpften Analysesystem nur die vorverformte Geometrie. Das Modul F „Static Structural“ berechnete schließlich die feuchteinduzierten Verformungen und Spannungen zu den verschiedenen Zeitpunkten der Trocknungsphase.

Die Simulation des Feuchtigkeitstransportes erfolgte unter Berücksichtigung der Analogie zwischen Wärmediffusion, den Fourier-Gleichungen, und der Dampfdiffusion, den Fickschen Gesetzen, siehe Abschnitt 2.4.3. Da Wärmeleitung und Feuchtigkeitstransport auf den prinzipiell gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhen, entspricht die berechnete Temperaturverteilung der Verteilung der Holzfeuchtigkeit. So bezeichnet beispielsweise der hier verwendete Begriff „Holzfeuchteverteilung“ die von der Software berechnete „Temperaturverteilung“.

Die Kennzeichnung der einzelnen Finite-Elemente-Systeme, siehe auch Tabelle 12-12 im Anhang 12.4, folgt der Systematik V_W_X_Y_Z. Hierin bedeutet:

V	Holzart – BU, DG, EI, ES, FI, LA
W	Klimafolge – K2, K3, KD
X	Anzahl Lamellen – 1, 2
Y	Versuchs-/Bezugsserie für Eingabe der Feuchtetransportkoeffizienten etc. – I, II
Z	Versuchsreihe – o für „optische Messungen“ mit Koordinatensystem analog Jahrringlage der Probekörper, einheitliches Koordinatensystem ohne Kennzeichen

5.1.2 Grenzen des Modells

Die Güte der Finite-Elemente-Berechnungen hängt insbesondere von der akkuraten Wahl der Materialparameter ab, siehe Abschnitt 2.5.4. Der Diffusionskoeffizient in Verbindung mit dem Oberflächenemissionskoeffizient bestimmt die Trocknungsgeschwindigkeit und den Gradient der Holzfeuchte über den Querschnitt. Damit beeinflussen die beiden Kennwerte maßgeblich die Einwirkungen auf die Hölzer und das Ausmaß der feuchteinduzierten Spannungen. Für die hier betrachteten Probekörper lieferte die Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“ die Feuchtetransportkoeffizienten, die auf den Umgebungsbedingungen, der Versuchsmethodik und den spezifischen Eigenschaften der Hölzer beruhten. Allerdings konnten nicht alle notwendigen Materialparameter des natürlich gewachsenen Rohstoffs Holz in Versuchen ermittelt werden, sodass zwangsläufig Literaturwerte Verwendung fanden. Die Finite-Elemente-Berechnungen beschrieben daher das Verhalten der Hölzer nur in gewissen Grenzen und dienten vor allem dem qualitativen Vergleich der Holzarten untereinander.

Die Finite-Elemente-Modelle basierten auf einem linear elastischen Materialverhalten der Prüfkörper. Mögliche viskoelastische oder plastische Verformungen sowie Risse bildeten die Systeme folglich nicht ab. Auch rheologische Modelle zur Beschreibung des zeitabhängigen Materialverhaltens des Holzes blieben somit unberücksichtigt. Das mechano-sorptive Verhalten hängt generell von der Holzart ab und die zur Darstellung notwendigen Parameter sollten akkurat gewählt sein (Ranta-Maunus 1975; Hunt 1986; Wu und Milota 1994). Die entsprechenden Materialkennwerte ließen sich nicht vollumfänglich in der Literatur finden, die versuchstechnische Ermittlung für die sechs Holzarten verlangt zeitaufwendige Versuche. Das Vernachlässigen des mechano-sorptiven Verhaltens führte daher möglicherweise zu einer gewissen Überschätzung der Spannungen und zu höheren Verformungen, vergleiche (Kang und Lee 2002; Gereke 2009).

Die meisten Materialkennwerte hängen von der Holzfeuchtigkeit ab. Die generierten Finite-Elemente-Modelle bildeten diese Beziehungen allerdings nicht ab. Untersuchungen haben gezeigt, dass beispielsweise der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf den Elastizitätsmodul gegenüber anderen Einflüssen, wie die in dieser Arbeit berücksichtigte Jahrringlage, äußerst gering ist (Jönsson und Svensson 2004; Angst und Malo 2012). Die Annahme von holzfeuchteabhängigen mechanischen Kenngrößen hätte hier einerseits eine Genauigkeit vorgetäuscht, die bei der Verwendung von Literaturwerten nicht gegeben ist. Andererseits wäre aufgrund der Anisotropie des dreidimensionalen Modells konsequenterweise die Eingabe der Zusammenhänge für alle Poissonzahlen, Elastizitäts- und Schubmoduli erforderlich gewesen, was aber wegen fehlender Daten nicht möglich war. Die Auswirkung einer Temperaturänderung auf die Materialkennwerte blieb ebenfalls unberücksichtigt.

Die dünnen Klebefugen der Probekörper der beiden Versuchsreihen „Sorption/Desorption“ und „optische Messungen“ zeigen mit der Stärke von etwa 0,1 mm ein bei Brettschichtholz übliches Maß. Das mechanische Verhalten dünner struktureller Klebeschichten inklusive deren Versagen lässt sich beispielsweise mit dem „Kohäsivzonenmodell“ simulieren (Jousset und Rachik 2010). Dies geht allerdings mit einer merklich längeren Rechenzeit einher und schließt noch nicht die Modellierung der zugehörigen Grenzschicht im Holz ein. Das Darstellen der Klebefuge durch einzelne Elemente hätte eine erhebliche Netzverfeinerung bedeutet. Der Fokus der Berechnungen lag jedoch nicht auf einer Beschreibung unterschiedlicher Klebstofffugen. Das Finite-Elemente-Modell erzeugte daher praktischerweise einen festen Verbund zwischen den Lamellen, wie es auch Müller und Groth (2007) vorschlagen. Die Diffusionseigenschaften des Klebstoffs konnten unberücksichtigt bleiben, da die Richtung des Feuchtetransportes parallel zur Klebefuge verlief.

5.1.3 Geometrie und Netzgenerierung

Ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell bildete die Geometrie der Prüfkörper aus einer beziehungsweise zwei Lamellen mit Volumenelementen ab. Bei der Klimafolge KD diffundierte die Feuchtigkeit in Längs- und Querrichtung, sodass sich wegen der Anisotropie des Holzes ein räumlicher Spannungszustand einstellte. Der Feuchtigkeitstransport bei den Klimafolgen K2 und K3 erfolgte lediglich in transversaler Richtung, die Rechenergebnisse variierten praktisch nicht in Richtung der Längsachse. Die Länge des Modells wurde gegenüber der Länge des Prüfkörpers für die Berechnung der Klimafolgen K2 und K3 halbiert und betrug 37,5 mm statt 75 mm. Die

Maßnahme führte zu merklich kürzeren Rechenzeiten und geringeren Datenmengen. Höhe und Breite der einzelnen Quader entsprachen mit 30 mm und 150 mm den Abmessungen der Prüfkörperlamellen, siehe auch Abbildung 3-1.

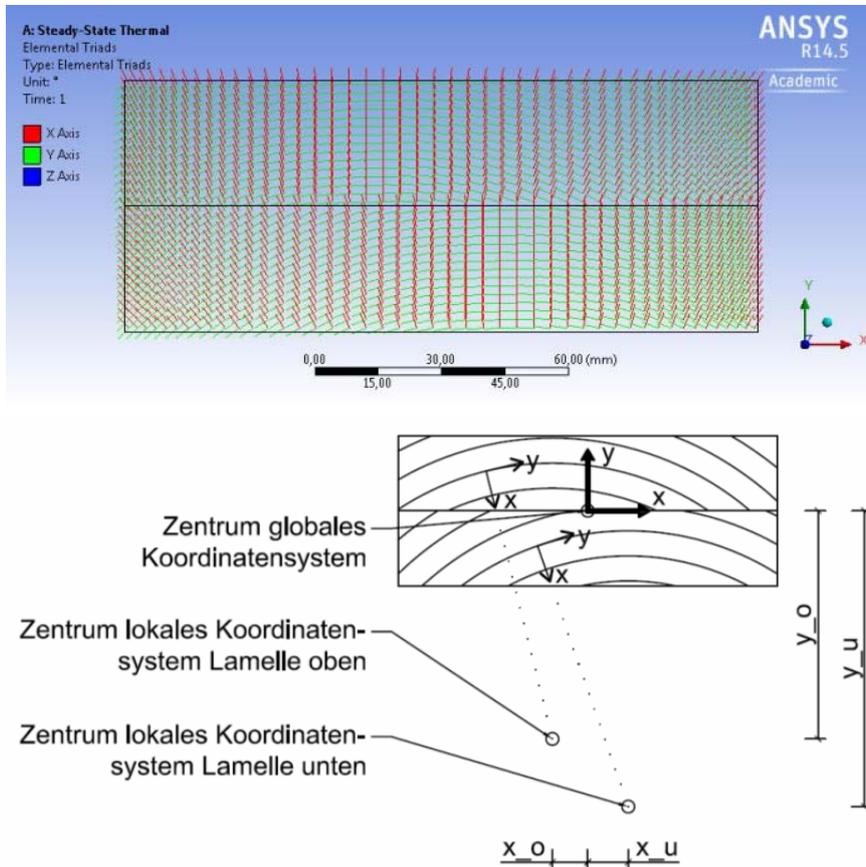


Abbildung 5-2: Globales und lokale Koordinatensysteme. Screenshot Ansys Mechanical, oben, und erläuternde Skizze, unten. Die Darstellungen zeigen unterschiedliche Maßstäbe.

Die globalen Koordinatenachsen verliefen parallel zu den Kanten der Prüfkörper. Der Ursprung befand sich analog zu der Ergebnisdarstellung der Versuchsreihe „optische Messungen“ in Prüfkörpermitte. Zur Abbildung der Anisotropie der Hölzer erfolgte eine Orientierung der lokalen Koordinatensysteme der einzelnen Volumenelemente analog zur Jahrringlage. Dabei zeigte die x-Achse in radiale und die y-Achse in tangentielle Richtung. Die lokale und globale Ausrichtung der z-Achse entsprach der Längsrichtung der Holzfasern, siehe Abbildung 5-2. Für die Validierung der Finite-Elemente-Berechnung anhand der Versuchsreihe „optische Messungen“ wurde die Jahrringlage der entsprechenden Prüfkörper bestimmt und das lokale Koordinatensystem an der Markröhre als Zentrum ausgerichtet. Erfolgte ein Vergleich mit Fokus auf den unterschiedlichen Spannungsniveaus der Hölzer, wiesen alle Körper dasselbe zylindrische und konzentrische Koordinatensystem auf. Die jeweilige Lage der lokalen Koordinatensysteme geben Tabelle 12-13, Tabelle 12-14 und Tabelle 12-15 im Anhang 12.4 wieder.

Die Netzgenerierung erfolgte prinzipiell mit einer maximalen Kantenlänge der Elemente von vier Millimetern. Zu den Längsseiten hin, also den Ebenen an den Stellen $x = 0$ und $x = 150$ mm,

wurde das Netz verfeinert. An den Außenflächen betrug die maximale Elementlänge zwei Millimeter. Die Ergebnisse der Versuchsreihe „optische Messungen“ haben gezeigt, dass vor allem an den Seitenrändern die größten Deformationen auftreten. Ein feineres Netz diente somit der Genauigkeit an diesen Stellen. Das Netz zweier Lamellen mit ganzer Prüfkörperlänge, siehe Abbildung 5-3, bestand aus mehr als 220.000 Knoten und 50.000 Elementen. Für die Systeme aus einer Lamelle oder mit halber Prüfkörperlänge galt Entsprechendes. Vergleichende Untersuchungen bestätigten die Wahl der Elementgröße, da Systeme mit einer nochmals feineren Netzeinteilung keine signifikante Änderung der Verformungen und Spannungen ergaben. Die Bezeichnung für die verwendeten, quaderförmigen Volumenelemente nach der Ansys Nomenklatur lauteten „Solid90“ für die thermischen und „Solid186“ für die statischen Berechnungen. Kontaktelemente zwischen zwei Lamellen bildeten die Fuge als einen festen Verbund ab.

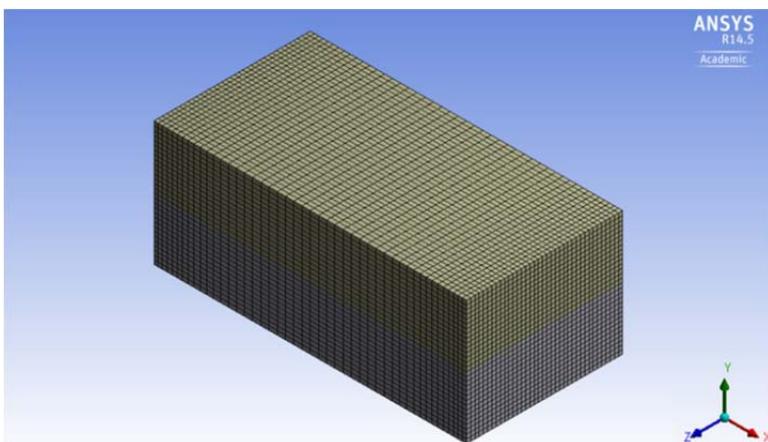


Abbildung 5-3: Netzdarstellung eines Finite-Elemente-Modells der Klimafolge KD aus zwei Lamellen.

Das verwendete statische System erforderte generell keine Eingabe von Auflagerbedingungen, da ausschließlich innere Kräfte im Körper wirkten. Für die numerische Stabilität fügte die Software automatisch Federn ein, sogenannte „weak springs“. Die sich einstellenden Reaktionskräfte blieben unter einem vernachlässigbar kleinen Wert von weniger als 10^{-5} N. Innerhalb des Moduls F „Static Structural“ bildeten Festhaltungen in Richtung der globalen y-Achse die Auflagerpunkte des Trocknungsofens, Versuchsreihe „optische Messungen“, ab. Eine Kontrolle der ermittelten Auflagerkraft in y-Richtung ergab den numerisch bedingten, vernachlässigbaren Wert in einer Größenordnung kleiner als 10^{-4} N.

5.1.4 Berechnung der Holzfeuchtigkeit

Das Finite-Elemente-System berechnete die sich in der Trockenphase der Klimafolgen K2, K3 und KD eingestellte Holzfeuchtigkeit zu verschiedenen Zeitpunkten. Der Feuchtetransport innerhalb der Probekörper ließ sich aufgrund der Analogie der physikalischen Gesetzmäßigkeiten mit thermischen Berechnungen simulieren. Nachfolgende Beschreibung nutzt die feuchtetechnischen und nicht die äquivalenten wärmetechnischen Begriffe. Die Eingabemaske der Software verwendete allerdings die Bezeichnungen aus der Wärmelehre, die daher auf den Abbildungen vorzufinden sind.

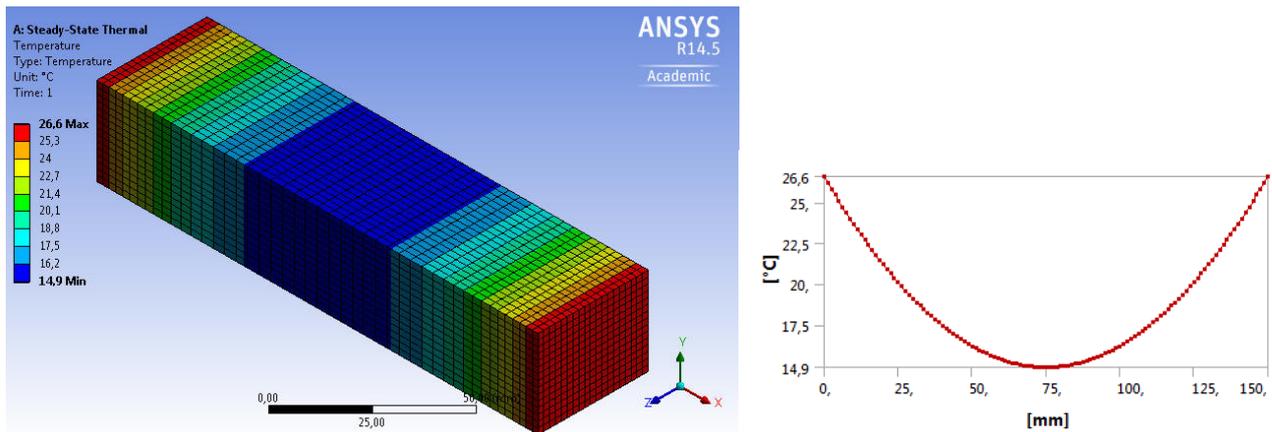


Abbildung 5-4: Anfangsfeuchteverteilung über den Querschnitt eines Prüfkörpers. Bei dem Finite-Elemente-Modell entspricht die Systemgröße „Temperatur in °C“ der „Holzfeuchte in %“.

Das Analysesystem A „Steady-State Thermal“, siehe Abbildung 5-1, wies die Anfangsverteilung der Holzfeuchtigkeit, die zum betrachteten Startzeitpunkt im Prüfkörper herrschte, dem Volumenmodell zu. Die Systeme ließen sich hierbei in drei Gruppen unterteilen, siehe auch Tabelle 12-12 im Anhang 12.4. Jeweils eine Gruppe diente der Validierung der Finite-Elemente-Modelle anhand der Versuchsreihe „optische Messungen“ und der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“, eine dritte dem Vergleich der Holzarten anhand der errechneten Spannungswerte. In Analogie zu der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“ erfolgte bei den letztgenannten Gruppen die Eingabe der Holzfeuchte mittels einer Parabelfunktion über den Querschnitt verteilt, siehe Abbildung 5-4. Bei Simulation der Klimafolgen K2 und K3 variierte die Anfangsfeuchtigkeit quer zur Faser, bei der Klimafolge KD in Faserrichtungsrichtung. Bei Klimafolge KD war jedoch eine Eingabe einer konstanten Anfangsverteilung notwendig, wenn nicht genügend gültige Messwerte zur Verfügung standen. Für die Berechnungen, die einen Vergleich mit den optischen Messwerten vorsahen, lagen generell keine Daten über den Verlauf der Anfangsholzfeuchte vor. Die als konstant angenommene Anfangsverteilung ergab sich aus der mittleren Holzfeuchte. Bei Klimafolge KD entsprach die Anfangsfeuchtigkeit nicht dem Feuchtegehalt nach der Wassersättigung, sondern notwendigerweise der Holzfeuchte, die auch den Berechnungen der Feuchtetransportkoeffizienten zugrunde lag. Andernfalls führte die Simulation zu unplausiblen Ergebnissen.

Ein in der programmeigenen Sprache APDL, Ansys Parametric Design Language, verfasstes Skript speicherte die berechnete Feuchtigkeit elementweise in einer Textdatei ab. Die Daten standen damit dem Analysesystem F nach der erforderlichen, nochmaligen Generierung des Modells zur Verfügung und dienten dann weiterhin als Anfangsfeuchteverteilung.

Mit Bezug zur Versuchsreihe „optische Messungen“ berechnete das Modul B „Transient Thermal“, siehe Abbildung 5-1, die sich im Körper einstellende Feuchteverteilung an vorgegebenen Zeitpunkten, siehe Tabelle 5-1. Der Vergleich der simulierten mit der gemessenen Holzfeuchte zur Validierung des Finite-Elemente-Modells erfolgte hingegen zu Zeitschritten, die den Messzeitpunkten der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“ entsprachen, siehe Abschnitt 3.2. Die Simulation startete jeweils zum Zeitpunkt $t = 0$ s mit der im Modul A erzeugten Feuchteverteilung.

Tabelle 5-1: Berechnungsschritte und zugehörige Zeitpunkte für Finite-Elemente-Modelle mit Bezug zur Versuchsreihe „optische Messungen“.

Zeitpunkt in			Zeitpunkt in			Zeitpunkt in			Zeitpunkt		
Step	s	h	Step	s	h	Step	s	h	Step	s	h
1	1	0	4	14.400	4	7	36.000	10	10	72.000	20
2	3.600	1	5	21.600	6	8	43.200	12	11	86.400	24
3	7.200	2	6	28.800	8	9	57.600	16			

5.1.5 Statische Berechnungen

Die allgemeinen Spannungs-Dehnungsbeziehungen bildeten die Grundlage der statischen Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode, siehe Abschnitt 2.5.1. Das Analysesystem C „Static Structural“, siehe Abbildung 5-1, berechnete die Vorverformung der Prüfkörper, die sich aufgrund der Feuchtezunahme in den Sorptionshasen der Klimafolgen K2, K3 und KD nach Konditionierung im Normalklima 20/65 ergaben. Die in dem Modul A „Steady-State Thermal“ eingegebene Anfangsholzfeuchte führte somit zu der aufgebrachten, indirekten Einwirkung. Durch Eingabe von Quell- und Schwindmaßen, die oberhalb des Fasersättigungspunktes Null waren, ergaben sich nur im hygroskopischen Bereich Volumenänderungen.

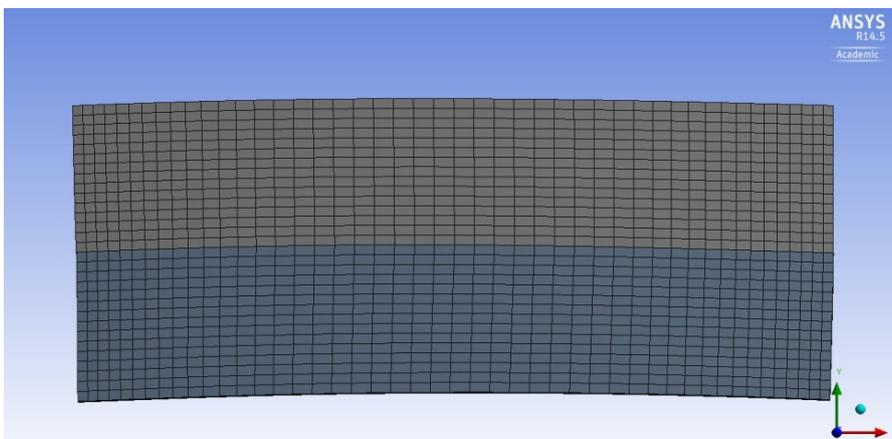


Abbildung 5-5: Nach Feuchtezunahme vorverformtes Finite-Elemente-Modell aus zwei Lamellen.

Die Module D „Mechanical APDL“ und E „Finite Element Modeler“ übergaben die Geometrie und Netzeinteilung des vorverformten Systems, siehe Abbildung 5-5, dem Analysesystem F „Static Structural“. Die Module D und E ermöglichten den Zugriff auf die Funktionen von Ansys Classical mit der Skriptsprache APDL und die notwendige Neugenerierung des Systems. Die Berechnungen in dem Modul F erfolgten auf Basis einer vorverformten, aber spannungs- und dehnungsfreien Ausgangsgeometrie. Der beabsichtigte Vergleich mit der Versuchsreihe „optische Messungen“, bei der systembedingt alle Messergebnisse zu Beginn der Trocknungsphase den Wert Null aufwiesen, erforderte diese Vorgehensweise. Die Annahme von spannungsfreien Prüfkörpern ließ sich bei den Klimafolgen K2 und K3 vertreten, da sicherlich ein merklicher Spannungsabbau aufgrund der langandauernden Lagerung und langsamen Feuchtezunahme stattgefunden hat. Die

Probekörper der Klimafolge KD lagen nach der Wässerung im Druckkessel eine Zeit lang untergetaucht im Wasserbad, sodass sich wohl auch hier Spannungen deutlich abbauen konnten.

Zu Beginn der Berechnungen der feuchteinduzierten Spannungen und Dehnungen gab das Finite-Elemente-Modell einen Zustand wieder, der dem verformten Prüfkörper nach der Sorptionsphase und vor Beginn der Trocknung weitgehend entsprach. Das Analysesystem F brachte die zuvor bestimmte Holzfeuchteverteilung als indirekte Einwirkung auf und berechnete das Modell zu den vorgegebenen Zeitpunkten, siehe Tabelle 5-1. Analog zur Vorgehensweise bei der Versuchsreihe „optische Messungen“ zeigten definierte Schnitte, vergleiche Abbildung 3-27, die ausgewählten Ergebnisse. Eine Programmierung in APDL ermöglichte den Export der Daten und die Auswertung in einer Excel-Datei.

5.1.6 Materialkennwerte und Eingabeparameter

Die Ermittlung der feuchteinduzierten Spannungen und Dehnungen basierte auf der Analogie der mathematischen und physikalischen Beschreibung der Wärmeleitung und des Feuchtetransports durch Diffusionsvorgänge. Die wärmetechnischen Kennwerte mussten daher mit den äquivalenten, auf die Feuchtetransportvorgänge bezogenen Größen eingegeben werden.

Tabelle 5-2: Materialkennwerte für die Eingabe bei den Finite-Elemente-Modellen.

Materialkennwert		Holzart					
		BU	DG	EI	ES	FI	LA
Elastizitätsmodul in N/mm ²	E_x	2280	900	1580	1500	800	950
	E_y	1160	700	1000	820	450	780
	E_z	14000	12000	13000	13000	10000	12000
Schubmodul in N/mm ²	G_{xy}	460	90	390	250	20	80
	G_{yz}	1080	900	800	620	650	830
	G_{xz}	1640	800	1150	880	600	760
Poissonzahl	ν_{xy}	0,710	0,390	0,660	0,660	0,510	0,389
	ν_{yz}	0,043	0,022	0,085	0,042	0,025	0,018
	ν_{xz}	0,073	0,020	0,120	0,058	0,030	0,028
Quell-/ Schwindmaß in 1/%	α_x	0,0021	0,0017	0,0019	0,0019	0,0017	0,0016
	α_y	0,0041	0,0028	0,0032	0,0033	0,0032	0,0032
	α_z	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5-2 gibt die bei den statischen Berechnungen verwendeten Materialkennwerte wieder. Die durch die Indizes ausgedrückten Richtungen entsprachen der Notation der Software Ansys, siehe Abbildung 2-12. Die Werte für Elastizitäts- und Schubmoduli wurden DIN 68364:1979 entnommen, sofern Angaben vorhanden waren. Andernfalls basierten die Daten auf (Vorreiter 1965; Forest Products Laboratory 1999; Neuhaus 2011). Die Poissonzahlen waren in (Vorreiter 1965; Forest Products Laboratory 1999) angegeben. Die Quell- und Schwindmaße verstehen sich je 1 % Holzfeuchteänderung und sind Mittelwerte nach (Sell 1997). Die Angaben zu den Quell- und Schwindmaßen gelten unterhalb des Fasersättigungspunktes, oberhalb wurden die Werte zu Null gesetzt. In Faserlängsrichtung wurden die Quell- und Schwindmaße generell mit dem Wert

Null angenommen. Die Eingabe der spezifischen Wärmekapazität erfolgte als Kehrwert der Rohdichte, sodass das Produkt der beiden Materialkennwerte den Wert 1 ergab.

Tabelle 5-3: Mittlere Festigkeiten nach DIN 68364:2003 für fehlerfreie, normalklimatisierte Hölzer.

Art der Festigkeit	Holzart					
	BU	DG	EI	ES	FI	LA
Zug f_t in N/mm ²	135	105	110	130	95	107
Biegung f_m in N/mm ²	120	100	95	105	80	99
Druck f_c in N/mm ²	60	54	52	50	45	55
Scher f_v in N/mm ²	10	10	11,5	13	10	10

Zur Einschätzung der berechneten Vergleichsspannungen dienten die Kennwerte der Biegefestigkeit f_m nach DIN 68364:2003 als Referenz. Die in Tabelle 5-3 angegebenen Festigkeiten wurden an kleinen, fehlerfreien Proben parallel zur Faserrichtung des Holzes ermittelt.

Die Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten basierten auf den Regressionsanalysen mit dem Lösungsansatz p/\bar{U} nach Newman (1931a), siehe Abschnitt 4 sowie Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5. Für Serie I beziehungsweise II der Finite-Elemente-Berechnungen wurden die Feuchtetransportkoeffizienten verwendet, die auf der Serie I beziehungsweise II der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ basierten. Der Diffusionskoeffizient bei Klimafolge KD entsprach in tangentialer und radialer Richtung vereinfachend einem Zehntel des ermittelten Wertes der Längsrichtung. In der Literatur (Siau 1984; Wadsö 1994b; Langrish und Walker 2006) fanden sich in Abhängigkeit von der Holzfeuchte Verhältniszahlen zwischen etwa 2 und 100. Der Vergleich der berechneten Diffusionskoeffizienten der Klimafolgen K3 und KD führte letztlich unter Berücksichtigung der genannten Literaturquellen zu der getroffenen Annahme. Da der Diffusionsstrom hauptsächlich in Längsrichtung erfolgte, war der gewählte Wert von geringerer Bedeutung. Ein gänzliches Vernachlässigen ergab allerdings eine wenig plausible Holzfeuchteverteilung.

Tabelle 5-4: Fasersättigungsfeuchtigkeit in % für die Eingabe bei den Finite-Elemente-Modellen.

Temperatur in °C/ relative Luftfeuchte in %	Holzart					
	BU	DG	EI	ES	FI	LA
20/100	34,0	26,4	29,9	32,2	28,9	23,7
40/100	32,0	24,4	27,9	30,2	26,9	21,7
65/100	29,5	21,9	25,4	27,7	24,4	19,2

Tabelle 5-4 gibt die in den Finite-Elemente-Modellen eingegebene Ausgleichsfeuchtigkeit bei Fasersättigung an. Die Angaben für eine Temperatur von 20 °C entstammen (Popper und Niemz 2009), für höhere Temperaturen basierten die Werte auf der Annahme, dass die Ausgleichsfeuchtigkeit um 0,1 % bei Temperaturzunahme um 1 °C abnimmt (Siau 1984). Die Ausgleichsfeuchte u_1 der Trocknungsphasen der Klimafolgen K2, K3 und KD wurde gemäß Tabelle 4-1 angenommenen.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Vergleich des Finite-Elemente-Modells mit der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ und der analytischen Lösung der Diffusionsdifferentialgleichung

Das Finite-Elemente-Modell berechnete die Holzfeuchte auf Basis der eingegebenen Anfangsverteilung, Randbedingungen und Feuchtetransportkoeffizienten. Dieselben Parameter lagen der analytischen Lösung der Diffusionsdifferentialgleichung zugrunde. Der Vergleich der Ergebnisse zeigte beinahe identische Verteilungen der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt, siehe Abbildung 5-6, Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9. Ein merklicher Unterschied fiel lediglich bei den ersten Zeitschritten auf, anfangs führte die analytische Lösung zu einem wellenförmigen Kurvenverlauf auf. Dennoch betrug die mittlere Abweichung $F(u)$ bei Berücksichtigung der Werte an den Messstellen sowie aller Klimafolgen und Hölzer insgesamt weniger als 0,2 % Holzfeuchtigkeit. Der Fehlerwert $F(u)$ bildete in Analogie zur Gleichung (4-4) den Mittelwert der Summe der betragsmäßigen Abweichungen ab. Die analytischen Vergleichsrechnungen basierten auf dem Lösungsansatz p/\ddot{U} nach Newman (1931a), siehe Gleichung (2-24).

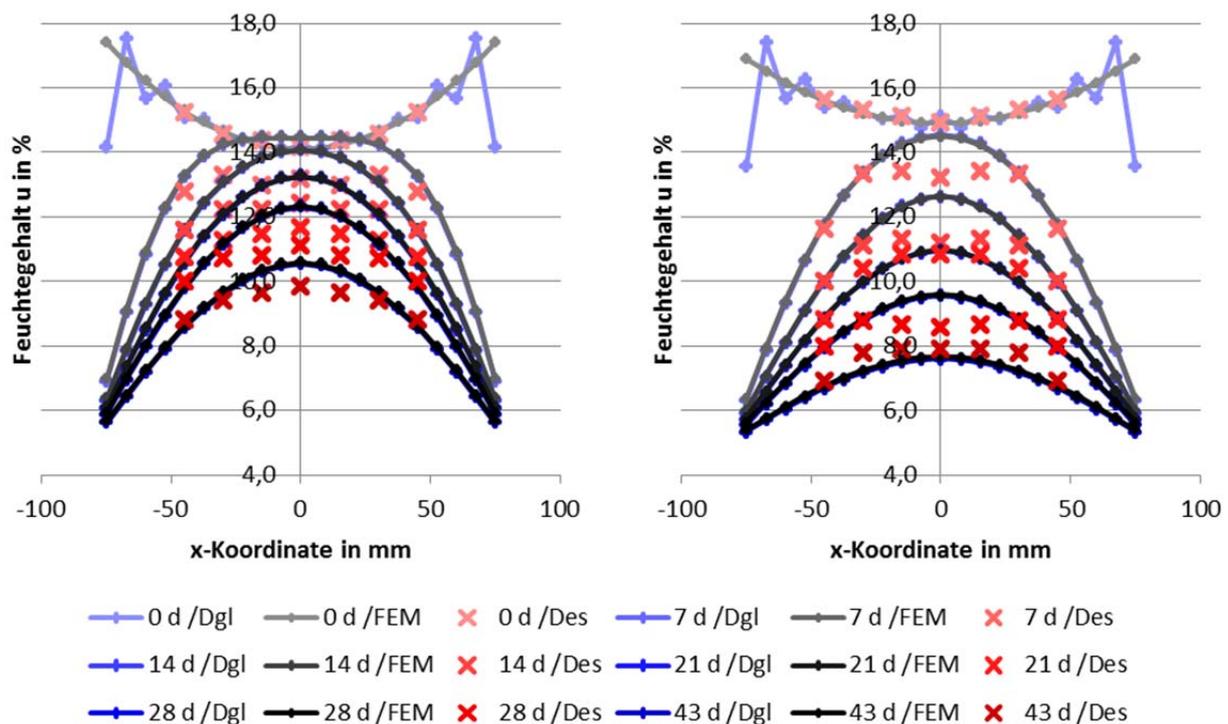


Abbildung 5-6: Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten. Vergleich der analytischen Lösung, Dgl, der numerischen Lösung, FEM, und der Messwerte, Des. Trockenphase der Klimafolge K2, jeweils Serie I. Esche mit größtem, links, und Fichte mit kleinstem Fehlerwert $F(u)$, rechts.

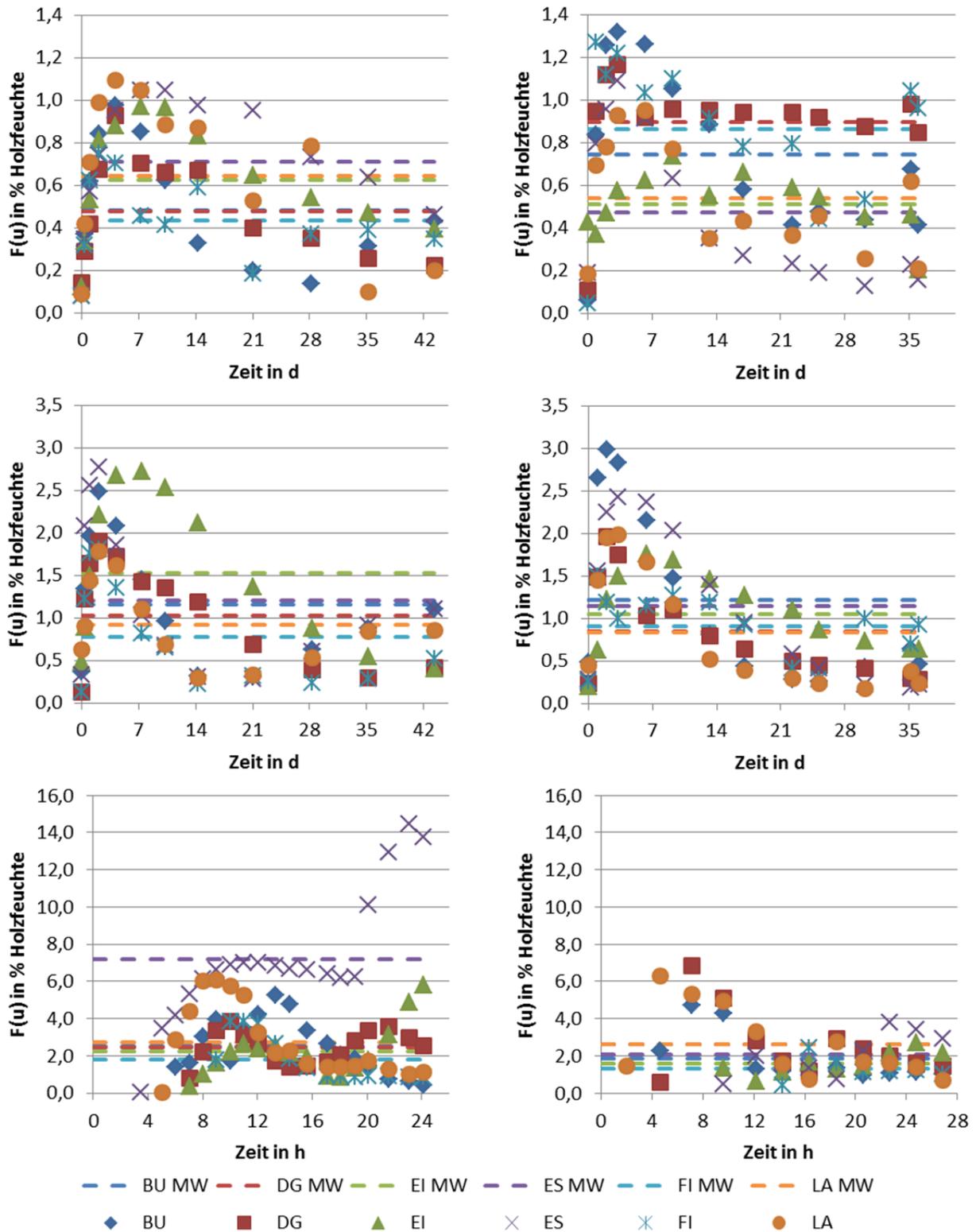


Abbildung 5-7: Fehlerwert $F(u)$ zwischen numerisch berechneter Holzfeuchtigkeit und zugehörigem Messwert zu verschiedenen Zeitpunkten. Trockenphase der Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten. Serie I, links, und II, rechts. Darstellung des Mittelwerts, MW, als gestrichelte Linie.

Zusätzlich zu der Gegenüberstellung mit der analytischen Methode erfolgte die Validierung der numerischen Systeme anhand der korrigierten Messergebnisse der Versuchsreihe „Sorption/De-

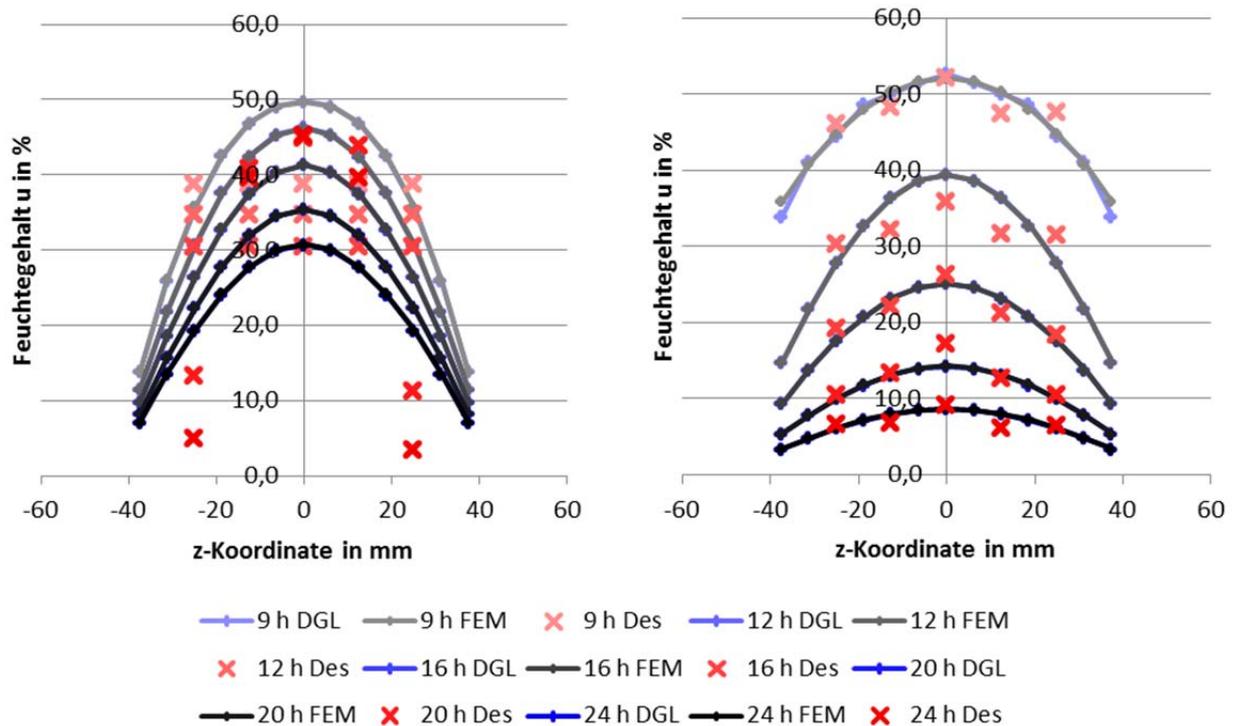


Abbildung 5-9: Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten. Vergleich der analytischen Lösung, DGL, der numerischen Lösung, FEM, und der Messwerte, Des. Trockenphase der Klimafolge KD, Serie I. Esche mit größtem, links, und Fichte mit kleinstem Fehlerwert $F(u)$, rechts. Die mittlere Holzfeuchte ersetzt fehlende Messwerte bei den ersten drei Zeitpunkten im linken Diagramm.

5.2.2 Vergleich des Finite-Elemente-Modells mit der Versuchsreihe „optische Messungen“

Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen wurden den in der Versuchsreihe „optische Messungen“, siehe Abschnitt 3.3, ermittelten Deformationen gegenübergestellt. Die Messergebnisse zeigten eine unterschiedlich stark ausgeprägte Volumenzunahme und zusätzlich eine geringe Verschiebung der Prüfkörper zu Beginn der Trockenphase. Das Finite-Elemente-Modell bildete dieses Verhalten erwartungsgemäß nicht ab. Der Vergleich der numerischen Berechnungen mit den optischen Messungen erfolgte daher nur eingeschränkt anhand bestimmter Größen. Die gewählten Vergleichswerte basierten prinzipiell auf den Koordinatendifferenzen der definierten Schnitte, siehe Abbildung 3-27. Damit ließen sich die nur bei den optischen Messergebnissen aufgetretenen Einflüsse zum Teil eliminieren.

In den ersten Trocknungsstunden nahm der Abstand der vertikalen Schnittlinien bei den optischen Messungen deutlich zu. Ein Bezug der Deformationen auf den Referenzabstand anhand der Verformungsgröße $\min \Delta x$, siehe Abbildung 5-10, führte daher nicht zu einem brauchbaren Vergleichswert. Nur in der Trockenphase der Klimafolge KD ergaben sich am Ende so große Verformungen, dass der Einfluss der Anfangsverformungen je nach Holzart vernachlässigbar war, siehe auch Abbildung 12-5 und Abbildung 12-6 im Anhang 12.2. Der Deformationswert $\max \Delta x_n$ gab die Differenz der maximalen zur minimalen Abstandsänderung der beiden gegenüber-

liegenden Schnittlinien bei Betrachtung des maßgebenden Zeitschrittes wieder. Ein Einfluss der anfänglichen Verformungen ließ sich so weitgehend ausschließen. Im Gegensatz zu den Verformungen in x-Richtung vergrößerte sich der Abstand der horizontalen Schnittlinien zu Beginn der optischen Messungen nur unwesentlich, sodass sich der auf den deformationsfreien Referenzzustand bezogene Verformungswert $\min \Delta y$ für einen Vergleich eignete.

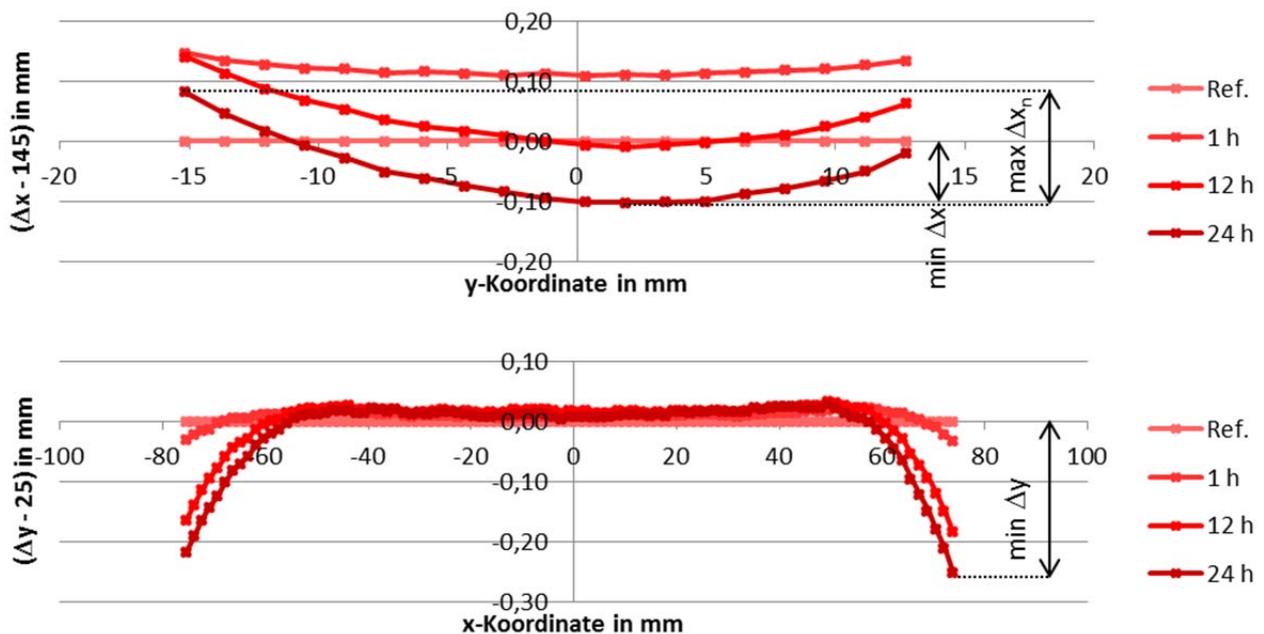


Abbildung 5-10: Definition der Abstände $\min \Delta x$, $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$ am Beispiel eines Prüfkörpers aus einer Lamelle. Analoges gilt für Prüfkörper aus zwei Lamellen.

Insgesamt zeigte der Vergleich der Abstände $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$, dass die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnung mit den optischen Messwerten in ihrer Größenordnung und in ihrer Tendenz weitgehend übereinstimmten, siehe Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 sowie Abbildung 12-7, Abbildung 12-8 und Abbildung 12-9 im Anhang 12.4. In Einzelfällen ergaben sich sogar nahezu identische Werte. Vor allem die Prüfkörper der Klimafolgen K2 und K3 aus Lärche wiesen dabei durchweg geringe Abweichungen auf, die Prüfkörper aus Buche vergleichsweise hohe. Die unterschiedlichen Konvergenzen waren sicherlich zum Teil auch darauf zurückzuführen, dass die Kennwerte aus der Literatur die tatsächlichen Materialeigenschaften nicht gleich gut abbildeten. Die numerischen Berechnungen starteten bei Klimafolge KD mit zum Teil deutlich geringerer Holzfeuchte, als die Prüfkörper zu Beginn der optischen Messungen aufwiesen. Die dem Finite-Elemente-Modell und der Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten zugrundeliegenden, physikalischen Gesetzmäßigkeiten bildeten die Diffusionsvorgänge im hygroskopischen Feuchtebereich des Holzes ab. Im Gegensatz dazu erfassten die optischen Messungen das Verhalten der Prüfkörper ausgehend vom Zustand der vollständigen Wassersättigung. Auch wenn oberhalb des Fasersättigungspunktes keine Schwindverformungen auftraten, führte die unterschiedliche Anfangsfeuchtigkeit zumindest zu zeitlich voneinander abweichenden Deformationen.

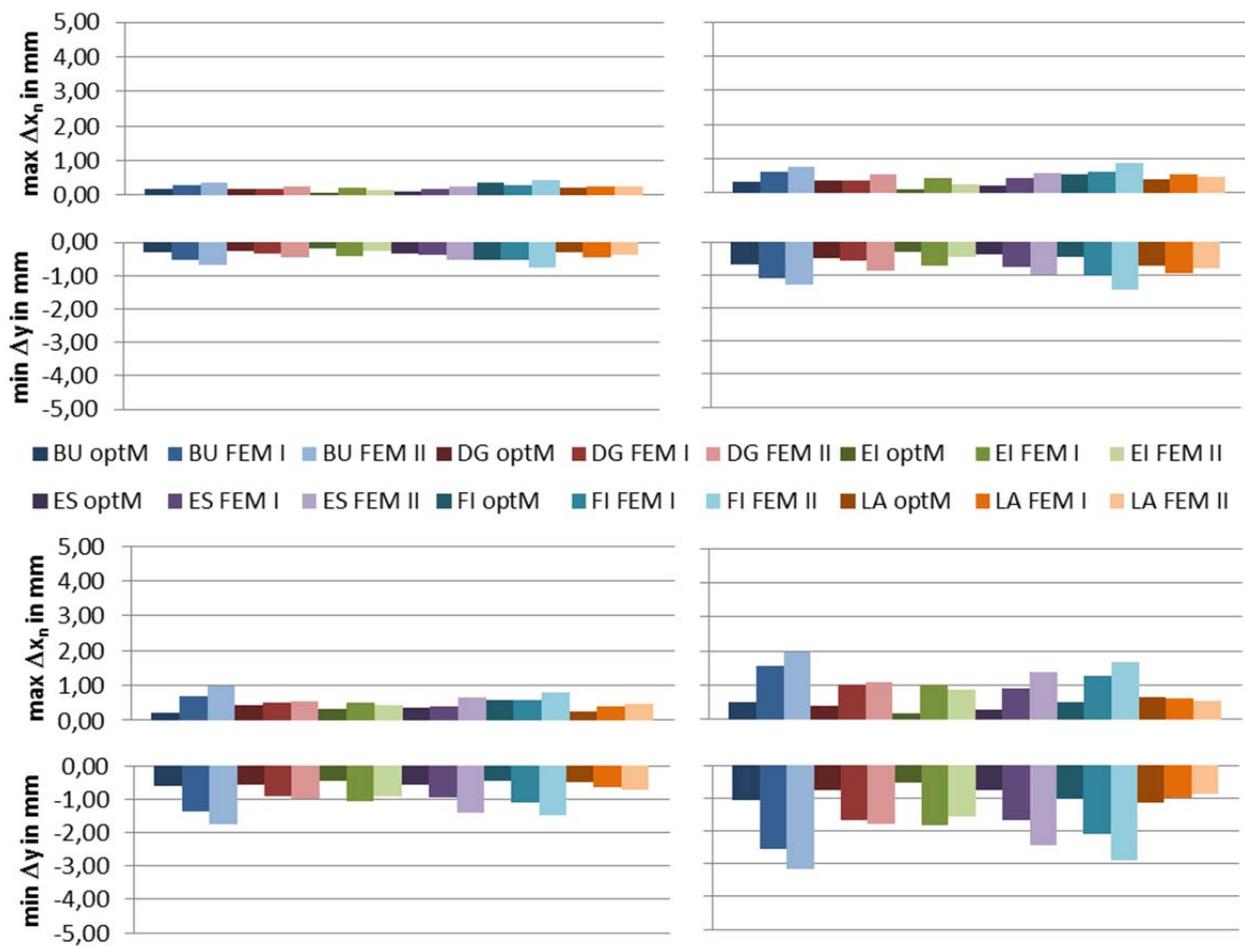


Abbildung 5-11: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge K2, oben, und K3, unten. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und aus zwei Lamellen, rechts.

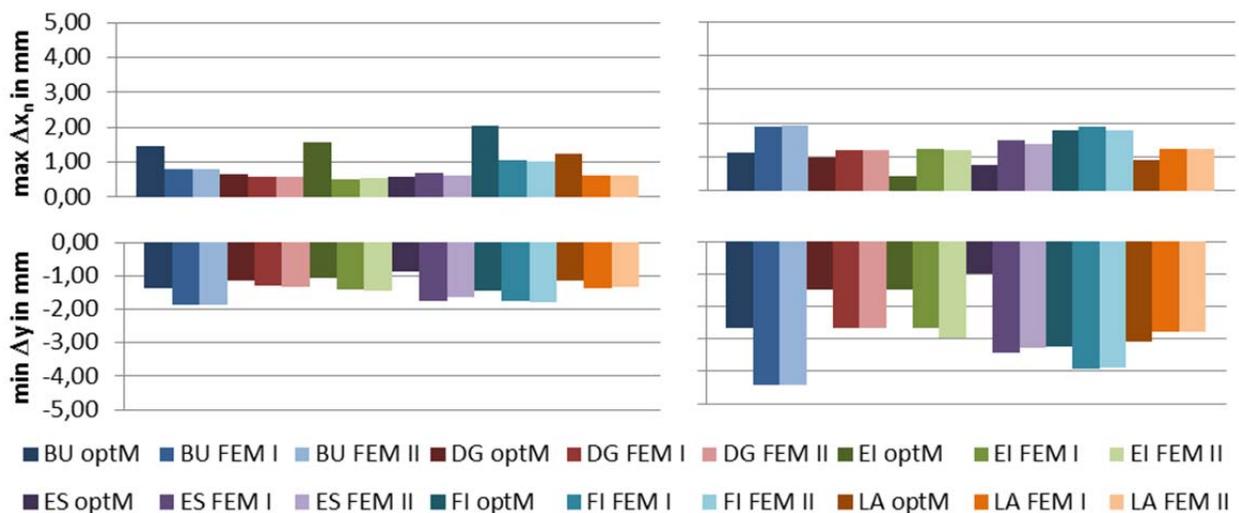


Abbildung 5-12: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge KD. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und aus zwei Lamellen, rechts.

Während bei den Klimafolgen K2 und K3 die Differenz zwischen berechnetem und gemessenem Feuchtegehalt nach 24 Stunden im Mittel unter 1 % Holzfeuchtigkeit lag, ergab sich bei der Klimafolge KD im Mittel eine Differenz von etwa 5 % Holzfeuchtigkeit. Nichtsdestotrotz zeigte die Klimafolge KD, zumindest bei den Nadelhölzern und relativ geringer Feuchtedifferenz, eine zum Teil dennoch gute Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messwerten, siehe Abbildung 5-12 und Abbildung 12-10 im Anhang 12.4.

Der zeitliche Verlauf der maximalen und minimalen Verformungsänderung verdeutlichte ebenfalls die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen realem Prüfkörper und Modell. So stimmten beispielsweise bei Douglasie und Klimafolge K2, Serie I, die Kurvenverläufe nahezu überein, siehe Abbildung 5-13. Bei dem dargestellten Prüfkörper aus Buche, als Beispiel für eine weniger gute Übereinstimmung, ergaben sich bei der Serie II schon gleich zu Beginn der Trocknungsphase erhebliche Abweichungen. Hier verursachte der Oberflächenemissionskoeffizient S , für den ein außergewöhnlich hoher Wert ermittelt wurde, die von Beginn an großen Verformungen.

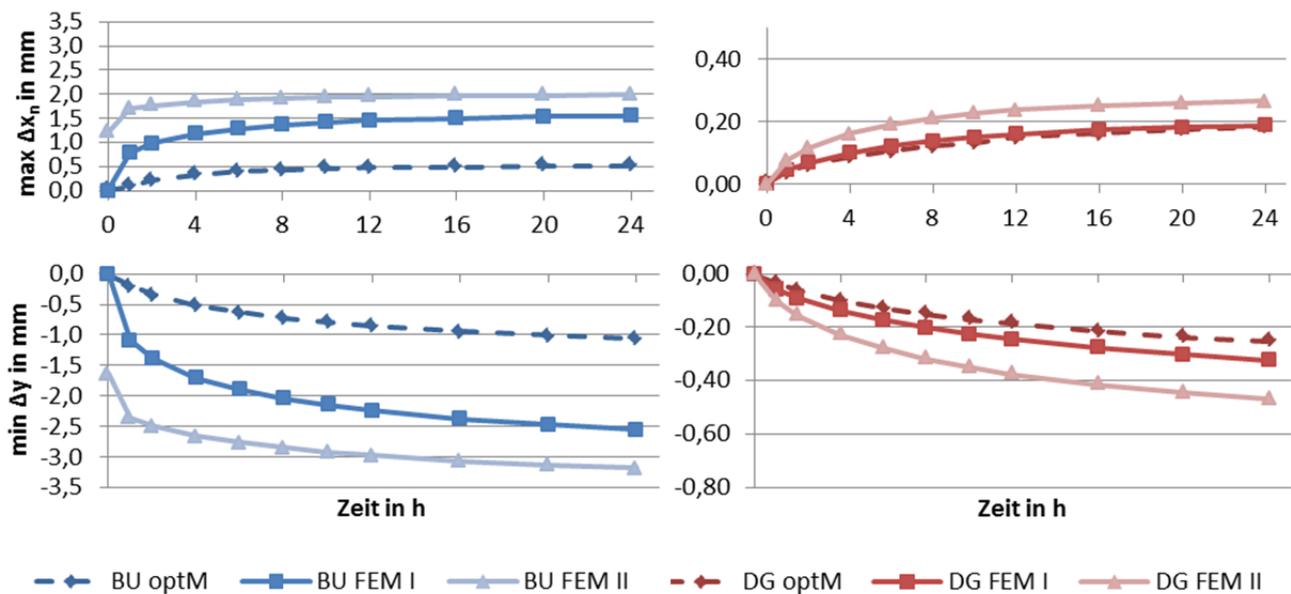


Abbildung 5-13: Abstände $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$ zu elf Zeitpunkten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, Klimafolge K3, Prüfkörper aus zwei Lamellen, links, und Douglasie, Klimafolge K2, Prüfkörper aus einer Lamelle, rechts.

Bei der Klimafolge KD verursachte vermutlich die niedrigere Anfangsfeuchtigkeit, dass die Verformung bei der Finite-Elemente-Berechnung teilweise schneller zunahm als bei der optischen Messreihe. Dennoch führten auch hier, je nach Holzart und Güte der Eingabeparameter, die Berechnungen zu Kurven, die in weiten Bereichen nahezu deckungsgleich mit den Ergebnissen der optischen Messung verliefen, siehe Abbildung 5-14.

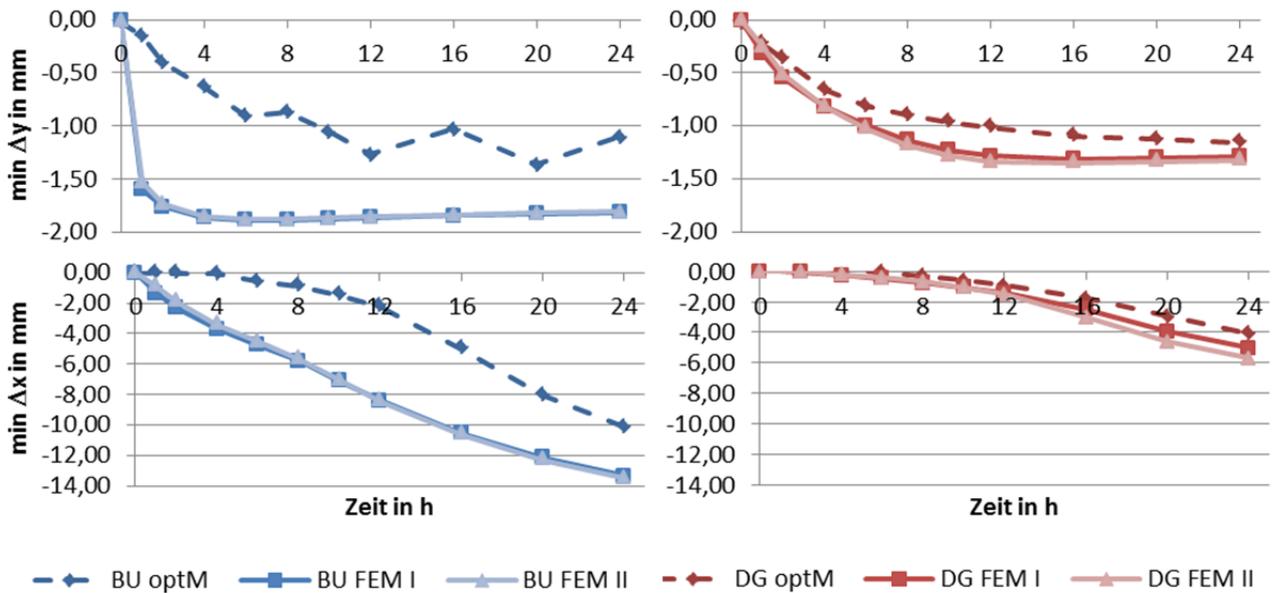


Abbildung 5-14: Abstände $\min \Delta y$ und $\min \Delta x$ zu elf Zeitpunkten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, links, und Douglasie, rechts. Klimafolge KD, Prüfkörper aus einer Lamelle.

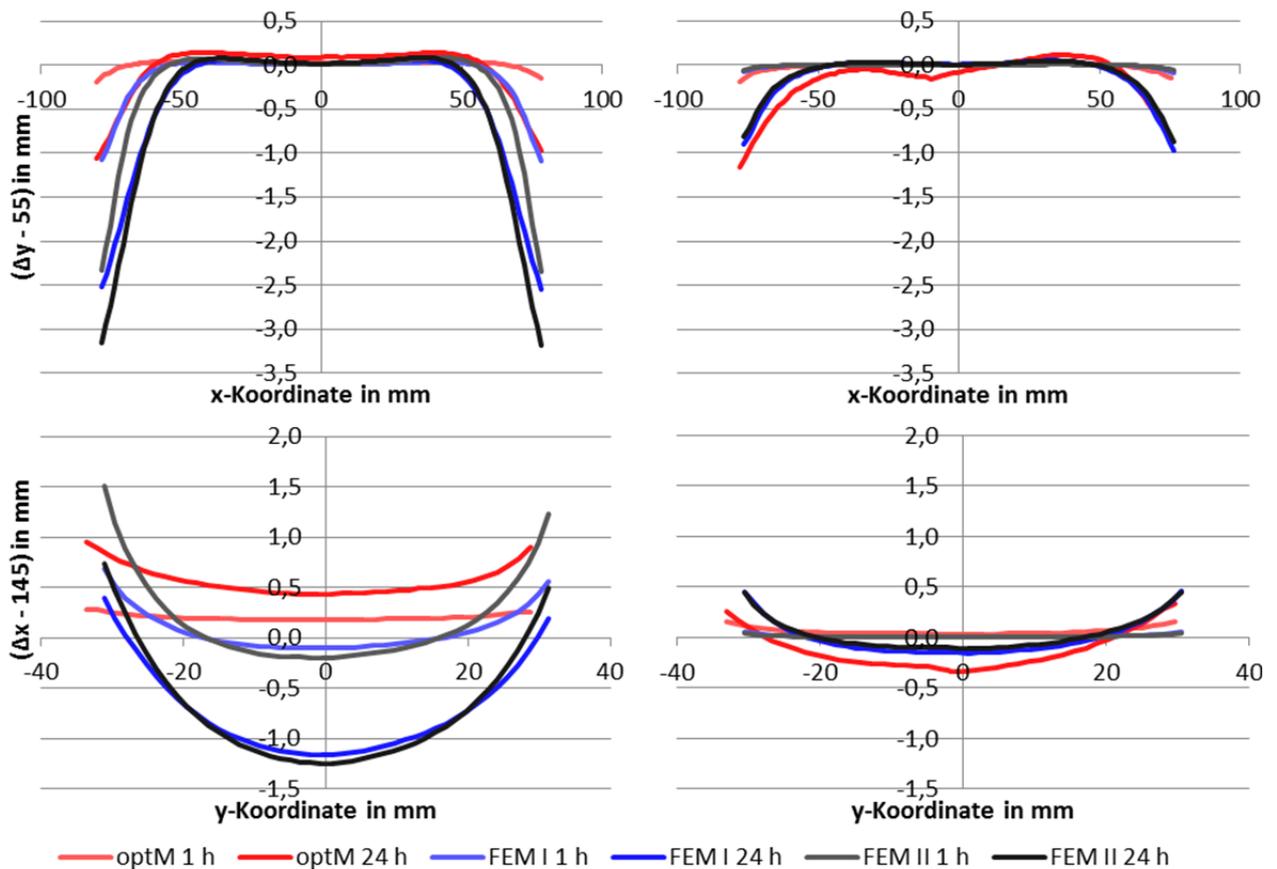


Abbildung 5-15: Lotrechte Abstandsänderung der Schnittlinien in y-Richtung, oben, und in x-Richtung, unten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, links, und Lärche, rechts. Klimafolge K3, Prüfkörper aus zwei Lamellen.

Die Betrachtung der definierten Schnitte schloss die Möglichkeit ein, dass bereits von Beginn an nicht identisch verlaufende Schnittlinien zu Unterschieden zwischen numerischer Berechnung und optischer Messung führten. Am Rand zeigten die Kurven die steilsten Gradienten und daher konnte eine nicht deckungsgleiche Schnittlinienführung, insbesondere bei den Höchstwerten, merkliche Abweichungen bedingen. Ein immer gleicher Randabstand der Schnittlinien war nicht zu gewährleisten, da die Positionen der Prüfkörper im Koordinatensystem der Messbilder nicht exakt übereinstimmten. Zudem verursachten ungültige Facetten unterschiedliche Schnittlängen. Die Darstellung der Kurvenverläufe über den Querschnitt beschränkte die Ergebnisauswertung nicht auf die Maximal- und Minimalwerte. Die Darstellung beinhaltete allerdings die positive Abstandsänderung der vertikalen Schnittlinien aufgrund der Volumenzunahme der Prüfkörper, siehe Abbildung 5-15. Gegenüber dem Prüfkörper aus Buche zeigte der Prüfkörper aus Lärche kaum eine Zunahme des Abstandes Δx und einen teilweise identischen Kurvenverlauf mit der numerischen Berechnung.

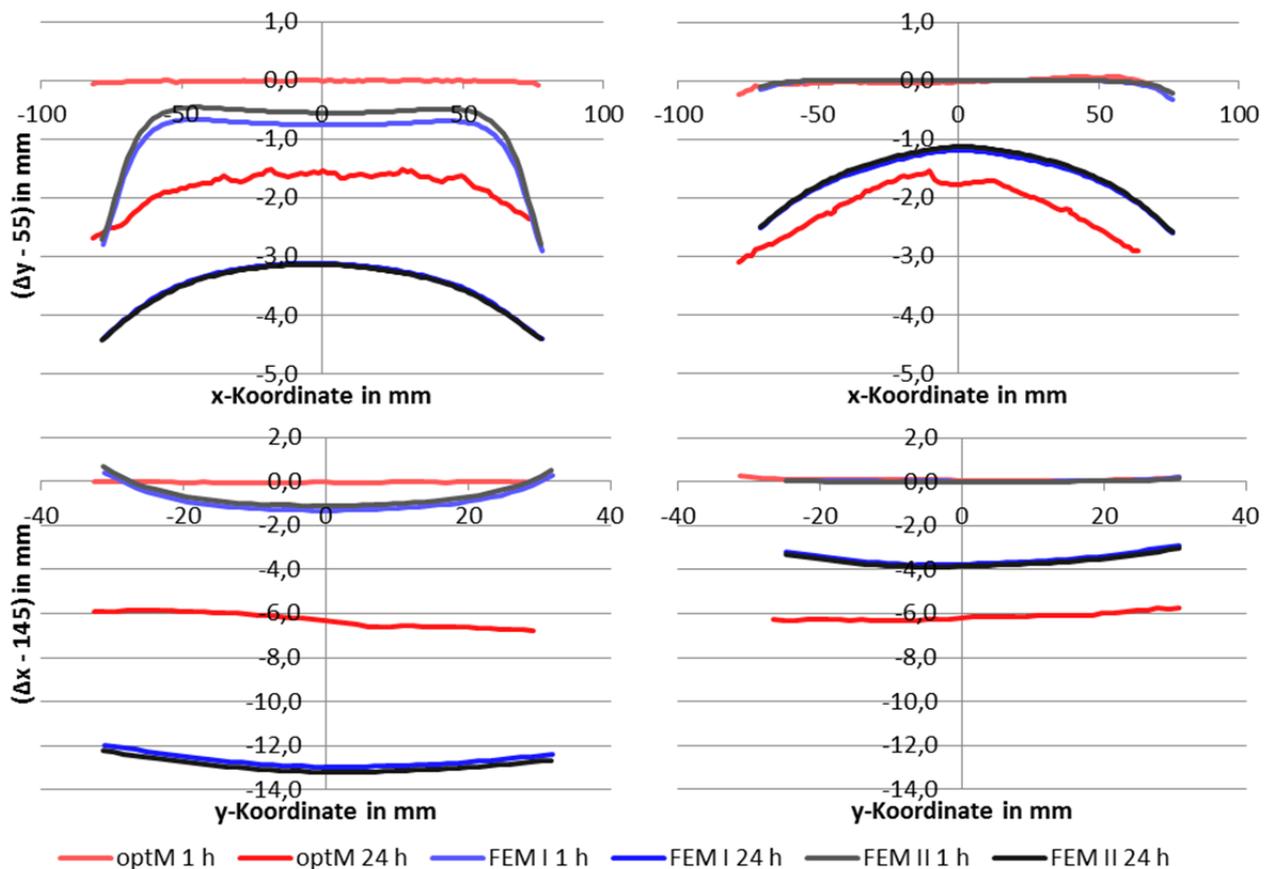


Abbildung 5-16: Lotrechte Abstandsänderung der Schnittlinien in y-Richtung, oben, und in x-Richtung, unten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, links, und Lärche, rechts. Klimafolge KD. Prüfkörper aus zwei Lamellen.

Anhand der Graphen der Klimafolge KD ließ sich in Abbildung 5-16 ablesen, dass die unterschiedliche Anfangsfeuchtigkeit abweichende Kurvenverläufe mitverursachte. So wies das optische Messbild des Prüfkörpers aus Buche nach einer Stunde Trocknung relativ geringe

Deformationen auf, während die Berechnungen schon ein deutliches Schwinden aufzeigten. Die Kurvenverläufe nach 24-stündiger Trocknung spiegelten auch die unterschiedliche Holzfeuchte bei der optischen Messung und der numerischen Berechnung wider. Geringere Verformungswerte gingen mit jeweils einem höheren Wassergehalt des Prüfkörpers oder des Modells einher.

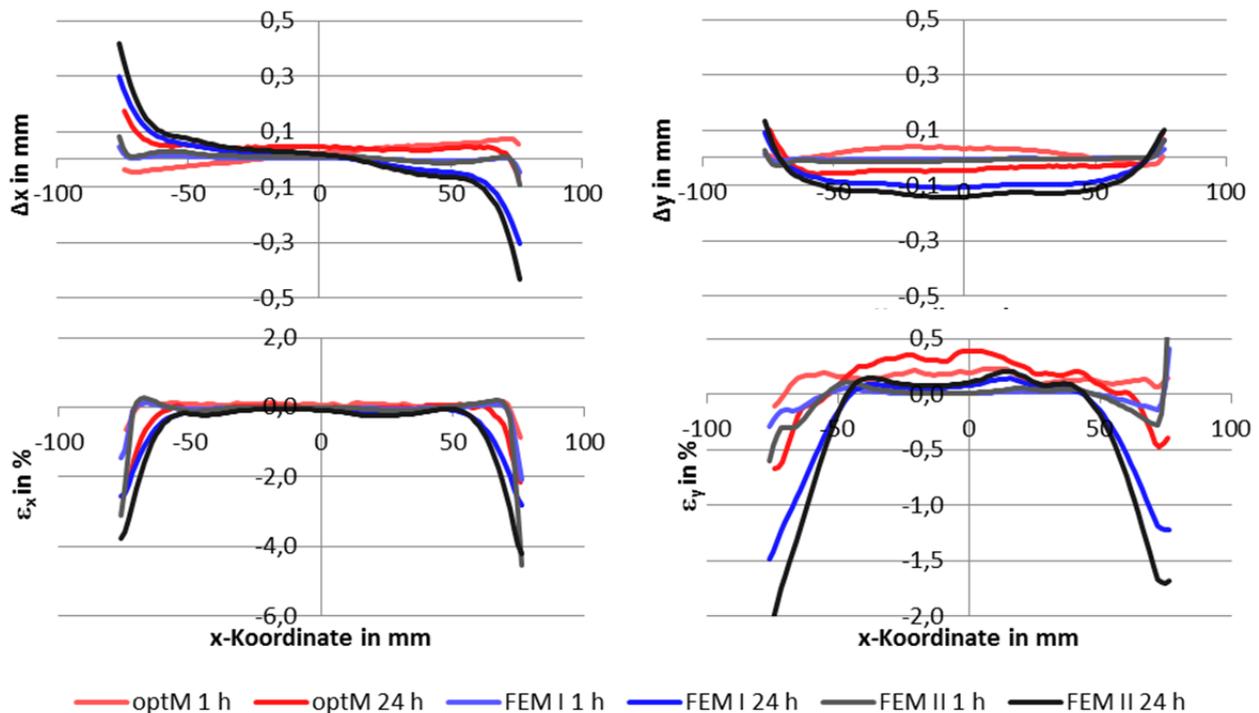


Abbildung 5-17: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Fichte, Klimafolge K2, zwei Lamellen.

Die Ergebnisse des Schnittes 1 zeigten die Beanspruchung der Klebefuge während der Trocknungsphase. Analog zu den Koordinatendifferenzen Δx und Δy , die die veränderte Form und Lage der Schnittlinie verdeutlichten, ergaben die Verläufe der Dehnungen ε_x und ε_y eine prinzipiell gute Übereinstimmung zwischen der Versuchsreihe „optische Messungen“ und den Finite-Elemente-Berechnungen in der Trocknungsphase der Klimafolgen K2 und K3. Die entsprechenden Kurvenverläufe sind exemplarisch für die Prüfkörper aus Fichte in Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 dargestellt, im Anhang 12.4 befinden sich die Graphen für die Prüfkörper aus Buche und Lärche. Bei der Klimafolge KD, die zu Rissbildung während der Trocknung führte, wiesen die Dehnungskurven einen sehr unregelmäßigen, welligen Verlauf auf, siehe Abbildung 5-19 und Anhang 12.4. Die Finite-Elemente-Berechnungen basierten auf einem elastischen Materialverhalten, die Graphen zeigten einen vergleichsweise regelmäßigen Verlauf.

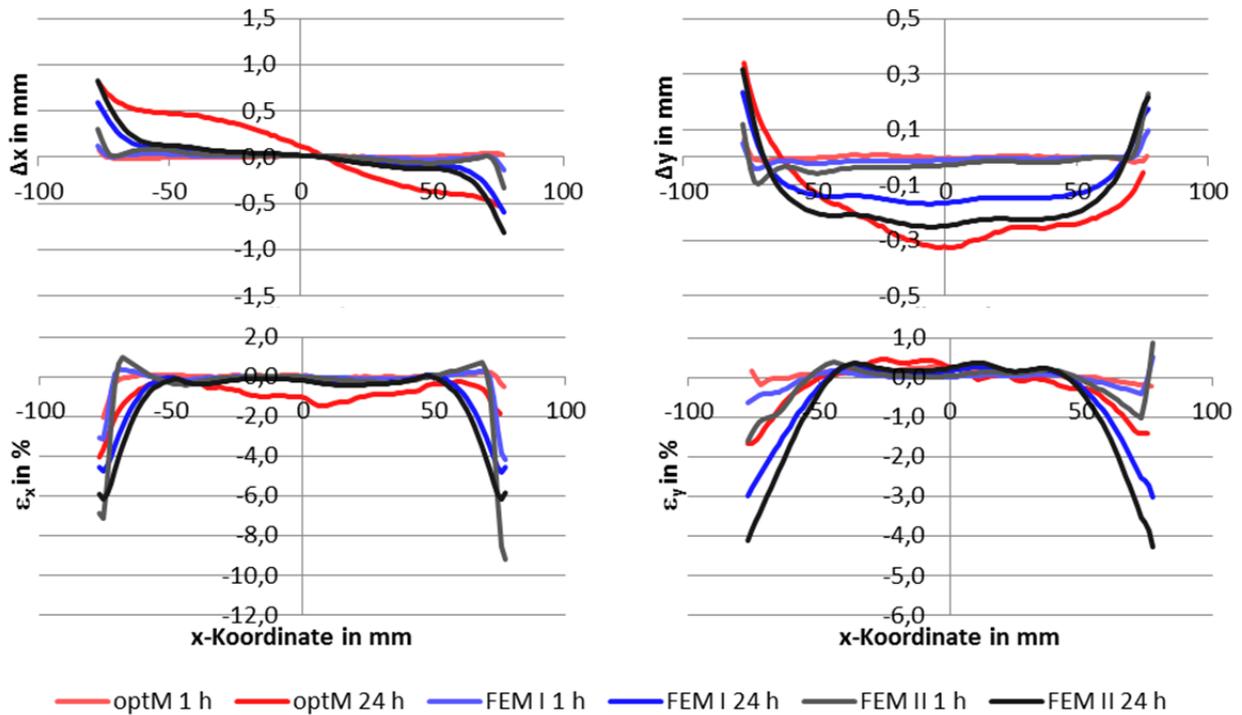


Abbildung 5-18: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Fichte, Klimafolge K3, zwei Lamellen.

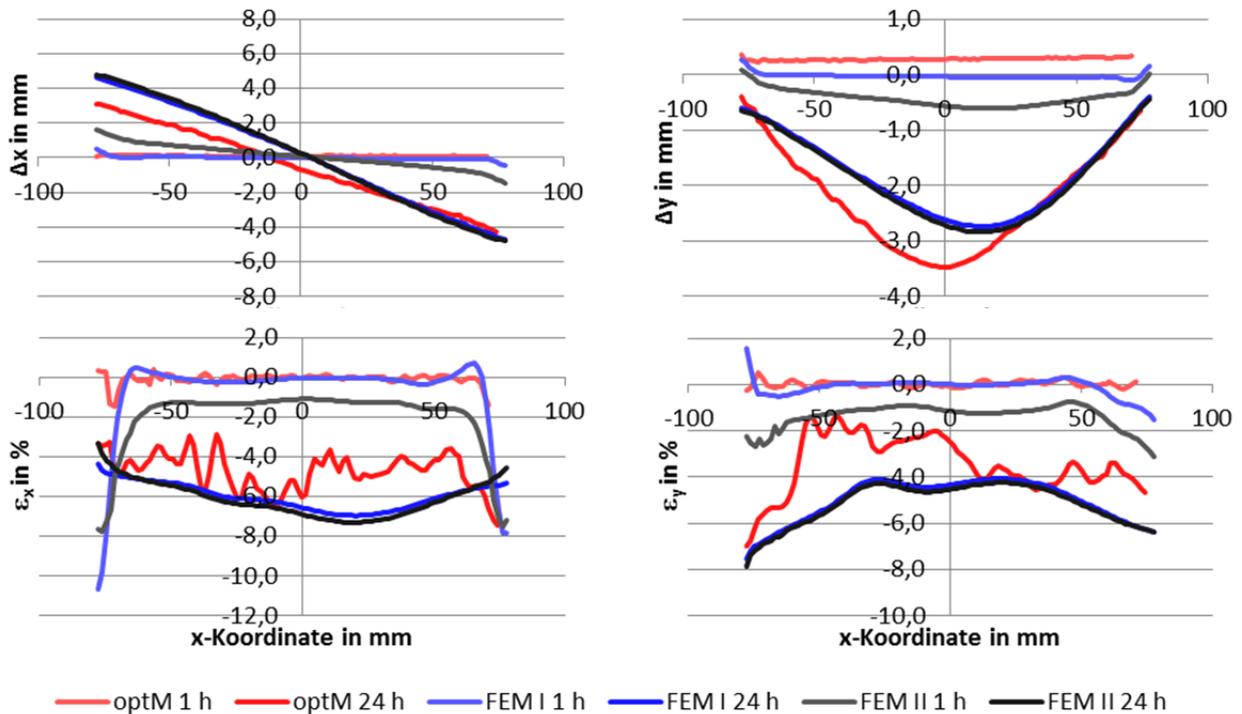


Abbildung 5-19: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Fichte, Klimafolge KD, zwei Lamellen.

5.2.3 Vergleich der Holzarten anhand feuchteinduzierter Spannungen

Zum Vergleich der betrachteten Hölzer wurden Prüfkörper mit einem Aufbau aus zwei Lamellen modelliert und die Trocknungsphase der Klimafolgen K2, K3 und KD simuliert. Elf Zeitschritte bildeten die 24-stündige Trocknung ab, siehe Tabelle 5-1. Um bei allen Modellen bezüglich des Einflusses der Jahrringlage gleiche Voraussetzungen zu schaffen, war der Ursprung der lokalen Koordinatensysteme identisch. Die voneinander abweichenden Spannungen basierten somit zum einen auf den verschiedenen Materialeigenschaften der Holzarten und zum anderen auf den Eingaben zu den feuchtigkeitsrelevanten Größen. Zwischen Serie I und II ergaben sich wegen der abweichenden Feuchtetransportkoeffizienten und der zum Teil unterschiedlichen Ausgleichsfeuchtigkeit, siehe Tabelle 4-1, auch innerhalb einer Holzart und Klimafolge merkliche Differenzen hinsichtlich des Spannungsniveaus.

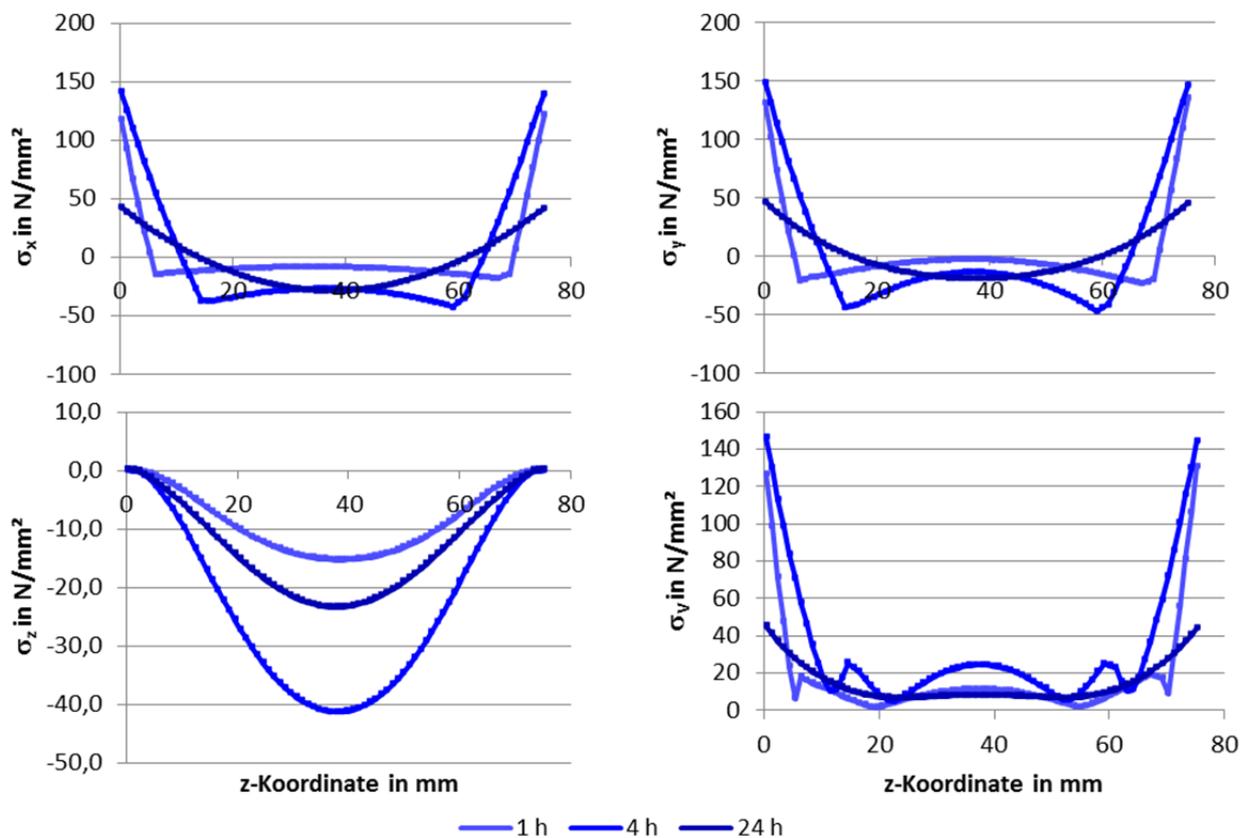


Abbildung 5-20: Spannungen σ_x , σ_y , σ_z und σ_{vy} , Schnittführung am oberen Rand der unteren Lamelle mittig zur Prüfkörperbreite. Buche, Serie I, Klimafolge KD.

Die Spannungsverläufe über den Querschnitt veranschaulichen exemplarisch Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21. Die Darstellung der Spannungen erfolgte hierbei entlang von Pfaden, siehe Abbildung 5-22, die parallel zur Fuge zwischen den beiden Lamellen verliefen. Die Schnittlinien lagen aus darstellungstechnischen Gründen allerdings nicht in Fugenebene, sondern wiesen einen geringen Abstand zur Fuge von etwa 2 mm auf. Das in dieser Arbeit sowohl für die Normal- als auch die Schubspannung verwendete Kurzzeichen σ ergab sich aus der Nomenklatur der

benutzten Berechnungssoftware. Die Indizes kennzeichneten die globalen Koordinatenachsen, siehe auch Abschnitt 2.5.1 sowie Abbildung 2-12.

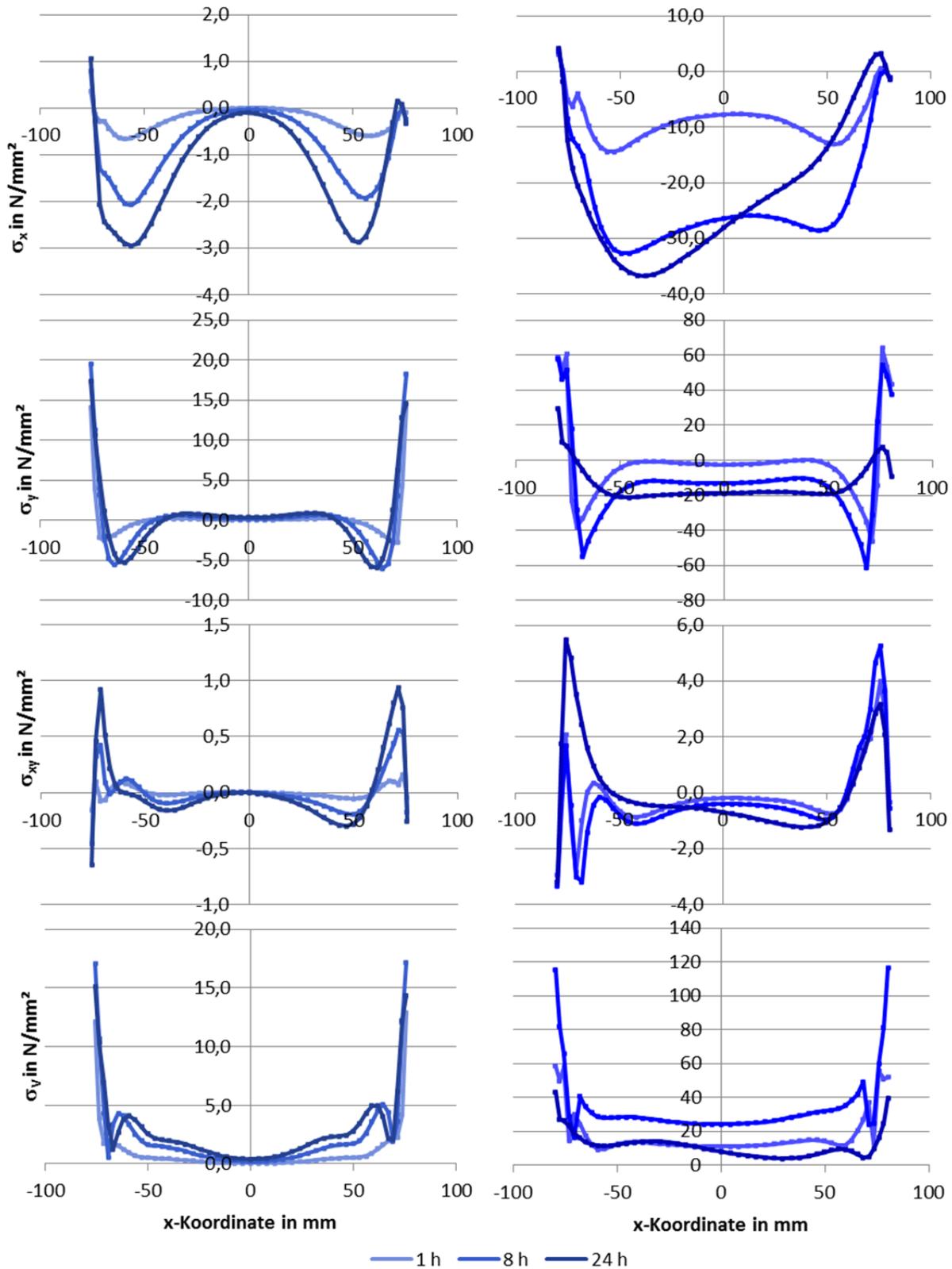


Abbildung 5-21: Spannungen σ_x , σ_y , σ_{xy} und σ_v , Schnittführung am oberen Rand der unteren Lamelle mittig zur Prüfkörperlänge. Buche, Serie I. Klimafolge K2, links, und KD, rechts.

Das feine Netz der Volumenmodelle lieferte die Ergebnisse an nahezu jeder beliebigen Stelle des Körpers. Die nachfolgende Auswertung der auftretenden Spannungen erfolgte sowohl in den Elementen der Fuge zwischen den beiden Lamellen eines Prüfkörpers, siehe Abbildung 5-22, als auch in allen Elementen des gesamten Prüfkörper, siehe Abbildung 5-23. Bei den Finite-Elemente-Modellen der Klimafolgen K2 und K3 änderten sich die Ergebnisse in Richtung der z-Achse aufgrund numerischer Ungenauigkeiten nur unwesentlich, weshalb die Verwendung der halben Prüfkörperlänge gerechtfertigt war. Die Werte der Prüfkörper der Klimafolge KD variierten hingegen in alle Richtungen. Die Auswertung der Vergleichsspannung σ_v , siehe Gleichung (2-51), bot den Vorteil, dass sich anhand eines Wertes der dreidimensionale Spannungszustand der Hölzer beschreiben und vergleichen ließ.

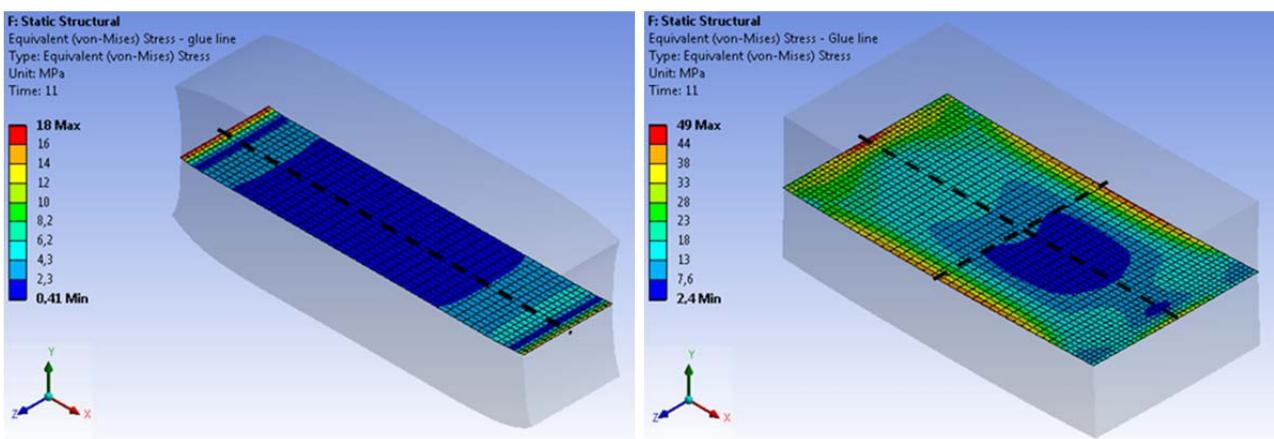


Abbildung 5-22: Vergleichsspannung σ_v nach simulierter 24-stündiger Trocknung in der Fuge zwischen zwei Lamellen, Buche, Klimafolge K2, links, und KD, rechts. Gestrichelte Linien markieren Pfade für die Ergebnisauswertung der Spannungsverläufe über den Querschnitt.

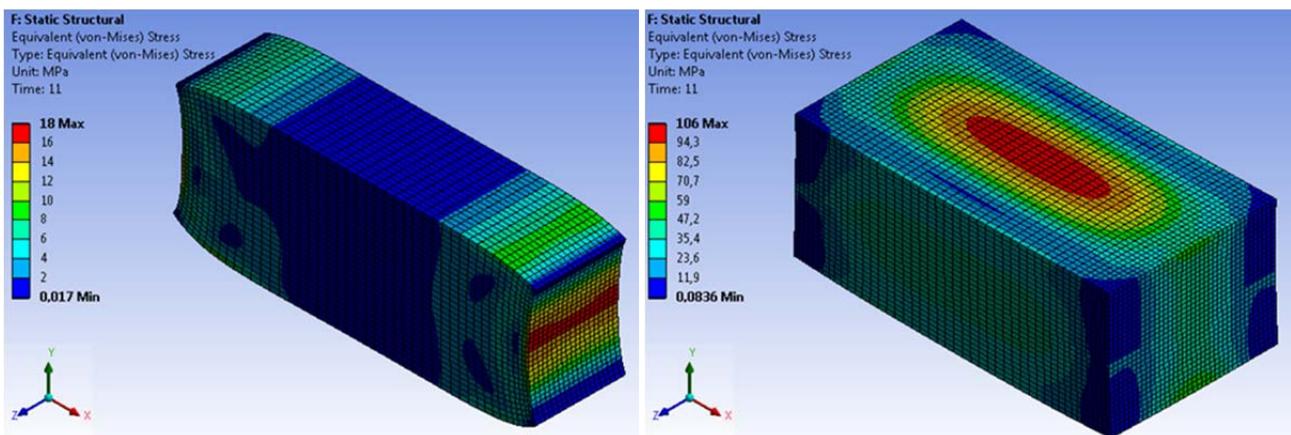


Abbildung 5-23: Vergleichsspannung σ_v nach simulierter 24-stündiger Trocknung, Buche, zwei Lamellen, Klimafolge K2, links, und KD, rechts.

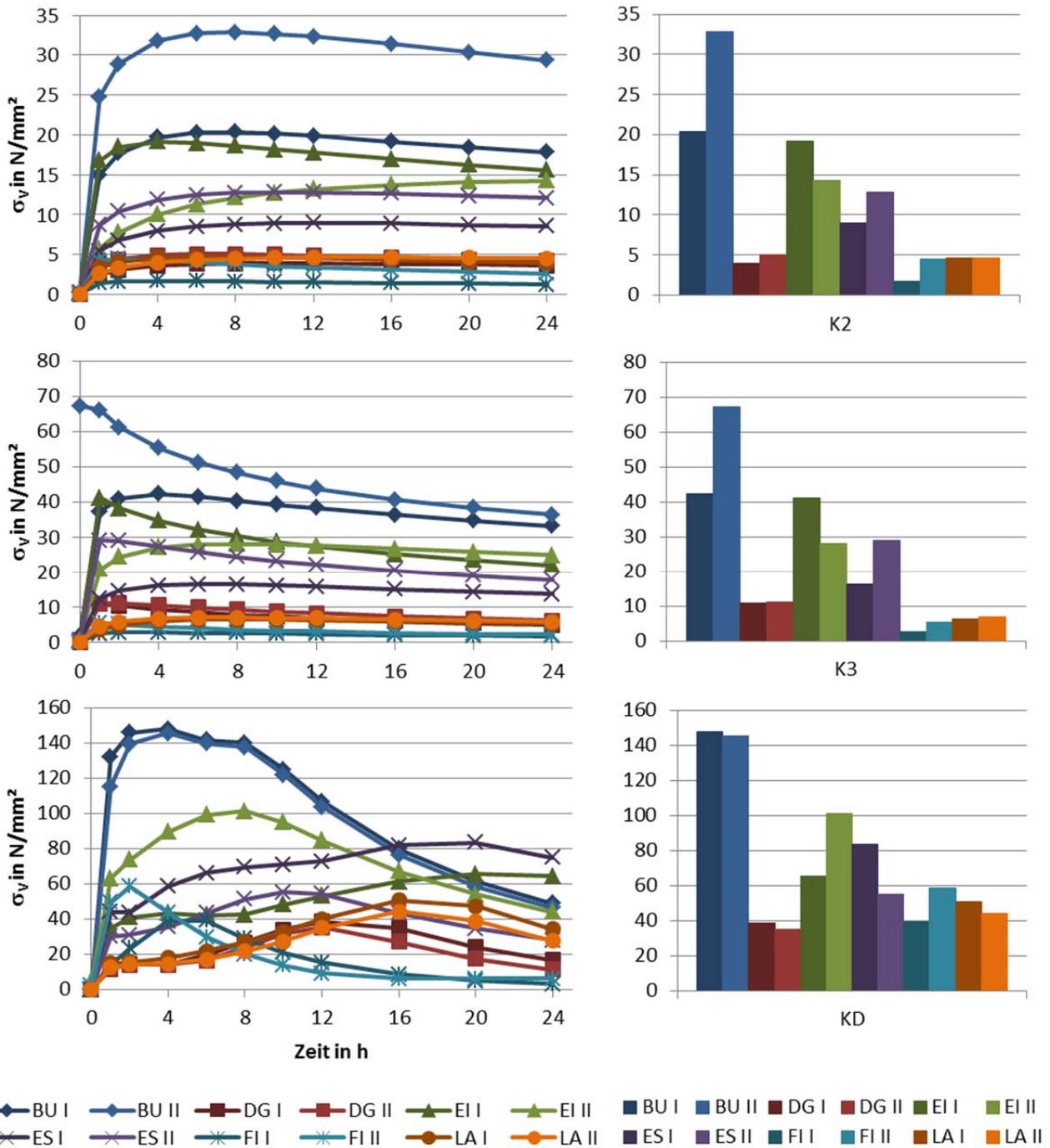


Abbildung 5-24: Verlauf der maximalen Vergleichsspannung σ_v über die Zeit t , links, und jeweilige Höchstwerte, rechts, in der Fuge zwischen zwei Lamellen, Serie I und II. Betrachtung von elf Zeitpunkten der Trockenphase der Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.

Erwartungsgemäß ergaben sich für die Laubhölzer in allen Klimafolgen höhere maximale Vergleichsspannungen σ_v als für die Nadelhölzer, siehe Abbildung 5-24. In den Klimafolgen K2 und K3 erreichten die Modelle, bis auf Eiche der Serie II, innerhalb der ersten sechs Stunden der 24-stündigen Trocknungsdauer über 90 % des maximalen Vergleichsspannungswertes. Bei Klimafolge KD galt dies lediglich für Buche und Fichte. Alle Kurven mit Ausnahme der Graphen

des Prüfkörpers aus Eiche, Serie II, Klimafolge K2, zeigten ein Maximum innerhalb der betrachteten Trocknungsdauer. Allerdings verringerte sich hier die Spannungszunahme zum Ende der Trocknungsphase bereits deutlich. Die maximale Vergleichsspannung σ_v des gesamten Modells und in der Fuge waren in den Klimafolgen K2 und K3 in etwa gleich. Auch der zeitliche Verlauf der Spannungsänderung unterschied sich zwischen Fuge und Gesamtkörper nur in der Klimafolge KD. Das Spannungsmaximum des Modells BU K3 II trat zum Zeitpunkt $t = 0$ der Berechnung auf. Der mit Abstand höchste ermittelte Oberflächenemissionskoeffizient verursachte die sofortige Anpassung der Oberflächenfeuchte an das Umgebungsklima. So entwickelte sich eine große Feuchtedifferenz zwischen Prüfkörpertrand und Innerem.

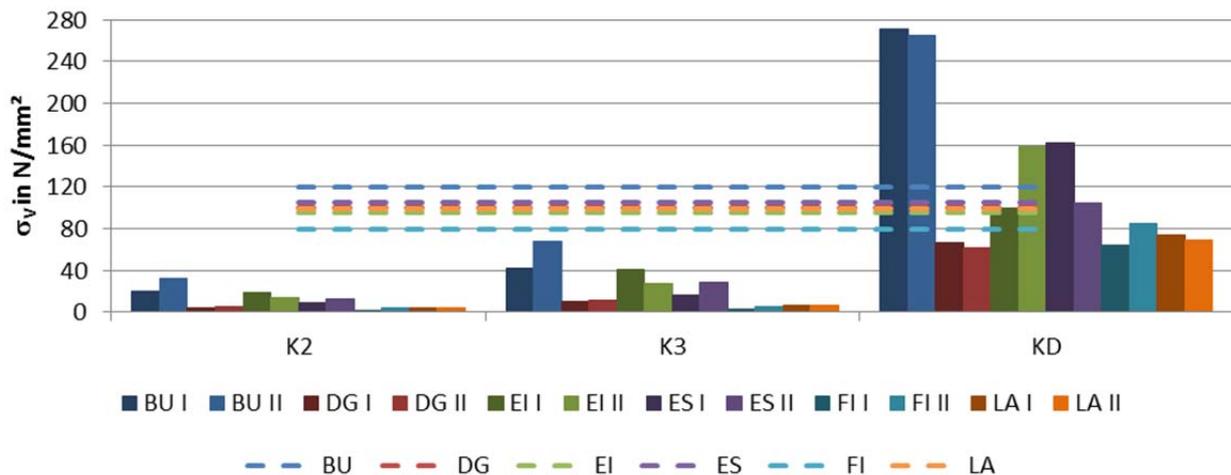


Abbildung 5-25: Maximale Vergleichsspannung σ_v des gesamten Prüfkörpers, Serie I und II. Betrachtung von elf Zeitpunkten bei 24-stündiger Trocknung. Kennwerte der Biegefestigkeit f_m als gestrichelte Linien.

Als Kennwert zur Einschätzung der Größenordnung der berechneten, den räumlichen Spannungszustand beschreibenden Vergleichsspannung σ_v diente die Biegefestigkeit f_m nach DIN 68364:2003, siehe Abbildung 5-25. Die angegebene Biegefestigkeit liegt jeweils etwas über der Zugfestigkeit in Faserlängsrichtung, siehe Tabelle 5-3. Die Festigkeit von Holz hängt allgemein vom Winkel zwischen Beanspruchungs- und Krafrichtung ab und so beträgt die Zugfestigkeit senkrecht zur Faser bei kleinen fehlerfreien Nadelholzproben nur etwa 2 bis 4 % der Längszugfestigkeit, bei Laubhölzern etwa 4 bis 5 % (Neuhaus 2011).

Generell gilt die Anforderung, dass die Festigkeit der Klebstoffverbindung nicht geringer als die Festigkeit des Holzes sein sollte. Der Verhältnswert σ_v / f_m lag bei den Klimafolgen K2 und K3 sowohl bei Betrachtung der Fuge als auch bei Betrachtung des gesamten Prüfkörpers meist deutlich unter 0,5. Allein bei dem Modell BU K3 II, mit einem geringen Übergangswiderstand und daher sehr hohen Spannungswerten zu Beginn der Berechnung, ergab sich ein etwas höheres Verhältnis, siehe Abbildung 5-26. Die Laubhölzer zeigten, bezogen auf ihre Biegefestigkeit, in allen Klimafolgen insgesamt höhere Ausnutzungsgrade als die Nadelhölzer. Während in den Trocknungsphasen der Klimafolgen K2 und K3 die Spannungsmaxima in der Fuge auftraten, verteilten sich in der Klimafolge KD die maximalen Spannungen über das gesamte Modell,

vergleiche Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25. Bei alleiniger Berücksichtigung der Fugenfläche wiesen die Modelle der Buche und der Eiche in der Klimafolge KD Verhältniswerte σ_v / f_m über 1,0 auf. Bei Betrachtung des gesamten Prüfkörpers lagen zusätzlich die Verhältniswerte σ_v / f_m bei Modellen der Esche und Fichte über 1,0.

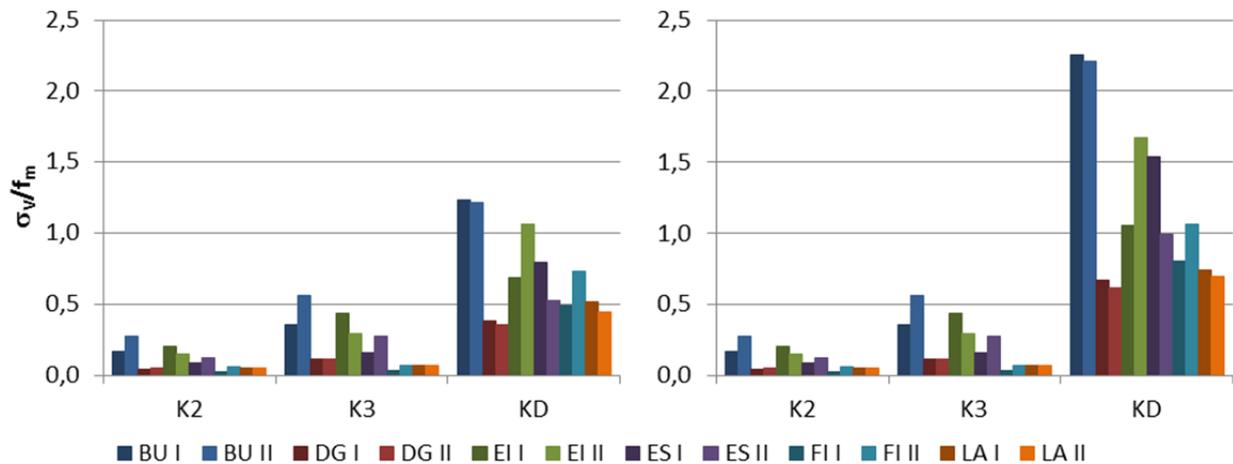


Abbildung 5-26: Verhältnis der maximalen Vergleichsspannungen σ_v der Klimafolgen K2, K3 und KD zur Biegefestigkeit f_m bei Betrachtung der Fuge zwischen zwei Lamellen, links, und des gesamten Prüfkörpers, rechts. Serie I und II.

Die Spannungszunahme zwischen den Modellen, die eine Delaminierungsprüfung simulierten, und den Modellen, die sich an den Klimabedingungen der Nutzungsklassen 2 und 3 der DIN EN 1995-1-1 orientierten, war bei Laubholz deutlich höher als bei Nadelholz, siehe Abbildung 5-27. Die größten Spannungszuwächse waren bei der Buche feststellbar, die Laubhölzer wiesen allerdings eine weite Spanne zwischen etwa 60 und 250 N/mm² auf. Bei den Nadelhölzern wies die Fichte die größten Differenzen auf, insgesamt lagen die Zuwächse zwischen 50 und 80 N/mm².

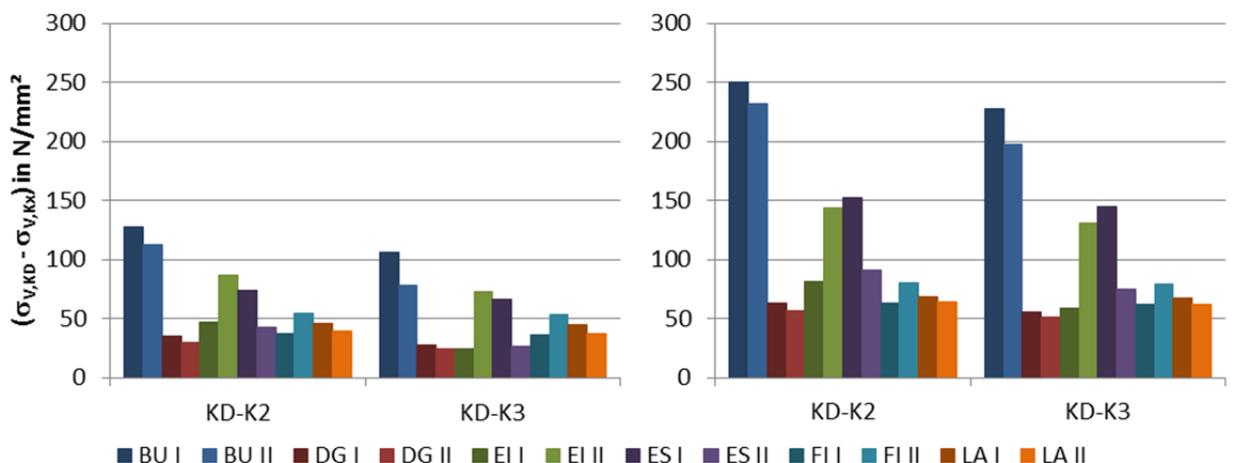


Abbildung 5-27: Differenzen der maximalen Vergleichsspannungen σ_v zwischen Klimafolge KD und K2/K3 bei Betrachtung der Fuge zwischen zwei Lamellen, links, und des gesamten Prüfkörpers, rechts. Serie I und II.

5.3 Diskussion

Die Finite-Elemente-Berechnungen führten zu Spannungswerten, die den Unterschied zwischen den Holzarten, basierend auf dem Schwind- und Quellverhalten, den Sorptionseigenschaften und den mechanischen Kenngrößen wie Elastizitätsmoduli, Schubmoduli und Querkontraktionszahlen, veranschaulichten. Dabei wurden vereinfachende Annahmen hinsichtlich der Modellierung der Holzeigenschaften getroffen.

Der Vergleich der Holzfeuchteverteilung mit den Ergebnissen der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ und der analytischen Lösung der Diffusionsdifferentialgleichung bestätigte die Vorgehensweise, die Analogie zwischen der Wärmeleitung und der Diffusion für die numerische Simulation zu nutzen. Die Validierung des Finite-Elemente-Modells hinsichtlich der Feuchteverteilung zeigte die korrekte Eingabe der Kennwerte, die den Feuchtetransport beschreiben.

Das akkurate Simulieren von feuchteinduzierten Spannungen und Verformungen erfordert komplexe Modelle. Zahlreiche Faktoren bestimmen dabei das Verhalten des natürlich gewachsenen Werkstoffs Holz. Die Kennwerte sind oftmals nicht exakt quantifizierbar, da zum einen die Materialeigenschaften Schwankungen unterliegen und die Literaturangaben variieren. Zum anderen bedingt das Ermitteln aller relevanten Kennwerte die Durchführung zahlreicher, zeit- und aufwendiger Versuche. So halfen vereinfachende Annahmen beim Modellieren der Prüfkörper und dem Beschreiben der Diffusionsvorgänge. Inhomogenität des Materials, Plastifizieren, Rissbildungen und mechano-sorptive Effekte blieben unberücksichtigt. Die Resultate zeigten aber, dass das numerische System die maßgeblichen Parameter hinreichend berücksichtigte. Die berechneten Verformungen und Dehnungen stimmten mit den Ergebnissen der Versuchsreihe „optische Messungen“ weitgehend überein. Teilweise ergaben sich sogar nahezu deckungsgleiche Kurven. Voneinander abweichende Ergebnisse ließen sich jedoch nicht allein auf die Modellierung zurückführen, sondern auch auf mögliche Messfehler und verfahrensbedingte Auswertungenauigkeiten bei der Verwendung des optischen Messsystems. Letztendlich bestätigte der Vergleich mit den optischen Messergebnissen, dass das numerische Modell die tendenziellen Unterschiede bei den Hölzern abbildet.

Ferner geben Vergleiche mit Untersuchungen anderer Autoren Hinweise auf die Güte der erzeugten Finite-Elemente-Modelle. Hering (2011) untersucht die Klebstofffugenbeanspruchung von Buchenplatten. Die Berechnungen unter Berücksichtigung eines feuchteabhängigen, viskoelastischen Materialmodells führen bei vergleichbarer Geometrie und Trocknungsbedingung zu Vergleichsspannungen in derselben Größenordnung wie in dieser Arbeit. Der Einfluss des Oberflächenkoeffizienten auf den Spannungsverlauf zeigt sich auf analoge Weise. Angst und Malo (2013) berechnen die Spannungen eines verklebten Holzquerschnittes bei Feuchtezunahme. Unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Randbedingungen ergibt sich auch hier eine prinzipielle Übereinstimmungen hinsichtlich der ermittelten Spannungsverläufe.

Der Bezug der berechneten Vergleichsspannungen σ_v zu der Biegefestigkeit f_m veranschaulichte das insgesamt sehr hohe Spannungsniveau, welches aus den simulierten Feuchtewechseln resultierte. Bei Klimafolge KD wurde der Tragwiderstand des Holzes teilweise sehr deutlich

überschritten. Der Vergleichsspannungswert fasste dabei alle räumlichen Spannungszustände zusammen, die Biegespannungen stellten nur einen Teil der Beanspruchungen dar. Ein gewisser Anteil der berechneten Spannungen wirkte quer zur Faserlängsrichtung. Hier beträgt die Zugfestigkeit des Holzes oftmals weniger als 5 % der Längszugfestigkeit, sodass ein Vergleich mit der Querkzugfestigkeit sehr viel drastischere Verhältniswerte ergeben würde.

Das in dieser Arbeit berechnete Spannungsniveau führt bei realen Prüfkörpern vor allem in der Klimafolge KD zu Rissen und Spannungsumlagerungen, wie schon die optischen Messbilder zeigten. Die Spitzenwerte der Vergleichsspannung σ_v traten bei der Klimafolge KD nicht im Bereich der Fuge auf. Das Schädigen des Holzes und die einhergehenden Spannungsumlagerungen gehen allerdings bei der Beurteilung einer Delaminierung nicht ein. Dabei sollte in der Praxis unbedingt vermieden werden, dass bei zwar intakter Klebefuge der eigentliche Werkstoff bereits Schäden aufweist und zu einem Bauteilversagen führen kann. Holzarten mit einer hohen Festigkeit übertragen eine relativ große Beanspruchung auf die Klebefuge, da das Holz weniger schnell reißt und Spannungen im Holz nicht abgebaut werden. Bei Holzarten mit niedriger Festigkeit mindert die Rissbildung das Spannungsniveau, die Klebefuge erfährt dadurch eine geringere Belastung. Die Materialeigenschaften der Laubhölzer bedingen eine höhere Festigkeit und gleichzeitig ein höheres Spannungsniveau bei Feuchtwechseln als Nadelhölzer. Solche materialspezifischen Eigenschaften finden bislang bei der Beurteilung einer Delaminierungsprüfung nicht genügend Berücksichtigung.

Die realen Feuchteschwankungen, die während einer gewöhnlichen Nutzung in einem Bauteil auftreten, führen üblicherweise zu einer deutlich geringeren Beanspruchung als bei den simulierten Klimabedingungen. Die Spannungsverläufe mit einem Maximum innerhalb der 24-stündigen Trocknungsphasen der Klimafolgen K2 und K3 bestätigten allerdings das Schadenspotenzial, das Nutzungsänderungen bei einem abrupten Klimawechsel hervorrufen können. Die Modelle mit den Materialparametern der Laubhölzer zeigten in allen Klimafolgen erwartungsgemäß die höchsten Vergleichsspannungswerte. Der berechnete Spannungsunterschied zwischen einer Delaminierungsprüfung und den Bedingungen in Anlehnung an die Nutzungsklassen 2 und 3 der DIN EN 1995-1-1 wies vor allem bei den Laubhölzern eine Größenordnung auf, die teils deutlich über dem gewählten Referenzwert der Biegefestigkeit lag. Die Spannungsunterschiede belegten, dass die Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2 das Verhalten der Holzarten offensichtlich nicht gleichwertig repräsentiert.

Feuchteinduzierte Spannungen stellen in der Tat ein Sicherheitsproblem dar. Die Delaminierungsprüfung ist daher nicht ohne Grund eine etablierte Klebstoffprüfung, die sowohl im Bereich der Klebstoffzulassung als auch bei der werkseigenen Produktionskontrolle Anwendung findet. Im Hinblick auf die im Holz auftretenden Risse und einhergehenden Spannungsumlagerungen sollten allerdings die Beurteilungskriterien mehr auf die Materialeigenschaften der zu testenden Holzart eingehen. Zudem sollte die ungleich hohe Spannungsdifferenz, die zwischen den Klimabedingungen in Anlehnung an die Nutzungsklassen der DIN EN 1995-1-1 und der Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2 auftrat, vermieden werden. Unter anderem führte die praxisferne Methodik, wassergesättigte Prüfkörper über die Stirnflächen zu trocknen, zu dem hohen Spannungsniveau bei der Delaminierungsprüfung. Die nachstehend in ihren wesentlichen

Grundzügen kurz und beispielhaft beschriebene Prüfung könnte, eine positive Evaluation vorausgesetzt, die Delaminierungsprüfung zunächst ergänzen und nach einer Übergangszeit gegebenenfalls ersetzen:

An den Stirnflächen versiegelte, im Normalklima konditionierte Prüfkörper werden aus zwei Lamellen mit liegenden Jahrringen hergestellt, auf die Abmessungen $B \times L \times H = 150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ zugeschnitten und in zwei Serien aufgeteilt. Zu Beginn der Prüfung lagern die verklebten Hölzer über einen definierten Zeitraum bei atmosphärischem Druck unter Wasser. Anschließend werden die Prüfkörper bei hoher Temperatur und niedriger relativer Luftfeuchtigkeit länger als 24 Stunden getrocknet. Eine der Serien ist querzugbeansprucht, eine aufgebrachte Last von etwa 3750 N entspricht dabei der charakteristischen Querzugfestigkeit $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ nach DIN EN 14080. Nach der Trocknung wird die Güte der Verklebung beider Serien anhand einer Scherprüfung gemäß dem Anhang D der DIN EN 14080 beurteilt und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Gegenüber einer Sichtprüfung und Messung der Delaminierung stellt eine Scherprüfung eine verlässliche Methode dar, um überdrückte Risse in der Klebefuge zu berücksichtigen. Ein Versagen der Prüfkörper aufgrund der zusätzlichen Querzugbeanspruchung deutet, je nach Bruchbild, auf eine Schädigung des Holzes oder auch der Klebefuge während der Trocknung hin. Eine Spannungsumlagerung durch Rissbildung im Holz kann zwar eine intakte Klebefuge bedingen, aber dennoch zu einer relevanten Schwächung des Querschnitts während der Trocknung führen.

Selbst ein natürliches Klima kann in Europa dazu führen, dass im Innenbereich steilere Feuchtegradienten als im überdachten Außenbereich auftreten (Häglund 2007). Die vorgeschlagene Prüfung bildet darüber hinaus ein Szenario ab, welches im Bauwesen bei Verwendung von verklebten Holzbauteilen als eines der kritischsten angesehen werden muss: Ein Träger nimmt beim Transport, beispielsweise durch Regen und mangelhaftem Schutz, oder auf der Baustelle, beispielsweise durch hohe Luftfeuchtigkeit nach Einbringen eines Estrichs, viel Feuchtigkeit auf. Anschließend trocknet der Träger in einem stark geheizten Bauwerk der Nutzungsklasse 1. Der rasche Feuchtigkeitsverlust verursacht hohe, feuchteinduzierte Spannungen, die schädliche Risse bedingen können.

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit führen versuchstechnische Untersuchungen, Regressionsrechnungen und Finite-Elemente-Berechnungen zu Erkenntnissen hinsichtlich des Feuchtetransportes, der einhergehenden Deformationen und der indirekten Beanspruchungen bei Feuchtewechseln in Hölzern. Die Feuchtewechsel in den sechs ausgesuchten Holzarten erfolgen aufgrund von Klimabedingungen, die in Anlehnung an die Nutzungsklassen der Holzbaunorm DIN EN 1995-1-1 und an das Prüfverfahren der Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2 gewählt wurden.

Die Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ stellt das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten der Hölzer in den verschiedenen Klimafolgen dar. Die Veränderung des Feuchtegehaltes wird dabei in Abhängigkeit von Zeit und Ort bestimmt. Von den sechs betrachteten Holzarten zeigt Fichte die höchsten Schwankungen des mittleren Feuchtegehaltes, Eiche insgesamt die geringsten. Folglich nimmt die Holzfeuchte der Fichtenprüfkörper in den betrachteten Zeitintervallen am schnellsten zu und wieder ab. Im Gegensatz dazu laufen diese Prozesse bei der Eiche am langsamsten ab. Anhand verschiedener graphischer Darstellungen der zeitabhängigen Feuchtigkeitsabnahme lassen sich qualitativ für Eiche die niedrigsten und für Fichte die höchsten Diffusionskoeffizienten ablesen. Die Delaminierungsprüfung erzeugt allerdings bei der Fichte wesentlich geringere Feuchtegradienten. Generell verursachen die Randbedingungen der Delaminierungsprüfung im Vergleich zu den baupraktischen Verhältnissen deutlich stärker ausgeprägte Feuchtegradienten. Die graphischen Darstellungen der Messdaten im logarithmischen Maßstab beziehungsweise in Abhängigkeit von der Wurzel der Zeit beschreiben weitgehend lineare Verläufe, die die Gültigkeit der Annahme der Fickschen Diffusionsgleichungen zur mathematischen Beschreibung der Feuchtetransportvorgänge belegen.

Die Messdaten der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“ lassen sich dementsprechend gut an Lösungen des 2. Fickschen Gesetzes anpassen. Die Regressionsrechnungen liefern die Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten für die betrachteten Rand- und Umgebungsbedingungen. Bei der Untersuchung verschiedener Lösungsansätze führt die Gleichung nach Newman (1931a) mit einer parabelförmigen Feuchteverteilung als Anfangsbedingung und einem Übergangswiderstand als Randbedingung zu Ausgleichskurven, die den Verlauf der Messdaten am besten wiedergeben. Trotz Annahme konstanter Feuchtetransportkoeffizienten in den betrachteten Feuchtebereichen stimmen Messdaten und Rechenwerte weitgehend überein, insbesondere bei Betrachtung der mittleren Holzfeuchte. Die Nadelhölzer zeigen gegenüber den Laubhölzern generell höhere Diffusionskoeffizienten, wobei aus der Regressionsanalyse für Fichte die höchsten und für Eiche die niedrigsten Werte resultieren. Bei den zugehörigen Oberflächenemissionskoeffizienten ergibt sich keine holzartenspezifische Rangfolge. Die Feuchtetransportkoeffizienten dienen als maßgebliche Eingangsparameter der Berechnung der feuchteinduzierten Spannungen mit der Finite-Elemente-Methode.

Die Versuchsreihe „optische Messungen“ visualisiert das unterschiedliche Deformationsverhalten der Holzarten während der Trocknung. Gegenüber dem baupraktischen Klimabereich beeinflussen die Randbedingungen einer Delaminierungsprüfung die Messergebnisse weitaus deutlicher. Die Verformungs- und Dehnungskurven beschreiben unter den Extrembedingungen der

Klebstoffprüfung nicht mehr einen regelmäßigen Verlauf, sondern einen von vielen Amplituden geprägten Verlauf. In den Messbildern sichtbare Risse belegen eine Überschreitung der Holzfestigkeit und bewirken einen Abbau der maximalen Dehnungswerte. Durch das weitere Schwinden des Holzes bedingt, sind viele Risse, vor allem bei Fichte und Lärche, am Ende der an einer Delaminierungsprüfung angelehnten Trocknungsphase mit dem bloßen Auge nicht mehr erkennbar. Im Hinblick auf die normativ zu erfüllenden Leistungsanforderungen erscheint daher die ausschließlich visuelle Beurteilung einer Delaminierung als nicht ausreichend.

Die Validierung der Finite-Elemente-Modelle erfolgt anhand der Ergebnisse der Versuchsreihen „Sorptions/Desorption“ und „optische Messungen“. Die Vergleiche bestätigen die Plausibilität der Feuchtetransportkennwerte. Trotz der Annahme eines linear-elastischen Werkstoffmodells ergibt sich eine weitgehend gute Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messwerten. Die Ergebnisse der Versuchsreihe „optische Messungen“ lassen keine abschließende Beurteilung der Auswirkungen der untersuchten Szenarien zu, da die Holzarten die gemessene Werteskala der jeweiligen Dehnungen und Verzerrungen in unterschiedlicher Reihenfolge abbilden. Die Berechnung der Vergleichsspannung σ_v mit Finite-Elemente-Modellen ermöglicht dagegen eine einfache Gegenüberstellung der Holzarten hinsichtlich der Auswirkungen der verschiedenen Klimata. Die numerischen Berechnungen liefern Spannungswerte, die den Unterschied zwischen den Holzarten basierend auf dem Schwind- und Quellverhalten, den Desorptionseigenschaften und den mechanischen Kenngrößen darstellen. Die Oberflächenemissionskoeffizienten wirken sich dabei erheblich auf den Spannungsverlauf aus. Die Modelle mit den Materialparametern der Laubhölzer zeigen erwartungsgemäß die insgesamt höchsten Vergleichsspannungswerte.

Die Finite-Elemente-Berechnungen veranschaulichen, dass das Spannungsniveau, welches bei einer Delaminierungsprüfung erzeugt wird, wesentlich höher ist als das Spannungsniveau aufgrund einer sich ändernden Holzfeuchte, die in einem baupraktischen Feuchtebereich variiert. Die Holzart beeinflusst dabei das Ausmaß der Spannungsdifferenz zwischen den unterschiedlichen Randbedingungen signifikant. Die Delaminierungsprüfung verursacht vor allem bei den Laubhölzern eine Beanspruchung, die, verglichen mit Fichte als Referenz, nicht mehr in einem adäquaten Verhältnis zu realen Lastsituationen steht. Letztlich führen die numerischen Untersuchungen zu der Erkenntnis, dass die Delaminierungsprüfung ein oftmals nicht mehr sinnvolles Sicherheitsniveau abbildet.

Die vorliegende Arbeit weist auf weitere, gravierende Mängel einer Delaminierungsprüfung hin. Bei der Beurteilung einer Delaminierung besteht die Möglichkeit, dass Öffnungen aufgrund des Schwindens des Holzes nach Ablauf der Prüfdauer nicht mehr feststellbar sind. Spannungumlagerungen durch Schäden im Holz, die in einem Bauteil nicht tolerierbar sind, berücksichtigen die Beurteilungskriterien ebenso wenig, wie die Vorschädigung einer Klebstoffuge während der zyklischen Über- und Unterdruckwässerung des Holzes. Die genannten Aspekte sind in Abhängigkeit von der Holzart mehr oder weniger stark ausgeprägt, zeigen dabei zum Teil wenig baupraktische Bedeutung und können dennoch entscheidend für das Bestehen einer Delaminierungsprüfung sein.

Das skizzierte Prüfverfahren einer überarbeiteten Delaminierungsprüfung berücksichtigt sowohl das holzspezifische Verhalten als auch die Feuchtetransportmechanismen, die in einem realen Bauteil wirken, in einem stärkeren Maße als bisher. Mit der Betrachtung von querzugbeanspruchten Prüfkörpern kann sich eine mögliche Rissbildung im Holz oder der Klebefuge schon während der Prüfung auf das Ergebnis auswirken. Eine rein visuelle Beurteilung der Delaminierung entfällt, stattdessen sollen Scherprüfungen die Resttragfähigkeit der Fuge verlässlich und nachvollziehbar abbilden. Durch das stirnseitige Trocknen der wassergesättigten Prüfkörper treten bislang bei einer Delaminierungsprüfung außerordentlich hohe Spannungen im Holz auf. Die Trocknung der Prüfkörper in transversaler Richtung und ausgehend von einem Feuchtegehalt, der nur etwas über dem Fasersättigungspunkt des Holzes liegt, bildet ungünstige, aber an reale Bauteile angelehnte Verhältnisse ab.

Der Übergangswiderstand beziehungsweise die Dampfdurchlässigkeit der Holzoberfläche hat eine wesentliche Auswirkung auf das Spannungsniveau. Die Weiterentwicklung und Anwendung von Anstrichen, Imprägnierungen oder auch Holzmodifikationen erscheint sinnvoll, um die Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit zu reduzieren und so Schäden in Bauteilen zu vermeiden. Eine künftige Prüfnorm sollte praktischerweise solche Maßnahmen, insofern für ein Bauteil vorgesehen, bei der Vorbereitung der Prüfkörper nicht gänzlich ausschließen.

7 Ausblick

Die Versuchsergebnisse und Berechnungen geben Auskunft über die komplexen Vorgänge in verschiedenen Hölzern bei Änderung der Holzfeuchte. Die Versuchsreihe „optische Messungen“ und die Finite-Elemente-Modelle visualisieren und simulieren dabei ausschließlich die Trocknungsvorgänge. Eine Ausweitung der Untersuchungen auf die Sorptionsphase ist möglich, die Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten bei Feuchtezunahme liegen vor. Der wesentliche Einfluss der Jahrringlage und Feuchtetransportkoeffizienten auf die Rechenergebnisse ist bekannt. Eine Sensitivitätsanalyse kann die Bedeutung einer exakteren Abbildung anderer Eingabeparameter für die Güte der numerischen Berechnungen aufzeigen. Es gibt noch zahlreiche weitere Möglichkeiten, die Realität umfangreicher und aufwendiger abzubilden. So sind die zusätzliche Berücksichtigung rheologischer Modelle, die Eingabe von feuchte- und temperaturabhängigen Materialparametern und die Modellierung von Klebstoffeigenschaften denkbar. Darüber hinaus stellt das direkte Verknüpfen der Finite-Elemente-Berechnung mit den optischen Messungen eine interessante Vorgehensweise dar, aus den gemessenen Verformungen Materialparameter und Spannungen zu generieren.

Der Ingenieurholzbau nutzt die vorhandene Vielfalt an Holzarten kaum für tragende Konstruktionen. Ein Grund dafür liegt sicherlich in dem Prüfverfahren der Delaminierungsprüfung. Vor allem für verklebte Laubhölzer stellen die offensichtlich unverhältnismäßig hohen Leistungsanforderungen häufig eine unüberwindbare Hürde dar. Eine Überarbeitung der Prüfnorm mag dazu beitragen, dass sich Bauprodukte aus verklebtem Laubholz und dauerhaftem Nadelholz künftig etablieren können. Die jahrelange Erfahrung mit Brettschichtholz aus Fichte begründet den Stellenwert der Delaminierungsprüfung. Die anzustrebende Verwendung von anderen Holzarten, die im Forstsektor zunehmend mehr Verwendung finden und dem Ingenieurholzbau einen Mehrwert bieten, erfordert jedoch eine neue Auseinandersetzung mit der Prüfnorm. Ansonsten wird innovativen Konstruktionen, die angemessenen Sicherheitsanforderungen genügen und den modernen Holzbau prägen können, keine Chance auf Erfolg eingeräumt. Angesichts der immer schneller fortschreitenden Modernisierung unsere Gesellschaft werden sich die Anforderungen an ein Gebäude noch rascher ändern. Dies führt schon heute dazu, dass nach vergleichsweise kurzer Zeit Neubauten den veralteten Bestand ersetzen. Hier sollte es ein Anliegen sein, den nachwachsenden Rohstoff Holz als einen sehr effektiven Werkstoff künftig vermehrt einzusetzen. Beim Wachsen bindet das Naturprodukt durch Fotosynthese Kohlendioxid, so sorgt der entstehende Baustoff für mehr Sauerstoff und saubere Luft. Mehr als andere Bauweisen eignen sich Holzkonstruktionen zum einfachen Umbau, Rückbau und Recyceln. Ein entferntes Holzbauteil kann dann in einer Kaskadennutzung noch viele weitere Aufgaben erfüllen. Und am Ende dieses Prozesses entsorgt sich das ehemalige Baumaterial durch Verwitterung oder Erzeugen von Energie idealerweise von selbst.

8 Symbole, Abkürzungen

Lateinische Großbuchstaben

A	Querschnitt des durchströmten Körpers, in m^2
D	Diffusionskoeffizient bezogen auf die Holzfeuchte u , in m^2/s
D'	„scheinbarer“ Diffusionskoeffizient, in m^2/s
D _c	Diffusionskoeffizient bezogen auf die Konzentration c der diffundierenden Masse, in m^2/s
D	Steifigkeitsmatrix
E	Verhältnis der zum betrachteten Zeitpunkt t zu-/abgenommenen Holzfeuchtigkeit zur maximal möglichen Zu-/Abnahme
E	E-Modul, in N/mm^2
F(u)	Fehlerwert, in % Holzfeuchte
G _{xy}	Schubmodul in x-y-Ebene, in N/mm^2
J	Stromdichte, in $kg/(m^2 \cdot s)$
Q	Volumenstrom, in m^3/s
S	Oberflächenemissionskoeffizient, in m/s
S(E)	Summe der Abweichungsquadrate
T	Temperatur, in K
V	Volumen, in m^3

Lateinische Kleinbuchstaben

a	halbe Prüfkörperlänge, in m
a	Abstand Messstelle P1 und P2 der Prüfkörper „Sorption/Desorption“, in m
c	Konzentration der diffundierenden Masse, in kg/m^3
c	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen, in $J/(kg \cdot K)$
f _c	Druckfestigkeit, in N/mm^2
f _m	Biegefestigkeit, in N/mm^2
f _t	Zugfestigkeit, in N/mm^2
f _v	Scherfestigkeit, in N/mm^2
h	Verhältniswert Oberflächenemissionskoeffizient / Diffusionskoeffizient, in $1/m$
k	Permeabilität, Durchlässigkeit, in m^2
l	Länge der Kapillare, in m
l	Länge der Prüfkörper, in m
m ₀	Masse des darrtrockenen Holzes, in kg
m _u	Masse des Holzes bei einem Feuchtegehalt u , in kg
m	Anzahl Messstellen
n	Anzahl paralleler Kapillaren
n	Anzahl Zeitschritte
p	Druck, in $Pa = N/m^2$
r	Innenradius der Kapillare, in m
t	Zeit, in s

$t_{0,5}$	Zeit bis $E = 0,5$, in s
u	Holzfeuchtegehalt, % Holzfeuchte
u_0	Holzfeuchtegehalt zum Zeitpunkt $t = 0$, in % Holzfeuchte
u_1	Ausgleichsfeuchtigkeit zum Zeitpunkt $t = \infty$, in %
u_{darr}	mit der Darrmethode bestimmter Holzfeuchtegehalt, in % Holzfeuchte
u_{korr}	Korrekturwert der Holzfeuchtigkeit, in % Holzfeuchte
u_M	Holzfeuchtegehalt in Körpermitte, in % Holzfeuchte
$u_{P,MW}$	gewichteter Mittelwert der Holzfeuchtigkeit an den Messstellen und am Rand, in %
u_{Px}	Holzfeuchtigkeit an der Stelle $x = a_{Px}$, in %
u_S	Oberflächenfeuchtigkeit, in %
$w(t)$	Integral über den Holzfeuchteverlauf, mittlerer Holzfeuchtegehalt des Körpers zum Zeitpunkt t
x	Raumkoordinate, in m
y	Raumkoordinate, in m
z	Raumkoordinate, in m

Griechische Buchstaben

α_T	Temperaturdehnzahl, in $1/^\circ\text{C}$
α_u	Differentielles Quell- und Schwindmaß, in % je % Holzfeuchteänderung
Δ	Laplace-Operator
ϵ_{cr}	Dehnung aufgrund des Kriechens unter mechanischer Last
ϵ_{el}	elastische Dehnung
ϵ_{ms}	Dehnung aufgrund des mechano-sorptiven Kriechens
ϵ_{th}	Dehnung aufgrund einer Temperaturänderung
ϵ_{tot}	Gesamtdehnung
ϵ_u	Dehnung aufgrund einer Feuchteänderung, Schwinden und Quellen
ϵ_x	Dehnung in x-Richtung
ϵ_{xy}	Schubverzerrung in x-y-Ebene
η	dynamische Viskosität, in Pa·s
λ	Wärmeleitfähigkeit, in W/(K·m)
ν	Variationskoeffizient, in %
ν	Poissonzahl, Querkontraktionszahl
∇	Nabla-Operator
ρ	Dichte, in kg/m^3
ρ_0	Rohdichte bei $u = 0$ % Holzfeuchtigkeit, in kg/m^3
ρ_{12}	Rohdichte bei $u = 12$ % Holzfeuchtigkeit, in kg/m^3
σ_{el}	mechanische Spannung, in N/mm^2
σ_v	Vergleichsspannung σ_v , von Mises Spannung, in N/mm^2
σ_x	Normalspannung in x-Richtung, in N/mm^2
σ_{xy}	Schubspannung in x-y-Ebene, in N/mm^2
τ	dimensionslose Zeit

Abkürzungen

k/A	Lösungsansatz der Diffusionsdifferentialgleichung
p/A	Lösungsansatz der Diffusionsdifferentialgleichung
p/Ü	Lösungsansatz der Diffusionsdifferentialgleichung
20/65	Normalklima bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit
BU	Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)
DG	Douglasie (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)
EI	Eiche (<i>Quercus robur</i>)
EPI	Emulsion-Polymer-Isocyanat Klebstoffe
ES	Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FI	Fichte (<i>Picea abies</i>)
FSP	Fasersättigungspunkt
H ₂ O	Wasser
K1	Klimafolge, die sich aus den Klimaphasen „Sorptions“ und „Desorption“ zusammensetzt
K2	Klimafolge, die sich aus den Klimaphasen „Sorptions“ und „Desorption“ zusammensetzt
K3	Klimafolge, die sich aus den Klimaphasen „Sorptions“ und „Desorption“ zusammensetzt
KCl	Kaliumchlorid
KD	Klimafolge, die sich aus den Klimaphasen „Sorptions“ und „Desorption“ zusammensetzt
LA	Lärche (<i>Larix decidua</i>)
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd Klebstoff
PRF	Phenol-Resorzin-Formaldehyd Klebstoff
PUR	Polyurethan Klebstoff

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Bezug der analytischen und numerischen Berechnungen sowie der Versuchsreihen zueinander.	15
Abbildung 2-1: Veränderung der Waldfläche nach Baumartengruppen (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).	16
Abbildung 2-2: Zellstruktur eines Nadelholzes, Westamerikanische Lärche (<i>Larix occidentalis</i>) links, und eines Laubholzes, Roteiche (<i>Quercus rubra</i>) rechts. Die Aufnahmen eines Rasterelektronenmikroskops zeigen Hirn- (Tr), Radial- (R) und Tangentialfläche (Ta), die dünn- und dickwandigen Holzzellen sowie die unterschiedlichen Durchmesser der Gefäße (V) im Früh- (EW) und Spätholz (LW) (Siau 1984).	18
Abbildung 2-3: Darstellung einzelner Tüpfel, links und mittig (Comstock und Côté, Jr. 1968), und mehrerer Tüpfel in den Zellwänden, rechts (Butterfield 2006).....	19
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der vorhandenen Feuchtigkeit innerhalb einer Holzzelle. Links über, mittig bei und rechts unterhalb der Fasersättigung (Skaar 1988).....	20
Abbildung 2-5: Unterschied zwischen Physisorption und Chemisorption (Job und Rüffler 2011). 21	
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz (Niemz 1993).....	22
Abbildung 2-7: Sorption-Desorption Isotherme für Fichte bei 25 °C (Stamm 1964).....	23
Abbildung 2-8: Schwinden von einer Stammscheibe entnommenen Buchenholzproben (Keylwerth 1951).....	24
Abbildung 2-9: Holzprobe mit Kennzeichnung der drei anatomischen Hauptrichtungen – longitudinal, radial und tangential.....	25
Abbildung 2-10: Schematische Darstellungen von prinzipiellen Pfaden bei transversalem Feuchtetransports durch eine Holzzelle, (Skaar 1988) links und (Stamm 1967a) rechts.	27
Abbildung 2-11: Gegenüberstellung Diffusion und Wärmeleitung.	31
Abbildung 2-12: Definition der Spannungsvektoren (ANSYS, Inc. 2012).	46
Abbildung 2-13: Unterschiede im Verformungsverhalten bei nicht verklebten und verklebten Holzlamellen durch Quellen und Darstellung von Spannungen parallel und senkrecht zur Klebefuge (Frihart 2009).	49
Abbildung 2-14: Schichten einer Holzklebeverbinding. Zeichnung nicht maßstäblich, Darstellung in Anlehnung an Marra (1992).....	52

Abbildung 2-15: Schematische Darstellung der Spannungsverteilung – im Holz bei Stabilisierung der Holzoberfläche durch den Klebstoff oder in der Klebstofffuge bei Vorhandensein eines flexiblen Klebstoffs (Frihart 2009).	53
Abbildung 2-16: Mikroskopische Aufnahme einer Fichtenholzverklebung mit einem PRF-Klebstoff, links, und einem PUR-Klebstoff, rechts (Jiang et al. 2014).	53
Abbildung 2-17: Entzerrtes und bemaßtes Foto einer Fassade, Einzelbild-Photogrammetrie links, Kantenmodell aus Mehrbildphotogrammetrie desselben Objekts rechts (Schaffrath et al. 2010).	57
Abbildung 2-18: Aramis 5M Kamerasystem vor Kalibrierplatte.	58
Abbildung 2-19: Mit Sprühtechnik aufgebracht Oberflächenmuster, links. 15 x 15 Pixelfacetten mit zwei Pixeln Randüberlappung, rechts (Quelle linkes Bild Autor, rechtes Bild GOM mbH 2009a).	59
Abbildung 2-20: Facettenpaar des linken und rechten Kamerabildes. Das weiß gestrichelte Viereck visualisiert den nicht verformten Zustand, das grüne Viereck zeigt zunächst ebenfalls den Referenzzustand, links, und dann den verformten Zustand nach fünf Zeitschritten, rechts (GOM mbH 2009a).	59
Abbildung 2-21: Schematische Darstellung einer Messprobe im Referenzzustand und im verformten Zustand. Die Dehnungsberechnung für einen Messpunkt, roter Pfeil, findet in Verbindung mit den umgebenden Messpunkten, blaues Viereck, statt (GOM mbH 2009a)...	60
Abbildung 3-1: Abmessungen eines aus zwei Lamellen verklebten Prüfkörpers der Versuchsreihe „optische Messungen“. Oberflächen teilweise mit Aluminiumfolie abgeklebt.	65
Abbildung 3-2: Prüfkörper der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“	68
Abbildung 3-3: Delaminierungsanlage „ULWA-E“, Ulrich Lübbert Warenhandel GmbH & Co.KG, mit Trocknungskammer, links, und Druckkessel, rechts.	69
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des Diffusionsstroms. Präparierte Prüfkörper der Klimafolgen K2 und K3, links, und der Klimafolge KD, rechts.	70
Abbildung 3-5: Skizze eines Prüfkörpers der Klimafolgen K2 und K3. Maße in mm.	71
Abbildung 3-6: Skizze eines Prüfkörpers der Klimafolge KD. Maße in mm.	71
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Holzfeuchteverlaufs über den Querschnitt eines Prüfkörpers der Klimafolgen K2 und K3.	72
Abbildung 3-8: Mit Messgeräten von zwei Herstellern, HF1/2, am Messpunkt P1 ermittelte Holzfeuchte u_{P1} zu verschiedenen Zeitpunkten. Klimafolge K2, links, und K3, rechts. Fichte, Serie I.	74

Abbildung 3-9: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} und Mittelwert $u_{\text{P,MW}}$ über die Zeit t . Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Fichte, Serie I.....	74
Abbildung 3-10: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} und Holzfeuchte $u_{\text{P,korr}}$ an den Messstellen P1 bis P4 über die Zeit t . Eiche, links, und Fichte, rechts. Klimafolge K2, Serie I.....	75
Abbildung 3-11: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} der Prüfkörper der Serie I und II nach Beendigung der Konditionierung, K, der Feuchtezunahme, +, und der Trocknung,-. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.....	76
Abbildung 3-12: Differenz der Holzfeuchte Δu nach Feuchtezunahme, blau, und Trocknung, rot. Zusammengefasste Zeitschritte in einem gestapelten Säulendiagramm. Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K3, oben, und KD, unten.	77
Abbildung 3-13: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} der Prüfkörper der Klimafolge K2, oben, und K3, unten, jeweils Serie I, über die Zeit t	78
Abbildung 3-14: Mittlere Holzfeuchte u_{darr} der Prüfkörper der Klimafolge KD, Serie I, über die Zeit t	79
Abbildung 3-15: Verhältniswert der mittleren Holzfeuchten $u_{\text{darr}}/u_{\text{t0,Des}}$ über die Zeit t . Klimafolge K3, links, und KD, rechts, jeweils Serie I.	79
Abbildung 3-16: Feuchtegehalt $u_{\text{P,korr}}$ an vier Messstellen und zu acht Zeitpunkten. Klimafolge K3, Serie I. Eiche, links, und Fichte, rechts. Phase nach Konditionierung, gepunktete Linie, der Feuchtezunahme, gestrichelte Linie, und der Trocknung, durchgezogene Linie.....	80
Abbildung 3-17: Feuchtegehalt $u_{\text{P,korr}}$ an fünf Messstellen und zu acht Zeitpunkten. Klimafolge KD, Serie I. Eiche, links, und Fichte, rechts.....	80
Abbildung 3-18: Betragsmäßige Differenz der Holzfeuchte $\Delta u_{\text{P,korr}}$ zwischen Messpunkt P1 und P2 zu den Messzeitpunkten während der Trocknungsphase der Serie I und II. Darstellung der 5 %- und 95 %-Quantile als Whisker, der oberen und unteren Quartile, und der Mediane als Boxplot sowie der Mittelwerte, —, und der Maximalwerte, rotes x. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.....	81
Abbildung 3-19: Gradient der Holzfeuchte $\Delta u_{\text{P}}/a$ zwischen Messpunkt P1 und P2 als gleitender Durchschnitt von drei aufeinanderfolgenden Messdaten über die Zeit t . Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.....	83
Abbildung 3-20: Darstellung des Verhältniswertes E über die Wurzel der Zeit t . Klimafolge K2, links, und K3, rechts, jeweils Serie I.	85
Abbildung 3-21: Darstellung des Verhältniswertes E über die Wurzel der Zeit t . Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten.....	86

Abbildung 3-22: Darstellung des natürlichen Logarithmus des Verhältniswertes E über die Zeit t. Klimafolge K3, links, und KD, rechts, jeweils Serie I.	87
Abbildung 3-23: Optisches Messsystem Aramis 5M.....	89
Abbildung 3-24: Abgeklebter Prüfkörper mit stochastischem Sprühmuster und Darstellung des Diffusionsstrom sowie der gedachten Lage in einem Brettschichtholzträger.	90
Abbildung 3-25: Trockenofen für die Desorptionsphase der Versuchsreihe „optische Messungen“ (Fleischhauer 2012).....	91
Abbildung 3-26: Optisches Messsystem mit Rechner, links, und Sensor vor dem Trocknungs-Ofen, rechts.....	92
Abbildung 3-27: Schnittführung in dem Messfeld der Prüfkörper aus einer Lamelle, oben, und aus zwei Lamellen, unten. Maße in mm.	93
Abbildung 3-28: Lotrechte Abstände zwischen Schnitt 5–7, Δx , Schnitt 3–4, Δy , und Schnitt 0–2, Δy_F , am Beispiel eines Prüfkörpers aus zwei Lamellen im ursprünglichen Zustand der Referenzstufe 0. Analoge Bezeichnungen gelten bei Prüfkörper aus einer Lamelle mit $\Delta y = 25$ mm. Maße in mm.....	94
Abbildung 3-29: Messrauschen der y-Koordinaten des Schnittes 1, Stufe 0 bis 9. Darstellung der Kurven vor dem Einschalten der Heizung und Lüftung in Blau, nach dem Einschalten in Rot. Prüfkörper aus Buche, zwei Lamellen, Klimafolge K1.....	95
Abbildung 3-30: Mittlere Holzfeuchte zu Beginn/am Ende der Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3. Prüfkörper aus einer Lamelle, oben, und zwei Lamellen, unten.....	96
Abbildung 3-31: Mittlere Holzfeuchte zu Beginn/am Ende der Trocknungsphase der Klimafolge KD. Prüfkörper aus einer Lamelle und zwei Lamellen.	96
Abbildung 3-32: Schnitte 0 bis 7 bei Referenzstufe 0, blau, und nach 24 h Trocknung, rot. Klimafolge KD, Buche, 2 Lamellen.	97
Abbildung 3-33: y-Koordinate des Schnittes 0, links, und x-Koordinate des Schnittes 3, rechts, bei Referenzstufe 0 und sechs weiteren Zeitstufen, $t_0 = 0$ h bis $t_{05} = 24$ h, der Trocknungsphase K3. Prüfkörper aus Esche, oben, und Fichte, unten, jeweils aus einer Lamelle bestehend.	98
Abbildung 3-34: Abstand Δy , links, und Δx , rechts. Referenzstufe 0 und sechs Zeitstufen, $t_0 = 0$ h bis $t_{05} = 24$ h, der Trocknungsphase K3. Prüfkörper aus Esche, oben, und Fichte, unten, jeweils aus einer Lamelle bestehend.	99

Abbildung 3-35: Zeitlicher Verlauf des mittleren Abstandes Δx_{MW} in den Trocknungsphasen K1, K2, K3 und KD. Prüfkörper aus Esche, links, und Fichte, rechts, jeweils aus einer Lamelle bestehend. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand von 145,0 mm zum Zeitpunkt $t = 0$	100
Abbildung 3-36: Mittlere Abstandsänderung Δx_{MW} zum Referenzabstand 145,0 mm nach 24 h Trocknung. Prüfkörper der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper aus einer Lamelle, oben, und aus zwei Lamellen, unten.	100
Abbildung 3-37: Abstand Δx nach 24 h Trocknung. Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand zum Zeitpunkt $t = 0$	101
Abbildung 3-38: Abstandsänderung Δy zum Referenzabstand 25,0 mm. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten. Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus einer Lamelle.	101
Abbildung 3-39: Abstandsänderung Δy zum Referenzabstand 55,0 mm. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten. Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen.	102
Abbildung 3-40: Abstand Δy nach 24 h Trocknung. Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand zum Zeitpunkt $t = 0$	102
Abbildung 3-41: Abstandsänderung Δy_F zum Referenzabstand 5,0 mm. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten. Trocknungsphase der Klimafolge K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen.	103
Abbildung 3-42: Abstand Δy_F nach 24 h Trocknung. Klimafolge K3, links, und KD, rechts. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Rot gestrichelte Linie markiert den Referenzabstand zum Zeitpunkt $t = 0$	103
Abbildung 3-43: Dehnungen ε_x , ε_y und Schubverzerrung ε_{xy} im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, nach 24 h Trocknung in der Klimafolge K3, links, und KD, rechts.	104
Abbildung 3-44: Dehnungen ε_x , links, und ε_y , rechts, im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, bei Auswertung von fünf Zeitschritten. Maximalwerte, oben, und Minimalwerte, unten.	105
Abbildung 3-45: Maximaler Betrag der Schubverzerrung ε_{xy} im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, bei Auswertung von fünf Zeitschritten.	105
Abbildung 3-46: Dehnungen ε_x im Bereich der Klebefuge, Schnitt 1, nach 2 h, 4 h, 8 h und 24 h Trocknung in der Klimafolge KD. Anordnung der Diagramme mit aufsteigender Trocknungsdauer in Leserichtung von links nach rechts und oben nach unten.	106

Abbildung 3-47: Dehnungen ε_x , links, und ε_y , rechts. Maximal-, oben, und Minimalwerte, unten, des gesamten Messbereichs. Trocknungsphase Klimafolge K3. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen.	107
Abbildung 3-48: Dehnungen ε_x , links, und ε_y , rechts. Maximal-, oben, und Minimalwerte, unten, des gesamten Messbereichs. Trocknungsphase Klimafolge KD. Prüfkörper aus zwei Lamellen.	107
Abbildung 3-49: Dehnungen ε_x , oben, und ε_y , unten, nach 24 h Trocknung in der Klimafolge K3. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -1,0 %, blau, und 1,0 %, rot.	108
Abbildung 3-50: Dehnungen ε_x , oben, und ε_y , unten, nach 24 h Trocknung in der Klimafolge KD. Prüfkörper bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -5,0 %, blau, und 5,0 %, rot.	108
Abbildung 3-51: Dehnungen ε_x nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge K3. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -1,0 %, blau, und 1,0 %, rot.	109
Abbildung 3-52: Dehnungen ε_y nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge K3. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -1,0 %, blau, und 1,0 %, rot.	109
Abbildung 3-53: Dehnungen ε_x nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge KD. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -5,0 %, blau, und 5,0 %, rot.	110
Abbildung 3-54: Dehnungen ε_y nach 4 h, links, 8 h, mittig, und 24 h, rechts, Trocknung in der Klimafolge KD. Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, jeweils bestehend aus zwei Lamellen. Skaleneinteilung zwischen -5,0 %, blau, und 5,0 %, rot.	110
Abbildung 3-55: Linke Kamerabilder der Prüfkörper aus Eiche, oben, und Fichte, unten, nach 8 h, links, und 24 h Trocknung, rechts, in Klimafolge KD. Prüfkörper aus zwei Lamellen.	111
Abbildung 3-56: Links – lotrechter Abstand Δy , Schnitt 3-4, nach 24 Stunden Trocknung in Klimafolge K3, Fichtenprobekörper aus zwei Lamellen. Rechts (Jönsson 2001) – Dehnungen über die Querschnittshöhe nach 3, 11 und 38 Tagen Trocknung in 20 °C/40 %rF nach Konditionierung in 20 °C/80 %rF. Fichtenprobekörper aus sechs Lamellen, Gesamtabmessung B x H x T = 90 x 270 x 16 mm ³	112
Abbildung 4-1: Struktogramm zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten D und Oberflächenemissionskoeffizienten S bei Verwendung des Lösungsansatzes p/Ü mit der Software Maple.	117

Abbildung 4-2: Summe der Abweichungsquadrate $S(E)$ bei verschiedenen Verhältnissen $h = S / D$. Darstellung aller Iterationsschritte, links, und der Ergebnisse in der Nähe der Iterationsgrenzen, rechts.	118
Abbildung 4-3: Summe der Abweichungsquadrate $S(E)$, links, und Veränderung des Diffusionskoeffizienten D , rechts, bei zunehmenden Iterationsschritten.....	119
Abbildung 4-4: Diffusionskoeffizienten D und Oberflächenemissionskoeffizient S der Serien I und II, Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U}	123
Abbildung 4-5: Darstellung der Diffusionskoeffizienten D mittels Netzdiagramm.....	123
Abbildung 4-6: Berechnete Trocknungsdauer bis zum Erreichen von 95 % der maximal möglichen Holzfeuchtedifferenz, $E = 0,05$. Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U}	124
Abbildung 4-7: Mittlere Summe der Abweichungsquadrate $S(E) / n$ bei n Messzeitpunkten. Darstellung des Mittelwertes der Hölzer einer Serie als Linie.	124
Abbildung 4-8: Messdaten, rot, und zugehörige Ausgleichskurven, grün, der Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U} . Eiche, links, und Fichte, rechts, in der Trocknungsphase der Klimafolge K3, Serie I.	125
Abbildung 4-9: Mittelwerte der betragsmäßigen Abweichung $F(u)$ zwischen berechneter Holzfeuchtigkeit und zugehörigem Messwert an den über den Querschnitt verteilten Messstellen. Darstellung des Mittelwertes der Hölzer einer Serie als Linie.	126
Abbildung 4-10: Mittlere betragsmäßige Differenz $F(u_n)$ zu verschiedenen Messzeitpunkten t . Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U} . Eiche, links, und Fichte, rechts, in der Trocknungsphase der Klimafolge K3, Serie I. Mittelwert über alle Messzeitpunkte als gestrichelte Linie.	126
Abbildung 4-11: Messdaten, rot, und berechneter Verlauf der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt, blau. Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U} . Fichte nach 6 Stunden, links, 14 Tagen, mittig, und 38 Tagen, rechts, Lagerung in der Trocknungsphase der Klimafolge K3, Serie I.	127
Abbildung 4-12: Messdaten, rot, und berechneter Verlauf der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt bei den Anfangs- und Randbedingungen k/A , grün, p/A , magenta, und p/\ddot{U} , blau. Buche nach 3 Stunden, links, 2 Tagen, mittig, und 28 Tagen, rechts, Lagerung in der Trocknungsphase der Klimafolge K2, Serie I.	127
Abbildung 4-13: Links – mittlere betragsmäßige Abweichung $F(u)$ zu verschiedenen Messzeitpunkten t bei den Anfangs- und Randbedingungen k/A , grün, p/A , magenta, und p/\ddot{U} , blau. Mittelwert über alle Messzeitpunkte als gestrichelte Linie. Rechts – Messdaten, rot, und zugehörige Ausgleichskurven bei den Anfangs- und Randbedingungen k/A , grün, p/A , magenta, und p/\ddot{U} , blau. Buche in der Trocknungsphase der Klimafolge K2, Serie I.	128

Abbildung 5-1: Fünf miteinander verknüpfte Analysensysteme/Module A bis F innerhalb der Ansys Workbench.	131
Abbildung 5-2: Globales und lokale Koordinatensysteme. Screenshot Ansys Mechanical, oben, und erläuternde Skizze, unten. Die Darstellungen zeigen unterschiedliche Maßstäbe.	134
Abbildung 5-3: Netzdarstellung eines Finite-Elemente-Modells der Klimafolge KD aus zwei Lamellen.	135
Abbildung 5-4: Anfangsfeuchteverteilung über den Querschnitt eines Prüfkörpers. Bei dem Finite-Elemente-Modell entspricht die Systemgröße „Temperatur in °C“ der „Holzfeuchte in %“.	136
Abbildung 5-5: Nach Feuchtezunahme vorverformtes Finite-Elemente-Modell aus zwei Lamellen.	137
Abbildung 5-6: Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten. Vergleich der analytischen Lösung, Dgl, der numerischen Lösung, FEM, und der Messwerte, Des. Trockenphase der Klimafolge K2, jeweils Serie I. Esche mit größtem, links, und Fichte mit kleinstem Fehlerwert $F(u)$, rechts.....	140
Abbildung 5-7: Fehlerwert $F(u)$ zwischen numerisch berechneter Holzfeuchtigkeit und zugehörigem Messwert zu verschiedenen Zeitpunkten. Trockenphase der Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten. Serie I, links, und II, rechts. Darstellung des Mittelwerts, MW, als gestrichelte Linie.	141
Abbildung 5-8: Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten. Vergleich der analytischen Lösung, Dgl, der numerischen Lösung, FEM, und der Messwerte, Des. Trockenphase der Klimafolge K3, jeweils Serie I. Eiche mit größtem, links, und Fichte mit kleinstem Fehlerwert $F(u)$, rechts.....	142
Abbildung 5-9: Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten. Vergleich der analytischen Lösung, DGL, der numerischen Lösung, FEM, und der Messwerte, Des. Trockenphase der Klimafolge KD, Serie I. Esche mit größtem, links, und Fichte mit kleinstem Fehlerwert $F(u)$, rechts. Die mittlere Holzfeuchte ersetzt fehlende Messwerte bei den ersten drei Zeitpunkten im linken Diagramm.....	143
Abbildung 5-10: Definition der Abstände $\min \Delta x$, $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$ am Beispiel eines Prüfkörpers aus einer Lamelle. Analoges gilt für Prüfkörper aus zwei Lamellen.....	144
Abbildung 5-11: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge K2, oben, und K3, unten. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und aus zwei Lamellen, rechts. .	145
Abbildung 5-12: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge KD. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und aus zwei Lamellen, rechts.	145

Abbildung 5-13: Abstände $\max \Delta x_n$ und $\min \Delta y$ zu elf Zeitpunkten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, Klimafolge K3, Prüfkörper aus zwei Lamellen, links, und Douglasie, Klimafolge K2, Prüfkörper aus einer Lamelle, rechts.	146
Abbildung 5-14: Abstände $\min \Delta y$ und $\min \Delta x$ zu elf Zeitpunkten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, links, und Douglasie, rechts. Klimafolge KD, Prüfkörper aus einer Lamelle.	147
Abbildung 5-15: Lotrechte Abstandsänderung der Schnittlinien in y-Richtung, oben, und in x-Richtung, unten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, links, und Lärche, rechts. Klimafolge K3. Prüfkörper aus zwei Lamellen.	147
Abbildung 5-16: Lotrechte Abstandsänderung der Schnittlinien in y-Richtung, oben, und in x-Richtung, unten. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Buche, links, und Lärche, rechts. Klimafolge KD. Prüfkörper aus zwei Lamellen.	148
Abbildung 5-17: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Fichte, Klimafolge K2, zwei Lamellen.	149
Abbildung 5-18: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Fichte, Klimafolge K3, zwei Lamellen.	150
Abbildung 5-19: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Fichte, Klimafolge KD, zwei Lamellen.	150
Abbildung 5-20: Spannungen σ_x , σ_y , σ_z und σ_v , Schnittführung am oberen Rand der unteren Lamelle mittig zur Prüfkörperbreite. Buche, Serie I, Klimafolge KD.	151
Abbildung 5-21: Spannungen σ_x , σ_y , σ_{xy} und σ_v , Schnittführung am oberen Rand der unteren Lamelle mittig zur Prüfkörperlänge. Buche, Serie I. Klimafolge K2, links, und KD, rechts....	152
Abbildung 5-22: Vergleichsspannung σ_v nach simulierter 24-stündiger Trocknung in der Fuge zwischen zwei Lamellen, Buche, Klimafolge K2, links, und KD, rechts. Gestrichelte Linien markieren Pfade für die Ergebnisauswertung der Spannungsverläufe über den Querschnitt.	153
Abbildung 5-23: Vergleichsspannung σ_v nach simulierter 24-stündiger Trocknung, Buche, zwei Lamellen, Klimafolge K2, links, und KD, rechts.....	153

- Abbildung 5-24: Verlauf der maximalen Vergleichsspannung σ_v über die Zeit t , links, und jeweilige Höchstwerte, rechts, in der Fuge zwischen zwei Lamellen, Serie I und II. Betrachtung von elf Zeitpunkten der Trockenphase der Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten. 154
- Abbildung 5-25: Maximale Vergleichsspannung σ_v des gesamten Prüfkörpers, Serie I und II. Betrachtung von elf Zeitpunkten bei 24-stündiger Trocknung. Kennwerte der Biegefestigkeit f_m als gestrichelte Linien. 155
- Abbildung 5-26: Verhältnis der maximalen Vergleichsspannungen σ_v der Klimafolgen K2, K3 und KD zur Biegefestigkeit f_m bei Betrachtung der Fuge zwischen zwei Lamellen, links, und des gesamten Prüfkörpers, rechts. Serie I und II. 156
- Abbildung 5-27: Differenzen der maximalen Vergleichsspannungen σ_v zwischen Klimafolge KD und K2/K3 bei Betrachtung der Fuge zwischen zwei Lamellen, links, und des gesamten Prüfkörpers, rechts. Serie I und II. 156
- Abbildung 12-1: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Sorptionsphase der Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2 der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“. Messung nicht kontinuierlich, daher Abszisse nicht maßstäblich. Minima der relativen Luftfeuchtigkeit durch Öffnen der Behälter zum Messen der Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper. 198
- Abbildung 12-2: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Sorptionsphase der Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K3 der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“. Messung nicht kontinuierlich, daher Abszisse nicht maßstäblich. Minima der relativen Luftfeuchtigkeit durch Öffnen der Behälter zum Messen der Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper. 199
- Abbildung 12-3: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Trocknungsphase der Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2 und K3 der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“. 199
- Abbildung 12-4: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Trocknungsofen während der Versuchsreihe „optische Messungen“. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und zwei Lamellen, rechts. Klimafolge K1, K2, K3 und KD, Bildanordnung von oben nach unten. Minima der Kurven zum Zeitpunkt der Prüfkörperwechsel. Zeitraum zwischen Prüfkörperwechsel nicht dargestellt. 201
- Abbildung 12-5: Abstandsänderung Δx zum Referenzabstand 145,0 mm. Maximalwerte während, oben, und Minimalwerte nach 24 h Trocknung, unten. Prüfkörper der Klimafolgen K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts, bestehend aus einer Lamelle. 203
- Abbildung 12-6: Abstandsänderung Δx zum Referenzabstand 145,0 mm. Maximalwerte während, oben, und Minimalwerte nach 24 h Trocknung, unten. Prüfkörper der Klimafolgen K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts, bestehend aus zwei Lamellen. 204

- Abbildung 12-7: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$, links, und $\min \Delta y$, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten. Prüfkörper aus einer Lamelle..... 210
- Abbildung 12-8: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$, links, und $\min \Delta y$, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten. Prüfkörper aus zwei Lamellen..... 211
- Abbildung 12-9: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x$. Klimafolge KD. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und zwei Lamellen, rechts. 211
- Abbildung 12-10: Höchstwerte der Abstände $\min \Delta x$. Klimafolge KD. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und aus zwei Lamellen, rechts..... 212
- Abbildung 12-11: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Buche, Klimafolge K2, zwei Lamellen. 212
- Abbildung 12-12: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Lärche, Klimafolge K2, zwei Lamellen.213
- Abbildung 12-13: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Buche, Klimafolge K3, zwei Lamellen. 213
- Abbildung 12-14: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Lärche, Klimafolge K3, zwei Lamellen.214
- Abbildung 12-15: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Buche, Klimafolge KD, zwei Lamellen.214
- Abbildung 12-16: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Lärche, Klimafolge KD, zwei Lamellen.
..... 215

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Gleichgewichtsfeuchten von Holzbaustoffen, in % (DIN EN 1995-1-1/NA).	63
Tabelle 3-2: Bezeichnungen der gewählten Klimafolgen und vergleichbare Klimabedingungen... 64	64
Tabelle 3-3: Beschreibung ausgesuchter Holzarten (Grosser 2007).	66
Tabelle 3-4: Kenngrößen und Eigenschaften ausgesuchter Holzarten, Angaben nach (Sell 1997).67	67
Tabelle 3-5: Klimafolgen und Klimabedingungen der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“.	68
Tabelle 3-6: Klimafolgen und Klimabedingungen der Versuchsreihe „optische Messungen“.	90
Tabelle 4-1: Angenommene Ausgleichsfeuchten u_1 in % nach (Popper und Niemz 2009, Siau 1984) für die Trocknungsphasen der Klimafolgen K2, K3 und KD.	115
Tabelle 4-2: Diffusionskoeffizienten D_k' , Anfangs- und Randbedingung k/A	121
Tabelle 4-3: Diffusionskoeffizienten D' , Anfangs- und Randbedingung p/A	121
Tabelle 4-4: Diffusionskoeffizienten D , Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U}	122
Tabelle 4-5: Oberflächenemissionskoeffizienten S , Anfangs- und Randbedingung p/\ddot{U}	122
Tabelle 5-1: Berechnungsschritte und zugehörige Zeitpunkte für Finite-Elemente-Modelle mit Bezug zur Versuchsreihe „optische Messungen“.	137
Tabelle 5-2: Materialkennwerte für die Eingabe bei den Finite-Elemente-Modellen.	138
Tabelle 5-3: Mittlere Festigkeiten nach DIN 68364:2003 für fehlerfreie, normalklimatisierte Hölzer.	139
Tabelle 5-4: Fasersättigungsfeuchtigkeit in % für die Eingabe bei den Finite-Elemente-Modellen.	139
Tabelle 12-1: Prinzipielle Übersicht zu den Prüfkörpern der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“.	197
Tabelle 12-2: Angaben zur Rohdichte, Prüfkörper Versuchsreihen „Sorptions/Desorption“.	197
Tabelle 12-3: Versuchseinrichtungen und Klimadaten der Klimafolge K2 und K3.	198
Tabelle 12-4: Dauer der Klimalagerung und Anzahl der Holzfeuchtemessungen.	199
Tabelle 12-5: Holzfeuchtigkeit u zum Ende der Klimaphasen.	200

Tabelle 12-6: Differenz der mittleren Holzfeuchtigkeit zwischen Beginn und Ende einer Klimaphase.	200
Tabelle 12-7: Prinzipielle Übersicht zu den Prüfkörpern der Versuchsreihe „optische Messungen“.	202
Tabelle 12-8: Angaben zur Rohdichte, Prüfkörper Versuchsreihe „optische Messungen“	202
Tabelle 12-9: Holzfeuchtigkeit u zum Ende der Klimaphasen.	202
Tabelle 12-10: Betragsmäßige Differenz der mittleren Holzfeuchtigkeit zwischen Beginn und Ende der 24-stündigen optischen Messung.	203
Tabelle 12-11: Minimale und maximale Dehnungswerte über alle Zeitstufen des gesamten optischen Messbereichs und Angabe der zugehörigen Holzart. Angegeben sind gefilterte Werte.	204
Tabelle 12-12: Prinzipielle Übersicht zu den Finite-Elemente-Systemen.	209
Tabelle 12-13: Lage des Ursprungs des lokalen im globalen Koordinatensystem bei Prüfkörpern aus einer Lamelle für den Vergleich mit der Versuchsreihe „optische Messungen“, in mm.	209
Tabelle 12-14: Lage des Ursprungs des lokalen im globalen Koordinatensystem bei Prüfkörpern aus zwei Lamellen für den Vergleich mit der Versuchsreihe „optische Messungen“, in mm.	209
Tabelle 12-15: Lage des Ursprungs des lokalen im globalen Koordinatensystem bei Prüfkörpern aus zwei Lamellen für den Vergleich Spannungen der Hölzer, in mm.	210

11 Literaturverzeichnis

ASTM D2559, May 2004: Specification for Adhesives for Structural Laminated Wood Products for Use Under Exterior (Wet Use) Exposure Conditions.

DIN 52182, September 1976: Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte.

DIN 68364, November 1979: Kennwerte von Holzarten - Festigkeit, Elastizität, Resistenz.

DIN 68364, Mai 2003: Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten.

DIN EN 301, Dezember 2013: Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 301:2013.

DIN EN 302-2, Juni 2013: Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 302-2:2013.

DIN EN 350-1, Oktober 1994: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz; Deutsche Fassung EN 350-1:1994.

DIN EN 923, Juni 2008: Klebstoffe - Benennungen und Definitionen; Deutsche Fassung EN 923:2005+A1:2008.

DIN EN 1990, Dezember 2010: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.

DIN EN 1995-1-1, Dezember 2010: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008.

DIN EN 1995-1-1/NA, August 2013: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.

DIN EN 13183-1, Juli 2002: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren; Deutsche Fassung EN 13183-1:2002.

DIN EN 14080, September 2013: Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14080:2013.

DIN EN 15026, Juli 2007: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007.

DIN EN 15425, Juni 2008: Klebstoffe – Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis für tragende Holzbauteile – Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 15425:2008.

DIN EN 16254, Februar 2014: Klebstoffe - Emulsionspolymerisiertes Isocyanat (EPI) für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 16254:2013.

DIN EN ISO 12572, September 2001: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (ISO 12572:2001); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2001.

Aicher, S.; Dill-Langer, G. (1996): Influence of cylindrical anisotropy of wood and loading conditions on off-axis stiffness and stresses of a board in tension perpendicular to grain. In: *Otto-Graf-Journal*. Annual journal on research and testing of materials. Volume 7. Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg (FMPA), Otto-Graf-Institut. Stuttgart, S. 216–242.

Aicher, S.; Dill-Langer, G. (1997): Climate induced stresses perpendicular to the grain in glulam. In: *Otto Graf Journal* 8, S. 209–231.

Aicher, S.; Dill-Langer, G. (2005): Effect of Lamination Anisotropy and Lay-Up in Glued-Laminated Timbers. In: *Jahresbericht 2005*. Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut, (FMPA)).

Angst, V.; Malo, K. A. (2010): Moisture induced stresses perpendicular to the grain in glulam: Review and evaluation of the relative importance of models and parameters. In: *Holzforschung* 64 (5). DOI: 10.1515/hf.2010.089.

Angst, V.; Malo, K. A. (2012): The effect of climate variations on glulam—an experimental study. In: *Eur. J. Wood Prod.* 70 (5), S. 603–613. DOI: 10.1007/s00107-012-0594-y.

Angst, V.; Malo, K. A. (2013): Moisture-induced stresses in glulam cross sections during wetting exposures. In: *Wood Sci. Technol.* 47 (2), S. 227–241. DOI: 10.1007/s00226-012-0493-8.

ANSYS, Inc. (2012): ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 14.5. Unter Mitarbeit von P. Kohnke.

ANSYS, Inc. (2013): ANSYS Workbench 2.0 Framework. Version 14.5.7: ANSYS, Inc.; SAS IP, Inc.

Avramidis, S.; Siau, J. F. (1987): An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. In: *Wood Sci. Technol.* 21 (3), S. 249–256. DOI: 10.1007/BF00351396.

Babiak, M. (1995): Is Fick's law valid for the adsorption of water by wood? In: *Wood Sci. Technol.* 29 (3). DOI: 10.1007/BF00204590.

Baehr, H. D.; Stephan, K. (2010): Wärme- und Stoffübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Banks, W. B. (1981): Addressing the problem of non-steady state liquid flow in wood. In: *Wood Sci. Technol.* 15 (3), S. 171–177. DOI: 10.1007/BF00353469.
- Bayerische Staatsforsten (2011): Hat die Fichte im Staatswald noch eine Chance? Online verfügbar unter http://www.baysf.de/de/home/unternehmen_wald/aktuelles/detailansicht/browse/1/article/85/hat-die-fichte-im-staatswald-noch-eine-chance.html, zuletzt geprüft am 18.07.2013.
- Böhner, G. (1976): Zur Wasserdampf- und Luftdurchlässigkeit verschiedener unbehandelter und thermisch behandelter Hölzer. In: *Holz Roh Werkst* 34 (8), S. 295–307. DOI: 10.1007/BF02610959.
- Brockhaus Enzyklopädie online: brockhaus-enzyklopaedie. Online verfügbar unter http://www.brockhaus-enzyklopaedie.de/be21_article.php#1, zuletzt geprüft am 06.06.2007.
- Brockmann, W.; Geiß, P. L.; Klingen, J.; Schröder, B. (2005): Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Weinheim: Wiley-VCH.
- Brosinger, F.; Tretter, S. (2007): Waldbau im Zeichen des Klimawandels. Anpassung durch Waldumbau und naturnahe Forstwirtschaft. In: *LWF-aktuell* 60.
- Brunauer, S.; Emmett, P. H.; Teller, E. (1938): Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. In: *J. Am. Chem. Soc.* 60 (2), S. 309–319. DOI: 10.1021/ja01269a023.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Online verfügbar unter http://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/BMEL_Wald_Broschuere.pdf, zuletzt geprüft am 09.10.2014.
- Butterfield, B. (2006): The structure of wood: form and function. Chapter 1. In: J. C. F. Walker (Hg.): *Primary wood processing. Principles and practice*. 2nd ed. Dordrecht: Springer, S. 1–22.
- Cai, L.; Avramidis, S. (1997): A study on the separation of diffusion and surface emission coefficients in wood. In: *Drying Tech.* 15 (5), S. 1457–1473. DOI: 10.1080/07373939708917303.
- Cai, L.; Deku, S. (1992): Modelling of the moisture transfer process in particleboards. In: *Holz Roh Werkst* 50 (10), S. 395–399. DOI: 10.1007/BF02627609.
- Cai, L.; Wang, F. (1994): Steady and unsteady state moisture movement in particleboards. In: *Holz Roh Werkst* 52 (5), S. 304–306. DOI: 10.1007/BF02621419.
- Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C. (2011): *Conduction of heat in solids*. 2. ed., reprint. Oxford: Clarendon Pr.
- Chen, Y.; Choong, E. T. (1994): Determining the effect of extractives on moisture movement using a "continuous" measuring system. In: *Wood and fiber science* 26 (3), S. 390–396.

- Chen, Y.; Choong, E. T.; Wetzel, D. M. (1994): Optimum average diffusion coefficient: An objective index in description of wood drying data. In: *Wood and fiber science* 26 (3), S. 412–420.
- Choong, E. T. (1962): Movement of moisture through a softwood in the hygroscopic range. In: *Forest Products Journal*, S. 489–498.
- Choong, E. T.; Skaar, C. (1969): Separating internal and external resistance to moisture removal in wood drying. In: *Wood Sci.* 1 (4), S. 200–202.
- Choong, E. T.; Skaar, C. (1972): Diffusivity and surface emissivity in wood drying. In: *Wood and fiber science* 4 (2), S. 80–86.
- Comstock, G. L.; Côté, W. A., Jr. (1968): Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood. In: *Wood Science and Technology* 2 (4), S. 279–291. DOI: 10.1007/BF00350274.
- Crank, J. (1975): The mathematics of diffusion. 2d ed. Oxford, [Eng]: Clarendon Press.
- Droin-Josserand, A.; Taverdet, J. L.; Vergnaud, J. M. (1988): Modelling the absorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. In: *Wood Sci. Technol.* 22 (4), S. 299–310. DOI: 10.1007/BF00353320.
- Enquist, B. (2005): Use of optical measurement techniques in furniture design. In: *Building Design Papers* 2.
- Fick, A. (1855): Ueber diffusion. In: J. C. Poggendorff (Hg.): *Annalen der Physik und Chemie*. Leipzig: J. A. Barth, S. 59–86.
- Fleischhauer, M. (2012): Untersuchungen mit dem optischen Messsystem ARAMIS zu den Verformungen verschiedener Holzarten bei Holzfeuchteänderung. Bachelor's Thesis in der Fachrichtung Holzbau. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Forest Products Laboratory (1999): *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Fortino, S.; Toratti, T. (2010): A three-dimensional moisture-stress FEM analysis for timber structures. In: *WCTE 2010 Conference Proceedings*. World Conference on Timber Engineering. Trento, Italy.
- Fortuin, G. (2003): Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz. Dissertation. Universität Hamburg.
- Fourier, J. B. J. (1822): *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: Chez Firmin Didot, Père et Fils.

Frandsen, H. L.; Damkilde, L.; Svensson, S. (2007a): A revised multi-Fickian moisture transport model to describe non-Fickian effects in wood. In: *Holzforschung* 61 (5), S. 563–572. DOI: 10.1515/HF.2007.085.

Frandsen, H. L.; Svensson, S. (2007): Implementation of sorption hysteresis in multi-Fickian moisture transport. In: *Holzforschung* 61 (6), S. 693–701. DOI: 10.1515/HF.2007.113.

Frandsen, H. L.; Svensson, S.; Damkilde, L. (2007b): A hysteresis model suitable for numerical simulation of moisture content in wood. In: *Holzforschung* 61 (2). DOI: 10.1515/HF.2007.031.

Franke, B.; Franke, S.; Rautenstrauch, K. (2005): Beanspruchungsanalyse von Holzbauteilen durch 2D-Photogrammetrie. In: *Bautechnik* 82 (2), S. 61–68. DOI: 10.1002/bate.200590047.

Franke, S.; Franke, B.; Rautenstrauch, K. (2004): Determination of fracture mechanics parameters for wood with the help of close range photogrammetry. In: CIB-W18. Meeting 37. International Council For Research And Innovation In Building And Construction. Working Commission W18 - Timber Structures. Edinburgh, Scotland.

Franke, S.; Franke, B.; Rautenstrauch, K. (2007): Strain analysis of wood components by close range photogrammetry. In: *Materials and structures* 40 (1), S. 37–46.

Franke, S.; Franke, B.; Schober, K.-U.; Rautenstrauch, K. (2006): Experimental verification of FE-Simulations of wood using photogrammetry. In: WCTE 2006 Conference Proceedings. World Conference on Timber Engineering. Portland, OR, USA.

Franke, S.; Franke, B.; Schober, K.-U.; Rautenstrauch, K. (2008): The strength behavior of wood in experiment and simulations. In: WCTE 2008 Conference Proceedings. World Conference on Timber Engineering. Miyazaki, Japan.

Frihart, C. R. (2009): Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. In: *Journal of Adhesion Science and Technology* 23 (4), S. 601–617. DOI: 10.1163/156856108X379137.

Frihart, C. R.; Wescott, J. M. (2008): Why do some wood-adhesive bonds respond poorly to accelerated moisture-resistant tests? In: Innovation and Challenges in Bio-based Composites-- How Far to the New Frontier? Rotorua, New Zealand, 5th-8th November 2008. 9th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, S. 51–58.

Frihart, C. R.; Yelle, D. J.; Wiedenhoef, A. C. (2008): What does moisture-related durability of wood bonds mean? In: C. Csiha (Hg.): Enhancing bondline performance. Proceedings of the Final conference of COST E34 Bonding of timber. Sopron, Hungary, 6th-7th May. University of West Hungary, Faculty of wood sciences, Institute of product design and technology, S. 89–101.

Gann (2002): Gann Hydromette HT 85. Bedienungsanleitung. Gann Mess- und Regeltechnik GmbH. Stuttgart.

Gebhardt, C. (2011): Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. München: Hanser.

Gereke, T. (2009): Moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich. Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute for Building Materials - Wood Physics.

Gereke, T.; Gustafsson, P. J.; Persson, K.; Niemz, P. (2011): The Hygroscopic Warping of Cross-Laminated Timber. In: V. Bucur (Hg.): Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 269–285.

GOM mbH (2009a): Aramis. Benutzerhandbuch - Software. aramis-v6-1_1st_de_rev-c.

GOM mbH (2009b): Aramis. Benutzerinformation - Hardware. aramis_hw-2lt-4-5-5lt-hs-adjustable_de_rev-c.

Grosser, D. (2007): Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas. Repr. der 1. Aufl. von 1977. Remagen: Kessel.

Habenicht, G. (2009): Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6., aktualisierte Aufl. Berlin: Springer (VDI).

Häglund, M. (2006): Varying moisture content and eigen-stresses in timber elements. In: WCTE 2006 Conference Proceedings. World Conference on Timber Engineering. Portland, OR, USA.

Häglund, M. (2007): Moisture content penetration in wood elements under varying boundary conditions. In: *Wood Sci. Technol.* 41 (6), S. 477–490. DOI: 10.1007/s00226-007-0131-z.

Häglund, M. (2010): Parameter influence on moisture induced eigen-stresses in timber. In: *Eur. J. Wood Prod.* 68 (4), S. 397–406. DOI: 10.1007/s00107-009-0377-2.

Hailwood, A. J.; Horrobin, S. (1946): Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. In: *Trans. Faraday Soc.* 42, S. B084. DOI: 10.1039/TF946420B084.

Hartke, B. (2008): Kapitel 8: Suche nach Nullstellen und Extremwerten, zuletzt aktualisiert am 01.10.2008, zuletzt geprüft am 12.04.2014.

Hawley, L. F. (1931): Wood-liquid relations. Washington, D. C.: United States Department of Agriculture (Technical bulletin, 248).

Henke, K.; Schaffrath, J. (2010): Massgefertigte Vakuum-Dämmelemente für das Bauen im Bestand. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2749).

Hering, S. (2011): Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen. Dissertation. ETH/IfB, Zürich.

Hering, S.; Keunecke, D.; Niemz, P. (2012): Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. In: *Wood Sci. Technol.* 46 (5), S. 927–938. DOI: 10.1007/s00226-011-0449-4.

Hübner, U. (2009): Laubhölzer für lastabtragende Bauteile im Bauwesen. In: *OIB aktuell* 10, S. 12–23.

Hukka, A. (1999): The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments. In: *Holzforschung* 53 (5). DOI: 10.1515/HF.1999.088.

Hunt, D. G. (1986): The mechano-sorptive creep susceptibility of two softwoods and its relation to some other materials properties. In: *J Mater Sci* 21 (6), S. 2088–2096. DOI: 10.1007/BF00547951.

Jesse, F.; Kutzner, T. (2013): Digitale Photogrammetrie in der Bautechnik. In: *Bautechnik* 90 (11), S. 703–714. DOI: 10.1002/bate.201300059.

Jiang, Y.; Schaffrath, J.; Van de Kuilen, J.-W. G. (2014): Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben. IGF-Vorhaben 17284 N. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion; Technische Universität München, Holzforschung München.

Job, G.; Rüffler, R. (2011): *Physikalische Chemie*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Johansson, M.; Sjödin, J. (2010): A general FE-model to predict capacity of a steel-timber dowel joint with complex loading. In: WCTE 2010 Conference Proceedings. World Conference on Timber Engineering. Trento, Italy.

Jönsson, J. (2001): Moisture induced stresses in glulam cross sections. In: CIB-W18. Meeting 34. International Council For Research And Innovation In Building And Construction. Working Commission W18 - Timber Structures. Venice, Italy.

Jönsson, J. (2004): Internal stresses in the cross-grain direction in glulam induced by climate variations. In: *Holzforschung* 58 (2), S. 154–159. DOI: 10.1515/HF.2004.023.

Jönsson, J. (2005): Internal stresses in glulam due to moisture gradients in the grain direction. In: *Holzforschung* 59 (1). DOI: 10.1515/HF.2005.003.

Jönsson, J.; Svensson, S. (2004): A contact free measurement method to determine internal stress states in glulam. In: *Holzforschung* 58 (2). DOI: 10.1515/HF.2004.022.

Jönsson, J.; Thelandersson, S. (2002): Tensile strength of glulam perpendicular to grain - effects of moisture gradients. In: CIB-W18. Meeting 35. International Council For Research And Innovation In Building And Construction. Working Commission W18 - Timber Structures. Kyoto, Japan.

- Jousset, P.; Rachik, M. (2010): Kohäsivzonenmodell für die Finite-Element Simulation von strukturellen Klebverbindungen: Modellierung, Parameteridentifikation und Validierung. In: *NAFEMS Magazin* (17).
- Kang, W.; Lee, N.-H. (2002): Mathematical modeling to predict drying deformation and stress due to the differential shrinkage within a tree disk. In: *Wood Sci. Technol.* 36 (6), S. 463–476. DOI: 10.1007/s00226-002-0153-5.
- Keunecke, D.; Hering, S.; Niemz, P. (2008): Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. In: *Wood Sci. Technol.* 42 (8), S. 633–647. DOI: 10.1007/s00226-008-0192-7.
- Keylwerth, R. (1951): Formänderungen in Holzquerschnitten. In: *Holz Roh Werkst* 9 (7), S. 253–260. DOI: 10.1007/BF02617369.
- Keylwerth, Rudolf (1962a): Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz—Erste Mitteilung: Freie Quellung. In: *Holz Roh Werkst* 20 (7), S. 252–259. DOI: 10.1007/BF02604681.
- Keylwerth, Rudolf (1962b): Untersuchungen über freie und behinderte Quellung—Zweite Mitteilung: Behinderte Quellung. In: *Holz Roh Werkst* 20 (8), S. 292–303. DOI: 10.1007/BF02608540.
- Keylwerth, Rudolf (1968): Dimensionsstabile Holzarten. In: *Holz Roh Werkst* 26 (11), S. 413–416. DOI: 10.1007/BF02612540.
- Kölling, C. (2007): Bäume für die Zukunft. Baumartenwahl in den Zeiten des Klimawandels. In: *LWF-aktuell* 60.
- Kollmann, F. (1944): Sorption und Quellung des Holzes. In: *Naturwissenschaften* 32 (14-26), S. 121–139. DOI: 10.1007/BF01467888.
- Kollmann, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, BD 1. Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Kollmann, F. (1959): Über die Sorption von Holz und ihre exakte Bestimmung. In: *Holz Roh Werkst* 17 (5), S. 165–171. DOI: 10.1007/BF02608808.
- Kouali, M.; Bouzon, J.; Vergnaud, J. M. (1992): Process of absorption and desorption of water in a wood board, with 3-dimensional transport beyond the FSP. In: *Wood Sci. Technol.* 26 (4), S. 307–321. DOI: 10.1007/BF00200166.
- Kouali, M.; Vergnaud, J. M. (1991): Modeling the process of absorption and desorption of water above and below the fiber saturation point. In: *Wood Sci. Technol.* 25 (5), S. 327–339. DOI: 10.1007/BF00226172.
- Kraus, K. (2004): Photogrammetrie. Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Aufl. Berlin: de Gruyter.

- Langrish, T.; Walker, J. C. F. (2006): Drying of timber. Chapter 8. In: J. C. F. Walker (Hg.): Primary wood processing. Principles and practice. 2nd ed. Dordrecht: Springer, S. 251–295.
- Langrish, T. A. G.; Bohm, N. (1997): An experimental assessment of driving forces for drying in hardwoods. In: *Wood Sci. Technol.* 31 (6), S. 415–422. DOI: 10.1007/BF00702563.
- Larsen, F.; Ormarsson, S. (2013): Numerical and experimental study of moisture-induced stress and strain field developments in timber logs. In: *Wood Sci. Technol.* 47 (4), S. 837–852. DOI: 10.1007/s00226-013-0541-z.
- Larsen, F.; Ormarsson, S.; Olesen, J. F. (2010): Experimental investigation of moisture driven fracture in solid wood. In: WCTE 2010 Conference Proceedings. World Conference on Timber Engineering. Trento, Italy.
- Lasserre, B.; Morlier, P.; Galimard, P. (2000): Long term mechanical behaviour of glued joints. In: S. Aicher und H. W. Reinhardt (Hg.): Joints in timber structures. Stuttgart, Germany, 12-14 September 2001. Cachan Cedex, Frankreich: RILEM publications (RILEM proceedings, 22).
- Leicester, R. H. (1971): A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams. In: *Wood Sci. Technol.* 5 (3), S. 211–220. DOI: 10.1007/BF00353683.
- Liu, J. Y. (1989): A new method for separating diffusion coefficient and surface emission coefficient. In: *Wood and fiber science* 21 (2), S. 133–141.
- Liu, J. Y.; Simpson, W. T. (1997): Solutions of diffusion equation with constant diffusion and surface emission coefficients. In: *Drying Tech.* 15 (10), S. 2459–2477. DOI: 10.1080/07373939708917370.
- Liu, J. Y.; Simpson, W. T. (1999): Two-stage moisture diffusion in wood with constant transport coefficients. In: *Drying Tech.* 17 (1-2), S. 258–267. DOI: 10.1080/07373939908917528.
- Luhmann, T. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. Aufl. Heidelberg: Wichmann.
- Luhmann, T. (2010): Close range photogrammetry for industrial applications. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (6), S. 558–569. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003.
- Mannes, D.; Sonderegger, W.; Hering, S.; Lehmann, E.; Niemz, P. (2009): Non-destructive determination and quantification of diffusion processes in wood by means of neutron imaging. In: *Holzforschung* 63 (5). DOI: 10.1515/HF.2009.100.
- Marra, A. A. (1992): Technology of wood bonding. Principles in practice. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Martin, R. E.; Moschler, W. W., Jr. (1970): Measurement of diffusion coefficients in wood by the Matano solution. In: *Wood Sci.* 2 (3), S. 186–192.

- Meierhofer, U.; Sell, J. (1979a): Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Holzbauteilen. 2. Mitteilung: Tragende Holzbauteile im Freien unter Dach. In: *Holz als Roh-und Werkstoff* 37 (6), S. 227–234. DOI: 10.1007/BF02608193.
- Meierhofer, U.; Sell, J. (1979b): Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Holzbauteilen. 3. Mitteilung: Träger mit direkter Wetterbeanspruchung. In: *Holz als Roh-und Werkstoff* 37 (12), S. 447–454. DOI: 10.1007/BF02614411.
- Mirianon, F.; Toratti, T.; Fortino, S. (2008): A Method to model wood by using ABAQUS finite element software. Part 1. Constitutive model and computational details. Espoo, Finland (VTT publications).
- Möhler, K.; Steck, G. (1977): Rißbildung in Brettschichtträgern durch Trocknung oder Trocknung nach vorheriger Feuchtigkeitszunahme. In: *Informationszentrum Raum und Bau der Fraunhofer Gesellschaft Forschungsbericht F 1423*.
- Möhler, K.; Steck, G. (1980): Untersuchungen über die Rissbildung in Brettschichtholz infolge Klimabeanspruchung. In: *Bauen mit Holz* (4), S. 194–200.
- Moldan, B. (2011): Untersuchungen mit dem Messsystem Aramis an Prüfkörpern mit verschiedenen Auftragsmustern. Studienarbeit in der Fachrichtung Holzbau. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Moschler, W. W., Jr.; Martin, R. E. (1968): Diffusion Equation solutions in experimental wood drying. In: *Wood Sci.* 1 (1), S. 47–57.
- Mounji, H.; Bouzon, J.; Vergnaud, J. M. (1991): Modelling the process of absorption and desorption of water in two dimensions (transverse) in a square wood beam. In: *Wood Sci. Technol.* 26 (1), S. 23–37. DOI: 10.1007/BF00225689.
- Müller, G.; Groth, C. (2007): FEM für Praktiker. Band 1: Grundlagen. Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen - Lösungen mit dem Programm ANSYS Rev. 9/10. 8. Aufl. Renningen-Malmsheim: Expert-Verl. (Edition expertsoft, 23).
- Müller, U.; Gindl, W.; Teischinger, A. (2005a): Berührungslose Dehnungsmessung in Holz- und Holzwerkstoffen mittels Elektronischer Laser Speckle Interferometrie. In: *Holztechnologie* 46 (3), S. 48–49.
- Müller, U.; Sretenovic, A.; Vincenti, A.; Gindl, W. (2005b): Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. Part 1: Shear strain concentration in a lap joint specimen by means of electronic speckle pattern interferometry. In: *Holzforschung* 59 (3). DOI: 10.1515/HF.2005.050.
- Nadler, K. C.; Choong, E. T.; Wetzel, D. M. (1985): Mathematical modeling of the diffusion of water in wood during drying. In: *Wood and fiber science* 17 (3), S. 404–423.

- Nakano, T. (1994a): Non-steady state water adsorption of wood. Part 1. A formulation for water adsorption. In: *Wood Sci. Technol.* 28 (5). DOI: 10.1007/BF00195283.
- Nakano, T. (1994b): Non-steady state water adsorption of wood. Part 2. Validity of the theoretical equation of water adsorption. In: *Wood Sci. Technol.* 28 (6). DOI: 10.1007/BF00225464.
- Neuhaus, H. (2011): Ingenieurholzbau. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Teubner.
- Newman, A. B. (1931a): The drying of porous solids: Diffusion and surface emission equation. In: *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs* 27, S. 203–220.
- Newman, A. B. (1931b): The drying of porous solids: Diffusion calculations. In: *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs* 27, S. 310–333.
- Niemz, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl (Holz - Anatomie, Chemie, Physik).
- Niemz, P.; Wyss, M.; Fuhr, M. (2007): Untersuchungen zum Versagensmechanismus in der Klebfuge bei Zugscherbelastung. In: *Holztechnologie* 48 (4), S. 43–47.
- Olek, W.; Perré, P.; Weres, J. (2011): Implementation of a relaxation equilibrium term in the convective boundary condition for a better representation of the transient bound water diffusion in wood. In: *Wood Sci. Technol.* 45 (4), S. 677–691. DOI: 10.1007/s00226-010-0399-2.
- Olek, W.; Weres, J. (2007): Effects of the method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modeling bound water transfer in wood. In: *Transp Porous Med* 66 (1-2), S. 135–144. DOI: 10.1007/s11242-006-9010-6.
- Ormarsson, S.; Dahlblom, O.; Petersson, H. (1999): A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 2: Simulation of drying board. In: *Wood Science and Technology* 33 (5), S. 407–423. DOI: 10.1007/s002260050126.
- Oscarsson, J.; Olsson, A.; Enquist, B. (2010): Strain fields around a traversing edge knot in a spruce specimen exposed to tensile forces. In: WCTE 2010 Conference Proceedings. World Conference on Timber Engineering. Trento, Italy.
- Pizzo, B.; Lavischi, P.; Misani, C.; Triboulot, P. (2003): The compatibility of structural adhesives with wood. In: *Holz Roh Werkst* 61 (4), S. 288–290. DOI: 10.1007/s00107-003-0384-7.
- Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG (2014): Pollmeier BauBuche - Ingenious hardwood - BauBuche steht für Nachhaltigkeit, Innovation, Ästhetik und Wirtschaftlichkeit. Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG. Online verfügbar unter <http://www.pollmeier.com/de/baubuche/ingenious-hardwood/>, zuletzt aktualisiert am 09.10.2014, zuletzt geprüft am 09.10.2014.

Popper, R.; Niemz, P. (2009): Wasserdampfsorptionsverhalten ausgewählter heimischer und überseeischer Holzarten. In: *Bauphysik* 31 (2), S. 117–121. DOI: 10.1002/bapi.200910017.

Popper, R.; Niemz, P.; Croptier, S. (2009): Adsorption and desorption measurements on selected exotic wood species. Analysis with the Hailwood-Horrobin model to describe the sorption hysteresis. In: *Wood research* 54 (4), S. 43–56.

Radovic, M. (2012): Untersuchungen zu diffusionsoffenen und diffusionsdichten Anstrichen für Holzprobekörper. Studienarbeit in der Fachrichtung Holzbau. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Ranta-Maunus, A. (1975): The viscoelasticity of wood at varying moisture content. In: *Wood Sci. Technol.* 9 (3), S. 189–205. DOI: 10.1007/BF00364637.

Ranta-Maunus, A. (2003): Effects of climate and climate variations on strength. In: S. Thelandersson und H. J. Larsen (Hg.): *Timber engineering*. New York: J. Wiley, S. 153–167.

Rautenstrauch, K.; Hädicke, W.; Löffler, A.; Mueller, J. (2010): Simulation and research of a rounded dovetail connection. In: *WCTE 2010 Conference Proceedings*. World Conference on Timber Engineering. Trento, Italy.

Rott, A. (2012): Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Holzarten. Studienarbeit in der Fachrichtung Holzbau. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Rozas, C.; Tomaselli, I.; Zanoelo, E. F. (2009): Internal mass transfer coefficient during drying of softwood (*Pinus elliottii* Engelm.) boards. In: *Wood Sci. Technol.* 43 (5-6), S. 361–373. DOI: 10.1007/s00226-008-0223-4.

Rug, W. (2006): 100 Jahre Hetzer-Patent. In: *Bautechnik* 83 (8), S. 533–540. DOI: 10.1002/bate.200610046.

Schaffrath, J.; Henke, K.; Winter, S. (2010): Vorfertigung für das Bauen im Bestand am Beispiel maßgefertigter Vakuum-Dämmelemente. In: *Bauingenieur* 85 (12), S. 505–512.

Schaffrath, J.; Winter, S. (2013): Stresses and strains in glulam due to moisture change – differences between testing and service conditions with reference to various wood species. In: *The International Conference on Wood Adhesives*. Toronto, Ontario, Kanada, S. 209–220.

Schoenmakers, J. C. M.; Svensson, S. (2011): Embedment tests perpendicular to the grain – optical measurements of deformation fields. In: *Eur. J. Wood Prod.* 69 (1), S. 133–142. DOI: 10.1007/s00107-009-0404-3.

- Schwark, M.; Rautenstrauch, K.; Franke, S.; Franke, B. (2004): Beanspruchungsanalyse von Bauteilen aus Voll- und Brettschichtholz durch Industriephotogrammetrie am Beispiel von Ausklinkungen und Durchbrüchen. In: Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. 61. DVW-Fortbildungseminar. Weimar, 27.-28.09.2004. Augsburg: Wissner-Verlag (Schriftenreihe des DVW, 61).
- Sell, J. (1997): Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. 4. Aufl. Dietikon: Baufachverl.
- Serrano, E.; Enquist, B. (o. J.): Assessment of the strain distribution in wood adhesive bonds by contact-free measurement and finite element analyses. Online verfügbar unter http://www.sp.se/sv/index/resources/contact-freedeformation/Documents/Contact_free_article.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2014.
- Serrano, E.; Enquist, B. (2005): Contact-free measurement and non-linear finite element analyses of strain distribution along wood adhesive bonds. In: *Holzforschung* 59 (6). DOI: 10.1515/HF.2005.103.
- Serrano, E.; Enquist, B. (2010): Compression strength perpendicular to grain in cross-laminated timber (CLT). In: WCTE 2010 Conference Proceedings. World Conference on Timber Engineering. Trento, Italy.
- Shi, S. Q. (2007): Diffusion model based on Fick's second law for the moisture absorption process in wood fiber-based composites: is it suitable or not? In: *Wood Sci. Technol.* 41 (8), S. 645–658. DOI: 10.1007/s00226-006-0123-4.
- Siau, J. F. (1984): Transport processes in wood. Berlin, New York: Springer-Verlag (Springer series in wood science).
- Siau, J. F.; Avramidis, Stavros (1996): The surface emission coefficient of wood. In: *Wood and fiber science* 28 (2), S. 178–185.
- Simpson, W. T.; Liu, J. Y. (1991): Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (*Populus spec.*) on moisture content. In: *Wood Sci. Technol.* 26 (1), S. 9–21. DOI: 10.1007/BF00225688.
- Sjödén, J.; Serrano, E.; Enquist, B. (2006): Contact-free measurements and numerical analyses of the strain distribution in the joint area of steel-to-timber dowel joints. In: *Holz Roh Werkst* 64 (6), S. 497–506. DOI: 10.1007/s00107-006-0112-1.
- Skaar, C. (1954): Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood. In: *Forest Products Journal* 4 (6), S. 403–410.
- Skaar, C. (1988): Wood-water relations. Berlin, New York: Springer-Verlag (Springer series in wood science).

- Söderström, O.; Salin, J.-G. (1993): On Determination of Surface Emission Factors in Wood Drying. In: *Holzforschung* 47 (5), S. 391–397. DOI: 10.1515/hfsg.1993.47.5.391.
- Sonderegger, W.; Hering, S.; Mannes, D.; Vontobel, P.; Lehmann, E.; Niemz, P. (2010): Quantitative determination of bound water diffusion in multilayer boards by means of neutron imaging. In: *Eur. J. Wood Prod.* 68 (3), S. 341–350. DOI: 10.1007/s00107-010-0463-5.
- Srpčič, S.; Srpčič, J.; Saje, M.; Turk, G. (2009): Mechanical analysis of glulam beams exposed to changing humidity. In: *Wood Sci. Technol.* 43 (1-2), S. 9–22. DOI: 10.1007/s00226-008-0196-3.
- Stamm, A. J. (1959): Bound-water diffusion into wood in the fibre directions. In: *Forest Products Journal*, S. 27–32.
- Stamm, A. J. (1960): Bound-water diffusion into wood in across-the-fibre directions. In: *Forest Products Journal* 10 (10), S. 524–528.
- Stamm, A. J. (1964): Wood and cellulose science. New York: Ronald Press Co.
- Stamm, A. J. (1967a): Diffusion. Movement of fluids in wood - Part II. In: *Wood Sci. Technol.* 1 (3), S. 205–230.
- Stamm, A. J. (1967b): Movement of fluids in wood. Part I: Flow of fluids in wood. In: *Wood Sci. Technol.* 1 (2), S. 122–141. DOI: 10.1007/BF00353384.
- Svensson, S.; Toratti, T. (2002): Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. In: *Wood Science and Technology* 36 (2), S. 145–156. DOI: 10.1007/s00226-001-0130-4.
- Thomas, R. (2012): Trocknungsverhalten verschiedener Holzarten bei der Delaminierungsprüfung nach DIN EN 302-2. Studienarbeit in der Fachrichtung Holzbau. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Toratti, T.; Svensson, S. (2000): Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. In: *Wood Sci. Technol.* 34 (4), S. 317–326. DOI: 10.1007/s002260000059.
- Tremblay, C.; Cloutier, A.; Fortin, Y. (2000a): Determination of the effective water conductivity of red pine sapwood. In: *Wood Sci. Technol.* 34 (2), S. 109–124. DOI: 10.1007/s002260000036.
- Tremblay, C.; Cloutier, A.; Fortin, Y. (2000b): Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. In: *Wood Sci. Technol.* 34 (3), S. 253–276. DOI: 10.1007/s002260000045.
- Truax, T. R.; Selbo, M. L. (1948): Results of accelerated tests and long-term exposures on glue joints in laminated beams. In: *Transactions of the ASME* May, 1948, S. 393–400.

- Vanek, M.; Teischinger, A. (1989): Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen von verschiedenen Holzarten. In: *Holzforschung und Holzverwertung* 1, S. 3–6.
- Vessby, J.; Serrano, E.; Enquist, B. (2010): Contact-free measurement and numerical and analytical evaluation of the strain distribution in a wood-FRP lap-joint. In: *Mater Struct* 43 (8), S. 1085–1095. DOI: 10.1617/s11527-009-9568-x.
- Voigt, H.; Krischer, O.; Schauss, H. (1940): Die Feuchtigkeitsbewegung bei der Verdunstungstrocknung von Holz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 3 (10), S. 305–321. DOI: 10.1007/BF02718022.
- Volkmer, T.; Schmidt, J.-A.; Kranitz, K.; Niemz, P. (2012): Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen. In: *Bauphysik* 34 (2), S. 55–60. DOI: 10.1002/bapi.201200006.
- Vorreiter, L. (1965): Hygro-, mechano- und thermoelastische Maßänderungen, Kennzahlen und Kräfte der Hölzer. Mering: Holzverlag (Kleine Holz-Reihe, 5).
- Wadsö, L. (1993a): Measurements of water vapour sorption in wood. Part 2. Results. In: *Wood Sci. Technol.* 28 (1), S. 59–65. DOI: 10.1007/BF00193877.
- Wadsö, L. (1993b): Studies of water vapor transport and sorption in wood. Dissertation. Lund University, Lund. Building Materials.
- Wadsö, L. (1993c): Surface mass transfer coefficients for wood. In: *Drying Tech.* 11 (6), S. 1227–1249. DOI: 10.1080/07373939308916897.
- Wadsö, L. (1994a): A test of different methods to evaluate the diffusivity from unsteady-state sorption measurements. In: *Drying Tech.* 12 (8), S. 1863–1876. DOI: 10.1080/07373939408962210.
- Wadsö, L. (1994b): Unsteady-state water vapor adsorption in wood: an experimental study. In: *Wood and fiber science* 26 (1), S. 36–50.
- Wangaard, F. F.; Granados, L. A. (1967): The effect of extractives on water-vapor sorption by wood. In: *Wood Science and Technology* 1 (4), S. 253–277. DOI: 10.1007/BF00349758.
- Weichert, L. (1963): Untersuchungen über das Sorption- und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Preßvollholz bei Temperaturen zwischen 20° und 100°C. In: *Holz Roh Werkst* 21 (8), S. 290–300. DOI: 10.1007/BF02610962.
- Weingärtner, B. (2009): Entwicklung im Forst – zukünftiger Baumbestand. Bachelor's Thesis in der Fachrichtung Holzbau. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Werner, G.; Steck, G. (1991): Holzbau. Teil 1 - Grundlagen. 4. Aufl. Düsseldorf: Werner (Werner-Ingenieur-Texte, 48).

Wu, Q.; Milota, M. R. (1994): Effect of creep and mechano-sorptive effect on stress development during drying. In: *Drying Tech.* 12 (8), S. 2057–2085. DOI: 10.1080/07373939408962219.

Zhou, H. Z.; Zhu, E. C.; Fortino, S.; Toratti, T. (2010): Modelling the hygrothermal stress in curved glulam beams. In: *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 45 (2), S. 129–140. DOI: 10.1243/03093247JSA563.

Zillig, W. (2009): Moisture transport in wood using a multiscale approach. Katholieke Universiteit Leuven.

12 Anhang

12.1 Anhang zur Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“

Tabelle 12-1: Prinzipielle Übersicht zu den Prüfkörpern der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“.

Holzart	Klimafolge	Serie
BU, DG, EI, ES, FI, LA	K2, K3, KD	I
		II

Tabelle 12-2: Angaben zur Rohdichte, Prüfkörper Versuchsreihen „Sorptions/Desorption“.

Holzart	Serie	Rohdichte ρ_{12} in kg/m ³			Mittelwert ρ_{12} in kg/m ³	Var.koeff. v in %	DIN 68364 ρ_{12} in kg/m ³	
		K2	K3	KD				
BU	I	684	692	693	690	722	5,0	710
	II	758	752	755	755			
DG	I	517	486	482	495	498	2,5	580
	II	501	500	500	501			
EI	I	756	729	710	731	704	4,8	710
	II	685	680	665	677			
ES	I	661	665	679	668	697	4,9	700
	II	702	740	734	725			
FI	I	404	409	409	408	398	2,8	460
	II	383	396	388	389			
LA	I	501	497	490	496	582	16,2	600
	II	666	673	663	667			

Die letzte Spalte der Tabelle 12-2 gibt Kennwerte der Rohdichte ρ_{12} nach DIN 68364 zum Vergleich wieder.

Gleichungen (12-1) und (12-2) dienen der Umrechnung der Rohdichte bei gemessener Holzfeuchte auf die Rohdichte ρ_0 bei $u = 0$ % beziehungsweise ρ_{12} bei $u = 12$ %. Die Gleichungen sind Niemz (1993) beziehungsweise DIN 52182 entnommen.

$$\rho_0 = \frac{100\rho_u}{(100 + u) - (0,85 \cdot \rho_u \cdot u \cdot 10^{-3})} \quad (12-1)$$

$$\rho_u = \rho_0 \cdot \frac{100 + u}{100 + 0,85 \cdot \rho_0 \cdot u \cdot 10^{-3}} \quad (12-2)$$

mit

ρ_0 Rohdichte bei $u = 0$ % Holzfeuchte, in kg/m^3

ρ_{12} Rohdichte bei $u = 12$ % Holzfeuchte, in kg/m^3

Tabelle 12-3: Versuchseinrichtungen und Klimadaten der Klimafolge K2 und K3.

Klimaphase	Versuchseinrichtung/ Messgröße	Klimafolge/Serie			
		K2		K3	
		I	II	I	II
Feuchtezunahme	Versuchseinrichtung	geschlossene, mit KCl-Lösung befüllte Behältnisse		geschlossene, mit H ₂ O befüllte Behältnisse	
	mittlere Temperatur in °C	20,4	20,1	20,2	20,4
	Standardabweichung in °C	0,3	0,1	0,2	0,2
	mittlere relative Luftfeuchtigkeit in %	87	87	99	99
	Standardabweichung in %	2	2	2	4
Trocknung	Versuchseinrichtung	Klimakammer Fa. Vissmann	Wärmeschrank Fa. Memmert	Klimakammer Fa. Vissmann	Wärmeschrank Fa. Memmert
	mittlere Temperatur in °C	38,6	40,9	38,6	40,9
	Standardabweichung in °C	0,4	0,2	0,4	0,2
	mittlere relative Luftfeuchtigkeit in %	26	13	26	13
	Standardabweichung in %	2	2	2	2

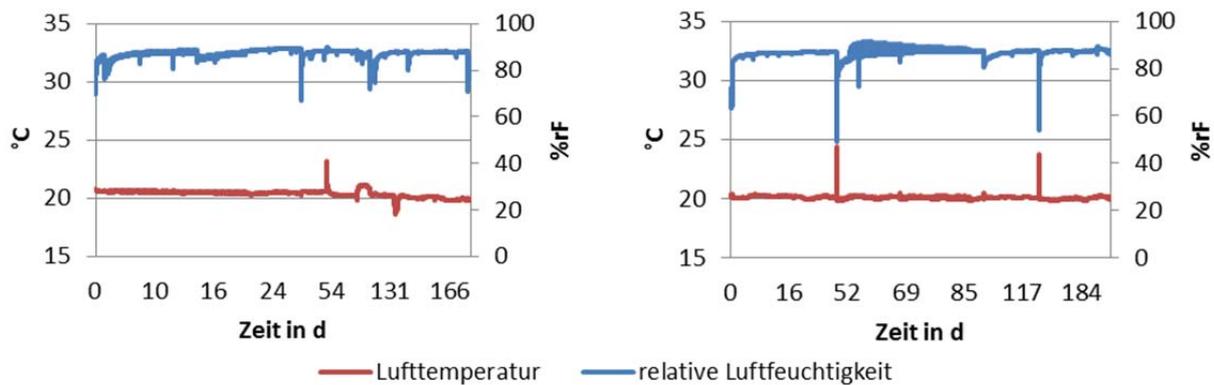


Abbildung 12-1: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Sorptionsphase der Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2 der Versuchsreihe „Sorption/Desorption“. Messung nicht kontinuierlich, daher Abszisse nicht maßstäblich. Minima der relativen Luftfeuchtigkeit durch Öffnen der Behälter zum Messen der Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper.

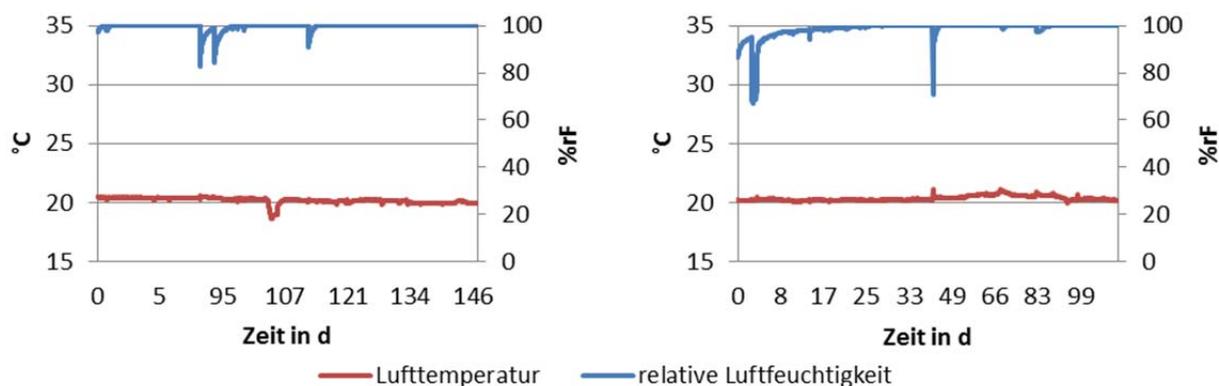


Abbildung 12-2: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Sorptionsphase der Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K3 der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“. Messung nicht kontinuierlich, daher Abszisse nicht maßstäblich. Minima der relativen Luftfeuchtigkeit durch Öffnen der Behälter zum Messen der Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper.

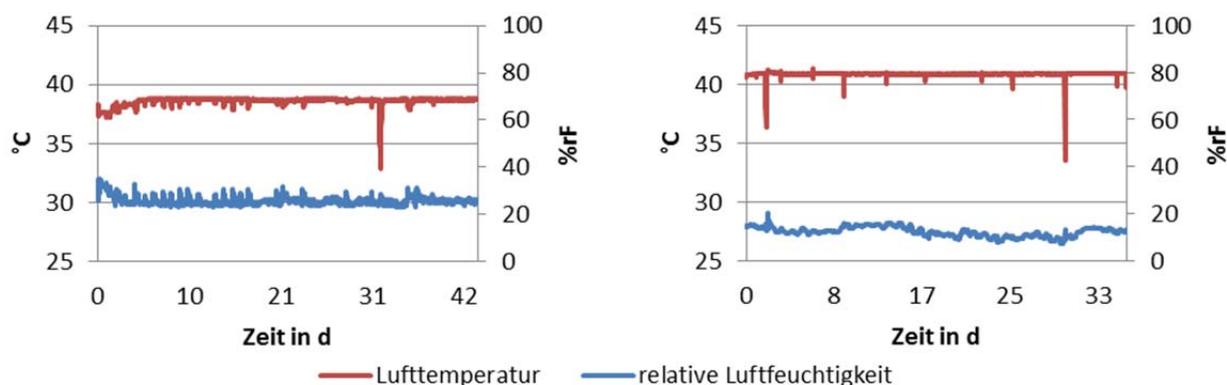


Abbildung 12-3: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Trocknungsphase der Serie I, links, und II, rechts. Klimafolge K2 und K3 der Versuchsreihe „Sorptions/Desorption“.

Tabelle 12-4: Dauer der Klimalagerung und Anzahl der Holzfeuchtemessungen.

Klimafolge	Serie	Klima	Dauer	Anzahl Messungen	
				HF 1 ^{*)}	HF 2 ^{*)}
K2	I	20/85	181 d	34	9
		40/30	43 d	27	27
	II	20/85	200 d	-	20
		40/12,5	36 d	-	12
K3	I	20/100	152 d	24	9
		40/30	43 d	28	28
	II	20/100	200 d	-	20
		40/12,5	36 d	-	12
KD	I	H ₂ O	> 2 h	1	-
		65/12,5	24 h	24	-
	II	H ₂ O	> 2 h	-	1
		65/12,5	27 h	-	12

^{*)} HF 1/2: Holzfeuchtemessgerät 1/2

Tabelle 12-5: Holzfeuchtigkeit u zum Ende der Klimaphasen.

Zeitpunkt	Klima- folge	Serie	Klima	Holzfeuchtigkeit u, in %					
				BU	DG	EI	ES	FI	LA
Ende Konditionier- ung im Normalklima	K2	I	20/65	10,4	12,0	10,6	12,4	11,6	12,3
		II		11,5	12,2	11,6	10,8	13,0	13,3
	K3	I		10,8	12,2	11,0	12,6	12,6	12,4
		II		11,5	12,4	11,6	10,8	12,7	13,2
	KD	I		11,5	12,6	11,4	12,3	12,7	13,3
		II		11,2	12,1	11,0	9,5	12,1	13,6
Ende Feuchte- zunahme/ Sorptions	K2	I	20/85	13,2	14,5	12,9	15,2	15,6	15,3
		II	14,4	15,0	13,2	13,7	17,3	16,1	
	K3	I	20/100	18,8	20,0	16,9	20,4	22,8	21,1
		II	18,3	18,9	15,6	16,5	22,7	19,5	
	KD	I	H ₂ O	112,1	151,3	81,3	73,9	178,0	142,8
		II	101,7	145,8	70,4	92,3	209,9	95,2	
Ende Trocknungs- phase/ Desorption	K2	I	40/30	7,7	8,5	9,1	8,8	7,0	8,1
		II		8,6	7,2	9,4	7,8	6,6	9,2
	K3	I		8,4	8,4	9,4	8,6	7,6	8,6
		II		9,4	7,5	8,9	8,1	6,7	8,8
	KD	I	65/12,5	11,5	15,9	27,4	22,3	6,5	15,8
		II	8,5	8,4	13,8	18,2	4,6	10,6	

Tabelle 12-6: Differenz der mittleren Holzfeuchtigkeit zwischen Beginn und Ende einer Klimaphase.

Klima- folge	Serie	Dauer	Klima	Klima zuvor	Δu , in %					
					BU	DG	EI	ES	FI	LA
K2	I	181 d	20/85	20/65	2,8	2,5	2,2	2,7	4,0	3,0
	II	200 d	20/85	20/65	2,9	2,8	1,6	2,9	4,4	2,8
	I	43 d	40/30	20/85	-5,5	-6,0	-3,7	-6,4	-8,6	-7,2
	II	36 d	40/12,5	20/85	-5,8	-7,8	-3,9	-5,9	-10,8	-6,9
K3	I	152 d	20/100	20/65	7,9	7,8	5,9	7,8	10,2	8,7
	II	200 d	20/100	20/65	6,8	6,5	4,0	5,8	10,0	6,3
	I	43 d	40/30	20/100	-10,4	-11,6	-7,5	-11,8	-15,1	-12,5
	II	36 d	40/12,5	20/100	-8,9	-11,4	-6,8	-8,4	-16,0	-10,7
KD	I	> 2 h	H ₂ O	20/65	100,6	138,8	69,9	61,6	165,3	129,4
	II	> 2 h	H ₂ O	20/65	90,5	133,7	59,4	82,8	197,7	81,5
	I	24 h	65/12,5	H ₂ O	-100,6	-135,5	-53,9	-51,6	-171,5	-127,0
	II	27 h	65/12,5	H ₂ O	-93,2	-137,4	-56,6	-74,1	-205,3	-84,6

12.2 Anhang zur Versuchsreihe „optische Messungen“

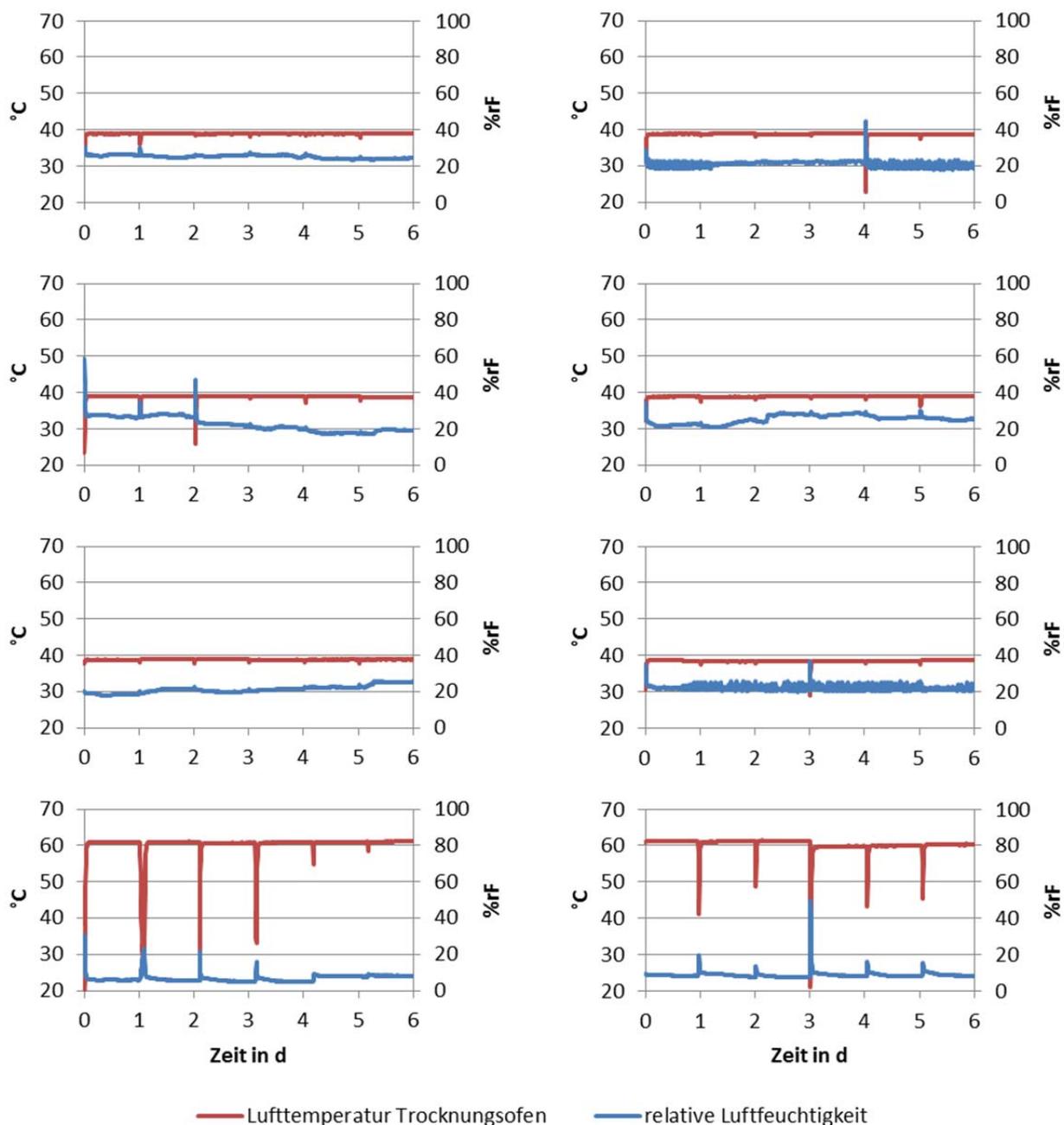


Abbildung 12-4: Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Trocknungssofen während der Versuchsreihe „optische Messungen“. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und zwei Lamellen, rechts. Klimafolge K1, K2, K3 und KD, Bildanordnung von oben nach unten. Minima der Kurven zum Zeitpunkt der Prüfkörperwechsel. Zeitraum zwischen Prüfkörperwechsel nicht dargestellt.

Tabelle 12-7: Prinzipielle Übersicht zu den Prüfkörpern der Versuchsreihe „optische Messungen“.

Holzart	Klimafolge	Prüfkörperaufbau
BU, DG, EI, ES, FI, LA	K1, K2, K3, KD	1 Lamelle
		2 Lamellen

Tabelle 12-8: Angaben zur Rohdichte, Prüfkörper Versuchsreihe „optische Messungen“.

Holzart	Lamellenanzahl	Rohdichte ρ_{12} in kg/m ³				Mittelwert ρ_{12} in kg/m ³		Var.koeff. v in %	DIN 68364 ρ_{12} in kg/m ³
		K1	K2	K3	KD				
BU	1	712	713	708	713	712	729	2,6	710
	2	752	748	746	735	745			
DG	1	484	475	503	472	483	483	1,9	580
	2	480	484	485	479	482			
EI	1	660	651	651	655	654	650	1,2	710
	2	650	654	642	636	646			
ES	1	745	680	709	691	706	644	10,7	700
	2	587	576	593	574	582			
FI	1	449	460	453	443	451	447	2,5	460
	2	433	460	432	445	442			
LA	1	488	492	521	495	499	534	7,5	600
	2	590	573	560	552	569			

Die letzte Spalte der Tabelle 12-8 gibt Kennwerte der Rohdichte ρ_{12} nach DIN 68364 zum Vergleich wieder.

Tabelle 12-9: Holzfeuchtigkeit u zum Ende der Klimaphasen.

Zeitpunkt	Klimafolge	Klima	Anzahl Lamellen	Holzfeuchtigkeit u , in %					
				BU	DG	EI	ES	FI	LA
Ende Feuchtezunahme/ Beginn optische Messung	K1	20/65	1	11,5	12,1	11,3	11,3	12,2	12,0
			2	13,0	13,2	12,2	12,8	13,5	13,2
	K2	20/85	1	16,2	15,9	14,6	16,1	16,6	16,0
			2	16,9	16,1	14,8	18,0	16,9	16,8
	K3	20/100	1	25,6	22,5	22,5	25,1	24,9	24,5
			2	26,5	23,3	23,1	25,2	25,3	27,4
	KD	H ₂ O	1	101,3	125,8	50,5	84,9	144,0	67,2
			2	98,1	128,4	49,1	97,3	114,9	66,7
Ende Trocknungsphase/ optische Messung	K1	40/25	1	11,0	11,5	11,0	10,9	11,5	11,5
			2	12,5	12,5	11,8	12,2	12,6	12,6
	K2	40/25	1	15,3	14,7	13,9	15,3	14,7	14,9
			2	15,9	14,7	14,1	15,9	15,2	15,5
	K3	40/25	1	23,6	20,5	21,1	23,0	22,3	22,5
			2	24,9	21,2	21,8	23,2	21,6	24,8
	KD	65/10	1	9,5	7,1	12,3	24,5	3,6	4,0
			2	13,3	15,7	12,7	26,3	6,3	7,5

Tabelle 12-10: Betragmäßige Differenz der mittleren Holzfeuchtigkeit zwischen Beginn und Ende der 24-stündigen optischen Messung.

Klima- folge	Klima	Klima zuvor	Anzahl Lamellen	Δu , in %					
				BU	DG	EI	ES	FI	LA
K1	40/25	20/65	1	0,5	0,6	0,3	0,5	0,7	0,6
			2	0,5	0,7	0,4	0,6	0,9	0,6
K2	40/25	20/85	1	0,9	1,2	0,6	0,9	1,9	1,1
			2	1,0	1,5	0,7	2,0	1,7	1,3
K3	40/25	20/100	1	2,0	2,0	1,4	2,1	2,6	2,0
			2	1,6	2,1	1,3	2,0	3,7	2,6
KD	65/10	H2O	1	91,9	118,7	38,1	60,4	140,4	63,2
			2	84,8	112,7	36,5	71,0	108,6	59,2

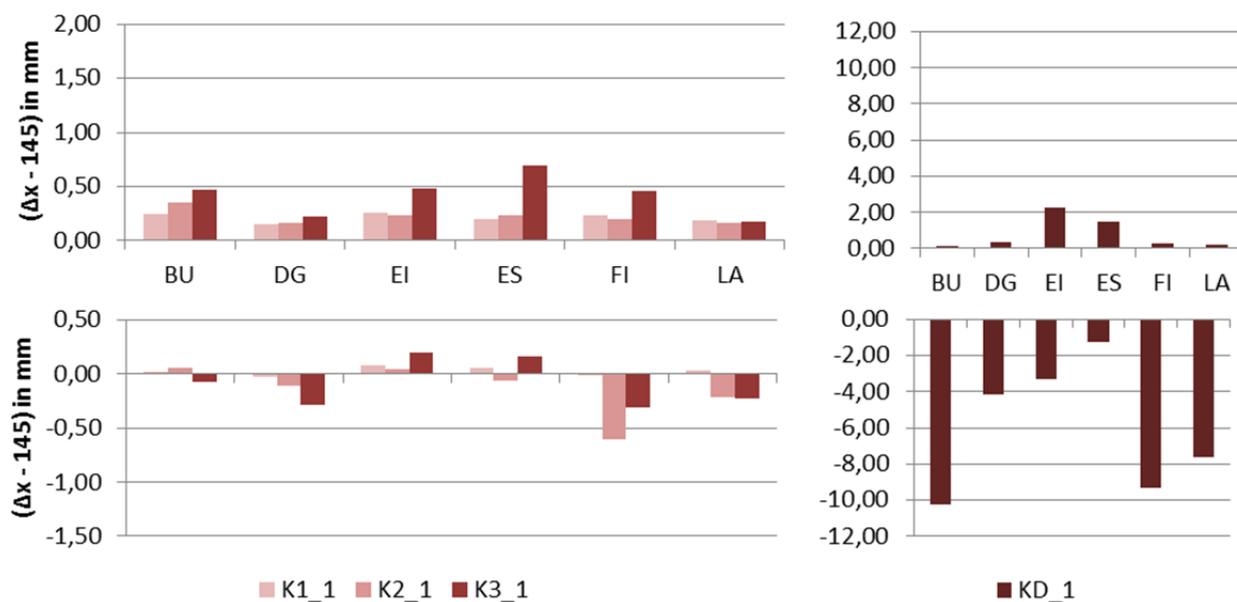


Abbildung 12-5: Abstandsänderung Δx zum Referenzabstand 145,0 mm. Maximalwerte während, oben, und Minimalwerte nach 24 h Trocknung, unten. Prüfkörper der Klimafolgen K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts, bestehend aus einer Lamelle.



Abbildung 12-6: Abstandsänderung Δx zum Referenzabstand 145,0 mm. Maximalwerte während, oben, und Minimalwerte nach 24 h Trocknung, unten. Prüfkörper der Klimafolgen K1, K2 und K3, links, sowie KD, rechts, bestehend aus zwei Lamellen.

Tabelle 12-11: Minimale und maximale Dehnungswerte über alle Zeitstufen des gesamten optischen Messbereichs und Angabe der zugehörigen Holzart. Angegeben sind gefilterte Werte.

Versuchsreihe	Holzart/Dehnung in %								Holzart/Verzerrung $\epsilon_{xy} \cdot 10^2$	
	Stauchung ϵ_x		Streckung ϵ_x		Stauchung ϵ_y		Streckung ϵ_y		minimal	maximal
	minimal	maximal	minimal	maximal	minimal	maximal	minimal	maximal		
K1 1	LA -1,3	BU -2,6	FI 0,6	EI 3,3	BU -1,2	EI -4,4	FI 0,8	DG 4,7	BU 0,8	EI 4,2
K1 2	ES -2,3	BU -3,4	EI 0,7	DG 1,6	EI -1,2	DG -3,3	ES 1,1	LA 4,7	ES 0,9	DG 2,4
K2 1	EI -1,8	FI -5,6	LA 0,8	ES 1,9	LA -2,2	EI -5,6	EI 0,6	ES 6,6	LA 1,1	FI 5,7
K2 2	DG -3,4	BU -5,3	EI 0,5	LA 3,5	EI -1,8	DG -3,7	FI 0,4	BU 7,2	EI 1,1	BU 5,1
K3 1	EI -3,2	BU -7,1	LA 0,9	FI 2,1	LA -2,7	ES -6,6	LA 1,8	EI 7,3	BU 1,8	EI 3,4
K3 2	EI -4,1	BU -6,7	FI 0,9	BU 4,1	ES -3,2	LA -8,9	ES 0,6	DG 4,9	EI 1,1	LA 4,1
KD 1	DG -8,9	BU -14,2	FI 6,9	EI 16,4	BU -7,5	FI -15,0	ES 3,5	EI 12,2	ES 4,5	BU 8,4
KD 2	ES -7,8	BU -17,4	LA 10,7	FI 17,6	ES -7,6	FI -15,0	ES 3,2	DG 11,9	ES 5,3	FI 10,7

12.3 Anhang zur Bestimmung der Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten

Beispiel für eine Eingabedatei zur Bestimmung der Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten mit dem Programm Maple und dem Lösungsansatz p/\bar{U} für die Klimafolgen K1, K2 und K3, Klimafolge KD analog:

```
> restart; # Grundgleichung p/Ü nach Newman, Desorption, parabelförmige
Anfangsverteilung
> #kernelopts (maxdigits);
> #interface (displayprecision = -1): #Voreingestellter Wert: -1
> dgts:=11:
> sizetxt:=18:
sizesymb:=14:
> Digits:=dgts: #Voreingestellter Wert: 10
> cE:=(3*cm-3*c1)/(2*cm-3*c1+ca):
cEp:=(3*cm-3*ca)/(2*cm-3*c1+ca):
> aT:=1: #Anfangszeitpunkt
> zT:=29: #Zeitschritte
zT2:=zT-aT+1:
> T_txt:=readdata(`q:\\Excel\\t.txt`, 1);
HF_MW:=readdata(`q:\\Excel\\mw.txt`, 1);
HF[1]:=readdata(`q:\\Excel\\p1.txt`, 1);
HF[2]:=readdata(`q:\\Excel\\p2.txt`, 1);
HF[3]:=readdata(`q:\\Excel\\p3.txt`, 1);
HF[4]:=readdata(`q:\\ Excel \\p4.txt`, 1);
HF[5]:=HF[3]: # Versuchsreihe K1-K3
HF[6]:=HF[2]: # Versuchsreihe K1-K3
HF[7]:=HF[1]: # Versuchsreihe K1-K3
> c1:=HF_MW[zT+1]; # Ausgleichsfeuchte
> cm:=HF[4][aT]: # Holzfeuchte in PK-Mitte, Versuchsreihe K1-K3
> a:=(0.5*150): # Versuchsreihe K1-K3
zX:=7: # Versuchsreihe K1-K3
X_dat:=[-45,-30,-15,0,15,30,45]: # x-Koordinate Messstellen, Versuchsreihe K1-K3
> minut:=24*60: # Eingabe Zeit in Tage/Ausgabe in Minuten, Versuchsreihe K1-K3
T_dat:=T_txt*minut:
> w0:=HF_MW[aT]: # MW-Holzfeuchte zum Zeitpunkt t=0
ca:=3*w0-2*cm; # Holzfeuchte am Rand zum Zeitpunkt t=0
> W_dat:= seq((HF_MW[i]-c1)/(w0-c1), i = aT .. zT); # Verhältniswert E, bezogene
Holzfeuchte
T_dat:=seq(T_dat[i]-T_dat[aT], i = aT..zT);
M_T_dat:= [seq([T_dat[i], W_dat[i]], i = 1 .. zT2)];
> HF_dat:= [seq([seq(HF[i][j], i=1..zX), j=aT..zT]):
HF_X_dat:= seq([seq([X_dat[i], HF_dat[j][i]], i=1..zX), j=1..zT2):
> w_int:=evalf((3-sqrt(5))/2): # Intervallschachtelung, goldener Schnitt
> zsum:=9: # Anzahl Reihenglieder
> initv:=0.001:
> h_it[1][1]:=0.00001: # Vorgabe Verhältniswerte h für ersten Iterationsschritt
h_it[2][1]:=h_it[1][1]+1*10^3:
h_it[3][1]:=h_it[1][1]+1:
h_it[4][1]:=h_it[3][1]+w_int*(h_it[2][1]-h_it[3][1]):
> with(Statistics):
> g:=1:
for i from 1 to 4
do
for j from 1 to zsum
do
beta[j]:=fsolve(cot(beta)=beta/(h_it[i][g]*a),beta,beta=(j-1)*Pi..j*Pi): #
Bestimmung der beta-Werte
```

```

end do:
k:='k': # Diffusionskoeffizient D
theta:='theta': # Zeit t
tau:=k*theta/a^2: # dimensionslose Zeit
E:=sum(2*exp(-
(tau)*beta[n]^2)*(h_it[i][g]*a)^2/(beta[n]^2*((h_it[i][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[i]
[g]*a)),n=1..zsum):
Ep:=sum(2*exp(-
(tau)*beta[n]^2)*(h_it[i][g]*a*(2*beta[n]^2+h_it[i][g]*a*beta[n]^2-
2*h_it[i][g]*a)/(beta[n]^4*((h_it[i][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[i][g]*a))),n=1..zsum
):
W:=cE*E-cEp*Ep: # Lösungsansatz p/Ü der Diffusionsdifferentialgleichung nach
Newman
s1:= Fit(W, M_T_dat,theta,initialvalues=[k=initv],output=solutionmodule); #
Bestimmung des Diffusionskoeffizienten
PA:=s1:-Results(parametervector);
k:=PA[1];
k_contr[g]:=k;
W_calc:=evalf([seq(subs(theta=T_dat[r],W), r = 1 .. zT2)]); # Rechenwert
unabhängig von Ortskoordinate
SF_W[i][g]:=sum((W_calc[m]-W_dat[m])^2,m=1 .. zT2); # Fehlerwert unabhängig von
Ortskoordinate, Methode der kleinsten Quadrate
end do:
A[n]:=h_it[4][g]*a/(((h_it[4][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[4][g]*a)*cos(beta[n]]):
B[n]:=((2*beta[n]^2+h_it[4][g]*a*beta[n]^2-
2*h_it[4][g]*a)/(beta[n]^2*((h_it[4][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[4][g]*a)*cos(beta[n]
))):
c:=c1+(cm-c1)*sum(2*exp(-
(k*theta/a^2)*beta[n]^2)*A[n]*cos(beta[n]*x/a),n=1..zsum)-(cm-ca)*sum(2*exp(-
(k*theta/a^2)*beta[n]^2)*B[n]*cos(beta[n]*x/a),n=1..zsum):
HF_calc:= [seq([seq(evalf(subs(x=X_dat[o],theta=T_dat[m],c)),o=1..zX)],m=1..zT2)]
:
SD_T_HFp[g]:= [seq(add(abs(HF_calc[m][o]-HF_dat[m][o]),o=1..zX)/zX,m=1..zT2)]: #
MW Differenz HF Rechenwert-Messpunkt je Zeitschritt
SD_HFp[g]:=add(SD_T_HFp[g][m],m=1..zT2)/zT2: # MW Differenz HF Rechenwert-
Messpunkt alle Zeitschritte
SD_HFm[g]:=add(abs((W_calc[m]*(w0-c1)+c1)-(W_dat[m]*(w0-c1)+c1)),m=1 ..
zT2)/zT2: # MW Differenz HF Rechenwert-Masse/Darrgewicht alle Zeitschritte,
Rechenwert unabhängig von HF-Messpunkten
> ziter:=100: # Iteration
> for g from 2 to ziter
do
if SF_W[3][g-1]>SF_W[4][g-1] then
h_it[1][g]:=h_it[3][g-1];
h_it[2][g]:=h_it[2][g-1];
SF_W[1][g]:=SF_W[3][g-1];
SF_W[2][g]:=SF_W[2][g-1];
if (h_it[4][g-1]-h_it[3][g-1])>(h_it[2][g-1]-h_it[4][g-1]) then
h_it[4][g]:=h_it[4][g-1];
SF_W[4][g]:=SF_W[4][g-1];
h_it[3][g]:=h_it[3][g-1]+w_int*(h_it[4][g-1]-h_it[3][g-1]);
s:=3;
else
h_it[3][g]:=h_it[4][g-1];
SF_W[3][g]:=SF_W[4][g-1];
h_it[4][g]:=h_it[4][g-1]+w_int*(h_it[2][g-1]-h_it[4][g-1]);
s:=4;
end if;
else
h_it[1][g]:=h_it[1][g-1];
h_it[2][g]:=h_it[4][g-1];

```

```

SF_W[1][g]:=SF_W[1][g-1];
SF_W[2][g]:=SF_W[4][g-1];
  if (h_it[3][g-1]-h_it[1][g-1])>(h_it[4][g-1]-h_it[3][g-1]) then
    h_it[4][g]:=h_it[3][g-1];
    SF_W[4][g]:=SF_W[3][g-1];
    h_it[3][g]:=h_it[1][g-1]+w_int*(h_it[3][g-1]-h_it[1][g-1]);
    s:=3;
  else
    h_it[3][g]:=h_it[3][g-1];
    SF_W[3][g]:=SF_W[3][g-1];
    h_it[4][g]:=h_it[3][g-1]+w_int*(h_it[4][g-1]-h_it[3][g-1]);
    s:=4;
  end if;
end if;
s_contr[g]:=s:
  for j from 1 to zsum
  do
    beta[j]:=fsolve(cot(beta)=beta/(h_it[s][g]*a),beta,beta=(j-1)*Pi..j*Pi);
  end do;
k:='k':
theta:='theta':
tau:=k*theta/a^2:
E:=sum(2*exp(-
(tau)*beta[n]^2)*(h_it[s][g]*a)^2/(beta[n]^2*((h_it[s][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[s]
[g]*a)),n=1..zsum);
Ep:=sum(2*exp(-
(tau)*beta[n]^2)*(h_it[s][g]*a*(2*beta[n]^2+h_it[s][g]*a*beta[n]^2-
2*h_it[s][g]*a)/(beta[n]^4*((h_it[s][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[s][g]*a))),n=1..zsum
);
W:=cE*E-cEp*Ep;
s1:= Fit(W, M_T_dat,theta,initialvalues=[k=initv],output=solutionmodule);
PA:=s1:-Results(parametervector);
k:=PA[1];
k_contr[g]:=k;
A[n]:=h_it[s][g]*a/(((h_it[s][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[s][g]*a)*cos(beta[n])):
B[n]:=(2*beta[n]^2+h_it[s][g]*a*beta[n]^2-
2*h_it[s][g]*a)/(beta[n]^2*((h_it[s][g]*a)^2+beta[n]^2+h_it[s][g]*a)*cos(beta[n]
)):
c:=c1+(cm-c1)*sum(2*exp(-
(k*theta/a^2)*beta[n]^2)*A[n]*cos(beta[n]*x/a),n=1..zsum)-(cm-ca)*sum(2*exp(-
(k*theta/a^2)*beta[n]^2)*B[n]*cos(beta[n]*x/a),n=1..zsum):
HF_calc:=[seq([seq(evalf(subs(x=X_dat[i],theta=T_dat[j],c)),i=1..zX)],j=1..zT2)]
:
SD_T_HFp[g]:=[seq(add(abs(HF_calc[m][o]-HF_dat[m][o]),o=1..zX)/zX,m=1..zT2)]:
SD_HFp[g]:=add(SD_T_HFp[g][m],m=1..zT2)/zT2:
W_calc:=evalf([seq(subs(theta=T_dat[r],W), r = 1 .. zT2)]):
SF_W[s][g]:=sum((W_calc[m]-W_dat[m])^2,m=1 .. zT2);
SD_HFm[g]:=add(abs((W_calc[m]*(w0-c1)+c1)-(W_dat[m]*(w0-c1)+c1)),m=1 ..
zT2)/zT2;
if h_it[4][g]-h_it[3][g]<10^(-5) then # SF_W nicht als Grenze verwenden!
gziter:=g;
g:=ziter;
else
gziter:=ziter;
end if;
end do:

```

```
> #-----Ergebniskontrolle/Graphiken/Ergebnisausgabe-----  
  
...  
  
> ziter:=gziter;  
> seq(k_contr[j],j=1..ziter);  
> gryo:=max(seq(seq(SF_W[i][j],i=1..4),j=1..ziter));  
gryu:=min(seq(seq(SF_W[i][j],i=1..4),j=1..ziter));  
> with (plots):  
plotsetup(default);  
plot([seq([seq([h_it[i][j],SF_W[i][j]],i=1..4)],j=1..ziter)],style=point,symbol=  
circle,symbolsize = sizesymb,view=[h_it[1][1]..h_it[2][1], gryo..gryu],labels =  
["h = S /  
D","S(E)"],labeldirections=["horizontal","vertical"],labelfont=[default,sizetxt]  
,axesfont=[default,default,sizetxt]);  
  
...  
  
h:=h_it[s][ziter];  
M:=h*k:  
Dk:=[k]; # Diffusionskoeffizient D  
h:=[h];  
S:=[M]; # Oberflächenemissionskoeffizient S  
  
...  
  
writedata(`q:\\...\\D.txt`, Dk);  
writedata(`q:\\...\\h.txt`, h);  
writedata(`q:\\...\\S.txt`, S);  
  
...  
  
theta:='theta':  
plotsetup(bmp, plotoutput = `q:\\...\\plot1.bmp`);  
with(plots): display(p2, p1);  
  
...
```

12.4 Anhang zu den Finite-Elemente-Berechnungen

Tabelle 12-12: Prinzipielle Übersicht zu den Finite-Elemente-Systemen.

Holzart	Klima- folge	Zweck	Zeitpunkte Auswertung	Koordinatensystem	Feuchtetransport- koeffizienten *)
BU, DG, EI, ES, FI, LA	K2, K3, KD	Validierung FEM anhand Holzfeuchte/Versuchsreihe "Sorptions/Desorption"	Versuchsreihe "Sorptions/Desorption"	einheitlich gewählter Koordinatenursprung	Serie I
					Serie II
		Validierung FEM anhand Deformation/Versuchsreihe "optische Messungen"	Versuchsreihe "optische Messungen"	analog Prüfkörper Versuchsreihe "optische Messungen"	Serie I
					Serie II
		Vergleich der Holzarten anhand berechneter Spannungen	Versuchsreihe "optische Messungen"	einheitlich gewählter Koordinatenursprung	Serie I
					Serie II

*) siehe Versuchsreihe "Sorptions/Desorption" und "Bestimmung der Diffusions- und Oberflächenemissionskoeffizienten" - Regressionskurve 'p/U'

Tabelle 12-13: Lage des Ursprungs des lokalen im globalen Koordinatensystem bei Prüfkörpern aus einer Lamelle für den Vergleich mit der Versuchsreihe „optische Messungen“, in mm.

Klimafolge	Achs- richtung	Ursprung lokales Koordinatensystem, in mm					
		BU	DG	EI	ES	FI	LA
K2	x	-1	-1	18	82	6	-1
	y	-102	-66	-184	-138	-50	-58
K3	x	8	-4	21	32	5	-1
	y	-92	-64	-129	-117	-53	-50
KD	x	1	-5	20	19	-11	-8
	y	-183	-63	-183	-142	-52	-50

Tabelle 12-14: Lage des Ursprungs des lokalen im globalen Koordinatensystem bei Prüfkörpern aus zwei Lamellen für den Vergleich mit der Versuchsreihe „optische Messungen“, in mm.

Klimafolge	Lamelle	Achs- richtung	Ursprung lokales Koordinatensystem, in mm					
			BU	DG	EI	ES	FI	LA
K2	unten	x	16	8	-12	6	30	4
		y	-118	-87	-176	-146	-58	-65
	oben	x	-14	1	-11	-5	-23	-16
		y	-91	-46	-178	-106	-32	-31
K3	unten	x	-11	-11	-15	-12	26	4
		y	-118	-83	-203	-139	-60	-63
	oben	x	12	0	-6	3	-23	-11
		y	-96	-40	-166	-91	-27	-35
KD	unten	x	-17	-9	-16	-6	-28	-7
		y	-124	-89	-230	-137	-61	-70
	oben	x	14	-1	0	6	24	18
		y	-99	-52	-135	-103	-27	-27

Tabelle 12-15: Lage des Ursprungs des lokalen im globalen Koordinatensystem bei Prüfkörpern aus zwei Lamellen für den Vergleich Spannungen der Hölzer, in mm.

Klimafolge	Lamelle	Achs- richtung	Ursprung lokales Koordinatensystem, in mm					
			BU	DG	EI	ES	FI	LA
K2, K3, KD	unten	x	50					
		y	-100					
	oben	x	-25					
		y	-150					

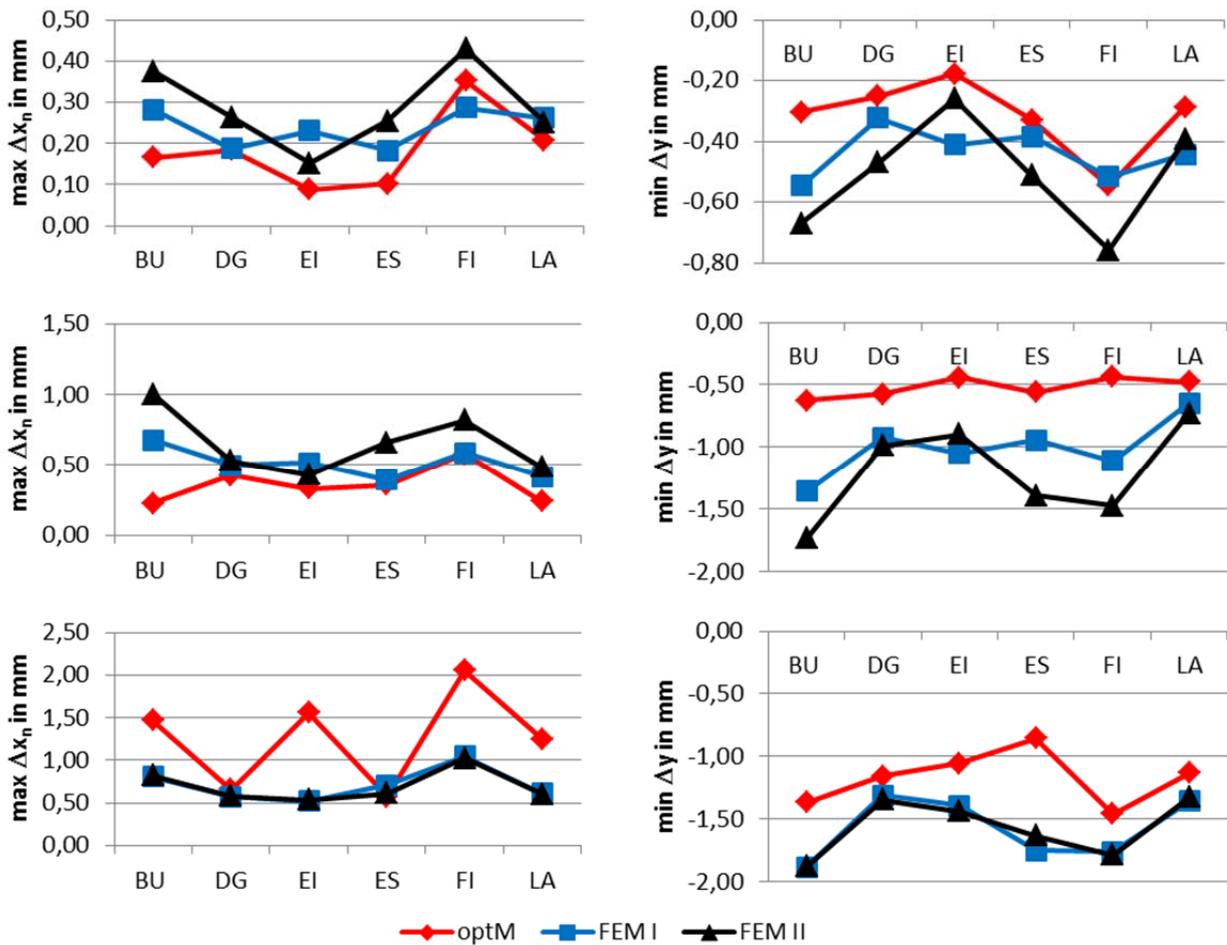


Abbildung 12-7: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$, links, und $\min \Delta y$, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten. Prüfkörper aus einer Lamelle.

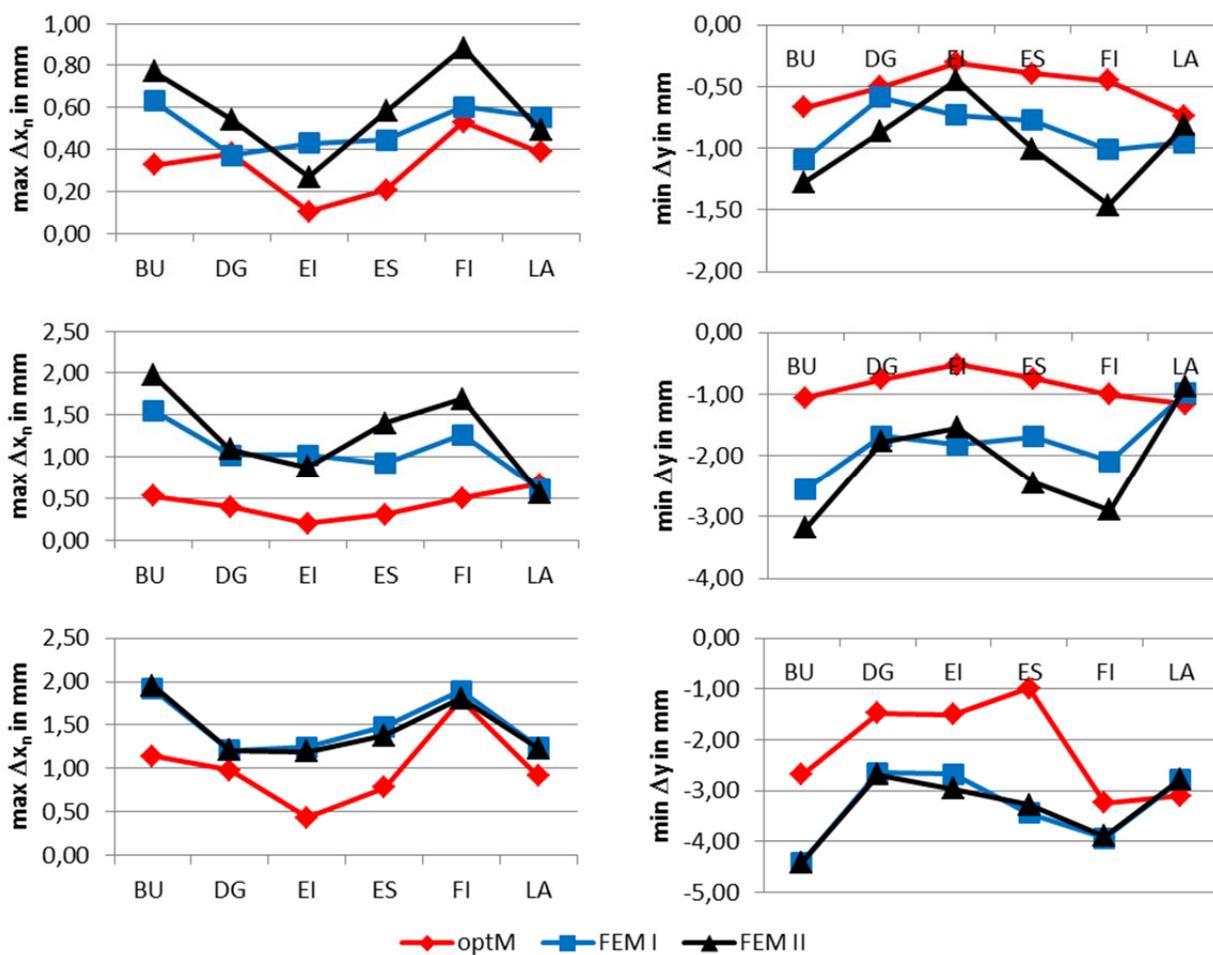


Abbildung 12-8: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x_n$, links, und $\min \Delta y$, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Klimafolge K2, oben, K3, mittig, und KD, unten. Prüfkörper aus zwei Lamellen.

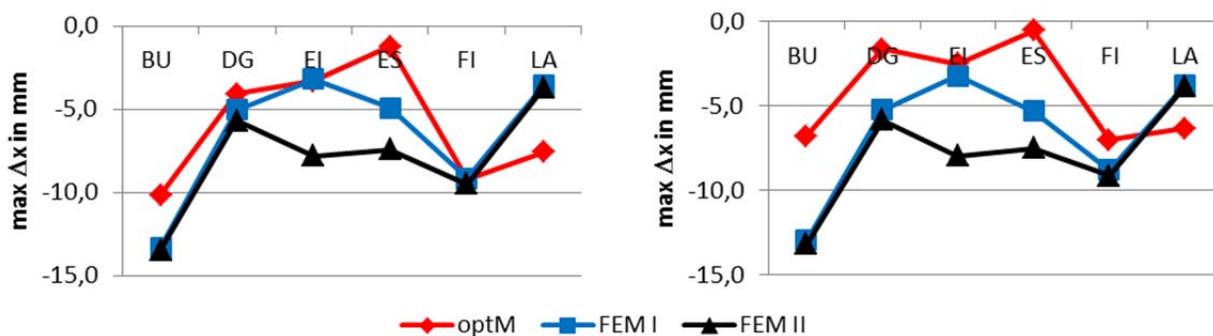


Abbildung 12-9: Höchstwerte der Abstände $\max \Delta x$. Klimafolge KD. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und zwei Lamellen, rechts.

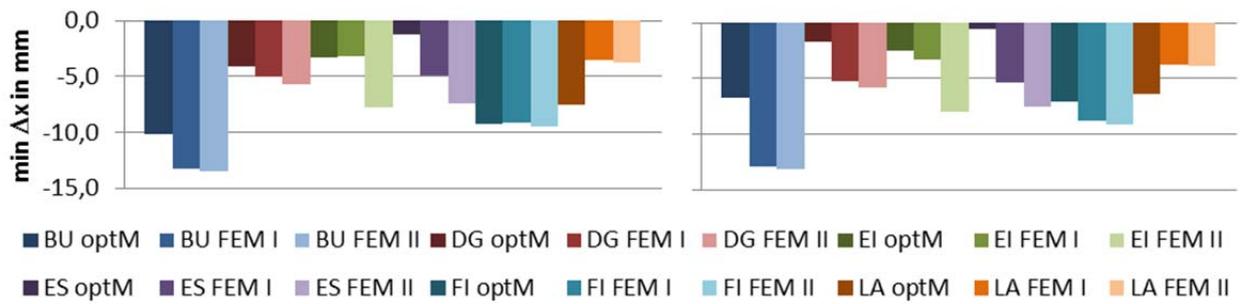


Abbildung 12-10: Höchstwerte der Abstände $\min \Delta x$. Klimafolge KD. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Prüfkörper aus einer Lamelle, links, und aus zwei Lamellen, rechts.

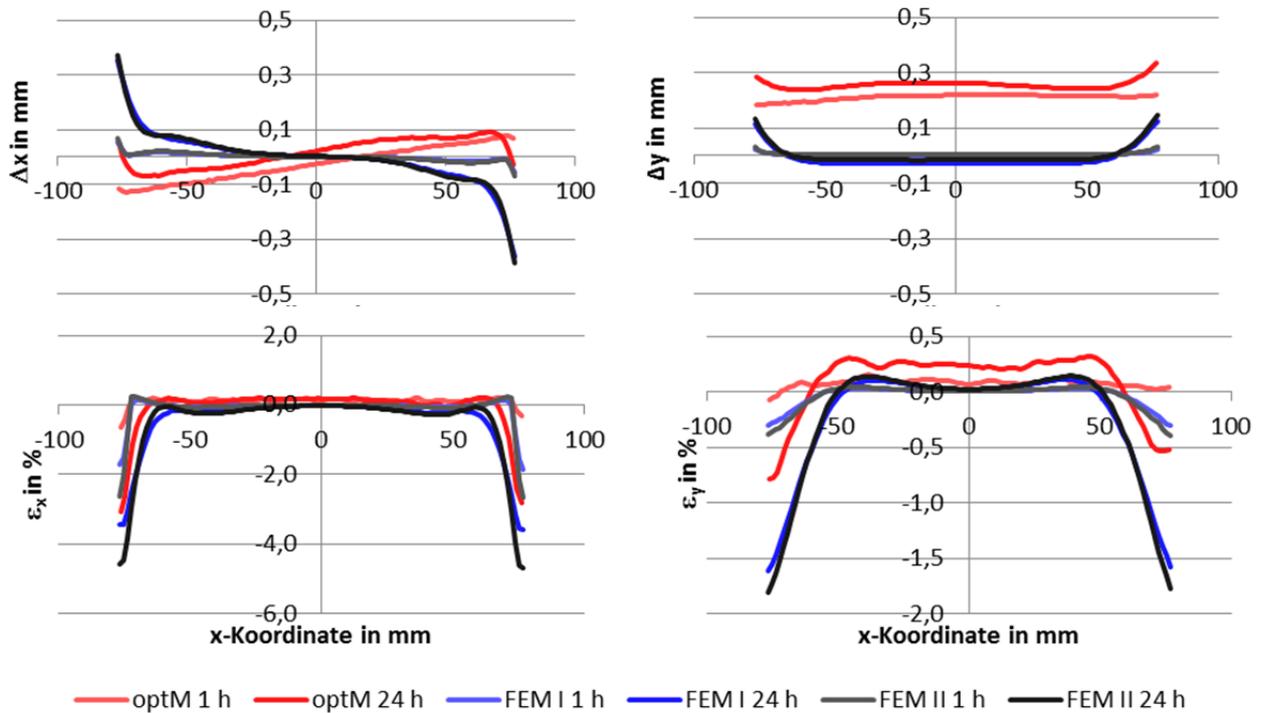


Abbildung 12-11: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Buche, Klimafolge K2, zwei Lamellen.

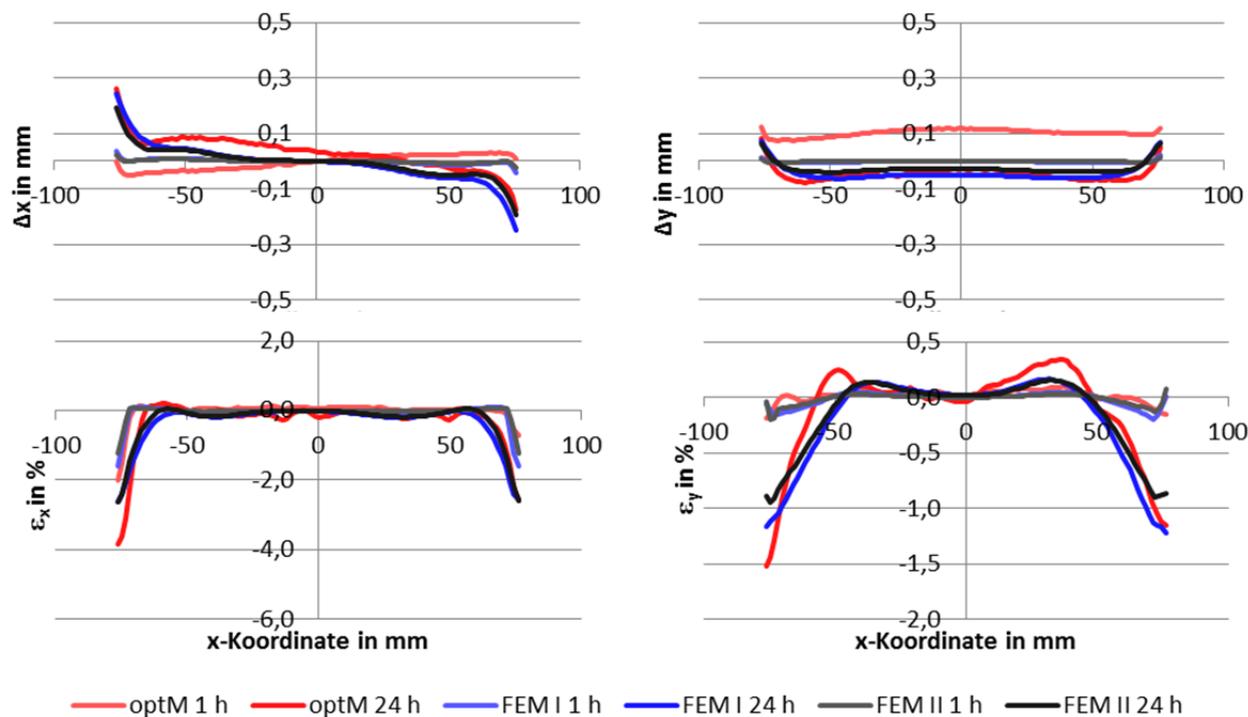


Abbildung 12-12: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Lärche, Klimafolge K2, zwei Lamellen.

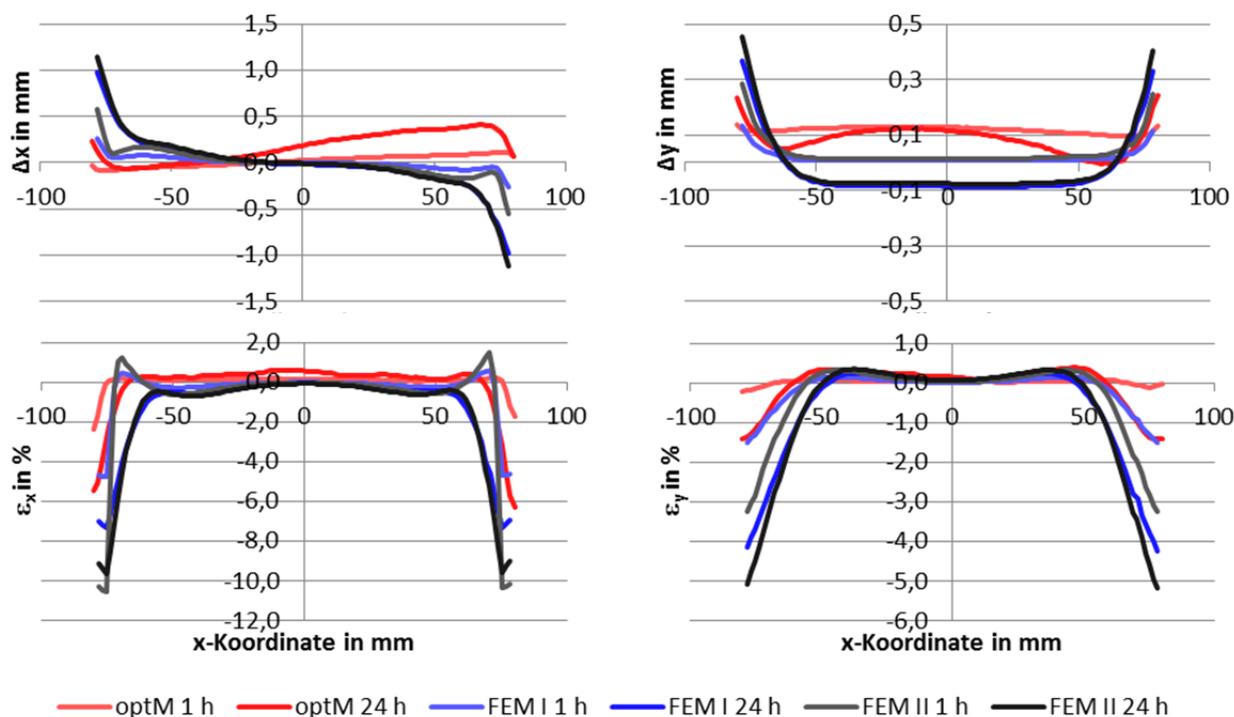


Abbildung 12-13: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Buche, Klimafolge K3, zwei Lamellen.

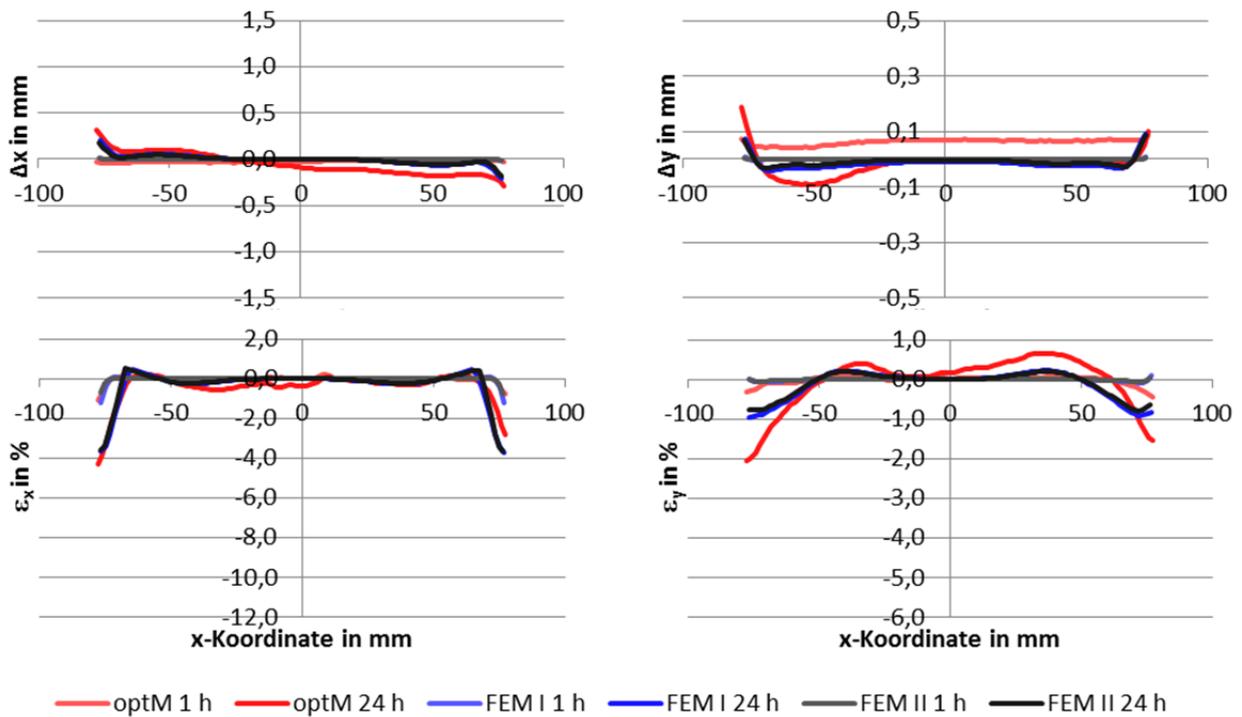


Abbildung 12-14: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Lärche, Klimafolge K3, zwei Lamellen.

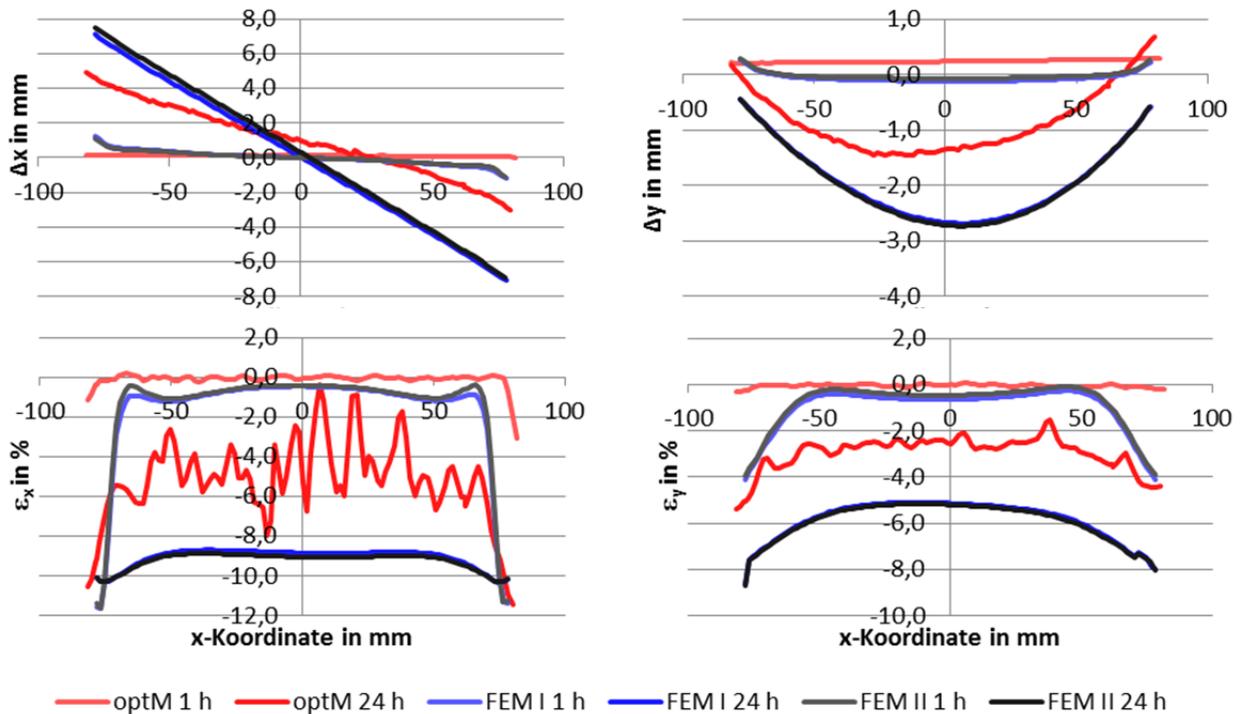


Abbildung 12-15: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Buche, Klimafolge KD, zwei Lamellen.

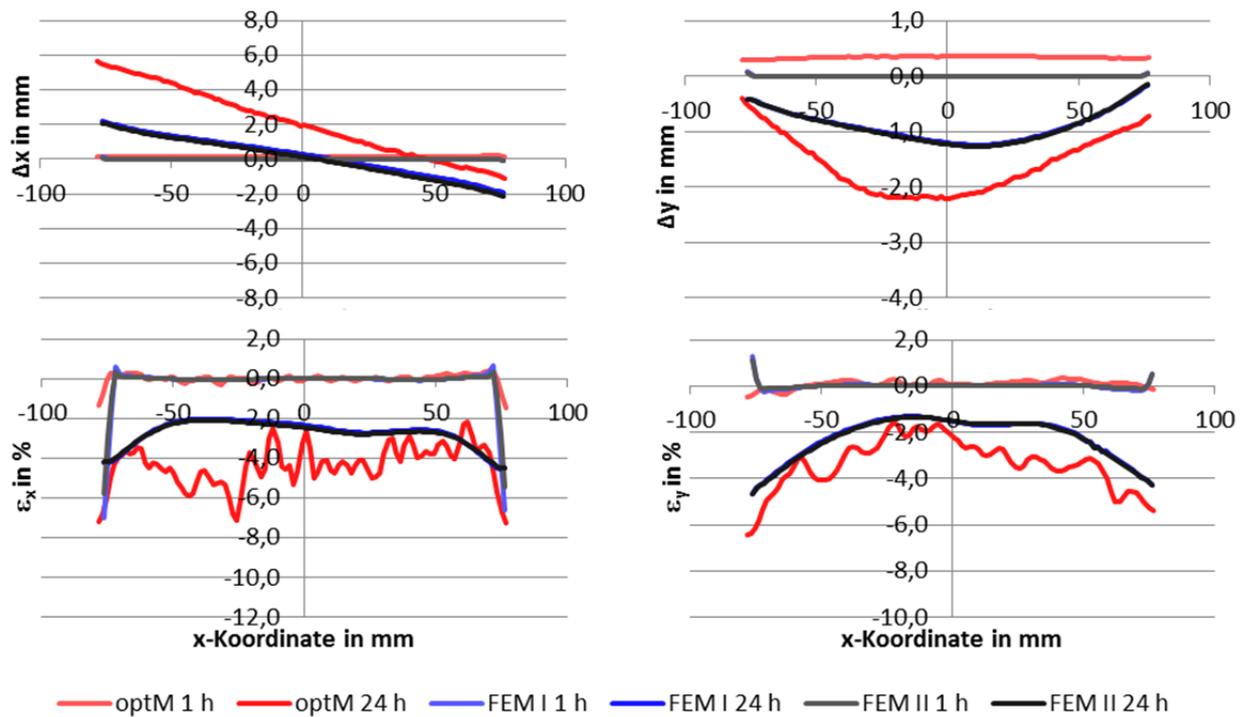


Abbildung 12-16: Änderung der Koordinatenwerte, oben, und der Dehnungen, unten, in x-, links, und y-Richtung, rechts. Ergebnisse der optischen Messungen, optM, und der Finite-Elemente-Methode, FEM, Serie I und II. Schnitt S1, Lärche, Klimafolge KD, zwei Lamellen.