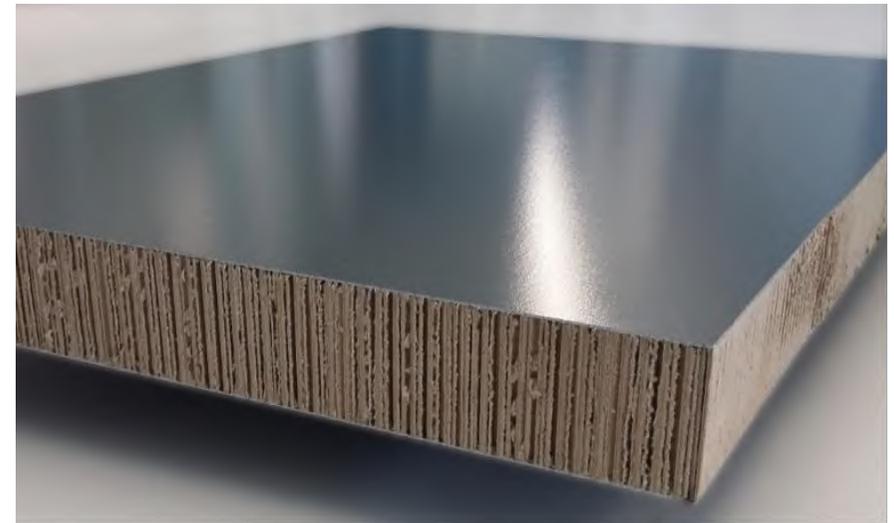


Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Sohnstr. 65
40237 Düsseldorf



fosta@stahlforschung.de
www.stahlforschung.de



Untersuchungen zur Eignung von Wellpappe als ökologisches Kernmaterial für Sandwichelemente

Assessment on the utilization of corrugated
cardboard as an ecological core material for
sandwich panels

Forschung für die Praxis P 1284 / IGF-Nr. 19886 N

Forschungsprojekt P 1284 / IGF-Nr. 19886 N

Untersuchungen zur Eignung von Wellpappe als ökologisches Kernmaterial für Sandwichelemente

Assessment on the utilization of corrugated cardboard as an ecological core material for sandwich panels

**Technische Universität Darmstadt, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik,
Fachgebiet Stahlbau**

Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange

Dipl.-Ing. Aaron von der Heyden

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Dr. Gregor Nüsse

Das IGF-Vorhaben 19886 N der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde vom Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, Technische Universität Darmstadt, durchgeführt.

Beteiligte am Projektbegleitenden Ausschuss:

Aneta Kurpiela Sandwichtechnik, Mainz
ArcelorMittal Construction Deutschland GmbH, Sandersdorf-Brehna
bauart Konstruktions GmbH + Co. KG, Darmstadt
Brucha GmbH, MICHELHAUSEN
Donges SteelTec GmbH, Darmstadt
Dr. Mertens Ingenieure GmbH, Erbach
GOLDBECK Bauelemente Bielefeld SE , Bielefeld
IFBS - Internationaler Verband für den Metalleichtbau, Krefeld
Ingenieur- und Sachverständigenbüro Korff, Kreuztal
Ingenieurbüro Dr. Böttcher & Dr. Schick, Wetter-Amönau
iS-engineering GmbH, Darmstadt
Ludwig Leitermann GmbH & Co. KG, Bad König
Papiertechnische Stiftung (PTS), Heidenau
Sika Deutschland GmbH, Bad Urach
thyssenkrupp Steel Europe AG, Duisburg

© 2021 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Bestell-Nr. P 1284
ISBN 978-3-96780-004-3

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

Kurzdarstellung

In diesem Projekt wurde die Eignung von Wellpappe als alternatives Kernmaterial für Sandwichelemente zur Verkleidung von Dach- und Wandflächen untersucht.

Hierzu wurden die wichtigsten Grundlagen zu Papier und Wellpappe einerseits und zur Sandwichbauweise andererseits zusammengetragen. Darauf aufbauend wurde ein geeignetes Materialmodell gefunden und die elastischen Materialparameter sowie Festigkeiten für insgesamt 10 verschiedene Wellpappensorten bestimmt. Die Versuche zur Bestimmung des elastischen Materialmodells konnten aufgrund der zu geringen Anzahl an Versuchen nicht statistisch ausgewertet werden. Trotz teilweise großer Streuungen ermöglichen die Versuche aber eine grundsätzliche Bewertung des Tragverhaltens von Wellpappe.

In Biegeversuchen an Sandwichproben in Form von Balken und Bauteilen wurde das Verbundtragverhalten für vier ausgewählte Wellpappensorten und drei unterschiedliche Kernausrichtungen untersucht. Der Einfluss der Inhomogenität eines Kerns aus vorgefertigten Lamellen konnte hierbei ebenfalls analysiert werden.

Die Biegeversuche der Elemente mit der schwächsten Kernausrichtung, in der die ebenen Papiere parallel zu den Deckschichten der Bauteile liegen, führten bei Verwendung von hochwertigen Wellpappen zu Trageigenschaften, die mit denen von Sandwichelementen mit herkömmlichen Kernmaterialien vergleichbar sind. Für die Elemente der anderen beiden Kernausrichtungen stehen die ebenen Papiere jeweils in der XZ-Ebene der Sandwichelemente. Diese sorgen für eine derart gute Stützung der Deckschichten gegen Ausweichen aus ihrer Ebene, dass auch Stähle mit Streckgrenzen von bis zu 500 N/mm² bis zum Fließen beansprucht werden können.

Die Elemente der schwächsten Kernausrichtung zeigen ähnlich wie die herkömmlichen Materialien derart große Kriechzahlen, dass eine planmäßige andauernde Belastung von Elementen mit ebenen Deckschichten mit den Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit nicht vereinbar ist. Die anderen Elementtypen zeigten hingegen so kleine zeitabhängige Verformungszuwächse, dass sich für diese Elemente möglicherweise weitere Einsatzgebiete mit planmäßiger Dauerlast erschließen lassen. Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Pappen ergaben, dass in der Kernausrichtung vom untersuchten Typ 1 die besten Wärmedämmeigenschaften vorliegen. Die Dämmfähigkeit liegt nahe bei der von Mineralwollelementen. Bei Elementen von den Typen 2 und 3 ergaben die Messungen für beide Typen ähnliche Wärmeleitfähigkeiten. Diese sind allerdings so hoch, dass der Einsatz dieses Elementtyps für beheizte Wohngebäude baupraktisch kaum umsetzbar wäre.

Untersuchungen zum Feuchteschutz haben gezeigt, dass in einem abgeschlossenen Kern die Bildung von Kondensat nicht auftreten kann. Langzeitexperimente an Bauteilen mit je einer Seitenkante, die nicht geschützt wurde und einer hohen Umgebungsfeuchte ausgesetzt wurden, haben gezeigt, dass Feuchtigkeit aus der Luft langsam in ein Element eindringt. Gegenüber der Umgebung ungeschützte Elementseiten sind daher zu vermeiden.

Abstract

Within the scope of the research project the utilization of corrugated cardboard as an alternative core material for sandwich panels was assessed. On the basis of a literature research the most important basics of paper and corrugated cardboard on the one hand and of sandwich constructions on the other hand were collected. Building on this a viable material model was found and the elastic parameters as well as the strengths for overall ten different types of cardboard were detected.

The experiments for the determination of the elastic material model could not be evaluated statistically due to the small number of tests. Despite partly high deviation of the test results, a fundamental assessment of the bearing behaviour was possible, though.

In bending test on sandwich specimens, the composite bearing behaviour for four selected sorts of corrugated cardboard was investigated for three different core orientations. The influence of the inhomogeneity of the core built up with prefabricated lamellas could be analysed, too.

The panels with the weakest core orientation, in which the flat papers of the corrugated cardboard are parallel to the face sheets, showed a bearing behaviour that was very similar to the behaviour of sandwich panels with common core materials. For the specimens of the other two core orientations the flat papers of the corrugated cardboard are oriented perpendicular to the face sheets. The resulting support of the face sheets against buckling leads to the possibility of utilize the full yield strength of the face sheets. The weakest core orientation leads to creep coefficients that are similar the those of common core materials, which means that permanent loading of this sort of panels is not possible, if flat face sheets are applied. The other two types of panels show very little displacement increments for long term loading, which might lead to other application fields in which the elements are methodically loaded permanently.

Thermal conductivity tests showed that the elements of core type 1 have the best thermal insulation capability. They have slightly higher thermal conductivity coefficients than mineral wools. The stronger types 2 and 3 behave similar and show much higher thermal conductivities than type 1. The application for in residential building would result in exorbitant panel thicknesses. For the energy standard of low heated industrial buildings an application would lead to a core thickness of about 260 mm, which would be technically feasible.

Investigation on the influence of moisture indicated that condense water in a panel, that is shuttered towards the ambient air. Long term experiments o Panels with one open side exposed to high air humidity, showed, that the moisture penetrates inside the element only very slowly but also is considered to continue until equilibrium is reached. Therefore, a sandwich panel with a core of corrugated cardboard should be designed to be shuttered towards the ambient air.

Inhaltsverzeichnis

Content

Inhaltsverzeichnis Content	I
Abbildungsverzeichnis	IV
List of figures	XII
1 Einleitung Introduction	1
1.1 Problemstellung / Problem definition	3
1.2 Motivation / Motivation	4
1.3 Zielsetzung / Objective	5
2 Stand der Technik und Grundlagen State of the Art and Basics	8
2.1 Sandwichbauweise Sandwich Constructions	8
2.1.1 Tragverhalten	9
2.1.2 Versagensmechanismen	11
2.1.3 Deckschichten	14
2.1.4 Kernwerkstoffe	15
2.1.5 Klebstoffe	21
2.1.6 Bauphysik von Sandwichelementen	21
2.2 Papier und Pappe Paper and Board	26
2.2.1 Allgemeines	26
2.2.2 Materialeigenschaften von Papier und Wellpappe	33
2.2.3 Papier und Pappe als Baustoff Paper and Board as a Building Material	45
2.3 Kernausrüstung	50
2.4 Wellpappenprüfung in der Papiertechnik Testing of Corrugated Cardboard in Paper Technology	53
2.4.1 Kantenstauchwiderstand Edge-Crush-Test (ECT)	53
2.4.2 Berstfestigkeit	53
2.4.3 Durchstoßarbeit	54
2.4.4 Biegesteifigkeit	54
2.4.5 Flachstauchwiderstand Flat-crush-test	54
2.4.6 Klassifizierung	54
2.4.7 Flächenbezogene Masse der Einzellagen	55
2.5 Arbeitshypothese Working hypothesis	56
3 Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and Design of Experiments	58
3.1 Bearbeitungsschritte	58

3.1.1	Arbeitspaket 1.....	58
3.1.2	Arbeitspaket 2.....	58
3.1.3	Arbeitspaket 3.....	59
3.1.4	Arbeitspaket 4:.....	59
3.1.5	Arbeitspaket 5.....	61
4	Mechanischer Materialparameter von Wellpappe	63
4.1	Prüfprogramm.....	63
4.1.1	Untersuchte Wellpappensorten	64
4.1.2	Lineare Elastizität und Kurzzeitfestigkeit	65
4.1.3	Kriechversuche.....	67
4.2	Versuchsaufbauten und Probekörperherstellung.....	68
4.2.1	Herstellung des Kernmaterials aus Wellpappe	68
4.2.2	Zuschnitt	70
4.2.3	Klimatisierung	70
4.2.4	Druckversuche.....	71
4.2.5	Zugversuche.....	72
4.2.6	Schubversuche.....	74
4.2.7	Kriechversuche.....	78
4.3	Voruntersuchungen	80
4.3.1	Schubmodul.....	80
4.3.2	Querdehnzahlen	83
4.3.3	Bestimmung eines effektiven E-Moduls.....	88
4.4	Berechnung der Kenngrößen.....	96
4.4.1	Lineare Elastizität und Kurzzeitfestigkeit	96
4.4.2	Kriechfaktoren	98
4.5	Versuchsergebnisse und Versuchsauswertung	99
4.5.1	Lineare Elastizität und Kurzzeitfestigkeit	99
4.5.2	Kriechversuche.....	128
4.5.3	Vergleich der Ergebnisse mit herkömmlichen Materialien	130
4.6	Materialuntersuchungen durch Papierprüfungsinstitut.....	133
4.6.1	Versuchsvorbereitungen und Versuchsdurchführung.....	133
4.6.2	Prüfergebnisse	135
4.6.3	Vergleich der Materialparameter	137
4.7	Zusammenfassung und Bewertung des Materialuntersuchungen	138

5	Bauphysikalische Eigenschaften von Sandwichelementen mit Wellpappenkern	140
5.1	Wärmeschutz	140
5.1.1	Experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	140
5.1.2	s Analytische Untersuchung zu Konvektionsvorgängen in Achse 2 ..	145
5.2	Brandschutz	147
5.2.1	SBI-Versuche	147
5.2.2	Kleinbrennerversuche	149
5.2.3	Vergleich zu herkömmlichen Kernwerkstoffen	151
5.3	Feuchteschutz	151
5.3.1	Kondenswasser im Kern	151
5.3.2	Entwicklung der Feuchtigkeit im Kern	152
6	Tragverhalten von Sandwichelementen mit Wellpappe als Kernmaterial	155
6.1	Prüfprogramm	155
6.2	Versuchsvorbereitungen	159
6.3	Versuchsaufbauten und Versuchsdurchführung.....	162
6.4	Berechnung der Spannungen und Verformungen	166
6.5	Versuchsergebnisse und Versuchsauswertung.....	167
6.5.1	Tragverhalten der Kernanordnung Typ 1	168
6.5.2	Tragverhalten der Kernanordnung Typ 2	173
6.5.3	Tragverhalten der Kernanordnung Typ 3	188
6.6	Zusammenfassung und Interpretation	194
6.6.1	Typ 1 Elemente	194
6.6.2	Typ 2 Elemente	194
6.6.3	Typ 3 Elemente	195
7	Zusammenfassung / Summary	196
8	Ausblick / Perspective.....	200
9	Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project.....	202
10	Literaturverzeichnis.....	203
Anhang A	212
Anhang B – Materialversuche	213
Anhang C – Brandversuche	214

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Sandwichelement unter einachsiger Biegung und Schub, Schnittgrößen und Spannungen sowie vereinfachte Ansätze für Elemente mit ebenen und quasi-ebenen Deckschichten (vgl. KLEIN (2013) und STAMM & WITTE (1974)).....	10
Abbildung 2-2: Typisches Schubversagen eines Sandwichelements in der Seitenansicht, nach DIN EN 14509	12
Abbildung 2-3: Typisches Druckversagen an einem Auflagerpunkt , NELKE (2018).....	12
Abbildung 2-4: Knitter von Sandwichelmenten, hier gedrücktes oberes Deckblech eines Dachelements	13
Abbildung 2-5 Kernbeanspruchung durch Knittern der Deckschicht, Bossel (1962).....	14
Abbildung 2-6: Herstellung von Mineralwolle-Sandwichelementen mit Lamellen (DAVIES 2008)	18
Abbildung 2-7: Gleichmäßige hexagonale Wabenstruktur (GIBSON & ASHBY 1988)	19
Abbildung 2-8: Beispiel für den Aufbau des SBI-Versuchs (Grundriss) für Sandwichelemente aus DIN EN 13823	23
Abbildung 2-9: Elektronenmikroskopaufnahme eines Papierblattes, (SANGL 2013)	27
Abbildung 2-10: Koordinatensystem einer Papierbahn in Anlehnung an GUSTAFSSON & NISKANEN (2012)	28
Abbildung 2-11: Faserausrichtung in einer Papiermaschine, nach Holik.2013.....	29
Abbildung 2-12: Wellpappenarten nach VDW (2019)	30
Abbildung 2-13: Abmessungen der Wellen nach DIN 55468-1.....	30
Abbildung 2-14: Herstellung einseitiger Wellpappe, modifiziert nach MENSING 2013	33
Abbildung 2-15 Herstellung dreiwelliger Wellpappe, basierend auf VDW 2019.....	33
Abbildung 2-16: Sorptionsisothermen von Zellulose, Wink.1961 zitiert nach Haslach, Henry W., JR. (2000)	35

Abbildung 2-17: Spannungskomponenten im dreidimensionalen Spannungszustand, KLEIN 2013	36
Abbildung 2-18: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Papier unter Zug- und Druckbeanspruchungen in MD und CD, in Anlehnung an Fellers.1980	37
Abbildung 2-19: Kathedrale aus Papphülsen in Christchurch (NZL); (www.shigerubanarchitects.com ©Bridgit Anderson)	48
Abbildung 2-20: TorHex - Faltwabe aus Wellpappe, aus PFLUG ET AL. (1999)	49
Abbildung 2-21: Zellstoffverbundelement (Betz Dämmelemente GmbH 2019)	50
Abbildung 2-22: Ausrichtung der Papierbahnen in der Wellpappe und Definition eines Koordinatensystems für Wellpappe	51
Abbildung 2-23: Mögliche Kernausrichtungen, Elementtypen 1 bis 6 (Deckbleche nicht dargestellt, jeweils auf Ober- und Unterseite der Quader)	52
Abbildung 4-1: Untersuchte Wellpappenarten, Wellenteilungen maßstäblich	64
Abbildung 4-2: Leimauftrag zur Verklebung der Wellpappenbögen untereinander	69
Abbildung 4-3: Leimfuge zwischen Wellpappebögen (D - Deckenbahn, W - Wellenbahn)	70
Abbildung 4-4: Furnierpresse zum Verkleben der Wellpappe	70
Abbildung 4-5: Druckversuch Gesamtansicht (a) und Nahaufnahme (b)	72
Abbildung 4-6: Zugversuch in Achse 1: Gesamtansicht (a) und Nahaufnahme (b)....	73
Abbildung 4-7: Zugversuch in Achsen 2 und 3: Probengeometrie (a) und Beispielbild (Achse3) (b)	74
Abbildung 4-8: Schubversuch: Versuchsaufbau aus DIN 53294 (a) und Geometrie (b)	76
Abbildung 4-9: Schubversuch: Versuchsaufbau Nahaufnahme (a) sowie Kraftanteile F_{\perp}	77
Abbildung 4-10: Abhängigkeit des mit dem Versuchsaufbau nach DIN 53294 ermittelten Schubmoduls vom Höhen/Breiten Verhältnis der Probe, HEYDER ET AL. 2002	78
Abbildung 4-11: Kriechversuch: Versuchsaufbau der Proben von VR 1	79
Abbildung 4-12: Kriechversuch: Versuchsaufbau der Proben von VR 3	79
Abbildung 4-13: Schubversuch - Varianten für Schub in Ebene 2-3	81

Abbildung 4-14: Schubversuch: Kernausrichtung in der Proben in den drei Schubebenen	83
Abbildung 4-15: Biegebalken mit bimodularem Materialmodell und zugehörige Spannungsverteilung im Querschnitt.....	90
Abbildung 4-16: Vorgehensweise zur numerischen Bestimmung der Knitterspannung bei bimodularem Materialverhalten – 1. Schritt.....	93
Abbildung 4-17: Vorgehensweise zur numerischen Bestimmung der Knitterspannung bei bimodularem Materialverhalten – 2. Schritt.....	93
Abbildung 4-18: Vorgehensweise zur numerischen Bestimmung der Knitterspannung bei bimodularem Materialverhalten – n. Schritt.....	94
Abbildung 4-19: Ersatz-E-Moduln in Abhängigkeit von E_t / E_c	95
Abbildung 4-20: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Druckversuche in Achse 1 bei Klima 20/65 (VR 4)	101
Abbildung 4-21: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Druckversuche in Achse 2 bei Klima 20/65 (VR 4)	101
Abbildung 4-22: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Druckversuche in Achse 3 bei Klima 20/65 (VR 4)	102
Abbildung 4-23: Kraftfluss durch eine Welle bei Druck in Achse 1	103
Abbildung 4-24: Druck in Achse 1: Mechanismen der Lastübertragung zwischen zwei Wellen (a) und Beispielbild eines Druckversuchs in Achse 1 (b).....	104
Abbildung 4-25: Mögliche Eigenformen eines Liners für Druck in Achse 2 (a) und Achse 3 (b)	107
Abbildung 4-26: Versagensbilder der Druckversuche für Achse 2 (a) und Achse 3 (b)	107
Abbildung 4-27: Druck in Achse 3: Stützung eines imperfekten Liners durch benachbarte Wellenbahnen.....	108
Abbildung 4-28: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Zugversuche in Achse 1 bei Klima 20/65 (VR 4)	111
Abbildung 4-29: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Zugversuche in Achse 2 bei Klima 20/65 (VR 4)	111
Abbildung 4-30: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Zugversuche in Achse 3 bei Klima 20/65 (VR 4)	112

Abbildung 4-31: Zugversuch Versagensbilder: Klebefuge zwischen Welle und Liner (a) sowie Spalten eines Liners und Versagen der Wellen an der Klebefuge (b).....	113
Abbildung 4-32: Zugversuch Versagensbilder: Achse 2 (a) und Achse 3 (b)	115
Abbildung 4-33: Schubspannungs-Scherwinkel-Beziehung der Schubversuche in Ebene 1-2 bei Klima 20/65 (VR 4).....	118
Abbildung 4-34: Schubspannungs-Scherwinkel-Beziehung der Schubversuche in Ebene 2-3 bei Klima 20/65 (VR 4).....	118
Abbildung 4-35: Schubkraftfluss bei Schub in Ebene 1-2 (a) und Ebene 2-3 (b)	119
Abbildung 4-36: Schubversagen in Ebene 1-2, im Versuch (a) und Probekörper aufgetrennt (b) (VR 4)	120
Abbildung 4-37: Schubversagen in Ebene 2-3 von Schrenz (VR 2) (a) und Kraftliner Wellpappe (hier VR 4) (b)	121
Abbildung 4-38: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Druck in Achse 1 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben.....	123
Abbildung 4-39: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Druck in Achse 2 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben.....	123
Abbildung 4-40: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Druck in Achse 3 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben.....	124
Abbildung 4-41: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Zug in Achse 1 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben.....	124
Abbildung 4-42: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts),, bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Zug in Achse 2 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben.....	125
Abbildung 4-43: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts),, bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Zug in Achse 3 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben.....	125

Abbildung 4-44: Schubmoduln (links) und Festigkeiten (rechts),, bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Schub in Ebene 12 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben	126
Abbildung 4-45: Schubmoduln (links) und Festigkeiten (rechts),, bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Schub in Ebene 23 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben	126
Abbildung 4-46: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Zugversuchen in Achse 1 (VR1) für Klimate 20/65 (schwarz), 60/20 (rot), 30/40 (grün) und 10/90 (blau)	128
Abbildung 4-47: Durchbiegung der Typ 2 Proben von VR 3 im Kriechversuch im Klima 20/80.....	129
Abbildung 5-1: Einplattenmessgerät „ λ -Meter EP500e“ zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	141
Abbildung 5-2: Probekörper der Wärmeleitfähigkeitsversuche aller drei Ausrichtungen.....	141
Abbildung 5-3: Wärmedurchgangskoeffizient U in Abhängigkeit der Elementdicke d für herkömmliche Kernwerkstoffe und Wellpappe in den drei Hauptachse (hier R1 bis R3 genannt) sowie ausgewählte Grenzwerte.....	144
Abbildung 5-4: Äquivalenter Röhrendurchmesser für Wellpappe in Abhängigkeit der Wellenhöhe	146
Abbildung 5-5: Versuchsaufbau der SBI-Versuche (Foto: MPA Braunschweig).....	148
Abbildung 5-6: Versuch zur Ausbreitung von Feuchtigkeit aus Umgebungsluft in ein Sandwichelement mit einer offenen Elementseite	153
Abbildung 5-7: Messwerte der relative Luftfeuchte im Kern in Abhängigkeit des Abstands von der offenen Elementaußenkante für Elementtyp 1 im Zeitraum von 0 Tagen bis 43 Tagen.....	153
Abbildung 5-8: Messwerte der relative Luftfeuchte im Kern in Abhängigkeit des Abstands von der offenen Elementaußenkante für Elementtyp 1 im Zeitraum von 0 Tagen bis 43 Tagen.....	154
Abbildung 6-1: Lamellenanordnungen Typ A, Typ B und Typ C, Maße in mm.....	156
Abbildung 6-2: Lamellenanordnung Typ D, Maße in mm	157
Abbildung 6-3: Probenherstellung: Vorgefertigte Wellpappenlamellen auf unterem Deckblech (Hier Elementtyp 2	160

Abbildung 6-4: Zuschnitt der Proben von Versuchsreihe VR 4 mit Hilfe einer Paneelsäge, a) Stirnseite, b) Längsseite (Umkantung der Deckbleche erkennbar).....	161
Abbildung 6-5: Statische Systeme und Schnittgrößen der Biegeversuche, 4-Punkt-Biegung links, 6-Punkt-Biegung rechts	163
Abbildung 6-6: Versuchsaufbauten der Biegeversuche von VR 1 (a,b) und VR 2 (a).....	163
Abbildung 6-7: Versuchsaufbauten der Biegeversuche von VR 3 (a) und VR 4 (b).....	164
Abbildung 6-8: Versuchsaufbauten der Biegeversuche von VR 3 (a) und VR 4 (b).....	164
Abbildung 6-9: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 1	169
Abbildung 6-10: Versagensbilder der Typ 1-Versuche von VR1-T1-1 bis VR-T1-3	170
Abbildung 6-11: Versagen der Typ 1-Versuche von VR1-T1-4 bis VR-T1-6 (hier Probe VR1-T1-6).....	171
Abbildung 6-12: VR3-T1-1: Beule am Stoß der äußeren Lamelle (a) und Knitterfalte im Bereich des Momentenmaximums (b).....	172
Abbildung 6-13: VR3-T1-1 - An Knitterfalte aufgeschnittener Probekörper, Zugversagen der Wellpappe	172
Abbildung 6-14: VR3-T1-2: Knittern zwischen Lasteinleitung und Auflager	173
Abbildung 6-15: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 1, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b)	175
Abbildung 6-16: VR1-T2-2 – Knitterfalte und zahlreiche plastische Beulen in oberer Deckschicht	176
Abbildung 6-17: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 2, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b)	176
Abbildung 6-18: VR2-T2-1: Beulen im oberen Deckblech (a) und Knitterfalte (b)	177
Abbildung 6-19: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 3, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b)	178
Abbildung 6-20: VR3-T2-1: Delamination mit Beule an einer der Elementkanten (a) und Knitterfalte über gesamte Elementbreite (b)	179

Abbildung 6-21: Proben VR3-T2-2 (Vordergrund) und VR3-T2-4 (Hintergrund) mit Knitterfalte und plastischen Beulen in oberem Deckblech	180
Abbildung 6-22: Stahlzugversuche: Drei Proben aus Bauteildeckblechen von Probekörper VR3-T2-1 (repräsentativ für Proben VR3-T2-2 und VR3-T2-4).....	180
Abbildung 6-23: VR1-T2-4: Lamellenstöße jeder zwei Lamelle in Feldmitte; Probe ohne Deckblech (a), Beulen an Lamellenstößen kurz vor dem Versagen (b) und Knitterfalte durch Beulen(c)	181
Abbildung 6-24: Stahlzugversuche: Drei Proben aus Deckblechen von Probekörper VR3-T2-3	182
Abbildung 6-25: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 4, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b).....	182
Abbildung 6-26: VR4-T2-1: Versagen der oberen Deckschicht durch Delamination in Auflagernähe.....	183
Abbildung 6-27: VR4-T2-2: Fotografie während des Versuchs vor dem Versagen .	184
Abbildung 6-28: VR4-T2-2: Versagensbild	184
Abbildung 6-29: VR4-T2-3: Versagensbild	185
Abbildung 6-30: VR4-T2-2: Ablösung des oberen Deckblechs mit Knicken genau oberhalb der Lamellenstöße	186
Abbildung 6-31: VR4-T2-2: Lamellenstöße unterhalb der Knicke im oberen Deckblech.....	186
Abbildung 6-32: VR4-T2-3: Oberes Deckblech nach Versuch aufgebogen; Lamellenstöße und Knicke in oberem Deckblech.....	187
Abbildung 6-33: Schiefstellung des Lasteinleitungsträgers	188
Abbildung 6-34: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 4, Kraft-Weg-Diagramm.....	191
Abbildung 6-35: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 3 der Versuchsreihe VR 1, Darstellung mit bezogenen Größen.....	192
Abbildung 6-36: Versagensbilder Typ 3 Serie VR1-T3-1 bis VR1-T3-3, a) Fließversagen mit anschließendem Knittern, b) Delamination von VR1-T3-3	193
Abbildung 6-37: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Stahl-Zugversuch, a) VR1-T3-4 bis VR1-T3-6; b) VR1-T3-7 bis VR1-T3-10	193
Abbildung 8-1: Kombination der Elementtypen 1 und 2 durch Variation der Kernausrichtung in Elementdickenrichtung	200

Abbildung 8-2: Kombination der Elementtypen 1 und 2 durch Variation der Kernausrichtung in Elementquerrichtung	201
Abbildung A.B-1: Wärmefreisetzungsrates der SBI-Versuche (MPA- Braunschweig)	214
Abbildung A.B-2: Gesamte freigesetzte Energie der SBI-Versuche (MPA- Braunschweig)	214
Abbildung A.B-3: Rauchentwicklungsrates der SBI-Versuche (MPA- Braunschweig)	215
Abbildung A.B-4: Gesamte freigesetzte Rauchmenge der SBI-Versuche (MPA- Braunschweig)	215
Abbildung A.B-5: Feuerwachstumswert $FIGRA_{0,2}$ der SBI-Versuche (MPA- Braunschweig)	216
Abbildung A.B-6: Feuerwachstumswert $FIGRA_{0,4}$ der SBI-Versuche (MPA- Braunschweig)	216
Abbildung A.B-7: Rauchentwicklungswert der SBI-Versuche (MPA- Braunschweig)	217
Abbildung A.D-1: Kraft-Weg-Diagramme der Biegeversuche vom Typ 1	213

List of figures

Figure 2-1: Sandwich panel under uniaxial bending and shear, internal forces and stresses as well as simplification for elements with flat face sheets (see KLEIN (2013) und STAMM & WITTE (1974)).....	10
Figure 2-2: Typical shear failure of a sandwich panel, side view, according DIN EN 14509.....	12
Figure 2-3: Typical compression failure at a support, NELKE (2018).....	12
Figure 2-4: Wrinkling of sandwich panels, here compressed upper face sheet of a roof element.....	13
Figure 2-5: Deformation of the core to elongation, shear deformation and compression due to wrinkling of the face, Bossel (1962).....	14
Figure 2-6: Core assembly of mineral wool sandwich panels (DAVIES 2008).....	18
Figure 2-7: Regular hexagonal Honey comb structure (GIBSON & ASHBY 1988).....	19
Figure 2-8: Example for the SBI-test setup (ground plan) for sandwich panels, taken from DIN EN 13823.....	23
Figure 2-9: Electron microscope picture of a paper sheet, (SANGL 2013).....	27
Figure 2-10: Coordinate system of a paper web, cf. GUSTAFSSON & NISKANEN (2012).....	28
Figure 2-11: Fiber alignment in a paper machine, cg. Holik.2013.....	29
Figure 2-12: Corrugated Cardboard Types according to VDW (2019).....	30
Figure 2-13: Measures of the waves according to DIN 55468-1.....	30
Figure 2-14: Production of single faced corrugated cardboard, MENSING 2013 modified.....	33
Figure 2-15: Production of triple wall corrugated cardboard.....	33
Figure 2-16: Moisture sorption isotherms of cellulose, Wink.1961 cited after Haslach, Henry W., JR. (2000).....	35
Figure 2-17: Stress components in the three dimensional state of stress, KLEIN 2013.....	36
Figure 2-18: Characteristic stress-strain-curve of paper under tension and compression in MD and CD, cf. Fellers.1980.....	37
Figure 2-19: Paper tube cathedral in Christchurch (NZL), (www.shigerubanarchitects.com ©Bridgit Anderson).....	48

Figure 2-20: TorHex – Folded honeycomb, PFLUG ET AL. (1999).....	49
Figure 2-21: Cellulose composite element „Zellstoffverbundelement“ (Betz Dämmelemente GmbH 2019)	50
Figure 2-22: Orientation of the paper webs in corrugated cardboard and definition of a coordinate system for corrugated cardboard	51
Figure 2-23: Possible orientations of the core material, element types 1 to 6 (face sheets not depicted, located on the top and bottom of each cuboid)	52
Figure 4-1: Investigated kinds of corrugated cardboard, wave measures drawn to scale.....	64
Figure 4-2: Glue application for gluing corrugated cardboard	69
Figure 4-3: glued joint between two layers of corrugated cardboard (D - liner, W - fluting)	70
Figure 4-4: veneer press for gluing corrugated cardboard	70
Figure 4-5: Compression test total view (a) and close up (b)	72
Figure 4-6: Tensile test in Axis 1: Total view (a) and close up (b).....	73
Figure 4-7: Tensile test in Axes 2 and 3: Specimen geometry (a) and picture (Axis 3) (b).....	74
Figure 4-8: Shear test: Test setup according to DIN 53294 (a) and geometry (b).....	76
Figure 4-9: Shear test: Test setup close up picture (a) and force components F_{\perp} and F_{\parallel} of a shear specimen (b).....	77
Figure 4-10: Dependence of the calculated shear modulus according to DIN 53294 on the height/width-ratio of the specimen, HEYDER ET AL. 2002	78
Figure 4-11: Creep test: Test setup for the specimens of VR 1.....	79
Figure 4-12: Creep test: Test setup for the specimens of VR 3.....	79
Figure 4-13: Shear test – Variants for shear in plane 2-3.....	81
Figure 4-14: Shear test: Core orientation of the specimens in the three shear planes.....	83
Figure 4-15: Beam with bimodular material model and corresponding stress distribution in the cross-section	90
Figure 4-16: Approach for the numerical determination of the wrinkling stress for bimodular material behavior – 1 st step	93
Figure 4-17: Approach for the numerical determination of the wrinkling stress for bimodular material behavior – 2 nd step.....	93

Figure 4-18: Approach for the numerical determination of the wrinkling stress for bimodular material behavior – n^{th} step	94
Figure 4-19: Substitutive Young's Moduli in dependence of E_t / E_c	95
Figure 4-20: stress-strain-diagram of compression test in axis 1 at climate 20/65 (VR 4)	101
Figure 4-21: stress-strain-diagram of compression test in axis 2 at climate 20/65 (VR 4)	101
Figure 4-22: stress-strain-diagram of compression test in axis 3 at climate 20/65 (VR 4)	102
Figure 4-23: Load path through a flute under compression in axis 1	103
Figure 4-24: Compression in axis 1: Load transfer mechanisms between two flutes (a) and example picture of a compression test in axis 1 (b)	104
Figure 4-25: Possible eigen-modes of a liner for compression in axis 2 (a) and axis 3 (b)	107
Figure 4-26: Pictures at failure of the compression tests for axis 2 (a) and axis 3 (b)	107
Figure 4-27: Compression in axis 3: Supporting of an imperfect liner by the adjacent flutings.....	108
Figure 4-28: stress-strain-diagram of tensile test in axis 1 at climate 20/65 (VR 4)	111
Figure 4-29: stress-strain-diagram of tensile test in axis 2 at climate 20/65 (VR 4)	111
Figure 4-30: stress-strain-diagram of tensile test in axis 3 at climate 20/65 (VR 4)	112
Figure 4-31: Tensile test failure modes: Glue joint between flute and liner (a) and splitting of a liner together with failure of the flute at the glued joint (b)	113
Figure 4-32: Tensile test failure modes: Axis 2 (a) and axis 3 (b)	115
Figure 4-33: Shear stress-shear angle-curve of the shear test in plane 1-2 at climate 20/65 (VR 4)	118
Figure 4-34: Shear stress-shear angle-curve of the shear test in plane 2-3 at climate 20/65 (VR 4)	118
Figure 4-35: Shear force path for shear in plane 1-2 (a) and plane 2-3 (b)	119

Figure 4-36: Shear failure in plane 1-2, during the test (a) and after cutting the specimen (b) (VR 4)	120
Figure 4-37: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	121
Figure 4-38: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	123
Figure 4-39: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	123
Figure 4-40: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	124
Figure 4-41: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	124
Figure 4-42: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	125
Figure 4-43: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	125
Figure 4-44: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	126
Figure 4-45: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)	126
Figure 4-46: Stress-strain-curve of tensile tests in axis 1 (VR 1) for climate 20/65 (black), 60/20 (red), 30/40 (green) und 10/90 (blue)	128
Figure 4-47: Deflection of the type 2 specimens of VR 3 during creep test in climate 20/80	129
Figure 5-1: Thermal conductivity test tool “ λ -Meter EP500e”	141
Figure 5-2: Specimens for the thermal conductivity test of all three orientations.....	141
Figure 5-3: Heat transition coefficient U over the element thickness d for common core materials and corrugated cardboard in the three main axes as well as selected threshold values	144
Figure 5-4: Equivalent cylinder diameter for corrugated cardboard in dependence of the height of the flutings	146
Figure 5-5: Test setup of the SBI-test (photos: MPA-Braunschweig	148

Figure 5-6: Test on the diffusion of moisture from the ambient atmosphere into a sandwich panel with one unprotected element side	153
Figure 5-7: Measurements of the relative humidity in the core in dependence of the distance from the unprotected element side for an element type 1 and a timespan from 0 days to 43 days.....	153
Figure 5-8: Measurements of the relative humidity in the core in dependence of the distance from the unprotected element side for an element type 2 and a timespan from 0 days to 43 days.....	154
Figure 6-1: Order of the lamellas type A, type B and type C, measures in mm	156
Figure 6-2: Order of the lamellas type D, measures in mm	157
Figure 6-3: Specimen manufacturing: prefabricated lamellas of corrugated cardboard on the bottom face sheet (here element type 2)	160
Figure 6-4: Cutting of the specimens of test series VR 4 with a panel saw, front side (a) and longitudinal side (b).....	161
Figure 6-5: Static system and internal forces of the bending test, 4-point-bending left, 6-point-bending right	163
Figure 6-6: Test setup of the bending test of VR 1 (a, b) and VR 2 (a).....	163
Figure 6-7: Test setup of the bending test of VR 3 (a) and VR 4 (b).....	164
Figure 6-8: Test setup of the bending test of VR 3 (a) and VR 4 (b).....	164
Figure 6-9: Diagrams of the bending test of type 1	169
Figure 6-10: Failure of the type 1 specimens of VR1-T1-1 to VR1-T1-3.....	170
Figure 6-11: Failure of the type 1 specimens of VR1-T1-4 to VR1-T1-6.....	171
Figure 6-12: VR3-T1-1: Local buckling half wave at the lamella joint (a) and wrinkling of the face sheet in the area of the maximum bending moment (b).....	172
Figure 6-13: VR3-T1-1 – Cross section at the wrinkling, tensile failure of the corrugated cardboard	172
Figure 6-14: VR3-T1-2: Wrinkling between load application point and support	173
Figure 6-15: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 1, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b).....	175
Figure 6-16: VR1-T2-2 – Wrinkling and numerous plastic buckles in upper face sheet.....	176
Figure 6-17: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 2, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b).....	176

Figure 6-18: VR2-T2-1: Buckles in upper face sheet (a) and wrinkling (b)	177
Figure 6-19: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 3, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b).....	178
Figure 6-20: VR3-T2-1 Delamination with buckle at one side of the element (a) and wrinkling along the whole element width (b)	179
Figure 6-21: Specimens VR3-T2-2 (front) and VR3-T2-4 (back) with wrinkling and plastic buckling in upper face sheet	180
Figure 6-22: Steel tensile tests: three tensile coupons of face sheets of panel VR3-T2-1 (representative for specimens VR3-T2-2 and VR3-T2-4)	180
Figure 6-23: VR1-T2-4: Lamella joints in every second lamella in midspan; specimen without face sheet (a), buckles at the lamella joint shortly before failure (b) and wrinkling through the buckles (c)	181
Figure 6-24: Steel tensile tests: three tensile coupons of face sheets of panel VR3-T2-3.....	182
Figure 6-25: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 4, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b).....	182
Figure 6-26: VR4-T2-1: Failure of the upper face sheet due to delamination close to a support	183
Figure 6-27: VR4-T2-2: Photograph during test before failure	184
Figure 6-28: VR4-T2-2: Failure	184
Figure 6-29: VR4-T2-3: Failure	185
Figure 6-30: VR4-T2-2: Delamination of the upper face sheet with kinks above the lamella joints	186
Figure 6-31: VR4-T2-2: Lamella joint underneath the kinks in the upper face sheet	186
Figure 6-32: VR4-T2-3: Upper face sheet bent up after test; lamella joint and kinks in upper face sheet.....	187
Figure 6-33: Tilt of the load application beam	188
Figure 6-34: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 4, load-deflection-diagram.....	191
Figure 6-35: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 4, illustrated with relative variables.....	192

Figure 6-36: Failure pictures of type 3 elements, series VR1-T3-1 to VR1-T3-3, a) yielding with subsequent wrinkling, b) delamination of VR1-T3-3.....	193
Figure 6-37: Stress-strain-curves of the steel tensile test, a) VR1-T3-4 to VR1- T3-6; b) VR1-T3-7 to VR1-T3-10	193
Figure 8-1: Combination of the element types 1 and 2 by variation of the core orientation along the thickness of the elements.....	200
Figure 8-2: Combination of the element type 1 and 2 by variation of the core orientation along the cross direction of the elements.....	201
Figure A.B-1: Heat release rate of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)	214
Figure A.B-2: Total heat release of the SBI-tests (MPA-Braunschweig).....	214
Figure A.B-3: Smoke production rate of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)	215
Figure A.B-4: Total smoke production of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)	215
Figure A.B-5: Fire growth rate $FIGRA_{0,2}$ of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)	216
Figure A.B-6: Fire growth rate $FIGRA_{0,4}$ of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)	216
Figure A.B-7: Smoke growth rate of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)	217
Figure A.D-1: Load-deflection-curves of the bending test of type 1	213

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Kennwerte herkömmlicher Kernmaterialien.....	20
Tabelle 2-2: Brandschutzklassifizierung nach EN 13501-1 und DIN 4102-2.....	24
Tabelle 2-3: Wellenarten nach DIN 55468-1	31
Tabelle 2-4: Elastizitätskenngrößen von ausgewählten Papieren	39
Tabelle 2-5: Klassifizierung nach DIN 55468-1 (zitiert von VDW 2019)	55
Tabelle 4-1: Untersuchte Wellpappensorten	65
Tabelle 4-2: Versuchsprogramm der Druck-, Zug- und Schubversuche, Anzahl der einzelnen Versuche.....	67
Tabelle 4-3: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Kriechfaktors φ_t	68
Tabelle 4-4: Belastung sowie resultierende Spannungen und Schubverzerrungen der Langzeitversuche.....	80
Tabelle 4-5: Vergleich der tatsächlichen Schubmoduln G mit den Schubmoduln G* nach DIN 53294 mit Hilfe der FEM	82
Tabelle 4-6: Querdehnzahlvariation bei Typ 1 Elementen	86
Tabelle 4-7: Querdehnzahlvariation bei Typ 2 Elementen	87
Tabelle 4-8: Querdehnzahlvariation bei Typ 3 Elementen	88
Tabelle 4-9: Vergleich der Ersatz-E-Moduln.....	95
Tabelle 4-10: Ergebnisse der Druckversuche: E-Moduln bei Klima 20/65	100
Tabelle 4-11: Ergebnisse der Druckversuche: Druckfestigkeit bei Klima 20/65	100
Tabelle 4-12: Ergebnisse der Zugversuche: E-Moduln bei Klima 20/65.....	109
Tabelle 4-13: Ergebnisse der Zugversuche: Zugfestigkeit bei Klima 20/65.....	110
Tabelle 4-14: Ergebnisse der Schubversuche: Schubmoduln und Festigkeiten bei Klima 20/65	117
Tabelle 4-15: Wellpappen-Wassergehalten in unterschiedlichen Klimabedingungen	122
Tabelle 4-16: Ergebnisse der Kriechversuche.....	128
Tabelle 4-17: Gegenüberstellung der mechanischen Materialparameter von Wellpappe mit den Kennwerten herkömmlicher Kernmaterialien	131
Tabelle 4-18: Flächenbezogene Masse der Einzellagen und visuelle Einstufung der Papiere.....	135

Tabelle 4-19: Ergebnisse der Wellpappenprüfungen durch externe Materialprüfanstalt (PTS-Heidenau)	136
Tabelle 4-20: Einstufung nach DIN 55468-1	136
Tabelle 5-1: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsversuche	142
Tabelle 5-2: Grenz-Röhrendurchmesser in Abhängigkeit der Elementdicke D.....	147
Tabelle 5-3: Ergebnisse der SBI-Versuche und Grenzwerte nach DIN EN 13501- 1, von MPA Braunschweig.....	148
Tabelle 5-4: Ergebnisse der Kleinbrennerversuche DIN EN ISO 11925-2, von MPA Braunschweig	150
Tabelle 6-1: Prüfprogramm der Biegeversuche	155
Tabelle 6-2: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 1, 4-Punkt-Biegung.....	158
Tabelle 6-3: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 2, 4-Punkt-Biegung.....	158
Tabelle 6-4: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 3, 4-Punkt-Biegung.....	159
Tabelle 6-5: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 4, 6-Punkt-Biegung.....	159
Tabelle 6-6: Ergebnisse der Biegeversuche: Elementtyp 1	169
Tabelle 6-7: Ergebnisse der Biegeversuche: Elementtyp 2	174
Tabelle 6-8: Ergebnisse der Biegeversuche: Elementtyp 2	188

List of tables

Table 2-1: Properties of common core materials.....	20
Table 2-2: Fire protection classification according to EN 13501-1 and DIN 4102-2.....	24
Table 2-3: Properties of common core materials.....	31
Table 2-4: Elastic properties of selected papers	39
Table 2-5: Classification according to DIN 55468-1 (cited after VDW 2019).....	55
Table 4-1: Investigated kinds of corrugated cardboard	65
Table 4-2: Test program of the compression, tension and shear tests, number of tests	67
Table 4-3: Test program for the investigation of the creep factor φ_t	68
Table 4-4: Load, resulting stresses and shear deformation of the long term tests	80
Table 4-5: Comparison of the true shear modulus with the shear modulus G^* according to DIN 53294 using the finite-element-method	82
Table 4-6: Poisson's ratio variation of type 1 elements	86
Table 4-7: Poisson's ratio variation of type 2 elements	87
Table 4-8: Poisson's ratio variation of type 3 elements	88
Table 4-9: Comparison of the substitutive Young's Moduli.....	95
Table 4-10: Compression test results: Young's moduli at climate 20/65	100
Table 4-11: Compression test results: compression strength at climate 20/65	100
Table 4-12: Tensile test results: Young's moduli at climate 20/65.....	109
Table 4-13: Tensile test results: tensile strength at climate 20/65.....	110
Table 4-14: Shear test results: Shear moduli and shear strengths at climate 20/65.....	117
Table 4-15: Water content of corrugated card boards in different climate conditions.....	122
Table 4-16: Results of the creep tests.....	128
Table 4-17: Summary of the mechanical material parameters of corrugated cardboard with the parameters of common core materials.....	131
Table 4-18: Areal masses and visual classification of the papers	135
Table 4-19: Results of corrugated cardboard test conducted by an external material testing institute (PTS-Heidenau).....	136

Table 4-20: Classification according to DIN 55468-1.....	136
Table 5-1: Properties of common core materials	142
Table 5-2: Threshold cylinder diameter in dependence of the element thickness D.....	147
Table 5-3: Results of the SBI-Tests and threshold values according to DIN EN 13501-1 by MPA Braunschweig	148
Table 5-4: Results of the small burner tests according to DIN EN ISO 11925-2 by MPA Braunschweig	150
Table 6-1: Test program of the bending tests	155
Table 6-2: Test program and specimen dimensions of test series VR 1, 4-point- bending.....	158
Table 6-3: Test program and specimen dimensions of test series VR 2, 4-point- bending.....	158
Table 6-4: Test program and specimen dimensions of test series VR 3, 4-point- bending.....	159
Table 6-5: Test program and specimen dimensions of test series VR 4, 6-point- bending.....	159
Table 6-6: Bending test results: Element type 1	169
Table 6-7: Bending test results: Element type 2	174
Table 6-8: Bending test results: Element type 2	188

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

%	Prozent
°	Grad
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
arcsin	Arcussinusfunktion
arctan	Arcustangensfunktion
b	Blechbreite nach der Umformung
b ₀	(Ausgangs-) Breite des Biegebauteils
b _{außen}	Bogenlänge der Messwerte
b _{innen}	Bogenlänge des die Biegezone beschreibenden Kreises
bzw.	beziehungsweise
C	Werkstoffkonstante in der Gleichung nach Hollomon
ca.	circa
cos	Kosinusfunktion
DIN	Deutsches Institut für Normung
et al.	et alii / et aliae; und andere
etc.	et cetera
h	Bogenhöhe der (vorgekrümmten) Biegeprobe
HV0,05	Härte nach Vickers bei einem Prüfgewicht von 0,05 pond
k	Korrekturbeiwert (k-Wert) bezogen auf ganze Blechdicke
k _{0,5}	Korrekturbeiwert (k-Wert) bezogen auf halbe Blechdicke
k _f	Fließspannung
l ₀	Abgewickelte Länge eines Biegebauteils
l ₁	Schenkellänge 1
l ₂	Schenkellänge 2
l _a	Länge der äußeren Faser
l _{Biegezone}	Länge der Biegezone eines Biegebauteils
l _i	Länge der inneren Faser
l _{mess}	Länge der (vorgekrümmten) Biegeprobe
ln	Logarithmusfunktion
m	Meter
m/min	Meter pro Minute
mm	Millimeter
mm/s	Millimeter pro Sekunde
MPa	Megapascal
N	Verfestigungsexponent

N	Newton
N/mm	Newton pro Millimeter
q	Länge eines Vektors
ρ	Mittelpunktswinkel der Biegeprobe
r_0	Radius der spannungsfreien Faser
R^2	Bestimmtheitsmaß
r_a	Radius der äußeren Faser
R_e	Streckgrenze
r_i	Radius der inneren Faser
$r_{i\text{unkorrigiert}}$	Radius der inneren Faser vor Berücksichtigung des Messkopfdurchmessers
r_k	Radius der Messspitze der Koordinatenmessmaschine
r_m	Radius der geometrisch mittleren Faser
R_m	Zugfestigkeit
r_u	Radius der ungelängten Faser
r_{um}	Radius der ursprünglich mittleren Faser
s	Blechdicke nach der Umformung
s_0	Ausgangsblechdicke
$s_{e\text{außen}}$	Länge der Sekante des Bogens der Übergangszone (außen)
$s_{e\text{innen}}$	Länge der Sekante des Bogens der Übergangszone (innen)
tan	Tangensfunktion
u.a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
w	Gesenkweite
x_s	Abstand der zweiten spannungsfreien Schicht von der äußeren Randschicht
x_u	Abstand des Minimums des Härteverlaufes von der inneren Randfaser
α	Biegewinkel
β	Öffnungswinkel
δ	Koordinate zur Beschreibung der Position einzelner Fasern im Biegequerschnitt [-1,+1]
Δk	Messunsicherheit für k
Δl_1	Messunsicherheit für l_1
Δl_2	Messunsicherheit für l_2
Δr_i	Messunsicherheit für r_i
Δs_0	Messunsicherheit für s_0
$\Delta \alpha$	Messunsicherheit für α
ε_a	Dehnung der äußeren Randfaser

ε_i	Dehnung der inneren Randfaser
ε_ϕ	Dehnung in Umfangsrichtung
η	Grenzwinkel
κ	Krümmung (Verhältnis von Blechdicke zum Radius der mittleren Faser)
π	Kreiszahl
ϕ	Umformgrad

1 Einleitung Introduction

Kurzfassung

Aufgrund der ausgezeichneten Kombination von raumabschließender, wärmedämmender und tragender Funktion werden Stahlsandwichelemente als Dach- und Wandverkleidungen immer häufiger eingesetzt. Die beiden am häufigsten eingesetzten Kernmaterialien PUR und Mineralwolle haben jedoch den Nachteil, dass sie unter ökologischen sowie gesundheitlichen Gesichtspunkten teilweise kritisch zu betrachten sind.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Prüfung eines ökologisch unbedenklichen und zu 100 % recyclebaren Kernmaterials auf der Basis von Wellpappebögen hinsichtlich der Eignung als Kernmaterial für Stahlsandwichelemente.

Wellpappe zeichnet sich neben guten Wärmedämmeigenschaften durch geringe Kosten und durch hohe Tragfähigkeit bei relativ geringem Gewicht aus. Um die Eignung als Kernmaterial für Sandwichelemente zu überprüfen, sind zahlreiche experimentelle sowie numerische Analysen hinsichtlich des mechanischen sowie des bauphysikalischen Verhaltens notwendig. Diese wurden im Rahmen des Projekts durchgeführt. Die Ergebnisse werden die grundsätzliche Eignung von Wellpappe als Kernmaterial klären und Grundlage für weitere Produktentwicklungen darstellen. Langfristig wird die Aufnahme von Wellpappe in die Liste der zugelassenen Dämmkernwerkstoffe der europäischen Sandwichnorm EN 14509 angestrebt.

Mit dem Forschungsprojekt soll ein großer Schritt in Richtung Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit von Stahl-Sandwichelementen möglich gemacht werden, was auch umweltbewusste Bauherren für diese Bauweise begeistern wird. Gelingt es, Stahlsandwichelemente mit Zellulose als Kernmaterial mit vergleichbaren Tragfähigkeiten und Wärmedämmeigenschaften wie bei bestehenden Systemen zu entwickeln, entsteht ein nahezu vollständig recyclebares Bauprodukt, mit dem ganz neue Absatzmärkte erschlossen werden können. Dies kann die Sandwichbauweise am Markt langfristig attraktiv gestalten und so die Marktanteile des Stahlleichtbaus weiter steigern.

Abstract

Due to the excellent combination of weather proof, insulating and structural functions, steel sandwich panels are used as roof and wall cladding more frequently. However, the two most commonly used core materials polyurethane foam and mineral wool have significant disadvantages concerning ecology and health compatibility.

The aim of this research project was the examination of an environmentally safe and recyclable core material based on corrugated cardboard regarding the suitability as a core material for steel sandwich panels.

Corrugated cardboard has not only good thermal insulation properties. It also has a high load capacity by being low-costs and lightweight. To check the suitability as a core material for sandwich panels, numerous experimental and numerical analyzes of the mechanical and the building-physical behavior are necessary. This will be carried out within the framework of the project. The results will clarify the suitability of corrugated cardboard as a core material and constitute a basis for further product design. The long term objective of the project is the acceptance of corrugated cardboard in the list of approved core materials of the European standard EN 14509 for sandwich panels.

With the research project a major step towards environmental sustainability of steel sandwich panels should be made, which will inspire even the environmentally conscious builders of this design. If it is possible to develop steel sandwich elements with a cellulose core material with comparable capacities and thermal properties as in existing systems, there exists an almost fully recyclable construction, which can develop completely new markets. This can make sandwich constructions attractive in the long term and thus, further enhance the market share of lightweight steel constructions.

1.1 Problemstellung / Problem definition

Aufgrund der ausgezeichneten Kombination von raumabschließender, wärmedämmender und tragender Funktion werden Sandwichelemente als Dach- und Wandverkleidungen immer häufiger eingesetzt. Allein in Deutschland werden derzeit jährlich ca. 18 Mio. m² Sandwichelemente eingebaut. Die üblicherweise verwendeten Elemente bestehen aus zwei Metalldeckschichten, die über ein wärmedämmendes Kernmaterial, meistens Polyurethanhartschaum (PUR) oder Mineralwolle (MW), schubsteif miteinander verbunden sind.

Eine ständige Verbesserung in verschiedenen Bereichen, wie z. B. der Verbindungstechnik, den Kernmaterialien, der Geometrie und nicht zuletzt des Designs, macht die Sandwichtechnik zu einer sehr wirtschaftlichen und auch optisch ansprechenden Leichtbauweise, die von einer steigenden Zahl von Bauherren gerne verwendet wird.

Die beiden am häufigsten eingesetzten Kernmaterialien PUR und Mineralwolle haben jedoch Nachteile im Hinblick auf ökologischen und gesundheitlichen Gesichtspunkte.

Bei der Herstellung von Mineralwolle werden sehr große Energiemengen benötigt. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit und der Tragfähigkeit der Mineralwollkernschichten kommen Bindemittel zum Einsatz, die aus Produkten der Erdölindustrie und somit aus nicht nachwachsenden, begrenzt vorhandenen Rohstoffen gewonnen werden. Mineralwolle gibt bei der Verarbeitung dünne Fasern ab, welche mechanische Reizungen der Haut, der Augen und der Atemwege verursachen können. Mineralwolle darf daher nur mit Schutzausrüstung verarbeitet werden und ist auf Deponien der Klasse I und II zu entsorgen. Dies führt zu hohen Entsorgungskosten und Belastungen für die Umwelt.

Die Grundstoffe von Polyurethanhartschaum werden aus Erdöl gewonnen. Eine stoffliche Verwertung von PUR ist zum aktuellen Zeitpunkt weder ökologisch noch ökonomisch vertretbar. Als Entsorgung kommt daher ausschließlich eine kontrollierte Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen in Frage, was zu weiterem CO₂-Ausstoß führt. (vgl. Forum Nachhaltiges Bauen)

1.2 Motivation / Motivation

Um Sandwichelemente auch unter ökologischen Gesichtspunkten und in Fragen der Nachhaltigkeit interessanter zu machen, stellt sich daher die Frage nach einem alternativen Kernmaterial. In den vergangenen Jahren hat sich Zellulosedämmung in Form von Zelluloseflocken als Zwischensparrendämmung oder Dämmstoff für Holzständerwände bereits am Markt durchgesetzt. Im Jahre 2009 wurde das sogenannte „Zellstoffverbundelement“, eine aus Wellpappe bestehende Dämmplatte, mit dem Innovationspreis des Technologiezentrums Würzburg ausgezeichnet (s. DiBt Zellstoffverbundelement (2016a)). Im Gegensatz zu Zelluloseflocken bietet eine solche Dämmplatte aus Wellpappe zusätzlich zu den Dämmeigenschaften eine erhebliche Tragfähigkeit.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts soll die Eignung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente untersucht werden.

Die Vorteile dieses Dämmstoffs sind leicht erkennbar. Wellpappe hat einen natürlichen Ursprung: Holz. Dieses dient als Grundlage für die Herstellung von Papier, das später auch zur Wellpappenproduktion eingesetzt wird. Trotz dieser Herkunft schadet Wellpappe unseren Wäldern nicht, da zur Herstellung von Wellpappenrohmaterial in erster Linie Bruch- und Durchforstungsholz verwendet wird, das bei der notwendigen Pflege in bewirtschafteten Wäldern anfällt. Holz ist zudem ein nachwachsender Rohstoff und bindet während seines Wachstums CO₂ aus der Luft. Werden nach vielfachen Recyclingdurchgängen verbrauchte Papierfasern aus dem Produktionsprozess ausgeschleust, können sie zur Energiegewinnung oder Kompostierung eingesetzt werden. Dabei geben sie genau die Menge CO₂ frei, die zuvor während des Baumwachstums der Atmosphäre entzogen wurde – der Prozess ist also klimaneutral. Zudem wird Wellpappe zu ca. 75 % aus Altpapier hergestellt und fast vollständig in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt (vgl. VDW 2008).

Wellpappe als Ausgangsmaterial ist in großen Mengen sehr günstig herzustellen und stellt damit auch ökonomisch eine interessante Alternative zu den bisher üblichen Kernmaterialien dar.

Untersuchungen an bereits hergestellten Zellstoffelementen zeigen, dass sich die Wärmeleitfähigkeit dieser Platten im Bereich der Werte für Mineralwolle bewegt (s. DiBt Zellstoffverbundelement (2016a)). Somit ist Wellpappe auch hinsichtlich der Wärmedämmung eine gute Alternative.

1.3 Zielsetzung / Objective

Das beantragte Forschungsprojekt stellt die Grundlage für eine wichtige Weiterentwicklung der Sandwichbauweise dar. Es soll damit ein großer Schritt in Richtung Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit von Stahl-Sandwichelementen möglich gemacht werden. Hierdurch sollen weitere Einsatzbereiche für die Sandwichbauweise erschlossen werden.

Die Forschungsergebnisse werden in erster Linie Fortschritte in den Fachgebieten Bauforschung (NB) und Ressourceneffizienz (FD) darstellen. Ein Nebengebiet bildet der Leichtbau (KC). Profitieren werden vor allem KMU im Wirtschaftszweig 41 (Hochbau), sowie im Bereich „Metallerzeugung und -Bearbeitung“ (24). Des Weiteren profitieren neben Prüfeinrichtungen und Gebäudeendnutzern auch Maschinenbauunternehmen (28), da in Zukunft auch die entsprechenden Maschinen für die Herstellung des Wellpappenkerns zu entwickeln sind.

Sandwichelemente werden schon heute häufig als Fassadenelemente im Industriebau eingesetzt. Im Zuge des Klimawandels und begrenzter Erdölvorkommen, welche für die Herstellung von PUR notwendig sind, liegt es nahe, nach ökologisch unbedenklichen Alternativen für das Kernmaterial zu suchen. Wellpappe bietet sich hier aus den zuvor erläuterten Gründen an. Gelingt es, Stahlsandwichelemente mit Zellulose als Kernmaterial mit vergleichbaren Tragfähigkeiten und Wärmedämmeigenschaften wie bei bestehenden Systemen zu entwickeln, entsteht ein nahezu vollständig recyclebares Bauprodukt, mit dem ganz neue Absatzmärkte erschlossen werden können. Dies kann die Sandwichbauweise am Markt langfristig attraktiv gestalten und so die Marktanteile des Stahlleichtbaus weiter steigern.

Profiteure einer Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Sandwichelementkonstruktionen sind neben den Sandwichelementherstellern auch deren Zulieferer und Nachunternehmer, die in der Regel mittelständische Unternehmen sind. Ihre Marktchancen werden deutlich verbessert, da sich durch ökologische Kernmaterialien ihre Zugangsmöglichkeiten zum Markt für den Neubau von Industrie- und Bürogebäuden europaweit verbessern werden.

Sandwichelemente sind aktuell in der Europäischen Produktnorm DIN EN 14509 „Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten – Werkmäßig hergestellte Produkte – Spezifikationen“ (DIN EN 14509) geregelt. Die DIN EN 14509 ist aktuell jedoch auf wenige Kernmaterialien, wie z.B. Polyurethanhartschaum und Mineralwolle beschränkt. Sollten sich die Wellpappenelemente als geeignetes Kernmaterial erweisen, wird eine Aufnahme in die Liste der Dämmkernwerkstoffe der DIN EN 14509 angestrebt.

2 Stand der Technik und Grundlagen State of the Art and Basics

Aufgrund der völlig neuartigen Idee, Wellpappe als Kernmaterial für Sandwich-Fassaden-Elemente zu verwenden, wurde bisher nur wenig an den speziell für die Sandwichbauweise wichtigen Eigenschaften von Wellpappe geforscht.

In Vorversuchen, die bereits an der Forschungsstelle an kleinen Probekörpern durchgeführt wurden, konnten Festigkeiten und Steifigkeiten bestimmt werden. Der Vergleich der Ergebnisse mit den Eigenschaften herkömmlicher Materialien zeigt, dass die hier willkürlich gewählte Wellpappe je nach Ausrichtung gleichwertig bzw. weit überlegen ist. Die Ergebnisse dieser mechanischen Vorversuche sind in HEYDEN ET AL. (2016) und HEYDEN & LANGE (2016) zusammengefasst.

Es gibt jedoch auch Forschungsarbeiten zu verwandten Themengebieten und ausgeführte Bauprojekte, bei denen Produkte aus Papier und Pappe als Baustoffe eingesetzt wurden.

Im Folgenden werden in diesem Kapitel zunächst die für die bessere Nachvollziehbarkeit erforderlichen Grundlagen zu den Themenfeldern der Sandwichbauweise sowie zu Paper und Wellpappe zusammengestellt. Außerdem wird auf die bekannte Forschung und realisierte Projekte eingegangen.

2.1 Sandwichbauweise Sandwich Constructions

Die Sandwichbauweise für Leichtbaukonstruktionen kombiniert verschiedene Materialien in mehreren Schichten, um einen Aufbau mit möglichst großer Tragfähigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht zu erhalten. Diese Bauweise übertrifft alle noch so differenzierten Blechbauweisen hinsichtlich ihrer Eigengewichtsoptimierung (KLEIN 2013). In vielen Bereichen werden sich die Vorteile der Sandwichbauweise zu Nutze gemacht. In der Luft- und Raumfahrt sowie in der Autoindustrie werden Sandwichbauteile bereits seit den 1950er Jahren verwendet (BLECHSCHMIDT 2013a). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Sandwichelemente für das Bauwesen behandelt. Diese Verbundelemente bestehen in der Regel aus zwei dünnen metallenen Deckschichten und einem dazwischenliegenden dicken Kern geringer Dichte, der die beiden Deckschichten schub- und zugfest miteinander verbindet (KLEIN 2013). Im Bauwesen werden Sandwichelemente fast ausschließlich als Gebäudehüllelemente eingesetzt, da sie dazu in der Lage sind alle Aufgaben zum Raumabschluss alleine zu erfüllen. Weiterhin gibt es derzeit bereits den Entwurf einer DIN EN 14509-2, mit deren Einführung die aussteifende Wirkung der Elemente auf einzelne tragende Bauteile, wie z. B. Träger der Unterkonstruktion, in Ansatz gebracht werden darf.

Die Erschließung weiterer Einsatzgebiete von Sandwichelementen im Bauwesen ist Teil einiger Forschungsarbeiten. Von BERNER (2009) wird der Einsatz von Sandwichelementen als Dach- und Wandelemente für kleine und mittlere Gebäude untersucht, wobei teilweise oder vollständig auf Unterkonstruktionen verzichtet werden soll. KUNKEL (2017) untersucht in ihrer Dissertation die Schubfeldwirkung von

Sandwichfassaden und Dächern im Hinblick auf die Aussteifung der gesamten Tragstruktur.

Von SCHÄFER ET AL. (2018), BERNER (2010) und GRIMM & LANGE (2018) liegen Untersuchungen zum Einsatz von gekrümmten Sandwichelementen und Flächen-tragwerken aus Sandwichelementen vor. BERNER ET AL. (2018) untersuchen Sandwich-bauteile mit vorgehängten Fassadenelementen, die neue Gestaltungsmöglichkeiten ergeben. Alle der genannten Forschungsarbeiten führen zu anderen mechanischen Beanspruchungen der Bauteile als für den herkömmlichen Einsatz als selbsttragende Elemente. Im Zuge dieser Arbeit soll hauptsächlich der Einsatz von Wellpappe in Sandwichelementen als selbsttragende Elemente bewertet werden, da diese Verwendung derzeit die größte Marktbedeutung hat.

2.1.1 Tragverhalten

Die Leiteinwirkungen auf Sandwichelemente als Gebäudehüllen sind Wind und Schnee sowie Zwangsbeanspruchungen infolge von Temperaturunterschieden zwischen der Innen- und der Außenseite der Elemente. Die Elemente werden in der Regel einachsig gespannt in Zwei- oder Mehrfeldsystemen montiert. Infolge der genannten Einwirkungen und Lagerungsbedingungen kommt es hauptsächlich zu einachsiger Biegung und der zugehörigen Schubbeanspruchung in den Elementen.

Deckschichten, die eben oder nahezu eben sind, haben gegenüber der Biegesteifigkeit des gesamten Elementes eine vernachlässigbare Eigenbiegesteifigkeit. Biegemomente werden fast ausschließlich über ein Kräftepaar zwischen den im Vergleich zum Kernmaterial sehr dehnsteifen Deckschichten abgetragen. Da der Kern die Deckschichten schubsteif miteinander verbindet und so den inneren Hebelarm zwischen den Deckschichten gewährleistet, wird dieser durch Schubkräfte beansprucht.

Dachbauteile werden mit einer stark profilierten Deckschicht hergestellt, um zeitabhängige Verformungen zu reduzieren. Da herkömmliche Kernmaterialien im Gegensatz zu Stahl auch bei Umgebungstemperatur viskoelastische Materialeigenschaften aufweisen, d. h. zu Kriechen und Relaxation neigen, treten unter Langzeitbeanspruchungen wachsende Verformungen auf. Dachelemente tragen andauernd ihre Eigenlast und zusätzlich Schneelasten über längere Zeiträume. Die starke Profilierung einer Deckschicht erlaubt die Abtragung von Eigengewicht und Teilen der Schneelasten über die Biegetragfähigkeit der profilierten Deckschicht selbst. Bei der Ermittlung von Spannungen und Verformungen dieser Elemente ist die Eigenbiegesteifigkeit der profilierten Deckschicht nicht vernachlässigbar. Zusätzlich wird ein Teil der Schubbeanspruchung von den profilierten Blechen abgetragen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Bauteile mit ebenen oder leicht profiliert Deckschichten betrachtet. Gemäß DIN EN14509 dürfen Bleche, bei denen eine Profilierungstiefe von 5 mm nicht überschritten wird, als leicht profilierte Deckschichten betrachtet werden und als solche wie ebene Deckschichten berechnet werden.

In Abbildung 2-1 werden die auftretenden Verformungen, Spannung und Teilschnittgrößen in den einzelnen Schichten eines auf Biegung und Schub beanspruchten

Sandwichelements dargestellt. Zusätzlich sind die vereinfachten Ansätze für die Spannungsverteilungen und Teilschnittgrößen von Sandwichelementen mit ebenen, dünnen Deckschichten abgebildet.

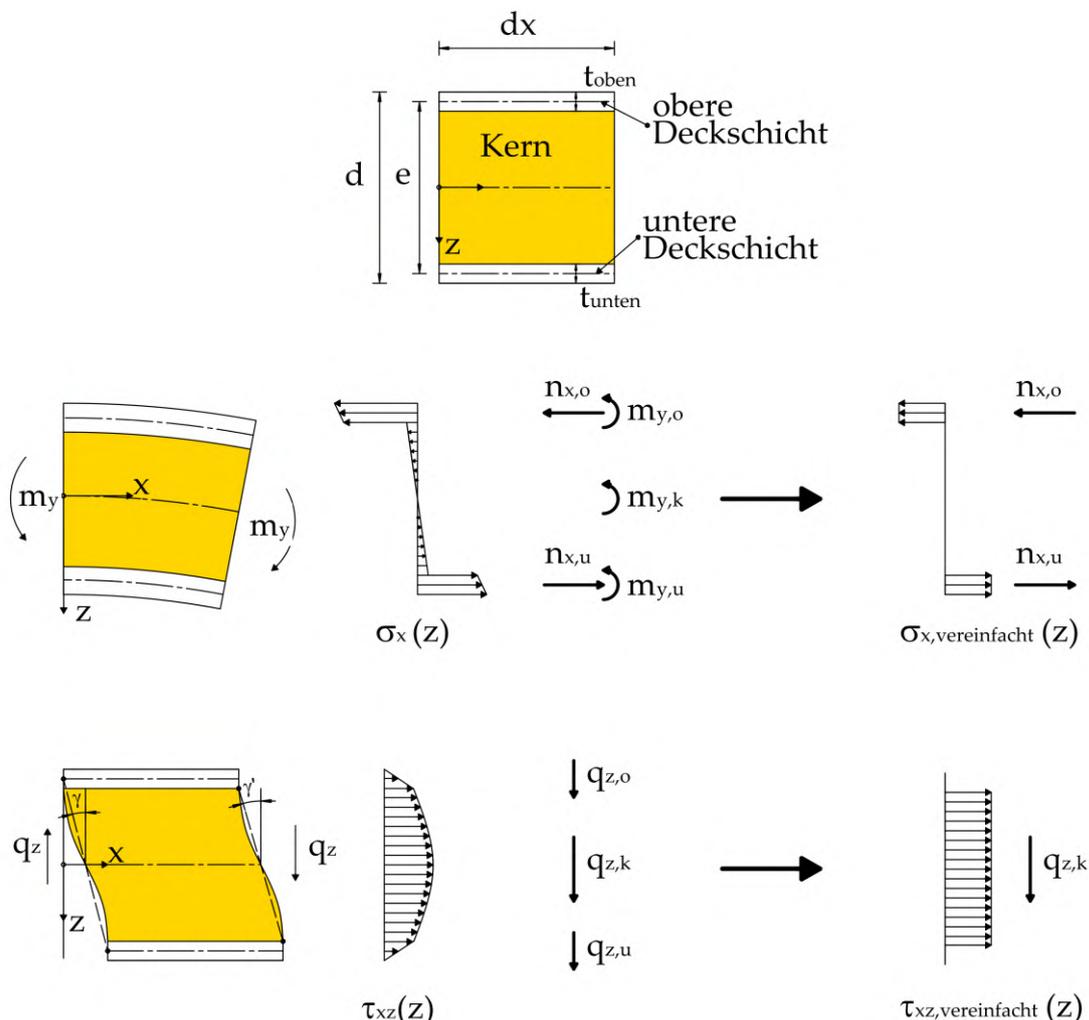


Abbildung 2-1: Sandwichelement unter einachsiger Biegung und Schub, Schnittgrößen und Spannungen sowie vereinfachte Ansätze für Elemente mit ebenen und quasi-ebenen Deckschichten (vgl. KLEIN (2013) und STAMM & WITTE (1974))

Figure 2-1: Sandwich panel under uniaxial bending and shear, internal forces and stresses as well as simplification for elements with flat face sheets (see KLEIN (2013) und STAMM & WITTE (1974))

In der Literatur findet man zahlreiche mehr oder weniger vereinfachte Verfahren zur Bestimmung von Schnittgrößen, Spannungen und Verformungen von Sandwichelementen. NELKE (2018) fasst die wichtigsten Verfahren für im Bauwesen übliche Sandwichelemente ausführlich zusammen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird für händische Berechnungen ausschließlich die sogenannten „klassischen Sandwichtheorie“ unter nachfolgend aufgeführten Annahmen verwendet. (vgl. NELKE 2018 und STAMM & WITTE 1974).

- Die Deckschichten sind eben und haben eine vernachlässigbare Biegesteifigkeit.
- Der Beitrag der Deckschichten am Schubabtrag ist vernachlässigbar.

- Die obere und die untere Deckschicht haben über die Bauteillänge konstante Abmessungen und sind zueinander parallel.
- Die beiden Deckschichten sind hinsichtlich Geometrie und Materialeigenschaften gleich.
- Die Materialien sind homogen.
- Der Kern ist orthotrop, wobei die Materialhauptachsen parallel oder rechtwinklig zu den Elementhauptachsen stehen.
- Der Kern ist in der Elementdickenrichtung inkompressibel
- Spannungen und Verformungen sind in Elementquerrichtung konstant. Die Berechnungen können daher an eindimensionalen Balkenmodellen erfolgen.
- Die Verformungen sind so klein, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Verzerrungs- und Verschiebungsgrößen besteht.
- Die Materialien verhalten sich linear elastisch

2.1.2 Versagensmechanismen

Bedingt durch den mehrschichtigen Aufbau und die unterschiedlichen Materialeigenschaften, sowie geometrische Besonderheiten der einzelnen Schichten lassen sich folgende charakteristische Versagensmechanismen unterscheiden:

- Adhäsives Versagen - Versagen des Verbunds zwischen den Schichten
- Versagen der Kernschicht:
 - Schubversagen
 - lokales Druckversagen an Auflager- oder Lasteinleitungspunkten
 - Zugversagen
- Versagen der Deckschichten:
 - Fließen
 - Knittern
 - Delamination

Verbindungsmitel leiten zudem lokal sehr große Beanspruchungen in die Deckschichten und den Kern. Das Versagen von Verbindungsmitteln und der Elemente an den Befestigungspunkten wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht behandelt.

2.1.2.1 Schubversagen des Kerns

Schubversagen der Kernschicht tritt infolge der Querkraftbeanspruchung von Sandwichelementen mit einem charakteristischen Bruchbild auf. Ein Schubriss verbindet die beiden Deckschichten in einem Neigungswinkel von ca. 45° - also in Richtung der Hauptzugspannung in einem schubbeanspruchten Bauteil. Ein typischer Schubbruch ist in Abbildung 2-2 skizziert.

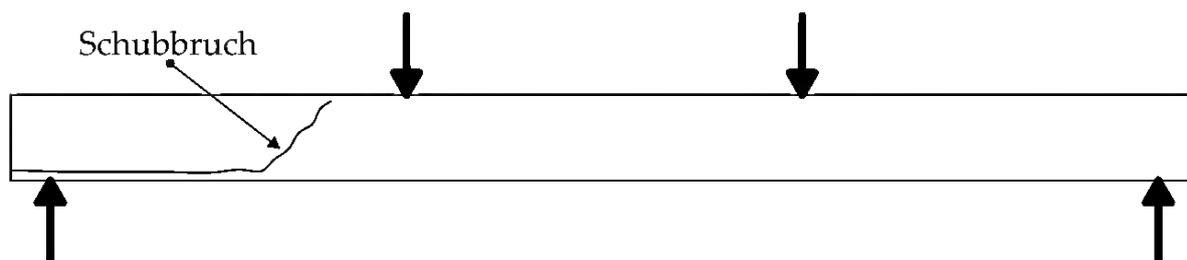


Abbildung 2-2: Typisches Schubversagen eines Sandwichelements in der Seitenansicht, nach DIN EN 14509

Figure 2-2: Typical shear failure of a sandwich panel, side view, according DIN EN 14509

2.1.2.2 Druckversagen des Kerns

Lokales Druckversagen kann bei großen örtlichen Pressungen an Auflager- oder Lasteinleitungspunkten auftreten. Ein Beispiel für ein solches Versagen ist in Abbildung 2-3 gegeben.



Abbildung 2-3: Typisches Druckversagen an einem Auflagerpunkt, NELKE (2018)

Figure 2-3: Typical compression failure at a support, NELKE (2018)

2.1.2.3 Zugversagen des Kerns

Reines Zugversagen tritt in der Regel nicht auf, da bei den herkömmlichen konstruktiven Details planmäßige Zugbeanspruchungen in Dickenrichtung der Elemente vermieden werden. Als Folge des Knitterns der Deckschichten (s.u.) tritt jedoch auch häufig Zugversagen des Kerns auf.

2.1.2.4 Fließen der Deckschichten

Die Deckschichten können aufgrund der Erreichung der Fließspannung versagen. Übersteigt die Deckblechspannung die Elastizitätsgrenze, wird dies als Fließversagen des Sandwichquerschnitts definiert. Das Erreichen der elastischen Querschnittstragfähigkeit ist damit als Fließversagen definiert. Aufgrund der Querschnittsform hat der Querschnitt nahezu keine plastischen Reserven. Der plastische Querschnittswiderstand entspricht also dem elastischen Querschnittswiderstand.

Der Ansatz von Fließgelenken bei der Schnittgrößenermittlung ist in statisch unbestimmten Systemen zwar denkbar, jedoch in den derzeit gültigen Regelwerken nicht vorgesehen und mit herkömmlichen Kernmaterialien nicht möglich, da bei hohen

Druckspannungen in den Deckblechen diese in der Regel vor dem Erreichen der plastischen Tragfähigkeit infolge von Knittern versagen.

Fließversagen tritt bei den für Sandwichelemente üblichen Deckschichtdicken nur in Verbindung mit vergleichsweise hohen Kernsteifigkeiten oder auf der Zugseite (bei großen Dickenunterschieden zwischen Zug- und Druckseite) auf.

2.1.2.5 Knittern der Deckschichten

Die Deckschichtdicken liegen in der Regel zwischen 0,4 mm und 1,0 mm. Da die Normalspannungen in den Deckschichten infolge von Biegebeanspruchungen sehr groß werden, ist die gedrückte Deckschicht stabilitätsgefährdet. Das typische Stabilitätsversagen der gedrückten Deckschicht wird als Knittern (gem. DIN EN 14509, sehr kurzweiliges Beulen) bezeichnet. Hierbei weicht das gedrückte Blech über die gesamte Elementbreite senkrecht zu seiner Ebene aus. Der Sandwichkern behindert das Knittern in Abhängigkeit seiner Druck- und Zugeigenschaften in der Dickenrichtung des Elements sowie infolge seiner Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit. Typische Knitterversagen sind in Abbildung 2-4 dargestellt.



Abbildung 2-4: Knitter von Sandwichelementen, hier gedrücktes oberes Deckblech eines Dachelements

Figure 2-4: Wrinkling of sandwich panels, here compressed upper face sheet of a roof element

Mit Abbildung 2-5 wird deutlich, dass das Kernmaterial durch Knittern einer Deckschicht sowohl Zug und Druck in der Elementdickenrichtung als auch Schubverformungen in der XZ-Ebene (X = Elementlängsachse, Z = Elementdickenrichtung) erfährt. Elastizitätsmoduln und Schubmoduln sowie die zugehörigen Festigkeiten kontrollieren also die Größe der Spannung, die zum Knitterversagen einer Deckschicht führt.

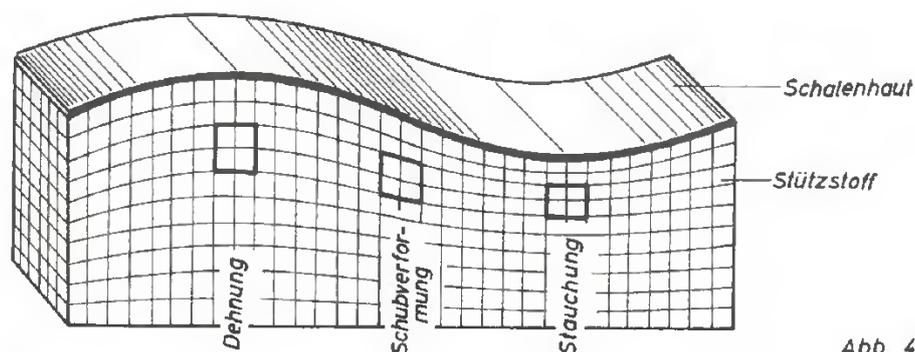


Abb. 41

Abbildung 2-5 Kernbeanspruchung durch Knittern der Deckschicht, Bossel (1962)

Figure 2-5: Deformation of the core to elongation, shear deformation and compression due to wrinkling of the face, Bossel (1962)

Für ein Element mit isotropen, linear-elastischen Materialien und unendlicher Kerndicke kann die ideale Knitterspannung auf Grundlage der Differentialgleichung für einen elastisch gebetteten Plattenstreifen mit einer sinusförmigen Vorverformung hergeleitet werden. Diese Herleitung ist erstmals PLANTEMA 1966 veröffentlicht. Hierbei stehen σ_{cr} für Verzweigungspunkte infolge von Instabilitäten (von engl. "critical") und w für Knittern (von engl. "wrinkling").

$$\sigma_{cr,w} = 0,82 \sqrt[3]{G_c E_c E_F} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Anhand der Formel Gl. 2-1 wird auch die Besonderheit deutlich, dass die Deckschichtdicke die Knitterspannung nicht beeinflusst.

In STAMM & WITTE (1974) wird darüber hinaus eine einfache Berechnungsformel für eine direkte Ermittlung der Knitterspannung unter Berücksichtigung von geometrischen und strukturellen Imperfektionen hergeleitet. Bei der Herleitung wird von den für herkömmliche Kernmaterialien üblichen Steifigkeiten und Festigkeiten ausgegangen. Nach DIN EN 14509, Abschnitt A.5.5.3, darf die Knitterspannung unter Traglast nach Gl. 2-2 bestimmt werden.

$$\sigma_{cr,w} = 0,5 \sqrt[3]{G_c E_c E_F} \quad \text{Gl. 2-2}$$

2.1.2.6 Delamination

Die Delamination ist ein adhäsives Versagen. Hier kommt es zum Bruch zwischen der Oberfläche eines der Verbundpartner (Deckschichten oder Kern) und dem Klebstoff zwischen den Schichten.

2.1.3 Deckschichten

Für Sandwichelemente im Bauwesen kommen nur in Sonderfällen nichtmetallische Deckschichten zum Einsatz. Auf dem Markt sind die Elemente mit Deckschichten aus

Stahl, Edelstahl Aluminium und Kupfer erhältlich (vgl. KOSCHADE 2011). In wenigen Sonderfällen werden Faserverbundwerkstoffe verwendet. Dabei entfallen auf Stahldeckschichten weit über 90 %. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Sandwichelemente mit stählernen Deckschichten untersucht. Die DIN EN 14509 schreibt in Verbindung mit den dort genannten normativen Verweisungen Anforderungen an die zulässigen Deckschichtmaterialien vor.

2.1.4 Kernwerkstoffe

Sandwichelemente können bereits mit einer Vielzahl von verschiedenen Kernmaterialien hergestellt werden. Neben Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen stehen die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften bei der Auswahl der eingesetzten Materialien im Vordergrund. Aber auch Anforderungen an die Ästhetik, Umweltfreundlichkeit und Dauerhaftigkeit spielen eine Rolle.

Die wichtigsten mechanischen Parameter der Kernwerkstoffe von Sandwichelementen sind Zug-, Druck- und Schubfestigkeit sowie die Elastizitätsparameter (Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Querdehnzahlen). Für viele Kernmaterialien sind diese Eigenschaften von den klimatischen Bedingungen abhängig. Das Materialverhalten unter Langzeiteinwirkungen ist ebenfalls zu untersuchen, da viele Kernmaterialien ein viskoelastisches Verhalten aufweisen. Ebenso wie für Kurzzeitbeanspruchungen ist auch hier der Einfluss der vorherrschenden Luftfeuchtigkeit und Temperatur zu berücksichtigen. (vgl. DAVIES 2008)

In DIN EN 14509 wird für die Zugfestigkeit der Kernwerkstoffe in Elementdickenrichtung ein Mindestwert von 0,018 N/mm gefordert. Für die übrigen Materialparameter werden keine Grenzwerte definiert.

Die wichtigsten bauphysikalischen Anforderungen an Kernwerkstoffe sind Wärmedämmfähigkeit, Widerstand gegen Feuchtigkeitsabsorption, Feuerwiderstand und Schalldämmung (DAVIES 2008).

Um eine Aussage über die Eignung von Wellpappe als Kernmaterial treffen zu können, werden auch Vergleiche mit herkömmlichen Kernmaterialien herangezogen. Hierzu ist es erforderlich, die wichtigsten Eigenschaften dieser Kernwerkstoffe zu kennen. Im Folgenden werden die Materialeigenschaften der Kernmaterialien behandelt, die für den Einsatz als Kernwerkstoff in Sandwichelementen im Bauwesen von Bedeutung sind.

2.1.4.1 Hartschäume

Hartschäume sind die am weitesten verbreiteten Kernwerkstoffe. Die größte Bedeutung haben hier PU¹-Elemente. Diese hatten im Jahr 2009 gemäß LANGE & BERNER (2010) einen Marktanteil von ca. 90 %.

Die Grundstoffe für die PU-Herstellung sind neben einer großen Zahl an Zusatzstoffen Isocyanate und Polyole, deren größter Teil von der Erdölindustrie bereitgestellt wird (KOSCHADE 2011). Durch die geschlossene Zellstruktur und darin eingeschlossene

¹ Gemäß DIN EN 13165:2016: "Familie von Dämmprodukten aus duroplastischem Hartschaumstoff mit überwiegend geschlossenzelliger Struktur, die Polyurethan(PUR)- und Polyisocyanurat(PIR)-Hartschäume mit einschließt"

Triebmittel mit geringen Wärmeleitfähigkeiten ergeben sich herausragende Wärmedämmfähigkeiten der Produkte mit PUR als Kernmaterial (KOSCHADE (2011)). Der Produktionsprozess erfolgt kontinuierlich auf Doppelbandanlagen, wobei die Grundstoffe für die Hartschäume in flüssiger Form auf das eine Deckblech aufgetragen werden von wo aus der Schaum nach oben wächst. Der Aufschäumprozess beginnt erst auf dem Blech und durch Plattenbänder werden die Deckschichten in dem geforderten Abstand gehalten. PU selbst hat gute Klebeeigenschaften, sodass keine weiteren Klebstoffe in der Fuge erforderlich sind. PU nimmt nahezu keine Feuchtigkeit auf und transportiert diese auch nicht, da die Hartschaumzellen geschlossen sind.

Herstellungsbedingt weisen Hartschäume stark anisotrope Materialeigenschaften auf. Hartschaumzellen mit gleichseitigen Fünfecken als Außenflächen, die regelmäßige Dodekaeder bilden, gibt es in "realen" Schaumstoffen nicht. Hier liegen die Zellen komprimiert und gedehnt vor UHLIG (2006). Die Hartschaumzellen werden infolge der unterschiedlichen Geschwindigkeiten von PU-Auftrag und Bandgeschwindigkeit in Richtung der Produktionslinien gedehnt und aufgrund der Ausdehnungsbehinderung an den Deckschichten gestaucht (KURPIELA & LANGE 2013). Zusätzlich gibt es in der Regel Dichtegradienten in der vertikalen Richtung, da gravitationsbedingt der Druck nach unten hin zunimmt und so die Zellexpansion hemmt (vgl. KURPIELA 2013).

Das bedeutendste Problem der verwendeten Hartschäume ist ihr Brandverhalten. Zwar können während der Herstellung Additive eingesetzt werden, die die chemische Zersetzung bei hohen Temperaturen verzögern, allerdings ist es derzeit noch nicht möglich, das Brandverhalten grundlegend zu verändern. Bereits bei Temperaturen von 150 °C - 200 °C beginnt der Zersetzungsprozess und ab 300 °C kommt es zur Entzündung und starker Rauchentwicklung. Ab Temperaturen von 600 °C entstehen außerdem giftige Gase (DAVIES 2008). Je nach Schaumsystem sind Brandschutzklassifikationen nach DIN EN 13501-2 von B-s2,d0 bis E-d2 möglich (vgl. IFBS 2018).

Hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit werden die Herstellung der Hartschäume aus Erdölprodukten sowie die mangelhafte Wiederverwendbarkeit problematisch angesehen. Neben einer thermischen Verwertung stehen derzeit keine wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten des Recyclings zur Verfügung.

Dem sehr wirtschaftlichen Herstellprozess und den hervorragenden bauphysikalischen Eigenschaften steht neben dem Brandverhalten auch eine Neigung zum Kriechen gegenüber. Die Kriechverformungen können ein Vielfaches der elastischen Verformung annehmen, weshalb dauerhafte Beanspruchungen nicht oder nur bei sehr geringen Lastniveaus von Sandwichelementen mit Hartschaumkernen abgetragen werden können (DAVIES 2008).

Zur Gruppe der Hartschäume gehören neben PU weitere Materialien. In DIN EN 14509 sind zusätzlich EPS, XPS, PF und CG als mögliche Kernmaterialien für Sandwichelemente enthalten. Diese Kernmaterialien bedürfen einer aufwändigeren Fertigung, da eine Verklebung mit den Deckblechen durch die Kernmaterialien selbst nicht möglich ist. Ähnlich wie bei Mineralwolle ist eine zusätzliche Klebung in den Verbundfugen erforderlich. Aufgrund ihrer geringen Marktbedeutung werden diese Kernmaterialien im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

In Tabelle 2-1 werden die wichtigsten Materialparameter von PU Hartschäumen aufgeführt. Die Parameter werden ausschließlich für die Hauptbeanspruchungsrichtungen im Sandwichelement angegeben (E-Modul und Festigkeiten für Druck und Zug in Elementdickenrichtung, Schubmodul und -festigkeit für die XZ-Ebene).

2.1.4.2 Mineralwolle

Aufgrund der schlechten Brandschutzeigenschaften der PU-Elemente wurde nach nicht brennbaren Lösungen für das Kernmaterial von Sandwichelementen gesucht. Seit den 1990er Jahren sind Elemente mit Steinwollkernen auf dem Markt erhältlich. Der gebräuchliche Begriff Mineralwolle umfasst zwar sowohl Steinwolle als auch Glaswolle, jedoch liegt die Schmelztemperatur von Glaswolle so niedrig, sodass sich keine große Verbesserung gegenüber PU-Elementen ergibt. Je nach gewählten Gesteinen, aus denen die Wolle gewonnen wird, können sehr hohe thermische Belastbarkeiten und Schmelzpunkte von über 1000 °C erreicht werden. (vgl. KOSCHADE (2011), HESELIUS (2005))

Zur Herstellung von Mineralwolle wird vulkanisches Gestein zusammen mit Kalk, Zuschlägen und gegebenenfalls Teilen von Recyclingmaterial, das in späteren Produktionsschritten als Verschnitt anfällt, Kupolöfen zugeführt und durch die Verbrennung von Koks bei über 1500 °C zum Schmelzen gebracht (vgl. KOSCHADE (2011), FMI (2018)). Für diesem Prozess sind demzufolge große Mengen an Primärenergie erforderlich. Die glasartige Schmelze wird auf eine schnell drehende Schwungscheibe geleitet und dadurch zu feinen Fäden geschleudert, die bei der anschließenden Abkühlung zu Steinwollfasern erstarren. Durch die Hinzugaben von organischen Bindemitteln werden eine Belastbarkeit hergestellt und die mechanischen Materialeigenschaften gesteuert. Diese Bindemittel sind in der Regel Phenolharze, petrochemische Produkte, die durch Polymerisation von Phenolen und Aldehyden gewonnen werden. Der Bindemittelanteil beträgt je nach Anforderung zwischen 1 und 10 % des Steinwollgewichts (DAVIES 2008). Die offene Zellstruktur von unbehandelter Steinwolle bedingt ein sehr großes Wasserabsorptionspotenzial, da sich Wasser in den Faserzwischenräumen sammeln kann. Die Fasermatrix selbst weist zwar nur einen Wasserabsorptionsfähigkeit von 1,5 % auf, dennoch können zusammen mit der Bindemittelzugabe zusätzlich Additive, wie z. B. Öle oder Silikone, zugeführt werden, um die Absorptionsfähigkeit weiter zu reduzieren (DAVIES 2008). Nach der anschließenden Pressung auf die gewünschte Dichte in einem Härteofen bei ungefähr 200 °C folgt der Zuschnitt (KOSCHADE 2011).

Infolge des Herstellprozesses haben die Fasern keine vollkommen zufällige Orientierung, sondern richten sich eher in Richtung der Produktionslinie aus. Daraus resultieren verschiedene mechanische und bauphysikalische Eigenschaften in den unterschiedlichen Beanspruchungsrichtungen. Da die Mineralwolle die höchsten Steifigkeiten und Festigkeiten aufweist, wenn sie in Richtung der Fasern beansprucht wird, werden die wie beschrieben produzierten Mineralwollblöcke in Lamellen geschnitten und um 90° gedreht in den Sandwichelementen angeordnet, sodass die Deckschichten der Sandwichelemente senkrecht zu ihrer Ebene besser gestützt werden. In Abbildung 2-6 wird dieser Vorgang veranschaulicht. Die angegebenen E-Moduln gelten für Beanspruchungen in Faserrichtung.

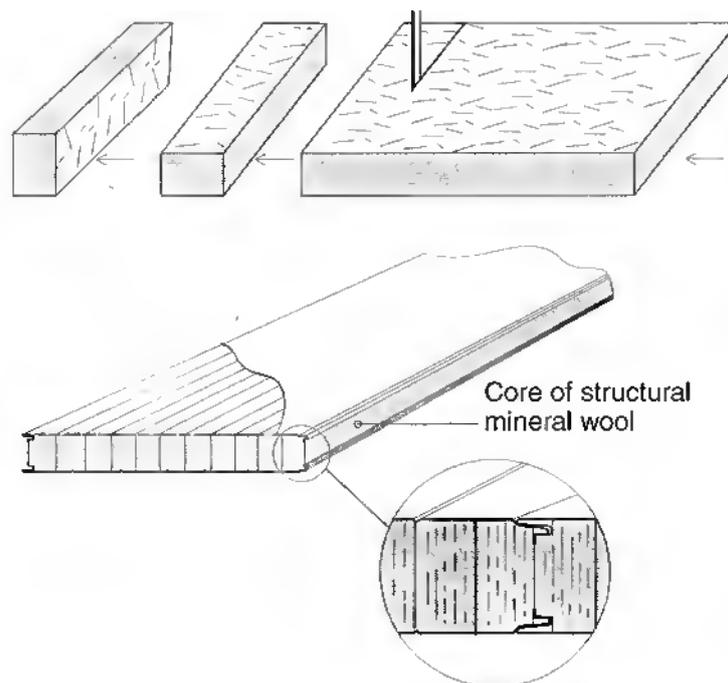


Abbildung 2-6: Herstellung von Mineralwolle-Sandwichelementen mit Lamellen (DAVIES 2008)

Figure 2-6: Core assembly of mineral wool sandwich panels (DAVIES 2008)

Die Lamellen werden untereinander nicht verklebt. Durch den Versatz der Lamellenlängsstöße über die Elementlänge und die Verklebung mit den Deckschichten, stellt ein Schubkraftübertragen über die Lamellenstöße hinweg sicher. Die Lamellen können dabei zufällig oder gleichmäßig, nach einem festgelegten Schema angeordnet werden.

Mineralwollfasern können bei der Verarbeitung zu Hautreizungen führen (BG BAU 2018). Die Karzinogenität der Fasern von Mineralwolle-Produkten, die nach 1996 hergestellt wurden, kann als unbedenklich eingestuft werden (BG BAU 2018).

Materialkennwerte von Mineralwolletypen, die in Sandwichelementen Verwendung finden, sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

2.1.4.3 Wabenkerne

Kerne aus aufgelösten Strukturen, die wabenähnliche Formen aufweisen, spielen für Sandwichelemente im Bauwesen derzeit eine stark untergeordnete Rolle. Dennoch wird hier auf derartige Kerne eingegangen, da einerseits in anderen Anwendungsgebieten, wie z.B. der Luft- und Raumfahrt, schon lange Wabenkerne eingesetzt werden und andererseits einige Parallelen zu Kernen aus Wellpappe gezogen werden können. Wabenkerne, die aus Metall, Kunststoffen, Papier oder Keramik hergestellt werden können (DAVIES 2008), werden aufgrund ihrer hohen Kosten in Sandwichelementen für das Bauwesen nur in Spezialanwendungen eingesetzt (z.B. bei besonders hohen Anforderung an Ebenheit, Brandschutz oder Ästhetik).

Wabenähnliche Strukturen beschreiben jegliche Art von prismatischen Zellen, die sich ihre Zellwände teilen und somit eine verbundene Struktur bilden, bei gleicher Wabenhöhe zwei parallele Ebenen an der Ober- und der Unterseite aufweist. Aus praktischen Gründen und aufgrund der guten Trageigenschaften kommen am

häufigsten hexagonale Waben mit identischen Abmessungen zum Einsatz (DAVIES 2008). Ein Beispiel für eine wabenähnliche Kernstruktur ist in Abbildung 2-7 gegeben.

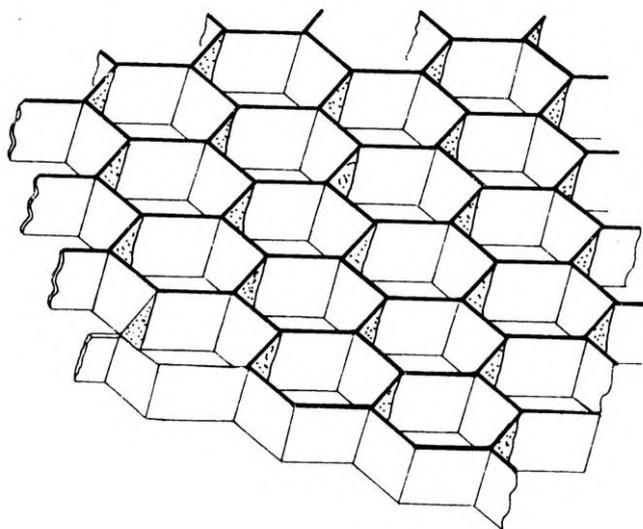


Abbildung 2-7: Gleichmäßige hexagonale Wabenstruktur (GIBSON & ASHBY 1988)

Figure 2-7: Regular hexagonal Honey comb structure (GIBSON & ASHBY 1988)

Die Tragwirkung von Sandwichkonstruktionen mit Wabenkernen ist bereits Gegenstand vieler Forschungsarbeiten gewesen. Für eine genaue Betrachtung des Tragverhaltens und der Versagensmechanismen für Wabenstrukturen unter allen denkbaren Belastungszuständen wird auf das Werk von GIBSON & ASHBY (1988) verwiesen. Hier wird sehr detailliert auf die mechanischen Eigenschaften von Wabenkernen eingegangen. Alle Belastungsszenarien werden analytisch betrachtet und Berechnungsansätze dafür werden vorgestellt. Die Autoren befassen sich jedoch nicht mit Papiermaterialien sondern mit Polymeren, Metallen, Keramiken und Glass. Eine Übertragbarkeit auf Papiermaterialien ist denkbar aber ohne weitere Untersuchungen nicht möglich, da Papier im Gegensatz zu den untersuchten Materialien stark anisotropes Verhalten aufweist und die Geometrien der Zellstrukturen und der Papiere selbst im Vergleich zu den von GIBSON & ASHBY (1988) untersuchten Materialien stark schwanken.

Im Vergleich zu den Hartschäumen oder Mineralwolle weisen Wabenkerne aus Papier höhere Steifigkeiten auf. Die Abmessungen der Papierwaben und die eingesetzten Papiere bestimmen das Tragverhalten. Die Geometrie beeinflusst die Wärmedämmfähigkeit stark, da von der Geometrie die Art des Wärmetransportes abhängt. In Tabelle 2-1 werden Kenngrößen für kommerziell verfügbare Papierwaben angegeben. Papierwaben mit davon stark verschiedenen Werten sind unter Verwendung anderer Geometrien und Papiere herstellbar.

Die meisten Wabenkerne werden heute durch das Expandieren verklebter Lagen hergestellt. Der Herstellprozess ist beispielsweise von PFLUG ET AL. (1999) ausführlich beschrieben. Die Wabenzellweite liegen üblicherweise oberhalb von 10 mm, da der Expansionsprozess bei kleineren Zellweiten mit der zur Verfügung stehenden Maschinenteknik und der verwendeten Papiere schwierig ist (PFLUG ET AL. 1999).

2.1.4.4 Kennwerte herkömmlicher Kernmaterialien

In Tabelle 2-1 werden Bandbreiten der wichtigsten Kennwerte der üblichen Kernmaterialien PU und Mineralwolle (MW) zusammengefasst. Wegen der Ähnlichkeit zu Wellpappe werden hier auch soweit bekannt Kennwerte von Papierwaben mit aufgeführt. Die Elastizitätsmoduln für Druck E_{Cc} und Zug E_{Ct} sowie die Festigkeiten für Druck f_{Cc} und Zug f_{Ct} beziehen sich immer auf die Elementdickenrichtung. Die Schubmoduln G_C und die Schubfestigkeiten f_{Cv} auf die Ebene, die von der Elementlängsachse und die Elementdickenrichtung gebildet wird. Die Wärmeleitfähigkeiten beziehen sich auf die Elementdickenrichtung.

Das Vorgehen zur Bestimmung dieser Kenngrößen ist in DIN EN 14509 genau beschrieben.

Tabelle 2-1: Kennwerte herkömmlicher Kernmaterialien

Table 2-1: Properties of common core materials

	PU ^[1,2]	MW ^[1,2]	PW ^[3,4]
ρ in kg/m ³	30 - 50	60 - 150	
E_{Cc} in N/mm ²	2 - 8	6 - 20	
E_{Ct} in N/mm ²	2 - 6	5 - 40	
G_C in N/mm ²	2 - 5	2 - 20	
f_{Cc} in N/mm ²	0,08 - 0,2	0,10 - 0,15	0,20 - 1,00
f_{Ct} in N/mm ²	0,08 - 0,25	0,03 - 1,00	
f_{Cv} in N/mm ²	0,08 - 0,18	0,03 - 0,20	
λ in W/(m·K)	0,25 - 0,30	0,25 - 0,30	0,04 ^[4,5]

^[1] LANGE & BERNER 2010

^[2] DAVIES 2008

^[3] PFLUG ET AL. 1999

^[4] HINGERL & ASCHAUER 1995

^[5] Von HINGERL & ASCHAUER stammt die Wärmeleitfähigkeit. Diese Zahl wird hier ohne Quellenangabe genannt. Die Richtigkeit dieser Angabe wird auf Grundlage eigener Untersuchungen an vergleichbaren Materialien in Frage gestellt. Siehe hierzu Abschnitt 5.1

2.1.5 Klebstoffe

Die Verklebung der meisten Kernmaterialien mit den Deckschichten bedarf in der Regel den Einsatz von Polyurethan-Klebstoffen. Durch die Verwendung von Zusatzstoffen können Zug- und Schubfestigkeit, Brandverhalten und Ausgleichsfähigkeit von Unebenheiten beeinflusst werden (vgl. DAVIES (2008)).

Sandwichelemente mit PU-Kernen benötigen keine zusätzlichen Klebstoffe, um den Verbund zu den Deckschichten herzustellen. Da PU in der nicht ausgehärteten Form selbst als Klebstoff fungiert, verbindet es sich während des Aufschäumprozesses, der in den Doppelbandanlagen stattfindet, gut mit den metallenen Deckschichten.

2.1.6 Bauphysik von Sandwichelementen

Die Teilgebiete der Bauphysik sind Wärmeschutz, Feuchteschutz, Klima, Akustik, Licht sowie Brandschutz (WILLEMS 2017). Für die Gewährleistung der Funktion und den Betrieb von Gebäuden ist es wichtig, die Auswirkungen der eingesetzten Materialien auf die Bauphysik bzw. die bauphysikalischen Eigenschaften der Materialien selbst zu berücksichtigen.

Für Sandwichelemente sind Wärmeschutzeigenschaften, das Verhalten unter der Einwirkung von Feuchte und das Brandverhalten die wichtigsten bauphysikalischen Themenfelder. Andere Materialeigenschaften sind für den Einsatz von Sandwichelementen zur Verklebung von Dach- und Wandflächen von untergeordneter Bedeutung oder werden nicht oder nur geringfügig durch das Kernmaterial beeinflusst. Akustik, Licht und Klima werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

2.1.6.1 Wärmeschutz

Die wichtigste bauphysikalische Anforderung an Sandwichelemente ist eine gute Wärmedämmfähigkeit. Da sie ohne weitere Bauteile die vollständige Gebäudeaußenhülle bilden und die Deckschichten in der Regel eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, muss der Kern für den nötigen Wärmeschutz sorgen.

Es gibt drei verschiedene Wärmeübertragungsvorgänge, die dazu führen, dass in allen Materialien ein Temperatenausgleich von wärmeren zu kälteren Bereichen stattfindet: Wärmeleitung, Konvektion (Wärmeströmung) und Wärmestrahlung. Dabei ist Wärmeleitung die Energieübertragung von Molekül zu Molekül durch Kontakt, Wärmestrahlung die Übertragung von Wärme durch elektromagnetische Wellen und Konvektion überträgt Wärme mittels Wärmemitführung durch sich in einem Fluid bewegenden Teilchen. Je nach Bauteil und Randbedingungen können die drei Arten der Wärmeübertragung sich unterschiedlich stark überlagern (vgl. MAAS (2017)).

Als Vergleichsgröße für die Wärmeschutzeigenschaften eines Materials wird die Wärmeleitfähigkeit λ verwendet. Sie ist ein geometrieunabhängiger Materialparameter. Für die Wärmeübertragung in einem Material, das sowohl aus Feststoffen als auch aus Gasen besteht ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit λ nach Gl. 2-3.

Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes ist, desto besser ist seine Wärmedämmfähigkeit bei gleichen Abmessungen in Richtung des Wärmetransports. In ihr sind alle Wärmetransportvorgänge enthalten.

Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe wird experimentell ermittelt. Die Versuche bedürfen vergleichsweise geringem Aufwand und die Ergebnisgenauigkeit ist im Vergleich zu numerischen Berechnungen oder vereinfachten analytischen Ansätzen sehr groß. Das Resultat der experimentellen Messung ist eine effektive Wärmeleitfähigkeit (vgl. WAGNER (2002)), die alle Wärmetransportvorgänge enthält:

$$\lambda = \lambda_M + \lambda_G + \lambda_R + \lambda_K \quad \text{Gl. 2-3}$$

mit:

- λ_M Wärmeleitung in der Feststoffmatrix
- λ_G Wärmeleitung im eingeschlossenen Gas
- λ_R Wärmeübertragung durch Strahlungsvorgänge zwischen den Festkörperoberflächen
- λ_K Wärmeübertragung durch Konvektion des eingeschlossenen Gases

2.1.6.2 Baulicher Brandschutz

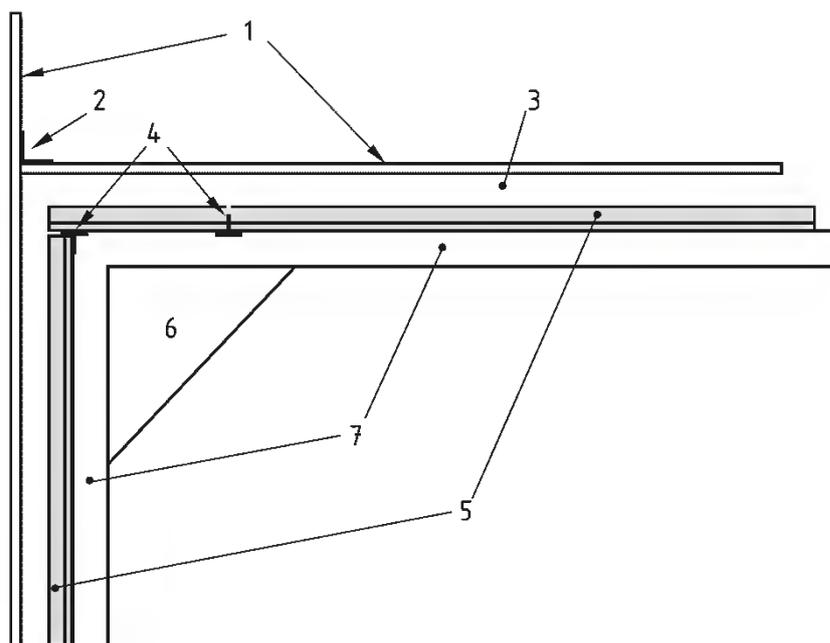
Der Bauliche Brandschutz ist ein Teilgebiet des vorbeugenden Brandschutzes und umfasst alle baulichen Maßnahmen, die in erster Linie dem Schutz von Menschen und Tieren hinsichtlich der Brandsicherheit von Gebäuden dienen. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf zwei Komponenten des baulichen Brandschutzes eingegangen: das Brandverhalten von Baustoffen und der Feuerwiderstand von Bauteilen.

Die anderen Komponenten betreffen die brandschutztechnische Planung von Gebäuden, wie z.B. Aufteilung in Brandabschnitte, Fluchtwegplanung oder Planung von Brandmelde- oder Löschanlagen und werden in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt.

Bauprodukte werden in Deutschland nach DIN 4102-1 oder DIN EN 13501 klassifiziert. Je nach Anwendung können neben den nicht brennbaren Baustoffen auch brennbare eingesetzt werden. In der Praxis kommen jedoch nur normal entflammbare und schwer entflammbare Baustoffe zum Einsatz, leicht entflammbare Baustoffe werden nicht verwendet (vgl. IFBS (2018)). Außer der Brennbarkeit und der Entflammbarkeit gibt es noch Klassifizierungen bezüglich Rauchentwicklung und Abtropfverhalten.

Anforderungen an den Feuerwiderstand von Bauteilen variieren je nach Gebäudeklasse. Für Sandwichelemente ist die Feuerwiderstandsfähigkeit nicht geregelt, was eine Bauartgenehmigung erfordert. Dazu werden Single-Burn-Item (SBI) Versuche nach DIN EN 13823 durchgeführt und deren Ergebnisse nach DIN EN 13501-2 klassifiziert (vgl. IFBS (2018)).

Bei einem SBI-Versuch an Sandwichelementen werden gemäß Abbildung 2-8 zwei Elementteile (Probenflügel genannt) im rechten Winkel zueinander aufgebaut und mit einem Brenner, der in der Ecke angeordnet wird befeuert. In der Fuge (s. Abbildung 2-8, Nr. 4, hier nur Eckfuge) wird in der Regel ein Fugenblech entsprechend der üblichen konstruktiven Ausbildung solcher Gebäudeecken angeordnet.



Legende

- | | | | |
|---|-----------------------------|---|--------------|
| 1 | rückseitige Abschlussplatte | 5 | Probenflügel |
| 2 | L-Profil | 6 | Hauptbrenner |
| 3 | Luftspalt | 7 | U-Profil |
| 4 | Fugen | | |

Abbildung 2-8: Beispiel für den Aufbau des SBI-Versuchs (Grundriss) für Sandwichelemente aus DIN EN 13823

Figure 2-8: Example for the SBI-test setup (ground plan) for sandwich panels, taken from DIN EN 13823

Folgende Parameter werden im Zuge der SBI-Versuchen bestimmt:

- $FIGRA_{0,2 MJ}$ Wärmefreisetzungsrate bei einem THR-Schwellenwert von 0,2 MJ in W/s
- $FIGRA_{0,4 MJ}$ Wärmefreisetzungsrate bei einem THR-Schwellenwert von 0,4 MJ in W/s
- THR_{600s} gesamte freigesetzte Wärme während 600 s in MJ
- TSP_{600s} gesamte freigesetzte Rauchmenge während 600 s in m^3
- $SMOGR$ Rauchentwicklungsrate in m^2/s^2

Die Entzündlichkeit von Sandwichelementen mit brennbaren Kernmaterialien wird nach DIN EN ISO 11925-2 im sogenannten Kleinbrennerversuch untersucht. Hierbei werden die Kleinproben, die aus den Elementen herausgeschnitten werden, einer Beflammung der Deckschichten und Elementkanten ausgesetzt. Bei den Kleinbrennerversuchen werden folgende Eigenschaften des Brandverhaltens bestimmt:

- Dauer bis zum Entflammen der Probe
- Maximale Höhe der Flammenspitze
- Dauer bis zum Verlöschen der Flamme
- Dauer des Nachglimmens
- Dauer bis zum etwaigen Eintreten brennenden Abtropfens

In der Normenreihe DIN 18234 sind darüber hinaus besondere Anforderungen an große Dachflächen mit über 2500 m^2 geregelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird hierauf nicht näher eingegangen (s. hierzu z. B. IFBS 2019, ANTONATUS 2016).

Sandwichelemente mit Hartschaumkern haben wie bereits in Abschnitt 2.1.4 geschrieben im Allgemeinen eher schlechte Brandschutzeigenschaften. Durch den Einsatz von Flammschutzmitteln können diese jedoch stark verbessert werden, sodass Brandschutzklassifizierungen bis zu "schwer entflammbar" (B1 nach DIN 4102) möglich sind.

Sandwichelemente mit Mineralwollkern werden als nicht brennbare Bauprodukte eingestuft. Da Sandwichelemente mit Mineralwollkern aber mit Polyurethan-Klebstoffen zur Herstellung des Verbunds zwischen Kern und Deckschichten produziert werden, müssen auch diese Elemente brandschutztechnisch klassifiziert werden. Art und Menge des Klebers ist entscheidend für die genaue Klassifikation (vgl. IFBS 2018)

Tabelle 2-2: Brandschutzklassifizierung nach EN 13501-1 und DIN 4102-2

Table 2-2: Fire protection classification according to EN 13501-1 and DIN 4102-2

deutsche bauaufsichtliche Benennung	Zusatzanforderung		Klasse zum Brandverhalten EN 13501-1	Baustoff- klasse DIN 4102-2
	keine Rauch- entwicklung	kein brennendes Abtropfen		
nichtbrennbar ohne brennbare Bestandteile	x	x	A1	A1
nichtbrennbar mit brennbaren Bestandteilen	x	x	A2-s1, d0	A2
schwerentflammbar	x	x	B; C-s1, d0	B1
		x	A2; B; C-s2, d0	
		x	A2; B; C-s3, d0	
	x		A2; B; C-s1, d1	
	x		A2; B; C-s1, d2	
normalentflammbar			A2; B; C-s3, d2	B2
	x	x	D-s1, d0	
		x	D-s2, d0	
		x	D-s3, d0	
	x		D-s1, d2	
			D-s2, d2	
			D-s3, d2	
leichtentflammbar		x	E	B3
			E-d2	

2.1.6.3 Feuchteschutz

Das Eindringen von Feuchtigkeit in den Kern stellt im Hinblick auf herkömmliche Kernmaterialien vor allem für Mineralwoll-Sandwichelemente ein Problem dar. Zwar nehmen die Fasern selbst kaum Feuchtigkeit auf, jedoch lässt die offene Struktur der Mineralwolle das Einlagern und den Transport von Wasser in den Faserzwischenräumen zu. Einerseits wird dadurch die Wärmedämmfähigkeit stark herabgesetzt, andererseits kann es durch Feuchtigkeit auf der Innenseite der Elemente zu Korrosion kommen und damit neben der Querschnittsreduktion der Deckbleche zum Verlust des Verbundes in der Fuge zwischen Blech und Mineralwolle (MÖLLER 2014). Die Innenseiten der Deckbleche sind in der Regel mit Beschichtungssystemen versehen, die im Vergleich zur bewitterten Außenseite einen schlechteren Korrosionsschutz darstellen (KOSCHADE 2011). Der Klebfilm, der zum Verbund zwischen Mineralwolle und Deckschicht dient, stellt keine geschlossene Schicht dar und trägt daher nicht zum Korrosionsschutz bei. Auch die Mineralwoll-Fasern selbst erfahren durch die Einwirkung von Feuchtigkeit eine Schädigung, die zur Reduktion der Tragfähigkeit führt. Die Anfälligkeit für Schäden durch Wasser und Feuchtigkeit erfordert eine genaue Planung von konstruktiven Details z.B. gemäß einer Richtlinie des IFBS (IFBS 2004). Von RÄDEL & LANGE (2018) und BERNER ET AL. (2007) konnte gezeigt werden, dass unter Beachtung der bekannten Detaillösungen an Fugen und Übergängen dichte Sandwichelement-Konstruktionen möglich sind.

2.2 Papier und Pappe Paper and Board

2.2.1 Allgemeines

Die Papierbestandteile und Materialeigenschaften sowie die Herstellverfahren von Papier und Wellpappe nehmen großen Einfluss auf die späteren Eigenschaften der Produkte und werden daher im Folgenden beschrieben.

2.2.1.1 Papier

Die Geschichte von Papier reicht etwa 2000 Jahre zurück (KALWEIT ET AL. 2012). Zunächst bestand es aus Leinen-, Hanf-, Baumwoll- und Flachsfasern bevor infolge der industriellen Revolution die Holzverarbeitung die Verwendung von Zellstoff und Holzstoff aus Holz möglich machte und damit die Massenproduktion von Papier begann. Heute werden in Deutschland jährlich ca. 23 Mio. Tonnen Papier produziert (VDW 2019).

Papier besteht aus Papierfaserstoffen und Additiven. Bei den Faserstoffen wird einerseits zwischen Primär- und Sekundärfaserstoffen unterschieden. Während Primärfaserstoffe aus Holz und Einjahrespflanzen hergestellt werden, werden Sekundärfaserstoffe aus Altpapier gewonnen. Andererseits lassen sich die Bestandteile der Faserstoffe in Zellstoff und Holzstoff unterscheiden. Durch das chemische Aufschließen von Holz oder Einjahrespflanzen entsteht Zellstoff, durch eine mechanische Zerfaserung von Holz entsteht Holzstoff. Der Zusammenhalt zwischen den Papierbestandteilen entsteht hauptsächlich durch Wasserstoffbrückenbindungen, die sich zwischen den Fasermolekülen bilden (BLECHSCHMIDT 2013b).

Die Fasergeometrie beeinflusst zahlreiche Papiereigenschaften wie beispielsweise Steifigkeit, Festigkeit, Oberflächenebenheit, Bedruckbarkeit, Opazität, Weißgrad. Länge und Breite der Fasern hängen stark von den eingesetzten Hölzern und von der Anzahl der Wiederaufbereitungszyklen, die die Fasern bereits erfahren haben, ab. Laubhölzer enthalten Fasern mit 0,5 mm bis 2 mm Länge und einer Faserbreite von 10 μm bis 40 μm während aus Weichhölzern Fasern mit Längen von 3 mm bis 6 mm und Breiten von 30 μm bis 50 μm gewonnen werden. Die Zellwanddicken liegen je nach Holzart zwischen 3 μm und 8 μm (Gruber 2011).

Die Elektronenmikroskopaufnahme in Abbildung 2-9 zeigt die Bestandteile eines Papiers. Es wurde ein Bild eines Rohpapiers gewählt, da hier die Fasern gut erkennbar sind. Während die Fasern auf der Aufnahme des Rasterelektronenmikroskops weitgehend dunkel erscheinen, werden die mineralischen Füllstoffe weiß dargestellt.

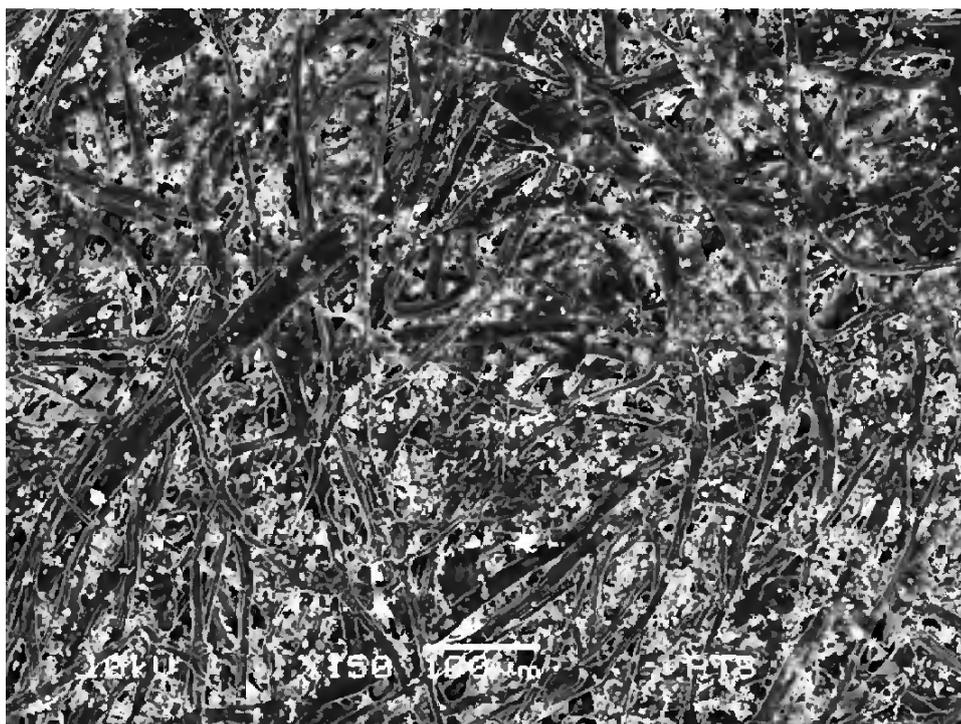


Abbildung 2-9: Elektronenmikroskopaufnahme eines Papierblattes, (SANGL 2013)

Figure 2-9: Electron microscope picture of a paper sheet, (SANGL 2013)

Durch jeden Wiederaufbereitungszyklus nimmt die Faserlänge ab. Papierfasern können bis zu zehnmal recycelt werden, danach sind die Faserlängen zu gering, um sich gut mit anderen Fasern zu verbinden (POHL 2009).

Der Anteil von Sekundärfasern an der Fasermasse hängt von der herzustellenden Papiersorte und Qualität ab. Durchschnittlich liegt er bei ca. 40 % Holik.2013, kann aber grundsätzlich zwischen 0 % und 100 % betragen.

Additive haben einen Massenanteil am fertigen Papier von ca. 11 %. Sie dienen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit während der Produktion oder der mechanischen, physikalischen und optischen Merkmale des Endprodukts. Es kommen Füllstoffe, Leimstoffe und Farbstoffe sowie spezielle chemische Additive zum Einsatz (BLECHSCHMIDT 2013b).

Die Papierproduktion bietet durch die Wahl verschiedener Faserstoffe und Additive sowie der eingesetzten Verarbeitungs- und Bearbeitungstechniken zahlreiche Möglichkeiten, Papiere mit unterschiedlichsten Eigenschaften herzustellen. Derzeit sind etwa 3000 Papiersorten bekannt. Für detaillierte Beschreibungen wird auf BLECHSCHMIDT (2013a), BLECHSCHMIDT (2013d), KALWEIT ET AL. (2012), MARK ET AL. (2002) und Gruber (2011) verwiesen.

In Abbildung 2-10 wird in Anlehnung an die Literatur ein Koordinatensystem für maschinell hergestellte Papiere eingeführt. MD (von engl. „machine direction“), CD (von engl. „cross machine direction“) und ZD (von engl. „z-direction“) lauten die in der Papiertechnik üblichen Achsbezeichnungen.

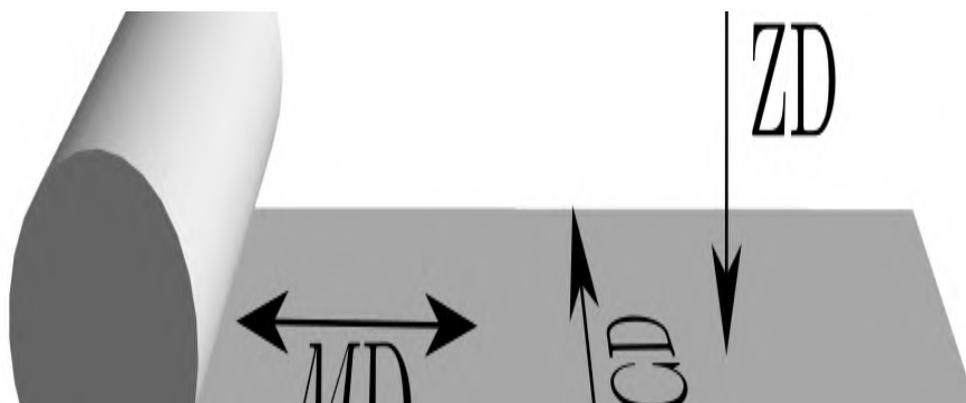


Abbildung 2-10: Koordinatensystem einer Papierbahn in Anlehnung an GUSTAFSSON & NISKANEN (2012)

Figure 2-10: Coordinate system of a paper web, cf. GUSTAFSSON & NISKANEN (2012)

2.2.1.2 Papierherstellung

Moderne Papierfabriken sind große Industrieanlagen mit bis zu 4500 t Produktionskapazität pro Tag. Eine Produktionslinie umfasst in der Regel die Stoffaufbereitung, die Papiermaschine, Abfall- und Abwasserentsorgung sowie Energieerzeugung (HOLIK 2013a). In diesem Abschnitt wird ausschließlich auf die industrielle Papiererzeugung eingegangen.

Erster Schritt der Papierherstellung ist die sogenannte Stoffaufbereitung. Sie beschreibt die Herstellung einer homogenen Suspension aus den Faserstoffen, einem Teil der Additive und Wasser. Die Stoffaufbereitung umfasst eine Vielzahl von Arbeitsschritten, die je nach verwendeten Rohstoffen und herzustellenden Produkten verschieden sein können. Eine Darstellung der Systeme der Stoffaufbereitung und die Funktionsweise der hierzu eingesetzten Anlagentechnik sind zum Beispiel in HOLIK (2013b) zu finden.

Die Suspension wird in der Papiermaschine zu einer kontinuierlichen Papierbahn weiterverarbeitet. Hierbei ist der sogenannte Stoffauflauf von besonderer Bedeutung für die Eigenschaften des fertigen Papiers. Die Suspension wird in einem freien Strahl auf das Sieb gelenkt. Die Neigung des Strahls wird so gewählt, dass eine gute Verteilung der Suspension ermöglicht wird, und die Strahlgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Siebes, das in modernen Maschinen mit einer Geschwindigkeit von über 2000 m/min schnell laufen kann, eingestellt. Die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Stoffstrahl und Sieb beeinflusst maßgeblich die Ausrichtung der Papierfasern im Blatt. In Abbildung 2-11 ist dieser Zusammenhang für den Fall dargestellt, dass der Strahl eine höhere Geschwindigkeit hat als das Sieb ($v_{\text{Strahl}} > v_{\text{Sieb}}$). Die Papierfasern haben in der Suspension vor dem Auftreffen auf das Sieb eine willkürliche Ausrichtung. Durch den Geschwindigkeitsunterschied zwischen Sieb und Suspension werden die Fasern mit ihrer Längsrichtung stärker in MD angeordnet als in CD. Der gleiche Effekt stellt sich ein, wenn die Siebgeschwindigkeit unter der des Suspensionsstrahls liegt (HOLIK 2013a).

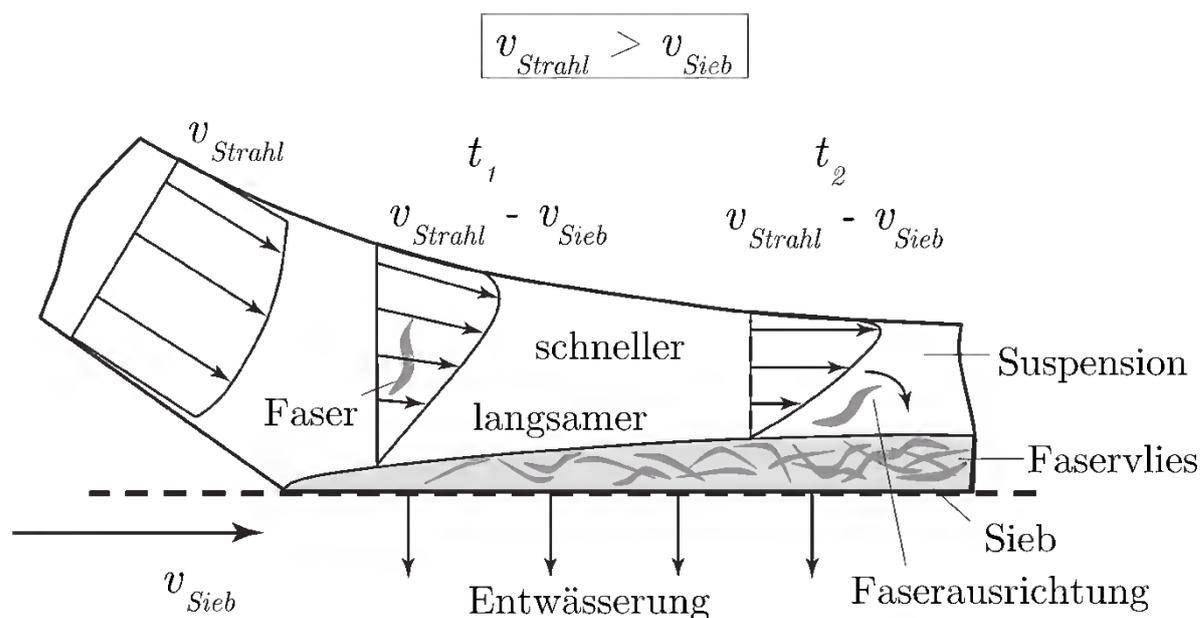


Abbildung 2-11: Faserausrichtung in einer Papiermaschine, nach Holik.2013

Figure 2-11: Fiber alignment in a paper machine, cg. Holik.2013

Um eine gute Blattformation, also eine gleichmäßige räumliche Verteilung der Feststoffe im Blatt zu erzeugen, ist eine nicht willkürliche Faserorientierung und damit eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Sieb und Strahl der Fasersuspension erforderlich (HOLIK 2013a). Neben ästhetischen Eigenschaften werden auch das Dehnungsverhalten infolge von Trocknung oder Befeuchtung sowie unter Hitze- einwirkung und die mechanischen Materialkennwerte (s. Abschnitt 2.2.2) stark von der Faserausrichtung beeinflusst (HOLIK 2013a). Die Fasern sind aber keinesfalls alle akkurat parallel zu MD ausgerichtet. Die meisten Fasern weisen lediglich einen geringeren Winkel zwischen ihrer Längsachse und MD als zwischen Längsachse und CD. Die Elektronenmikroskopaufnahme (Abbildung 2-9) verdeutlicht diesen Sachverhalt.

Auf den Stoffauflauf folgen für alle Papiersorten die Siebpartie, die Pressenpartie, die Trockenpartie und der Rollapparat. Für diese Arbeitsschritte und je nach Produkthanforderung zusätzliche Sektionen einer Papiermaschine wird auf die Literatur verwiesen (z.B. BLECHSCHMIDT 2013b).

2.2.1.3 Wellpappe

Wellpappe ist weltweit das am weitesten verbreitete Verpackungsmaterial. Sie hat sich gegen die übrigen Produkte durchgesetzt, da sie bei sehr geringem Gewicht hervorragende Festigkeiten sowie Steifigkeiten aufweist und gleichzeitig sehr kostengünstig herstellbar und recyclebar ist. In Deutschland wurden im Jahr 2017 5,3 Mio. t Wellpappe produziert und damit ein Umsatz von 5,3 Mrd. € erzielt (VDW 2018).

Wellpappe besteht aus ebenen Papierbahnen, den sogenannten Linern oder auch Deckenbahnen, die sich in einem schichtweisen Aufbau mit Wellpapieren oder auch Wellenbahnen abwechseln. Die Verbindung der Papierbahnen untereinander erfolgt

über Klebstoff, der in Deutschland in der Regel aus Stärkeleim besteht. Dieser wird aus hauptsächlich aus Mais, Weizen und Kartoffeln gewonnen (MENSING 2013).

Aber auch synthetische Klebstoffe kommen vereinzelt zum Einsatz, um besserer Verklebungen, geringere Produktionstemperaturen und größere Produktionsgeschwindigkeiten zu erzielen (SCHUMACHER ET AL. 2011).

Am häufigsten werden ein- und zweiwellige Wellpappen hergestellt, aber auch einseitige und dreiwellige Wellpappen werden auf modernen Anlagen produziert. Die gängigen Wellpappenarten sind in Abbildung 2-12 dargestellt. Die Wellen werden in Deutschland als Sinuswellen hergestellt (VDW 2019) und in Abhängigkeit von ihrer Wellenteilung t und Wellenhöhe h nach Wellenarten klassifiziert (s. Abbildung 2-13 und Tabelle 2-3). Die Wellenarten können untereinander beliebig kombiniert werden. Für gute Bedruckbarkeit, ebene Oberflächen und hohe Festigkeiten werden in der Regel kleine Wellen an der Außenseite und für eine gute Dämpfung und weiche Federung des Verpackungsguts größere Wellen auf der Innenseite von Verpackungen angeordnet.

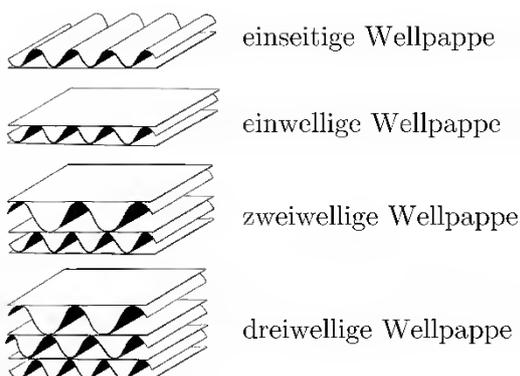


Abbildung 2-12: Wellpappenarten nach VDW (2019)

Figure 2-12: Corrugated Cardboard Types according to VDW (2019)

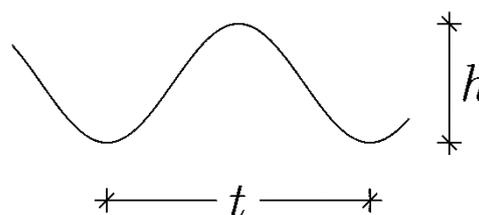


Abbildung 2-13: Abmessungen der Wellen nach DIN 55468-1

Figure 2-13: Measures of the waves according to DIN 55468-1

Nach DIN 55468-1 erfolgt eine weitere Einteilung nach Sorten für einwellige und zweiwellige Wellpappen in Abhängigkeit ausgewählter Festigkeitswerte (s. Tabelle 2 in DIN 55468-1).

Tabelle 2-3: Wellenarten nach DIN 55468-1

Table 2-3: Properties of common core materials

Wellenart	Wellenhöhe h in mm	Wellenteilung t in mm
G	< 0,6	≤ 1,8
F	≥ 0,6 bis < 1,0	> 1,8 bis ≤ 2,6
E	≥ 1,0 bis < 1,9	> 2,6 bis ≤ 3,5
D	≥ 1,9 bis < 2,2	> 3,5 bis ≤ 4,8
B	≥ 2,2 bis < 3,1	> 4,8 bis ≤ 6,5
C	≥ 3,1 bis < 4,0	> 6,5 bis ≤ 7,9
A	≥ 4,0 bis < 5,0	> 7,9 bis ≤ 10,0
K	≥ 5,0	> 10,0

Für die Deckenpapiere werden Papiere mit vergleichsweise hohen Festigkeitseigenschaften verwendet. Die Wellenpapiere sollen neben einer ausreichenden Tragfähigkeit auch eine gute Verformbarkeit und Dämpfungswirkung gewährleisten. Die Grammaturen der Deckenpapiere liegen demzufolge mit 100 bis 400 g/m² höher als die der Wellenbahnen mit 70 bis 160 g/m² (MENSING 2013).

Nach den Statistiken der Wellpappenindustrie (VDW 2018) werden durchschnittlich 79 % Recyclingpapiere und 21 % Papiere aus Frischfasern für die Wellpappenproduktion in Deutschland verwendet.

2.2.1.4 Papier- und Wellentypen für Wellpappenherstellung

Für die Herstellung kommerzieller Wellpappe kommen nachfolgend aufgeführte Papiertypen (PT) zum Einsatz.

- **Kraftliner:**
Kraftliner beschreibt den hochwertigsten Papiertypen für Wellpappenpapiere. Diese Papiere haben einen großen Frischfaseranteil und haben daher gute Festigkeitseigenschaften.
- **Testliner:**
Testliner sind spezielle Papiertypen für Wellpappen mit Altpapieranteilen von bis zu 100 %.
- **Schrenz:**
Schrenz wird für Deckenpapiere und Wellenpapiere eingesetzt. Er wird ausschließlich aus Altpapier hergestellt. Schrenz ist das Wellpappenpapier mit der niedrigsten Qualität.
- **Halbzellstoff:**
Halbzellstoff wird als Wellenpapier eingesetzt. Er verfügt über eine höhere Steifigkeit als Wellenstoff.
- **Wellenstoff:**
Wellenstoff ist das am häufigsten eingesetzte Rohpapier für die Wellen von Wellpappe in Deutschland.

In der Verpackungsindustrie ist es üblich für die Liner (vor allem die äußeren und inneren Deckenpapiere) stärkere Papiere und für die Wellen leichtere Qualitäten zu verwenden. Da die Hauptaufgabe von Verpackungen der Schutz der verpackten Ware ist, werden die Papiere auf diese Weise kombiniert. Die starken Deckenpapiere verhindern ein Eindringen oder durchstoßen der Verpackung durch Einflüsse von

außen oder der Ware von innen. Die weicheren Wellenpapiere sorgen in Kombination mit ihrer Form für eine gute Dämpfung von Stößen und Schlägen. Punktlasten können so gut auf größere Flächen verteilt werden. Zusätzlich werden bei mehrwelligen Wellpappen die Wellenteilungen meist so gewählt, dass die innenliegende Wellenteilung größer ist als die zur Verpackungsaußenseite liegende Welle. Die Dämpfung gegenüber der Ware ist durch die größere Wellenteilung stärker, während eine feinere Wellen mechanische Einwirkungen von außen, wie Stöße gegen Kanten oder spitze Gegenstände, besser verhindert. Diese Wellenkombination bringt zusätzlich den Vorteil mit sich, dass die Bedruckbarkeit der Außenseite verbessert wird. Ist die Wellenteilung der äußere Welle zu groß und gleichzeitig die Außendecke zu dünn, drücken sich die Wellenberge der äußeren Wellenbahn durch und es entsteht eine unebene Oberfläche.

Um die Eigenschaften der einzelnen Papiere zu verbessern, können vor allem Liner aus mehreren Papieren bestehen, die zusammengegautscht werden. Beim Gautschen werden zweier oder mehr vorgebildeter Faserstofflagen im feuchten Zustand durch Aufeinanderpressen ohne die Verwendung von Klebstoffen miteinander verbunden.

2.2.1.5 Wellpappenherstellung

Die Herstellung von Wellpappe erfolgt vollautomatisch mit Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu 400 m/min und Arbeitsbreiten von bis zu 3350 mm (MENSING 2013). Wellpappenanlagen können in Nasspartie und Trockenpartie unterteilt werden. In der Nasspartie werden mit Hilfe von ineinandergreifenden Riffelwalzen und unter Zufuhr von Wärme und Feuchtigkeit aus ebenen Papieren die Wellenbahnen geformt. Anschließend erfolgt der Leimauftrag in Leimwerken auf den Wellenbergen und die Verklebung der Wellenbahnen mit den Linern. Der Leim enthält eine Mischung von zuvor verkleisterter Stärke und nativer, unverkleisterter Stärke, um eine möglichst geringe Viskosität des Leims zu gewährleisten (ONUSSEIT 2004). Um auch den nativen Stärkeanteil klebefähig zu machen, wird die Pappe beim Zusammendrücken abermals stark erwärmt, da der Stärkeleim erst nach einer Erhitzung geliert und dadurch die erforderliche Klebkraft entwickelt (STEADMAN 2002). Schematische Darstellungen der Herstellung von einseitiger Wellpappe und einer dreiwelligen Wellpappe sind in Abbildung 2-14 und Abbildung 2-15 gegeben.

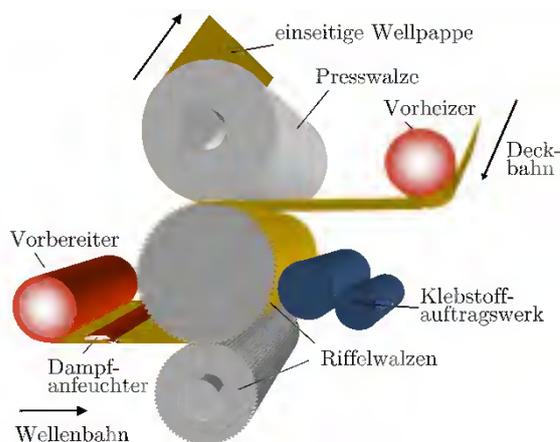


Abbildung 2-14: Herstellung einseitiger Wellpappe, modifiziert nach MENSING 2013

Figure 2-14: Production of single faced corrugated cardboard, MENSING 2013 modified

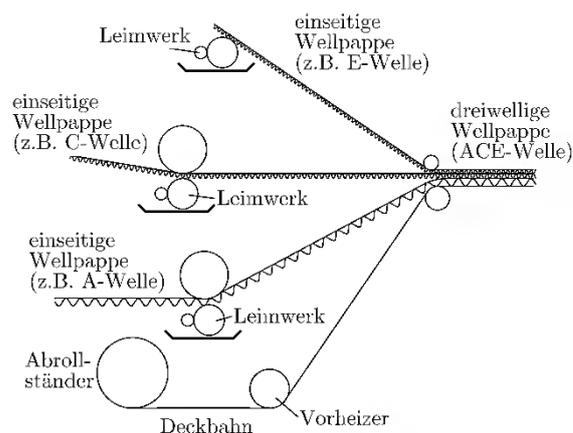


Abbildung 2-15 Herstellung dreiwelliger Wellpappe, basierend auf VDW 2019

Figure 2-15: Production of triple wall corrugated cardboard

Nach dem Verkleben der Papierbahnen erfolgt keine weitere Feuchtigkeits- oder Wärmezufuhr, weshalb der folgende Abschnitt einer Wellpappenanlage Trockenpartie genannt wird. In diesem Teil der Anlage wird das Material je nach Anwendung zugeschnitten, gerillt und auf der Ablage automatisch stapelweise auf Rollenbahnen abgesetzt (VDW 2019).

2.2.2 Materialeigenschaften von Papier und Wellpappe

Die Materialeigenschaften von Papier und Wellpappe variieren sehr stark in Abhängigkeit der eingesetzten Grundstoffe und Verarbeitungsprozesse. Dennoch gibt es einige Materialeigenschaften, die für alle Papiere und Wellpappen charakteristisch sind. Im Folgenden werden ausschließlich solche Eigenschaften behandelt, die für den Einsatz von Wellpappe als Kernmaterial von Sandwichelementen von Bedeutung sind. Zahlreiche andere Eigenschaften wie beispielsweise Oberflächenebenheit, Bedruckbarkeit, Opazität oder Weißgrad sind nicht Teil dieses Berichts.

2.2.2.1 Inhomogenität

Papier ist ein inhomogenes Verbundmaterial aus Fasern, Füllstoffen und Poren (SCHAFFRATH & TILLMANN 2013). In Abhängigkeit von der Blattformation (s. Abschnitt 2.2.1.2) kommen Inhomogenitäten infolge der Faserverteilungen hinzu. Da auf die Papiere wirkende Kräfte hauptsächlich von den Papierfasern übertragen werden, mit herkömmlichen Dickenmessgeräten aber nur der Abstand der Oberflächen bestimmt wird, unterscheiden sich gemessener Querschnitt und mechanische wirksamer Querschnitt um bis zu 30 % (WILKEN 2013).

Die Ausrichtung der Fasern von maschinell hergestellten Papieren hat ein anisotropes Materialverhalten zur Folge.

2.2.2.2 Hygroskopizität

Papier ist hygroskopisch, d. h. es kann in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte und der Temperatur bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes Wasser binden.

Die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften sind abhängig vom Wassergehalt. Aufgrund der Hygroskopizität und der damit verbundenen Effekte bedürfen experimentelle Untersuchungen einer definierten Klimatisierung der Probekörper.

Für den Wassergehalt der Papiere ist es von Bedeutung, ob das Papier den Gleichgewichtszustand durch Desorption oder Adsorption von Feuchtigkeit erreicht hat, da die Wassergehalte der beiden Gleichgewichtszustände voneinander verschieden sind. Um im Rahmen von Forschungsarbeiten vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können, müssen die Proben vor der Klimatisierung auf Testbedingungen zunächst auf ein trockeneres Niveau gebracht werden, um die Ausgleichsfeuchte durch Adsorption zu erreichen (vgl. Casey.1980). Die Sorptionsisothermen für eine bestimmte Temperatur von Zellulose (s. Abbildung 2-16) wurden von Wink.1961 veröffentlicht und zeigen, dass der Wassergehalt nichtlinear von der relativen Luftfeuchte abhängt und dass sich durch Desorption (Linie A in Abbildung 2-16) ein anderer Wassergehalt einstellt als durch Adsorption (Linie B in Abbildung 2-16). Die Linie CD stellt beispielsweise die Entfeuchtung nach vorheriger Befeuchtung auf das Niveau von C dar, die Linie EF die Befeuchtung nach einer vorherigen Entfeuchtung auf das Niveau von E.

Das Adsorptionsvermögen hängt hauptsächlich vom vorherrschenden Druck, der Oberflächenbeschaffenheit und der Temperatur ab. Mit steigender Temperatur nimmt es ab. Der Wassergehalt sinkt also mit steigender Temperatur, auch wenn sich die Menge der Teilchen in der Gasphase nicht verringert. Einer Reduktion des Wassergehaltes von Papier durch höhere Temperaturen steht die Tatsache entgegen, dass wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann - also die Menge der Teilchen in der Gasphase ansteigt.

Welche Wassergehalte sich bei verschiedenen Klimabedingungen einstellen, ist in der Literatur nur für wenige Klimakonfigurationen zu finden. Übliche Papiere weisen bei 23 °C und relativen Luftfeuchtigkeiten zwischen 20 % und 75 % Wassergehalte von 3,8 % bis 10 % auf (SCHAFFRATH & TILLMANN 2013).

Der Wassergehalt w_{H_2O} in % von Papier und Pappe wird nach DIN EN ISO 287 nach Gl. 2-4 bestimmt.

$$w_{H_2O} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad \text{Gl. 2-4}$$

Mit:

m_0 Masse der Probe bei Probenentnahme

m_1 Masse der getrockneten Probe

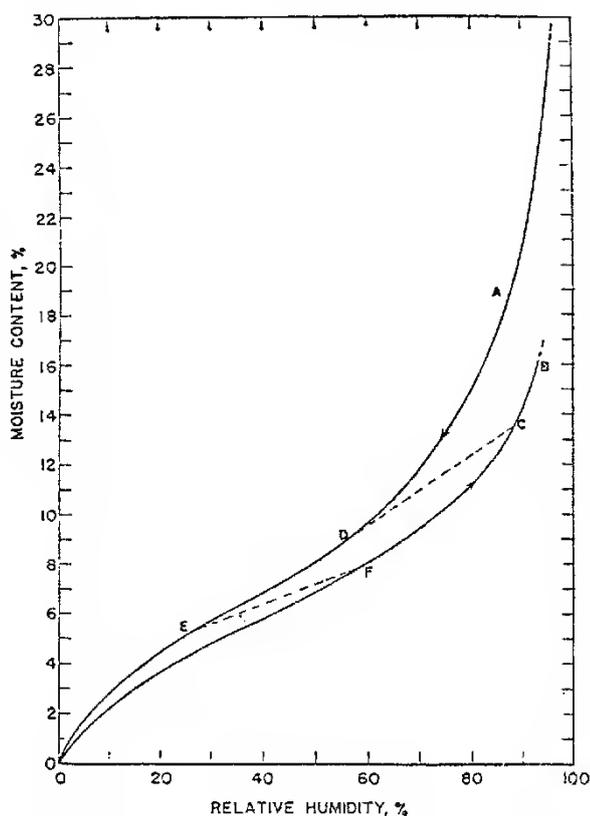


Abbildung 2-16: Sorptionsisothermen von Zellulose, Wink.1961 zitiert nach Haslach, Henry W., JR. (2000)

Figure 2-16: Moisture sorption isotherms of cellulose, Wink.1961 cited after Haslach, Henry W., JR. (2000)

2.2.2.3 Lineare Elastizität

Für Dehnungen, die keine Beanspruchungen über die Linearitätsgrenzen hinaus hervorrufen, können die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen durch elastische Konstanten beschrieben werden. Im Allgemeinen dreidimensionalen Fall wird der Spannungszustand durch drei Normalspannungen, σ_x , σ_y und σ_z sowie sechs Schubspannungen, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ und $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ charakterisiert (GUSTAFSSON & NISKANEN 2012). Die auf einen quaderförmigen Körper wirkenden Spannungen sind in Abbildung 2-17 dargestellt. Der Dehnungszustand ist im dreidimensionalen Fall über drei Dehnungen ε_x , ε_y , ε_z sowie über drei Schubverzerrungen γ_{xy} , γ_{xz} und γ_{yz} definiert. Gemäß des in Abschnitt 2.3 festgelegten Koordinatensystems für Wellpappe (die Hauptachsenbezeichnungen für Wellpappe wird zu 1, 2 und 3 gewählt) gelten die Entsprechungen nach Gl. 2-5.

$$x \cong 1; y \cong 2; z \cong 3; xy \cong 12; xz \cong 13; yz \cong 23$$

Gl. 2-5

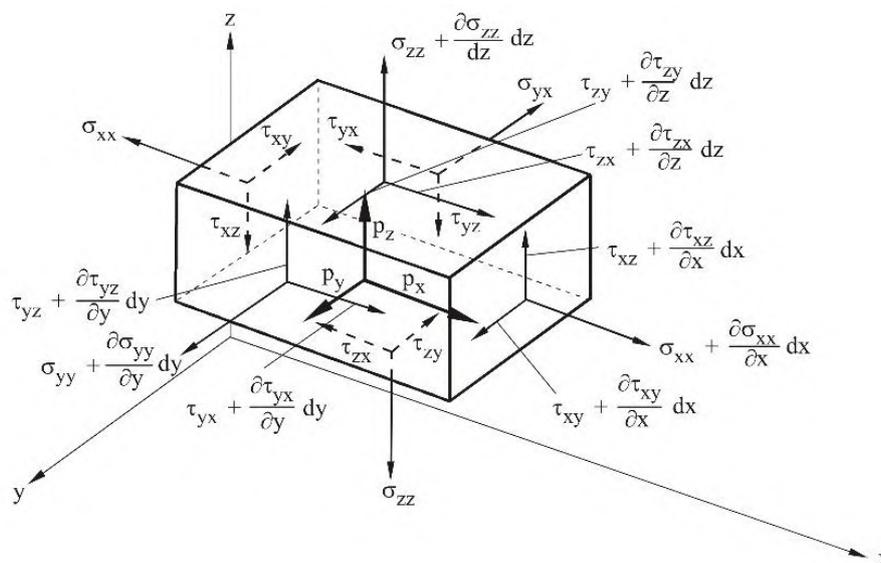


Abbildung 2-17: Spannungskomponenten im dreidimensionalen Spannungszustand, KLEIN 2013

Figure 2-17: Stress components in the three dimensional state of stress, KLEIN 2013

Spannungen und Dehnungen sind Größen, die für homogene Materialien definiert werden können. Bei Papier wird aufgrund der Faserverbundstruktur die Inhomogenität (s. Abschnitt 2.2.2.1) ab einer Feinheit von ca. 1 cm dominant. Die Materialkennwerte von Papier werden daher in der Regel aus makroskopischen Versuchen gewonnen und das Faserverbundmaterial Papier als homogen betrachtet (GUSTAFSSON & NISKANEN 2012).

Die so ermittelten Spannungen sind also nicht die tatsächlich in den Papieren bzw. Fasern wirkenden Spannungen, sondern verschmierte Werte, die sich auf die jeweilige umschlossene Schnittflächen beziehen.

Für die Charakterisierung von stark aufgelösten Strukturen wie z.B. Schäumen und Waben mit großen Zellwandabständen verwenden Gibson.1988 einen sogenannten relativen E-Modul, der durch Division des auf den gesamten Schaumquerschnitt ermittelten E-Moduls (E^* nach GIBSON & ASHBY 1988) durch den E-Modul der Zellwand (E_s nach GIBSON & ASHBY 1988) berechnet wird. Aus verschiedenen Gründen wird dieses Vorgehen für die vorliegende Arbeit nicht angewendet:

- Kommerzielle Wellpappen bestehen aus einer Kombination von verschiedenen Papiersorten. Für die Klassifizierung der Zellwand-E-Moduln müsste hier eine weitere Gewichtung vorgenommen werden, die die Aussagekraft eines bezogenen E-Moduls wieder in Frage stellt.
- Wie oben und in Abschnitt 2.1.4.3 bereits beschrieben, ist die E-Modul-Bestimmung einer einzelnen Papierbahn infolge der vorliegenden Inhomogenitäten bereits mit starken Vereinfachungen verbunden. Die Bezugsgröße wäre daher zusätzlich in Frage zu stellen.

Für Wellpappe wird im Rahmen dieses Berichts eine ähnliche Vereinfachung wie für herkömmliche Kernmaterialien von Sandwichelementen gemäß DIN EN 14509 getroffen. Alle im Folgenden ermittelten Spannungen und Dehnungen und daraus

resultierenden Elastizitätskenngrößen der Materialien werden an makroskopischen Experimenten ermittelt und auf die umschlossene Schnittfläche verschmiert. Das heißt das Kernmaterial Wellpappe wird vereinfacht als homogenes Kontinuum angenommen. Spannungen in den einzelnen Papieren oder den einzelnen Fasern werden nicht betrachtet. Ermittelte Dehnungen werden stets auf die Ausgangslängen bzw. Ausgangsflächen bezogen, es wird mit technischen und nicht mit wahren Dehnungen gearbeitet.

Aufgrund der Faserausrichtung in den Papieren, wie in Abschnitt 2.2.1.2 dargestellt, verhält sich Papier unter mechanischen Einwirkungen stark anisotrop. In Abbildung 2-18 ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Papierprobe getrennt für Zug- und Druckbeanspruchungen parallel zur Produktionsrichtung MD und quer zur Produktionsrichtung CD. Es ist zu erkennen, dass die Steifigkeiten und Festigkeiten für Beanspruchungen in MD höher sind als in CD. Ebenso sind sowohl die Steifigkeiten als auch die Festigkeiten von Papieren unter Zugbeanspruchungen größer als unter Druckbeanspruchungen. Für Zug in CD ist eine größere Dehnbarkeit zu verzeichnen. Nach dem Erreichen der Linearitätsgrenze zeigt der Graph noch eine große Dehnbarkeit, wobei die Spannungen fast nicht mehr anwachsen. Die Dehnbarkeit für Zug in MD ist weniger groß, jedoch kann man auch hier einen Knick in der Kurve erkennen, der die Linearitätsgrenze markiert und nach dem die Kurve mit reduzierter Steigung weiter verläuft. In ZD weist Papier im Vergleich zu Beanspruchungen in MD und CD nur einen Bruchteil der Steifigkeiten und Festigkeiten auf.

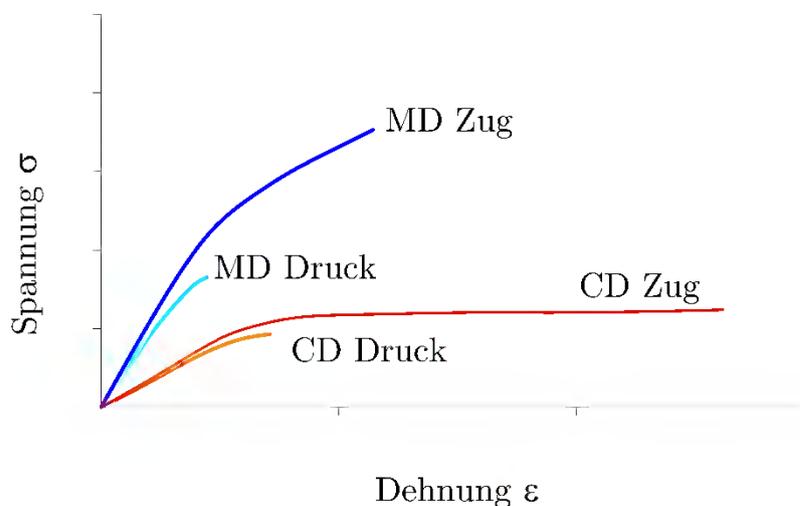


Abbildung 2-18: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Papier unter Zug- und Druckbeanspruchungen in MD und CD, in Anlehnung an Fellers.1980

Figure 2-18: Characteristic stress-strain-curve of paper under tension and compression in MD and CD, cf. Fellers.1980

Neben der Anisotropie der Papiere selbst ist Wellpappe aufgrund ihres Aufbaus und ihrer Struktur stark anisotrop. Wie schon in Abschnitt 2.2.1.5 beschrieben, weist das Material unter vereinfachter Betrachtung drei senkrecht aufeinander stehende Symmetrieebenen auf, was die Beschreibung des Materials als orthotrop nahelegt. Orthotrope Materialien haben drei orthogonal zueinander angeordnete Achsen und werden im elastischen durch neun Parameter beschrieben. Das allgemeine

Elastizitätsgesetz für ein orthotropes Material mit den Bezeichnungen der drei Hauptachsen 1, 2 und 3 ist in Gleichung Gl. 2-6 dargestellt.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & & & \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & & & \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & & \\ & & & & \frac{1}{G_{13}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 2-6}$$

=: S

Die Symmetrie der Nachgiebigkeitsmatrix (definiert zu S) führt zu folgenden Abhängigkeiten, wodurch sich die Zahl der unbekanntelastischen Materialkennwerte auf sechs reduziert:

$$\nu_{21} \triangleq \frac{E_2}{E_1} \nu_{12}; \quad \nu_{31} \triangleq \frac{E_3}{E_1} \nu_{13}; \quad \nu_{32} \triangleq \frac{E_3}{E_2} \nu_{23} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Jedoch ist mit der Kenntnis der unterschiedlichen Materialreaktionen auf Zug- und Druckbeanspruchungen (s. Abbildung 2-18) die Annahme der Orthotropie des Materials nicht korrekt, da hier für jede Achse nur ein Elastizitätsmodul eingesetzt werden kann und keine Unterscheidung nach der Beanspruchungsart (Druck oder Zug) möglich ist.

Sehr viele Stoffe weisen unterschiedliche Druck- und Zugsteifigkeiten auf, darunter auch Baustoffe wie z. B. Beton (SUN ET AL. 2010) aber auch die herkömmlichen Sandwich- Kernmaterialien PU und MW. Solche Materialien werden bimodulare oder multimodulare Materialien genannt. Die Entwicklung von passenden Materialmodellen insbesondere im Hinblick auf die numerische Berechnung dieser Materialien ist bereits seit einigen Jahrzehnten Teil von Forschungsarbeiten (z. B. AMBARTSUMYAN & KHACHATRYAN 1966, JONES 1976, JONES 1977, MEDRI 1982, YAO & YE 2004, HE ET AL. 2009). Problematisch ist, dass die entwickelten Ansätze bislang nicht in den kommerziellen Computerprogrammen, wie z. B. Ansys Inc., Dlubal Software GmbH RFEM oder ABAQUS Inc., implementiert wurden und daher nur schwer anzuwenden sind. Allerdings bietet das orthotrope Materialmodell gemäß Literatur (z.B. NISKANEN 2012, SCHAFFRATH & TILLMANN 2013) in vielen Fällen eine gute Näherung und wird für Papier oder auch PU und MW angewendet. Für die E-Moduln werden dann vereinfachte Ersatzwerte angenommen (z.B. Mittelwert aus Druck und Zug-E-Modul

gemäß DIN EN 14509). Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird dieses Vorgehen für Wellpappe in Abschnitt 4.3.3 näher untersucht.

Typische elastische Materialparameter von Papier wurden getrennt für die drei Richtungen aus der Literatur von GUSTAFSSON & NISKANEN (2012) zusammengefasst und sind in Tabelle 2-4 angegeben. Die ausgewählten Papiere sind mit „Paperboard“, „Carton“ und „Linerboard“ bezeichnet. Differenzierte Angaben zu den Papierzusammensetzungen sind nicht gegeben. Diese drei zufällig angegebenen Papiere geben jedoch einen Anhaltspunkt für die Größenordnung der einzelnen mechanischen Parameter von Papieren, die in der Wellpappenherstellung einsetzbar sind. Es fällt auf, dass die Größen der einzelnen Parameter sich in Abhängigkeit von der Papiersorte unterscheiden. Die hier angegebenen Querdehnzahlen von Papier schwanken besonders stark. Die Angabe von $v_{MDZD} = 2,2$ (Persson.1991) sticht besonders heraus. Dies bedeutet eine Ausdehnung des Materials in der Dickenrichtung ZD, wenn es in MD unter Zug gesetzt wird. Das Volumen des Papiers nimmt also nach Persson.1991 unter Zug zu und unter Druck ab. GUSTAFSSON & NISKANEN (2012) bezeichnet diesen Sachverhalt als üblich. Im Vergleich zu den Werten nach BAUM (1984) (s. Tabelle 2-4) scheint diese Angabe jedoch fragwürdig. In Abschnitt 4.3.2 wird gezeigt, dass dieser Widerspruch für die in dieser Arbeit avisierte Anwendung von Papier und Wellpappe nicht von Bedeutung ist.

Tabelle 2-4: Elastizitätskenngrößen von ausgewählten Papieren

	Table 2-4: Elastic properties of selected papers		
	Paperboard (Persson.1991 ^(*))	Carton (Baum.1987 ^(*))	Linerboard (Baum.1987 ^(*))
Dichte ρ	640	780	691
E in MD	5420	7440	7460
E in CD	1900	3470	3010
E in ZD	17	40	29
v_{MD-CD}	0,38	0,15	0,12
v_{MD-ZD}	-2,2	0,008	0,011
v_{CD-ZD}	0,54	0,021	0,021
v_{CD-MD}	0,14		
v_{ZD-MD}	0,05		
v_{ZD-CD}	0,05		
G_{MD-CD}	1230	2040	1800
G_{MD-ZD}	8,8	137	129
G_{CD-ZD}	8	99	104

(*) zitiert nach Gustafson 2003

2.2.2.4 Viskoelastizität

Papier weist bei Langzeitbeanspruchungen unterhalb der Linearitätsgrenze kein rein elastisches sondern auch ein viskoses Materialverhalten auf und kann daher als viskoelastisch klassifiziert werden. Viskoelastizität ist nach SHAW & MACKNIGHT (2005) bei allen Polymeren zu beobachten, also auch bei Papier als Faserverbundmaterial, dessen Fasern aus organischen Polymeren aufgebaut sind. Kennwerte hierfür können grundsätzlich durch das vorhandene Spannungsniveau, die vorherrschenden

Klimabedingungen sowie die Dauer und Frequenz der Einwirkung beeinflussen werden. Viskoelastizität von Polymersystemen im Allgemeinen werden z.B. von FERRY (1980) (zitiert nach MEISSNER (1985)) grundlegend beschrieben. SALMÉN & HAGEN (2002) arbeiten die speziellen Phänomene für Papier ausführlich auf.

CRIPPS (2007) beschreibt abgeschlossene Bauprojekte mit Papierwerkstoffen. Er erwähnt die Neigung des Materials zu kriechen. Das Kriechverhalten wird jedoch nicht näher beschrieben. In der Dimensionierung der Bauwerke wurde das viskoelastische Materialverhalten berücksichtigt, indem dauerhaft beanspruchte Bauteile nur zu 10 % ausgelastet wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit steht vor allem das Kriech- und Relaxationsverhalten von Pappe infolge von Schubbeanspruchungen im Fokus. Gemäß der praktischen Gültigkeitsgrenze nach Meissner.1985 darf für kleine Dehnungen von linearer Viskoelastizität ausgegangen. Das heißt, dass die viskoelastischen Werkstoffeigenschaften nur von der Zeit und nicht vom aufgetragenen Spannungsniveau abhängen, solange die Dehnung nicht größer als 1 % werden (LÜPKE 2015).

Temperatur und Feuchtigkeit haben gemäß SALMÉN & HAGEN (2002) für das viskose Verhalten von Papier einen großen Einfluss, da Wasserstoffbrückenbindungen, die für die physikalische Papiereigenschaften wichtigsten Bindungen zwischen den Papierfasern, durch erhöhte Temperaturen und Wassergehalte geschwächt bzw. gelöst werden und die Polymere der Papierfasern selbst beim Erreichen der Glasübergangstemperatur vom Glaszustand in den gummiartigen Zustand übergehen. Für trockene Papiere liegen die Glasübergangstemperaturen zwar bei über 200 °C, also weit oberhalb der auf Sandwichelemente im Gebrauchszustand einwirkenden Temperaturen, jedoch wird sie durch die Einwirkung von Feuchtigkeit stark herabgesetzt. Bei trockenen Papieren hat auch die Schwächung der Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern infolge von Temperaturerhöhungen im Temperaturbereich, der für Sandwichelemente üblich ist, nur geringe Auswirkungen. Unter Feuchteeinwirkung kommt es aber zur Lösung von Wasserstoffbrückenbindungen.

2.2.2.5 Versagen von Papier und Pappe

Das Versagen von Papier kann aufgrund unterschiedlicher Ursachen eintreten. Grundsätzlich kann zwischen Zug- und Druckversagen unterschieden werden. Auch Schubversagen kann auf der Grundlage der Hauptspannungsermittlung auf ein kombiniertes Zug-Druck-Versagen heruntergebrochen werden. (Vgl. Gruber (2011))

Unter Zugbeanspruchungen versagt Papier durch Reißen. Hierbei werden in hauptsächlich die Bindungen zwischen den Fasern zerrissen, die Papierfasern selbst bleiben zum größten Teil intakt (vgl. Gruber (2011)). Infolge dessen haben Länge und Breite der Fasern einen sehr großen Einfluss auf die Zugfestigkeit, da pro Faser mehr Berührungspunkte mit größeren Kontaktflächen zu anderen Fasern auftreten, je länger und breiter diese sind. Auch eine höhere Biegeweichheit der einzelnen Fasern ermöglicht eine größere Kontaktfläche an einem Kreuzungspunkt zweier Fasern. Für Beanspruchungen in der Dickenrichtung der Papiere kann es unter Zugbeanspruchungen einerseits zum Reißen und andererseits zur Trennung der Lagen eines

Papiers kommen. Dies spielt insbesondere bei Papieren eine Rolle, die aus zwei oder mehr Lagen zusammengepresst sind (s. Abschnitt 2.2.1.4).

Druckversagen äußert sich für Beanspruchungen in der Papierebenen durch Stabilitätsversagen, wobei die Papiere seitlich ausweichen. Druckversagen durch die Trennung der Papierfasern ähnlich dem Zugversagen kann nur bei sehr gedruckenen Pappen wie z. B. Papphülsen beobachtet werden.

Bei Wellpappe kommen weitere Phänomene infolge ihrer Struktur hinzu. Wird Wellpappe senkrecht zu den ebenen Papieren auf Zug oder durch Schub beansprucht, kann es zum Versagen der Klebefuge zwischen den Wellenbahnen und den Deckpapieren kommen. Die Verklebung kann durch einen Adhäsionsbruch (Ablösung der Klebung vom Untergrund) oder durch einen Kohäsionsbruch (Bruch im Klebstoff selbst) versagen (vgl. HABENICHT (2006)). Infolge von Druckbeanspruchungen in Achse 1 kann es zum Einknicken (also Stabilitätsversagen) der gewellten Papiere kommen. Schub in der Ebene 1-3 kann auch zum seitlichen Knicken der Wellenpapiere führen, wobei alle Wellen einer Lage in der Richtung der Kraft versetzt werden.

2.2.2.6 Bauphysikalische Materialeigenschaften

Papier und Pappe wurden zwar bereits als in einigen Fällen im Bauwesen und im Maschinenbau eingesetzt (s. Abschnitt 2.2.3), sind jedoch noch nicht als Baustoff etabliert. Daher sind nur wenige bauphysikalische Parameter charakterisiert. Im Folgenden werden bekannte Grundlagen zu den Materialeigenschaften hinsichtlich Wärmeschutz, Feuchteschutz und Brandschutz beschrieben. Wie bereits in Abschnitt 2.1.6 dargelegt, werden die übrigen Teilgebiete der Bauphysik im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht beleuchtet.

2.2.2.6.1 Wärmeschutz

In einem Sandwichelement mit einem Kern aus Wellpappe können prinzipiell alle Formen der Wärmeübertragung stattfinden. Wärmeleitung findet durch die Papiere und Klebeschichten hindurch statt. Strahlungsübertragung tritt zwischen den Oberflächen der Papiere auf. Da Luft in den Zwischenräumen ist, kann es zu Wärmetransport über freie Konvektion der Luft kommen. Wenn Konvektion nicht auftritt, so tritt dennoch Wärmeleitung in der Luft auf. Die Wärmeübertragung durch Wellpappe unterscheidet sich je nach Ausrichtung des Kernmaterials im Sandwichelement, da die Papierfaserausrichtung sowie die Lage der gewellten und ebenen Papiere zur Übertragungsrichtung Einfluss auf Art und Größe der einzelnen Wärmetransportarten nehmen (vgl. POHL (2009)).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Wärmeübertragung in einem Kern aus Wellpappe zu bestimmen. Neben der experimentellen Bestimmung stehen numerische und analytische Methoden zur Verfügung. Die Qualität der numerischen Ergebnisse hängt stark von der Modellgenauigkeit und von der Genauigkeit der implementierten Randbedingungen ab.

Für die Wärmeleitung durch aufgelöste Strukturen ähnlich der von Wellpappe wurden bereits von SWANN & PITTMANN (1961) sowie STROUD (1965) analytische Ansätze präsentiert. Diese wurden von POHL (2009) bereits auf Wellpappe angewendet. Hier wurden die Inhomogenität der Papiere, die Schwankungen der Wellengeometrie, die

Lage der Wellen zueinander sowie der Einfluss der Verklebung mit weiteren sehr starken Vereinfachungen und nicht validierten Annahmen abgebildet. Auch die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Papiere, die eine Eingangsgröße für die analytische Bestimmung der Leitfähigkeit von Wellpappe ist, ist problembehaftet, da sie einerseits selbst richtungsabhängig ist und nur wenige Vergleichswerte in der Literatur zu finden sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden Wärmeleitfähigkeiten ausschließlich experimentell ermittelt.

Wärmestrahlung ist der Wärmetransport zwischen zwei Oberflächen von Körpern über elektromagnetische Wellen. Die auf einer Oberfläche auftreffende Strahlung wird von dieser reflektiert, absorbiert und/oder transmittiert. Opake Oberflächen transmittieren keine Strahlen. In einem Sandwichelement mit Wellpappenkern tritt also nur Reflexion und Absorption auf den Papier- und Deckschichtoberflächen auf. Die Größe der emittierten Strahlung hängt vom der Oberflächenbeschaffenheit eines Körpers ab und wird mit Hilfe des Emissionsgrades ε charakterisiert. Der Wärmeübergang zwischen zwei Flächen hängt auch noch vom Winkel zwischen den Oberflächen und dem Temperaturunterschied zwischen den Flächen ab. Im Rahmen dieser Arbeit werden keine analytischen oder numerischen Berechnungen zum Wärmeübergang durch Strahlung durchgeführt.

Konvektion kann nur in Flüssigkeiten und Gasen auftreten, da hier der Wärmetransport durch die Fortbewegung von Teilchen erfolgt. Bei Wellpappe ist die Luft in den Papierzwischenräumen das übertragende Gas. Wenn Konvektion auftritt, ist die Berechnung des Anteils der Wärmemenge, die durch Konvektion übertragen wird, sehr schwierig und bedarf in der Regel experimentellen Untersuchungen. Es gibt jedoch zuverlässige vereinfachte Handrechenmethoden, die eine Vorhersage ermöglichen, ob sich Konvektion überhaupt einstellt. Die NASA untersuchte bereits in den 1960er Jahren den Einsatz von Sandwichpaneelen mit Wabenkern als Außenhülle zum Einsatz in der Luft- und Raumfahrt. CATTON & EDWARDS (1967) zeigen eine Abschätzung zum Auftreten freier Konvektion für solche Bauteile. Sie untersuchen die Einflüsse auf freie Konvektion innerhalb der Waben unter der Annahme verschiedener Randbedingungen. Im Fokus stehen hier das Verhältnis von Zelldurchmesser zu Plattendicke sowie die Leitfähigkeit der Zellwände. Die honigwabenähnlichen Zellen werden vereinfacht als zylindrische Röhren betrachtet. Bei Wellpappe stellt sich die Frage nach Konvektionsvorgängen vor allem dann, wenn Wellpappe im Sandwichelement so ausgerichtet ist, dass die in Luft von einer Deckschicht zu anderen strömen könnte (Elementtyp 2 gem. Abbildung 2-23). POHL (2009) zeigt in ihrer Arbeit bereits, dass für die von ihr getesteten Wellpappensorten in dieser Ausrichtung keine freie Konvektion auftritt. Die Lufträume, die sich zwischen einer Welle und einem Liner ergeben, wurden hier vereinfacht als zylindrische Röhre betrachtet.

In Abschnitt 5.1.2 wird versucht, eine allgemeine Antwort auf die Frage, ob in Sandwichelement mit Wellpappe als Kernmaterial freie Konvektion auftreten kann, zu treffen.

Papier hat eine Wärmeleitfähigkeit von $0,013 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bis $0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ HOLIK (2013b). Die hier angegebenen Werte beziehen sich auf die Wärmeleitfähigkeit in der Papierdickenrichtung ZD. In der Papierebene, weder in MD noch in CD sind der Literatur Wärmeleitfähigkeiten zu entnehmen.

Für Zelluloseflocken als lose Schüttung zur Dämmung von Gebäuden liegen zahlreiche Wärmeleitfähigkeiten vor. Sie variieren je nach Hersteller zwischen 0,04 W/m·K und 0,045 W/m·K.

In der Literatur sind Angaben zur Wärmeleitfähigkeit von Wellpappe zu finden. POHL (2009) ermittelt im Rahmen ihrer Dissertation (s. auch Abschnitt 2.2.3.1) unter anderem Wärmeleitfähigkeiten für eine Wellpappe, allerdings nur in Richtung von Achse 2. Ihre experimentellen Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit λ reichen von 0,075 W/m·K bis 0,095 W/m·K.

HINGERL & ASCHAUER (1995) weisen in Ihrem Beitrag zwar die Bezeichnung „Papierwaben“ aus, jedoch kann den Abbildungen entnommen werden, dass ein Wellpappe-Produkt als Wärmedämmung eingesetzt wurde. Die für die Wärmeleitung wirksame Richtung der Wellpappe entspricht der in der vorliegenden Arbeit definierten Achse 2. Ohne weitere Angaben und nachvollziehbare Herkunft der Daten wird eine Wärmeleitfähigkeit für das Kernmaterial von 0,04 W/m·K ausgewiesen.

RUSS ET AL. (2013) präsentieren Ergebnisse eines Forschungsprojekts (s. auch Abschnitt 2.2.3.1) zum Einsatz von Wellpappe als Wärmedämmung. Die experimentell ermittelten Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,045 W/m·K. Im Rahmen des Projekts wurde nur die Wärmeübertragung in Richtung von Achse 1 der Wellpappe untersucht. Eine weitere Erkenntnis von RUSS ET AL. (2013) hinsichtlich des Wärmeschutzes ist, dass die Wärmeleitfähigkeit von der Art und Menge der eingesetzten Klebstoffe abhängt. Eine genaue Quantifizierung des Einflusses ist nicht dokumentiert.

Das Zellstoffverbundelement (s. auch Abschnitt 2.2.3.2) ist eine Dämmung aus Wellpappe, wobei ausschließlich Achse 1 der Wellpappe der Richtung des Wärmeübergangs entspricht. Der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit wird im technischen Datenblatt (Betz Dämmelemente GmbH 2018) mit 0,04 W/m·K angegeben, in der bauaufsichtlichen Zulassung (DiBt 2016a) ist ein Wert von 0,0497 W/m·K gefordert.

Die Auslegung von Gebäudehüllen hinsichtlich ihre Wärmedämmfähigkeit erfolgt über den Wärmedurchgangskoeffizienten U (auch U-Wert), der sich nach Gl. 2-8 durch Division der Wärmeleitfähigkeit λ durch die Dicke des Bauteils ergibt. Je nach Gebäudeklasse und Nutzung gibt es unterschiedliche Anforderungen an eine obere Grenze für den Wärmedurchgangskoeffizienten U .

$$U = \lambda/d \quad \text{Gl. 2-8}$$

Die meist maßgebenden Grenzwerte der U-Werte von beheizten Gebäuden werden durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) in regelmäßigen Zeitabständen veröffentlicht. Für unbeheizte Gebäude werden in DIN 4108-2 ebenfalls Grenzwerte für U-Werte „zur Vermeidung von Tauwasser und unhygienischen Raumluftverhältnissen“ (Zitat aus DIN 4108-2) festgelegt.

2.2.2.6.2 Feuchteschutz

Wie in den Abschnitten 2.2.2.2 und 2.2.2.4 beschrieben, ist Papier und Pappe hygroskopisch und weist mit zunehmendem Wassergehalt geringere Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Zugelassene Bauprodukte aus Papier und Pappe dürfen daher nur in vor Feuchtigkeit, Niederschlag und Bewitterung geschützten Bereichen eingebaut werden (s. DiBt (2016b), DiBt (2016a)). Die Aufgabe des Feuchteschutzes in einem

Sandwichelement ist eindeutig den Deckschichten zuzuweisen. Dennoch soll dieser Punkt auch im Hinblick auch das neuartige Kernmaterial kurz betrachtet werden, da ein Eindringen von Feuchtigkeit in den Kern bei unsachgemäßer Verwendung der Sandwichelemente möglich ist.

Es gibt die Möglichkeit, Papiere mit Zusatzstoffen zu versehen, sodass eine Nassfestigkeit erreicht werden kann. Davon ist aber nur die Zugfestigkeit betroffen. Nassfeste Papiere können im nassen Zustand keine Druckkräfte übertragen, da die Steifigkeit so gering ist, dass es schon bei sehr kleinen Druckspannungen zu Stabilitätsversagen kommt.

Die Hydrophobierung von porösen Oberflächen wird bereits seit einigen Jahrzehnten erforscht (z. B. CASSIE & BAXTER (1944)) und ist auch Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben. KOŞAK SÖZ ET AL. (2018) zeigen in ihrem Beitrag eine Entwicklung für die Superhydrophobierung einer Papieroberfläche. Problematisch für die Anwendung in einem Sandwichelement mit Wellpappenkern wäre, dass es sich um eine Oberflächenbeschichtung handelt. An unbehandelten Oberflächen wie z. B. Schnittflächen wäre das Eindringen von Wasser weiterhin möglich.

2.2.2.6.3 Brandschutz

Für Papier und Wellpappe gibt es keine allgemein gültigen Brandschutzklassifizierungen. Das Brandverhalten hängt von der stofflichen Zusammensetzung der Produkte und von ihrer Form und Struktur ab.

Eine flammhemmende oder flammfeste Ausrüstung von Papieren ist grundsätzlich z. B. mit Salzen möglich. Die Recyclebarkeit wird zwar durch die Zusatzstoffe nicht eingeschränkt, jedoch geht mit dem Einsatz vieler solcher Ausrüstungen eine größere Umweltbelastung einher. Zusätzlich kann es zur Entstehung giftiger Gase kommen, wenn die Flammenschutzmittel einem Brand ausgesetzt sind (EEKHOUT ET AL. 2008). Außer Boraten kommen auch Ammonium- und Aluminiumsalze zur Anwendung. Als Ergebnis eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit beauftragten Forschungsvorhabens (LEISEWITZ ET AL. 2000) gelten diese hinsichtlich Toxizität, Ökotoxizität, Kreislauffähigkeit als unproblematisch anwendbar, Borate hingegen als Stoffe mit "problematischen Eigenschaften".

Das einzige derzeit in Deutschland bauaufsichtlich zugelassene Bauprodukt aus Wellpappe ist das Zellstoffverbundelement. Hinsichtlich der Brandschutzeigenschaften gibt es unterschiedliche Formen des Produkts. In der bauaufsichtlichen Zulassung (DiBt 2016a) ist die Anforderung an Bauprodukte der Klasse E nach DIN EN 13501 gestellt. Im Datenblatt des Herstellers (Betz Dämmelemente GmbH 2018) wird die Klasse B2 (normal entflammbar) nach DIN 4102 angegeben, was keinen Widerspruch zur Klasse E nach DIN EN 13501 darstellt. Diese Angaben scheinen für unbehandelte Wellpappe zu gelten. Laut Onlineportal Ökologisch Bauen (2019) ist durch eine nicht näher beschriebene Modifikation eine Brandschutzklasse B1 (schwer entflammbar) nach DIN 4102 zu erreichen.

Zelluloseflocken (s. auch Abschnitt 2.2.3.2) als Dämmstoff werden zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften mit Bor-, Ammonium- und Aluminiumsalzen ausgerüstet. Die Brandschutzmittel werden mit verschiedenen Verfahren appliziert, jedoch ist bei allen eine gleichmäßige Verteilung auf der Flockenoberfläche schwer

möglich. Daher werden bis zu 25 Gew.-% an Salzen zugesetzt. Die meisten Produkte sind als "normal entflammbar" klassifiziert (z. B. DiBt (2016b)).

2.2.2.7 Dauerhaftigkeit und Widerstand gegen Destruenten

Papiere, die im Zeitraum von 1850 bis 1970 hergestellt wurden, sind nicht dauerhaft, da ihr Milieu herstellungsbedingt sauer ist und dadurch eine Zerfallsreaktion stark beschleunigt wird. Seit einigen Jahrzehnten werden Papiere jedoch bei der Herstellung mit alkalischen Reserven versehen, sodass Papiere als haltbar betrachtet werden können (vgl. ROTH (2006)). Für übliche Nutzungszeiträume von Sandwichelementen (50 - 80 Jahre) kann daher auch von Haltbarkeit ausgegangen werden.

Auch Destruenten wie Pilze und Insekten (z.B. Milben, Motten, Papierfischchen), können Papier und Pappe zerstören bzw. sich davon ernähren. Bei den auf dem Markt befindlichen Bauprodukten aus Papier findet man daher in der Regel biozide Zusätze (z. B. DiBt (2016a), DiBt (2016b)).

2.2.3 Papier und Pappe als Baustoff

Paper and Board as a Building Material

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Bewertung von Wellpappe als alternativer Kernwerkstoff für Sandwichelemente. Bevor auf die Besonderheiten des Materials eingegangen wird, soll in diesem Abschnitt ein Überblick über bekannte Baustoffe aus Papier und Pappe sowie Forschungsarbeiten zum Einsatz von Papier und Pappe als tragende Elemente in Gebäuden oder Maschinen gegeben werden. Außerdem soll hier auf Einsatzgebiete für Sandwichelemente mit aufgelösten Kernstrukturen ähnlich der von Wellpappe eingegangen werden.

Die Idee, Papier als Baustoff einzusetzen ist nicht neu. Bereits 1930 wurden im sogenannten „Paper House“ in Rockport, Massachusetts - USA, tragende Wände und Teile der Dachkonstruktion aus Papier gebaut.

Der Einsatz von Papierwabenplatten ist neben der Verwendung in Zimmertüren auch in der Automobilindustrie und in der Luft- und Raumfahrt verbreitet. Die Anforderungen an diese Bauteile und die eingesetzten Kernmaterialien sind hingegen nur bedingt mit denen an ein Sandwichelement als Fassadenbauteil vergleichbar. Die verwendeten Papierqualitäten sind in der Regel besonders hoch und daher viel teurer als die in der Verpackungsindustrie üblichen Papiere. Die Wärmedämmfähigkeit spielt häufig eine untergeordnete Rolle und die Papiere werden meist durch Beschichtungen oder Tränkungen ertüchtigt, was den Preis der Kernmaterialien ebenfalls erhöht. Es kommen beispielsweise Phenolharz getränkte Natron-Kraft-Papiere (Bossel 1962) oder PU beschichtete Wellpappen (PFLUG ET AL. (1999), PFLUG ET AL. (2002)) zum Einsatz. Häufig werden auch Aramid-Papiere verwendet. Diese Papiere bestehen jedoch aus synthetischen, aromatischen Polyamidpolymeren. Im Folgenden wird nur auf Papier und Pappe als Baustoff in der Bauindustrie eingegangen.

2.2.3.1 Forschungsarbeiten

Wellpappe und Papierwaben als Kernmaterial für Sandwichelemente in der Bauindustrie sind nur Gegenstand weniger Forschungsarbeiten.

Die Möglichkeiten, Papier und Pappe als Baustoff einzusetzen, wird seit dem Jahr 2000 intensiv an der TU Delft erforscht. Große Teile der Forschungsaktivität sind von EEKHOUT ET AL. (2008) zusammengefasst. Es werden Wellpappe, Papierwabenplatten und Hartpapierhülsen untersucht. Ein großer Schwerpunkt liegt hier auf architektonischen Gesichtspunkten und dem Einsatz von Papierhülsen. SCHÖNWÄLDER & ROTS (2008) untersuchen das mechanische Verhalten von Wellpappe und Papierwaben an Materialproben und an zusammengesetzten Bauteilen, die ausschließlich aus Papierwerkstoffen bestehen. In SCHÖNWÄLDER ET AL. (2004) werden auch Langzeituntersuchungen vorgestellt. Die Arbeiten aus Delft gehen davon aus, das Papier und Pappe als einzige tragende Materialien eingesetzt werden. Verbundquerschnitte mit anderen Materialien wie Holz, Metall oder Kunststoffe werden nicht behandelt. Resultierend aus dieser Annahme unterscheiden sich die Anforderungen und Beanspruchungen von denen, die an ein Kernmaterial für Sandwichelemente gestellt werden.

An der ETH Zürich entstanden ebenfalls Forschungsarbeiten an Wellpappe als Baustoff. POHL (2009) untersuchte im Rahmen ihrer Dissertation Wellpappe als Kernmaterial von Sandwichbauteilen, die als tragenden Wandelementen eingesetzt werden sollten. Neben unbehandelter Wellpappe untersuchte sie auch eine mit einer Zementsuspension getränkte Pappe. Durch die Suspension werden die Brandschutz- und Feuchteschutzeigenschaften stark verbessert. Die mechanischen Eigenschaften von einer Wellpappensorte werden für ausgewählte Beanspruchungsszenarien und die Wechselwirkungen mit unterschiedlichen Verbundwerkstoffen als Deckschichten analysiert. Aufgrund des vorgesehenen Einsatzes als tragende Wände wurden allerdings Deckschichtstärken und Kerndicken untersucht, die für Sandwichelemente als Fassadenelemente nicht von Bedeutung sind. Das Tragverhalten der untersuchten Bauteile unterscheidet sich grundlegend von den Sandwichelementen, die im hier beschriebenen Forschungsvorhaben untersucht werden sollen. Sandwichelemente im Sinne dieses Forschungsprojekts, also zur Verkleidung von Dach- und Wandflächen, erfahren hauptsächlich Beanspruchungen, die senkrecht zur Elementebene wirken. Die Elemente werden also als Platte beansprucht. Da aus dieser Beanspruchung andere Anforderungen an das Kernmaterial gestellt werden, ist für die Frage der Eignung als Kernmaterial für Sandwichelemente als Dach- und Wandverkleidung noch erheblicher Forschungsbedarf vorhanden. AYAN (2009) stellt in ihrer Dissertation Untersuchungen zum Einsatz von Wellpappe als Baustoff vor. Hierbei stehen sowohl die Baukonstruktion als auch ästhetische Aspekte in Fokus. Außerdem werden Umwelteinflüsse von Wellpappe als Baustoff analysiert.

In SADEGHIAN & MCCRACKEN (2017) sowie in SADEGHIAN & MCCRACKEN (2018) werden Untersuchungen einer Forschergruppe der Dalhousie University in Halifax präsentiert. Es werden Sandwichelemente mit Wellpappe als Kernmaterial und Deckschichten aus Naturfaserverstärkten Polymeren als Biegeträger untersucht. Das Kernmaterial wird hier nicht separat charakterisiert.

Im Rahmen des Projekts "Bauen mit Papier", das seit dem Jahr 2017 unter Federführung der TU Darmstadt mit Beteiligung von zwei Hochschulen bearbeitet wird, soll Papier umfassend als Baumaterial bewertet werden. Die Forschung umfasst hier nicht nur mechanische und bauphysikalische Aspekte, sondern auch Belange der Papierchemie, Umformtechnik, Architektur, Baukonstruktion und Fertigung. Zum

Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit sind aus dem Projekt drei Veröffentlichungen entstanden. LÜBKE ET AL. (2018) zeigen Ergebnisse zu Verbundbauteilen aus Wellpappe und Glass. Die anderen Arbeiten (NAU ET AL. (2018), KOŞAK SÖZ ET AL. (2018)) befassen sich mit speziellen wasserabweisenden Beschichtungen und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher beleuchtet.

2.2.3.2 Bauprodukte und Bauprojekte mit Papier und Pappe

Obwohl nur wenige Forschungsarbeiten zu Papier und Pappe als Baustoff entstanden sind, gibt es einige Bauprojekte, bei denen Papierwerkstoffe eingesetzt wurden. Außerdem gibt es einige Bauprodukte auf Papierbasis. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Projekte und Bauprodukte aufgeführt, um die grundsätzlichen Einsatzbereiche darzustellen.

2.2.3.2.1 Papierhülsen

Papier hat eine große Tradition in Japan, und die Verwendung von Papier für Sichtschutzwände oder leichte Türbespannungen ist schon lange etabliert. Der japanische Architekt Shigeru Ban hat seit 1986 zahlreiche Projekte mit Papier und Pappe realisiert. Meist setzt er Hartpapierhülsen mit Durchmessern von bis zu 600 mm und Wandstärke bis etwa 20 mm für seine Tragwerke ein und errichtet damit temporäre, recyclebare Strukturen. Zwei der herausragenden Projekte von Ban mit Papierhülsen sind der Japanische Pavillon zur Expo in Hannover aus dem Jahr 2000 und eine Kathedrale in Christchurch (Neuseeland) (s. Abbildung 2-19), die 700 Personen Platz bietet und für einen Lebensdauer von 20 Jahren geplant wurde. Viele Projekte von Ban sind von EEKHOUT ET AL. (2008) und BAN ET AL. (2014) ausführlich zusammengefasst. Hier sind auch weitere Projekte und Forschungsarbeiten an Papierhülsen näher erläutert. Ein Überblick über das Bauen mit Papierhülsen wird auch von BANK & GERHARDT (2016) gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit soll nicht näher auf Papierhülsen eingegangen werden.



Abbildung 2-19: Kathedrale aus Papphülsen in Christchurch (NZL);
(www.shigerubanarchitects.com ©Bridgit Anderson)

Figure 2-19: Paper tube cathedral in Christchurch (NZL), (www.shigerubanarchitects.com ©Bridgit Anderson)

2.2.3.2.2 Zelluloseflocken

Lose Flocken auf Zellulosebasis sind mittlerweile als Dämmstoff etabliert. Sie bestehen zum größten Teil aus Altpapier, meist aus alten Zeitungspapieren. Sie werden vor allem in Hohlräumen in der Ständerbauweise oder als Zwischensparrendämmung in Dächern verwendet. Es gibt zahlreiche Hersteller, die Zelluloseflocken mit Rohdichten von 30 bis 80 kg/m³ anbieten. Die Flocken bestehen meist aus recyceltem, zerfasertem Zeitungspapier, das mit bestimmten Salzen und Säuren zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften und des Widerstandes gegen Destruenten (s. auch Abschnitt 2.2.2.7) behandelt wird (DIEKMANN ET AL. 2016).

2.2.3.2.3 Papierwabenplatten

Mit Papierwabenplatten sind hier plattenförmige Elemente gemeint, die aus Papieren mit honigwabenähnlicher Struktur oder auch Wellpappe bestehen. Die Zellen der Waben sind dabei immer so ausgerichtet, dass man in eine Zelle hineinschauen könnte, wenn man die Deckschichten entfernen würde.

Papierwabenkerne mit unbehandelten Papieren wurden bislang nur selten als tragende Elemente eingesetzt. Die Architekten Ad Kil und Ro Koster stellten 2005 aus mit Papierdeckschichten kaschierten Papierwabenplatten den gesamten Innenausbau eines Büros her. Dabei wurden die Elemente als Trennwände und für den Möbelbau

eingesetzt. Für das Tragwerk haben die Wabenplatten jedoch keine Funktion (VAN DOOREN & VERHEIJEN 2008).

Die Architekten Stuchburry und Pape entwickelten das „Cardboard House“, dessen Haupttragelemente aus kaschierten Papierwabenplatten bestehen (VAN DOOREN & VERHEIJEN 2008).

Wabenartige Kerne für Sandwichelementen aus naturbelassenen Papieren spielen bislang keine Rolle. Ähnlich zu der Modifikation der Wellpappe von POHL (2009) wurde von einer Schweizer Firma ein zementgetränktes Produkt namens ECOCELL auf den Markt gebracht. Die Wellpappenkerne werden mit Holzdeckschichten verklebt und hauptsächlich für den Bau von Wohngebäuden eingesetzt.

Papierwabenplatten, die kontinuierlich aus Wellpappe hergestellt werden können, werden im Möbelbau bereits eingesetzt. Im Rahmen der europäischen Forschungsprojekte „FoldHex-ThermHex-TorHex“ wurden an der K.U. Leuven neuartige Wabenkernmaterialien und ihre Produktionsprozesse entwickelt (vgl. PFLUG ET AL. 1999). Das Produkt „TorHex“ wird kontinuierlich aus Wellpappe gemäß Abbildung 2-20 hergestellt. Die maximale Elementdicke ist auf 60 mm begrenzt.

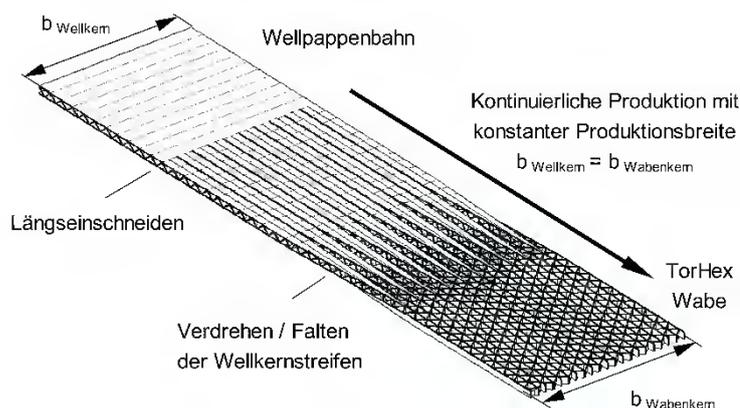


Abbildung 2-20: TorHex - Faltwabe aus Wellpappe, aus PFLUG ET AL. (1999)

Figure 2-20: TorHex – Folded honeycomb, PFLUG ET AL. (1999)

2.2.3.2.4 Wellpappe

Im System-Fertighaus „Wikkelhouse“ einer niederländischen Firma wird einseitige Wellpappe in vielen Schichten zu einer Röhre verklebt, die den Querschnitt des späteren Hauses darstellt. Die Wellpappe bildet die Tragstruktur. Die Röhren haben eine Länge von 1,2 m, die bei Bedarf aneinandergereiht werden können (LATKA 2018).

Das Zellstoffverbundelement ist ein bauaufsichtlich zugelassenes Bauprodukt (DiBt 2016a). Es besteht aus mehreren Schichten von verklebter, handelsüblicher zweiwelliger oder dreiwelliger Wellpappe zur Wärmedämmung von Gebäuden. Es darf entsprechend der bauaufsichtlichen Zulassung als nicht druckbelastete Zwischensparrendämmung, Dämmung von Holzrahmen- und Holztafelbauweise und als Innendämmung von Dach und Wandbauteilen sowie Raumtrennwänden eingesetzt werden. Die Wellpappe leistet keinen Beitrag zum Lastabtrag. Sie ist vor Feuchtigkeit, Niederschlag und Bewitterung zu schützen und darf als normalentflammbarer Baustoff verwendet werden.

Laut Betz Dämmelemente GmbH (2019) werden die Wellpappenlagen für eine optimale Wärmedämmung jeweils abwechselnd längs und quer verklebt. Die Verbindung der Papiere erfolgt mit Leim auf Wasserglasbasis. In Abbildung 2-21 ist eine Fotografie eines Zellstoffverbundelements gezeigt.



Abbildung 2-21: Zellstoffverbundelement (Betz Dämmelemente GmbH 2019)

Figure 2-21: Cellulose composite element „Zellstoffverbundelement“
(Betz Dämmelemente GmbH 2019)

Im Gegensatz zu Papierwabenkernen ist die Wellpappe so ausgerichtet, dass die Elementdickenrichtung senkrecht zu den ebenen Papieren der Wellpappe liegt.

2.3 Kernausrichtung

Da Wellpappe wie zuvor beschrieben stark anisotrope Materialeigenschaften aufweist, ist die Ausrichtung des Kernmaterials in einem Sandwichelement von großer Bedeutung für die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften des Sandwichelements. In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Möglichkeiten der Kernausrichtung beschrieben und für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit definiert.

Um die verschiedenen Kernausrichtungen beschreiben zu können, wird zunächst ein Koordinatensystem für Wellpappe eingeführt.

Anhand der Ausrichtung der Riffelwalzen (s. Abbildung 2-14) wird deutlich, dass Papiermaschinenrichtung MD und damit die Faserausrichtung der ebenen Papierbahnen und der Wellenbahnen immer in Richtung der Wellen vorliegen muss. MD und die Richtung der Wellpappenanlage sind gleich. Betrachtet man einen Volumenkörper aus vielen Schichten von Wellpappe, lassen sich drei senkrecht aufeinander stehende Symmetrieachsen² finden, die mit den Achsen von MD, CD und ZD der Papiere

² Vor allem unter Berücksichtigung des Einsatzes unterschiedlicher Wellentypen aber auch infolge der Materialinhomogenitäten (s. Abschnitt 2.2.2.1) stellen diese Achsen keine Symmetrieachsen dar. Für die ingenieurmäßige Herangehensweise an die Materialcharakterisierung wird diese Ungenauigkeit

übereinstimmen. Ein solcher Körper aus Wellpappe ist in Abbildung 2-22 dargestellt. Die Achsen werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit mit „1“, „2“ und „3“ bezeichnet.

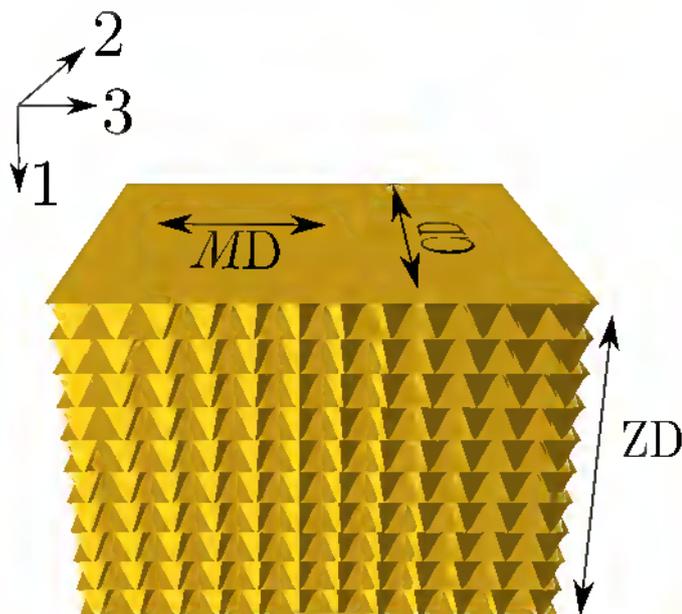


Abbildung 2-22: Ausrichtung der Papierbahnen in der Wellpappe und Definition eines Koordinatensystems für Wellpappe

Figure 2-22: Orientation of the paper webs in corrugated cardboard and definition of a coordinate system for corrugated cardboard

Unter der Voraussetzung, dass die Hauptachsen des Kernmaterials stets parallel oder orthogonal zu den Hauptachsen des Sandwichelements orientiert werden, ergeben sich für das Material Wellpappe sechs voneinander verschiedene Kernausrichtungen in einem einachsigen gespannten Sandwichelement. Die Ausrichtungen sind in den Abbildung 2-23 a) bis f) dargestellt und werden mit "Typ 1" bis "Typ 6" bezeichnet. Hierbei sind die XYZ-Koordinatensysteme immer am Element orientiert. X entspricht der Längsachse in Spannrichtung, Y der Querrichtung des Sandwichelements und Z der Elementdickenrichtung. Die Deckbleche sind hier nicht dargestellt und würden bei allen Teilbildern auf den Ober- und Unterseiten der Quader angeordnet werden. Die in Abbildung 2-22 definierten Koordinatenachsen 1, 2 und 3 der Wellpappe sind ebenfalls in Abbildung 2-23 enthalten.

jedoch als akzeptabel erachtet und ist bereits in der Fachliteratur etabliert (z.B. Niskanen.2012, Schaffrath.2013).

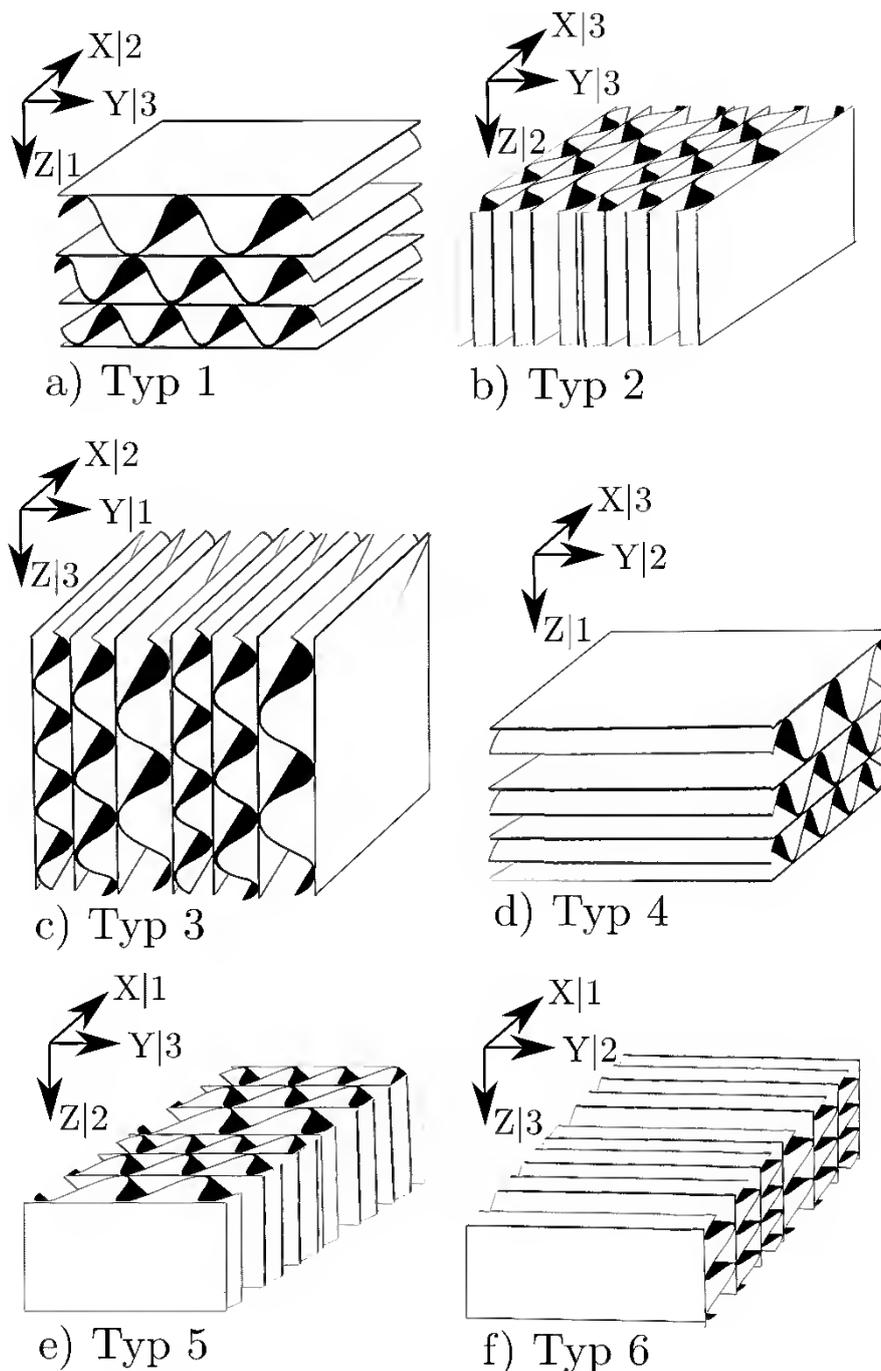


Abbildung 2-23: Mögliche Kernausrichtungen, Elementtypen 1 bis 6 (Deckbleche nicht dargestellt, jeweils auf Ober- und Unterseite der Quader)

Figure 2-23: Possible orientations of the core material, element types 1 to 6 (face sheets not depicted, located on the top and bottom of each cuboid)

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Typen 1 bis 3 näher untersucht. Die Typen 4 bis 6 erhält man durch Drehen des Kernmaterials um 90° um die Achse in Dickenrichtung der Elemente. Da die bauphysikalischen Eigenschaften (insbesondere die Wärmeleitfähigkeit) der Elemente hauptsächlich von den Kerneigenschaften in Elementdickenrichtung abhängen, wird erwartet, dass diese Eigenschaften vollständig mit den Typen 1 bis 3 untersucht werden können. Hinsichtlich der mechanischen

Eigenschaften weisen die Typen 4 bis 6 im Vergleich große Nachteile gegenüber dem jeweiligen Pendant der Typen 1 bis 3 auf:

- Bei den Typen 4 und 6 erzeugt eine Querkraft q_z Schubspannungen in der Ebene 13 ($\tau_{13} = \tau_{31}$). In dieser Ebene hat Wellpappe bedingt durch Struktur und Ausrichtung der Wellen die geringste Schubsteifigkeit und geringste Schubfestigkeit. Die Wellen werden hier seitlich verschoben.
- Typ 5 erfährt durch Querkräfte Schubbeanspruchungen in Ebene 12 ($\tau_{12} = \tau_{21}$). Die Schubkräfte müssen hier durch die gewellten Papiere geleitet werden. Das Schubtragverhalten von Typ 2 Elementen ist deutlich günstiger, da hier die Schubspannungen in Ebene 23 durch die ebenen Deckenpapiere übertragen werden können.

2.4 Wellpappenprüfung in der Papiertechnik Testing of Corrugated Cardboard in Paper Technology

Da die Parameter der Papierindustrie zur Klassifizierung von Papier und Pappe von denen zur Klassifizierung eines Kernmaterials für Sandwichelemente grundlegend verschieden sind, werden im Rahmen dieses Forschungsprojekts umfangreiche Materialprüfungen im Sinne der Sandwichtechnik durchgeführt. Es ist aber auch erstrebenswert auf der Grundlage der Parameter der Papierindustrie Rückschlüsse auf das spätere Materialverhalten als Sandwich-Kernmaterial schließen zu können. In Abschnitt 4.6.3 wird daher versucht, Abhängigkeiten hierfür zu finden.

In diesem Abschnitt werden zunächst die üblichen Parameter und Versuchstypen der Papierindustrie zur Klassifizierung von Sandwichelementen vorgestellt.

2.4.1 Kantenstauchwiderstand Edge-Crush-Test (ECT)

Der Kantenstauchwiderstand (ECT) ist die maximale Kraft je Längeneinheit, welche eine Wellpappe-Probe einer parallel zu den Wellen angreifenden Druckkraft bis zum Anfang des Versagens standhält und deren Wellenstruktur senkrecht zur beanspruchten Oberfläche verläuft. Die Druckkraft wird also in Richtung von Achse 2 (gem. Abschnitt 2.3) aufgebracht.

Die Bestimmung des Kantenstauchwiderstandes erfolgt nach DIN EN ISO 3037. Bei dieser Prüfmethode werden mindestens 10 Probestücke mit einer Höhe von $25 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ und einer Länge von $100 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ getestet. Die zu belastenden Kanten müssen sauber, gerade, parallel und senkrecht zur Oberfläche der Wellpappe sein. Es wird die Höchstkraft in N ermittelt und in kN/m umgerechnet und angegeben.

2.4.2 Berstfestigkeit

Die Bestimmung der Berstfestigkeit bzw. des Berstwiderstandes für Pappe erfolgt nach DIN EN ISO 2759. Die Maße der Proben betragen $175 \times 220 \text{ mm}$, so dass Ober- und Unterseite mit einer Probe geprüft werden können. Das zu prüfende Material wird ringförmig eingespannt und durch eine aufgewölbte Membran gleichmäßig immer senkrecht zur Oberfläche belastet. Der Druck in kPa, der zum Bersten der Probe führt, wird als Berstwiderstand bezeichnet. Bersten beschreibt hier ein Aufreißen der Probe, wobei der Riss in der Regel radial zum Ring der Probenapparatur oder entlang der Ringinnenkante verläuft.

2.4.3 Durchstoßarbeit

Die Durchstoßarbeit wird definiert als die gesamte beim Durchstoßen einer Probe mit einem Durchstoßkörper bestimmter Form und Maße verbrauchte Energie. Die Prüfung der Durchstoßarbeit erfolgt nach DIN 53142-1.

2.4.4 Biegesteifigkeit

Die breitenbezogene Biegesteifigkeit ist der Widerstand, den eine Probe beim Biegen entgegensetzt. Sie ist im elastischen Verformungsbereich das Produkt aus dem für die Biegung gültigen Elastizitätsmodul E und dem Flächenträgheitsmoment I der Probe. Die Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode (4-Punkt-Verfahren) wurde nach DIN 53121 durchgeführt.

Es wurden Probestreifen in MD und CD mit einer Länge, die sich nach der Dicke der Wellpappen richtet, getestet.

Die Messungen erfolgen nur im elastischen Bereich. Es dürfen keine plastischen Verformungen erfasst werden. Dazu wird ein Vorversuch mit den Proben durchgeführt, um die passende Belastung zu bestimmen. Die Messergebnisse werden in Nm ermittelt und getrennt für Längs- und Querrichtung angegeben.

2.4.5 Flachstauchwiderstand Flat-crush-test

Der Flachstauchwiderstand von Wellpappe (FCT) wird nach DIN EN ISO 3035 durchgeführt. Aus den Wellpappenbögen werden runde Proben mit einer Grundfläche von 100 cm² zwischen zwei Druckplatten getestet. Der Flachstauchwiderstand stellt die größte gemessene Kraftreaktion des weggesteuerten Versuchs dar und wird in kPa angegeben (vgl. BLECHSCHMIDT (2013c)).

Die Richtung der Druckkraft entspricht der in dieser Arbeit definierten (s. 2.3) Achse 1 der Wellpappe.

2.4.6 Klassifizierung

Die DIN 55468-1 stellt ein Klassifizierungssystem in Abhängigkeit von den erzielten Ergebnissen der Berstfestigkeiten, der Durchstoßarbeit und des Kantenstauchwiderstands zur Verfügung (s. Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Klassifizierung nach DIN 55468-1 (zitiert von VDW 2019)
Table 2-5: Classification according to DIN 55468-1 (cited after VDW 2019)

	Sorte	Berstfestigkeit	Durchstoßarbeit ^a	Kantenstauchwiderstand
		kPa	J	kN/m
einwellig	1.01	-	2,5	3,5
	1.02	-	3,0	4,0
	1.03	-	3,5	4,5
	1.04	-	4,0	5,5
	1.05	-	4,5	6,5
	1.10	540	2,5	3,5
	1.20	770	3,0	4,0
	1.30	1000	3,5	4,5
	1.40	1200	4,0	5,5
	1.50	1450	4,5	6,5
mehrwellig	2.02	-	5,5	6,5
	2.03	-	6,0	7,0
	2.04	-	6,5	7,5
	2.05	-	7,0	8,5
	2.06	-	7,5	9,0
	2.20	770	5,5	6,5
	2.30	1000	6,0	7,0
	2.40	1200	6,5	8,0
	2.50	1450	7,5	8,5
	2.60	1650	8,5	9,0
	2.70	2000	9,5	9,5
	2.80	-	11,0	12,0
	2.90	-	13,0	14,0
	2.91	-	16,0	16,0
	2.92	-	21,0	18,0
	2.95	-	24,0	21,0
2.96	-	27,0	24,0	
ANMERKUNG: Festigkeitswerte gelten nicht für Wellpappen nur aus Wellen D, E, F und G				
^a Für einwellige Wellpappe in Wellenart B reduzieren sich die angegebenen Werte der Sorten um 10 %				

2.4.7 Flächenbezogene Masse der Einzellagen

Die Prüfung der flächenbezogenen Masse der Einzellagen erfolgte abweichend von der DIN EN ISO 3039 als Dreifachbestimmung. Von den Wellpappen-Mustern werden Proben von ca. 150 x 150 mm herausgeschnitten, gewässert und an den getrennten Lagen vorsichtig die Leimspuren entfernt. Im Anschluss daran werden die getrennten Papiere im Trockner des Blattbildners getrocknet und geglättet und anschließend bei Normklima von 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte über 24 h klimatisiert und danach gewogen.

2.5 Arbeitshypothese

Working hypothesis

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Prüfung eines ökologisch unbedenklichen und zu 100 % recycelbaren Kernmaterials auf der Basis von Zellstoff hinsichtlich der Eignung als Kernmaterial für Stahlsandwichelemente. Wellpappe zeichnet sich neben guten Wärmedämmeigenschaften durch geringe Kosten und hohe Tragfähigkeiten bei relativ geringem Gewicht aus. Um die Eignung als Kernmaterial für Sandwichelemente zu überprüfen, ist eine Vielzahl von Untersuchungen, in erster Linie hinsichtlich des mechanischen Verhaltens aber auch im Bereich der Bauphysik und des Brandschutzes, erforderlich. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sollen die grundsätzliche Eignung klären und die Grundlage für Produktentwicklungen darstellen. Ziel ist außerdem, eine Grundlage für die Erweiterung der bestehenden Sandwichnorm DIN EN 14509 um den Kernwerkstoff Wellpappe bzw. Zellstoff zu schaffen.

3 Vorgehensweise und Versuchsplanung / Approach and Design of Experiments

3.1 Bearbeitungsschritte

Das Forschungsprojekt war in 5 Arbeitspakete (AP) gegliedert. Das erste AP diente der Festlegung des Parameterbereichs, in dem die verschiedenen Möglichkeiten, die Wellpappe hinsichtlich Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit einzusetzen, bestmöglich kombiniert wurden. Das zweite AP bestand aus der Ermittlung geeigneter Klebstoffe, mit denen die Wellpappen untereinander sowie die Wellpappe mit den Stahldeckschichten verklebt werden konnten. Im Rahmen des dritten AP erfolgten numerische Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Wellpappenarten und -anordnungen. Alle experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen des vierten AP durchgeführt. Anschließend erfolgte die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie ein Vergleich mit üblichen Ergebnissen anderer Kernmaterialien. Diese führten zu einer abschließenden Beurteilung der Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente. Im Rahmen des Schlussberichts werden weitere Forschungs- beziehungsweise Optimierungsmöglichkeiten sowie Produktvarianten aufgezeigt werden.

3.1.1 Arbeitspaket 1

Das erste Arbeitspaket diente der Vorauswahl der Wellpappenarten, die im weiteren Projektverlauf näher untersucht werden sollten. Handelsübliche Wellpappen unterscheiden sich einerseits in der Form und Größe der ebenen und gewellten Papierschichten und andererseits in der Zusammensetzung der Papiere voneinander. Das Tragverhalten der Papiere hängt auch von der Belastungsrichtung ab. Aufgrund der Geometrie der Wellpappe und der anisotropen Trageigenschaften kann ein Kern aus Wellpappe in unterschiedlichen Ausrichtungen in einem Sandwichelemente angeordnet werden. Die Einflüsse dieser Parameter auf das Tragverhalten und die Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials sollten im Rahmen des ersten Arbeitspakets erfasst werden.

Ziel war es, identische Untersuchungen mit möglichst unterschiedlichen Wellpappensorten durchzuführen, um sicherzustellen, dass die mögliche Bandbreite, die die Wellpappenherstellung bietet, gut wiedergegeben wird. Damit sollten Vor- und Nachteile für die spezifische Anwendung als Kernmaterial für Sandwichelemente deutlich gemacht und Weiterentwicklungsmöglichkeiten dargestellt werden können.

3.1.2 Arbeitspaket 2

Für die Herstellung der Prüfkörper wurden zwei Klebstoffe benötigt. Zum einen mussten die Wellpappen untereinander verklebt werden, um Blöcke in den gewünschten Kernmaterialdicken zu erhalten. Zum anderen mussten die daraus entstandenen Blöcke mit den Stahldeckschichten verklebt werden.

Die Verwendung von Wellpappe als Kernmaterial in Sandwichelementen bringt spezielle Anforderungen an die Klebstoffe mit sich, die sich von denen für den

herkömmlichen Einsatz von Wellpappe, wie z. B. im Bereich der Verpackungs- oder Logistikindustrie, unterscheiden. Daher war eine ausführliche Betrachtung unterschiedlicher Klebstoffe zur Verbindung der Papiere untereinander notwendig.

Zur Verklebung der metallenen Deckschichten mit dem Kernmaterial musste ein Klebstoff gefunden werden, dessen Tragfähigkeit groß genug ist, um adhäsives Versagen in der Verbundfuge zu vermeiden. Der Klebstoff sollte außerdem in der Lage sein, kleine Hohlräume, die aufgrund von Ungenauigkeiten oder beispielsweise infolge von Linierung oder Microlinierung der Deckschichten vorhanden sind, auszugleichen, um einen flächigen Verbund sicherzustellen. Die Verarbeitung der Klebstoffe und die Eingliederung des Klebprozesses in einen Produktionsablauf sollten bei der Auswahl berücksichtigt werden. Betrachtungen hinsichtlich der Ökologie solcher Klebstoffe sollten im Rahmen dieses Projektes im Hintergrund stehen, da die Klebstoffmengen vergleichsweise gering sind. Bei einer Trennung von Kern und Deckschichten verbleiben die Klebstoffe an der metallenen Deckschicht und stellen, ähnlich wie Korrosionsschutzbeschichtungen, organische Verunreinigung dar. Moderne Lichtbogenöfen können diese Art von verunreinigtem Stahlschrott recyceln.

3.1.3 Arbeitspaket 3

Um die Auswirkungen der großen Bandbreite an Wellpappenarten sowie deren mögliche unterschiedliche Anordnung innerhalb des Bauteils auf das mechanische und bauphysikalische Verhalten beurteilen zu können, sollte mit numerischen und analytischen Modellen versucht werden, das Wärmedämmverhalten und die Trageigenschaften abzubilden.

Ziel dieses Arbeitspakets war die Ermittlung von mindestens zwei geeigneten Varianten für den Aufbau des Kernmaterials. Diese sollen dann im Rahmen der experimentellen Untersuchungen weiter analysiert werden.

3.1.4 Arbeitspaket 4:

Das vierte Arbeitspaket enthielt alle notwendigen experimentellen Untersuchungen. Diese können in vier Teilbereiche untergliedert werden: Voruntersuchungen, bauphysikalische Untersuchungen, Bauteilprüfungen und Prüfungen zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften. Außer den Prüfungen zur Untersuchung des Brandverhaltens und der Klassifizierung der Wellpappen im papiertechnischen Sinne können alle Versuche in den Laboren des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TU Darmstadt durchgeführt werden.

Durch die Hygroskopizität von Wellpappe war davon auszugehen, dass die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften des Kernmaterials in Abhängigkeit von den Klimabedingungen variieren. Es wurden daher über DIN EN 14509 hinausgehend alle mechanischen und bauphysikalischen Versuche nach vorheriger Klimatisierung in zwei unterschiedlichen Klimabedingungen geprüft. Die genauen Klimatisierungsgrößen für Temperatur und Feuchtigkeit wurden auf der Grundlage der Voruntersuchungen festgelegt.

Im Rahmen von Vorversuchen mit zwei unterschiedlichen Wellpappensorten sollten zunächst Druck-, Zug- und Schubversuche durchgeführt werden. Zusätzlich wird die

Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Diese Versuche dienen der Validierung der numerischen und analytischen Modelle (AP 2) und zur Festlegung von zwei oder drei Pappensorten (AP 1) für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen im weiteren Projektverlauf.

Im Rahmen der bauphysikalischen Untersuchungen wurden Wärmeleitfähigkeiten und Kernfeuchtigkeiten analysiert. Mit Hilfe eines Platten-Wärmeleitfähigkeitsmessgeräts wurde der Wärmeleitkoeffizient für unterschiedliche Kernkonfigurationen ermittelt. Die Messung stationärer Wärmeübertragungseigenschaften orientierten sich an der DIN EN 12667 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Da die ragfähigkeit mit dem Wassergehalt des Zellstoffs variiert, wurde die Entwicklung der Kernfeuchte unter extremen Klimabedingungen untersucht. Hierzu sollen unter zuvor definierter Klimatisierung hergestellte Elemente mit Deckschichten aber ohne zusätzlichen Schutz der Elementseiten extremen Klimabedingungen ausgesetzt werden. Die Messung der Kernfeuchte an verschiedenen Stellen des Elements über einen Zeitraum von einigen Monaten gab Aufschluss über die Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsausbreitung. Auch die Anwendung üblichen Fugenausbildungen hinsichtlich des Schutzes gegen eindringenden Luftfeuchte sollte für Sandwichelemente mit Zellstoffkern konstruktiv untersucht werden.

Die Bauteilversuche dienten der Ermittlung des Verformungsverhaltens und der Tragfähigkeit der vollständigen Elemente. Für den Einsatz von Sandwichelementen ist es von Bedeutung, welches Kriechverhalten die Kernmaterialien aufweisen. In vielen Fällen ist dies bemessungsmaßgebend und führt zur Verwendung von stark profilierten Deckblechen anstelle von gering profilierten Blechen. Aus diesem Grund sollten Versuche zur Bestimmung des Kriechverhaltens erfolgen. Um auch das grundsätzliche Brandverhalten von Sandwichelementen mit Zellstoffkern kennenzulernen, waren Experimente nach DIN EN 13823 und DIN EN ISO 11925-2 zur Klassifizierung nach DIN EN 13501-1 vorgesehen. Da in den Laboren der TU Darmstadt keine Brandprüfungen durchgeführt werden können, müssen diese Untersuchungen bei einer externen Materialprüfanstalt in Auftrag gegeben werden.

Folgende Versuchsreihen wurden durchgeführt:

- Bauteilprüfungen zur Bestimmung des aufnehmbaren Biegemoments und der Steifigkeit eines Einfeldelements (DIN EN 14509-A.5)
- Interaktion zwischen Biegemoment und Auflagerkraft (DIN EN 14509-A.7)
- Aufnehmbare Endauflagerkraft (DIN EN 14509-A.15)
- Bestimmung des Kriechfaktors (DIN EN 14509- A.6)
- Untersuchung des Brandverhaltens (DIN EN 13501-1) bei externer Materialprüfanstalt

Alle Bauteilversuche sollten für zwei oder drei unterschiedliche Wellpappensorten mit mindestens zwei unterschiedlichen Bauteildicken und unter zwei unterschiedlichen Klimabedingungen durchgeführt werden. Die erforderliche Anzahl an Probekörpern je Versuchstypus wird in Anlehnung an die Anforderungen der DIN EN 14509 **Fehler! erweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für eine Erstprüfung (ITT-Prüfungen) festgelegt.

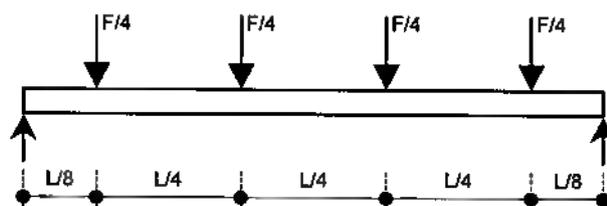


Bild 3-1: Versuchsaufbau der Bauteilprüfung zur Bestimmung des aufnehmbaren Biegemoments Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

Die ergänzenden Versuche an kleinen Probekörpern waren für die Ermittlung der Werkstoffeigenschaften des Kernmaterials notwendig. Die Prüfungen zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften enthielten folgende Versuchsreihen (für jede Klimabedingung):

- Bestimmung der Rohdichte des Kernmaterials (DIN EN 14509-A.8)
- Zugfestigkeit und Zug-E-Modul des Kernmaterials (DIN EN 14509-A.1 / DIN EN 789)
- Druckfestigkeit und Druck-E-Modul des Kernmaterials (DIN EN 14509-A.2)
- Schubversuche für das Kernmaterial (DIN EN 14509-A.3 / DIN 53294)
- Zeitstandversuche an Schubproben (DIN EN 14509-A.3.6 / DIN 53294)
- Untersuchungen der Eigenschaften des Kernmaterials durch die Papiertechnische Stiftung PTS

Die Versuche zur Klassifizierung der eingesetzten Papiere wurden an einer externen Prüfstelle, der Papiertechnischen Stiftung PTS, durchgeführt, da die Forschungsstelle selbst keinen Zugriff auf die Infrastruktur zur Durchführung dieser Versuche hatte.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden keine Versuche unter dem Einfluss von Nässe durchgeführt. Es wurde davon ausgegangen, dass das Eindringen von Nässe durch entsprechende Fugenausbildungen verhindert werden kann. Bei Sandwichelementen mit Mineralwollkern ist der Schutz vor eindringender Nässe ebenfalls Voraussetzung für die Wärmedämmwirkung und die Tragsicherheit. Sollte im vorliegenden Fall keine ausreichend wasserdichte Fugenausbildung möglich sein, müssen die Seiten der Sandwichelemente durch geeignete Klebstoffe, Klebebänder oder Folien zusätzlich geschützt werden. Diese zusätzliche Behandlung der offenen Elementflächen sollte im Zuge dieses Forschungsvorhabens nicht untersucht werden.

3.1.5 Arbeitspaket 5

Im Rahmen des fünften Arbeitspaketes wurden die Versuchsdaten ausgewertet und interpretiert. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen wurden mit üblichen Werten für derzeit am Markt befindliche Sandwichelemente verglichen. Dadurch kann bezüglich der grundsätzlichen Eignung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente mit Stahldeckschichten eine klare Aussage getroffen werden. Außerdem wurden Möglichkeiten der Optimierung aufgezeigt.

4 Mechanischer Materialparameter von Wellpappe

Um die Eignung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente hinsichtlich des Tragverhaltens bewerten zu können, werden in diesem Abschnitt mechanische Materialparameter ermittelt.

Im Vordergrund stehen elastische Kenngrößen, E-Moduln und Schubmoduln, sowie die Materialfestigkeiten für Zug, Druck und Schubbeanspruchungen. Aber auch viskoelastische Materialeigenschaften für ausgewählte Belastungssituationen werden untersucht, um das Langzeitverhalten von Sandwichelementen mit Wellpappe als Kernmaterial bewerten zu können. Mit diesen Untersuchungen soll ein grundsätzliches Verständnis der Trageigenschaften und -mechanismen geschaffen werden, auf dessen Basis zum einen ein allgemeiner Vergleich zu herkömmlichen Materialien möglich ist und zum anderen Anforderungen an die Bestandteile und den Aufbau von Wellpappen zum Einsatz als Kernmaterial für Sandwichelemente gefunden werden können.

Da das Material als orthotrop betrachtet wird und die Ausrichtung der Wellpappe in einem Sandwichelement auf verschiedene Möglichkeiten erfolgen kann, werden die Parameter in unterschiedlichen Belastungsrichtungen bzw. -ebenen ermittelt.

Die Hygroskopizität des Materials und die Abhängigkeit der Steifigkeiten und Festigkeiten vom Wassergehalt erfordern definierte Klimatisierungen der Probekörper vor der Durchführung der Experimente auf unterschiedliche Klimabedingungen.

Die experimentelle Bestimmung der Schubmoduln wird durch numerische Voruntersuchungen in Abschnitt 4.3.1 ergänzt, um den Versuchsaufbau und die Probenanordnung zu validieren.

Durch eine Parameteranalyse mit Hilfe der FEM in Abschnitt 4.3.2 kann eine vereinfachte Annahme für Querdehnzahlen validiert werden.

Mit Hilfe analytischer Ansätze kann der Abweichung von Zug- zu Druckverhalten des Materials bei der Bestimmung eines Ersatz-E-Moduls Rechnung getragen werden. Auch hier dient die FEM zur Validierung. Diese Voruntersuchungen sind in Abschnitt 4.3.3 zu finden.

Da Papier als viskoelastisches Material bekannt ist und bei Kernmaterialien von Sandwichelementen das Kriechverhalten von großer Bedeutung ist, wurden Kriechfaktoren φ_t anhand von Langzeitversuchen mit ausgewählten Wellpappen für unterschiedliche Kernausrichtungen ermittelt. Diese Untersuchungen sind in Abschnitt 4.5.2 zusammengefasst. Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Dauerstandfestigkeiten bestimmt.

4.1 Prüfprogramm

Im Folgenden werden zunächst die untersuchten Wellpappensorten beschrieben. Anschließend wird das Prüfprogramm getrennt zum einen zur Bestimmung der linearen Elastizität und der Kurzzeitfestigkeiten und zum anderen zur Ermittlung der relevanten viskoelastischen Materialparameter vorgestellt.

4.1.1 Untersuchte Wellpappensorten

An zehn unterschiedlichen kommerziellen Wellpappen wurden Druck-, Zug- und Schubversuche durchgeführt. In Tabelle 4-1 sind die getesteten Sorten der Versuchsreihen (VR 1 bis VR 10) aufgeführt.

Der Großteil der Untersuchungen wurde an hochwertigen Wellpappen mit Kraftliner-Papieren (KL) in den Decklagen durchgeführt, um möglichst große Tragfähigkeiten und Steifigkeiten zu erzielen (VR 1, VR 3, VR 4, VR 5, VR 9, VR 10). Es wurden aber auch Versuchsreihen (VR 6 bis VR 8) mit Testliner-Papieren (TL) und eine Versuchsreihe (VR 2) mit Schrenz-Papier (SZ) durchgeführt, um auch eine Aussage über das Tragverhalten der kostengünstigeren Sorten mit großem Altpapieranteil treffen zu können. Die Wellen waren außer bei zwei Sorten aus Wellenstoff (WS), in den Versuchsreihen VR 3 und VR 6 waren auch die Wellen aus Testliner-Papier hergestellt.

Die Wellenteilungen nach DIN 55468-1 sowie die Papiertypen (PT) und die Flächengewichte ρ_A in g/m^2 der einzelnen Papierbahnen der getesteten Sorten werden in Tabelle 4-1 angegeben. Die Daten stammen von den Produzenten der Wellpappen bzw. von einer unabhängigen Materialprüfanstalt.

Die am häufigsten untersuchte Wellenteilung ist die Kombination aus einer B- und einer C-Welle. Für die Verpackungsindustrie ist diese Kombination stark verbreitet. Die Kombination von zwei E-Wellen (VR 10) ist im Vergleich dazu sehr fein. In den Versuchsreihen VR 5 und VR 6 wurden im Gegensatz dazu Sorten mit sehr großen Wellen vom Typ A ausgewählt. Die Geometrie der Wellenteilungen der getesteten Wellpappen ist in Abbildung 4-1 maßstäblich dargestellt.

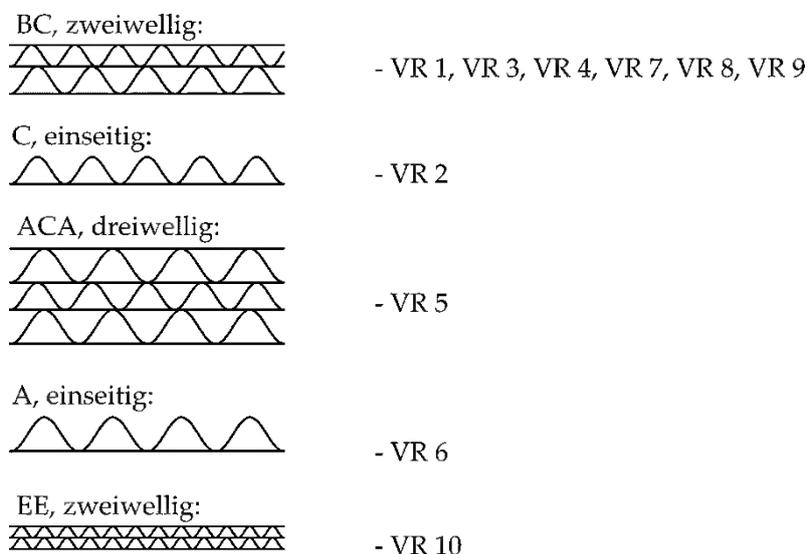


Abbildung 4-1: Untersuchte Wellpappenarten, Wellenteilungen maßstäblich

Figure 4-1: Investigated kinds of corrugated cardboard, wave measures drawn to scale

Die Dichte ρ in kg/m^3 eines Volumenkörpers aus der jeweiligen Sorte ist auch in Tabelle 4-1 aufgeführt und wurde entsprechend der Festlegung, das Kernmaterial Wellpappe als homogenes Kontinuum zu vereinfachen, bestimmt. Die Masse von quaderförmigen getrockneten Körpern aus mehreren Schichten von Wellpappe wurde durch das von dem Quader umschlossene Volumen dividiert. Hierbei wurde bereits der zur

Herstellung der Volumenkörper aus Wellpappe erforderliche Leim mit erfasst. Die Bandbreite der untersuchten Dichten reicht von 69 kg/m³ (VR2) bis hin zu 235 kg/m³ (VR 10). Wellpappen mit kleineren Wellenteilungen haben tendenziell größere Dichten, da dadurch bei gleicher Höhe mehr Papierlagen in einem Volumen enthalten sind. Zusätzlich sind Kraftliner in der Regel schwerer als Testliner und diese wiederum schwerer als Schrenz $\rho_A(KL) > \rho_A(TL) > \rho_A(SZ)$.

Die Einstufung der Wellpappensorten DIN 55468-1 erfolgte von Seiten der Hersteller oder durch eine Materialprüfanstalt (s. Abschnitt 4.6) und ist in Tabelle 4-1 angegeben.

Tabelle 4-1: Untersuchte Wellpappensorten

Table 4-1: Investigated kinds of corrugated cardboard

Versuchsreihe	Wellenteilung	ρ	D 1		W 1		D 2		W 2		D 3		W 3		D 4		Einstufung DIN 55468-1
			PT	ρ_A													
VR 1	BC, zweiwellig	133	KL	139	WS	139	KL	128	WS	124	KL	121					2.60
VR 2	C, einseitig	69	SZ		SZ												n. e.
VR 3	BC, zweiwellig	154	KL	170	TL	150	TL	125	TL	150	KL	170					2.50
VR 4	BC, zweiwellig	173	KL	248	WS	153	WS	114	WS	141	KL	251					2.90
VR 5	ACA, dreiweilig	132	KL	430	WS	167	WS	145	WS	156	WS	160	WS	154	KL	278	2.95
VR 6	A, einseitig	72	TL	125	TL	125											n. e.
VR 7	BC, zweiwellig	118	TL	125	WS	90	WS	75	WS	90	TL	125					2.20
VR 8	BC, zweiwellig	129	TL	135	WS	110	WS	75	WS	110	TL	150					2.40
VR 9	BC, zweiwellig	125	KL	135	WS	110	TL	90	WS	110	TL	150					2.40
VR 10	EE, zweiwellig	235	KL	135	WS	90	WS	75	WS	130	KL	135					n. e.

D - Deckbahn/Liner; W - Wellenbahn; PT - Papiertyp; ρ - Dichte eines Wellpappevolumens; ρ_A - Dichte einer Papierbahn

4.1.2 Lineare Elastizität und Kurzzeitfestigkeit

In diesem Abschnitt wird das Prüfprogramm zur Bestimmung der Elastizitäts- und Schubmoduln sowie der Kurzzeitfestigkeiten vorgestellt. In Tabelle 4-2 ist die Übersicht der durchgeführten Versuche gegeben.

Üblicherweise werden die E-Moduln von Papieren und Pappen gemäß DIN EN ISO 1924-2 ausschließlich in einem Zugversuch ermittelt. Wird Wellpappe als Kernmaterial in Sandwichelementen eingesetzt, führt dies aber auch zu Druckbeanspruchungen auf die Wellpappe. Voruntersuchungen und auch die Literaturrecherche (s. Abschnitt 2.2.2.3) haben gezeigt, dass sich das Material unter Druckbeanspruchungen anders als unter Zugbeanspruchungen verhält. Daher werden die E-Moduln ähnlich wie in der Sandwichnorm bereits verankert getrennt für Druck und Zug ermittelt. Die Versuchsaufbauten sind in Abschnitt 4.2 genau beschrieben.

Insgesamt wurden 531 Druck-, Zug- und Schubversuche in 10 Versuchsreihen durchgeführt. Es wurden alle unbekanntenen Elastizitätsmoduln und Schubmoduln des als orthotrop angenommenen Materials ermittelt. Die Zug-, Druck- und Schubfestigkeiten wurden in quasi-statischen Versuchen für alle Achsen und Schubebenen bestimmt. Die Schubebene 13 wurde jedoch nur in der Versuchsreihe 1 untersucht, da diese Ebene für den Einsatz als Kernmaterial für Sandwichelemente nicht von Bedeutung ist (s. auch Abschnitt 2.3). In den Versuchsreihen VR 1 bis VR 6 wurde das

Materialverhalten in den anderen beiden Schubebenen und in den drei Hauptachsen des Materials analysiert.

Im Zuge der Versuchsreihen VR 7 bis VR 10 wurden nur Druck- und Zugversuche in Richtung von Achse 1 durchgeführt. Da die Eignung von Wellpappe für Sandwich-elemente vom Typ 1 (s. Abschnitt 2.3) hauptsächlich vom Tragverhalten in Achse 1 abhängt und diese vergleichsweise schwach ist, wird hier eine größere Bandbreite an Wellpappensorten abgedeckt.

Die Klimabedingungen werden in den meisten Versuchsreihen variiert. Die Vielzahl an untersuchten Klimabedingungen in Versuchsreihe VR 1 in Richtung von Achse 1 dient zur Bestimmung der Beziehung zwischen Kernfeuchte und Tragverhalten und wird in Abschnitt 4.5.1.4 näher beleuchtet. In Versuchsreihen VR 2 sowie VR 7 bis VR 10 wurde aufgrund der geringen Tragfähigkeiten unter den getesteten Klimabedingungen von weiteren Versuchen Abstand genommen.

Tabelle 4-2: Versuchsprogramm der Druck-, Zug- und Schubversuche, Anzahl der einzelnen Versuche

Table 4-2: Test program of the compression, tension and shear tests, number of tests

Versuchsreihe u. Klima T in °C / rF in %	Druckversuche in Achse			Zugversuche in Achse			Schubversuche in Ebene		
	1	2	3	1	2	3	12	13	23
VR 1									
60 / 20	3	3	3	3					
30 / 40	3			3					
20 / 65	3	3	3	13	3	3	3	3	3
10 / 65	3			2					
10 / 90	3	3	3	3					
20 / 90	3			3					
VR 2									
20 / 65	4	8	5	6	3	3	3		3
VR 3									
20 / 35	6	6	6	4	3	4	3		3
20 / 65	6	5	5	5	5	5	3		3
20 / 80	6	4	7	5	3	3	3		3
VR 4									
20 / 35	5	5	5	5	5	5	4		3
20 / 65	10	10	10	10	10	10	8		8
20 / 80	5	5	5	4	5	5	4		5
VR5									
20 / 35	7	4	4	5	3	3	3		3
20 / 65	6	5	4	5	3	3	3		3
20 / 80	4	5	5	4	3	3	3		3
VR6									
20 / 65	5	5	4	5	3	3	3		3
VR7									
20 / 35	3								
20 / 65	4			3					
VR8									
20 / 65	4			4					
VR9									
20 / 35	3								
20 / 65	4			3					
VR10									
20 / 35	2								
20 / 65	3			3					
	Σ Druck: 245			Σ Zug: 197			Σ Schub: 89		

4.1.3 Kriechversuche

Das Langzeitverhalten von Papier und Pappe ist viskoelastisch (vgl. Abschnitt 2.2.2.4). Sandwichelemente werden je nach Einsatzort und Verwendungszweck mehr oder

weniger großen ständig wirkenden Lasten ausgesetzt. Daher ist es wichtig, das Langzeitverhalten des Kernmaterials zu untersuchen und kennenzulernen. Da Temperatur und Feuchtigkeit das Tragverhalten im Allgemeinen beeinflussen, müssen auch für die Langzeitversuche zuvor festgelegte Klimabedingungen eingehalten werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden an den Wellpappen der Versuchsreihen VR 1 und VR 3 Langzeitversuche zur Bestimmung des Kriechfaktors φ_t von Sandwichelementen mit einem Kern aus Wellpappe durchgeführt. Die Versuche wurden für zwei mögliche Kernausrichtungen durchgeführt. Die Elementtypen 1 und 2 (gemäß Abbildung 2-2) wurden in Form von Sandwich-Biegebalken auf ihr Kriechverhalten untersucht. Die Dauerstandfestigkeit des Materials wurde nicht ermittelt. Der Versuchsaufbau ist ausführlich in Abschnitt 4.2.7 dargestellt. Die Versuchsübersicht zu den Langzeitversuchen ist in Tabelle 4-3 gegeben.

Die Versuche wurden unter dem in Abschnitt 4.2.3 definierten Standardklima von 20 °C und 65 % rF durchgeführt. Bei Versuchsreihe VR 3 erfolgten zudem auch Versuche unter einer Klimabedingung mit höherer Feuchte im Klima 20 °C und 80 % rF.

Tabelle 4-3: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Kriechfaktors φ_t

Table 4-3: Test program for the investigation of the creep factor φ_t

Versuchsreihe u. Klima T in ° C / rF in %	Kriechversuch		Versuchsaufbau in Anlehnung an
	Typ 1	Typ 2	
VR 1			
20 / 65	2	2	DIN EN 1156
VR 3			
20 / 65	4	4	DIN EN 14509
20 / 80		4	DIN EN 14509

4.2 Versuchsaufbauten und Probekörperherstellung

4.2.1 Herstellung des Kernmaterials aus Wellpappe

Das Kernmaterial für die hier untersuchten Probekörper wurde durch Verkleben mehrerer Lagen handelsüblicher einseitiger, zweiwelliger und dreiwelliger Wellpappebögen hergestellt. Die Bögen hatten eine Länge von ca. 2 m und eine Breite von ca. 1 m. Es wurde bis zu 10 cm hohe quaderförmige Körper aus Wellpappe hergestellt. Wie in 2.2.1.5 beschrieben, benötigen die in der Wellpappenindustrie üblichen Leime zur Verklebung der Papiere untereinander hohe Temperaturen zur vollen Entfaltung ihrer Klebkraft.

In einer manuellen Fertigung ist das Erhitzen der Papiere schlecht möglich. In Vorversuchen wurden daher unterschiedliche Klebstoffe getestet. Hierbei wurde das Hauptaugenmerk auf eine zuverlässige Verbindung gelegt. Andere Belange wie z. B. die Beeinflussung des verwendeten Klebstoffs auf die Umweltbelastung wurden nicht berücksichtigt, da ein marktreifes Sandwichelement mit Wellpappe als Kernmaterial mit industriell hergestellten Kernen produziert werden würde und hier bewährte und meist

umweltfreundliche Verklebungen realisiert werden können. Als Ergebnis der Voruntersuchungen konnte ein Dispersionsklebstoff auf Polyvinylacetat-Basis (Weißleim D3/D4) gefunden werden, mit dem kein adhäsives Versagen in dieser Leimfuge auftritt. Der Weißleim wird mit etwa ca. 100 g/m² mit Hilfe einer Leimrolle³ auf beide zu verklebende Oberflächen aufgetragen (s. Abbildung 4-2). Nach dem Leimauftrag werden die Klebeflächen in einer im Möbelbau üblichen Furnierpresse bei ca. 0,02 N/mm² für ca. 20 Minuten aufeinander gepresst (s. Bild Abbildung 4-4).



Abbildung 4-2: Leimauftrag zur Verklebung der Wellpappenbögen untereinander

Figure 4-2: Glue application for gluing corrugated cardboard

³ Pfohl-Leimer der Firma GUSTAV PFOHL GMBH, Breite 150 mm mit Moosgummi-Walze

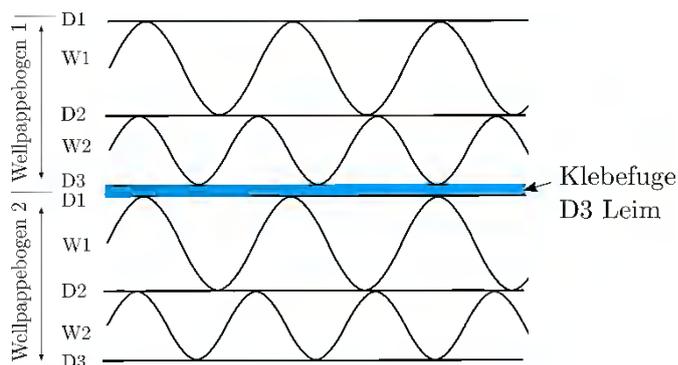


Abbildung 4-3: Leimfuge zwischen Wellpappebögen
(D - Deckenbahn, W - Wellenbahn)

Figure 4-3: glued joint between two layers of corrugated cardboard (D - liner, W - fluting)



Abbildung 4-4: Furnierpresse zum Verkleben der Wellpappe

Figure 4-4: veneer press for gluing corrugated cardboard

4.2.2 Zuschnitt

Die aus der Verleimung der einzelnen Wellpappebögen entstandenen Volumenkörper können mit Hilfe von Sägen, die auch für die Holzbearbeitung geeignet sind, zugeschnitten werden. Je nach Anforderungen an den Zuschnitt eignen sich Plattensägen, Bandsägen, Kappsägen und Formatkreissägen.

4.2.3 Klimatisierung

Wie in Abschnitt 2.2.2.2 beschrieben, beeinflussen die klimatischen Bedingungen die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften von Papier und Pappe. Alle Versuchskörper wurden daher vor den Versuchen unter definierten Klimabedingungen gelagert, bis sich ein Feuchtegleichgewicht einstellte. Das Gleichgewicht wird nach DIN EN 20187 „[...] als erreicht betrachtet, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Wägungen der Probe, die innerhalb eines Zeitintervalls von mindestens 1 h durchgeführt werden, sich um nicht mehr als einen festgelegten Betrag unterscheiden“. Im vorliegenden Fall wurde die Massenkonzanz als erreicht betrachtet, wenn die Massendifferenz zweier Wägungen $< 0,1\%$ betrug.

Die Klimatisierung der Probekörper erfolgte in klimatisierten Räumen und Klimaschränken, die mit einer Genauigkeit von $\pm 1\text{ °C}$ und $\pm 2\%$ rF (bzw. $\pm 5\%$ rF) bei den Langzeitversuchen von VR 1 klimatisiert werden können.

In DIN 50014 werden allgemeine Normklimata, die repräsentativ für unterschiedliche Umgebungsbedingungen sind, für die Konditionierung und Prüfung festgelegt. Als Normklima für Papier, Pappe und Zellstoff gilt gemäß DIN EN 20187 das Normklima mit dem Kurzzeichen 23/50 - also eine Temperatur von $(23 \pm 1)\text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchte von $(50 \pm 2)\%$. Entgegen dieser Vorgabe wurde im Rahmen dieser Arbeit das Normklima 20/65 mit einer Temperatur von $(20 \pm 1)\text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchte von $(65 \pm 2)\%$ verwendet. Dieses Klima ist für die Prüfung von Holz und Holzwerkstoffen üblich. Die Taupunkttemperatur von Klima 20/65 liegt mit $13,2\text{ °C}$ etwas höher als die Taupunkttemperatur des Klimas 23/50, die $12,0\text{ °C}$ beträgt. Die absolute Luftfeuchtigkeit ist demzufolge auch höher und führt zu geringeren Steifigkeiten und Festigkeit der Papierwerkstoffe. Für die Klassifizierung als Baustoff liegt die Annahme des Klimas 20/65 als Normklima also auf der sicheren Seite.

Die meisten Versuche werden unter dem hier definierte Normklima 20/65 durchgeführt. Um eine allgemeingültige Aussage über die Eignung von Wellpappe als Kernmaterial machen zu können, wurden in mehreren Versuchsreihen auch Experimente nach Konditionierung auf ein sehr trockenes Klima, 20/35 (20 °C und 35 % rF), und ein sehr feuchtes Klima, 20/80 (20 °C und 80 % rF), durchgeführt. Zusätzlich wurden an einer Versuchsreihe weitere Kombinationen von Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten getestet, um die Abhängigkeit der ermittelten Parameter von der Materialfeuchte qualitativ zu untersuchen.

4.2.4 Druckversuche

Alle Druckversuche wurden gemäß Anhang A.1.3 von DIN EN 14509 an quaderförmigen Probekörpern mit quadratischer Grundfläche mit einem Soll-Seitenmaß von 100 mm durchgeführt. Neben dem Zuschnitt waren keine weiteren Bearbeitungsschritte der Proben für die Druckversuche erforderlich.

Die Versuche wurden an einer Universalprüfmaschine⁴ durchgeführt. Die konstante Versuchsgeschwindigkeit wurde so festgelegt, sodass die Versuchsdauer bis zum Versagen zwischen 1 und 5 Minuten betrug (in Anlehnung an DIN EN 14509). Je nach Probensteifigkeit und Probenhöhe wurden zwischen 0,5 mm/min und 3 mm/min festgelegt. Die Kraftreaktion wurde mit einer Kraftmessdose⁵ gemessen, die oberhalb der Lasteinleitungsplatte in den Kraftweg eingefügt wurde. Die Stauchung der Probekörper wurde über vier Seilzugwegaufnehmer⁶ gemessen, die an den Seiten der Lasteinleitungsplatten die Verformung in Krafrichtung aufnahmen. Der Mittelwert der vier gemessenen Wege entspricht somit der mittleren Verformung des Wellpappe-Quaders. Die Messraten der Kraftmessdose und der Wegaufnehmer wurde zu 5 Hz gewählt. Damit ist eine ausreichende Auflösung der Messdaten gewährleistet. Die analogen Messdaten wurden mit dem Messverstärkersystem Spider8-Messmodul bzw. mit QuantumX Messdatenerfassungssystem der Firma HBM verstärkt und digitalisiert und über die Messsoftware CatmanEasy, Version 3.4, der Firma HBM aufgezeichnet. Bilder des Versuchsaufbaus sind in Abbildung 4-5 a) und b) gegeben.

⁴ Universalprüfmaschine der Firma MAN, Kapazität 100 kN

⁵ der Firma HBM, Typ: 1-U2B/10kN

⁶ Wegaufnehmer der Firma Messotron, Typ MSZ-P1-12

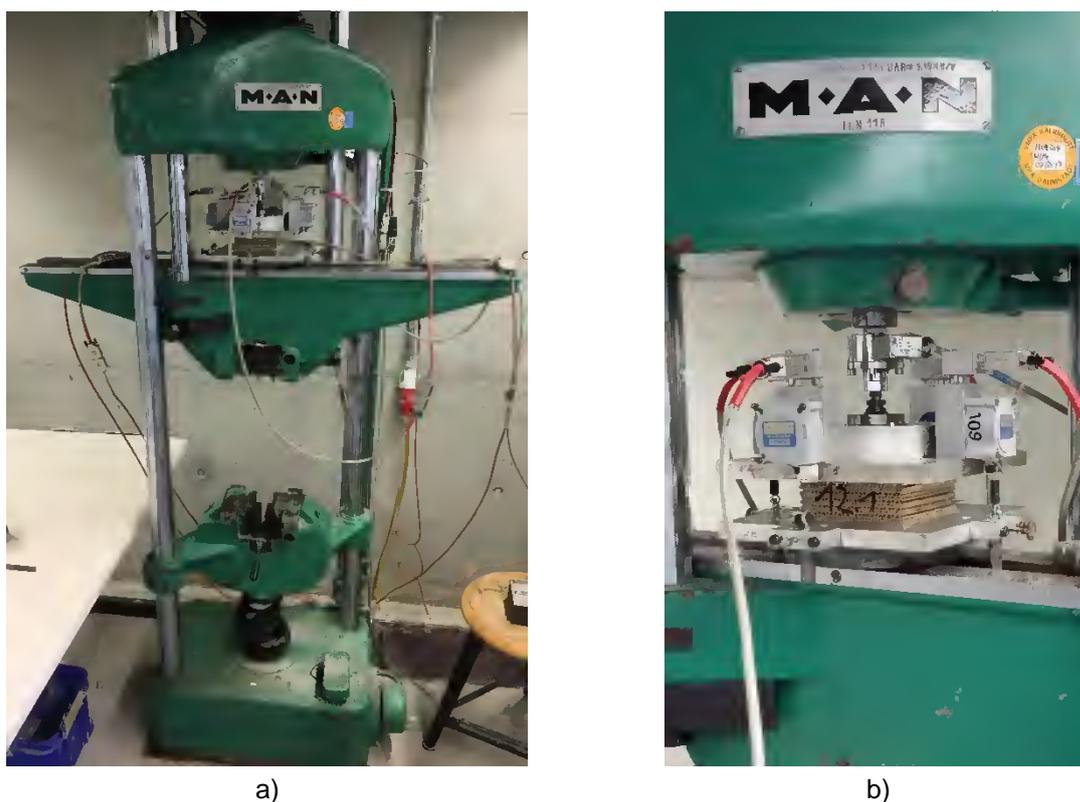


Abbildung 4-5: Druckversuch Gesamtansicht (a) und Nahaufnahme (b)

Figure 4-5: Compression test total view (a) and close up (b)

Die Probenbezeichnung folgt dem Schema, das anhand der Beispielprobe VR1-D-2-1 erläutert wird. Hierbei steht VR1 für die Versuchsreihe VR 1, D für Druckversuch, 2 für die Wirkungsachse der Last (hier in Richtung von Achse 2), 1 für die Probennummer.

4.2.5 Zugversuche

Für die Zugversuche wurden je nach Ausrichtung der Wellpappe unterschiedliche Versuchsaufbauten verwendet. Die Zugversuche in Achse 1 erfolgten an Quadern aus Wellpappe in Anlehnung an DIN EN 14509. Zur Lasteinleitung wurden an der Ober- und an der Unterseite der Probekörper Holzspanplatten mit Epoxidharz aufgeklebt. Die Spanplatten waren breiter als der Wellpappe-Quader, wodurch eine Lasteinleitung mit einer hinterschnittenen Lasteinleitungsstruktur über Kontakt möglich ist. Die Versuche wurden an der Universalprüfmaschine durchgeführt, an der auch die Druckversuche erfolgten. Die Prüfvorgaben der Maschinengeschwindigkeit sowie die Anordnung der Kraftmessdose und der Wegaufnehmer waren analog zu den Druckversuchen. Die Messrate betrug hier ebenfalls 5 Hz. Die analogen Messdaten wurden mit dem Messverstärkersystem Spider8-Messmodul bzw. mit QuantumX Messdatenerfassungssystem der Firma HBM verstärkt und digitalisiert und über die Messsoftware CatmanEasy, Version 3.4, der Firma HBM aufgezeichnet. Ein Bild eines Zugversuchs in Richtung von Achse 1 ist in Abbildung 4-6 a) und b) gegeben.



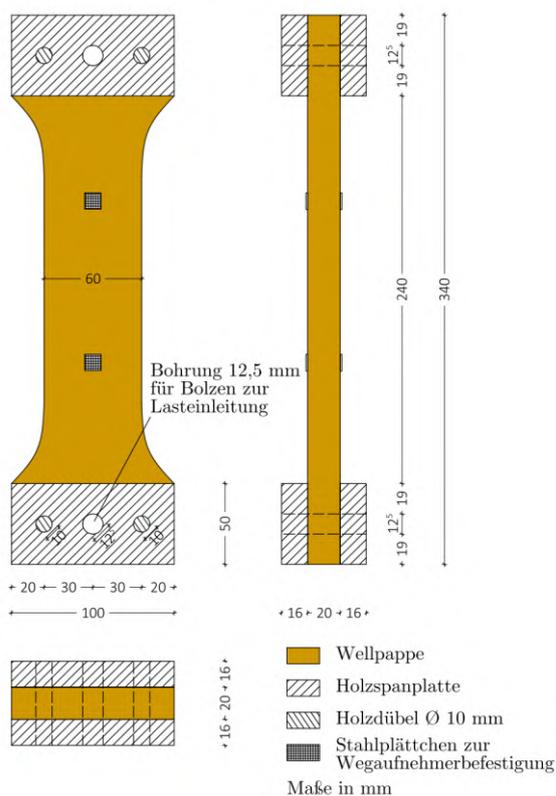
Abbildung 4-6: Zugversuch in Achse 1: Gesamtansicht (a) und Nahaufnahme (b)

Figure 4-6: Tensile test in Axis 1: Total view (a) and close up (b)

Vorversuche haben gezeigt, dass Wellpappe in den Achsen 2 und 3 viel steifer und fester ist als herkömmliche Kernmaterialien. Der Versuchsaufbau, der für Achse 1 zum Einsatz kam, ist für Zugversuche in den Achsen 2 und 3 nicht geeignet. Bei der Anordnung der Wegaufnehmer des Versuchsaufbaus gemäß Abbildung 4-6 werden Verformungen der Lasteinleitungskonstruktion als Verformungen der Probe interpretiert. Bei kleinen Lasten und geringen Materialsteifigkeiten ist der Fehler infolge dieser Vereinfachung vernachlässigbar. Aufgrund der hohen Steifigkeit der Wellpappe in den Achsen 2 und 3 ist diese Vereinfachung jedoch unzulässig. Zusätzlich ist die hinterschnittene Lasteinleitungskonstruktion nicht für die Versagenslasten von Wellpappequadraten mit Seitenlängen von 100 mm ausgelegt und würde selbst versagen. Daher wurden die Zugversuche in Anlehnung an DIN EN 789 an knochenförmigen Probekörpern an einer Universalprüfmaschine⁷ durchgeführt. Die Holzspanplatten wurden zur Verbesserung der Lasteinleitung mit den Probekörper verklebt. Außerdem wurden Holzdübel zur Lastverteilung vorgesehen und die Wellpappe wurde im Bereich der Lasteinleitung mit Epoxidharz getränkt. Mit Heißkleber aufgeklebte Stahlplättchen ermöglichten die Anbringung von induktiven Wegaufnehmern mit Hilfe von Magnethaltern. Die Kraft wurde mit einer Kraftmessdose⁸ aufgenommen. Die Messrate betrug 5 Hz. Auch diese Zugversuche wurden weggesteuert durchgeführt. Um eine quasi-statische Belastungssituation zu gewährleisten, wurde die Geschwindigkeit so gewählt, dass die Dauer von Belastungsbeginn bis zum Versagen 1 bis 5 Minuten betrug. Sie lagen zwischen 1 mm/min und 3 mm/min. In Abbildung 4-7 sind die Probekörpergeometrie und ein Beispielbild mit eingetragener Belastung gegeben.

⁷ Universalprüfmaschine der Firma MAN, Kapazität 400 kN

⁸ Kraftmessdose der Firma HBM, Typ: 1-U2B/10kN



a)

b)

Abbildung 4-7: Zugversuch in Achsen 2 und 3: Probengeometrie (a) und Beispielbild (Achse3) (b)

Figure 4-7: Tensile test in Axes 2 and 3: Specimen geometry (a) and picture (Axis 3) (b)

Die Probenbezeichnung folgt dem Schema, das anhand der Beispielprobe VR1-Z-2-1 erläutert wird. Hierbei steht VR1 für die Versuchsreihe VR 1, Z für Zugversuch, 2 für die Wirkungsachse der Last (hier in Richtung von Achse 2), 1 für die Probennummer.

4.2.6 Schubversuche

Herkömmliche Kernmaterialien werden gemäß DIN EN 14509 über 4-Punkt-Biegeversuche an Sandwichbalken hinsichtlich ihrer Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit charakterisiert. Die Sandwichbalken können sehr leicht aus Sandwichpaneelen herausgeschnitten werden. Neben der aufgebrachten Kraft wird auch die zugehörige vertikale Verformung in Balkenmitte gemessen. Zur Bestimmung des Schubmoduls G_{xz} ist es erforderlich, die Schubverformung zu bestimmen. Da die Gesamtverformung der Summe aus einem Biegeverformungsanteil und einem Schubverformungsanteil entspricht, kann der Anteil infolge Schubverformung des Kerns über das Differenzmaß von gemessener Gesamtverformung des Balkens zu errechneter Biegeverformung ermittelt werden. Dies ist möglich, da die Biegeverformung nahezu ausschließlich von den Deckschichten abhängt und daher sehr genau vorhergesagt werden kann. Vorversuche an Sandwichbalken mit Wellpappenkern haben folgende Erkenntnisse hervor gebracht, die gegen das Vorgehen nach DIN EN 14509 sprechen:

- Je nach Kernausrichtung sind die Schubsteifigkeiten von Sandwichbalken mit Wellpappenkern sehr groß und deshalb betragen die Schubverformungen in einem 4-Punkt-Biegeversuch teilweise weniger als 10 % der Gesamtverformung. Kleine Fehler

bei der Berechnung der Biegeverformungen (z.B. durch Messfehler der Blechdicke oder Fertigungstoleranzen bezüglich des inneren Hebelarms der Bleche zueinander) wirken sich stark auf die Bestimmung des Schubmoduls aus und führen zu großen Fehlern in den Ergebnissen.

- Ebenso führen kleine geometrische Abweichungen im Versuchsaufbau zu großen Fehlern bei der späteren Schubmodulbestimmung.
- Die Herstellung von Sandwichbalken ist aufwendig, da diese nicht einfach wie bei herkömmlichen Kernmaterialien aus Sandwichpaneelen herausgeschnitten werden können, sondern eigens produziert werden müssen.
- Der Materialverbrauch für einen Probekörper ist vergleichsweise groß.

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schubmoduln und Schubsteifigkeiten von Wellpappe des orthotropen Materials wurde nach DIN 53294 gewählt. Die Norm aus dem Jahr 1982 beschreibt ein Prüfverfahren zur Beurteilung der „Festigkeits- und Verformungseigenschaften von ebenen und planparallelen Kernverbunden bei Schubbeanspruchung“ (DIN 53294).

Schema und Geometrie des Versuchsaufbaus sind in Bild Abbildung 4-8 dargestellt. Die Dicke der Probekörper ist in Abbildung 4-8 b) nicht bemaßt, da sie je nach Versuchsreihe zwischen 30 und 50 mm variiert. Eine Fotografie des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4-9 a) gegeben.

Die Proben werden bei diesem Versuchsaufbau zwischen zwei Schneidenplatten aus Stahl, die zur Einleitung der Last dienen, geklebt. Hierzu wurde in den durchgeführten Versuchen ein PU-Klebstoff⁹ verwendet. Die Maschinendruckkraft wird über Kontakt von den mit der Maschine fest verbundenen Schneidenlagern an die Schneidenplatten übergeben. Der Scherweg v also die Differenzverformung zwischen den Schneidenplatten in Richtung von F_{II} , wurde über den Mittelwert von zwei induktiven Wegaufnehmer, die auf der Vorder- und auf der Rückseite des Probekörpers angebracht wurden, gemessen (s. Abbildung 4-9). Die Versuche wurden weggesteuert an einer Universalprüfmaschine¹⁰ durchgeführt. Die Maschinenkraft wurde über den Öldruck der Universalprüfmaschine bestimmt und wie die Wegmessungen mit einer Messrate von 5 Hz aufgezeichnet. Die analogen Messdaten wurden mit dem Messverstärkersystem Spider8-Messmodul bzw. mit QuantumX Messdatenerfassungssystem der Firma HBM verstärkt und digitalisiert und über die Messsoftware CatmanEasy, Version 3.4, der Firma HBM aufgezeichnet. Je nach Probensteifigkeit wurden Geschwindigkeiten zwischen 0,5 mm/min und 2 mm/min gewählt, um eine quasi-statische Belastung der Probe sicherzustellen.

⁹Jowat - FaserPUR 686.60, 1K-PUR-Prepolymer

¹⁰Universalprüfmaschine der Firma MAN, Kapazität 1000 kN

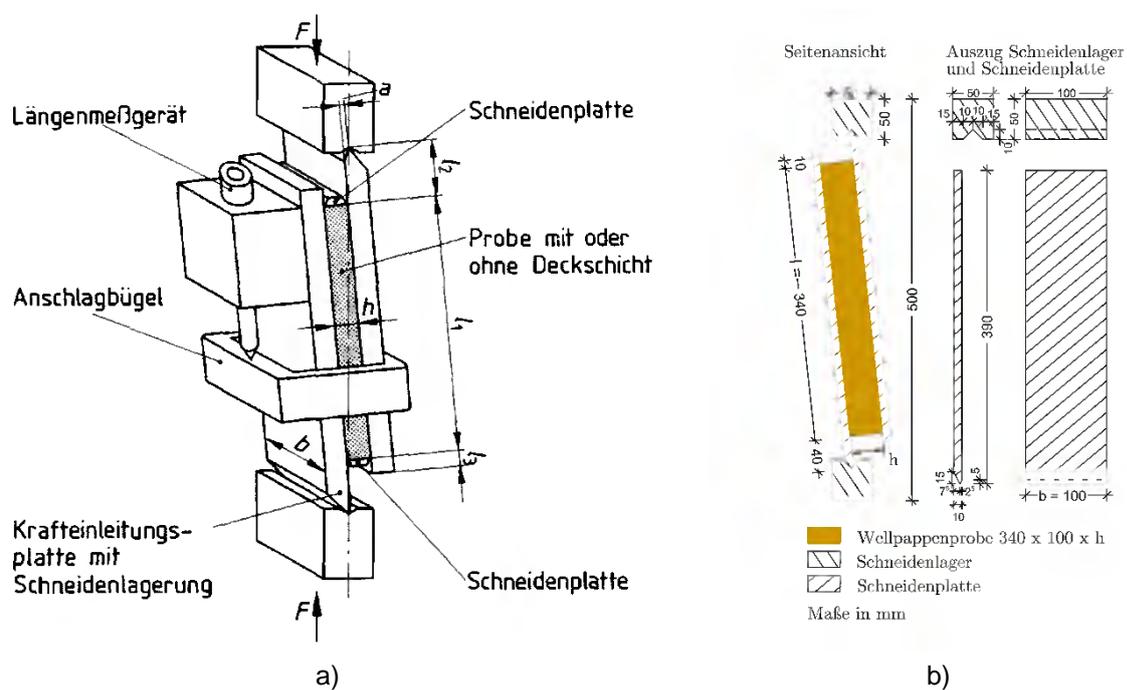


Abbildung 4-8: Schubversuch: Versuchsaufbau aus DIN 53294 (a) und Geometrie (b)

Figure 4-8: Shear test: Test setup according to DIN 53294 (a) and geometry (b)

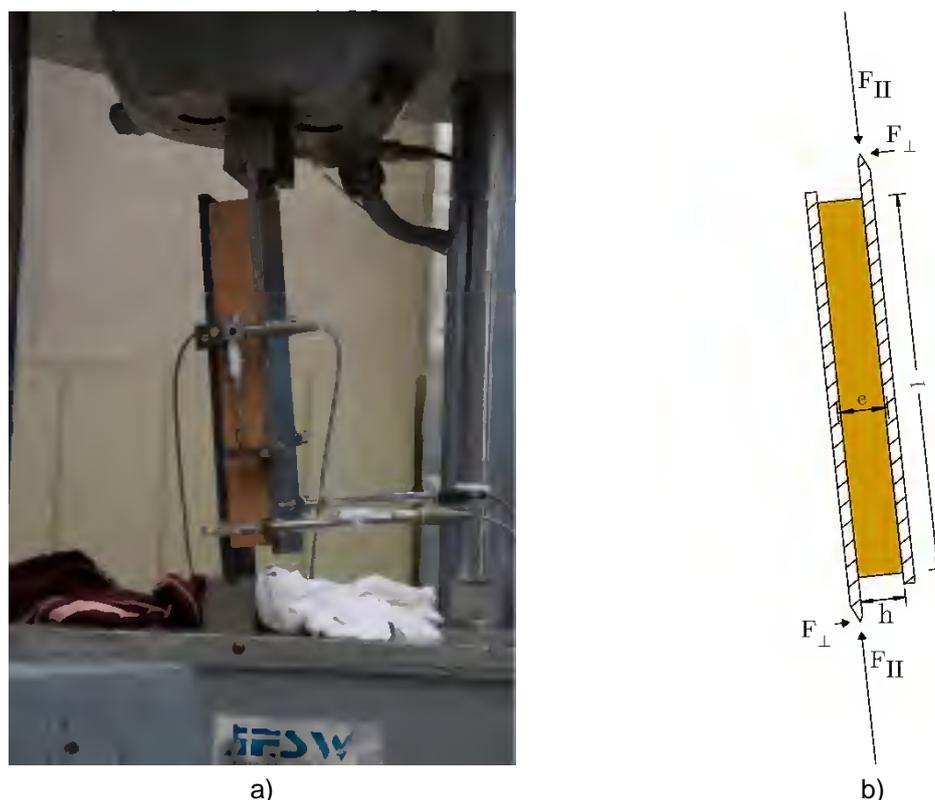


Abbildung 4-9: Schubversuch: Versuchsaufbau Nahaufnahme (a) sowie Kraftanteile F_{\perp} und F_{II} einer Schub-Probe (b)

Figure 4-9: Shear test: Test setup close up picture (a) and force components F_{\perp} and F_{II} of a shear specimen (b)

Der Versuchsaufbau bringt den Nachteil mit sich, dass kein reiner Schubzustand im Probekörper erzeugt wird, sondern auch ein Biegemoment auf den Probekörper einwirkt. Die Größe des Biegemoments ist vom Abstand e der beiden Schneidenplatten zueinander abhängig und erzeugt eine Normalspannung in Richtung der Probendicke h (s. Bild Abbildung 4-9 b). Auch der in Richtung der Probendicke wirkende Kraftanteil F_{\perp} erzeugt eine kleine Normalspannung in Probendickenrichtung σ_{\perp} . Wird eine große Probekörperlänge l bei gleichzeitig kleiner Dicke h der Probe gewählt, wird damit e und die Neigung des Probekörpers klein gehalten und damit auch das Moment und der Kraftanteil F_{\perp} . Zusätzlich führt eine Vergrößerung der Probenlänge l zu einer Erhöhung des Flächenträgheitsmoments, das für die Biegebeanspruchung wirksam ist. Die resultierende Normalspannung σ_{\perp} wird somit klein gehalten. HEYDER ET AL. (2002) beschreiben diesen Sachverhalt über einen Schubmodul G^{*11} , der mit steigendem Höhen/Breiten-Verhältnis gegenüber dem wahren Schubmodul des Materials abnimmt. Die Darstellung von HEYDER ET AL. (2002) in Abbildung 4-10 zeigt diesen Zusammenhang anschaulich.

¹¹ G^* ist der Schubmodul, der aus der Versuchsauswertung des hier beschriebenen Versuchsaufbaus nach DIN 53294 hervorgeht

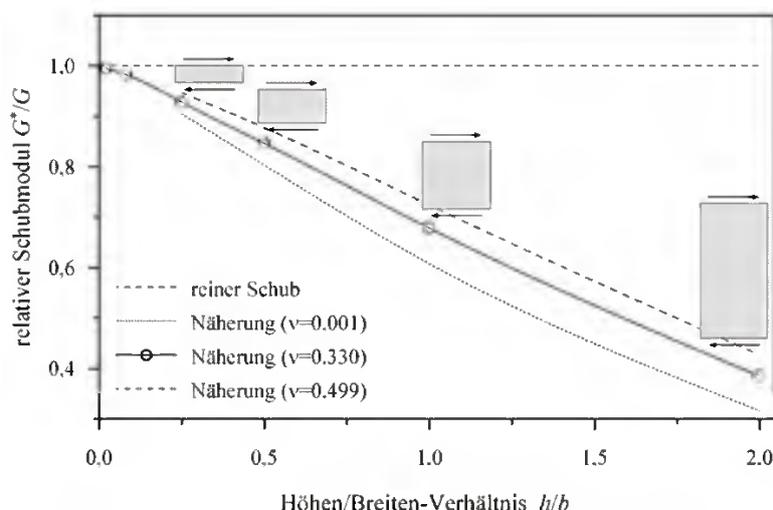


Abbildung 4-10: Abhängigkeit des mit dem Versuchsaufbau nach DIN 53294 ermittelten Schubmoduls vom Höhen/Breiten Verhältnis der Probe, HEYDER ET AL. 2002

Figure 4-10: Dependence of the calculated shear modulus according to DIN 53294 on the height/width-ratio of the specimen, HEYDER ET AL. 2002

Da HEYDER ET AL. (2002) von isotropen Materialien ausgehen, Wellpappe sich hingegen anisotrop verhält, wird in Abschnitt 4.3.1 der Einfluss der Anisotropie auf die Ermittlung der Schubmoduln mit Hilfe numerischer Methoden genauer analysiert.

Gemäß Abschnitt 2.2.2 enthält die Elastizitätsmatrix von Wellpappe drei Schubmoduln, G_{12} in Ebene 1-2, G_{13} in Ebene 1-3 und G_{23} in Ebene 2-3. Wie jedoch in Abschnitt 2.3 beschrieben, wird die Schubebene 1-3 in keiner der avisierten Kernausrichtung in einem Sandwichelement wirksam. An einer Wellpappensorte wird der Schubmodul G_{13} bestimmt, um die Größenordnung dieses Schubmoduls kennen zu lernen. Bei den übrigen Wellpappen werden nur die Schubmoduln G_{12} und G_{23} bestimmt.

Die Probenbezeichnung folgt dem Schema, das anhand der Beispielprobe VR1-SV-23-1 erläutert wird. Hierbei steht VR1 für die Versuchsreihe VR 1, SV für Schubversuch, 23 für die beanspruchte Ebene (hier Ebene 2-3), 1 für die Probennummer.

4.2.7 Kriechversuche

Gemäß DIN EN 14509 werden die Kriechfaktoren von Sandwich-Kernmaterialien mit Hilfe von Langzeitversuchen an Bauteilen mit Längen von mindestens 3 m durchgeführt. Es werden Einfeldträger unter gleichmäßig verteilten Lasten untersucht. Aufgrund der erforderlichen Klimatisierung der Proben während der gesamten Versuchslaufzeit wurden die Versuche in einer Klimakammer durchgeführt. Da die Klimakammer mit einer Grundfläche von ca. 15 m² keine Versuche an mehreren Probekörpern mit einer Länge von 3 m zur gleichen Zeit zulässt, wurden in dieser Arbeit kleinere Versuchsaufbauten gewählt. Bei Versuchsreihe VR 1 wurde sich an DIN EN 1156 orientiert. Diese Norm gilt für Plattenwerkstoffe aus Holz. Der Versuchsaufbau und die Probekörperabmessung ist in Abbildung 4-11 dargestellt. Die Proben werden als Einfeldträger unter 4-Punkt-Biegung getestet. Für Versuchsreihe VR 3 wurde ebenfalls ein 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, jedoch ist der Versuchsaufbau an

die Dauerstandfestigkeit-Versuche von Sandwichelementen nach DIN EN 14509 angelehnt. Der Versuchsaufbau und die Probekörperabmessung sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Hier wurde eine etwas größere Stützweite als in VR 1 gewählt, um größere und damit leichter messbare absolute Verformungen des Probekörpers zu erzielen. Die Durchbiegung der Träger in Feldmitte wurde mit analogen Messuhren gemessen. Die Belastung erfolgte mit Gewichten aus Stahlblech.

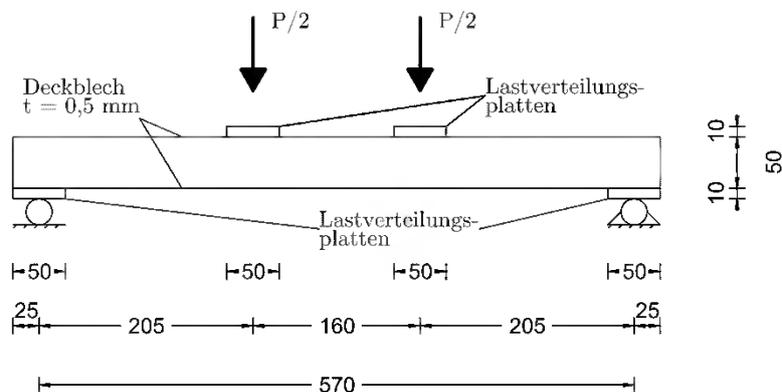
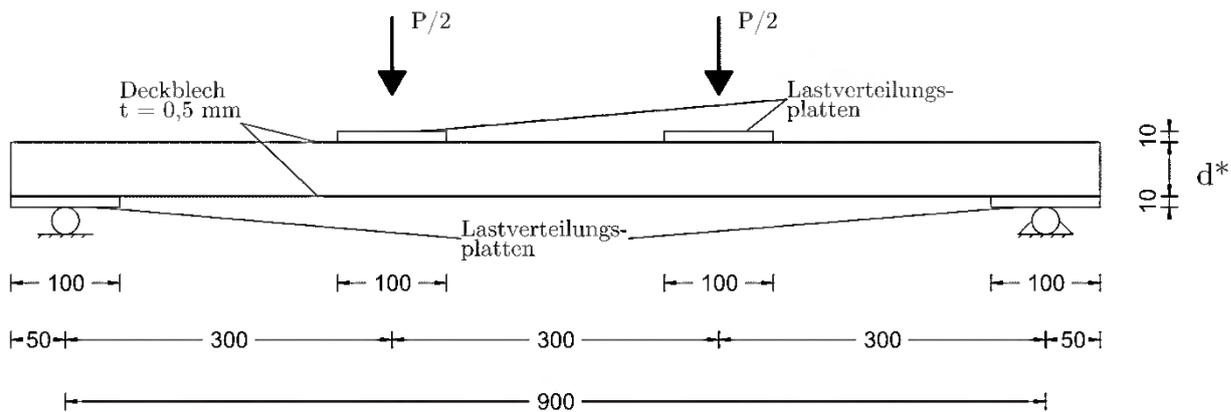


Abbildung 4-11: Kriechversuch: Versuchsaufbau der Proben von VR 1

Figure 4-11: Creep test: Test setup for the specimens of VR 1



* d (Typ 1) = 50 mm, d (Typ 2) = 40 mm

Abbildung 4-12: Kriechversuch: Versuchsaufbau der Proben von VR 3

Figure 4-12: Creep test: Test setup for the specimens of VR 3

Die Belastungen der Probekörper sowie die zugehörigen Deckblechspannungen σ_{DB} sind in Tabelle 4-4 gegeben. Die Größe der Belastung wurde nach zuvor durchgeführten Referenzversuchen festgelegt. Die Ergebnisse der Referenzversuche sind in Tabelle 4-4 aufgeführt. Die Dauerlasten wurden zu ca. 30 % der Bruchlasten gewählt. Da in kleinen Dehnungsbereichen für feste Polymere von linearer Viskoelastizität ausgegangen werden kann (s. Abschnitt 2.2.2.4), ist das Lastniveau zur Bestimmung der Kriechfaktoren nicht relevant. Die hier betroffene Dehnungskomponente ist die Schubverzerrung zu Belastungsbeginn γ_{11} . Wie in Tabelle 4-4 aufgeführt, liegt die aus

den Schubmoduln aus Abschnitt 4.5.1 errechnete Schubverzerrung in allen Fällen unter 1 %.

Tabelle 4-4: Belastung sowie resultierende Spannungen und Schubverzerrungen der Langzeitversuche

Table 4-4: Load, resulting stresses and shear deformation of the long term tests

Versuchstyp	Referenzlast ^[1]	Belastung P		σ_{DB}	G ^[2]	τ_{xz}	γ_{t1}
	RL in N	in N	in % von RL	in N/mm ²	in N/mm ²	in N/mm ²	in N/mm ²
VR1-LZ-T1	1049	308	29,4	23,6	19,1	0,06	0,003
VR1-LZ-T2	3011	981	32,6	79,7	176,8	0,19	0,001
VR3-LZ-T1	1555	491	31,5	32,1	27,1	0,05	0,002
VR3-LZ-T2	4700	1373	29,2	114,5	134,1	0,17	0,001

^[1] Referenzlast RL aus Abschnitt 4.5.2

^[2] Schubmodul G aus Abschnitt 4.5.1

Die Probenbezeichnung folgt dem Schema, das anhand der Beispielprobe VR1-LZ-T1-1 erläutert wird. Hierbei steht VR1 für die Versuchsreihe VR 1, LZ für Kriechversuch, T1 für den Elementtypen gemäß Abbildung 2-23 und 1 für die Probennummer.

4.3 Voruntersuchungen

4.3.1 Schubmodul

Gemäß Abschnitt 4.2.6 hängt die Qualität der Ergebnisse der Schubversuche nach DIN 53294 vom Höhen/Breiten-Verhältnis der Probekörper ab. Um zu überprüfen, ob die Ergebnisse an den Schubproben mit der in Bild Abbildung 4-8 b dargestellten Geometrie eine ausreichend genaue Bestimmung des Schubmoduls ermöglichen, wird der Versuchsaufbau in einem Finite-Elemente-Modell mit Hilfe des Programms RFEM nachgebildet. Die Idee besteht darin, ein Material mit zuvor zugewiesenen Elastizitätsparameter in einem numerischen Modell so zu beanspruchen wie im Experiment und anhand der Verformungen des numerischen Modells diese Elastizitätsparameter zu ermitteln. Ein Vergleich der zurückgerechneten mit den zugewiesenen Parametern soll Aufschluss über die Eignung des Versuchsaufbaus liefern.

Grundsätzlich kann der Kern zur Bestimmung des Schubmoduls in einer Ebene mit dem in Abschnitt 4.2.6 vorgestellten Versuchsaufbau auf zwei Arten ausgerichtet werden. Exemplarisch werden die beiden Möglichkeiten für die Schubebene 2-3 in Abbildung 4-13 gezeigt. Die vorderen Schneidenplatten sind zur besseren Erkennbarkeit transparent dargestellt. Bei Variante 1 entspricht Achse 2 der Dickenrichtung der Probe, bei Variante 2 liegt die weniger steife Achse 3 in Richtung der Probendicke. Im Rahmen von Vorversuchen an Schubversuchen in der Schubebene 2-3 wurde festgestellt, dass die Schubmoduln, die sich aus der Scherung der beiden Schneidenplatten für beide Varianten nach Abbildung 4-13 ergeben, unterschiedlich sind. In einem Finite-Elemente-Modell werden daher beide Varianten untersucht, um die Ursache für diese Diskrepanz zu finden.

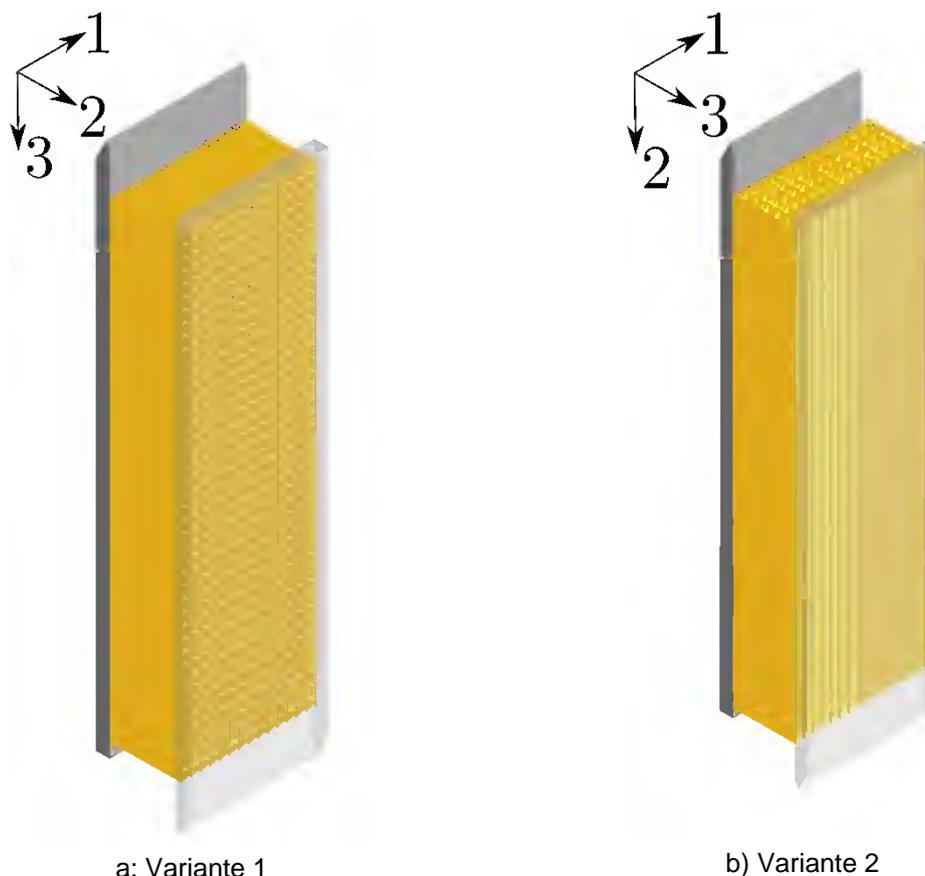


Abbildung 4-13: Schubversuch - Varianten für Schub in Ebene 2-3

Figure 4-13: Shear test – Variants for shear in plane 2-3

Es wird ein zweidimensionales FE-Modell erzeugt, das die zu untersuchende Schubebene abbildet. Die Schneidenplatten werden als Stäbe modelliert, die Wellpappen-Proben mit Schalen-Elementen. Die Schneidenplatten erhalten ein isotropes, linear-elastisches Materialverhalten mit den Parametern, die in der Programmbibliothek für Stahl hinterlegt sind. Der Wellpappe wird ein orthotropes elastisches Materialverhalten zugewiesen. Die Größenordnungen der Parameter wurden anhand von Vorversuchsergebnissen gewählt. Mit einer linear elastischen Berechnung nach Theorie I. Ordnung wird der Scherwinkel zwischen den Schneidenplatten für eine Einheitslast von $F = 1$ kN berechnet. Die Ermittlung der Schubmoduln aus den Scherwinkeln erfolgte gemäß Abschnitt 4.4.1.

Die Ergebnisse sowie der Vergleich zu den tatsächlich im Modell hinterlegten Schubmodul für die Wellpappe-Schalenelemente in der Schubebene sind in Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5: Vergleich der tatsächlichen Schubmoduln G mit den Schubmoduln G^* nach DIN 53294 mit Hilfe der FEM

Table 4-5: Comparison of the true shear modulus with the shear modulus G^* according to DIN 53294 using the finite-element-method

		Schwerweg u in mm (FEM)	Scherwinkel γ	G^* in N/mm ²	G in N/mm ²	Abweichung von G^* zu G in %
Ebene 1-3	Variante 1	2,360	0,059	5,0	5,0	-0,3
	Variante 2	2,673	0,067	4,4	5,0	-12,0
Ebene 1-2	Variante 1	0,478	0,012	24,6	25,0	-1,6
	Variante 2	1,152	0,029	10,2	25,0	-59,1
Ebene 2-3	Variante 1	0,130	0,003	90,5	100,0	-9,5
	Variante 2	0,145	0,004	81,1	100,0	-18,9

Die aus der Verformung des FE-Modells berechneten Schubmoduln G^* weichen um bis zu 59 % (Ebene 1-2, Variante 2) vom tatsächlich hinterlegten Schubmodul G ab. In der Variante 1 ist die Abweichung für alle drei Ebenen geringer als für Variante 2 und liegt in für die Schubebenen 1-2 und 1-3 unter 2 %.

Für Ebene 2-3 beträgt die Abweichung 9,5 %. In dieser Ebene ist der Schubmodul am größten, da hier die Linerpapiere die Schubspannungen über ein ebenes Schubfeld übertragen und die gewellten Papiere nahezu nicht am Lastabtrag beteiligt sind. Eine Abweichung von etwa 10% wird hier als akzeptabel bewertet, da die Schubmoduln in Ebene 2-3 ohnehin um ein vielfaches (bis zu Faktor 50) größer sind als die der herkömmlichen Kernmaterialien. Die Schubmoduln sind in dieser Ebenen so groß, dass in einem Sandwichelement der Schubverformungsanteil gegenüber der Biegeverformung fast vernachlässigbar klein wird.

Der Grund für die großen Abweichungen von G^* zu G in der jeweiligen Variante 2 (bis zu fast 60 % bei Ebene 1-2) liegt darin, dass hier immer die Achse mit dem geringeren E-Modul in Dickenrichtung der Probe orientiert ist. Infolge der in Abschnitt 4.2.6 beschriebenen Beanspruchungen der Proben in Dickenrichtung, werden die Proben in Dickenrichtung stärker komprimiert, was auch zu einer zusätzlichen Verschiebung der Knoten in Richtung des Scherwegs u führt und infolge der Anordnung der Wegmessung auch fälschlicherweise als Scherweg interpretiert wird. Dass die Abweichung in Ebene 1-2 am größten ist, lässt sich dadurch erklären, dass in Variante 1 Achse 2, die den größten Druck-E-Modul aufweist, und in Variante 2 Achse 1, die geringste Druck-E-Modul aufweist, in der Dickenrichtung der Probe orientiert ist.

Die Ausrichtung des Kernmaterials im Schubprobekörper wird auf der Grundlage der hier gewonnenen Ergebnisse so gewählt, dass die Wellpappe einen möglichst großen E-Modul in der Richtung der Normalspannung σ_{\perp} , also in Dickenrichtung der Probe aufweist. Dies entspricht für alle drei Schubebenen jeweils den Ausrichtungen nach Variante 1. In Abbildung 4-14 sind die gewählten Ausrichtungen dargestellt. Zur Verbesserung der Erkennbarkeit sind bei den Teilbilder b und c jeweils die vordere Schneidenplatte transparent dargestellt.

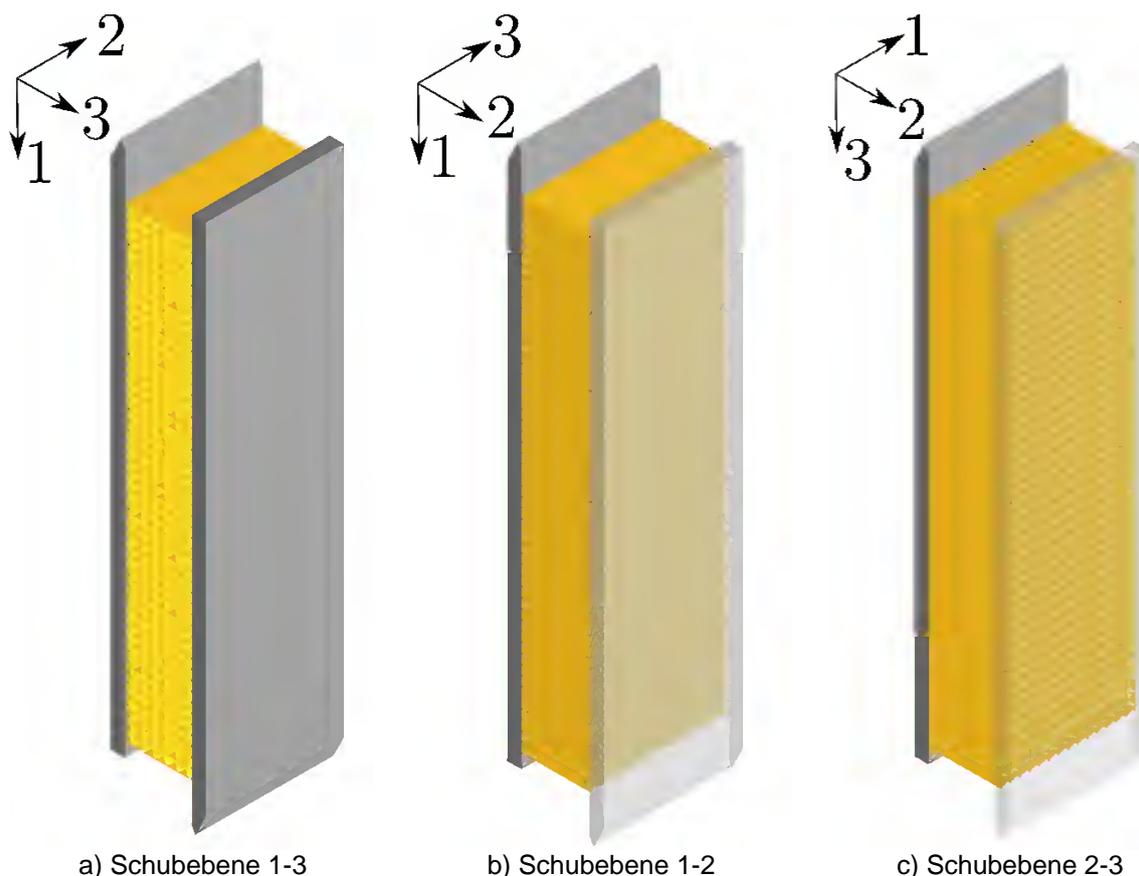


Abbildung 4-14: Schubversuch: Kernaussrichtung in der Proben in den drei Schubebenen

Figure 4-14: Shear test: Core orientation of the specimens in the three shear planes

4.3.2 Querdehnzahlen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde für die Bestimmung eines elastischen Materialgesetzes für Wellpappe auf die sehr aufwendige experimentelle Bestimmung von Querdehnzahlen verzichtet und stattdessen auf der Grundlage der in diesem Abschnitt vorgestellten numerischen Voruntersuchungen und theoretischen Überlegungen, vereinfachte Ansätze gewählt. Nachfolgend werden diese beschrieben und der Einfluss der Querdehnzahlen auf die Genauigkeit einzelner Berechnungsergebnisse bewertet.

Da in der Literatur zwar keine Werte für die Querdehnzahlen von Wellpappe aber für Papiere (s. Tabelle 2-4 in Abschnitt 2.2.2.3) gefunden werden konnten, werden auf der Grundlage der Querdehnzahlen von Papier Ersatz-Querdehnzahlen für das vereinfacht angenommene Kontinuum Wellpappe mit Hilfe numerischer Modelle ermittelt. Ein würfelförmiger Körper aus Wellpappe wird als aufgelöste Struktur modelliert, d. h. die einzelnen Papiere der Wellpappe werden mit Hilfe von Schalenelementen abgebildet. Die Papiere erhalten orthotrope Materialeigenschaften in Anlehnung an die Angaben in Tabelle 2-4. Der Wellpappe-Körper wird jeweils in allen drei Hauptachsen unter einaxialen Druck versetzt. Die Dehnung des Körpers können mit einer linear-elastischen Berechnung in allen drei Hauptachsen ermittelt werden und führen zu den Querdehnzahlen des modellierten Körpers und somit zu den Querdehnzahlen von

Wellpappe. Beispielhaft wird für eine Druckspannung σ_i in Richtung von Achse i der Wellpappe die Berechnung der Querdehnzahl ν_{ij} in Gleichung Gl. 4-1 gezeigt.

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Die Querdehnzahlen, die sich auf Grundlage der numerisch ermittelten Dehnungen nach Gleichung berechnen lassen, ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}\nu_{12} &= 0,00 \\ \nu_{21} &= 0,00 \\ \nu_{13} &= 0,00 \\ \nu_{31} &= 0,29 \\ \nu_{23} &= 0,14 \\ \nu_{32} &= 0,33\end{aligned}$$

Die Querdehnzahlen ν_{12} und ν_{13} haben den Wert 0. Die Lasten werden hier in Richtung von Achse 1 eingeleitet. Eine Verformung in Querrichtung setzt hier eine Dehnung oder Stauchung der ebenen Papiere voraus. Im Vergleich zum sehr geringen E-Modul der Wellpappe in Achse 1 (aufgrund der Makrostruktur der gewellten Papiere) sind die ebenen Papiere aber vielfach steifer. Eine Dehnung in Querrichtung tritt daher nicht auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Sachverhalt für alle Wellpappen gilt.

Die Querdehnzahl ν_{21} beträgt ebenfalls 0. Hier wirkt die Last in Richtung von Achse 2. In der Richtung von Achse 1 können die einzelnen Papiere sich zwar entsprechend ihrer zugewiesenen Querdehnzahl dehnen, jedoch wird diese Querdehnung aufgrund der Makrostruktur und der damit verbundenen geringen Steifigkeit in Achse 1 nicht weitergegeben. Auch in diesem Fall wird daher für alle Wellpappen davon ausgegangen, dass die Querdehnzahl 0 ist und die Größe der Querdehnzahl der einzelnen Papiere keine Rolle spielt.

Die Querdehnzahlen ν_{23} und ν_{32} hängen stark von den Vorgaben ab, die für die Papiere in der numerischen Simulation am aufgelösten Modell zugewiesen wurden (Vorgaben: $\nu_{CD,MD} = 0,15$, $\nu_{MD,CD} = 0,39$, Papierachse CD entspricht Achse 2 und Papierachse MD entspricht Achs 3 der Wellpappe). Für ν_{23} nehmen die gewellten Papiere kaum Einfluss. Die Querdehnung der ebenen Papiere in Richtung von Achse 3 kann sich nahezu frei einstellen, da die gewellten Papiere keine nennenswerte Dehnsteifigkeit in Richtung von Achse 3 aufweisen und diese damit nicht behindern. Die ermittelte Querdehnzahl entspricht demzufolge (mit einer geringen Abweichung von ca. 7 %) der Vorgabe für die ebenen Papiere. Die Abweichung bei ν_{32} ist etwas größer, da eine gewisse Querdehnungsbehinderung von den gewellten Papieren ausgeht. Diese erfahren aufgrund ihrer Form nur geringe Normalspannungen in Richtung von Achse 3 und somit auch keine Dehnung in der Querrichtung (Achse 2). Die Ebenen Papiere hingegen übertragen die aufgebrachte Druckkraft und weisen Normalspannungen in Richtung von Achse 3 auf. Sie erfahren somit auch eine Querdehnung in Richtung von Achse 2. Durch diesen Sachverhalt stellt sich zwischen den ebenen und den gewellten Papieren

ein innerer Zwang ein, der für die ebenen Papiere einer Querdehnungsbehinderung gleich kommt.

Infolge einer Normalspannung in Richtung von Achse 3 wird dem numerischen Modell eine Querdehnzahl in Richtung von Achse 1 von $\nu_{31} = 0,29$ entnommen. Die Größe dieser Querdehnung ist folge der Geometrie der gewellten Papiere. Aufgrund der Wellenform der Papiere, entstehen schon bei geringen Spannungen Abtriebskräfte in Richtung von Achse 1. Je größer das Verhältnis von Wellenhöhe h zu Wellenteilung t ist, desto größer ist die resultierende Abtriebskraft. Da die Steifigkeit in Achse 1 vergleichsweise gering ist, führen auch geringe Abtriebskräfte zu den gemessenen Dehnungen. Die Größe der Querdehnzahl ν_{31} hängt demzufolge von der Geometrie der gewellten Papiere, der Dehnsteifigkeit der Wellpappe in Richtung von Achse 1 und der Dehnsteifigkeit der ebenen Papiere in Richtung von Achse 3 ab.

Für die Querdehnzahlen ν_{23} , ν_{32} sowie ν_{31} kann auf der Grundlage der vorangegangenen FE-Analyse und der zugehörigen Überlegungen keine verlässliche vereinfachte Annahme getroffen werden, da diese stark von den unbekanntem mechanischen und geometrischen Parametern der verwendeten Papiere abhängen. Daher soll im Folgenden anhand einer Parameterstudie bestimmt werden, wie groß der Einfluss einer Fehleinschätzung dieser drei Querdehnzahlen ist. Als Kriterien für diese Bewertung sollen die Veränderung der Verformung und des ersten Eigenwerts eines Sandwichelementen dienen, da diese zu den wichtigsten Bemessungskriterien für Sandwichelemente zählen und im Rahmen dieser Arbeit quantitativ nur Verformungen und Verzweigungsspannungen mit Hilfe der FEM bestimmt werden. Ein Sandwichelement wird in einem 3D-Modell simuliert.

Für die untersuchten Kernausrichtungen Typ 1 bis Typ 3 (Definition gem. Abschnitt 2.3) werden je 10 Kombinationen von Querdehnzahlen untersucht. Die Querdehnzahlen werden zwischen den Werten 0 (keine Querdehnung) und 0,5 (Volumenkonstanz) variiert, wobei die Orthotropiebedingungen (siehe Gleichung Gl. 2-7) stets eingehalten sind. In den Tabelle 4-6 bis Tabelle 4-8 werden die Ergebnisse der Querdehnzahlvariationen für die drei untersuchten Bauteiltypen ausgegeben. Es wurden die maximale Durchbiegung in Feldmitte u_{\max} sowie der zur kleinsten Knitterspannung gehörige kritische Laststeigerungsfaktor $\eta_{cr,w}$ ausgewertet. Die Bildung des Variationskoeffizienten über alle Modelle für u_{\max} als auch für $\eta_{cr,w}$ ermöglicht eine anschauliche Darstellung der Auswirkung der Querdehnzahlvariation auf die Ergebnisse. Die größten Variationskoeffizienten der drei untersuchten Typen 1 bis 3 betragen sowohl für u_{\max} als auch für $\eta_{cr,w}$ 0,5 % (s. Tabelle 4-6 bis Tabelle 4-8). Damit ist der Einfluss der Querdehnzahlvariation auf die untersuchten Ergebnisse als sehr gering zu bewerten. Die größte Abweichung liegt unterhalb der für FE-Modelle üblichen Fehlertoleranz von ca. 3 % (BARTH & RUSTLER 2013).

Aufgrund der Unempfindlichkeit der Berechnungsergebnisse von den angenommenen Querdehnzahlen werden für weitere Untersuchungen vereinfachend alle Querdehnzahlen zu 0 gesetzt. Sollen auf der Grundlage des hier ermittelten Materialmodells weitergehende quantitative Erkenntnisse gewonnen werden, ist dieser vereinfachte Ansatz in Frage zu stellen und für den jeweiligen Fall zu validieren.

Mechanischer Materialparameter von Wellpappe

Typ 1

$E_x =$	170	$G_{yz} =$	5			
$E_y =$	50	$G_{xz} =$	25			
$E_z =$	3	$G_{xy} =$	100			
Kombination-Nr.					u_{\max}	$\eta_{cr,w}$
1.1	$v_{yz} = v_{31}$	0,00	$v_{zy} = v_{13}$	0,00	48,3	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,00	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
1.2	$v_{yz} = v_{31}$	0,10	$v_{zy} = v_{13}$	0,01	48,3	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,10	$v_{yx} = v_{32}$	0,03		
1.3	$v_{yz} = v_{31}$	0,20	$v_{zy} = v_{13}$	0,01	48,3	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,20	$v_{yx} = v_{32}$	0,06		
1.4	$v_{yz} = v_{31}$	0,30	$v_{zy} = v_{13}$	0,02	48,2	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,30	$v_{yx} = v_{32}$	0,09		
1.5	$v_{yz} = v_{31}$	0,40	$v_{zy} = v_{13}$	0,02	48,1	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,40	$v_{yx} = v_{32}$	0,12		
1.6	$v_{yz} = v_{31}$	0,50	$v_{zy} = v_{13}$	0,03	47,9	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,50	$v_{yx} = v_{32}$	0,15		
1.7	$v_{yz} = v_{31}$	0,00	$v_{zy} = v_{13}$	0,00	47,7	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,20	$v_{yx} = v_{32}$	0,06		
1.8	$v_{yz} = v_{31}$	0,10	$v_{zy} = v_{13}$	0,01	48	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,50	$v_{yx} = v_{32}$	0,15		
1.9	$v_{yz} = v_{31}$	0,20	$v_{zy} = v_{13}$	0,01	48,1	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,40	$v_{yx} = v_{32}$	0,12		
1.10	$v_{yz} = v_{31}$	0,50	$v_{zy} = v_{13}$	0,03	48	0,98
	$v_{xz} = v_{21}$	0,00	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0,10	$v_{yx} = v_{32}$	0,03		

VarK(u_{\max}) VarK($\sigma_{cr,w}$)
0,004 **0,000**

Tabelle 4-6: Querdehnzahlvariation bei Typ 1 Elementen

Table 4-6: Poisson's ratio variation of type 1 elements

Typ 2

$E_x =$	50	$G_{yz} =$	25			
$E_y =$	3	$G_{xz} =$	100			
$E_z =$	170	$G_{xy} =$	5			
Kombination-Nr.					u_{max}	$\eta_{cr,w}$
2.1	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,00	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,6	2,37
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,00		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,00	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,00		
2.2	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,10	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,5	2,39
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,34		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,10	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,01		
2.3	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,20	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,4	2,4
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,48		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,20	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,01		
2.4	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,30	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,5	2,4
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,48		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,30	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,02		
2.5	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,40	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,5	2,4
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,48		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,40	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,02		
2.6	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,50	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,6	2,37
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,48		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,50	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,03		
2.7	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,00	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,5	2,4
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,17		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,20	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,03		
2.8	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,10	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,6	2,39
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,34		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,50	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,02		
2.9	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,20	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,6	2,38
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,17		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,40	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,01		
2.10	$\nu_{yz} = \nu_{12}$	0,50	$\nu_{zy} = \nu_{21}$	0,00	23,5	2,4
	$\nu_{xz} = \nu_{32}$	0,00	$\nu_{zx} = \nu_{23}$	0,48		
	$\nu_{xy} = \nu_{31}$	0,10	$\nu_{yx} = \nu_{13}$	0,01		

VarK(u_{max}) VarK($\sigma_{cr,w}$)
0,004 **0,000**

Tabelle 4-7: Querdehnzahlvariation bei Typ 2 Elementen

Table 4-7: Poisson's ratio variation of type 2 elements

Typ 3

$E_x =$	170	$G_{yz} =$	5			
$E_y =$	3	$G_{xz} =$	100			
$E_z =$	50	$G_{xy} =$	25			
Kombination-Nr.					u_{max}	$\eta_{cr,w}$
3.1	$v_{yz} = v_{31}$	0	$v_{zy} = v_{13}$	c	24,3	2
	$v_{xz} = v_{21}$	0	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.2	$v_{yz} = v_{31}$	0,006	$v_{zy} = v_{13}$	0,10	24,2	2,01
	$v_{xz} = v_{21}$	0,1	$v_{zx} = v_{12}$	0,03		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.3	$v_{yz} = v_{31}$	0,012	$v_{zy} = v_{13}$	0,20	24,1	2
	$v_{xz} = v_{21}$	0,2	$v_{zx} = v_{12}$	0,06		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.4	$v_{yz} = v_{31}$	0,018	$v_{zy} = v_{13}$	0,30	24,1	2,01
	$v_{xz} = v_{21}$	0,3	$v_{zx} = v_{12}$	0,09		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.5	$v_{yz} = v_{31}$	0,03	$v_{zy} = v_{13}$	0,50	24,3	2,01
	$v_{xz} = v_{21}$	0,5	$v_{zx} = v_{12}$	0,15		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.6	$v_{yz} = v_{31}$	0,024	$v_{zy} = v_{13}$	0,40	24	2
	$v_{xz} = v_{21}$	0,1	$v_{zx} = v_{12}$	0,03		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.7	$v_{yz} = v_{31}$	0,006	$v_{zy} = v_{13}$	0,10	24	2,01
	$v_{xz} = v_{21}$	0,5	$v_{zx} = v_{12}$	0,15		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.8	$v_{yz} = v_{31}$	0,012	$v_{zy} = v_{13}$	0,20	24,1	2
	$v_{xz} = v_{21}$	0,3	$v_{zx} = v_{12}$	0,09		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.9	$v_{yz} = v_{31}$	0,03	$v_{zy} = v_{13}$	0,50	24,2	2
	$v_{xz} = v_{21}$	0,1	$v_{zx} = v_{12}$	0,03		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		
3.10	$v_{yz} = v_{31}$	0,012	$v_{zy} = v_{13}$	0,20	24,3	2
	$v_{xz} = v_{21}$	0	$v_{zx} = v_{12}$	0,00		
	$v_{xy} = v_{23}$	0	$v_{yx} = v_{32}$	0,00		

VarK(u_{max}) VarK($\sigma_{cr,w}$)
0,005 **0,002**

Tabelle 4-8: Querdehnzahlvariation bei Typ 3 Elementen

Table 4-8: Poisson's ratio variation of type 3 elements

4.3.3 Bestimmung eines effektiven E-Moduls

Die Knitterspannung stellt für Sandwichelemente eine häufige Versagensform dar. Mit der Gleichungen Gl. 2-1 kann die ideelle Knitterspannung ermittelt werden. Gleichung Gl. 2-2 nach DIN EN 14509 ermöglicht eine Abschätzung des tatsächlichen

Bauteilwiderstands hinsichtlich Knitterns von Sandwichelementen mit herkömmlichen Kernmaterialien. In beiden Fällen geht der E-Modul des Kernmaterials E_C (C für engl. "core" - Kern) in die Gleichung ein. Für E_C soll gemäß DIN EN 14509 der Mittelwert von Druck-E-Modul E_{Cc} und Zug-E-Modul E_{Ct} verwendet werden. Da in diesem Abschnitt nur das Kernmaterial betrachtet wird, wird der Kern-E-Modul hier vereinfachend mit E abgekürzt (entsprechend E_c für Druck-E-Modul und E_t für Zug-E-Modul).

Das Verhältnis der Zug-E-Moduln zu den jeweiligen Druck-E-Moduln ist bei Wellpappe in vielen Fällen um ein vielfaches größer (teilweise E_t / E_c (Wellpappe) > 10 ; s. Abschnitt 4.5.1) als bei den herkömmlichen Kernmaterialien (E_t / E_c (PUR, MW) < 2). Die Bestimmung eines Ersatz-E-Moduls gemäß DIN EN 14509 durch Bildung des arithmetischen Mittels von Zug- und Druck-E-Modul wird daher in Frage gestellt. Durch folgende Betrachtung wird die Problematik verdeutlicht. Im Grenzfall, dass E_t oder E_c den Wert 0 annimmt, muss auch das Ergebnis für einen Ersatz-E-Modul 0 sein, da der Eigenwert dem eines ungebetteten Deckblechs entspräche - ein Mittelwert von Zug- und Druck-E-Modul führt hier zu einer Überschätzung des Widerstands gegen Knittern. Für besonders große oder besonders kleine Verhältniswerte von E_t / E_c wird daher auch von einem nicht vernachlässigbaren Fehler ausgegangen.

In einem Sandwichelement erfährt das Kernmaterial hingegen zwar in der Regel keine nennenswerten Biegebeanspruchungen, jedoch wird im Falle des Knitterns der gedrückten Deckschicht das Kernmaterial in der Elementdickenrichtung (Z-Achse) sowohl auf Zug als auch auf Druck beansprucht. Im Folgenden wird daher die Bestimmung eines Ersatz-E-Moduls für den Sonderfall einer reinen Biegebeanspruchung analytisch hergeleitet. Anschließend wird iterativ unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode ein Ersatz-E-Modul ermittelt.

Der Vergleich der Ergebnisse nach der iterativen numerischen Berechnung, der Berechnung gemäß DIN EN 14509 und des hier entwickelten effektiven E-Moduls soll Aufschluss über die Größe des Fehlers gibt, der sich aus der Vorgabe nach DIN EN 14509 ergibt.

4.3.3.1 Analytische Herleitung

Grundlage für die Herleitung eines effektiven E-Moduls für reine Biegebeanspruchungen stellt die bimodulare Theorie dar. Für einen Balken unter reiner Biegebeanspruchung infolge des äußeren Moments M_A wird ein bilineares Materialmodell angenommen, bei dem Zug- und Druck-E-Modul voneinander verschieden sind (s. bimodulares Modell in Abbildung 4-15).

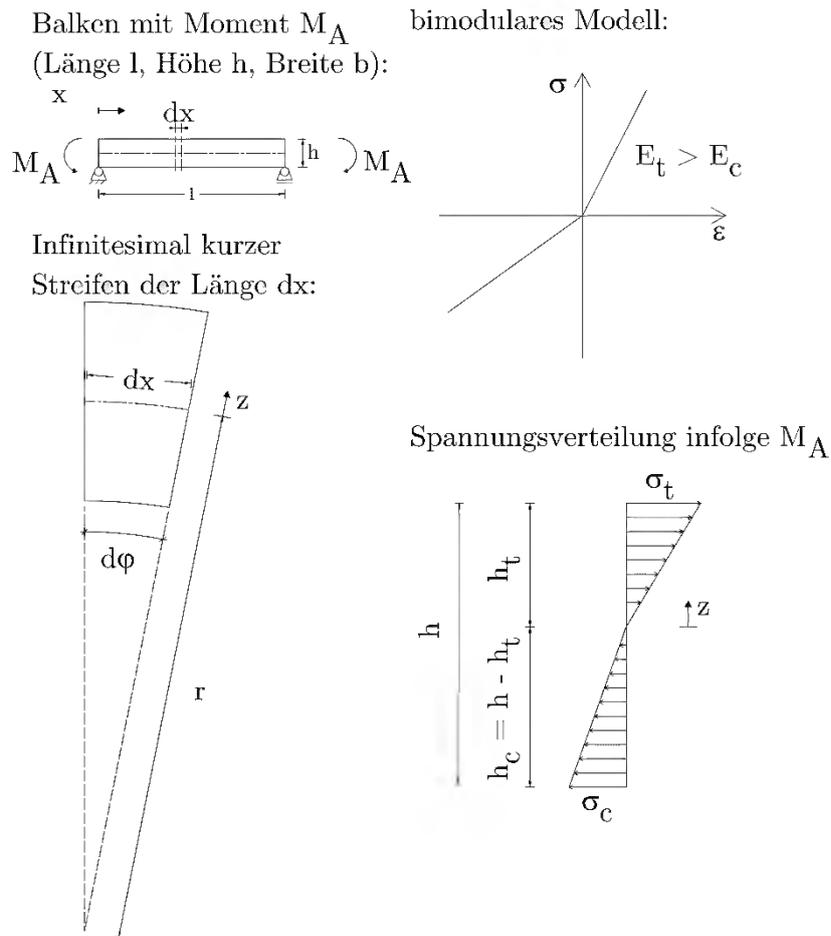


Abbildung 4-15: Biegebalken mit bimodularem Materialmodell und zugehörige Spannungsverteilung im Querschnitt

Figure 4-15: Beam with bimodular material model and corresponding stress distribution in the cross-section

Aus der Geometrie des in Abbildung 4-15 dargestellten infinitesimal kurzen Streifens der Länge dx folgt:

$$\varepsilon_x = \frac{(r+z)d\varphi - rd\varphi}{rd\varphi}$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon_x = \frac{z}{r} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Nach dem Hooke'schen Gesetz und nach dem bilinearen Materialmodell gilt für die Zugnormalspannung $\sigma_{x,t}$ und die Drucknormalspannung $\sigma_{x,c}$:

$$\sigma_{x,t} = \frac{E_t}{\varepsilon_{x,t}}; \quad \sigma_{x,c} = \frac{E_c}{\varepsilon_{x,c}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Die Spannungsverteilung im Querschnitt infolge des Moments M_A ist ebenfalls in Bild Abbildung 4-15 dargestellt. Mit den Gleichgewichtsbedingungen $\Sigma V = 0$ sowie $\Sigma M = 0$, und durch Einsetzen von Gl. 4-2 in Gl. 4-3 folgt:

$$\Sigma V : \int_{h_t-h}^0 E_c \frac{z}{r} b dz + \int_0^h E_t \frac{z}{r} b dz = 0 \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$\Sigma M : \int_{h_t-h}^0 E_c \frac{z}{r} z b dz + \int_0^h E_t \frac{z}{r} z b dz - M_A = 0 \quad \text{Gl. 4-5}$$

Aus Gl. 4-4 lässt sich die Lage der Dehnungsnulllinie, hier charakterisiert durch die Höhe der Zugzone h_t , bestimmen:

$$h_t = \frac{h \cdot \sqrt{E_c}}{\sqrt{E_t} + \sqrt{E_c}} \quad \text{Gl. 4-6}$$

Gl. 4-5 kann aufgelöst werden zu:

$$\frac{1}{r} = \frac{3 M_A}{[E_t h_t^3 + E_c (h - h_t)^3] b} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Einsetzen von Gl. 4-6 in Gl. 4-7 liefert Gl. 4-8. Diese ist leicht abgewandelt auch in der Literatur zu finden (vgl. YAO & YE 2004, Gl. a).

$$\frac{1}{r} = \frac{3 M_A (\sqrt{E_t} + \sqrt{E_c})^2}{b h^3 E_c E_t} \quad \text{Gl. 4-8}$$

Über die Beschreibung von YAO & YE (2004) hinausgehend lassen sich unter Zuhilfenahme der technischen Biegelehre folgende Zusammenhänge bestimmen.

$$\frac{1}{r} = w'' = \frac{M_A}{E_{\text{eff}} \cdot I_y} \quad \text{Gl. 4-9}$$

Hierbei ist E_{eff} ein in dieser Arbeit definierter effektiver E-Modul, der sowohl Druck als auch Zug-E-Modul repräsentiert. Gleichsetzen der Gl. 4-8 und Gl. 4-9 ermöglicht so die Formulierung eines effektiven E-Moduls, der sich aus den bekannten E-Modulen für Zug- und Druckbeanspruchungen errechnen lässt:

$$E_{\text{eff}} = \frac{4E_t E_c}{(\sqrt{E_t} + \sqrt{E_c})^2} \quad \text{Gl. 4-10}$$

4.3.3.2 Numerische Bestimmung eines Ersatz-E-Moduls

Mit Hilfe einer Eigenwertanalyse kann mit Finite-Elemente-Modellen die ideelle Knitterspannung numerisch ermittelt werden.

Wie bereits für die Herleitung der Berechnungsformel für die ideelle Knitterspannung (Gl. 2-1) durch PLANTEMA (1966) sowie STAMM & WITTE (1974) wird auch für das hier verwendete FE-Modell die gedrückte Deckschicht eines Sandwichelements als kontinuierlich gebetteter Stab bzw. Scheibe vereinfacht. Die kommerziellen FE-

Programme (z.B. Ansys, RFEM oder Abaqus) bieten bisher keine Möglichkeit, bimodulare Materialien oder Bettungen abzubilden. Um dennoch eine numerische Berechnung der Knitterspannung für solche Materialien durchführen zu können, wird hier ein iteratives Berechnungsverfahren vorgestellt.

Die Bettungsziffer c_{Bett} ist eine lineare Funktion des E-Moduls und eines hier definierten Faktors f , der die vorgegebenen Abmessungen, Belastungen und Materialien erfasst (STAMM & WITTE 1974). Da innerhalb der Parameterstudie nur die E-Moduln verändert werden, kann der Faktor f als konstante betrachtet werden. Hieraus ergibt sich, dass E-Modul und Bettungsziffer hier synonym verwendet werden können.

$$c = f \cdot E \qquad \text{Gl. 4-11}$$

Für die folgenden Untersuchungen ist die absolute Größe der E-Moduln bzw. der Bettungsziffern nicht von Bedeutung, es ist ausschließlich das Verhältnis E_t / E_c bzw. c_t / c_c relevant. Als Bezugsgröße wird der Zug-E-Modul für die Ergebnisdarstellung zu 100 N/mm^2 gesetzt. Der Druck-E-Modul wird in 10 Schritten von 100 N/mm^2 auf 5 N/mm^2 reduziert.

In Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-18 ist das Prinzip zur numerischen Bestimmung der Knitterspannung für unterschiedliche Druck- und Zug-Moduln dargestellt. Das gedrückte Deckblech wird an seinen Enden wie ein statisch bestimmter Einfeldträger gelagert. Die Länge des Deckblechs wird in 8 bis 10 Bereiche unterteilt, wobei die Bereiche alle in z-Richtung gebettet werden. Die Bettungen werden abwechselnd mit den beiden Bettungsziffern für Zug und Druck versehen. Für reinen Druck in x-Richtung, der durch eine äußere Last F hervorgerufen wird, erfolgt eine Eigenwertanalyse. Die Grenzlinien zwischen Druck- und Zug-Bettungen werden anschließend so verschoben, dass sie den Nulldurchgängen der ersten Eigenform entsprechen. Dadurch werden die Bereiche des Deckblechs, die in positive z-Richtung ausweichen (also in den Kern hineindrücken), mit dem Bettungsmodul für Druckspannungen gebettet und die Bereiche, die in negative z-Richtung ausweichen, mit dem Bettungsmodul für Zugspannungen gebettet.

Es folgen weitere Eigenwertanalysen und die Anpassung der Lage der Grenzlinien im Wechsel so lange, bis sich der kritische Laststeigerungsfaktor zwischen zwei Rechnungen um weniger als 3 % verändert.

In einem weiteren Modell wird die gesamte Deckschicht mit einer durchgehenden Bettung in z-Richtung gestützt. Die Steifigkeit dieser Bettung wird so lange angepasst, bis der erste Eigenwert des Systems mit dem des ersten FE-Modells übereinstimmt. Man erhält auf diese Weise einen Ersatz-Bettungsmodul und mit Gl. 4-11 den Ersatz-E-Modul E_{FEM} , der das unterschiedliche Zug- und Druckverhalten des Materials erfasst. Die Rechenzeiten einer linear elastischen Tragwerksberechnung in Verbindung mit einer Eigenwertanalyse sind zwar sehr kurz, dennoch ist der Modellierungsaufwand bei solch einem iterativen Vorgehen vergleichsweise groß. Insbesondere bei großen Unterschieden zwischen Druck- und Zug-E-Modul werden viele Schritte zur genauen Anpassung der Grenzlinien zwischen den Bettungen benötigt.

1. Schritt:
Gedrückte Deckschicht in n gleichgroße Abschnitte mit abwechselnden Bettungsmoduln c_{Zug} und c_{Druck}

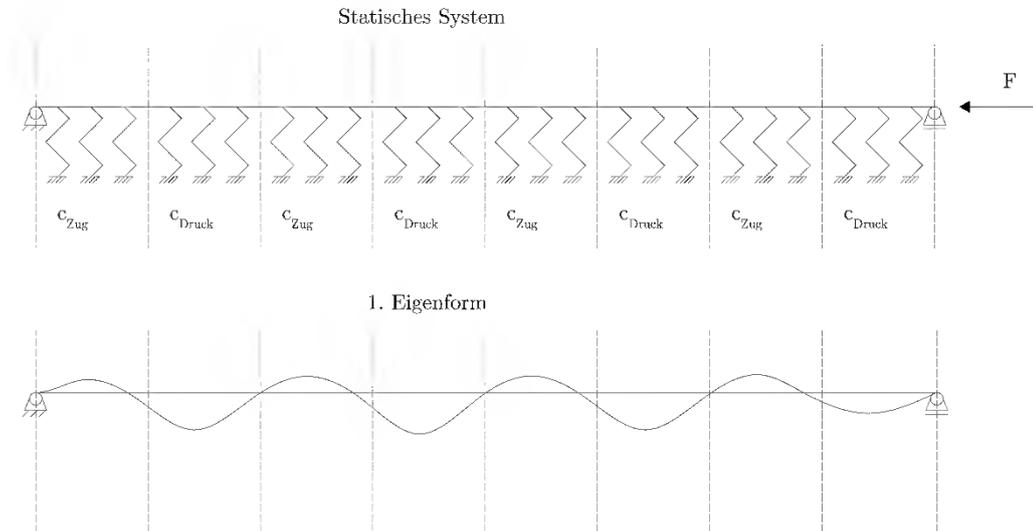


Abbildung 4-16: Vorgehensweise zur numerischen Bestimmung der Knitterspannung bei bimodularem Materialverhalten – 1. Schritt

Figure 4-16: Approach for the numerical determination of the wrinkling stress for bimodular material behavior – 1st step

2. Schritt:
Verschieben der Grenzen zwischen Zug- und Druck-Bettungsmoduln, gemäß Eigenform von Schritt 1.

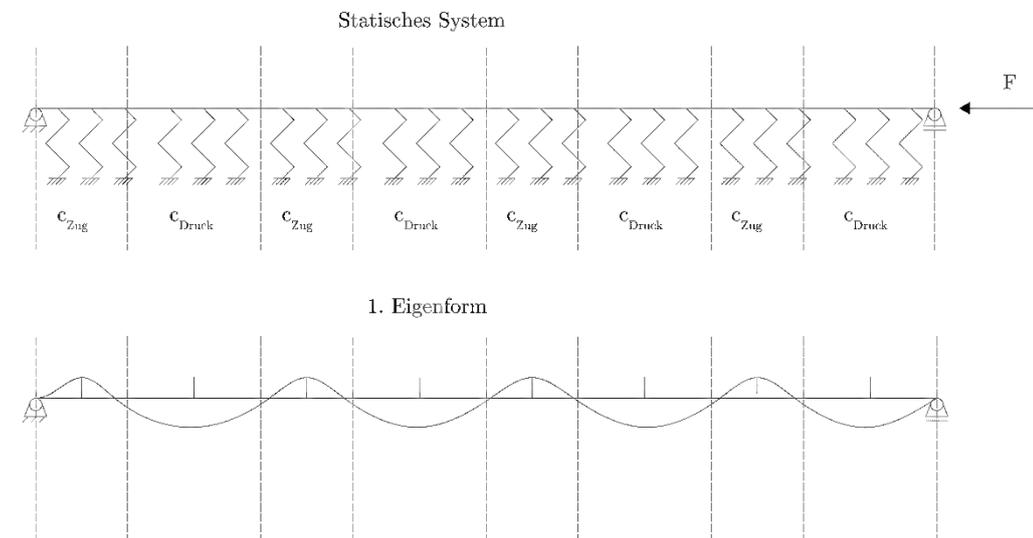


Abbildung 4-17: Vorgehensweise zur numerischen Bestimmung der Knitterspannung bei bimodularem Materialverhalten – 2. Schritt

Figure 4-17: Approach for the numerical determination of the wrinkling stress for bimodular material behavior – 2nd step

n. Schritt:
 Verschieben der Grenzen zwischen Zug- und Druck-Bettungsmodul,
 gemäß Eigenform von Schritt n-1.

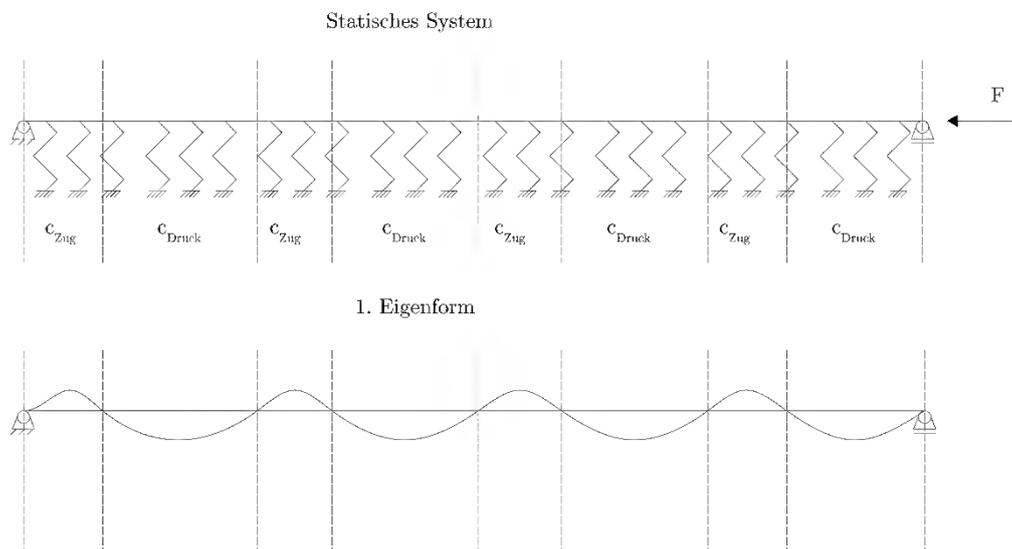


Abbildung 4-18: Vorgehensweise zur numerischen Bestimmung der Knitterspannung bei bimodularem Materialverhalten – n. Schritt

Figure 4-18: Approach for the numerical determination of the wrinkling stress for bimodular material behavior – nth step

4.3.3.3 Vergleich und Interpretation der Ansätze zur Bestimmung von Ersatz-E-Moduln

In Tabelle 4-9 werden die numerisch ermittelten Ersatz-E-Moduln E_{FEM} einerseits mit den arithmetisch gemittelten E-Moduln E_{Mittel} gemäß DIN EN 14509 und andererseits mit den effektiven E-Moduln E_{eff} nach Gl. 4-10 gegenübergestellt. Die Ergebnisse werden in Bild Abbildung 4-19 veranschaulicht. Es ist außerdem zu erwähnen, dass die Ergebnisse zwar für E_t / E_c von 1 bis 20 ausgegeben wurden, die Kehrwerte der jeweiligen Verhältniswerte aber zu den gleichen Ergebnissen führen.

Tabelle 4-9: Vergleich der Ersatz-E-Moduln
 Table 4-9: Comparison of the substitutive Young's Moduli

E_t	E_c	E_t / E_c	E_{FEM}	E_{Mittel}	ABW (E_{Mittel}) in %	E_{eff}	ABW (E_{eff}) in %
100	100	1,0	100	100	(0,0)	100	(0,0)
100	88	1,1	94	94	(0,3)	93	-(0,1)
100	75	1,3	86	88	(1,4)	86	-(0,1)
100	63	1,6	78	81	(4,2)	78	(0,0)
100	50	2,0	69	75	(9,5)	69	(0,2)
100	38	2,7	57	69	(20,6)	58	(1,2)
100	25	4,0	43	63	(47,1)	44	(4,6)
100	17	6,0	32	58	(85,2)	34	(6,8)
100	10	10,0	21	55	(168,3)	23	(12,6)
100	7	15,0	15	53	(267,8)	17	(16,3)
100	5	20,0	11	53	(366,7)	13	(18,7)

*Die Abweichung (ABW) wird jeweils gegenüber E_{FEM} ermittelt

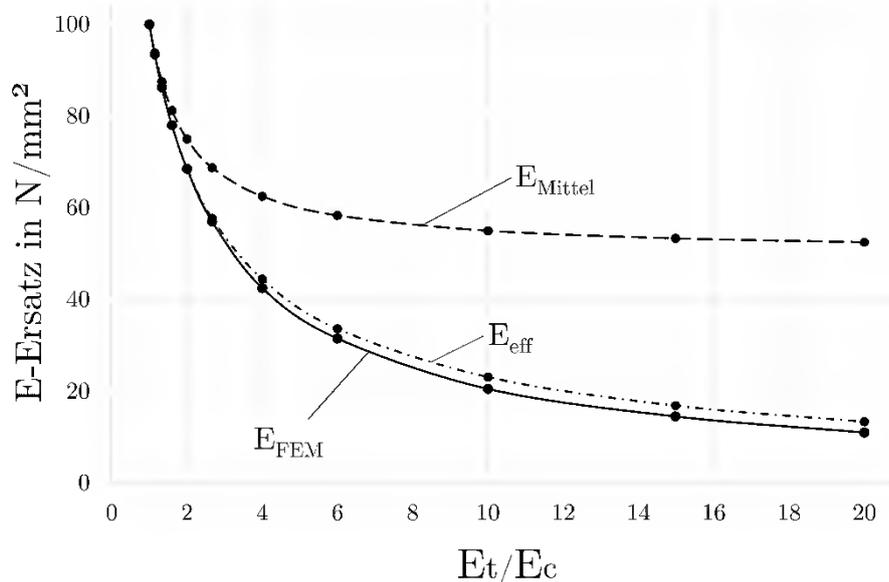


Abbildung 4-19: Ersatz-E-Moduln in Abhängigkeit von E_t / E_c
 Figure 4-19: Substitutive Young's Moduli in dependence of E_t / E_c

Die Ergebnisse für E_{Mittel} weichen stark von den numerischen Ergebniswerten ab. Dies gilt vor allem dann, wenn ein Modul mehr als doppelt so groß ist wie der andere. Für das Verhältnis E_t / E_c von 2 beträgt die Abweichung von E_{Mittel} zu E_{FEM} 9,5 %, für $E_t / E_c = 2,7$ aber bereits über 20 %. Bei sehr großen Verhältnissen von E_t / E_c weichen die Werte um über 360 % voneinander ab. Die Bildung eines Ersatz-E-Moduls über

den Ansatzes gem. DIN EN 14509 oder auch Stamm.1974 führt für $E_t/E_c > 2$ zu großen Fehlern und kann daher für Wellpappe nicht grundsätzlich angewendet werden. Bei den herkömmlichen Kernmaterialien sind E_t/E_c bzw. E_c/E_t selten größer als 2, was die Verwendung von E_{Mittel} für diese Materialien auch auf Grundlager der hier durchgeführten Untersuchung rechtfertigt.

Im Vergleich zu E_{Mittel} stimmen die Ergebnisse nach Gl. 4-10 viel besser mit der numerischen Lösung überein (s. Abbildung 4-19). Die Abweichung von E_{eff} zu E_{FEM} liegen bei E_t/E_c von 6 nur bei 6,8 %. Für größere Unterschiede weichen die Ergebnisse von E_{eff} stärker ab und liegen für $E_t/E_c = 20$ bei 18,7 %. Ob die größeren Abweichungen bei großen Unterschieden zwischen Druck- und Zug-Modul in der Genauigkeit des Finite-Elemente Modells oder im der Berechnung von E_{eff} begründet sind, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht. Die Bildung eines Ersatz-E-Moduls nach der hier eingeführten Berechnungsformel (Gl. 4-10) ist auch in der vorgestellten Form bereits zufriedenstellende Ergebnisse für $E_t/E_c < 10$. Bei keiner der untersuchten Wellpappen (s. Abschnitt 4.5.1) wurde diese Verhältnis überschritten.

4.4 Berechnung der Kenngrößen

In diesem Abschnitt wird die Berechnung der Materialkenngrößen aus den Versuchsdaten erläutert. Der Abschnitt ist unterteilt in die Vorgehensweise für die Kurzzeit-Kenngrößen (Abschnitt 4.4.1) und die Ermittlung der Kriechbeiwerte (Abschnitt 4.4.2).

4.4.1 Lineare Elastizität und Kurzzeitfestigkeit

Die Zug- und Druckfestigkeiten sowie Elastizitätsmoduln werden in Anlehnung an die Vorgaben der DIN EN 14509 bestimmt.

Die Druckfestigkeit f_{cc} wird unter Verwendung von Gl. 4-12, die Zugfestigkeit wird unter Verwendung von Gl. 4-13 berechnet.

$$f_{cc} = \frac{F_{c,max}}{A} \quad \text{Gl. 4-12}$$

$$f_{ct} = \frac{F_{t,max}}{A} \quad \text{Gl. 4-13}$$

mit:

$F_{c,max}$

maximale Druckkraft

$F_{t,max}$

maximale Zugkraft

A

umschlossene Querschnittsfläche des Probekörpers

Der E-Modul ergibt sich aus der Steigung des quasi-linearen Teils der jeweiligen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen. Die Spannungen und Dehnungen werden aus den Messdaten nach folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\sigma_{Cc} = \frac{F_c}{A} \quad \text{Gl. 4-14}$$

$$\sigma_{Ct} = \frac{F_t}{A} \quad \text{Gl. 4-15}$$

$$\varepsilon = \frac{w}{d_c} \quad \text{Gl. 4-16}$$

mit:

F_c	Druckkraft
F_t	Zugkraft
A	umschlossene Querschnittsfläche des Probekörpers
w	Mittelwert der Wegmessung in Krafrichtung
d_c	Probendicke/Probenlänge in Krafrichtung

Für E_{Cc} und E_{Ct} ergeben sich die Gleichungen Gl. 4-17 und Gl. 4-18. Um die quasi-linearen Bereiche der Kurve zu finden, können mit sehr guter Näherung die Spannung bei 40 % der Festigkeit als obere Grenze und die Spannung bei 10 % der Festigkeit als untere Grenze mit den zugehörigen Dehnungen ε verwendet werden. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, einer automatisierten Auswertung der E-Moduln.

$$E_{Cc} = \frac{\Delta\sigma_{Cc}}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Gl. 4-17}$$

mit:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{Cc} &= 0,4f_{Cc} - 0,1f_{Cc} \\ \Delta\varepsilon &= \varepsilon(0,4f_{Cc}) - \varepsilon(0,1f_{Cc}) \end{aligned}$$

$$E_{Ct} = \frac{\Delta\sigma_{Ct}}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Gl. 4-18}$$

mit:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{Ct} &= 0,4f_{Ct} - 0,1f_{Ct} \\ \Delta\varepsilon &= \varepsilon(0,4f_{Ct}) - \varepsilon(0,1f_{Ct}) \end{aligned}$$

Die Versuche zur Bestimmung der Schubsteifigkeiten und der Schubfestigkeiten erfolgten nach DIN 53294. Die Schubfestigkeit f_{Cv} ergibt sich nach Gl. 4-19.

$$f_{Cv} = \frac{F_{v,max}}{A} \quad \text{Gl. 4-19}$$

mit:

$F_{v,max}$	maximale Schubkraft
$A = l \cdot b$	umschlossene Querschnittsfläche des Probekörpers gem. Abbildung 4-8

Die Schubspannungen τ und Scherungen γ (auch Schiebung genannt) werden aus den Messdaten nach folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\tau_c = \frac{F_v}{A} \quad \text{Gl. 4-20}$$

$$\gamma = \frac{v}{h} \quad \text{Gl. 4-21}$$

mit:

F_v	Schubkraft
$A =$	$l \cdot b$, umschlossene Querschnittsfläche des Probekörpers gem. Abbildung 4-8
v	Mittelwert der gemessenen Scherung
h	Probendicke gem. Abbildung 4-8

Der Schubmodul G_C ergibt sich aus der Steigung des quasi-linearen Teils der jeweiligen Schubspannungs-Scherungs-Beziehung. G_C wird nach die Gl. 4-22 berechnet. Um die quasi-linearen Bereiche der Kurve zu finden, können mit sehr guter Näherung die Spannung bei 40 % der Schubfestigkeit als obere Grenze und die Spannung bei 10 % der Schubfestigkeit als untere Grenze mit der zugehörigen Scherung γ verwendet werden. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, einer automatisierten Auswertung der Schubmoduln.

$$G_C = \frac{\Delta\tau_C}{\Delta\gamma} \quad \text{Gl. 4-22}$$

mit:

$$\begin{aligned} \Delta\tau_C &= 0,4f_{Cv} - 0,1f_{Cv} \\ \Delta\gamma &= \gamma(0,4f_{Cv}) - \gamma(0,1f_{Cv}) \end{aligned}$$

4.4.2 Kriechfaktoren

Im Rahmen dieser Arbeit werden für unterschiedliche Wellpappen Kriechfaktoren ermittelt. Die Kriechzahl eines Materials gibt Aufschluss über die Verformungszunahme innerhalb eines bestimmten Zeitraums in Bezug auf die elastische Anfangsverformung. Der Kriechfaktor φ_t wird nach Gl. 4-23 bestimmt. Da die metallischen Deckschichten bei Umgebungstemperatur nicht kriechen, stellen die von der Zeit abhängigen Zusatzverformungen ausschließlich Zuwächse der Schubverformung des Kernmaterials dar. Die Division der Zusatzverformung durch die Anfangsschubverformung liefert somit den Kriechfaktor des Kernmaterials.

Gemäß DIN EN 14509 wird die Anfangsschubverformung aus der Differenz der gesamten Anfangsdurchbiegung der Probe und der errechneten Biegeverformung bestimmt. Analog zur Problematik bezüglich der Schubmodulbestimmung über einen 4-Punkt-Biegeversuch (s. Abschnitt 4.2.6) führt dieses Vorgehen zu sehr ungenauen Ergebnissen. Da die Schubmoduln der Wellpappen aus den Schubversuchen bekannt sind, werden die Anfangsschubverformung gemäß technischer Biegetheorie unter Verwendung der Schubmoduln aus Abschnitt 4.5.1.3 bestimmt.

$$\varphi_t = \frac{w_t - w_0}{w_{v,0}} \quad \text{Gl. 4-23}$$

mit:

w_t	Gesamtdurchbiegung zum Zeitpunkt t
w_0	Gesamtdurchbiegung zum Zeitpunkt t = 0
$w_{v,0}$	Durchbiegung infolge Schubverformung zum Zeitpunkt t = 0

Anhand der experimentell ermittelten Kriechfaktoren für die Zeiträume 200 und 1000 Stunden können bei logarithmischer Zeitachse weitere Kriechfaktoren durch lineare

Extrapolation der Weg-Zeit-Diagramme bestimmt werden. DIN EN 14509 sieht einerseits den Kennwert für 2000 Stunden vor, der zur Bestimmung der Verformung infolge einer Schneelast herangezogen (s. Gleichung Gl. 4-24) wird, und andererseits den Kriechfaktor für 100000 Stunden, mit dem Verformungen infolge von ständig wirkenden Lasten bestimmt werden können (s. Gleichung Gl. 4-25). Die Gleichung Gl. 4-24 ist im Gegensatz zu Gleichung Gl. 4-25 keine reine lineare Extrapolation. Sie enthält einen Erhöhungsfaktor von 1,2.

$$\begin{aligned} \varphi_{2000} &= 1,2 (1,43\varphi_{1000} - 0,43\varphi_{200}) \\ \Leftrightarrow \varphi_{2000} &= 1,7 (\varphi_{1000} - 0,3\varphi_{200}) \end{aligned} \quad \text{Gl. 4-24}$$

$$\varphi_{100000} = 3,86 \varphi_{1000} - 2,86 \varphi_{200} \quad \text{Gl. 4-25}$$

4.5 Versuchsergebnisse und Versuchsauswertung

In diesem Abschnitt werden die Versuchsergebnisse des vorgestellten Prüfprogramms zur Bestimmung mechanischer Materialparameter dargestellt, verglichen und interpretiert.

Eine umfangreiche statistische Auswertung ist hier aufgrund der zu geringen Probenanzahl je Versuchstyp und Pappsorte nicht möglich. Die Aussagekraft der Ergebnisse dient nicht zur Ableitung von Bemessungsformeln, allerdings lässt sich auch auf der Grundlagen von wenigen Versuchen eine klare Aussage über das Tragverhalten und über die grundsätzliche Einsetzbarkeit von Wellpappe für Sandwichelemente treffen.

4.5.1 Lineare Elastizität und Kurzzeitfestigkeit

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Elastizitätskennwerte und der Kurzzeitfestigkeiten getrennt nach Druck-, Zug- und Schubversuchen vorgestellt (Abschnitte 4.5.1.1 bis 4.5.1.3). Die Ergebnisse werden in diesen Abschnitten zunächst nur für das Klima von 20 °C und 65 % rF gegeben. Dieses Klima wurde in Abschnitt 4.2.3 als Normklima definiert und der Großteil der Versuche wurde unter diesen Bedingungen durchgeführt. Alle grundlegenden Betrachtungen in Bezug auf Tragmechanismen und Materialunterschiede erfolgen daher zunächst anhand der Ergebnisse bei Normklima. Betrachtungen zum Einfluss von Feuchtigkeit auf das Tragverhalten erfolgen in Abschnitt 4.5.1.4.

Bei den aufgeführten Ergebniswerten handelt es sich, wenn nicht anders ausgewiesen, um Mittelwerte \bar{x} . Zusätzlich werden die jeweiligen Variationskoeffizienten (VarK) angegeben, wodurch die Streuung der Ergebnisse leicht zu erfassen ist.

4.5.1.1 Druckversuche

Zur besseren Übersichtlichkeit werden hier nicht alle Ergebnisse aufgeführt. Die Mittelwerte der Elastizitätsmoduln E_{Cc} sowie die Druckfestigkeiten f_{Cc} aller Versuche sind in Anhang B zusammengestellt.

In Tabelle 4-10 sind die Druck-E-Moduln der Versuchsreihen VR 1 bis VR 10 gegeben.

Tabelle 4-10: Ergebnisse der Druckversuche: E-Moduln bei Klima 20/65

Table 4-10: Compression test results: Young's moduli at climate 20/65

Versuchsreihe	Druck E-Modul E_{cc} in N/mm ²		
	Achse 1 \bar{x} (VarK)	Achse 2 \bar{x} (VarK)	Achse 3 \bar{x} (VarK)
VR 1	2,8 (0,13)	126,2 (0,05)	53,4 (0,28)
VR 2	0,2 (0,05)	27,6 (0,12)	4,6 (0,14)
VR 3	2,1 (0,09)	65,4 (0,05)	55,4 (0,11)
VR 4	4,6 (0,03)	96,5 (0,08)	108,6 (0,11)
VR 5	2,0 (0,07)	67,6 (0,09)	55,9 (0,18)
VR 6	0,7 (0,01)	25,4 (0,04)	3,22 (0,10)
VR 7	1,3 (0,03)		
VR 8	0,6 (0,06)		
VR 9	1,2 (0,06)		
VR 10	5,3 (0,05)		

Die Kurzzeitfestigkeiten für Druckbeanspruchungen sind in Tabelle 4-11 ebenfalls für das Klima 20/65 zusammengefasst.

Tabelle 4-11: Ergebnisse der Druckversuche: Druckfestigkeit bei Klima 20/65

Table 4-11: Compression test results: compression strength at climate 20/65

Versuchsreihe	Druckfestigkeit f_{cc} in N/mm ²		
	Achse 1 \bar{x} (VarK)	Achse 2 \bar{x} (VarK)	Achse 3 \bar{x} (VarK)
VR 1	0,08 (0,03)	1,38 (0,01)	0,40 (0,07)
VR 2	0,01 (0,04)	0,42 (0,05)	0,06 (0,13)
VR 3	0,09 (0,04)	1,63 (0,07)	0,72 (0,08)
VR 4	0,11 (0,02)	1,81 (0,02)	1,16 (0,03)
VR 5	0,07 (0,05)	>0,95 (n.e.)	0,61 (0,14)
VR 6	0,05 (0,03)	0,46 (0,07)	0,05 (0,11)
VR 7	0,05 (0,03)		
VR 8	0,04 (0,06)		
VR 9	0,04 (0,02)		
VR 10	0,19 (0,04)		

In den Abbildung 4-20 bis Abbildung 4-22 sind typische Spannungs-Dehnungs-Diagramme gegeben. Hier wurden die Druckversuche von Versuchsreihe 4 für das Klima 20/65 gewählt.

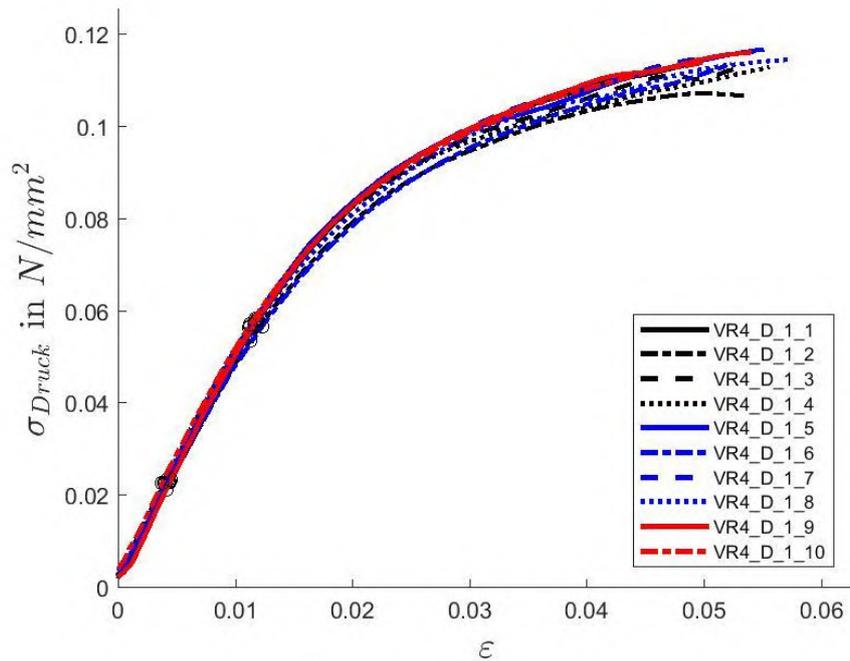


Abbildung 4-20: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Druckversuche in Achse 1 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-20: stress-strain-diagram of compression test in axis 1 at climate 20/65 (VR 4)

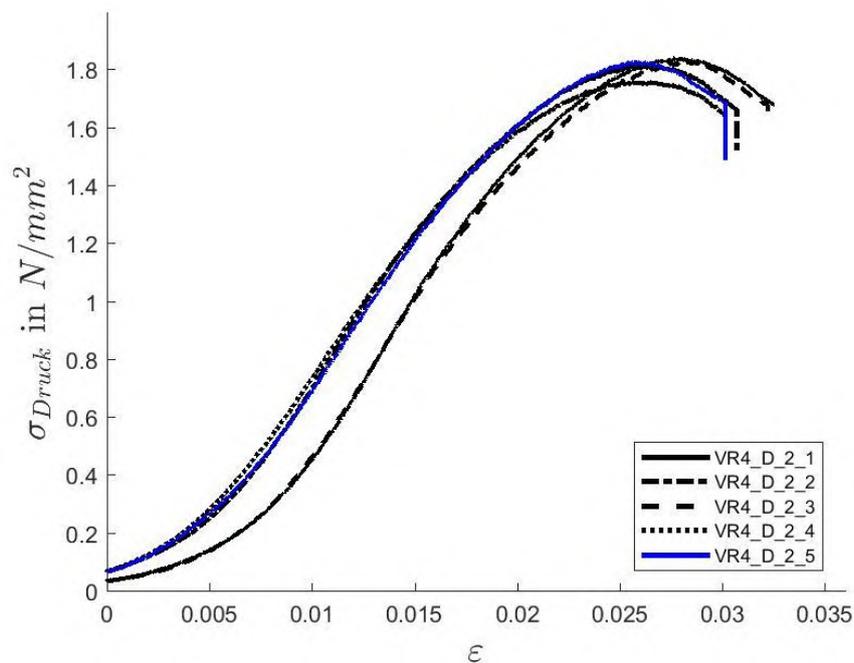


Abbildung 4-21: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Druckversuche in Achse 2 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-21: stress-strain-diagram of compression test in axis 2 at climate 20/65 (VR 4)

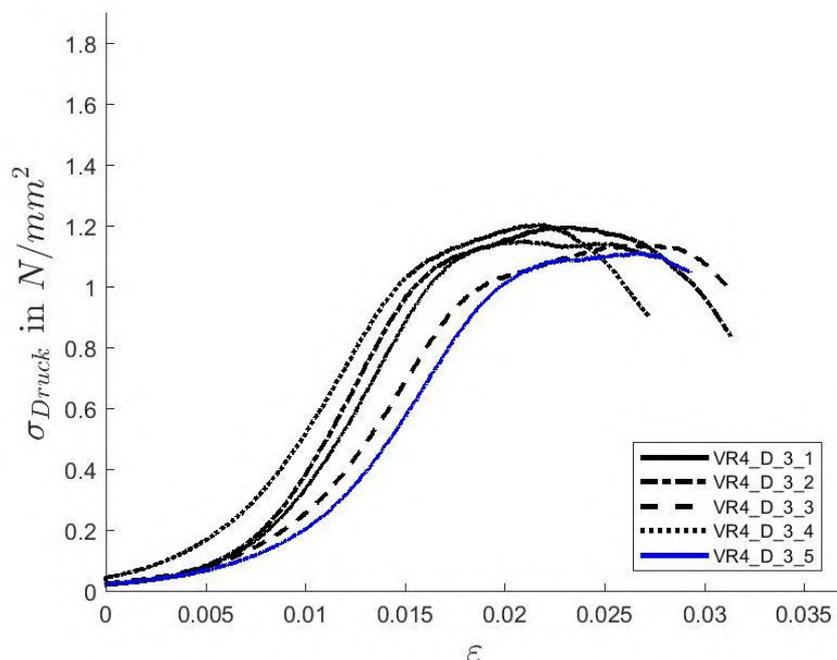


Abbildung 4-22: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Druckversuche in Achse 3 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-22: stress-strain-diagram of compression test in axis 3 at climate 20/65 (VR 4)

Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11 zeigen deutlich, dass die Ergebnisse sehr stark von der Richtung der Beanspruchung abhängen. In Achse 1 werden die mit Abstand geringsten E-Moduln und Druckfestigkeiten ermittelt. Außer für VR 4 sind in Achse 2 die größten Druck-E-Moduln zu finden. Die Festigkeiten für Beanspruchungen in Achse 2 sind in allen Fällen größer als die der anderen Ausrichtungen. In Achse 3 sind je nach Wellpappensorte sehr kleine aber auch sehr große Abweichungen gegenüber den Ergebnissen von Achse 2 zu erkennen.

Im Folgenden wird getrennt für die drei Hauptachsen detailliert auf die Versuchsergebnisse und die Tragmechanismen für Druckbeanspruchungen eingegangen.

4.5.1.1.1 Achse 1

Die E-Moduln in Achse 1 liegen zwischen 0,2 N/mm² und 5,3 N/mm² und sind damit vergleichsweise gering, da hier die Kräfte anders als in Achse 2 und Achse 3 nicht über eine Scheibentragwirkung in den ebenen Papieren abgetragen werden können. Die Kräfte fließen durch jede Papierlage der Wellpappe hindurch. In Abbildung 4-23 ist der Kraftfluss durch eine Welle dargestellt. Die Last F_1 in Richtung von Achse 1 wird am Wellenberg in die Welle eingeleitet und gleichmäßig (f_{Welle}) in die beiden darunterliegenden Wellentäler geleitet. Dabei entstehen in den Bereichen der Wellenberge und Wellentäler (in Abbildung 4-23 strichlierte Bereiche der Welle) Biegebeanspruchungen in der Welle, während in den Bereichen, in denen die Welle in Abbildung 4-23 mit einer durchgezogenen Linie dargestellt ist, hauptsächlich Druckspannungen in der Papierebene hervorgerufen werden.

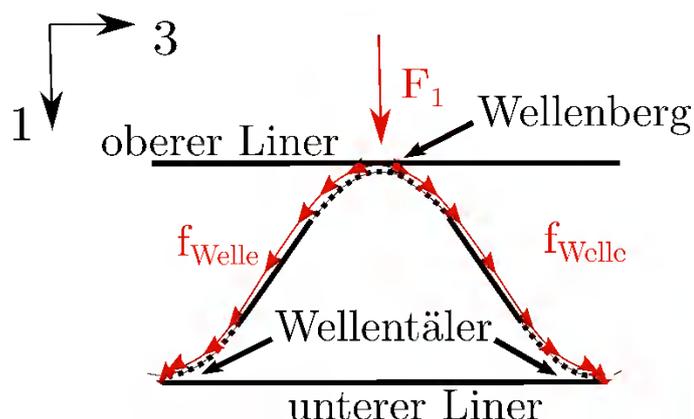


Abbildung 4-23: Kraftfluss durch eine Welle bei Druck in Achse 1

Figure 4-23: Load path through a flute under compression in axis 1

Der Tragmechanismus zur Übertragung von Kräften in Richtung von Achse 1 zwischen zwei Wellen, also von den Wellentälern zu den darunterliegenden Wellenbergen hängt von der Geometrie der Wellen ab. In Abbildung 4-24 a) sind die beiden verschiedenen Mechanismen skizziert. Liegt ein Wellental einer gewellten Papierbahn genau über einem Wellenberg der darunter liegenden Wellenbahn, fließt die Last direkt vom Wellental zum Wellenberg. In der Linerschicht werden nur Druckspannungen senkrecht zur Papierebene erzeugt. Die Steifigkeit hängt hier fast ausschließlich von der Steifigkeit der Wellenbahnen ab. Treffen sich Wellentäler und Wellenberge nicht, werden die Lasten über die Linerschichten abgetragen. Hier wirkt der Liner wie ein Biegebalken. In den Linerschichten können sich aber auch Zugkräfte ausbilden, wodurch sich ein Zugbandeffekt in den Linern einstellen kann. Dieser Mechanismus kontrolliert den Lastabtrag in Achse 1, da sich die Wellenberge und Wellentäler handelsüblicher Pappen nur selten treffen. In Abbildung 4-24 b) ist ein Beispielbild dargestellt, in dem der Lastfluss gut an der stark verformten Druckprobe (ein Probekörper der VR 6) erkannt werden kann, da die Papiere bei dieser Versuchsreihe von leichter Qualität sind und gleichzeitig die Wellenteilung dieser Wellpappe vergleichsweise groß ist. Der dargestellte Zeitpunkt der Fotografie liegt bereits nach dem Erreichen der Maximallast, also nicht mehr im linear elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Er wurde bewusst gewählt, da die Verformungen hier mit bloßem Auge gut zu erkennen sind und für die qualitative Aussage bezüglich des Tragmechanismus dies hier keine Auswirkung hat.

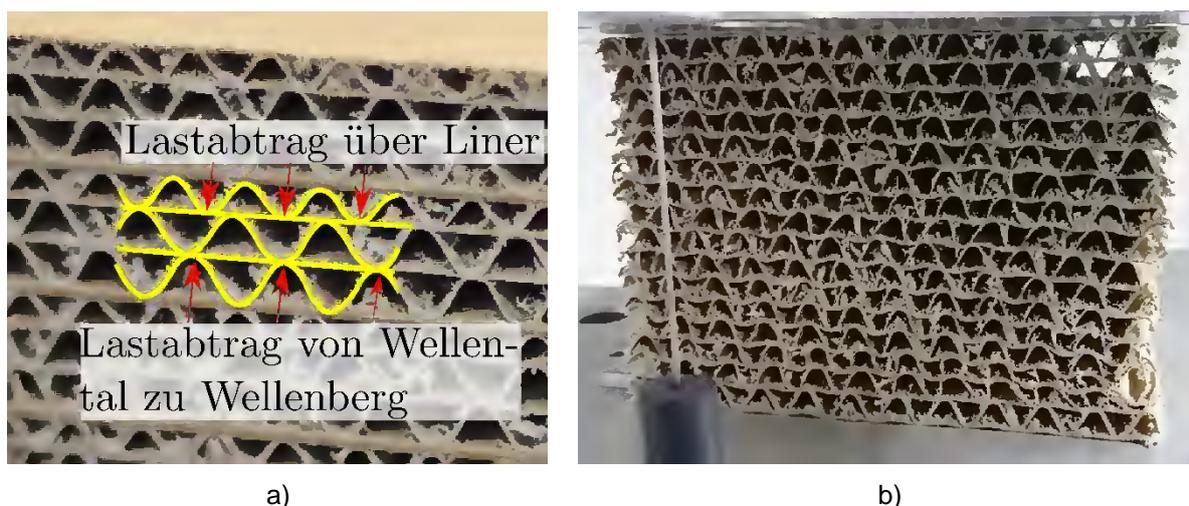


Abbildung 4-24: Druck in Achse 1: Mechanismen der Lastübertragung zwischen zwei Wellen (a) und Beispielbild eines Druckversuchs in Achse 1 (b)

Figure 4-24: Compression in axis 1: Load transfer mechanisms between two flutes (a) and example picture of a compression test in axis 1 (b)

Achse 1 zeigt im Vergleich zu den anderen Achsen die kleinsten Druckfestigkeiten. Druckversagen für Kräfte in Richtung von Achse 1 tritt dadurch ein, dass die Wellenbahnen versagen. Wie bereits weiter oben beschrieben, erfahren die in Abbildung 4-23 dargestellten, strichlierten Bereiche der Wellen Biegebeanspruchungen, die das Material stärker beanspruchen als die Normalspannungen in den Flanken der Welle (durchgezogener Bereich der Welle in Abbildung 4-23). Die Liner weisen große Verformungen auf. Sie werden senkrecht zu ihrer Ebene belastet und haben eine geringe Biegesteifigkeit. Infolge der Verformungsbehinderung in Querrichtung stellt sich eine Zugbandwirkung ein. Die resultierenden Zugspannungen in Richtung von Achse 3 können sehr gut aufgenommen werden, weshalb die Liner nicht versagen. Die Wellen werden meist in Verbindung mit einer seitlichen Verschiebung einer gesamten Wellenlage zusammengedrückt. Ein typisches Versagensbild ist in Abbildung 4-24 b) zu sehen. Die Wellen der zweiten und dritten Ebene (von unten nach oben gesehen) versagen im rechten Drittel des Querschnitts. Das Versagen kündigt sich durch einen starken Steifigkeitsabfall an, sodass man von einem duktilen Versagen sprechen kann. Der Ausfall von einzelnen Wellen ist für den Steifigkeitsabfall verantwortlich, der sich in der abnehmenden Größe der Steigung in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ab etwa 2 % Dehnung bemerkbar macht. Die Wellen knicken zwar ein, was auf ein Stabilitätsversagen hinweist. Jedoch versagen die Wellen einer Lage nicht alle gleichzeitig, sodass vor dem Versagen des Prüfkörpers Lasten von den ausgefallenen Wellen auf noch intakte umgelagert werden können.

Vergleicht man die Ergebnisse der Versuchsreihen VR 1 bis VR 10 für Achse 1 untereinander, dass auch hier die Ergebnisse sehr stark variieren. Die Größe der E-Moduln hängt von der Steifigkeit der Liner und der Wellenbahnen sowie von den Wellenteilungen ab. Die Festigkeit für Druckbeanspruchungen hängt bei den vorliegenden Wellpappensorten nur von den Wellenbahnen ab. Hierbei spielen einerseits die Papierzusammensetzungen aber auch die Wellenteilung eine Rolle. Die geringsten E-Moduln ($0,2 \text{ N/mm}^2$) und Festigkeiten ($0,01 \text{ N/mm}^2$) sind für VR 2 zu

verzeichnen. Diese Wellpappe hat das leichteste Volumengewicht (69 kg/m^3) und ist gleichzeitig aufgrund der Faserzusammensetzung als Schrenz zu klassifizieren. Es ist die einzige Schrenz-Wellpappe unter den Versuchsreihen. VR 6 zeigt für Festigkeit ($0,03 \text{ N/mm}^3$) und E-Modul ($0,7 \text{ N/mm}^3$) ebenfalls vergleichsweise kleine Werte. Der Grund hierfür ist in der Kombination aus leichten eingesetzten Testlinerpapieren (Papierflächengewicht 125 g/m^2) in Verbindung mit der großen Wellenteilung (A-Welle) zu finden. Die mit Abstand größten E-Moduln mit Werten zwischen $2,1 \text{ N/mm}^2$ und $4,6 \text{ N/mm}^2$ zeigen die Wellpappen, in denen für die Liner Kraftpapiere mit großen Frischfaseranteilen zur Verwendung kamen. Diese sind die Wellpappen der Reihen VR 1, VR 3, VR 4 und VR 5. Die Linersteifigkeit hat große Auswirkung auf den E-Modul, da diese Biegung erfahren, wenn Wellenberge und Wellentäler nicht genau übereinander stehen. Auch die Festigkeiten dieser Sorten sind mit Werten zwischen $0,06$ und $0,11 \text{ N/mm}^2$ am größten, allerdings heben diese Werte sich nicht so stark von den anderen ab, wie es bei den E-Moduln der Fall ist. Da die Wellpappen zwar mit Linern aus Kraftpapiere aber mit Wellenbahnen aus minderwertigerem Wellenstoff hergestellt wurden, liegen die Festigkeiten nur geringfügig höher. Die Grammatoren der Wellenbahnen liegen aber im Vergleich zu den anderen Sorten hier höher, was zu etwas höheren Festigkeiten führt. Bei VR 5 fallen die Werte der E-Moduln und Festigkeiten im Vergleich zu den anderen Kraftlinersorten am kleinsten aus. Die Wellenteilung ist hier am größten, wodurch die Anzahl der Wellen je Lage einer Wellenbahn reduziert ist und zusätzlich die Schlankheit der Wellenbahnen höher ist. Die Liner überbrücken größere Abstände zwischen den Wellenbergen und verformen sich dadurch stärker, was in dieser Auswertung zu geringeren E-Moduln führt.

Eine Besonderheit stellt VR 10 dar. Diese Sorte weist die größte Festigkeit ($0,19 \text{ N/mm}^2$) und den größten E-Modul ($5,3 \text{ N/mm}^2$) auf. Der Grund für diese großen Werte liegt hier nicht in den eingesetzten Papieren (Testliner und Wellenstoff) sondern in der Wellenteilung. Das Ausgangsmaterial von VR 10 ist eine zweiwellige Wellpappe mit zwei E-Wellen. Diese haben eine kleine Wellenhöhe von ca. $1,3 \text{ mm}$ und führen zu einer sehr großen Dichte des Kernmaterials von 235 kg/m^3 . Die Größenverhältnisse werden gut in Abbildung 4-1 deutlich. Durch die kleinen Wellen ergeben sich mehr Wellen je Lage, also eine Erhöhung der Nettoquerschnittsfläche der Wellenlagen, und geringere Schlankheiten der Wellenbahnen, da die Knicklängen der Wellen kürzer werden und die eingesetzten Papiere gleichzeitig ähnliche Grammatoren bzw. Dicken aufweisen.

4.5.1.1.2 Achse 2

In Achse 2 werden sowohl die ebenen Papiere als auch die Wellenbahnen durch Druckspannungen belastet, die beanspruchte Papierquerschnittsfläche ist demnach in dieser Achse am größten. Die Größe der E-Moduln E_{Cc} hängt aber nicht nur von der Papierquerschnittsfläche sondern auch stark von der Zusammensetzung der Papierbahnen bzw. deren eigenen E-Moduln ab. Da die Dehnung gezwungenermaßen in allen Papierschichten gleich groß ist, verteilen sich die Spannungen in den Papierschichten im linear elastischen Bereich in Abhängigkeit der E-Moduln der einzelnen Papierschichten. Eine Kombination von Papieren, mit stark unterschiedlichen E-Moduln, führt demzufolge dazu, dass die Spannungen in den einzelnen Papieren stark voneinander verschieden sind.

Die Druckfestigkeiten sind für Beanspruchungen in Richtung von Achse 2 im Vergleich zu den anderen Ausrichtungen am höchsten. Das Versagen ist ein Stabilitätsversagen, wobei die Liner und die Wellenbahnen gemeinsam mit sehr kurzen Wellenlängen knicken bzw. beulen. Abbildung 4-26 a) ist im Moment des Versagens aufgenommen. Am äußeren Liner lassen sich gut kleine Beulen zwischen den linienförmigen Ansatzstellen der Wellen erkennen. An der oberen Kante der Druckprobe sind im Bild die Beulen besonders stark ausgebildet und führen dann zum Versagen, bei dem die Wellen mit einknicken. Am Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 4-21 ist zu erkennen, dass die Kurven kurz nach dem Erreichen des Maximums stark abfallen. Anders als bei Achse 1 kommt es kurz nach dem Verlassen des linear elastischen Bereichs zum Versagen des gesamten Querschnitts. Die Tragfähigkeit ist in dieser Ausrichtung im Vergleich zu den anderen Ausrichtungen am höchsten, da die gewellten und die ebenen Papiere am Lastabtrag beteiligt sind. Bei Druck in Achse 2 sind die Liner gut durch die Wellenbahnen gegen seitliches Ausweichen gestützt werden. Die Richtung der Wellen der Wellenbahnen verläuft quer zu der Richtung der Halbwellen der knickstabähnlichen Beulfigur, die sich für den ungestützten Liner einstellen würde. Um dies zu verdeutlichen, ist in Abbildung 4-25 a) eine Probe mit Druck in Achse 2 mit einer möglichen Beulfigur des äußeren Liners gegeben. Die Lage der stützenden Wellen ist für diese Beulfigur günstig, da die resultierenden Halbwellenlängen der Beulen relativ klein sind.

Der Vergleich der Ergebnisse von VR 1 bis VR 6 für Achse 2 zeigt, dass die Werte stark von der verwendeten Wellpappensorte abhängen und eine große Schwankungsbreite aufweisen. Die Druck-E-Moduln nehmen Werte zwischen 25 N/mm^2 und 126 N/mm^2 und die Druckfestigkeiten Werte zwischen $0,42 \text{ N/mm}^2$ und $1,81 \text{ N/mm}^2$ an. Die Proben aus der einseitigen Schrenz-Wellpappe VR 2 und aus der einseitigen Testliner-Wellpappe VR 6 zeigen die geringsten E-Moduln und Festigkeiten für Druckbeanspruchungen. Diese beiden Papiere haben die geringsten Dichten (s. Tabelle 4-1). Die eingesetzten Papiere haben geringe Grammaturen und die Wellenteilungen sind relativ groß. Die beiden Sorten sind daher besonders anfällig für Instabilitäten.

Die übrigen Wellpappen VR 1, VR 3, VR 4 und VR 5 zeigen sehr hohe Druckfestigkeiten und E-Moduln. Bei diesen Sorten sind für die Mehrzahl der Liner-Bahnen Kraftpapiere mit hohen Grammaturen und hohen Frischfaseranteilen verwendet worden. Da die Festigkeiten so groß sind, dass bei einer Grundfläche der Druckproben von $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ die Kraft von 10 kN überschritten wird, wurden die Versuche auf zwei Arten durchgeführt werden. Zunächst unter Verwendung einer Kraftmessdose (Kapazität 10 kN), um eine große Genauigkeit bei der Bestimmung der E-Moduln zu gewährleisten, und ein zweites Mal mit der ungenaueren Kraftmessung über den Öldruck der Universalprüfmaschine, um die Druckfestigkeiten bestimmen zu können. Im Fall von VR 5 wurden nur die Versuche mit Kraftmessdose (Kapazität 10 kN) durchgeführt. Da beim Erreichen der Kraftgrenze noch kein Bruch eingetreten war, kann nicht die Bruchspannung aber ein Mindestwert der Druckfestigkeit angegeben werden.

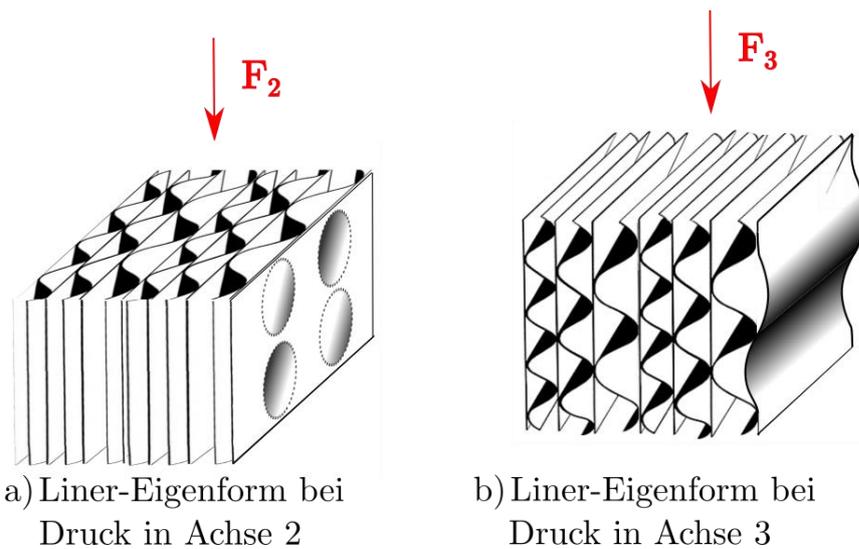


Abbildung 4-25: Mögliche Eigenformen eines Liners für Druck in Achse 2 (a) und Achse 3 (b)

Figure 4-25: Possible eigen-modes of a liner for compression in axis 2 (a) and axis 3 (b)



Abbildung 4-26: Versagensbilder der Druckversuche für Achse 2 (a) und Achse 3 (b)

Figure 4-26: Pictures at failure of the compression tests for axis 2 (a) and axis 3 (b)

4.5.1.1.3 Achse 3

Druckbeanspruchungen in Richtung von Achse 3 werden ausschließlich von den ebenen Papierlagen abgetragen. Die Wellenbahnen weisen in dieser Richtung infolge ihrer Geometrie nahezu keine Steifigkeit auf. Die Wellenbahnen dienen aber zur seitlichen Stützung der ebenen Papiere. Dies macht sich auch schon bei kleinen Spannungen im linear elastischen Bereich bemerkbar, da die Liner stets kleine geometrische Imperfektionen aufweisen, die auch schon bei kleinen Lasten zu Abtriebskräften quer zur Beanspruchungsrichtung führen. In Abbildung 4-27 ist eine Skizze von einem Probekörper mit Druck in Achse 3 gegeben. Beispielhaft ist einer der Liner strichliert in einer überhöhten, imperfekten Form dargestellt. Infolge einer Druckbeanspruchung in der Liner-Ebene würde sich der Liner aufgrund seiner nicht geraden Form stark in Richtung von Achse 1 verformen. Durch die Wellen wird diese Verformung jedoch behindert.

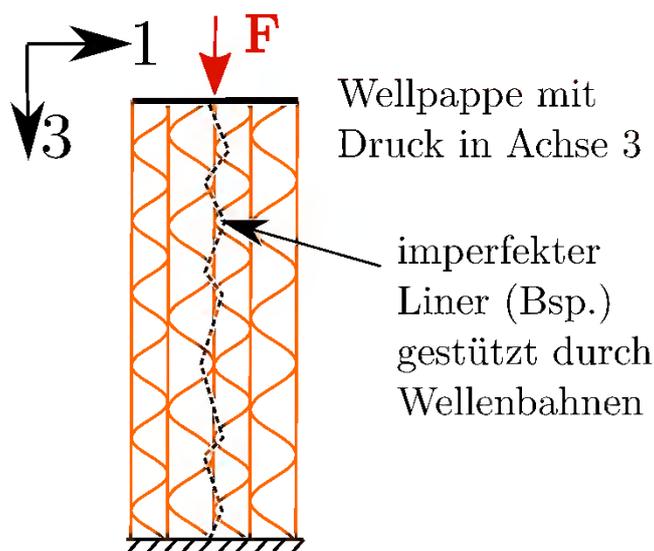


Abbildung 4-27: Druck in Achse 3: Stützung eines imperfekten Liners durch benachbarte Wellenbahnen

Figure 4-27: Compression in axis 3: Supporting of an imperfect liner by the adjacent flutings

Bei Druck in Richtung von Achse 3 tritt das Versagen infolge von Instabilitäten ein. Die Liner weichen senkrecht zur eigenen Ebene aus (in Richtung von Achse 1). Das Tragverhalten ist ungünstiger als in Achse 2, da die gewellten Papiere keine Druckspannungen in Achse 3 übertragen können und zusätzlich die stützende Wirkung der Wellenbahnen auf die ebenen Papiere ungünstiger ist als in Richtung 2. Die Richtung der Wellen der Wellenbahnen verläuft in der gleichen Richtung wie die Halbwellen der Beulfigur. Es bilden sich knickstabähnliche Beul-Halbwellen aus und die zugehörigen Verzweigungsspannungen sind geringer als der Eigenformen bei Druck in Achse 2. In Abbildung 4-25 b) ist eine Eigenform für den äußeren Liner der Druckprobe in Achse 3 dargestellt. In Abbildung 4-26 b) ist eine Probe mit Druck in Achse 3 nach dem Versagen zu sehen. Die Liner des Probekörpers sind an der oberen Lasteinleitung seitlich ausgebeult. Im unteren Viertel des Probekörpers lässt sich aber auch eine knickstabähnliche Halbwellen über die gesamte Probenbreite erkennen.

Die Fasern der Liner sind in Richtung 3, die der Maschinenrichtung der Papiere entspricht, ausgerichtet. Die reine Materialfestigkeit der Liner ist daher in dieser Ausrichtung höher zu erwarten als in Achse 2, jedoch kommt diese infolge der Instabilitäten nicht zur Entfaltung, sodass die Festigkeit der Druckproben in Achse 3 stets kleiner ist als die zugehörige Festigkeit für Druck in Achse 2.

Die vergleichende Betrachtung der Ergebnisse aller Versuchsreihen für Druck in Achse 3 zeigt zunächst, dass die Variationskoeffizienten hier sehr groß sind. Während die VarK der übrigen Ergebnisse fast immer unter 10 % oder nur leicht darüber liegen, treten hier VarK von bis zu 43 % auf. Die geringe Probenanzahl bei gleichzeitiger großer Empfindlichkeit der Ergebnisse gegenüber Imperfektionen (Gradheit der Liner) und gegenüber Instabilitäten führt vor allem bei den Wellpappen mit großen Wellenteilungen (VR 5 und VR 6) zu besonders großen Streuungen. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die Festigkeiten und die E-Moduln sehr stark von der

Wellpappensorte abhängen. Die Werte der ermittelten E-Moduln reichen von 4 N/mm² bis 108 N/mm², die Druckfestigkeiten schwanken zwischen 0,05 N/mm² und 1,16 N/mm². Die niedrigsten Ergebnisse werden von den Wellpappesorten VR 2 und VR 6 erreicht. VR 2 hat als Ausgangsmaterial Schrenz mit sehr leichten Grammaturnen. VR 6 ist eine einseitige Wellpappe, bei der sowohl die Liner als auch die Wellenbahnen aus sehr leichten Testliner-Papieren gefertigt sind. Bei VR 6 ist zudem mit einer A-Welle eine relativ große Wellenteilung produziert worden, wodurch sich die Anzahl der Stützpunkte der Liner reduziert und Instabilitäten aufgrund der größeren Schlankheit begünstigt werden.

Betrachtet man die Wellpappen, bei denen Kraftpapiere verwendet wurden (VR 1, VR 3, VR 4, VR5), fällt auf, dass die E-Moduln von VR 1, VR 3 und VR 5 in der gleichen Größenordnung liegen (ca. 50 bis 60 N/mm²) und der E-Modul von VR 4 etwa doppelt so groß ist. Die Festigkeit von VR 1 ist mit 0,4 N/mm² deutlich geringer als die von VR 3 (0,7 N/mm²) und VR 5 (0,6 N/mm²). Da die Papiere von VR 1 in diesem Vergleich die geringsten Grammaturnen aufweisen, sind die Papiereigensteifigkeiten geringer, was zu geringeren Verzweigungslasten und infolge des beschriebenen Versagensmechanismus bei Druck in Achse 3 zu geringeren Druckfestigkeiten führt.

Bei VR 5 wurde zwar ein Liner mit dem schwersten Papier (Decke 1: 430 g/m²) ausgeführt, was zu einem sehr hohen E-Modul und einer hohen Tragfähigkeit führen müsste. Festigkeits- und Steifigkeitsmindernd ist bei dieser Wellpappe jedoch, dass sie mit der ACA-Wellenteilung vergleichsweise große Schlankheiten der einzelnen Liner aufweist, da diese nur wenige Unterstützungspunkte haben.

VR 4 erzielt mit Abstand die größten Festigkeiten und E-Moduln. Das Ausgangsmaterial, eine zweiwellige BC-Wellpappe, hat sehr schwere äußere Deckbahnen (ca. 250 g/m²) und im Vergleich zu den anderen beiden Kraftpapier-Wellpappen mit BC-Wellenteilung (VR1 und VR 3) recht hohe Grammaturnen der übrigen Papiere (s. Tabelle 4-1).

4.5.1.2 Zugversuche

Zur besseren Übersichtlichkeit werden hier Ergebnisse nur auszugsweise vorgestellt. Die Mittelwerte der Elastizitätsmoduln E_{ct} sowie die Druckfestigkeiten f_{ct} aller Versuche sind in Anhang A zusammengestellt.

Wie bei der Ergebnisdarstellung Druckversuch sind auch hier zunächst nur die Ergebnisse für das Klima von 20 °C und 65 % rF dargestellt. In Tabelle 4-12 sind die Zug-E-Moduln der Versuchsreihen und in Tabelle 4-13 sind die ermittelten Zugfestigkeiten aller Versuchsreihen für das Normklima zusammengefasst. Der Einfluss von Feuchtigkeit auf das Tragverhalten erfolgt in Abschnitt 4.5.1.4.

Tabelle 4-12: Ergebnisse der Zugversuche: E-Moduln bei Klima 20/65

Table 4-12: Tensile test results: Young's moduli at climate 20/65

Versuchsreihe	Zug-E-Modul E_{ct} in N/mm ²		
	Achse 1 \bar{x} (VarK)	Achse 2 \bar{x} (VarK)	Achse 3 \bar{x} (VarK)

VR 1	2,3 (0,14)	288,3 (0,11)	456,5 (0,07)
VR 2	0,1 (0,45)	117,9 (0,10)	67,7 (0,22)
VR 3	2,0 (0,10)	312,7 (0,05)	515,1 (0,22)
VR 4	2,8 (0,09)	376,2 (0,06)	688,8 (0,10)
VR 5	1,4 (0,09)	298,6 (0,09)	547,5 (0,43)
VR 6	0,7 (0,13)	207,2 (0,04)	122,1 (0,35)
VR 7	1,1 (0,25)		
VR 8	0,4 (0,09)		
VR 9	0,9 (0,23)		
VR 10	1,1 (0,27)		

Tabelle 4-13: Ergebnisse der Zugversuche: Zugfestigkeit bei Klima 20/65

Table 4-13: Tensile test results: tensile strength at climate 20/65

Versuchsreihe	Zugfestigkeit f_{cc} in N/mm ²		
	Achse 1 \bar{x} (VarK)	Achse 2 \bar{x} (VarK)	Achse 3 \bar{x} (VarK)
VR 1	0,07 (0,10)	2,91 (0,10)	4,64 (0,05)
VR 2	0,01 (0,22)	0,94 (0,06)	0,95 (0,03)
VR 3	0,05 (0,35)	3,71 (0,09)	2,97 (0,27)
VR 4	0,07 (0,03)	3,84 (0,04)	4,32 (0,09)
VR 5	0,04 (0,03)	2,89 (0,09)	3,15 (0,22)
VR 6	0,02 (0,04)	1,59 (0,08)	1,14 (0,13)
VR 7	0,03 (0,28)		
VR 8	0,03 (0,17)		
VR 9	0,04 (0,29)		
VR 10	0,05 (0,52)		

In den Bildern Abbildung 4-28 bis Abbildung 4-30 sind typische Spannungs-Dehnungs-Diagramme gegeben. Hier wurden die Druckversuche von Versuchsreihe 4 für das Klima 20/65 gewählt.

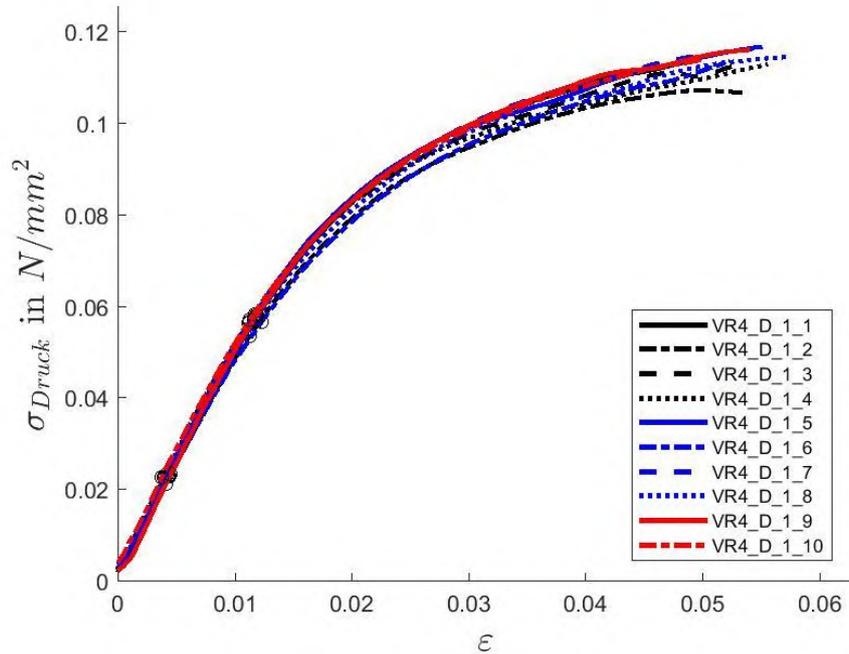


Abbildung 4-28: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Zugversuche in Achse 1 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-28: stress-strain-diagram of tensile test in axis 1 at climate 20/65 (VR 4)

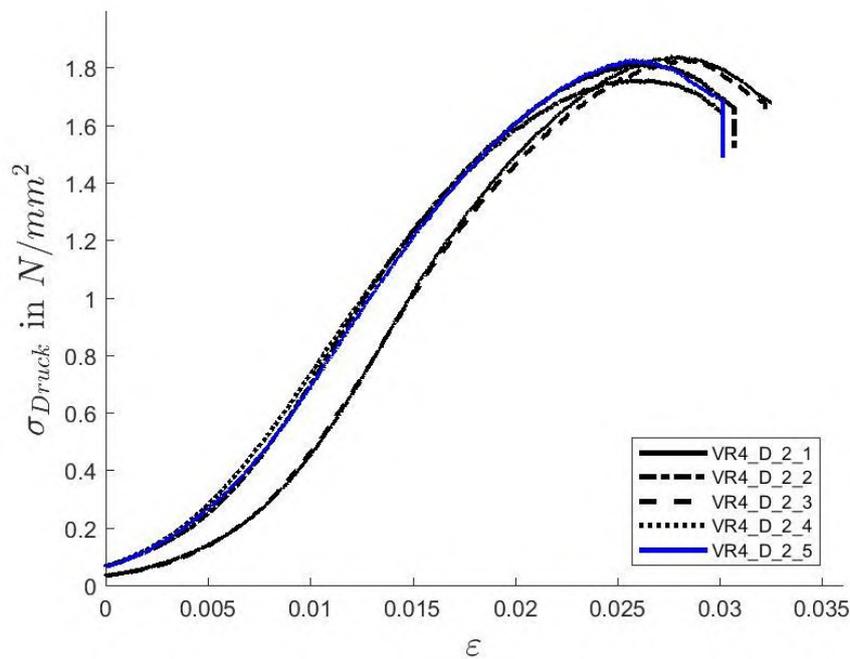


Abbildung 4-29: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Zugversuche in Achse 2 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-29: stress-strain-diagram of tensile test in axis 2 at climate 20/65 (VR 4)

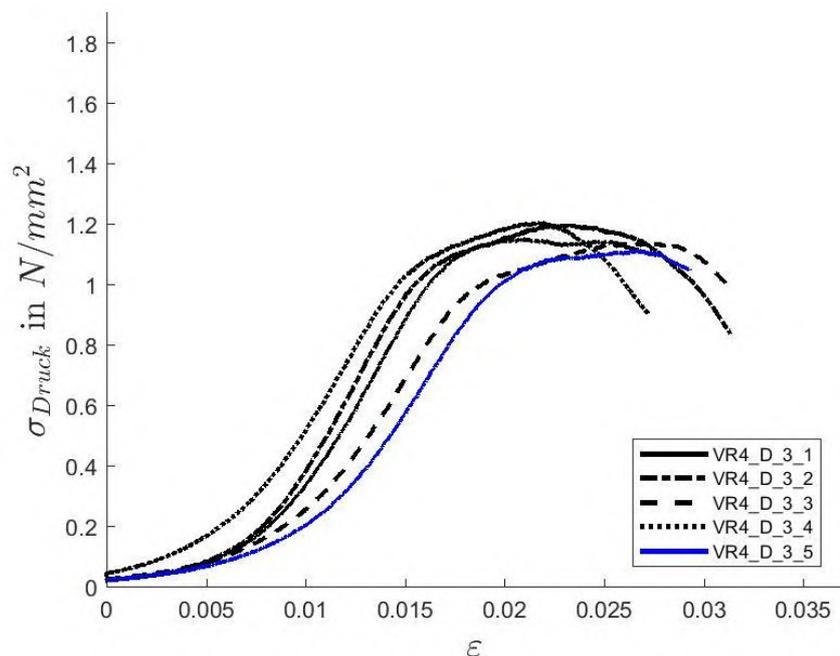


Abbildung 4-30: Spannungs-Dehnungs-Beziehung Zugversuche in Achse 3 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-30: stress-strain-diagram of tensile test in axis 3 at climate 20/65 (VR 4)

Tabelle 4-12 und Tabelle 4-13 und zeigen deutlich, dass die Ergebnisse sehr stark von der Richtung der Beanspruchung abhängen. In Achse 1 werden die mit Abstand geringsten E-Moduln und Druckfestigkeiten ermittelt. Während die Zug-E-Moduln in Achse 1 zwischen 0,1 N/mm² und 2,8 N/mm² liegen, erreichen die E-Moduln in den anderen Ausrichtungen Werte von bis zu 476 N/mm² (Achse 2) bzw. 688 N/mm² (Achse 3).

Die Zugfestigkeiten variieren in Achse 1 von 0,01 N/mm² bis 0,07 N/mm². Auch hier wird in den Achsen 2 und 3 mit Werten von bis zu 4,6 N/mm² ein Vielfaches davon erreicht.

Nachfolgend wird getrennt für die drei Hauptachsen detailliert auf die Versuchsergebnisse und die Tragmechanismen für Zugbeanspruchungen eingegangen.

4.5.1.2.1 Achse 1

In Achse 1 erfolgt der Lastabtrag für Zugbeanspruchungen ähnlich wie bei Druckbeanspruchungen durch alle Lagen hindurch. Hierbei fließt die Last durch die Welle ebenso wie in Abbildung 4-23 dargestellt, mit dem Unterschied, dass die Lastrichtung um 180° gedreht ist. Hinsichtlich der Lastweitergaben von einer Welle zur nächsten kann ebenfalls wie in Abbildung 4-24 a) dargestellt zwei Mechanismen unterschieden werden. Einerseits kommt es zu einer direkten Übertragung von Zugspannungen von einem Wellental zu einem Wellenberg durch senkrecht durch die Klebefugen und den dazwischenliegenden Liner hindurch, wenn die Wellenberge einer Lage genau unter den Wellentälern der darüber liegenden Lage angeordnet sind. Andererseits gibt es den Mechanismus bei dem die Lasten von einem Wellental in den darunterliegenden Liner fließen und von diesem auf die darunterliegenden benachbarten beiden Wellenberge übertragen werden. Der Liner erfährt in diesem Fall

zunächst Biegung und bei größeren Verformungen wiederum Zugspannungen in Richtung von Achse 3. Dieser zweite Fall tritt öfter auf, da Wellentäler und Wellenberge sich nur selten genau treffen.

Bei Zug in Achse 1 werden alle Klebefugen beansprucht. Die Papiere erfahren an den Klebestellen Zugspannungen in ihrer Dickenrichtung. Diese Art von Beanspruchung ist bei herkömmlichen Einsatzbereichen von Papier und Wellpappen in der Regel vermieden und tritt nicht auf.

Häufigstes Versagensbild bei allen Sorten in Achse 1 ist der Bruch der Klebefuge, der werksseitig zwischen den Wellen und den Linern hergestellt wurde. In Abbildung 4-31 a) ist ein solches Versagen zu erkennen. Bei einigen Sorten wurden Liner verwendet, die selbst aus zwei Lagen zusammen gegautscht wurden. Diese Art von Papiere ist in der Regel bei Testlinerqualitäten zu finden. Ein solches Versagen ist im linken Bereich der Fotografie in Abbildung 4-31 b) zu erkennen. Eine weitere mögliche Versagensform ist im rechten Bereich der Fotografie in Abbildung 4-31 b) zu sehen. Die Verbindung zwischen der Wellenbahn und dem Liner löst sich hier nicht, weil die Klebefuge versagt, sondern weil die Wellenbahn im Bereich der Verklebung ausreißt. Diese Form lässt sich an Fasern der Wellenbahn erkennen, die nach dem Bruch am Liner verbleiben.

Bei den Sorten, die nicht infolge der mangelhaften Verklebung zwischen den Wellenbahnen und den Linern versagen, ist ein Spannungs-Dehnungs-Verlauf wie in Abbildung 4-28 charakteristisch. Nach dem Erreichen der Linearitätsgrenze (hier etwa bei 2% Dehnung) ist eine weitere Spannungszunahme mit geringerer Steigung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms zu erkennen. Dieser Bereich ist auf das plastische Materialverhalten von Papier zurückzuführen. In den Fällen, in denen die Klebefugen adhäsiv versagen, ist ein plötzlicher Bruch, der häufig innerhalb des linearen Bereichs auftritt, typisch.



Abbildung 4-31: Zugversuch Versagensbilder: Klebefuge zwischen Welle und Liner (a) sowie Spalten eines Liners und Versagen der Wellen an der Klebefuge (b)

Figure 4-31: Tensile test failure modes: Glue joint between flute and liner (a) and splitting of a liner together with failure of the flute at the glued joint (b)

Der Vergleich der Ergebnisse der Versuchsreihen VR 1 bis VR 10 in Achse 1 zeigt große Unterschiede je nach Wellpappensorte. Die geringsten Werte bei einer sehr

großen Streuung sind für VR 2 (Schrenz) zu Verzeichnen. Der große Variationskoeffizient des E-Modul-Mittelwertes haben Vorschädigungen der Probekörper zur Ursache. In der manuellen Herstellung der Probekörper zeigten sich schon bei sehr leichten punktuellen Beanspruchungen oder Kantendruck Eindrückungen in den Probekörpern, die Vorschädigungen darstellen und somit die Ergebnisse beeinflussen. Sowohl die Festigkeit als auch der E-Modul von VR 2 in Achse 1 sind so gering, dass eine planmäßige Beanspruchung in dieser Achse nicht möglich ist. Die Mindestanforderung an die Festigkeit gemäß DIN EN 14509 in Höhe von $0,018 \text{ N/mm}^2$ werden nicht erreicht.

Die größten Zugfestigkeiten und Zug-E-Moduln in Achse 1 sind bei den Wellpappen, in denen Kraftpapiere verwendet wurden (VR 1, VR 3, VR 4, VR 5), zu finden. Die Wellenbahnen und die mittleren Deckbahnen sind auch bei diesen Papiere aus Wellenstoff bzw. Testlinerpapiere. Allerdings kamen auch bei den Sorten dieser Versuchsreihen vergleichsweise schwere Varianten dieser Qualitäten zum Einsatz. Hinsichtlich der Festigkeit sind die Unterschiede zu den reinen Testlinersorten (VR 5, VR 7 bis 10) aber nur geringfügig höher, da nicht die Papiere Versagen.

Bei einigen Versuchsreihen (VR 3, VR 7, VR 9, VR 10) fallen in Achse 1 sehr hohe Streuungen mit Variationskoeffizienten von bis zu 52 % auf, die darin begründet sind, dass die werksseitig hergestellten Klebefugen zwischen Linern und Wellenbahnen häufig mangelhaft hergestellt waren. Wenn diese Klebefugen in Teilbereichen gar nicht oder nur schwach verklebt sind, führt das zu einer Schwächung des für die hier durchgeführte Spannungsermittlung angesetzte Querschnittsfläche und damit zu geringeren E-Moduln und Festigkeiten. Für die üblichen Einsatzbereiche ist die Qualität dieser Verklebung untergeordnet. Es ist davon auszugehen, dass hier noch Potential zur Verbesserung des Tragverhaltens in Achse 1 besteht (s. auch Abschnitt 8).

4.5.1.2.2 Achse 2 und Achse 3

Der Lastabtrag von Zugspannungen in Achse 2 erfolgt einerseits über die Liner und andererseits über die Wellenbahnen. Die Belastung der Proben wird über eine Dehnung aufgebracht, die infolge des Aufbaus der Zugproben in allen Papieren gleich groß ist. Die resultierenden Spannungen verteilen sich im linear elastischen Bereich nach dem Hook'schen Gesetz in Abhängigkeit der E-Moduln der einzelnen Papiere.

Die charakteristischen Verläufe der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen in Bild Abbildung 4-29 zeigt ein eher duktilen Materialverhalten. Bei einer Dehnung von etwa 1% lässt sich in allen Versuchen ein Abknicken der Kurven erkennen, sodass sich nahezu eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung einstellt. Der Bruch der Proben tritt bei einer Dehnung von ca. 3 % bis 4 % ein. Dieser Verlauf deckt sich gut mit dem charakteristischen Verlauf eines Papier-Zugversuchs in der Maschinenquerrichtung (CD), wie in Abbildung 2-18 in Abschnitt 2.2.2 gegeben.

In Achse 3 findet der Lastabtrag von Zugspannungen ausschließlich durch die ebenen Liner der Wellpappen statt, da die Wellenbahnen aufgrund ihrer Geometrie (Wellenrichtung in Richtung von Achse 3) nahezu keine Steifigkeit in Achse 3 aufweisen. Da Achse 3 der Produktionsrichtung entspricht, sind die Fasern zu einem Großteil in dieser Richtung angeordnet, was das Zugtragverhalten stark begünstigt (s. auch Abschnitt 2.2.2).

In Abbildung 4-30 lässt sich für Achse 3 ein Materialverhalten mit geringerer Dehnbarkeit (Bruchdehnung beträgt ca. 1 %) als für Achse 2 erkennen. Auch diese Beobachtung stimmt gut mit den Kenntnissen über Papier-Zugversuche in Maschinenrichtung (MD) überein (s. Abschnitt 2.2.2.). Der in Abbildung 2-18 dargestellte Verlauf eines Zugversuchs in MD weist jedoch einen ausgeprägten Knick in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung auf. Für die hier getesteten Sorten kann zwar eine Steifigkeitsreduktion bei größer werdenden Dehnungen erkannt werden, jedoch erscheint diese als kontinuierliche Abflachung der Kurve.

Typische Versagensbilder für Zug in den Achsen 2 und 3 sind in Abbildung 4-32 gegeben. Bei den hier dargestellten Proben handelt es sich um Probekörper der Versuchsreihe VR 4. Der Bruch verläuft jeweils am Übergang von der Ausrundung zum geraden Teil der Proben in einem Schnitt, der nahezu senkrecht zur Zugrichtung verläuft. In manchen Fällen trat, trotz der in Abschnitt 4.2.5 beschriebenen Maßnahmen, Versagen im Bereich der Lasteinleitung auf. Diese Versuche wurden bei der Bestimmung der Zugfestigkeiten nicht berücksichtigt.

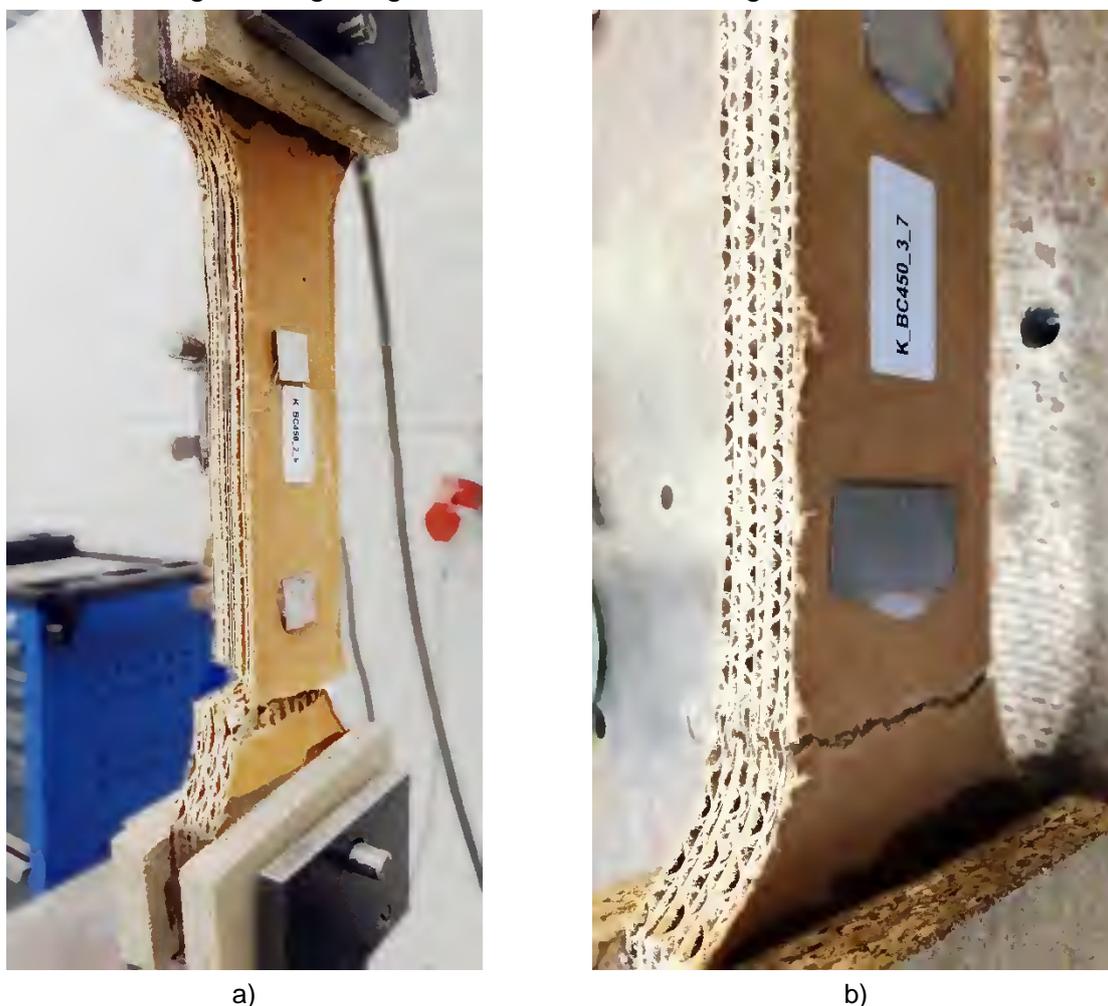


Abbildung 4-32: Zugversuch Versagensbilder: Achse 2 (a) und Achse 3 (b)

Figure 4-32: Tensile test failure modes: Axis 2 (a) and axis 3 (b)

Außer für VR 2 und VR 6 sind in Achse 3 die größten Zug-E-Moduln und Zugfestigkeiten zu finden, obwohl in Achse 2 sowohl die Deckbahnen als auch die

Wellenbahnen beansprucht werden, die belasteten Nettoquerschnittsflächen demnach größer sind als in Achse 3. Die Begründung für diesen Sachverhalt liegt einerseits in der Faserausrichtung (in Richtung von Achse 3) und andererseits in der Kombination der Papiersorten der jeweiligen Wellpappen. In den Versuchsreihen VR1, VR 3, VR 4 und VR 5 handelt es sich immer um Wellpappen mit Kombinationen von unterschiedlichen Papiersorten. Hier wurden, wie in der Verpackungsindustrie üblich, für die Liner im Vergleich zu den Wellen stärkere Papiere verwendet. Während die äußeren Deckbahnen Kraftliner sind, wurden für die Wellen und die Zwischendecken Wellenstoff und Testliner eingesetzt. Wellenstoff und Testliner weisen aufgrund ihrer Zusammensetzung geringere E-Moduln auf als die Kraftliner. Werden diese Wellpappen in Achse 2 mit einer über alle Papierlagen konstanten Dehnung versehen, resultieren in den Kraftlinern große Spannungen und in den leichteren Papieren kleine Spannungen. Der Lastabtrag findet also hauptsächlich über die Kraftliner statt, die damit die hier ermittelten E-Moduln der Wellpappensorte nahezu allein kontrollieren. Hinzu kommt, dass die Papierfasern in Richtung von Achse 3 ausgerichtet sind, da diese immer der Maschinenrichtung (MD) entspricht. Die Papier-E-Moduln in Richtung der MD sind deutlich größer als in der Maschinenquerrichtung (CD).

VR 2 und VR 6 stellen im Vergleich zu den anderen Sorten eine Besonderheit dar. Das Ausgangsmaterial für diese Versuchsreihen sind jeweils Wellpappen, die aus identischen Papiersorten für Liner und Wellen hergestellt wurden. Demnach verteilen sich die Spannungen bei einer Dehnung in Richtung von Achse 2 in allen Papieren gleichmäßig. Die Wellenbahnen leisten hier einen großen Beitrag zum Lastabtrag. Die größere Netto-Querschnittsfläche in Achse 2 steht den besseren Trageigenschaften infolge der Faserausrichtung in Achse 3 entgegen und führt dazu, dass die Zug-E-Moduln bei diesen Sorten in Achse 2 höher sind als in Achse 3. Hinsichtlich der Zugfestigkeit gleichen sich bei VR 2 die Phänomene nahezu aus ($f_{ct} = 0,94$ bzw. $0,95 \text{ N/mm}^2$) bei VR 6 überwiegt die Netto-Querschnittserhöhung die bessere Faserausrichtung in Achse 3, sodass hier auch die Zugfestigkeit in Achse 2 mit $1,59 \text{ N/mm}^2$ größer ist als in Achse 3 mit $1,14 \text{ N/mm}^2$.

Bei der Bestimmung der E-Moduln hat sich gezeigt, dass die ermittelten Werte in Achse 3 mit großen Streuungen behaftet sind. Diese Streuungen können entweder im Material oder aber auch im Versuchsaufbau begründet sein. Die Ermittelten E-Moduln sind sehr hoch und daher sind die zugehörigen Verformungen sehr klein, selbst, wenn mit dem gewählten Versuchsaufbau bereits eine relativ große Ausgangslänge der Länge zur E-Modul-Bestimmung von 100 mm gewählt wurde. Hier wäre eine Anpassung des Versuchsaufbaus und der Messtechnik erforderlich, um verlässlichere Ergebnisse zu erhalten (s. auch Abschnitt 8)

4.5.1.3 Schubversuche

Zur besseren Übersichtlichkeit werden hier nicht alle Ergebnisse aufgeführt. Die Mittelwerte der Schubmoduln G_C sowie die Schubfestigkeiten f_{cv} aller Versuche sind in Anhang A zusammengestellt.

In Tabelle 4-14 sind die Schub-E-Moduln und Schubfestigkeiten der Versuchsreihen für das Klima von 20°C und $65\% \text{ rF}$ gegeben. Dieses Klima wurde in Abschnitt 4.2.3

als Normklima definiert. Der Großteil der Versuche wurde mit diesem Klima durchgeführt. Alle grundlegenden Betrachtungen in Bezug auf Tragmechanismen und Materialunterschiede erfolgen daher zunächst anhand der Ergebnisse bei Normklima. Der Einfluss von Feuchtigkeit auf das Tragverhalten erfolgt in Abschnitt 4.5.1.4. In der Tabelle sind nur die Ergebnisse der Schubebenen 1-2 und 2-3 enthalten. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben wurden in Ebene 1-3 wegen der sehr geringen Steifigkeit und Tragfähigkeit nur in einer Versuchsreihe Experimente durchgeführt. In Ebene 1-3 wurden für Versuchsreihe 1 ein mittlerer Schubmodul G_{13} von 5,9 N/mm² und eine Festigkeit von 0,08 N/mm² ermittelt. In Verbindung mit den Vorüberlegungen zu den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kernaussrichtungen (s. Abschnitt 2.3) führt dieses Ergebnis dazu, dass das Schubtragverhalten in Ebene 1-3 nicht näher analysiert wird.

Tabelle 4-14: Ergebnisse der Schubversuche: Schubmoduln und Festigkeiten bei Klima 20/65

Table 4-14: Shear test results: Shear moduli and shear strengths at climate 20/65

Versuchsreihe	Schubmodul G_c in N/mm ²		Schubfestigkeit f_{cv} in N/mm ²	
	Ebene 12 \bar{x} (VarK)	Ebene 23 \bar{x} (VarK)	Ebene 12 \bar{x} (VarK)	Ebene 23 \bar{x} (VarK)
VR 1	19,1 (0,07)	177 (0,22)	0,42 (0,05)	0,89 (0,07)
VR 2	7,2 (0,13)	37 (0,32)	0,04 (0,12)	0,24 (0,13)
VR 3	27,1 (0,07)	134 (0,14)	0,33 (0,04)	1,15 (0,07)
VR 4	22,2 (0,17)	142 (0,17)	0,28 (0,15)	1,22 (0,17)
VR 5	23,4 (0,04)	84 (0,08)	0,32 (0,03)	0,83 (0,04)
VR 6	13,2 (0,12)	36 (0,23)	0,16 (0,05)	0,28 (0,12)

In den Bildern Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34 sind typische Spannungs-Dehnungs-Diagramme gegeben. Hier wurden die Schubversuche von Versuchsreihe 4 für das Klima 20/65 gewählt.

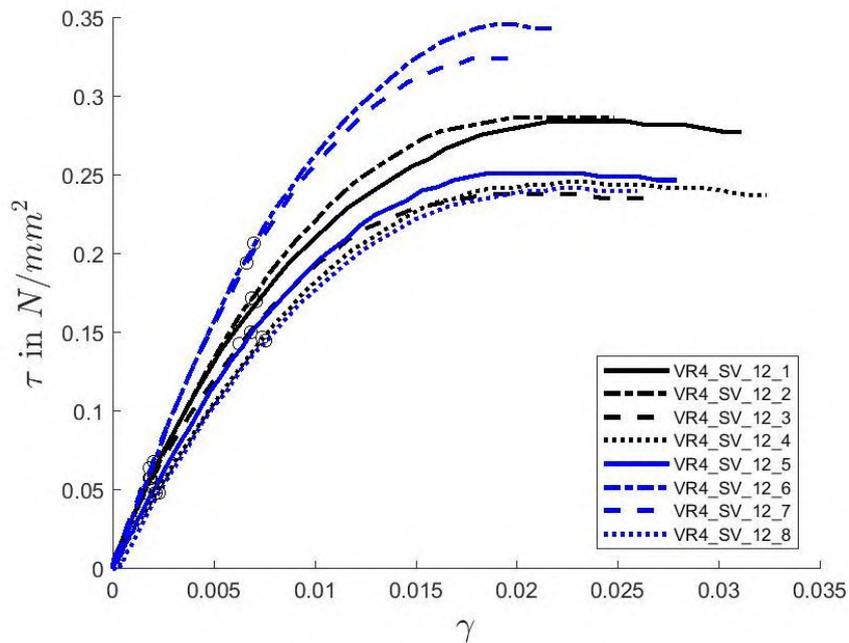


Abbildung 4-33: Schubspannungs-Scherwinkel-Beziehung der Schubversuche in Ebene 1-2 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-33: Shear stress-shear angle-curve of the shear test in plane 1-2 at climate 20/65 (VR 4)

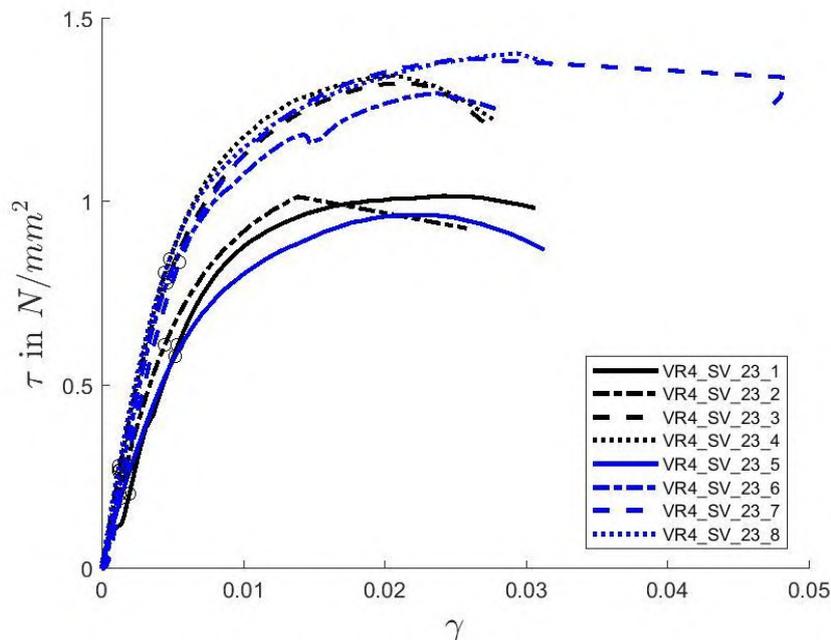


Abbildung 4-34: Schubspannungs-Scherwinkel-Beziehung der Schubversuche in Ebene 2-3 bei Klima 20/65 (VR 4)

Figure 4-34: Shear stress-shear angle-curve of the shear test in plane 2-3 at climate 20/65 (VR 4)

Die Ergebnisse der Ebenen 1-2 und 2-3 unterscheiden sich stark voneinander. Die Schubmoduln in Ebene 1-2 reichen von 7,2 N/mm² bis 27 N/mm² während die Schubmoduln in Ebene 2-3 jeweils etwa 3- bis 7-mal so hoch liegen (zwischen

37 N/mm² bis 177 N/mm²). Die Festigkeiten sind ebenfalls in Ebene 2-3 (0,24 N/mm² bis 1,22 N/mm²) deutlich höher als in Ebene 1-2 (0,04 N/mm² bis 0,42 N/mm²).

Die Tragmechanismen in den Ebenen unterscheiden sich grundsätzlich voneinander. In Ebene 1-2 werden die Schubkräfte durch die Wellenbahnen von Liner zu Liner weitergegeben. Dieser Schubkraftfluss in Ebene 1-2 ist in Abbildung 4-35 a) skizziert. Eine am oberen Liner angreifende Schubkraft wird durch die Klebefuge an den Wellenbergen an die Wellen weitergegeben und dann durch die Klebefugen an den Wellentälern in die darunter liegenden Liner übertragen. Die Linern leiten die Spannungen in Ihrer Ebene von einem Wellental zu den darunter liegenden Wellenbergen. In Ebene 2-3 können Schubkräfte allein durch die Linerebenen hindurch zwischen den Deckschichten übergeben werden. Die Wellen sind aufgrund ihrer Geometrie in dieser Ebene vergleichsweise weich und haben nahezu keinen Anteil am Lastabtrag. Die Klebefugen zwischen den einzelnen Papieren werden demzufolge auch nicht beansprucht. In Abbildung 4-35 b) ist der Kraftfluss in Ebene 2-3 skizziert. Eine Schubkraft die an der Oberseite des hier dargestellten Körpers angreift, wird über Schubspannungen in den Linern τ_{Liner} an die unten liegende Lagerebene weitergegeben. Die angreifende Schubkraft wurde hier durch eine Einzellast vereinfacht. Die gleichmäßige Verteilung der Last auf die Papiere wird in einem Sandwichelement durch die Deckschichten und im Versuch durch die Schneidenplatten gewährleistet.

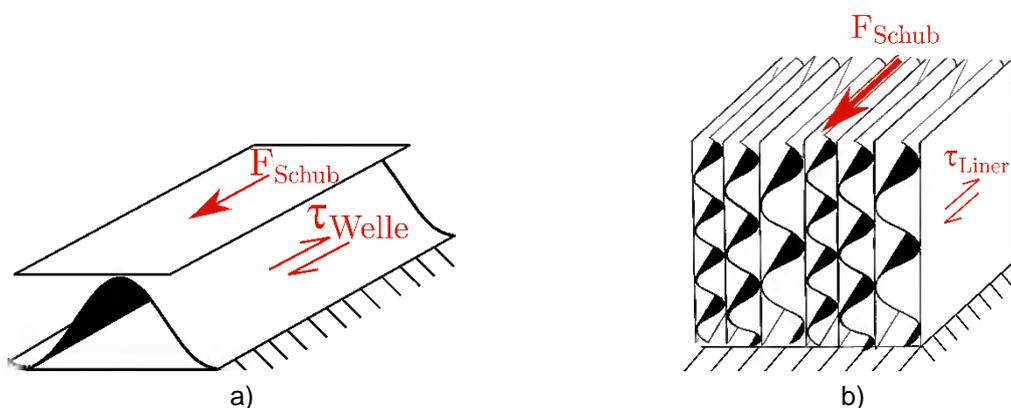


Abbildung 4-35: Schubkraftfluss bei Schub in Ebene 1-2 (a) und Ebene 2-3 (b)

Figure 4-35: Shear force path for shear in plane 1-2 (a) and plane 2-3 (b)

Der Vergleich der einzelnen Wellpappensorten zeigt, dass auch für Schubbeanspruchungen die Schrenzpappe (VR 2) die mit Abstand geringsten Schubmoduln aufweist. VR 6, die eine einwellige Testlinerpappe mit geringen Flächengewichten der Papiere als Ausgangsmaterial hat, zeigt zwar bereits etwa doppelt so große Schubmoduln wie VR 2, hat jedoch im Vergleich zu den übrigen Pappn wiederum viel kleinere Schubmoduln.

Die Sorten der Versuchsreihen VR 1, VR 3, VR 4 und VR 5 weisen in Ebene 1-2 ähnliche Werte für die Schubmoduln auf, was damit zu erklären ist, dass in dieser Ebene die Wellenbahnen die Steifigkeit kontrollieren (s. o.) und diese mit ähnlichen Papieren produziert wurden. Ein genauerer Zusammenhang zwischen Grammaturn der Wellenbahnen und der Größe der Schubmoduln kann jedoch auf der Grundlage der hier erhobenen Daten nicht gefunden werden, da die Papiereigenschaften neben der

Grammatur von anderen Parametern bestimmt werden (z.B. Faserzusammensetzung, Altpapieranteil) und die Versuchsdaten recht große Streuungen aufweisen (VarK bis zu 17 %).

In Ebene 2-3 zeigt sich ebenfalls, dass die Sorten mit Kraftpapieren (s. Tabelle 4-1) die größten Schubmoduln aufweisen. Die Steifigkeit der Probekörper wird wie oben beschrieben durch die Steifigkeit der Liner kontrolliert. VR 1 hat den höchsten Schubmoduln, da hier Liner des Ausgangsmaterials aus Kraftpapier mit hohem Frischfaseranteil bestehen. Die übrigen Pappen wurden mit Zwischendeckbahnen aus Wellenstoff oder Testliner produziert. VR 5 weist von den kraftpapierhaltigen Wellpappen den geringsten Schubmoduln in Ebene 2-3 auf. Hier wurde zwar für die Außendecke der mit 430 g/m² mit Abstand schwerste Liner eingesetzt, jedoch hat die dreiwellige Sorte zwei Zwischendecken aus Wellenstoff wohingegen die Sorten von VR 3 und VR 4 nur eine Zwischendecke aus Wellenstoff aufweisen. Hinzu kommt bei VR 5, dass es sich um eine Pappe mit vergleichsweise großer Wellenteilung handelt. Dies führt dazu, dass im Querschnitt weniger Liner je Längeneinheit vorhanden sind.

Hinsichtlich der Festigkeiten zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Schubmoduln. VR 2 und VR 6 verfügen in beiden Ebenen über die geringsten Festigkeiten. Die übrigen Sorten zeigen in Ebene 1-2 ähnliche Festigkeiten (0,28 N/mm² bis 0,42 N/mm²). Wiederum lässt sich dieser Sachverhalt mit den Wellenbahnen erklären, die das Versagen kontrollieren. In Abbildung 4-36 a) ist ein typisches Versagensbild zu erkennen. In Abbildung 4-36 b) ist ein Probekörper zu sehen, der nach dem Versuch entlang des einen Schneidenlagers aufgesägt wurde. Vor allem hier lassen sich gut Eindrückungen in den Wellen erkennen, die für den Lastabfall im Versuch und damit für das Versagen der Probe verantwortlich sind.

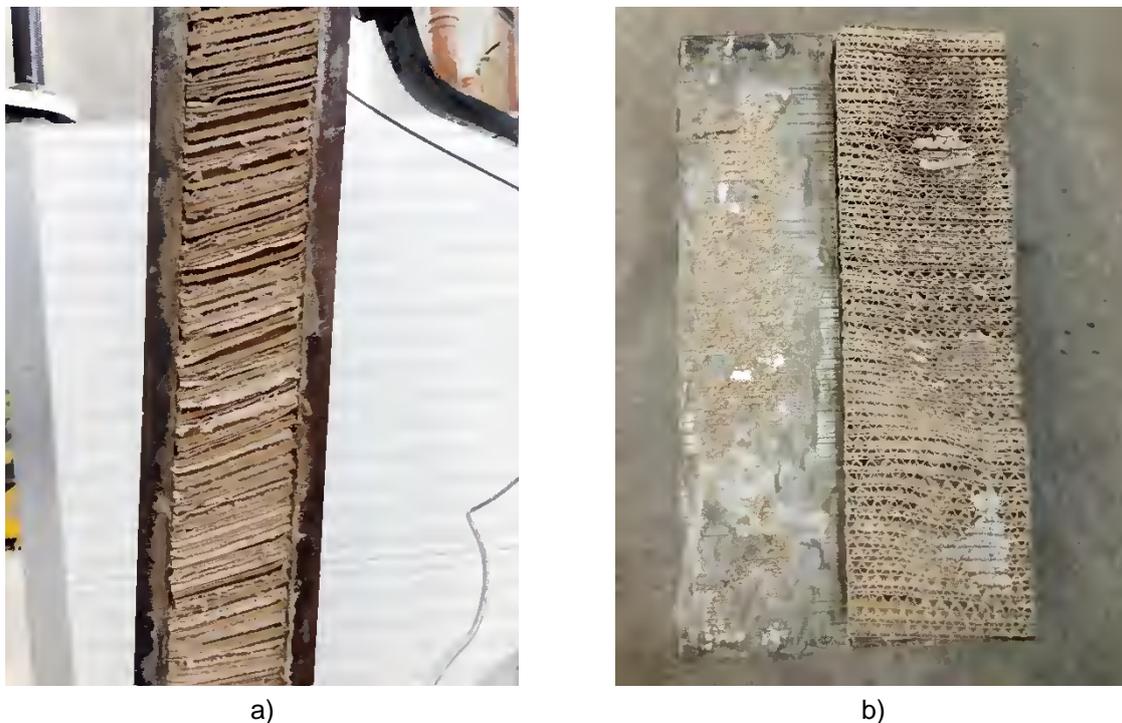


Abbildung 4-36: Schubversagen in Ebene 1-2, im Versuch (a) und Probekörper aufgetrennt (b) (VR 4)

Figure 4-36: Shear failure in plane 1-2, during the test (a) and after cutting the specimen (b) (VR 4)

In Ebene 2-3 zeigen VR 3 und VR 4 mit $1,15 \text{ N/mm}^2$ und $1,22 \text{ N/mm}^2$ die größten Festigkeiten. VR 1 und VR 5 liegen mit $0,89 \text{ N/mm}^2$ und $0,83 \text{ N/mm}^2$ etwa 30 % darunter. Im Bruchzustand findet aufgrund der großen Dehnungen in Verbindung mit dem Steifigkeitsabfall der Papiere eine gleichmäßigere Belastung der einzelnen Papiere statt. Die Festigkeiten haben bei einer Sortierung von groß nach klein die gleiche Reihenfolge wie die einer Sortierung nach den Volumengewichten ρ . Der Verlauf der Schubspannungs-Scherwinkel-Verläufe in Bild Abbildung 4-34 zeigt das duktile Materialverhalten, das eine gleichmäßigere Belastung aller Papiere ermöglicht. Das Versagensbild von Eben 2-3 äußert sich durch eine Schubverformung der Liner, die an Schubbeulen im Stahlbau erinnern. Die lässt sich gut bei den leichten Pappen erkennen und ist beispielhaft in Bild Abbildung 4-37 a) gegeben. In Abbildung 4-37 b) ist ein typisches Versagensbild für die schwereren Pappen zu erkennen. Hier knickt lediglich ein Liner zwischen den Wellen ein. Häufig ist an den äußeren Linern gar keine starke Schädigung zu erkennen.



a)



b)

Abbildung 4-37: Schubversagen in Ebene 2-3 von Schrenz (VR 2) (a) und Kraftliner Wellpappe (hier VR 4) (b)

Figure 4-37: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

4.5.1.4 Einfluss der Klimabedingungen

Um den Einfluss der Klimabedingungen beurteilen zu können, wird als Bezugsgröße die Materialfeuchte definiert. Gemäß SALMÉN & HAGEN (2002, 96 ff) hat die Temperatur erst bei im Bauwesen unübliche Werte von über 150 °C großen Einfluss auf das Tragverhalten von Papier. Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Annahme anhand von Versuche an Zug- und Druck-Probekörpern der Versuchsreihe VR 1 bei verschiedenen Temperaturen jedoch mit konstanten Wassergehalten überprüft. Auf Grundlage dieser

Versuche, kann die Aussage nach SALMÉN & HAGEN (2002) aufgrund von zu geringen Stichprobenumfängen zwar nicht validiert werden, jedoch können auch keine signifikanten Temperaturabhängigkeiten erkannt werden. Diese Versuche und ihre Ergebnisse sind in Anhang A beschrieben. Auf dieser Grundlage wird im Folgenden vereinfacht unterstellt, dass die Materialeigenschaften weitgehend unabhängig von der Temperatur sind und nur vom Wassergehalt der Pappen abhängen.

In Tabelle 4-15 sind die Wassergehalte nach Gl. 2-4 von 5 der 10 Versuchsreihen für unterschiedliche Klimabedingungen gegeben. Wie in Abschnitt 2.2.2.2 beschrieben, ist die Wasseraufnahmefähigkeit der Wellpappen von der Zusammensetzung der Papiere abhängig. Für die meisten Klimastufen sind die Wassergehalte allerdings für die getesteten Sorten sehr ähnlich mit Unterschieden von maximal 1,5 %. Für die besonders feuchten Bedingungen werden die Abweichungen etwas größer. VR 1 hat in einem Klima von 20/90 einen Wassergehalt von 18,5 %, während VR 7 nur 13 % aufweist.

Tabelle 4-15: Wellpappen-Wassergehalten in unterschiedlichen Klimabedingungen

Table 4-15: Water content of corrugated card boards in different climate conditions

Versuchsreihe	Wassergehalt in % bezogen auf Trockenmasse bei Klima in °C / % rF								
	60/20	20/35	30/40	23/50	20/65	10/65	20/80	10/90	20/90
VR1	0,7%	3,0%	3,8%	4,6%	6,7%	6,9%	10,5%	16,5%	18,5%
VR3	1,5%	3,7%	4,3%	5,0%	6,7%	6,9%	9,9%	13,7%	13,9%
VR4	2,3%	4,4%	4,9%	5,6%	7,3%	7,4%	10,5%	13,4%	14,3%
VR5	2,2%	4,4%	5,0%	5,7%	7,5%	7,7%	10,6%	14,5%	14,9%
VR7	1,5%	3,4%	4,0%	4,7%	6,3%	6,3%	9,3%	12,3%	13,0%

Um den Einfluss der Kernfeuchte auf das Tragverhalten von Sandwichelementen mit Wellpappenkern kennen zu lernen, wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Einerseits wurden in den Versuchsreihen VR 1, VR 3, VR 4 und VR 5 Druck, Zug und Schubversuche für je drei Klimastufen durchgeführt, wobei neben dem in Abschnitt 4.2.3 definierten Normklima ein trockenes und ein feuchteres Klima gewählt wurden. Andererseits wurden in Versuchsreihe VR 1 für Zug und Druck in Richtung von Achse 1 noch weitere Klimate untersucht, um genauere Kenntnis über den Zusammenhang von Tragverhalten und Kernfeuchte zu erlangen.

In den Diagrammen Abbildung 4-38 bis Abbildung 4-45 werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen in Form von Druck- und Zug-E-Moduln sowie Schubmoduln und Festigkeiten in Abhängigkeit des Wassergehalts der Pappen dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse aller Versuchsreihen, wurden alle Ergebnisse bezogen auf Referenzwerte dargestellt. Hierbei ist je Versuchsreihe und Versuchstyp der Wert für das in Abschnitt 4.2.3 definierte Normklima 20/65 der Referenzwert. Die zugehörigen Daten sind in Anhang A zusammengestellt.

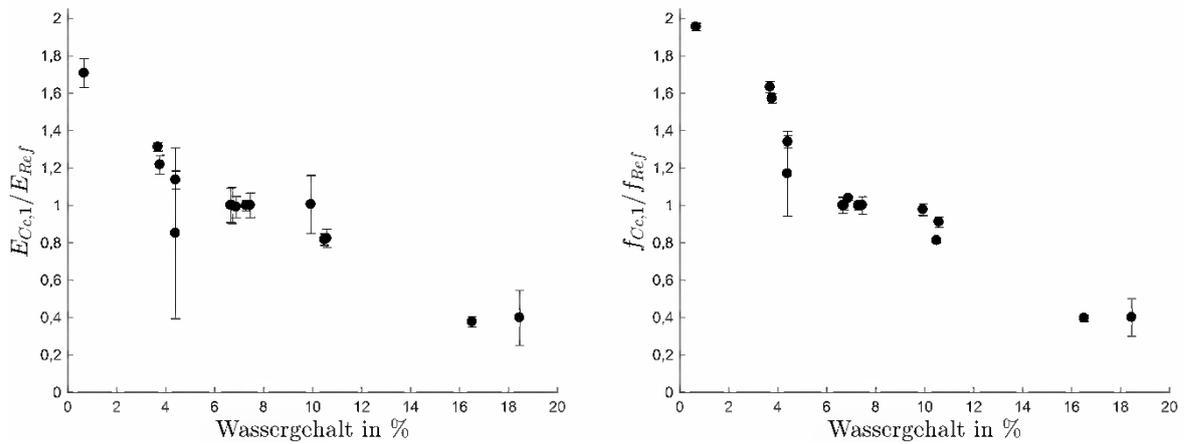


Abbildung 4-38: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Druck in Achse 1 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-38: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

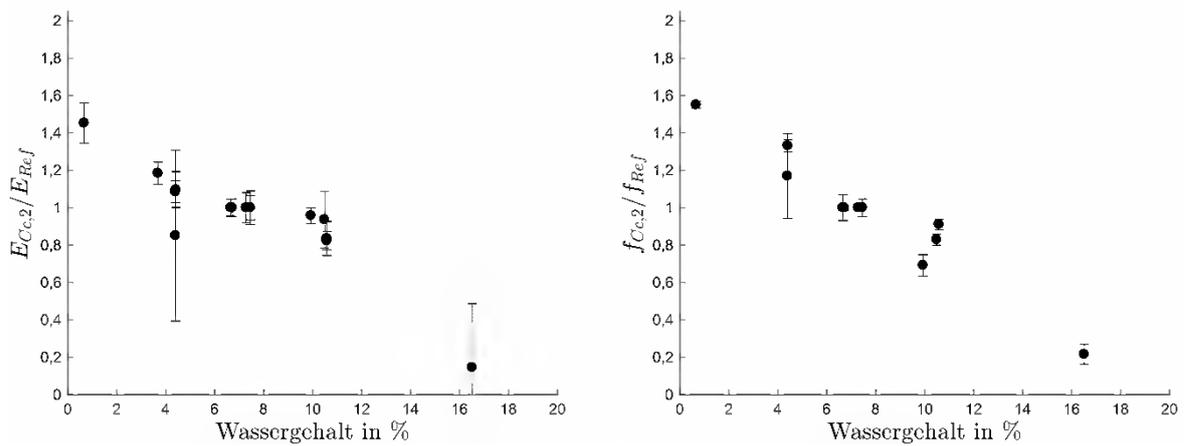


Abbildung 4-39: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Druck in Achse 2 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-39: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

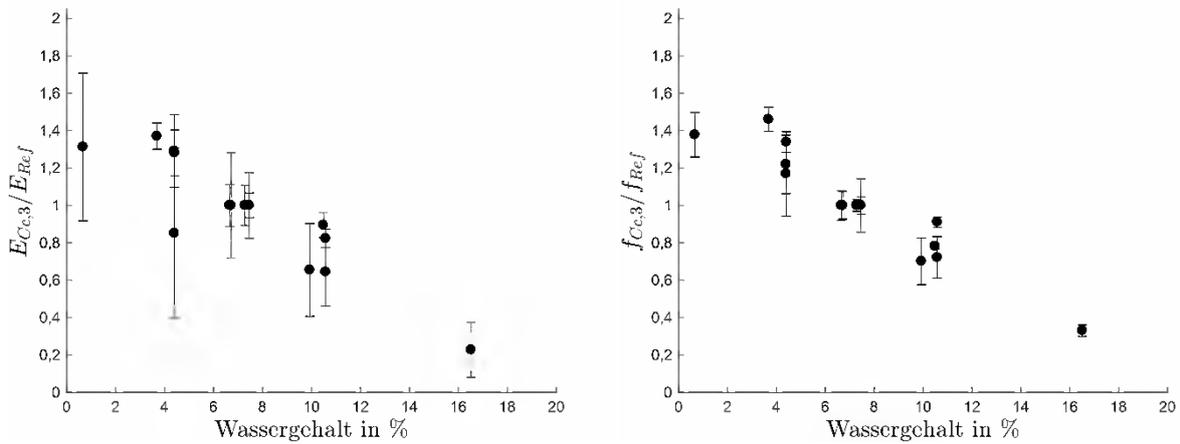


Abbildung 4-40: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Druck in Achse 3 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-40: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

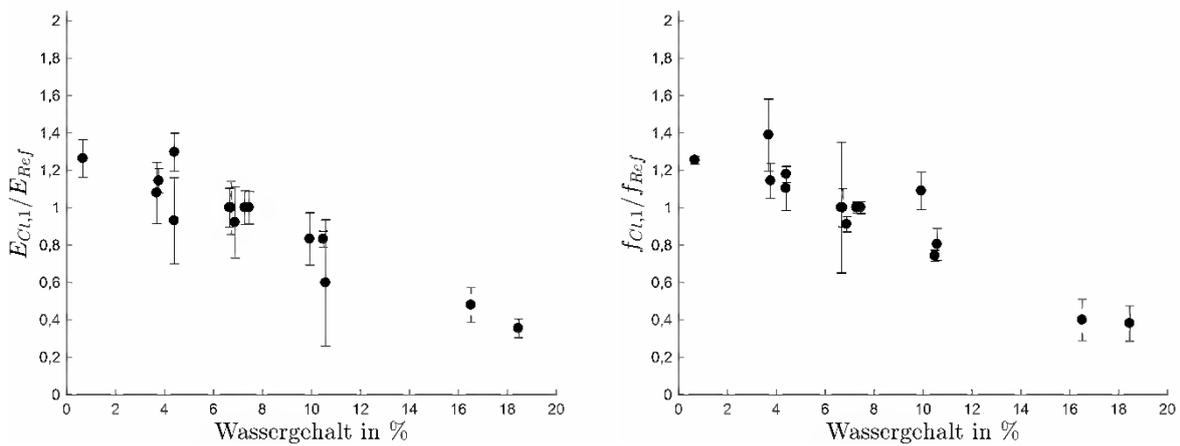


Abbildung 4-41: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Zug in Achse 1 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-41: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

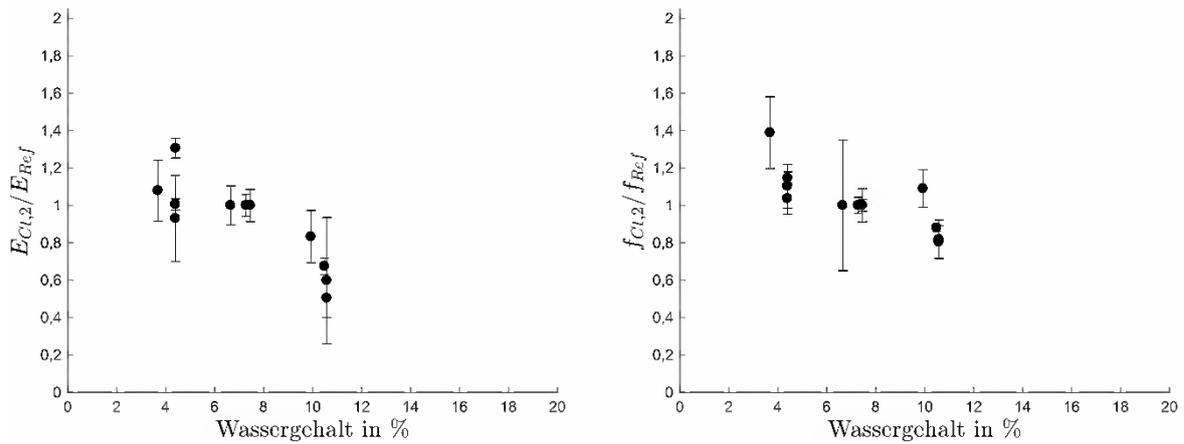


Abbildung 4-42: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Zug in Achse 2 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-42: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

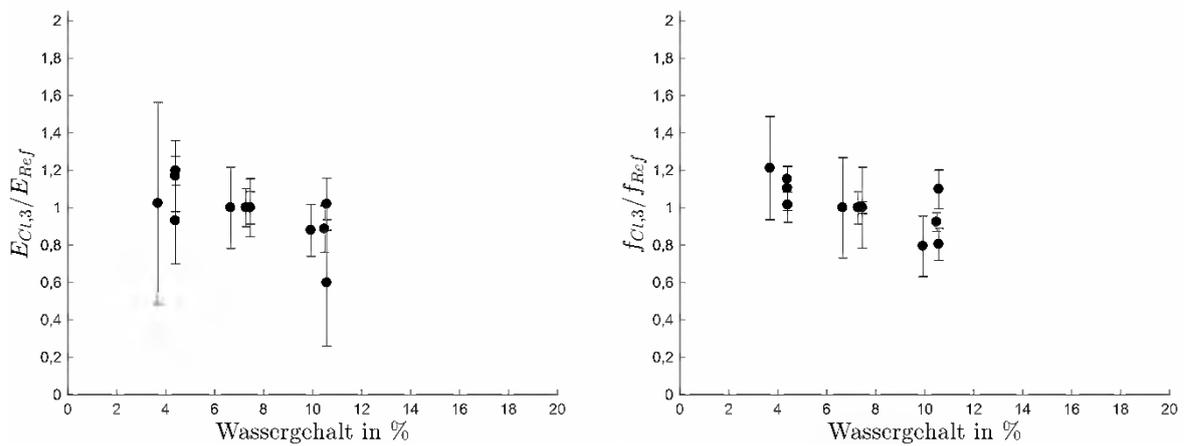


Abbildung 4-43: E-Moduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Zug in Achse 3 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-43: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

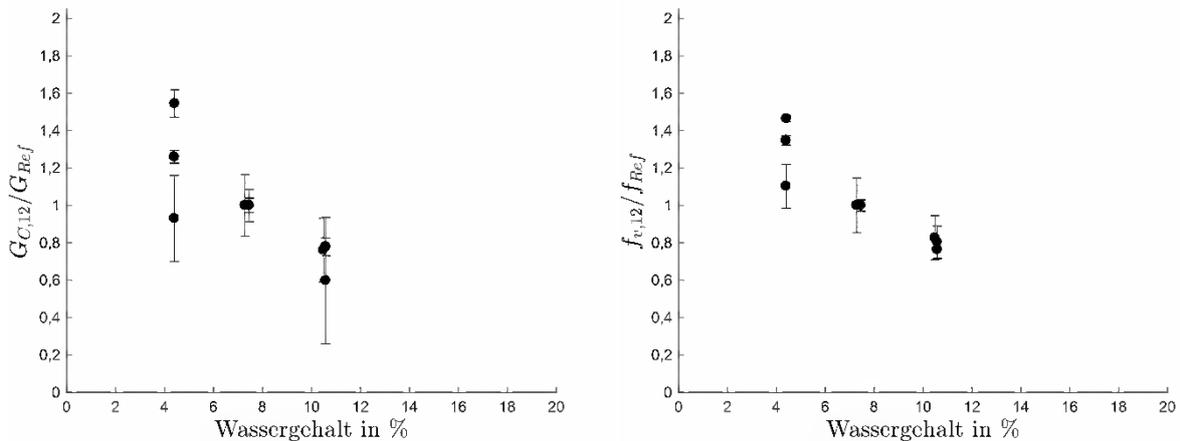


Abbildung 4-44: Schubmoduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Schub in Ebene 12 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-44: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

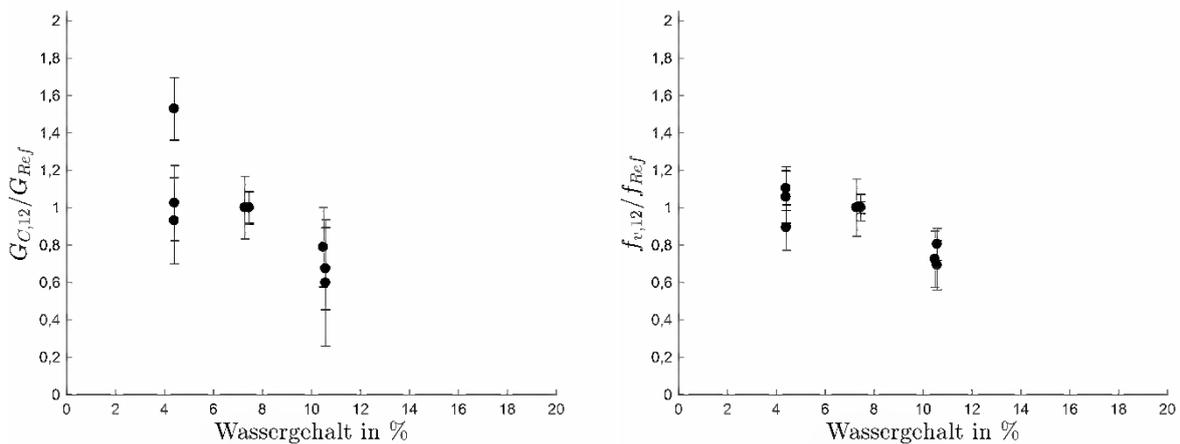


Abbildung 4-45: Schubmoduln (links) und Festigkeiten (rechts), bezogen auf jeweilige Werte bei Klima 20/65, für Schub in Ebene 23 in Abhängigkeit des Wassergehalts der Proben

Figure 4-45: Shear failure in plane 2-3 of light corrugated cardboard quality (VR 2) (a) and kraft paper containing board (here VR 4) (b)

Alle Diagramme zeigen eine Abhängigkeit der Elastizitätskennwerte und Festigkeiten vom Wassergehalt. Je höher der Wassergehalt, desto geringer sind die Festigkeiten, Schub- und E-Moduln der getesteten Sorten. Die Fehlerbalken, die die Standardabweichungen der Versuche anzeigen, veranschaulichen die teilweise sehr großen Streuungen der Versuchsergebnisse. Der Grund sind einerseits geringe Stichprobenumfänge und Materialinhomogenitäten sowie geometrische Imperfektionen, die bereits in den vorangegangenen Abschnitten getrennt für die Versuchsarten Druck-, Zug- und Schubversuche beschrieben wurden. Bei den Zugversuchen in Achse 1 und den Druckversuchen in allen drei Achsen liegen auch Ergebnisse für fast trockene (0,7 % Wassergehalt) sowie für sehr große Wassergehalte von über 18 % vor. Im trockenen Zustand zeigen die Proben E-Moduln, die um etwa 80 % höher liegen, und Festigkeiten, die nahezu doppelt so groß sind, wie die Referenzwerte für ein Klima von 20° C und 65 % rF. Bei Wassergehalten von über 16 % hingegen sinken die E-Moduln und Festigkeiten auf bis zu 15 % der Referenzwerte.

Der Großteil der Versuche wurden neben dem Normklima 20/65 für die drei Klimate 20/35 und 20/80 durchgeführt. Die Festigkeiten werden durch das feuchtere Klima 20/80 im Mittel nur um etwa 20 % bis 30 % reduziert. Die Reduktion der E-Moduln durch das feuchtere Klima variiert stärker je nach Versuchsreihe und Belastungsart. Während sich die Druck-E-Moduln in den Achse 1 und 2 nur um etwa 10 % bis 20 % verringern, ergeben sich in Achse 3 Reduktionen von bis zu 35 %. Dies lässt sich ebenso wie die zu diesen Werte gehörende größere Streuung durch den großen Einfluss von Imperfektionen in dieser Ausrichtung erklären (s. hierzu auch Bild Abbildung 4-27 und zugehörige Erläuterung).

Eine Ableitung von Bestimmungs- oder Näherungsgleichungen zur Vorhersage des Materialverhaltens in Abhängigkeit des Wassergehalts ist auf der Grundlage der hier präsentierten Versuchsergebnisse nicht möglich. Die Ergebnisse zeigen jedoch deutlich, dass die hier untersuchten Wellpappen auch bei Wassergehalten von ca. 10 %, die sich in feuchte Klimabedingungen wie z. B. Klima 20/80 einstellen, nur relativ kleine Reduktionen der Festigkeiten und Steifigkeiten erfahren. Steigen die Wassergehalte über 15 %, ergeben sich hingegen sehr große Tragfähigkeits- und Steifigkeitseinbußen, die gegenüber dem Materialverhalten bei Normklima über 80 % betragen können.

In Abbildung 4-46 wurden exemplarisch Spannungs-Dehnungs-Diagramme ausgewählter Versuche bei verschiedenen Klimaten der VR 1 für Zug in Achse 1 zusammengestellt. Hier lässt sich gut erkennen, dass nicht nur die Festigkeiten und Steifigkeiten sondern auch die Duktilität mit steigendem Wassergehalt abnimmt. Für ein Klima von 20/65 hat das Material einen Wassergehalt von 6,7 % und das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt ein duktileres Materialverhalten mit großer Dehnungszunahme und nahezu gleichbleibender Spannung ab etwa 0,06 N/mm². Für das Klima 30/40 (grüne Linien in Abbildung 4-46, Wassergehalt 3,8 %) ist dieser Bereich zum einen bei einem höheren Spannungsniveau finden und zum anderen weniger stark ausgeprägt. Dieser Effekt ist noch stärker bei den nahezu trockenen Probekörpern, die in einem Klima 60/20 gelagert wurde, zu erkennen. Die Proben des Klimas 10/90 (blau, Wassergehalt 16,6 %) hingegen erreichen noch größere Dehnungen als die Proben des Normklimas 20/65 bevor das Versagen eintritt.

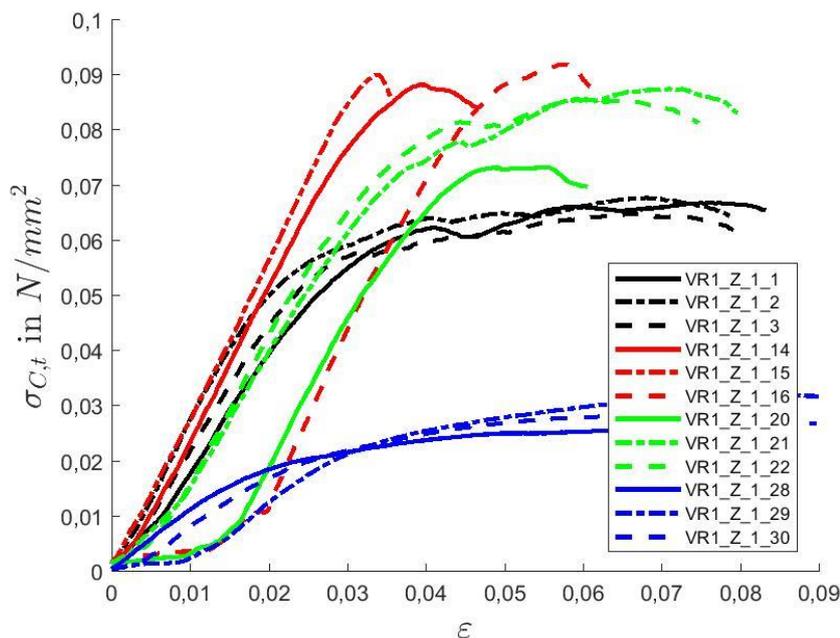


Abbildung 4-46: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Zugversuchen in Achse 1 (VR1) für Klimate 20/65 (schwarz), 60/20 (rot), 30/40 (grün) und 10/90 (blau)

Figure 4-46: Stress-strain-curve of tensile tests in axis 1 (VR 1) for climate 20/65 (black), 60/20 (red), 30/40 (green) und 10/90 (blue)

4.5.2 Kriechversuche

Die Ergebnisse der Kriechversuche sind in Tabelle 4-16 zusammengefasst. Bei Versuchsreihe VR 1 wurden keine Variationskoeffizienten gebildet, da hier je Typ nur zwei Versuche durchgeführt wurden. In Abbildung 4-47 sind die Verläufe der Probendurchbiegung in Feldmitte exemplarisch für die Typ 2 Proben von VR 3 im Klima 20/80 dargestellt. Die Verläufe der übrigen Versuche sind Anhang A gegeben. Die Versuchsdaten und Ergebnisse der einzelnen Versuche sind dort ebenfalls detailliert zusammengestellt.

Tabelle 4-16: Ergebnisse der Kriechversuche

Table 4-16: Results of the creep tests

	VR 1		VR 3					
	Typ 1 Klima 20/65	Typ 2	Typ 1 Klima 20/65	Typ 2		Typ 2		
			\bar{x}	(VarK)	Klima 20/65	(VarK)	Klima 20/80	
					\bar{x}	(VarK)	\bar{x}	(VarK)
w_0 in mm	1,10	1,20	1,31	(0,08)	2,80	(0,01)	2,76	(0,02)
$w_{v,0}$ in mm	0,91	0,44	1,08	(0,01)	0,76	(0,00)	0,73	(0,00)
$w(t = 200 \text{ h})$ in mm	2,54	1,23	2,31	(0,10)	3,15	(0,03)	3,30	(0,04)
$w(t = 200 \text{ h})$ in mm	2,97	1,26	2,70	(0,06)	3,35	(0,02)	3,70	(0,02)
φ_{2000}^*	2,7	0,2	1,7	(0,09)	0,8	(0,17)	1,6	(0,09)
φ_{100000}^{**}	3,4	0,3	2,3	(0,14)	1,1	(0,11)	2,4	(0,09)

* Extrapoliert nach DIN EN 14509 gem. Gl. 4-24

** Extrapoliert nach DIN EN 14509 gem. Gl. 4 25

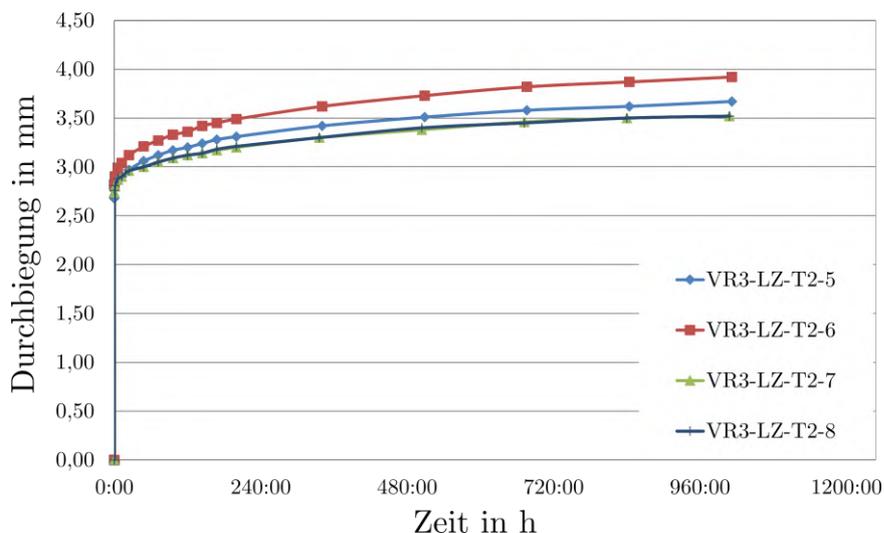


Abbildung 4-47: Durchbiegung der Typ 2 Proben von VR 3 im Kriechversuch im Klima 20/80

Figure 4-47: Deflection of the type 2 specimens of VR 3 during creep test in climate 20/80

Für die Proben vom Typ 1 (T1) wurden Versuche nur im Normklima 20/65 durchgeführt. Die extrapolierten Kriechfaktoren für einen Zeitraum von 100000 Stunden liegen zwischen 2,3 und 3,4. Das bedeutet, dass die Schubverformung sich innerhalb eines Zeitraums von 100000 h um das 2,3- bzw. das 3,4-fache erhöhen. Die Bedeutung dieses Ergebnisses für ein Sandwichelemente wird aber erst klar, wenn man gleichzeitig betrachtet, dass die Schubsteifigkeit des Materials in dieser Ausrichtung relativ gering ist, und somit die Anfangsschubverformung $w_{v,0}$ einen großen Anteil (ca. 80 %) an der Gesamtverformung w_0 trägt. Nach unter 1000 h hat dies bereits eine Verdopplung der Gesamtverformung zur Folge und nach 100000 h beträgt die Gesamtverformung etwa das 5-fache von w_0 .

Bei den Probekörpern des Typs 2 (T2) wurden sowohl für das Normklima 20/65 als auch für das feuchtere Klima 20/80 Kriechfaktoren ermittelt. Während im Klima 20/65 die Kriechzahl φ_{100000} für VR 1 zu 0,3 bestimmt wurde, liegt die Kriechzahl von VR 3 bei 1,1. Im Klima 20/80 ist die Kriechverformung deutlich größer und die Kriechzahl φ_{100000} wird zu 2,4 bestimmt. Zieht man auch hier die Schubsteifigkeit in Betracht, lässt sich das Ergebnis bewerten. Da die Kernausrichtung bei den Typ 2 Elementen zu einer großen Schubsteifigkeit führt, beträgt die Anfangsschubverformung $w_{v,0}$ nur einen Anteil von ca. 30 % an der Gesamtverformung w_0 . Dies hat zur Folge, dass sich die Gesamtverformung nach 100000 h im Klima 20/65 nur etwas um die Hälfte erhöht und im Klima 20/80 nur um ca. 90 % ansteigt, obwohl die Kriechzahl mit 2,4 hier sogar höher liegt als die Kriechzahl bei Typ 1 von VR 3, im Klima von 20/65 ($\varphi_{100000} = 2,3$).

Die vorgenannten prozentualen Zuwächse der Gesamtverformungen sind nicht allgemeingültig, sondern vom statischen System abhängig. Da die Biegeverformung im Vergleich zur Schubverformung mit anwachsender Spannweite der Elemente überproportional ansteigt, sinkt der prozentuale Verformungszuwachs infolge Kriechens mit steigender Spannweite. Die alleinige Betrachtung der Kriechzahl ermöglicht hingegen auch keine umfassende Bewertung des Ergebnisses, weshalb die Gesamtverformung im vorliegenden statischen System herangezogen wurde.

Die in diesem Abschnitt präsentierten Ergebnisse sind auf der Grundlage einer geringen Anzahl an Versuchen entstanden und unterliegen zudem teilweise großen

Streuungen (VAR bis zu 17 %). Es lässt sich jedoch klar erkennen, dass ein Einsatz der Typ 1 Elemente unter ständiger Beanspruchung nicht ohne weiteres möglich ist, da derart große Verformungszuwächse für Übergangsbereiche, Fugen und Verbindungsmittel nicht verträglich wären. Die Typ 2 Elemente hingegen lassen sich möglicherweise auch unter ständig wirkenden Lasten verwenden.

Die gewählten Versuchsaufbauten bedürfen sehr genauen Verformungsmessungen, da die absoluten Verformungen vergleichsweise klein sind. Auch Messfehler, die beispielsweise durch das Verschieben eines Auflagerpunktes um wenige Zehntelmillimeter hervorgerufen werden, haben bei den kleinen Messgrößen relativ großen Einfluss auf die Ergebnisse. Eine kontinuierliche Überwachung der Durchbiegung mit Messabständen von unter 60 Minuten hat sich hier gut bewährt. Eine schlagartige Verformung kann so erkannt werden und von einer zeitabhängigen unterschieden werden. Ein Versuchsaufbau, der die Anforderungen nach DIN EN 14509 erfüllt ist dennoch empfehlenswert, da durch die darin vorgeschriebene größere Stützweite auch größere Verformungswerte auftreten.

Dauerstandfestigkeiten wurden nicht ermittelt. In den Langzeitversuchen wurden die Probekörper mit Stahlplatten als Totlast mit Eigengewichten von bis zu 140 kg belastet, indem die Platten auf Zentrierleisten auf die Probekörper oben aufgelegt wurden. Höhere Belastungen hätten mit dem vorhandenen Versuchsaufbau nicht durchgeführt werden können, da dann eine sichere und stabile Versuchsdurchführung nicht zu gewährleisten gewesen wäre. Hinzu kommt, dass die Schubspannung im Kernmaterial bei den getesteten Konfigurationen bereits bis zu 0,2 N/mm² betrug und damit bereits höher liegt als die Schubspannung, die bei herkömmlichen Spannweiten und Sandwichaufbauten (Kerndicken sowie Deckblechmaterialien und Deckblechdicken) auftreten. Um den Einsatz für Zwecke, in denen dauerhaft höhere Schubspannungen auftreten, bewerten zu können, sind weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich.

4.5.3 Vergleich der Ergebnisse mit herkömmlichen Materialien

Um die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse besser einordnen zu können, werden sie nachfolgend in Tabelle 4-17 mit Kennwerten der herkömmlichen Kernmaterialien für Sandwichelemente gegenübergestellt. Es werden stets die gemittelten Versuchsergebnisse angegeben, wobei in der Gegenüberstellung auf die Angabe von Streugrößen verzichtet wird, da diese bereits in den vorangegangenen Abschnitten ausgegeben wurden. Der Vergleich beschränkt sich auf die mit Abstand am weitesten verbreiteten Kernmaterialien Polyurethan-Hartschaum (PU) und Mineralwolle (MW). Für diese beiden Kernmaterialien wurden die Extremwerte von marktüblichen Produkten gemäß Abschnitt 2.2.4 angegeben.

Tabelle 4-17: Gegenüberstellung der mechanischen Materialparameter von Wellpappe mit den Kennwerten herkömmlicher Kernmaterialien

Table 4-17: Summary of the mechanical material parameters of corrugated cardboard with the parameters of common core materials

	WP A1*	WP A2	WP A3	PU**	MW**
E_{cc}	0,6 bis 5,3	25 bis 126	3,2 bis 109	2 bis 8	6 bis 20
E_{ct}	0,4 bis 2,8	118 bis 376	68 bis 689	2 bis 6	5 bis 40
f_{cc}	0,04 bis 0,19	0,4 bis 1,8	0,1 bis 1,2	0,08 bis 0,20	0,20 bis 0,25
f_{ct}	0,02 bis 0,07	0,9 bis 3,8	0,9 bis 4,6	0,08 bis 0,25	0,03 bis 0,20
	WP E 1-2*	WP E 2-3		PU**	MW**
G_c	13,2 bis 27	36 bis 177		2 bis 5	2 bis 20
f_{cv}	0,16 bis 0,42	0,2 bis 1,2		0,08 bis 0,18	0,03 bis 0,20
	WP T1	WP T2		PU**	MW**
φ_{100000}	2,3 bis 3,4	0,3 bis 1,1		7,0	2,0
	WP			PU**	MW**
ρ	69 bis 235			25 bis 45	90 bis 150

* VR 2 ausgenommen

**nach Abschnitt 2.1.4

Die Wellpappen sind getrennt für die Hauptachsen (bei Druck- und Zug-Parametern) beziehungsweise die Schubebenen (Ebene 1-2 und Ebene 2-3 bei Schubparametern) und die Elementtypen (Typ 1 und Typ 2 bei Kriechfaktoren) aufgeführt. Es sind jeweils die kleinsten und der größten Mittelwerte, die im Normklima von 20 °C und 65 % rF bestimmt wurden, angegeben.

Bei den E-Moduln und Festigkeiten für Achse 1 und bei den Schubmoduln für Ebene 1-2 wurden die Ergebnisse von Versuchsreihe VR 2 ausgenommen. Es hat sich gezeigt, dass diese Werte nicht die Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften für ein Kernmaterial für Sandwichelemente erfüllen.

Während die schwächsten Wellpappen in Achse 1 Druck-E-Moduln aufweisen, die nur etwa 10 % der E-Moduln herkömmlicher Materialien betragen, liegen hier die höchsten Ergebnisse in etwa auf dem gleichen Niveau mit PU-Schäumen und weichen Mineralwollen. Die größten Zug-E-Moduln der Wellpappen in Achse 1 liegen im Bereich der schwächsten PU-Materialien und zeigen etwa nur 50 % der schwächsten Werte von MW. Im Hinblick auf die Zug- und Druckfestigkeiten der Wellpappen in Achse 1 zeigt sich ein ähnliches Bild. Die größten Werte der Wellpappen, die mit den kraftpapierhaltigen Wellpappensorten erzielt wurden, liegen auf dem Niveau schwacher PU-Schäume und Mineralwollen. Die größte getestete Druckfestigkeit liegt zwar im Bereich besonders fester PU-Schäume und Mineralwollen, jedoch handelt es sich hier um die Festigkeit einer Wellpappe mit sehr feiner Welle, die zu einer großen Materialdichte führt, deren Verwendbarkeit damit in Frage zu stellen ist. Die Sorten mit Dichten auf dem Niveau von Mineralwolle weisen Festigkeiten von maximal 0,11 N/mm² auf und liegen damit im Bereich eines PU-Schaums mit geringer Festigkeit. Die kleinsten E-Moduln und Festigkeiten in Achse 1 sind, obwohl die schwächste Versuchsreihe VR 2 (Schrenz) hier bereits ausgenommen wurde, viel kleiner als die der herkömmlichen Materialien. Die E-Moduln betragen etwa ein Viertel der kleinsten E-Moduln von PU-Schäumen. Die kleinste Druckfestigkeit in Achse 1 ist etwa halb so

groß wie die Festigkeit der schwächsten PU-Schäume und die Zugfestigkeit beträgt nur etwa ein Viertel der kleinsten PU-Zugfestigkeit.

Die Wellpappen in Achse 2 weisen Druck-E-Moduln auf, die um bis zu ca. 15 mal höher liegen als die der steifsten PU-Schäume und etwa sechsmal so groß sind wie die der steifsten Mineralwollen. Die Zug-E-Moduln betragen etwa das 63-fache eines steifen PU-Hartschaums und etwa das Neunfache einer steifen Mineralwolle. In Achse 2 sind die größten Druckfestigkeiten sieben- bis neunmal so groß und die Zugfestigkeiten 15- bis 19-mal so groß wie die höchsten Festigkeiten herkömmlicher Materialien. In Achse 2 weisen hier getesteten Wellpappensorten mit den kleinsten E-Moduln immer noch Werte auf, die für Druck etwa viermal so groß und für Zug etwa 20 mal so groß sind wie die von steifen PU Schäumen. Die Festigkeiten der schwächsten Wellpappen sind etwa drei- bis viermal so groß wie die der festesten herkömmlichen Materialien.

In Achse 3 ist die Bandbreite der Ergebnisse der Druck-E-Moduln und Druckfestigkeiten besonders groß. Die größten Druck-E-Moduln sind etwa fünfmal so groß wie die von steifen Mineralwollen während die kleinsten Druck-E-Moduln nur etwa eineinhalbmals so groß sind wie die weicher PU-Materialien. Die Druckfestigkeiten reichen von Werte, die auf dem Niveau von schwachen PU-Schäumen liegen bis zur fünffachen Festigkeit einer festen Mineralwolle. Die Zug-E-Moduln liegen eineinhalb bis ca. 17-mal so hoch wie die von sehr steifen Mineralwollen. Die Zugfestigkeiten sind etwa viermal bis 20-mal so groß wie die von festen PU-Schäumen oder Mineralwollen.

In Tabelle 4-17 wurden nur die Schubmoduln der Ebenen 1-2 und 2-3 berücksichtigt, da die Ebene 1-3 wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, für die praxisrelevanten Kernausrichtungen nicht von Bedeutung ist. Bei den Werten der Ebene 1-2 wurde die Versuchsreihe VR 2 nicht berücksichtigt, da diese bereits aufgrund der schlechten Druck- und Zugtragverhaltens in Achse 1 für den Einsatz als Kernmaterial in der Ausrichtung mit einer planmäßigen Beanspruchung der Schubebene 1-2 ausgeschlossen wurde.

Die kleinsten Schubmoduln der untersuchten Wellpappen in Ebene 1-2 sind zwischen drei und fünfmal so groß wie die von steifen PU-Schäumen, während die Wellpappen mit der größten Schubsteifigkeit in dieser Ebene etwa 30 % höher liegen als die schubsteifsten Mineralwollen. Die Schubfestigkeiten in Ebene 1-2 reichen von Werten, die auf dem gleichen Niveau wie sehr schubfeste PU-Schäume und Mineralwollen liegen, bis hin zum etwa zweifachen der tragfähigsten Mineralwollen.

In Ebene 2-3 betragen die Schubmoduln der Wellpappen etwa das doppelten bis neunfache der Schubmoduln von steifen Mineralwollen. Die Festigkeiten reichen vom Niveau der herkömmlichen Materialien bis zum sechsfachen dessen.

Die in Tabelle 4-17 dargestellten Kriechzahlen repräsentieren ausschließlich das Schubkriechverhalten der Wellpappen und der herkömmlichen Kernmaterialien, PU und MW. Es zeigt sich, dass die Vergrößerung der Schubverformungen für Elemente vom Typ 1 nach einem Zeitraum von 100000 Stunden mit der von Mineralwolle vergleichbar ist. Die Typ 2 Elemente zeigen kleinere Kriechzahlen, die etwa nur 20 % bis 50 % der Kriechzahlen von Mineralwolle betragen.

Die Dichten ρ der Untersuchten Wellpappen liegen zwischen 69 kg/m^3 und 235 kg/m^3 . Die meisten Wellpappen haben jedoch Dichten zwischen 130 kg/m^3 und 180 kg/m^3 ,

womit sie ähnliche Dichten wie schwere marktübliche Mineralwolle-Sorten (ca. 150 kg/m³) aufweisen.

4.6 Materialuntersuchungen durch Papierprüfungsinstitut

Zusätzlich zu den beschriebenen Materialuntersuchungen wurden auch Versuche nach den Vorgaben der Normen für die Papier- und Pappenindustrie gem. Abschnitt 2.4 an Proben der Versuchsreihen VR 1, VR 3 und VR 4 durchgeführt.

4.6.1 Versuchsvorbereitungen und Versuchsdurchführung

Nachfolgend werden die Versuchsvorbereitungen und Versuchsdurchführungen gem. Prüfbericht der externen Materialprüfanstalt (PTS-Heidenau) angegeben.

4.6.1.1 Kantenstauchwiderstand

Der Zuschnitt der Probestücke erfolgte mit einer Doppelblattsäge und die Prüfung der zugeschnittenen Probestücke wurde an der Universal- Zug- und Druckprüfmaschine TIRAtest 2805 durchgeführt.

Bei dieser Prüfmethode werden zwei Probestreifen der Breite 100 mm ± 0,5 mm (Länge variabel, etwa 200 mm) senkrecht zu den Wellen mit Hilfe des Probenschneiders zugeschnitten. Danach sind daraus mindestens 10 Probestücke parallel zu den Wellen mittels Doppelblattsäge zuzuschneiden mit der Breite: 25 mm ± 0,5 mm. Die zu belastenden Kanten müssen sauber, gerade, parallel und senkrecht zur Oberfläche der Wellpappe sein. Die 10 Probestücke sind mit „stehender Welle“ bei einer Vorschubgeschwindigkeit der oberen Platte von 12,5 mm/min bis zum Bruch der Probe zu prüfen. Zum Halten der Proben in senkrechter Stellung werden 2 Führungsblöcke verwendet, die entfernt werden, wenn die Kraft 50 N erreicht hat.

Es wird die Höchstkraft in N ermittelt und in kN/m umgerechnet und angegeben. Aufgrund der vorhandenen Materialmengen wurden 5-6 Einzelmessungen durchgeführt und daraus ein Mittelwert gebildet.

4.6.1.2 Berstfestigkeit

Die Bestimmung der Berstfestigkeit für Pappe erfolgt nach DIN EN ISO 2759:2014-10 mit dem Berstdruckprüfgerät SE 002 J 5-3 der Fa. Lorentzen & Wettre. Es wurden 2-5 Messungen für jede zu prüfende Seite durchgeführt, sodass insgesamt 4-10 Einzelwerte gemessen wurden und daraus ein Mittelwert gebildet wurde. Die Maße der Probestücke sollten ca. 175 x 220 mm betragen, so dass Ober- und Unterseite nebeneinander geprüft werden können.

4.6.1.3 Durchstoßwiderstand

Die Prüfung der Durchstoßarbeit erfolgte nach DIN 53 142-1:2014-12 mit dem Durchstoßprüfgerät der Fa. Frank, Typ 53809, Serien-Nr. 27489 für Voll- und Wellpappe.

Es wurden je 2-6 Proben gegen die Ober- und gegen die Unterseite geprüft, je-weils die Hälfte jeder Seite mit den Wellen parallel zur Drehachse des Pendels und die andere Hälfte mit den Wellen im rechten Winkel zur Drehachse des Pendels. Aus den 4-12 Einzelwerten wurde ein Mittelwert errechnet.

Das Pendel wird in Ausgangsstellung angebracht und durch die Ausklinkvorrichtung festgehalten. Je nach Messbereich werden die entsprechenden Gewichte befestigt. Die Probe wird in die Einspannvorrichtung eingelegt. Der Kragen wird auf den Durchstoßkörper aufgesteckt, der Schleppzeiger auf den Skalenendwert eingestellt. Das Pendel wird ausgeklinkt. Nach dem Durchstoß der Probe muss das Pendel frei ausschlagen können. Der Messwert wird in Joule angegeben.

Verwendeter Messbereich: 0 – 24 Joule

Anpresskraft der Einspannvorrichtung: 0,8 kN

4.6.1.4 4-Punkt-Biegeversuch

Die Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode (4-Punkt-Verfahren) wurde nach DIN 53 121:2014-08 durchgeführt. Dazu wurde das 4-Punkt-Biegesteifigkeitsprüfgerät (Bending Stiffness Tester) von Lorentzen & Wettre verwendet.

Es wurden 2-6 Probestreifen in jeder Maschinenrichtung (parallel und quer zur Maschinenaufrichtung) mittels Probenschneider zugeschnitten. Die Länge der Proben richtet sich nach der Dicke der Muster. Diese ist in Anlehnung an die DIN ISO 3034:2016-08 mittels dem Dickenmessgerät Micrometer von Lorentzen & Wettre anhand von 6 Einzelwerten ermittelt wurden.

Bei allen Mustern wurde der Auflagerabstand von 200 mm verwendet. Die Abmessungen der Proben betragen vorzugsweise:

Probenbreite: 100 mm ($\pm 1\%$)

Probenlänge: ausgewählte Messlänge + 170 mm (Toleranz $\pm 2\%$)

Die Messungen erfolgen nur im elastischen Bereich. Es dürfen keine plastischen Verformungen erfasst werden. Dazu wird ein Vorversuch mit den Proben durchgeführt, um die passenden Gewichte zu bestimmen.

Die Messergebnisse werden in Nm ermittelt und getrennt für Längs- und Quer-richtung angegeben. Aus den 2-6 Einzelmessungen pro Laufrichtung wurde je ein Mittelwert errechnet.

4.6.1.5 Flachstauchwiderstand

Aus den Wellpappenbögen wurden 4-6 Proben mit einer Grundfläche von 100 cm² ausgeschnitten. Für die Prüfung wurde die Universal-Zug-Druckmaschine TIRAtest 2805 verwendet. Als Messwert wird der maximal gemessene Widerstand, bevor die Probe komplett zerdrückt wurde, in kPa angegeben

4.6.1.6 Flächenbezogene Masse

Von den Wellpappen-Mustern wurden Proben von ca. 150 x 150 mm herausgeschnitten, gewässert und an den getrennten Lagen vorsichtig die Leimspuren entfernt. Im Anschluss daran wurden die getrennten Papiere im Trockner des Blattbildners getrocknet und geglättet und anschließend bei Normklima von 23°C und 50 % rel. Luftfeuchte über 24 h klimatisiert und danach gewogen. Die Prüfung der flächenbezogenen Masse der Einzellagen erfolgte abweichend von der DIN ISO 3039:2011-06 als Dreifachbestimmung.

4.6.2 Prüfergebnisse

Im Folgenden werden die Prüfergebnisse werden gemäß Prüfbericht der externen Materialprüfanstalt (PTS-Heidenau) angegeben. In Tabelle 4-19 sind die Mittelwerte mit den zugehörigen Standardabweichungen dokumentiert.

Tabelle 4-18: Flächenbezogene Masse der Einzellagen und visuelle Einstufung der Papiere

Table 4-18: Areal masses and visual classification of the papers

Muster	Lage	Flächenmasse* in g/m ² nach Lagentrennung		Visuelle Einstufung nach Cepi-Containerboard- Liste 2017
		n	MW	
VR1	Außendecke	3	139	Brauner Kraftliner
	B-Welle	3	128	Wellenstoff
	Zwischendecke	3	124	Brauner Kraftliner
	C-Welle	3	121	Wellenstoff
	Innendecke	3	142	Brauner Kraftliner
VR 3	Außendecke	3	168	Brauner Kraftliner
	B-Welle	3	147	Testliner oder gefärbter Wellenstoff
	Zwischendecke	3	125	Testliner oder gefärbter Wellenstoff
	C-Welle	3	148	Testliner oder gefärbter Wellenstoff
	Innendecke	3	165	Brauner Kraftliner
VR 4	Außendecke	3	248	Brauner Kraftliner
	B-Welle	3	153	Wellenstoff
	Zwischendecke	3	114	Wellenstoff
	C-Welle	3	141	Wellenstoff
	Innendecke	3	251	Brauner Kraftliner

* Werte auch in Tabelle 4-1 enthalten

Mechanischer Materialparameter von Wellpappe

Tabelle 4-19: Ergebnisse der Wellpappenprüfungen durch externe Materialprüfanstalt (PTS-Heidenau)
 Table 4-19: Results of corrugated cardboard test conducted by an external material testing institute (PTS-Heidenau)

Versuch	Klima	VR 1			VR 3			VR 4		
		n	MW	SD	n	MW	SD	n	MW	SD
ECT in kN/m	20°C / 35 %	5	14,36	0,18	5	12,89	0,22	5	16,25	0,3
	23°C / 50 %	5	13,38	0,23	5	12,11	0,35	5	14,99	0,32
	20°C / 65 %	6	11,98	0,51	6	10,65	0,17	6	13,37	0,26
	20°C / 80 %	6	8,83	0,16	6	7,48	0,14	6	9,39	0,11
Berstfestigkeit in kPa	20°C / 35 %	4	1524	294	10	1636	97	10	2410	129
	23°C / 50 %	4	1651	286	10	1451	158	10	2365	197
	20°C / 65 %	4	1455	183	10	1476	179	10	2388	233
	20°C / 80 %	4	1681	104	10	1491	136	10	2208	208
Durchstoß- widerstand in J	20°C / 35 %	4	9,2	0,5	10	8,9	0,2	10	11,8	0,7
	23°C / 50 %	4	9,5	0,8	12	9,8	0,6	12	12,2	0,5
	20°C / 65 %	4	9,3	0,7	12	9,3	0,4	12	12,2	0,6
	20°C / 80 %	4	9,4	0,1	12	9,0	0,2	12	11,6	0,3
4-Pkt.-Biege- steifigkeit in Nm Richtung MD	20°C / 35 %	2	21	-	6	32,6	0,93	6	54,3	2,64
	23°C / 50 %	2	17,6	-	6	29,8	1,42	6	49,0	0,92
	20°C / 65 %	2	15,2	-	6	30,1	1,46	6	48,9	1,55
	20°C / 80 %	2	20,7	-	6	22,9	1,54	6	40,7	0,38
4-Pkt.-Biege- steifigkeit in Nm Richtung CD	20°C / 35 %	2	14,8	-	6	18,6	0,36	6	24,9	0,35
	23°C / 50 %	2	14,5	-	6	17,0	1,07	6	23,2	0,57
	20°C / 65 %	2	13,1	-	6	16,9	0,57	6	22,4	0,36
	20°C / 80 %	2	10,6	-	6	12,7	0,27	6	16,3	0,37
FCT in kPa	20°C / 35 %	4	253	9,71	5	256	8,17	5	245	7,01
	23°C / 50 %	4	224	7,54	6	238	7,47	5	229	4,93
	20°C / 65 %	4	210	1,71	6	217	14,8	6	197	9,18
	20°C / 80 %	4	140	2,12	6	133	7,8	6	125	4,02

n-Anzahl der Proben, MW-Mittelwert, SD-Standardabweichung

Anhand der Prüfergebnisse werden die Wellpappensorten gemäß DIN 55468-1 wie in Tabelle 4-20 folgt eingestuft:

Tabelle 4-20: Einstufung nach DIN 55468-1

Table 4-20: Classification according to DIN 55468-1

Wellpappe	Einstufung nach DIN 55468-1
VR 1	2.50
VR 3	2.90
VR 4	2.60

4.6.3 Vergleich der Materialparameter

In diesem Abschnitt werden die Materialparameter und die Prüfergebnisse verglichen. Mit Hilfe dieses Vergleichs wird versucht, Abhängigkeiten zwischen den Parametern der Papierindustrie und der Sandwichtechnik zu finden.

4.7 Zusammenfassung und Bewertung des Materialuntersuchungen

Die mechanischen Materialeigenschaften von insgesamt zehn verschiedenen Sorten von Wellpappe wurden in Druck- Zug- und Schubversuchen sowie Kriechversuchen untersucht. Hierzu wurden zunächst geeignete Versuchsaufbauten teilweise unter Zuhilfenahme von numerischen Voruntersuchungen entwickelt.

Die Versuche wurden für die drei in Abschnitt 2.3 definierten Hauptachsen getrennt durchgeführt. Das Material wird zwar hinsichtlich des Materialmodells vereinfacht als orthotrop betrachtet, jedoch werden die Zug- und Druckeigenschaften getrennt bestimmt. Eine Studie in 4.3.3 zeigt eine Möglichkeit, wie ein effektiver E-Modul gebildet werden kann, der das unterschiedliche Materialverhalten für Druck- und Zugbeanspruchungen repräsentiert.

Die Untersuchungen in diesem Kapitel haben gezeigt, dass sich die mechanischen Eigenschaften der Wellpappen stark für die drei Hauptachsen des Materials unterscheiden. Auch die Zug- und Druckeigenschaften in einer Achse können stark voneinander abweichen.

Bei allen Versuchen ist eine starke Abhängigkeit von der Materialfeuchte festzustellen. Die Steifigkeit und die Festigkeit des Materials nehmen mit zunehmender Feuchtigkeit ab. Im Klima von 20 °C und 65 % rF stellen sich bei den untersuchten Wellpappen zwischen 6 % und 7,5 % Wassergehalt ein. Dieses Klima ist in dieser Arbeit als Normklima definiert. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit auf 80 % stellt sich in den Pappen ein Wassergehalt von 9,3 % bis 10,6 % ein. Diese Wasserzunahme führt im Mittel zu einer Reduktion der Festigkeitswerte von 20 % bis 30 % und eine Reduktion der Steifigkeiten um bis zu 35 %. Wird das Material größeren Feuchtigkeiten ausgesetzt (z.B. 10°C und 90 % rF) reduzieren sich die Festigkeiten und Steifigkeiten auf bis zu 15 % der Werte bei Normklima. Derart hohe Feuchtigkeiten oder gar Nässe müssen bei einer Verwendung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente verhindert werden. Eine kontrollierte Materialfeuchte während der Produktion in Verbindung mit der diffusionsdichten konstruktiven Ausbildung der Sandwichelemente ist hierzu erforderlich. Alle Vergleiche zu herkömmlichen Materialien und Bewertungen der Eignung von Wellpappe als Sandwich-Kernmaterial setzt dies voraus.

Die Streuungen der Versuchsergebnisse sind bei fast allen Versuchen sehr hoch. Die Ergebnisse ermöglichen keine umfangreiche statistische Auswertung. Allerdings sind grundlegende Erkenntnisse auf der Basis der durchgeführten Versuche möglich.

Achse 1 ist weist in allen Versuchen die kleinsten Druck- und Zugfestigkeiten sowie E-Moduln auf. Es hat sich gezeigt, dass nur die Verwendung von hochwertigen Papieren mit einem hohen Frischfaseranteil (Kraftpapiere) zu E-Moduln der Wellpappe in Achse 1 führen, die auf einem ähnlichen Niveau liegen wie die herkömmlichen Materialien. Die untersuchten kraftpapierhaltigen Wellpappensorten haben jedoch alle Zwischendecken und teilweise auch Wellenbahnen aus weniger hochwertigen Papieren wie Wellenstoff und Testlinerpapieren. Da in Achse 1 alle Papierlagen am Lastabtrag beteiligt sind, hat die geringe Steifigkeit und Festigkeit der weniger hochwertigen Papiere großen Einfluss auf die Kennwerte der Wellpappen in Achse 1. Hinsichtlich der Zugfestigkeit ist in Achse 1 in den meisten Fällen die Verklebung zwischen den Wellen und Linern maßgebend. Der Einsatz von hochwertigen Papieren

für allen Liner und Wellenbahnen kann zu höheren Steifigkeiten und die Verbesserung der Verklebungen zu höheren Zugfestigkeiten in Achse 1 führen. Es sollten jedoch möglichst keine gegautschten Papiere gewählt werden. Es ist üblich besonders schwere Papierqualitäten zu erzeugen, indem mehrere dünne Lagen im feuchten Zustand zusammen gegautscht werden. Diese Papiere können sich bei Zug in Achse zusätzlich an der Fügestelle zu trennen.

Bei Beanspruchungen der Achsen 2 und 3 weisen die Wellpappen deutlich größere E-Moduln und Festigkeiten auf als die herkömmlichen Kernmaterialien. Lediglich die Druckfestigkeiten und der Druck-E-Modul von Achse 3 sind bei Wellpappen mit großen Wellenteilungen nur etwa auf dem Niveau herkömmlicher Materialien, da hier Imperfektionen in Kombination mit der schlechteren seitlichen Stützung der Liner zum Ausweichen dieser unter Druckspannungen führen. Die größten Zugtragfähigkeiten und Zugsteifigkeiten sind in Achse 3 zu erkennen, was durch die Ausrichtung der Papierfasern entlang dieser Achse zu erklären ist.

Das Schubtragverhalten wurde nur für die Ebenen 1-2 und 2-3 umfassend untersucht, da die Ebene 1-3 in einem Sandwichelement gemäß der im Rahmen dieser Arbeit getroffenen Festlegungen und Annahmen keine planmäßigen Schubspannungen erfährt. Das Schubtragverhalten in Ebene 1-2 ähnelt dem der herkömmlichen Materialien, während in Ebene 2-3 sechs- bis achtmal höhere Schubmoduln und Festigkeiten als bei festesten und steifsten herkömmlichen Materialien zu verzeichnen sind.

Die Kriechzahlen wurden für die Elementtypen Typ 1 und Typ 2 ermittelt. Für Typ 1 wird die Ebene 1-2 der Wellpappe durch Schub beansprucht, bei Typ 2 Elementen die Eben 2-3. Die Proben vom Typ 1 weisen Kriechzahlen auf, die zwischen denen von PU-Schäumen und Mineralwolle liegen. In Verbindung mit ähnlichen Schubmoduln der Ebene 1-2 ergibt ein ähnliches Langzeitverhalten wie bei den herkömmlichen Materialien. Die Typ 2 Elemente zeigen deutlich kleinere Kriechzahlen. In Verbindung mit sehr großen Schubmoduln in der Ebene 2-3 stellen sich nur sehr kleine zusätzliche zeitabhängige Verformungen ein.

Die Dichten der Wellpappen variieren sehr stark in Abhängigkeit der eingesetzten Papiere und der verwendeten Wellenteilungen. Im Mittel sind die untersuchten Wellpappen mit den Dichten von schweren Mineralwollen vergleichbar.

5 Bauphysikalische Eigenschaften von Sandwichelementen mit Wellpappenkern

In diesem Kapitel werden die bauphysikalischen Untersuchungen zu Sandwichelementen mit Wellpappenkern präsentiert. Die für Sandwichelemente wichtigsten Felder der Bauphysik, Wärmeschutz, Feuchteschutz und Brandschutz, wurden hauptsächlich experimentell untersucht.

5.1 Wärmeschutz

Um die Verwendung von Wellpappe als Kernmaterial von Sandwichelementen bewerten zu können, ist auch die Kenntnis der Wärmedämmfähigkeit des Stoffes von Bedeutung, da in einem Sandwichelement der Kern allein für den Wärmeschutz sorgt. Die hier gewonnenen Ergebnisse ermöglichen keine statistischen Auswertungen und Ableitungen von Berechnungsformeln zur Vorhersage von Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit des Kernaufbaus oder der eingesetzten Papiere bzw. Wellpappen. Hier soll eine grundlegende Einstufung der Wärmedämmfähigkeit von ausgewählten kommerziellen Wellpappen erfolgen.

In diesem Abschnitt werden die experimentellen Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit verschiedener Wellpappen vorgestellt. Zusätzlich wurde mit einer analytischen Methode gezeigt, dass in Wellpappe unabhängig von der Ausrichtung im Sandwichelement, keine freie Konvektion beim Wärmeübergang zwischen den Deckschichten auftritt.

5.1.1 Experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die experimentelle Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit (s. Abschnitt 2.1.6.1) wurde an einem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät „ λ -Meter EP500“ durchgeführt. Das Gerät erfüllt die Anforderungen nach DIN EN 12667. Bei diesen Geräten wird die Probe zwischen einer Heizplatte und einer Kühlplatte eingelegt und seitlich mit Dämmstoff umgeben. Eine durch das Gerät erzeugte Temperaturdifferenz zwischen Heizplatte und Kühlplatte erzeugt einen Wärmestrom durch den Probekörper hindurch, der gemessen werden kann und Aufschluss über die Wärmeleitfähigkeit der Probe gibt. Für genauere Angaben zur Funktionsweise solcher Messgeräte wird auf DIN EN 12667 verwiesen.



Abbildung 5-1: Einplattenmessgerät „λ-Meter EP500e“ zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Figure 5-1: Thermal conductivity test tool “λ-Meter EP500e”

Für die Geometrie der Proben wurden die Vorgaben gemäß DIN EN 12667 eingehalten. Die Probekörper haben eine quadratische Grundfläche mit einer Kantenlänge von 150 mm und Dicken zwischen ca. 40 mm und 100 mm. Die Temperaturdifferenz zwischen den Heizplatten wurde zu $\Delta T = 15 \text{ K}$ gewählt. Die mittlere Temperatur zwischen der Heiz- und der Kühlplatte wurde mit $T = (10, 23, 40) \text{ }^\circ\text{C}$ variiert.

Die Wärmeleitfähigkeitsversuche wurden für drei alle drei Hauptachsen der Wellpappe durchgeführt. Beispielhaft sind Probekörper der Versuchsreihe VR 1 der drei Ausrichtungen in Abbildung 5-2 dargestellt.

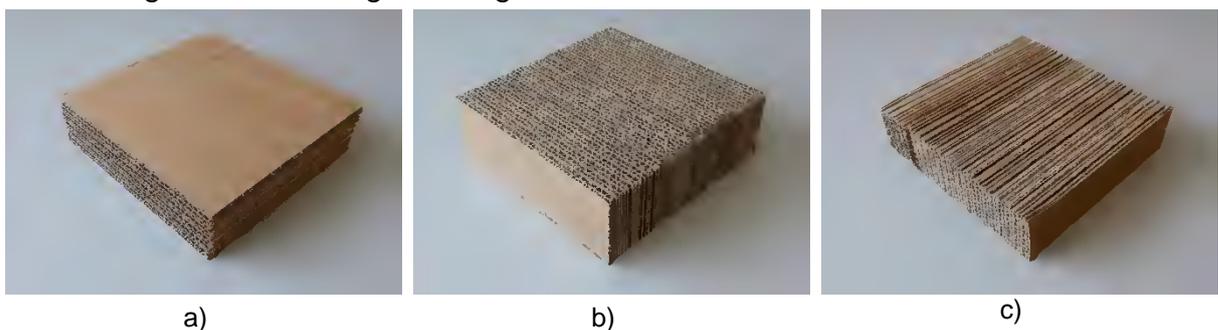


Abbildung 5-2: Probekörper der Wärmeleitfähigkeitsversuche aller drei Ausrichtungen

Figure 5-2: Specimens for the thermal conductivity test of all three orientations

Die Probekörper wurden vor den Versuchen klimatisiert. Da die Wärmeleitfähigkeit der meisten Materialien maßgeblich vom Wassergehalt abhängt, wurden zunächst alle Versuche mit dem Wassergehalt durchgeführt, der sich bei Normklima (gem. Abschnitt 4.2.3) von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65 % relativer Feuchte einstellt. Um den Einfluss der Kernfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit grob abschätzen zu können, wurde in jeder Ausrichtung der Versuchsreihe VR 1 ein weiterer Versuch mit zuvor getrockneten Proben durchgeführt.

Es wurden Versuche an den Wellpappen der Versuchsreihen VR 1, VR 2, VR 3, VR 4 durchgeführt. Das Prüfprogramm mit den zugehörigen Probendicken wird zusammen mit den Messwerte des λ -Meters sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Der Großteil der Messungen wurde an Versuchsreihe VR 1 durchgeführt. Die Probenanzahl für die übrigen Proben wurde reduziert, da die Verfügbarkeit des Prüfgeräts beschränkt war. Die Variationskoeffizienten der Ergebnisse von VR 1 getrennt nach Ausrichtung können für das Klima 20/65 bestimmt werden und betragen bis zu 8 %. Diese Streuung der Ergebnisse wird für die hier abgezielte Bewertung für ausreichend erachtet und die Reduktion der Probenanzahl für die übrigen Versuchsreihen somit gerechtfertigt.

Die Probenbezeichnung folgt dem Schema, das anhand der Beispielprobe VR1-W-3-5-DS erläutert wird. Hierbei steht VR1 für die Versuchsreihe VR 1, W für Wärmeleitfähigkeitsversuch, 3 für die Achse der Wellpappe, in welcher der Wärmetransport stattfindet, 5 für die laufende Probennummer und der Zusatz DS dafür, dass der Probekörper an der Ober- und der Unterseite mit metallenen Deckschichten beklebt war.

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsversuche

Table 5-1: Properties of common core materials

Probe- körper	d in mm	λ_{10} in mW / (m·K)	λ_{23} in mW / (m·K)	λ_{40} in mW / (m·K)	Klima in °C / % rF
VR1-W-1-1	39,6	55,5	59,9	70,1	20 / 65
VR1-W-1-2	39,2	55,4	58,3	67,6	20 / 65
VR1-W-1-3	40,0	56,9	58,7	66,3	20 / 65
VR1-W-1-4	33,0	54,2	55,1	58,5	trocken
VR1-W-2-1	50,7	95,5	101,1	112,7	20 / 65
VR1-W-2-2	74,6	114,4	111,9	124,7	20 / 65
VR1-W-2-3	100,8	112,5	116,9	134,1	20 / 65
VR1-W-2-4	75,0		99,7		trocken
VR1-W-3-1	81,4	104,3	110,4	124,3	20 / 65
VR1-W-3-2	82,0	111,0	117,0	126,0	20 / 65
VR1-W-3-3	82,0	109,8	112,9	126,1	20 / 65
VR1-W-3-4	34,5	93,4	95,1	101,8	20 / 65
VR1-W-3-5-DS	82,7	110,0	117,0	125,6	20 / 65
VR1-W-3-6-DS	82,8	112,1	116,8	131,4	20 / 65
VR1-W-3-7-DS	83,1	109,2	111,8	125,2	20 / 65
VR1-W-3-8-DS	35,8	94,8	96,7	105,1	20 / 65
VR1-W-3-9	36,0	88,8	91,5	96,5	trocken
VR2-W-1	40,0	51,0	51,3	61,1	20 / 65
VR2-W-2	72,3	113,5	112,7	122,9	20 / 65
VR2-W-3	79,9	111,9	117,1	124,0	20 / 65
VR3-W-1	40,0	57,0	58,5	66,3	20 / 65
VR3-W-2	75,0	112,0	111,8	126,7	20 / 65
VR3-W-3	33,3	90,7	95,1	102,0	20 / 65
VR5-W-1	96,2	61,6	75,9	73,0	20 / 65

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Achse 1 getrennt von den Achsen 2 und 3 beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeiten steigen mit der mittleren Plattentemperatur

leicht an. Die Ergebnisse werden anhand von λ_{10} erörtert, die Ergebnisse für die mittleren Plattentemperaturen von 23 °C und 40 °C sind zur Vollständigkeit mit angegeben.

5.1.1.1 Wärmeleitfähigkeit in Achse 1

Die Versuche zur Wärmeleitfähigkeit in Achse 1 lieferten die geringsten Wärmeleitfähigkeiten. Für die Schrenzplatte (VR 2) beträgt der kleinste gemessene Wert 51 mW / (m·K) für eine mittlere Plattentemperatur von 10 °C und für die dreiwellige sehr schwere Wellplatte von VR 5 beträgt λ_{10} 61,6 mW / (m·K).

Die Ergebnisse der mittelschweren Wellplatten mit BC-Wellenteilung von VR 1 und VR 3 liegen zwischen den Werten von VR 2 und VR 5.

Die Fasern der Schrenzpapiere (VR 2) sind kürzer als die der Testliner und Kraftpapiere der übrigen Versuchsreihen. Möglicherweise ist das ein Grund für die etwas geringere Wärmeleitfähigkeit. Bei der geringen Anzahl der Proben ist hier jedoch keine klare Abhängigkeit abzuleiten.

Die Untersuchung der getrockneten Wellplatte (VR1-W-1-4) führt im Vergleich zu den anderen drei Versuchen in Achse 1 von VR 1 zu einer kleinen, nicht signifikanten Verringerung der Wärmeleitfähigkeit.

5.1.1.2 Wärmeleitfähigkeit in Achse 2 und Achs 3

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten in Achse 2 und Achse 3 unterscheiden sich nicht signifikant voneinander und betragen bei einer mittleren Plattentemperatur von 10 °C zwischen 91 und 113 mW / (m·K). Die Trocknung der Proben führt auch hier nicht zu wesentliche geringeren Wärmeleitfähigkeiten.

Der Vergleich der Wellplatten untereinander zeigt, dass die Ergebnisse der hier getesteten Sorten so nah beieinander liegen, dass bei der Streuung der Ergebnisse in Verbindung mit der geringen Probenanzahl keine Aussage über die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von den Papiersorten möglichst.

Dass sich die Ergebnisse in Achse 2 nicht grundlegend von denen in Achse 3 unterscheiden, wurde nicht erwartet, da im Vorfeld angenommen wurde, dass es bei Achse 2 zu Konvektion in den Röhren, die sich durch die Form der Wellenbahnen ergeben, kommt. Es wird daher angenommen, dass keine freie Konvektion auftritt. In Abschnitt 5.1.2 wird dieser Sachverhalt analytisch untersucht.

Die Untersuchung der getrockneten Wellplatte zeigt mit 88 mW / (m·K) auch hier keine signifikanten Verringerung der Wärmeleitfähigkeit.

5.1.1.3 Vergleich zu herkömmlichen Kernmaterialien

Der Vergleich zu herkömmlichen Kernmaterialien wird im Folgenden nicht über den Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten λ sondern über den Wärmedurchgangskoeffizienten U (Abschnitt 2.1.6.1) geführt. So kann der nichtlineare Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit eines Materials und er der erforderlichen Bauteildicke zur Einhaltung einer Mindestwärmedämmung anschaulich erfasst werden.

Da der Wärmedurchgangskoeffizient U nichtlinear von der Dicke eines Sandwichelements abhängt, werden die Verläufe der U -Werte für die herkömmlichen

Materialien sowie für Wellpappe in Abbildung 5-3 in Abhängigkeit der Bauteildicke dargestellt. Für die Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der herkömmlichen Materialien wurden übliche Größen angenommen, für PUR 0,028 W/(m·K) und für Mineralwolle 0,044 W/(m·K). Im Diagramm sind zusätzlich ausgewählte obere Grenzwerte (im Diagramm als horizontale Linien dargestellt) für die U-Werte enthalten. Wellpappe in Achse 1 wird mit der Kurve für $\lambda = 0,05$ W/(m·K) repräsentiert. Für die Achsen 2 und 3 ist eine Kurve mit $\lambda = 0,09$ W/(m·K) gezeichnet. Die größten Anforderungen an die Wärmedämmung werden für Passivhäuser mit einem maximalen U-Wert von 0,16 W/(m²K) gestellt. Da die Sandwichbauweise vor allem im Industriebau etabliert ist, und hier die „Raum-Soll-Temperatur im Heizfall“ der Gebäude häufig bei 12-19°C liegt, ist der zugehörige Grenz-U-Wert mit 0,35 W/(m²K) ebenfalls in Abbildung 5-3 eingetragen. Die geringsten Anforderungen an die Wärmedämmung werden an unbeheizte Gebäude gerichtet und dienen zur Vermeidung von Tauwasser und Schimmel. Für Paneele ist dieser Wert gemäß DIN 4108-2 zu 0,57 W/(m²K) festgeschrieben.

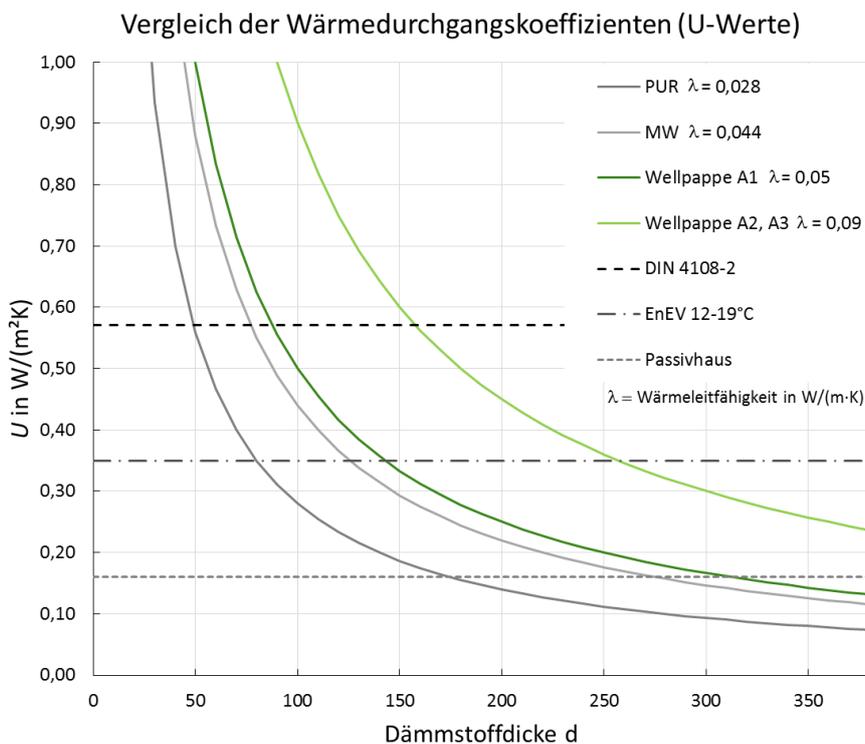


Abbildung 5-3: Wärmedurchgangskoeffizient U in Abhängigkeit der Elementdicke d für herkömmliche Kernwerkstoffe und Wellpappe in den drei Hauptachse (hier R1 bis R3 genannt) sowie ausgewählte Grenzwerte

Figure 5-3: Heat transition coefficient U over the element thickness d for common core materials and corrugated cardboard in the three main axes as well as selected threshold values

Die Darstellung in Abbildung 5-3 zeigt, dass Wellpappe in Achse 1 (A1) nur geringfügig schlechtere Wärmedämmfähigkeiten als bei Mineralwolle aufweist. Der Passivhausstandard wäre aber für Achse 1 bei erforderlicher Kerndicke von über 300 mm baupraktisch nur schwer zu realisieren. Die Grenzwerte für den hier gewählten EnEV-Grenzwert sowie der nach DIN 4108-2 wären mit der Ausrichtung, in der Achse 1 wirksam ist gut denkbar. In den Achsen 2 und 3 wären zum Erreichen des Grenzwerts für nicht beheizte Gebäude (DIN 4108-2) bereits ca. 160 mm und für schwach geheizte

Industriebauten (EnEV 12-19 °C) sogar 250 mm Kerndicke erforderlich. Während diese Dicken noch umsetzbar wären, ist der Passivhausstandard mit vertretbarem Aufwand nicht erreichbar, da die viel höheren erforderlichen Kerndicken verursachen gleichzeitig höhere Herstellkosten.

5.1.2 s Analytische Untersuchung zu Konvektionsvorgängen in Achse 2

Im Folgenden wird über eine von CATTON & EDWARDS (1967) vorgestellte Methode untersucht für welche Wellpappentypen und Elementdicken Wärmetransport über Konvektion in einem Sandwichelement vom Typ 2 auftreten kann.

Um die Berechnungen nachvollziehen zu können, werden im Folgenden zunächst die erforderlichen Grundlagen gegeben. Folgende Kennzahlen mit den zugehörigen Beschreibungen in Anlehnung an MAAS (2017) werden eingeführt:

- Rayleigh-Zahl: Ra ist das Produkt aus Grashof-Zahl und Prandtl-Zahl ($Gr \cdot Pr$)
- Grashof-Zahl: Gr stellt das Verhältnis der auf ein Fluid wirkenden Auftriebskraft zu der hemmenden Zähigkeitskraft dar. Diese Kennzahl wird für Strömungsvorgänge der freien Konvektion herangezogen.
- Prandtl-Zahl: Pr stellt das Verhältnis zweier Stoffwerte und zwar der kinematischen Zähigkeit zur Temperaturleitfähigkeit dar.
- Nußelt-Zahl: Nu beschreibt die Beziehung zwischen Wärmeübergang eines strömenden Mediums und der Wärmeleitung des ruhenden Mediums. Stationäre Wärmeleitung in eindimensionaler Form in einem Medium, in dem keine Konvektion stattfindet, führt zu $Nu = 1$.

Die Nußelt Zahl Nu nimmt den Wert 1 an, wenn die Rayleigh-Zahl Ra kleiner als der sogenannte erste kritische Wert R_1 ist:

$$0 < Ra \leq R_1 \Rightarrow Nu = 1 \quad \text{Gl. 5-1}$$

Die Rayleigh-Zahl ergibt sich nach folgender Berechnung (Catton.1967):

$$Ra = \frac{\alpha g \Delta T L^3}{\nu_L \kappa} \quad \text{Gl. 5-2}$$

mit

$\alpha = 3,67 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient von Luft für $T_0 / T_2 = 0 \text{ °C} / 20 \text{ °C}$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ Erdbeschleunigung

ΔT Temperaturdifferenz zwischen innen und außen in K

L Länge der Röhre, hier Dicke D des Sandwichelements

$\nu_L = 1,535 \cdot 10^{-5}$ kinematische Viskosität von Luft bei 2 °C

$\kappa = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ Temperaturleitfähigkeit von Luft bei 20 °C

Der kritische Wert R_1 lässt sich wie folgt ermittelt (Catton.1967):

$$R_1 = \frac{(a^2 + b_1^2)^3}{a^2} \quad \text{Gl. 5-3}$$

mit:

a und b Wellenzahlen in horizontaler und vertikaler Ebene, Anzahl der Konvektionswalzen in m^{-1}

$a = a_{leit} = 7,66(L/d)$ für perfekt leitenden Zellwände

oder

$a = a_{leit} = 7,66 \cdot 0,75 (L/d)$ für adiabate (wärmedichte) Zellwände

$b_1 = 1 \cdot \pi + 0,85 = 3,99$

d Durchmesser der Röhre

In Tabelle 5-2 sind Werte d_{grenz} , die sich nach den Gleichungen Gl. 5-1 bis Gl. 5-3 in Abhängigkeit der Elementdicke D ergeben. Die Werte wurden für die Annahme eines adiabater Zellwände ermittelt. Diese diesbezügliche Klassifizierung ist für Papier und Pappe nicht bekannt, die Annahme eines adiabaten Verhaltens führt zu kleinen Werten von d_{grenz} und ist damit konservativ. Für den Temperaturunterschied ΔT zwischen der Innen- und der Außenseite wurde mit 50 K angenommen. Damit ist die Röhrenlänge L , die hier der Elementdicke D entspricht, die einzige Variable. Steigt der Röhrendurchmesser über den Wert d_{grenz} kann sich zwischen den Deckschichten freie Konvektion einstellen.

Bei den Berechnungen nach den Gleichungen Gl. 5-1 bis Gl. 5-3 wird stark vereinfachend von einer idealen zylindrischen Röhre ausgegangen. Eine Röhre, die sich in Wellpappe ergibt, hat eine gerade Grundseite der Länge t und eine ganze Sinuswelle (Länge t , Höhe h) schließt den Röhrenquerschnitt. Als äquivalenter Durchmesser wurde d_{eq} zum 1,3-fachen des Wellenhöhe h festgelegt. Damit liegt der Flächeninhalt des Ersatzzylinders stets über dem Flächeninhalt des tatsächlichen Röhrenquerschnitts von üblichen Wellpappen gem. Tabelle 2-3, was für die Bestimmung der Wellenhöhe, für die gerade noch keine Konvektion auftritt, zu konservativen Ergebnissen führt.

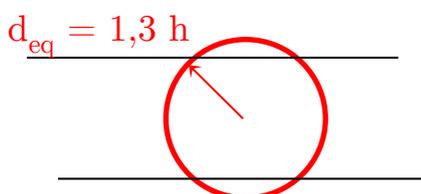


Abbildung 5-4: Äquivalenter Röhrendurchmesser für Wellpappe in Abhängigkeit der Wellenhöhe
 Figure 5-4: Equivalent cylinder diameter for corrugated cardboard in dependence of the height of the flutings

Tabelle 5-2: Grenz-Röhrendurchmesser in Abhängigkeit der Elementdicke D

Table 5-2: Threshold cylinder diameter in dependence of the element thickness D

D in mm	20	30	40	60	100	200
a in m ⁻¹	14,01	19,37	24,45	33,47	52,23	88,38
R ₁	4,87E+04	1,59E+05	3,87E+05	1,31E+06	7,57E+06	6,14E+07
Ra	4,69E+04	1,58E+05	3,75E+05	1,27E+06	5,86E+06	4,69E+07
d _{eq,grenz} in mm *	8,2	8,9	9,4	10,3	11	13
h _{grenz} in mm	6,3	6,8	7,2	7,9	8,4	10,0

*Steigt der Röhrendurchmesser über den Wert d_{grenz} kann sich zwischen den Deckschichten freie Konvektion einstellen

Die in Tabelle 5-2 bestimmten Werte für h_{grenz} liefern die maximale Wellenhöhe h einer Wellpappe für die jeweilige Bauteildicke, für die noch keine Konvektion in der Wellpappe zwischen den Deckschichten auftritt. Die Werte für h_{grenz} können selbst für die geringste Elementdicke von 20 mm selbst für die größte der marktübliche Wellenteilung A (h = 4 – 5 mm) eingehalten werden.

Diese Berechnung zeigt auch, dass bei Papierwaben, ein ebenfalls denkbares alternatives Kernmaterial für Sandwichelemente, diese Grenzdurchmesser nicht eingehalten werden und mit Konvektion zu rechnen ist.

5.2 Brandschutz

Um die Eignung von Wellpappe als neuartiges Kernmaterial für Sandwichelemente zu bewerten, muss auch das Brandverhalten eines solchen Elements untersucht werden. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden SBI-Versuche nach DIN 13823 und Kleinbrennerversuche nach DIN EN ISO 1925-2 durchgeführt.

Die Versuche wurden an Sandwichelementen vom Typ 2 (gem. Definition in Abschnitt 2.3). Vereinfachend wird im Rahmen dieses Projekts davon ausgegangen, dass sich das Brandverhalten für die einzelnen Ausrichtungen nicht maßgeblich unterscheiden.

Die Versuche wurden an einer externen Materialprüfanstalt durchgeführt, da die Forschungsstelle über kein eigenes Labor für Brandversuche verfügt.

Im Weiteren werden die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse getrennt für die SBI und die Kleinbrennerversuche beschrieben und Wellpappe auf der Grundlage der vorhandenen Daten nach DIN EN 13501-1 klassifiziert.

5.2.1 SBI-Versuche

Im Zuge des Forschungsprojekts sollten drei SBI-Versuche durchgeführt werden. Aufgrund von fehlerhaften Verklebungen an zwei Paneelen konnten jedoch nur zwei SBI-Versuche durchgeführt werden. Da die Mindestanzahl der Proben gem. DIN 13823 nicht erreicht werden konnte, wurde entschieden eine Variation zwischen den beiden Probekörpern vorzunehmen. Beim ersten Probekörper wurden die beiden Elementteile stumpf aneinander gestoßen ohne zusätzliche Fugenbleche in der Eckfuge zwischen den beiden Elementen vorzusehen. Diese Konfiguration war von Interesse, da sie als

sehr ungünstig einzuschätzen ist und die genaue Ausbildung von Fugendetails für Sandwichelemente mit Wellpappenkern bisher nicht entwickelt wurde. Der zweite Probekörper wurde mit einem Fugenblech analog zum Vorgehen bei herkömmlichen Sandwichelementen versehen. Die Probekörper wurden gemäß DIN EN 13238 Abschnitt 4.2 vorkonditioniert. Der Versuchsaufbau und die Probekörper der SBI Versuche vor dem Versuch sind in Abbildung 5-5 gegeben.



a) Probekörper SBI-1

b) Probekörper SBI-2

Abbildung 5-5: Versuchsaufbau der SBI-Versuche (Foto: MPA Braunschweig)

Figure 5-5: Test setup of the SBI-test (photos: MPA-Braunschweig)

Die Ergebnisse der SBI-Versuche sind in folgender Tabelle 5-3 zusammengestellt. In der Tabelle 5-3 sind ebenfalls die betreffenden Grenzwerte für eine Klassifizierung nach DIN EN 13501-1 enthalten.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der SBI-Versuche und Grenzwerte nach DIN EN 13501-1, von MPA Braunschweig

Table 5-3: Results of the SBI-Tests and threshold values according to DIN EN 13501-1 by MPA Braunschweig

Prüfung	Prüfgröße	Prüfergebnis		DIN EN 13501-1		
		1	2	B-s1,d0	C-s2,d0	
DIN EN 13823	FIGRA _{0,2 MJ}	[W/s]	68	9	≤ 120	--
	FIGRA _{0,4 MJ}	[W/s]	68	9	--	≤ 250
	THR _{600s}	[MJ]	9,4	1,0	≤ 7,5	≤ 15
	SMOGRA	[m ² /s ²]	16	4	≤ 30	≤ 180
	TSP _{600s}	[m ²]	80	60	≤ 50	≤ 200
	Brennendes Abtropfen:	--	nein	nein	nein	nein

Brennendes Abtropfen konnte bei keinem Versuch festgestellt werden. Die Verläufe aller Prüfgrößen der SBI-Versuche sind zusätzlich in

Anhang C – Brandversuche Abbildung A.B-1 bis Abbildung A.B-7 gegeben. Alle erfassten Brandparameter sind bei Probekörper 2 deutlich geringer als bei Probekörper 1. Die freigesetzte Wärmemenge innerhalb von 600 s beträgt bei Probe 2 nur 1 MJ während Probe 1 hier fast 10-mal so viel Wärme freisetzt. Auch die Feuerwachstumsraten sind bei Probe 1 etwa 7-mal so groß wie bei der Probe mit Fugenblech. Die Rauchentwicklungskennwerte SMOGRA und TSP sind bei Probe 1 viermal so groß bzw. 30 % größer als bei Probe 2. Es zeigt sich deutlich, dass die Applikation des Fugenblechs großen Einfluss auf das Testergebnis hat. Es wird davon ausgegangen, dass die Konfiguration ohne Fugenblech nicht repräsentativ ist, da in einem Gebäude allein aufgrund des Feuchteschutzes immer ein geeigneter Fugenschutz vorgesehen werden muss. Dennoch können die Grenzwerte von C-s2, d0 von beiden Probekörpern unterschritten werden und diese sind demzufolge beide in die Klasse B-s2, d0 einzustufen. Also als „schwer entflammbar, ohne brennendes Abtropfen“. Probekörper 1, dessen Fuge zwischen den beiden Probenflügeln mit einem Fugenblech abgedeckt wurde erreicht fast alle Forderungen für die Klasse B-s1, d0. Lediglich die innerhalb von 600 s freigesetzte Rauchmenge liegt mit 60 m² knapp über den zulässigen 50 m². Da bei 50 m² Rauchmenge von „keine Rauchentwicklung“ (gem. DIN EN 13501-1) gesprochen wird, ist die Menge von 60 m² als sehr gering zu bewerten. Probekörper 2 hat darüber hinaus mit THR =9,4 MJ den Grenzwert von B-s1, d0 für die freigesetzte Wärmemenge nicht eingehalten.

Die Klassifizierung auf Grundlage von je einem Versuch gilt nur unter der Annahmen, dass die Versuchsergebnisse der beiden Konfigurationen jeweils repräsentativ sind und bei größerer Probenanzahl keine stark abweichenden Ergebnisse zu erwarten sind.

5.2.2 Kleinbrennerversuche

Es wurden insgesamt 18 Kleinbrennerversuche durchgeführt. Hierbei wurden sechs Probekörper einer Flächenbeflammung ausgesetzt sowie je sechs Proben an einer Kante in Elementlängsrichtung und an einer Kante in Elementquerrichtung beflammen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-4 zusammengestellt.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Kleinbrennerversuche DIN EN ISO 11925-2, von MPA Braunschweig

Table 5-4: Results of the small burner tests according to DIN EN ISO 11925-2 by MPA Braunschweig

Kantenbeflammung							
Probe		1	2	3	4	5	6
Entflammen des Materials nach	[s]	1	1	1	1	1	1
Max. Höhe der Flammenspitze	[mm]	30	30	30	30	30	30
Messmarke erreicht nach	[s]	--	--	--	--	--	--
Verlöschen der Flamme nach	[s]	30	30	30	30	30	30
Dauer des Nachglimmens	[s]	--	--	--	--	--	--
Brennendes Abtropfen nach	[s]	--	--	--	--	--	--
Entzündung des Filterpapiers		nein	nein	nein	nein	nein	nein
Flächenbeflammung							
Probe		1	2	3	4	5	6
Entflammen des Materials nach	[s]	--	--	--	--	--	--
Max. Höhe der Flammenspitze	[mm]	BF*	BF*	BF*	BF*	BF*	BF*
Messmarke erreicht nach	[s]	--	--	--	--	--	--
Verlöschen der Flamme nach	[s]	30	30	30	30	30	30
Dauer des Nachglimmens	[s]	--	--	--	--	--	--
Brennendes Abtropfen nach	[s]	--	--	--	--	--	--
Entzündung des Filterpapiers		nein	nein	nein	nein	nein	nein
90° Drehung (Kantenbeflammung Kern)							
Probe		1	2	3	4	5	6
Entflammen des Materials nach	[s]	1	1	1	1	1	1
Max. Höhe der Flammenspitze	[mm]	70	60	80	100	60	60
Messmarke erreicht nach	[s]	--	--	--	--	--	--
Verlöschen der Flamme nach	[s]	30	30	30	36	30	35
Dauer des Nachglimmens	[s]	60	60	60	60	60	60
Brennendes Abtropfen nach	[s]	--	--	--	--	--	--
Entzündung des Filterpapiers		nein	nein	nein	nein	nein	nein

*BF entspricht der Brennerflamme von 20 mm

Bei allen Proben unter Flächenbeflammung verlöschen die Flammen mit dem Ende der Beflammung durch den Brenner, es kommt nicht zum Entflammen des Materials. Die Flammenhöhe übersteigt die Brennerflamme zu keiner Zeit.

Die Kantenbeflammung der längs zur Bauteillängsrichtung verlaufenden Kante der Proben führt zur Entzündung aller Proben nach einer Sekunde. Die Flammenspitzen werden mit 30 mm ca. 10 mm höher gemessen als die des Brenners. Nach dem Ende der Beflammung verlöschen die Proben und glimmen nicht nach.

Bei der Kantenbeflammung der Quer zum Bauteillängsrichtung verlaufenden kante (90° Drehung – Kantenbeflammung Kern) kommt es ebenfalls direkt nach Beginn der Beflammung zur Entflammung der Proben, wobei die die Flammenspitzen eine Höhe

von bis zu 100 mm erreichen. Die Flammen verlöschen bei zwei Probekörpern erst 5 bzw. 6 Sekunden nach dem Ende der Beflammung. Allen Proben glimmen 60 Sekunden lang nach bevor sie vollständig erlöschen.

Bei keiner der 18 Proben kam es zur Entzündung des Filterpapiers oder zu brennendem Abtropfen.

Auch bei den Kleinbrennerversuchen wurden alle Grenzwerte eingehalten, sodass sich an der Klassifizierung auf Grundlage der SBI-Versuche nichts ändert.

5.2.3 Vergleich zu herkömmlichen Kernwerkstoffen

Im Vergleich zu Mineralwolle ist Wellpappe hinsichtlich der Brandschutzeigenschaften schlechter zu bewerten, da Mineralwolle als „nicht brennbar“, Brandschutzklasse A1 klassifiziert werden können.

Bei PUR-Elementen liegen sowohl die Feuerwachstumsraten als auch die freigesetzten Rauch und Wärmemengen deutlich über den Werten, die für die Wellpappe gemessen wurden. Sie erreichen in der Regel zwar auch das Prädikat „nicht brennbar“, erreichen aber in der Regel nur die Klasse C-s3, d0.

5.3 Feuchteschutz

Grundsätzlich sorgen in einem Sandwichelement die Deckschichten zusammen mit den Fugen und zusätzlichen dichtenden Teilen (wie z.B. dauerhaft dichtenden Unterlegscheiben bei Verschraubungen) dafür, dass keine Nässe in ein Sandwichelement eindringen kann. Die Untersuchungen in diesem Abschnitt zielen auf Kondensatbildung im Kern und die Ausbreitung von Feuchtigkeit im Kern, für den Fall, dass eine nicht bedeckte Sandwichelementseite ohne zusätzlichen Feuchteschutz der Einwirkung von hoher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt ist.

5.3.1 Kondenswasser im Kern

Wird feuchte Luft, die sich in einem abgeschlossenen Volumen befindet, abgekühlt, kommt es aufgrund der Tatsache, dass die Wasseraufnahmefähigkeit von Luft mit sinkenden Temperaturen abfällt, zu Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit. Wird die Temperatur soweit abgesenkt, dass der Taupunkt des Luft-Wasser-Gemisches erreicht wird, kondensiert der Wasserdampf.

Ausfallendes Wasser in einem Sandwichelement mit Wellpappe als Kernmaterial würde zur Durchfeuchtung der Wellpappe und somit zum Verlust der Tragfähigkeit der Wellpappe führen. Infolge der Hygroskopizität und der großen Wasserabsorptionsfähigkeit von Wellpappe kommt es aber nicht zur Kondensatbildung.

Bei einer Temperatur von 30 °C kann Luft maximal 32 g Wasser je Kubikmeter aufnehmen. Unter der Annahme, dass dieses Wasser bei starker Abkühlung vollständig von der Wellpappe aufgenommen wird, entspricht dies bei einer Dichte von trockener Wellpappe von 130 kg/m³ einem Wassergehalt (nach Gl. 2-4) von nur 0,02 %. Verglichen mit einem Wassergehalt bei Normklima (20/65) von ca. 6,5 % (s. Tabelle 4-15) ist diese Erhöhung vernachlässigbar.

Um diese Überlegung experimentell zu validieren wurde ein Würfel aus Wellpappe in einem Klima von 20 °C und 65 % rF bis zu Ausgleichsfeuchte klimatisiert. Anschließend wurde der Probekörper in diffusionsdichter Polyethylenfolie verpackt und auf 10 °C abgekühlt. Die Messung mit Hilfe einer Sonde über eine Bohrung, ergab ein Ergebnis von 64,5 % rF. Dieser Wert ist unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit und der Tatsache, dass nur ein Versuch durchgeführt wurde als gleich anzusehen. Die relative Luftfeuchtigkeit erhöhte sich durch die Abkühlung nicht, obwohl die Taupunktstemperatur für ein Klima von 20 °C und 65 % rF bei 13,2 °C liegt.

Die Bildung von Kondenswasser und damit verbundene Tragfähigkeitseinbußen können in einem dicht abgeschlossenen Sandwichelement also grundsätzlich ausgeschlossen werden.

5.3.2 Entwicklung der Feuchtigkeit im Kern

Der Wassergehalt der Wellpappe ist maßgeblich für das Tragverhalten und daher muss für ein Sandwichelement mit Wellpappe mit konstruktiven Maßnahmen sichergestellt werden, dass Nässe nicht unkontrolliert in den Kern eindringen kann. Mit den zur Verfügung stehenden Lösungen für PU- und Mineralwoll-Sandwichelemente für die Ausbildung von Fugen- und Anschlusskonstruktionen kann von einer diffusionsdichten Hülle ausgegangen werden. In herkömmlichen Sandwichkonstruktionen gibt es z. B. an Gebäudeabschlüssen freie, ungeschützte Elementseiten, die von der feuchten Umgebungsluft angeströmt werden können. Da die Empfindlichkeit von Wellpappe gegenüber Feuchtigkeit größer ist als bei den herkömmlichen Materialien, soll hier untersucht werden wie schnell sich die Feuchte der umgebenden Luft in ein Element eindringt, um so bewerten zu können, ob und wann mit Tragfähigkeitseinbußen zu rechnen sind, sofern der Kern nicht an allen Elementseiten dicht abgeschlossen ist.

Die Untersuchung fand an kleinen Sandwichbauteilen, die wie in Abbildung 5-6 dargestellt vorbereitet wurden. Je ein Sandwichelement der Typen 1 und 2 (gemäß Definition in Abschnitt 2.3) mit 2 m Länge, 40 cm Breite und 40 mm Dicke wurden zusätzlich zu den Deckschichten an drei der vier Elementseiten diffusionsdichte Klebebänder angeordnet. In die obere Deckschicht wurden Bohrungen (in Abbildung 5-6 als schwarze Punkte dargestellt) für eine Messsonde mit Feuchte- und Temperatursensoren¹² angeordnet, die zwischen den Messungen ebenfalls mit diffusionsdichtem Klebeband verschlossen wurden. Die Messstellen wurden an sieben Stellen angeordnet. Die Abstände wurden von der Außenkante mit den Abständen von 100 mm, 200 mm, 400 mm, 700 mm, 1100 mm, 1500 mm und 1900 mm gewählt. Die Kernfeuchte wurde vor dem Versuch nicht homogenisiert, weshalb die Feuchte an den Messstellen zu Beginn der Messung nicht vollkommen konstant ist (s. jeweils blaue Linie – 0 d in Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8). Die in diesen Versuchen verwendete Wellpappe war vom Typ VR 3 (s. 4.1.1).

¹² Datenlogger mit Messsonde, ALMEMO® 2890-9, der Firma Ahlborn

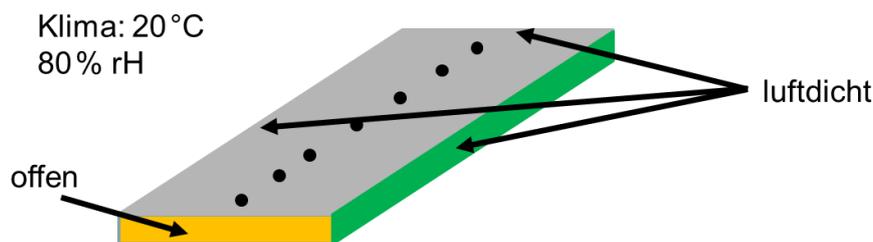


Abbildung 5-6: Versuch zur Ausbreitung von Feuchtigkeit aus Umgebungsluft in ein Sandwichelement mit einer offenen Elementseite

Figure 5-6: Test on the diffusion of moisture from the ambient atmosphere into a sandwich panel with one unprotected element side

Die Ergebnisse der Feuchtemessungen im Zeitraum von 0 bis 43 Tagen sind in Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 gegeben. Zur besseren Anschaulichkeit wurden die Messpunkte der jeweiligen Messzeitpunkte linear miteinander verbunden. Die lineare Interpolation der Messwerte stellt eine starke Vereinfachung dar, wird jedoch für die hier angestrebte qualitative Untersuchung als ausreichend genau angenommen. Die Messungen wurden bei 20 °C durchgeführt, womit die Darstellung der relativen Luftfeuchtigkeit aussagekräftig ist.

Im Abstand von 0 cm beträgt die Luftfeuchtigkeit 80 %, da dies die Elementaußenkante ist, und die Klimakammer auf eine Temperatur von 20 °C und eine relative Feuchte von 80 % rF eingestellt wurde. Die Messungen erfolgten an allen 7 Messstellen nach 4, 8, 16, 21, 28 und 43 Tagen.

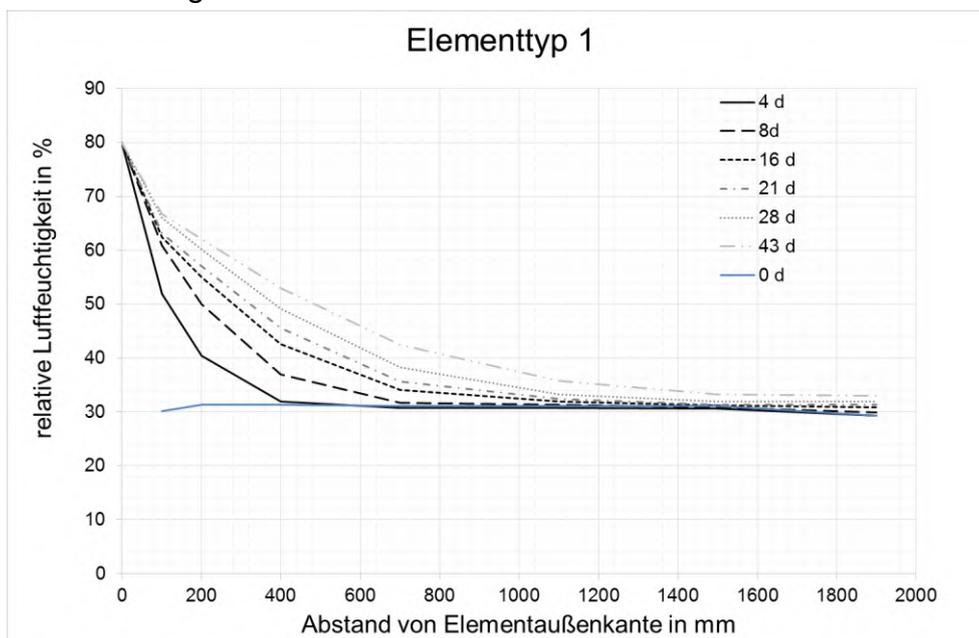


Abbildung 5-7: Messwerte der relative Luftfeuchte im Kern in Abhängigkeit des Abstands von der offenen Elementaußenkante für Elementtyp 1 im Zeitraum von 0 Tagen bis 43 Tagen

Figure 5-7: Measurements of the relative humidity in the core in dependence of the distance from the unprotected element side for an element type 1 and a timespan from 0 days to 43 days

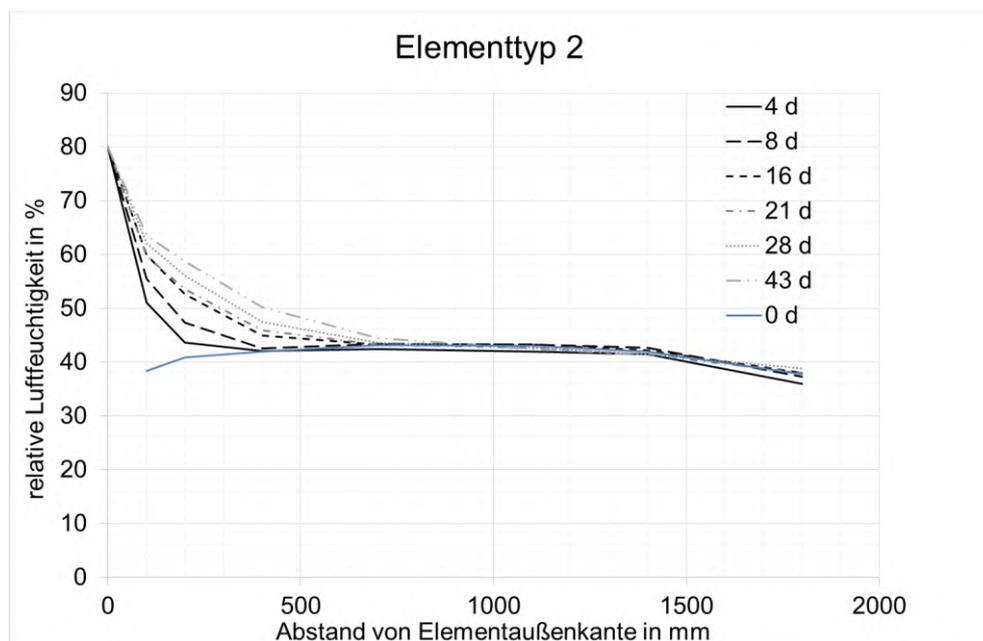


Abbildung 5-8: Messwerte der relative Luftfeuchte im Kern in Abhängigkeit des Abstands von der offenen Elementaußenkante für Elementtyp 1 im Zeitraum von 0 Tagen bis 43 Tagen

Figure 5-8: Measurements of the relative humidity in the core in dependence of the distance from the unprotected element side for an element type 2 and a timespan from 0 days to 43 days

Man sieht deutlich, dass bei beiden Elementtypen die Feuchtigkeit über die Zeit immer tiefer in das Kernmaterial eindringt. Es stellt sich ein Gefälle der Kernfeuchte von außen nach innen ein, wobei die Kurven nach innen hin abflachen und über den Verlauf der Zeit die Eindringtiefe der Feuchtigkeit zunimmt. Nach 43 Tagen hat die Kernfeuchtigkeit bei Typ 1 bereits bis zu einem Abstand von 1000 mm vom Elementrand signifikant zugenommen, während bei dem Typ 2 Element eine deutliche Erhöhung der Feuchte nur bis zu einem Abstand von 400 mm gemessen werden kann.

Die relative Luftfeuchte wächst beim Typ 1 Element im Abstand von 400 mm nach 43 Tagen von ca. 35 % auf ca. 55 % an. Gemäß Tabelle 4-15 entspricht das einer moderaten Erhöhung des Wassergehalts der Wellpappe von ca. 3,7 % auf ca. 5 % (zum Vergleich beim Klima 20/65 beträgt der Wassergehalt von VR 3 6,7 %; s. Tabelle 4-15). Eine quantitative Bewertung ist hier jedoch nicht möglich, da das Ausgangsniveau und die Umgebungsfeuchte diese Entwicklung kontrollieren. Jedoch lässt sich auf Grundlage der hier vorgestellten Untersuchung sagen, dass für den Fall einer ungeschützten Elementseite erst nach längerer Zeit mit empfindlichen Tragfähigkeitseinbußen zu rechnen ist, das die hier untersuchten Parameter als realitätsnahe bewertet werden. Es ist denkbar, dass ein Element nach der Produktion in etwa eine relative Luftfeuchtigkeit im Kern ca. 40 % bei 20 °C aufweist. Für mitteleuropäische Verhältnisse ist eine Umgebungsfeuchte von konstant 80 % bei 20 °C als sehr hoch und damit konservativ zu bewerten.

Auf der Grundlage dieser Untersuchungen konnte hingegen auch kein Hinweis darauf gefunden werden, dass das Eindringen von Feuchtigkeit in den Kern vor Erreichen der Ausgangsfeuchte endet. Da hohe feuchte Klimaregionen nicht auszuschließen sind, wird daher empfohlen freie Elementkanten konstruktiv zu verhindern. Dies ist beispielsweise durch

die Applikation von Klebebändern, Klebefolien oder Sprühfolien denkbar. Weitere Untersuchungen hierzu sind nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens.

6 Tragverhalten von Sandwichelementen mit Wellpappe als Kernmaterial

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen zum Tragverhalten von Sandwichelementen mit Wellpappe als Kernmaterial vorgestellt. Um das Verbundtragverhalten kennen zu lernen, wurden Biegeversuche an Sandwichproben durchgeführt. Einerseits wurden kleinformartige balkenförmige Probekörper und andererseits größere bis zu sechs Meter lange Bauteile untersucht. Auch hier wurden verschiedene Wellpappensorten als Kernmaterial in unterschiedlichen Ausrichtungen verwendet.

Eine Herstellung von Wellpappe-Sandwichelementen mit kontinuierlichem Kern ähnlich dem von PU-Sandwichelementen ist schwer denkbar. Es wird davon ausgegangen, dass die Herstellung von Sandwichelementen mit Wellpappenkern ähnlich der von Sandwichelementen mit Mineralwollkern mit einem Kernaufbau aus vorgefertigten Lamellen ablaufen kann. Die Einflüsse durch die zusätzliche Inhomogenität bzw. Diskontinuität des Kerns infolge eines Kerns aus Lamellen werden im Zug der Bauteilversuche untersucht.

Auf der Grundlage der Annahme, dass bestehende Fugenausbildungen von Sandwichelementen mit herkömmlichen Kernmaterialien auch für Elemente mit Wellpappenkern Verwendung finden können, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Untersuchungen zu Elementfugen durchgeführt.

6.1 Prüfprogramm

Die Pappen der bereits in Abschnitt 4.1 vorgestellten Sorten von VR 1 bis VR 4 wurden für die Herstellung von Sandwichprobekörpern verwendet. Bei der Versuchsreihe VR 1 und VR 2 wurden die Probekörper balkenförmig hergestellt. Diese Probenform lässt die Untersuchung zum Verbundtragverhalten zu und bedarf eines geringeren Materialeinsatzes. Zudem lassen sich die Einzelteile bei der manuellen Probekörperherstellung leicht handhaben.

Um den Einfluss eines Kernaufbaus aus vorgefertigten Lamellen erfassen zu können, wurden bei Versuchsreihen VR 3 und VR 4 größere Probenabmessungen gewählt und der Kern in verschiedenen Lamellenkonfigurationen aufgebaut. Überdies wurde bei VR 4 mit einer Probenlänge von 6 m eine baupraktisch relevante Bauteillänge gewählt.

In Tabelle 6-1 ist das Prüfprogramm der Biegeversuche an Sandwichproben zusammengefasst.

Tabelle 6-1: Prüfprogramm der Biegeversuche

Table 6-1: Test program of the bending tests

Versuchsreihe	Anzahl der Biegeversuche			Länge l in mm	Breite b in mm	Dicke d in mm	Verschstyp
	Typ 1	Typ 2	Typ 3				
VR 1	6	3	10	1000/1900	100	60	4-Punkt Biegev.
VR 2		5		1100	100	50	4-Punkt Biegev.

VR 3	4	4	2000	400	40	4-Punkt Biegev.
VR 4		3	6000	600	50	6-Punkt Biegev.

Bei den Lamellenanordnungen werden 4 verschiedene Typen, Typ A bis Typ D unterschieden. Die Lamellentypen sind in Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 in der Draufsicht skizziert. Die Typen A bis C wurden bei den Proben der Versuchsreihe VR 3 eingesetzt. Bei Typ A handelt es sich um eine Verteilung der Lamellen in einer Form mit höchstens zwei Lamellenstößen innerhalb eines Querschnitts. Typ B hat Lamellen, deren Länge der Elementlänge entspricht. Dieser Typ soll als Referenz dienen, um den Einfluss von Lamellenstößen bewerten zu können. Die Lamellenstöße von Typ C wurden so angeordnet, dass sowohl in der Elementmitte (Bereich mit maximalem Moment) als auch an den Elementseitenbereichen (Bereich maximaler Querkraft) jeweils in jeder zweiten Lamelle ein Stoß im gleichen Bauteilquerschnitt vorliegt. Typ D wurde bei den Proben der Versuchsreihe VR 4 bei allen Probekörpern gewählt. Diese Anordnung ist aufgrund ihrer Regelmäßigkeit leicht zu handhaben und wurde daher für die Produktion im externen Sandwichwerk gewählt. Hier ist ebenso wie bei Typ C je Stoßstelle jede zweite Lamelle eines Querschnitts unterbrochen.

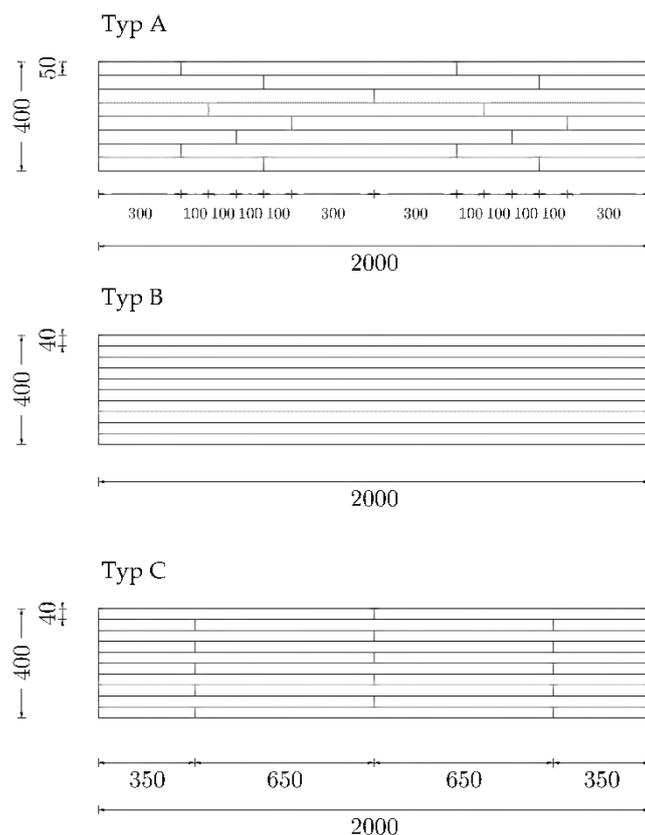


Abbildung 6-1: Lamellenanordnungen Typ A, Typ B und Typ C, Maße in mm

Figure 6-1: Order of the lamellas type A, type B and type C, measures in mm

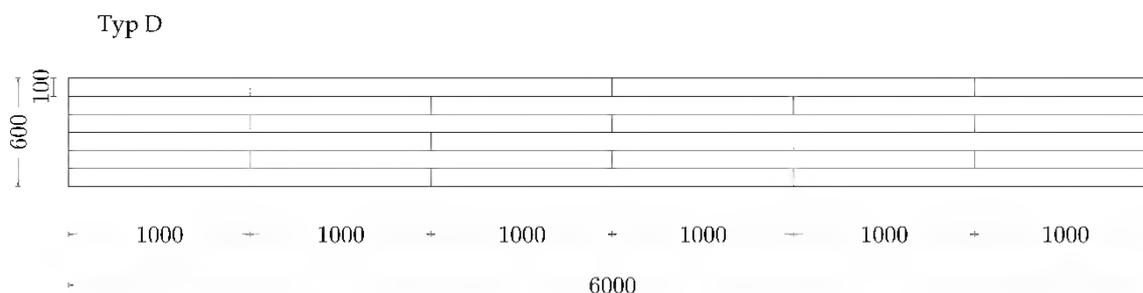


Abbildung 6-2: Lamellenanordnung Typ D, Maße in mm

Figure 6-2: Order of the lamellas type D, measures in mm

Die genauen Probenabmessungen sowie Angaben zur Versuchsanordnung der einzelnen Versuche sind in Tabelle 6-2 bis Tabelle 6-5 gegeben. Die Gesamtlänge der Probekörper l_{ges} ist stets 100 mm größer als die Stützweite zwischen den Auflagerpunkten, da die Probekörper zur besseren Lastverteilung an den Auflagerpunkten je 50 mm überstehen. Die Breite der oberen Deckschicht wird mit b_o , die der unteren Deckschicht mit b_u abgekürzt. t_o und t_u geben jeweils die Dicken der oberen und der unteren Deckschicht an, wobei Zinkschichtdicken oder die Dicken organischer Beschichtungen bereits abgezogen sind. Die Dicke des gesamten Sandwichelements von Außenkante zu Außenkante wird mit d bezeichnet. Mit l_1 und l_2 werden die Längen zwischen den Lastangriffspunkten untereinander und zu den Auflagerpunkten bezeichnet (s. Abbildung 6-5). Die Elastizitätsgrenzen f_y der eingesetzten Deckbleche werden ebenfalls angegeben und wurden gemäß DIN EN ISO 6892 durchgeführt.

Die Probenbezeichnung folgt dem Schema, das anhand der Beispielprobe VR1-T1-1 erläutert wird. VR1 für die Versuchsreihe VR 1, T1 für eine Sandwichprobe vom Elementtyp Typ 1 gemäß Definition in Abbildung 2-23 in Abschnitt 2.3 und 1 für die Probennummer.

Tabelle 6-2: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 1, 4-Punkt-Biegung

Table 6-2: Test program and specimen dimensions of test series VR 1, 4-point-bending

Probe	l_{ges}	b_o	b_u	t_o	t_u	d	l_1	l_2	f_y
VR1-T1-1	650	100,0	100,0	0,49	0,49	60,3	350	200	229
VR1-T1-2	650	100,8	100,8	0,49	0,49	60,2	350	200	229
VR1-T1-3	650	100,5	100,5	0,49	0,49	60,5	350	200	229
VR1-T1-4	1200	124,5	124,5	0,50	0,50	39,6	700	400	231
VR1-T1-5	1200	124,5	124,5	0,50	0,50	39,6	700	400	231
VR1-T1-6	1200	124,5	124,5	0,50	0,50	39,6	700	400	231
VR1-T2-1	650	102,1	102,1	0,49	0,49	61,7	350	200	229
VR1-T2-2	650	102,2	102,2	0,49	0,49	62,8	350	200	229
VR1-T2-3	650	97,8	97,8	0,49	0,49	61,5	350	200	229
VR1-T3-1	650	98,5	98,5	0,49	0,49	60,8	350	200	231
VR1-T3-2	650	98,5	98,5	0,49	0,49	60,6	350	200	231
VR1-T3-3	650	98,5	98,5	0,49	0,49	61,2	350	200	231
VR1-T3-4	650	98,6	98,6	1,01	1,01	61,9	350	200	207
VR1-T3-5	650	98,5	98,5	1,01	1,01	62,7	350	200	207
VR1-T3-6	650	98,6	98,6	1,02	1,02	62,1	350	200	207
VR1-T3-7	650	98,8	98,8	0,39	0,39	61,8	350	200	488
VR1-T3-8	650	98,5	98,5	0,39	0,39	60,5	350	200	488
VR1-T3-9	650	99,1	99,1	0,39	0,39	61,9	350	200	488
VR1-T3-10	650	98,3	98,3	0,39	0,39	61,8	350	200	488

Bezeichnungen der Längen gem. Abbildung 6-5 a)

Alle Längen in mm, Steckgrenze der Deckschichten f_y in N/mm²

Klimatisierung aller Probekörper auf 20 °C und 65 % rF

Tabelle 6-3: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 2, 4-Punkt-Biegung

Table 6-3: Test program and specimen dimensions of test series VR 2, 4-point-bending

Probe	l_{ges}	b_o	b_u	t_o	t_u	d	l_1	l_2	f_y
VR2-T2-1	1098	99,7	99,4	0,48	0,48	50,4	400	200	225
VR2-T2-2	1099	99,9	100,1	0,48	0,48	50,5	400	200	225
VR2-T2-3	1098	99,5	100,1	0,48	0,48	48,7	400	200	225
VR2-T2-4	1098	99,9	100,0	0,48	0,48	48,8	400	200	225
VR2-T2-5	1096	99,8	99,9	0,48	0,48	48,7	400	200	225

Bezeichnungen der Längen gem. Abbildung 6-5 a)

Alle Längen in mm, Steckgrenze der Deckschichten f_y in N/mm²

Klimatisierung aller Probekörper auf 20 °C und 65 % rF

Tabelle 6-4: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 3, 4-Punkt-Biegung

Table 6-4: Test program and specimen dimensions of test series VR 3, 4-point-bending

Probe	l_{ges}	b_o	b_u	t_o	t_u	d	l_1	l_2	f_y	Lamellen		Klima
										b_{La}	Typ	T / rF
VR3-T1-1	2000	404,9	404,9	0,51	0,51	39,1	633	633	208	50	Typ A	20,5 / 45
VR3-T1-2	2000	398,2	399,0	0,51	0,51	39,0	633	633	208	50	Typ A	20,8 / 43
VR3-T1-3	2000	406,1	406,1	0,50	0,50	39,3	633	633	206	50	Typ A	20,6 / 44
VR3-T1-4	2000	387,4	387,0	0,51	0,51	39,9	633	633	206	50	Typ A	20,6 / 44
VR3-T2-1	2000	377,4	377,6	0,50	0,50	41,8	617	666	201	40	Typ B	20,2 / 47
VR3-T2-2	2000	376,9	375,8	0,51	0,51	41,8	633	633	206	40	Typ B	20,1 / 46
VR3-T2-3	2000	383,7	382,7	0,50	0,50	41,5	617	666	153	40	Typ C	20,2 / 44
VR3-T2-4	2000	378,9	378,9	0,51	0,51	42,1	633	633	208	40	Typ C	20,1 / 44

Bezeichnungen der Längen gem. Abbildung 6-5 a)

Alle Längen in mm, Steckgrenze der Deckschichten f_y in N/mm²

Tabelle 6-5: Versuchsprogramm und Probengeometrie der Versuchsreihe VR 4, 6-Punkt-Biegung

Table 6-5: Test program and specimen dimensions of test series VR 4, 6-point-bending

Probe	l_{ges}	b_o	b_u	t_o	t_u	d	l_1	l_2	$f_{y,o}$	$f_{y,o}$	Klima	
											T / rF	
VR4-T2-1	5900	585,6	585,3	0,67	0,67	52,1	738	1475	357	393	20,5 / 45	
VR4-T2-2	5900	584,5	584,7	0,67	0,67	52,0	738	1475	376	373	20,8 / 43	
VR4-T2-3	5900	587,0	587,1	0,67	0,67	52,1	738	1475	366	373	20,6 / 44	

Bezeichnungen der Längen gem. Abbildung 6-5 b)

Lamellenbreite $b_{La} = 100$ mm, Lamellenanordnung Typ D

6.2 Versuchsvorbereitungen

Die Herstellung des Kernmaterials unterscheidet sich für die Verbundprobekörper nicht von denen zur Untersuchung der Materialeigenschaften. Diese ist in Abschnitt 4.2.1 beschrieben.

Für den Zuschnitt der Lamellen ist eine sehr große Genauigkeit (ca. $\pm 0,5$ mm) gefordert, um im späteren eine gleichmäßige Verklebung mit den Deckschichten erzielen zu können. Bei den Elementen vom Typ 2 ist die Genauigkeit des Zuschnitts besonders wichtig, da die Breite der abgeschnittenen Lamellen der späteren Kerndicke entspricht. Die Verwendung einer Formatkreissäge hat sich hier bewährt, da hier der Volumenkörper aus Pappe fest auf einem Schiebetisch liegend am Sägeblatt vorbeigeführt wird, und die Schnittbreite sehr genau eingestellt und entlang des gesamten Schnittes gehalten werden kann. Hinsichtlich der Genauigkeit eignen sich Plattensägen ebenso, jedoch ist bei den verbreiteten Modellen die Schnitttiefe auf 40 bis 50 mm begrenzt. Hierdurch wird gleichzeitig je nach avisierte Kernausrichtung die Lamellenbreite oder die Kerndicke auf dieses Maß begrenzt.

Nach dem Zuschnitt der Deckschichten mittels einer motorisch betriebenen Tafel-Blechscher wurden diese mit Lösemitteln (Aceton) gereinigt, um die Adhäsion des Klebstoffs zu ermöglichen.

Die Herstellung der Proben der Versuchsreihen VR 1 und VR 2 erfolgte durch Verklebung von vorbereiteten zusammenhängenden Volumenkörpern aus Wellpappe

mit metallischen Deckschichten. Bei den Proben der Versuchsreihen VR 3 und VR 4 wurden die Elementkerne aus einer Vielzahl von vorgefertigten Lamellen hergestellt. Ähnlich zum Kernaufbau von Sandwichelementen mit Mineralwollkern wurden die Lamellen untereinander nicht verklebt. Weder an den Stirnseiten noch an den längsseitigen Kontaktflächen der Lamellen. In Abbildung 6-3 ist ein Foto der Lamellen einer Probe der Versuchsreihe VR 3 vor der Verklebung mit der oberen Deckschicht gegeben. Die einzelnen Lamellen heben sich aufgrund unterschiedlicher Lichtreflexionseigenschaften teilweise stark voneinander ab.



Abbildung 6-3: Probenherstellung: Vorgefertigte Wellpappenlamellen auf unterem Deckblech (Hier Elementtyp 2)

Figure 6-3: Specimen manufacturing: prefabricated lamellas of corrugated cardboard on the bottom face sheet (here element type 2)

Die Proben der Versuchsreihen VR 1 bis VR 3 wurden manuell gefertigt. Der Klebstoff wurde raupenförmig auf Blechen, die zuvor auf die erforderlichen Maße mittels einer elektromotorisch betriebenen Schlagschere zugeschnitten wurden, aufgegeben und anschließend mit Lackrollen gleichmäßig verteilt. Für den Klebstoff wurden in Vorversuchen verschiedene Klebstoffe getestet. Klebstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, die in der Lage sind, die metallenen Deckschichten sicher zu verkleben, konnten nicht gefunden werden. Es wurden daher Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe verwendet. Diese haben neben ihrer leichten Handhabbarkeit den Vorteil, dass sie leicht aufschäumen und so Ungenauigkeiten in der Oberfläche der Pappen ausgleichen. Es wurden Klebstoffmenge von 200 g/m^2 bis 250 g/m^2 und Wasser von ca. 20 g/m^2 auf die Bleche aufgebracht. Um die Qualität der Verklebung und die Ebenheit der Elemente sicher zu stellen, wurden die Elemente nach dem Zusammenfügen während der Härtezeit mit Stahlblechen einer Dicke von 30 mm belegt.

Versuchsreihe 4 wurde nicht manuell sondern automatisiert von einer Firma, die Sandwichelementen mit Mineralwolle und Aluminiumwaben als Kernmaterialien in kontinuierlichen und nicht kontinuierlichen Verfahren produziert, hergestellt. Die Produktion der Probekörper erfolgte aufgrund der kleinen Stückzahl auf einer diskontinuierlichen Produktionslinie. Zunächst wurde auf die untere Deckschicht ein

Zweikomponenten PU-Klebstoff (280 g/m²) mit Hilfe eines Roboterarms über eine Flächenauftragsdüse appliziert. Anschließend wurden die vorgefertigten Lamellen nach einem bestimmten Schema in auf das untere Deckblech aufgelegt. Es folgte die Klebstoffapplikation auf dem oberen Deckblech und das Zusammenfügen der Elementteile mit Hilfe von Vakuumgreifern. Anschließend wurden die Elemente während des Härtens des Klebstoffs in eine hydraulische Presse gegeben. Die Platten der Presse wurden auf ca. 60 °C erwärmt. Der Produzent konnte den Pressdruck leider nicht angeben, da eine definierte Bauteildicke angefahren wird und der Pressdruck nicht ausgewertet werden kann.

Eine weitere Besonderheit bei der Herstellung der Proben von Versuchsreihe VR 4 ist, dass die Deckschichten an den Elementkanten umlaufend so kaltverformt sind, dass der Kern vollständig gegen äußere Einflüsse geschützt ist. Hintergrund dieser Umkantung ist, dass die auf der verwendeten Produktionslinie hergestellten Paneele als Vorhang-Fassadenelemente eingesetzt werden und daher von herkömmlichen Sandwichelementen verschiedene Anschluss und Fugengeometrien aufweisen. Für den Transport bietet die Umkantung zusätzlichen Schutz der Elemente. Vor den Versuchen wurden die Elemente jedoch umlaufend unter Verwendung einer Paneelsäge besäumt (s. Abbildung 6-4), da eine Umkantung am Elementrand eine Versteifung darstellt, die zu einer Veränderung des Tragverhaltens führt. Da hier ausschließlich das Verbundtragverhalten im Vordergrund der Untersuchungen steht, und um die Vergleichbarkeit zu den anderen Versuchen sicher zu stellen, wurde die Umkantung entfernt.

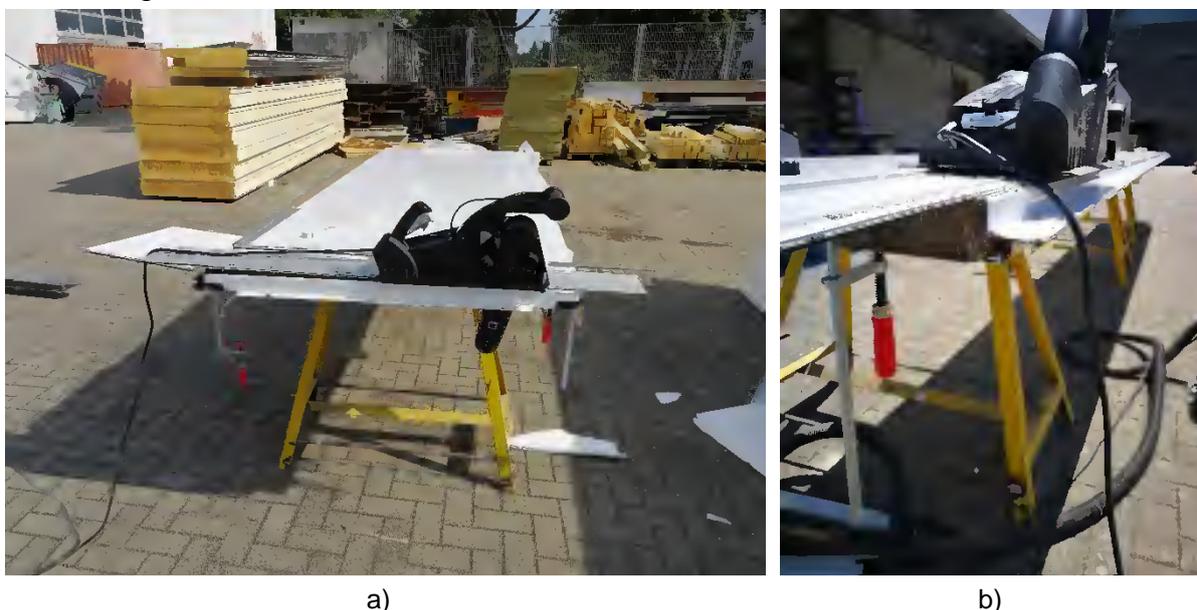


Abbildung 6-4: Zuschnitt der Proben von Versuchsreihe VR 4 mit Hilfe einer Paneelsäge, a) Stirnseite, b) Längsseite (Umkantung der Deckbleche erkennbar)

Figure 6-4: Cutting of the specimens of test series VR 4 with a panel saw, front side (a) and longitudinal side (b)

Die balkenförmigen Probekörper wurden ebenso wie die Kleinproben zur Bestimmung der Materialeigenschaften vor der Versuchsdurchführung bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte klimatisiert. Bei den großformatigen Probekörpern der

Versuchsreihen VR 3 und VR 4 wurden die Feuchtegehalte der Proben kurz nach den Versuchen lediglich gemessen. Geringe Unterschiede in der Kernfeuchte gleichen sich innerhalb der Elemente zwar schnell aus, jedoch dauert die Veränderung der vorhandene Kernfeuchte auf eine stark davon abweichende Feuchte sehr lange, da die Elementober- und Elementunterseiten durch die Deckbleche diffusionsdicht verschlossen sind und ein Austausch von Feuchtigkeit nur über die vergleichsweise schmalen Seitenflächen stattfinden kann. In Abschnitt 5.3.2 ist eine Studie hierzu beschrieben. Eine Klimatisierung des Kernmaterials vor dem Verkleben ist zwar möglich, jedoch wird die Kernfeuchte durch den Klebstoff und das zusätzlich zum Klebstoff applizierte Wasser, das zur Aushärtung des verwendeten Klebstoffs erforderlich ist, verändert.

6.3 Versuchsaufbauten und Versuchsdurchführung

Die Sandwichproben wurden als 4-Punkt oder 6-Punkt Biegeversuche getestet. Die statischen Systeme und die resultierenden Schnittgrößen sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Um ein Biegeversagen der Probekörper zu begünstigen, wurde der Abstand zwischen den Lasteinleitungspunkten bei den 4-Punkt-Biegeversuchen teilweise stark reduziert. Bei gleicher Belastung und damit bei gleicher Querkraft, erhöht sich so das einwirkende Moment, wodurch ein Biegeversagen in Form von Knittern oder Fließen der Deckschichten gegenüber einem Schubversagen oder einer lokalen Eindrückung an der Lasteinleitung begünstigt wird. Bei den 6-Punkt-Biegeversuchen wurden der Versuchsaufbau gemäß DIN EN 14509 gewählt. Die Lasteinleitungen haben gleiche Abstände von je einem Viertel der Stützweite und von den äußeren Lastangriffspunkten zu den Auflagern ergibt sich je ein Achtel der Stützweite.

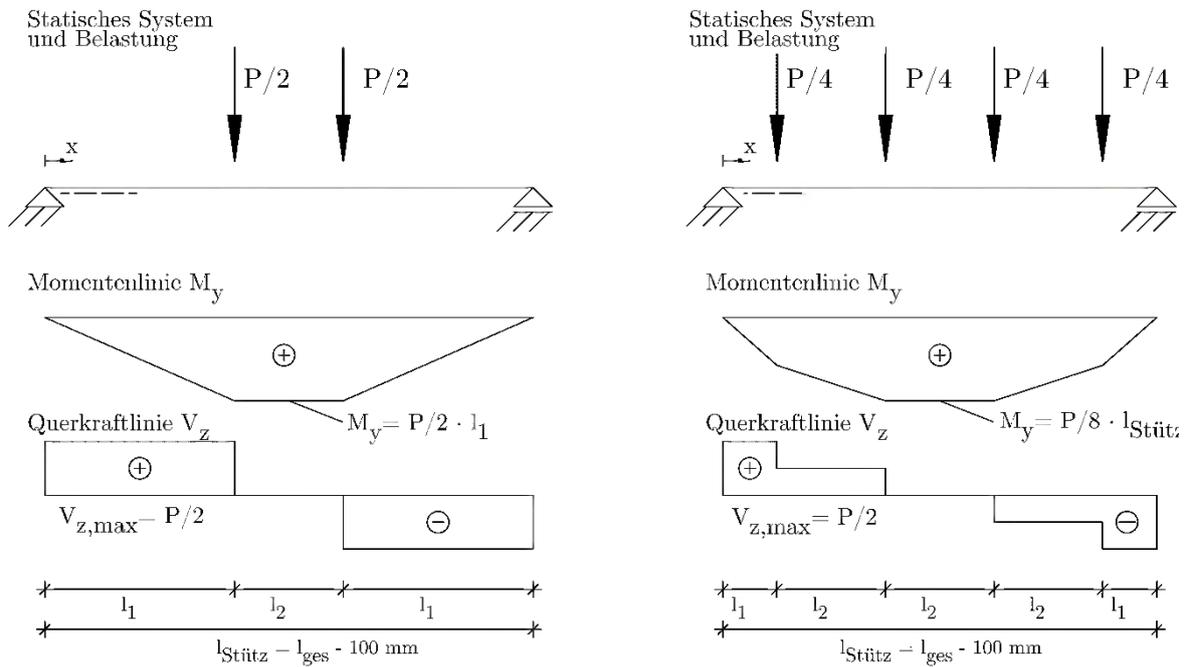


Abbildung 6-5: Statische Systeme und Schnittgrößen der Biegeversuche, 4-Punkt-Biegung links, 6-Punkt-Biegung rechts

Figure 6-5: Static system and internal forces of the bending test, 4-point-bending left, 6-point-bending right

Bilder der Aufbauten für die Biegeversuche sind in Abbildung 6-6 bis Abbildung 6-8 gegeben.



a)

b)

Abbildung 6-6: Versuchsaufbauten der Biegeversuche von VR 1 (a,b) und VR 2 (a)

Figure 6-6: Test setup of the bending test of VR 1 (a, b) and VR 2 (a)



Abbildung 6-7: Versuchsaufbauten der Biegeversuche von VR 3 (a) und VR 4 (b)

Figure 6-7: Test setup of the bending test of VR 3 (a) and VR 4 (b)



Abbildung 6-8: Versuchsaufbauten der Biegeversuche von VR 3 (a) und VR 4 (b)

Figure 6-8: Test setup of the bending test of VR 3 (a) and VR 4 (b)

Die Versuche an den schmalen Proben ($b < 150$ mm) der Versuchsreihen VR 1 und VR 2 konnten in Universalprüfmaschinen mit Kapazitäten von 50 t (s. Abbildung 6-6 a)) und 100 t (s. Abbildung 6-6 b)) durchgeführt. Die Bauteilversuche der Versuchsreihen VR 3 und VR 4 wurden in Bauteilprüfständen mit hängenden Druckzylindern getestet (s. Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8). Die Zylinderkraft wurde jeweils über Traversen in gleich große Lasten aufgeteilt. Für die 6-Punkt-Biegeversuche kam hierfür eine zweistufige Traversenkonstruktion (s. Abbildung 6-8) erforderlich. Die Lasten wurden jeweils über 100 mm breite und 10 mm dicke Stahlplatten oder Lastenleitungsträger

(Walzprofil HEB 100 bzw. Quadratrohr 100x4) mit aufgeklebten 10 mm dicken Elastomeren über die gesamte Probenbreite verteilt, um lokales Versagen der Proben zu vermeiden. An den Auflagerpunkten wurden ebenfalls Lastverteilplatten angeordnet und über Rollenlager gelenkige Lagerungen der Proben gewährleistet.

Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt, wobei die Prüfgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Probengeometrie und Steifigkeit zu Werten zwischen 2 mm/min und 10 mm/min so gewählt wurde, dass die Versuchsdauer bis zum Versagen zwischen 1 und 5 Minuten betrug (in Anlehnung an DIN EN 14509).

Die Kraftreaktion wurde mit Kraftmessdosen^{13, 14} gemessen, die oberhalb der Lasteinleitung in den Kraftweg eingefügt wurden.

Die Durchbiegung der Probekörper wurde mit zwei Wegaufnehmern in Feldmitte aufgenommen. Es kamen Seilzugwegaufnehmer und optische Wegaufnehmer zum Einsatz. Zusätzlich wurden bei den Bauteilversuchen der Versuchsreihen VR 3 und VR 4 die Dehnung ε_x an der unteren Deckschicht in Feldmitte mit Hilfe von linearen Dehnungsmessstreifen (DMS) bestimmt.

Die Messraten wurden zu 5 Hz gewählt. Damit ist bei den quasi-statischen Versuchen eine ausreichende Auflösung der Messdaten gewährleistet. Die analogen Messdaten wurden mit dem Messverstärkersystem¹⁵ verstärkt und digitalisiert und über die Messsoftware¹⁶ aufgezeichnet.

Kerntemperatur und -feuchte wurden bei den Proben der Versuchsreihen VR 3 und VR 4 im Anschluss an die Biegeversuche mit Hilfe einer Messsonde mit Feuchte- und Temperatursensoren¹⁷, die in nach der Versuchsdurchführung eingebrachte Bohrungen in die Elemente eingeführt wurde, bestimmt.

Im Anschluss an die Biegeversuche wurden Stahlzugproben aus den Deckschichten der Probekörper entnommen und nach DIN EN ISO 6892 und DIN 50125 mit der Probenform G in einer Universalprüfmaschine getestet. Für die Proben der Versuchsreihen VR 1 bis VR 3 wurden die beiden Deckschichten der jeweiligen Proben immer einer Blechtafel entnommen und haben daher die gleichen Materialeigenschaften. Bei VR 4 wurden die Streckgrenzen getrennt für oberes und unteres Blech ermittelt, da die Proben nicht selbst hergestellt wurden und nicht sichergestellt war, dass die Bleche eines Probekörpers aus einer Charge stammen. Die so bestimmten Elastizitätsgrenzen f_y der Deckschichten der Probekörper sind gemittelt in Tabelle 6-2 bis Tabelle 6-5 für jeden einzelnen Probekörper mit aufgeführt.

¹³Kraftmessdose der Firma HBM, Typ: 1-U2B/10kN bei Versuchen in den Universalprüfmaschinen

¹⁴ Kraftmessdose der Firma GMK, Serie K mit einer Kapazität von 150 kN bei den Versuchen in den Bauteilprüfständen

¹⁵ Spider8-Messmodul bzw. mit QuantumX Messdatenerfassungssystem der Firma HBM

¹⁶ CatmanEasy, Version 3.4, der Firma HBM

¹⁷ Datenlogger mit Messsonde, ALMEMO® 2890-9, der Firma Ahlborn

6.4 Berechnung der Spannungen und Verformungen

Aus den einwirkenden Kräften können unter den in Abschnitt 2.1.1 genannten vereinfachten Annahmen und den nachfolgend vorgestellten Berechnungsformeln, die Schnittgrößen, Verformungen und Spannungen nach der Sandwichtheorie bestimmt werden.

Die gewählten Versuchsaufbauten der Biegeversuche sind statisch bestimmt. Die Schnittgrößenverläufe sind bereits in Abbildung 6-5 gegeben. Die Längsspannung in den Deckblechen infolge eines positiven Biegemoments M_y werden nach Gl. 6-2 und Gl. 6-3 bestimmt. Da bei den vorliegenden Versuchen die Proben stets mit jeweils gleichen Querschnittsabmessungen des oberen und des unteren Deckblechs hergestellt wurden, unterschieden sich die Spannungen $\sigma_{x,o}$ und $\sigma_{x,u}$ nur marginal. Im Rahmen der Ergebnisdarstellung wird daher nur die Spannung im oberen gedrückten Deckblech ausgegeben und mit σ_x bezeichnet.

$$Z = -D = \frac{M_y}{e} \quad \text{Gl. 6-1}$$

$$\sigma_{x,u} = \frac{Z}{A_{F,u}} \quad \text{Gl. 6-2}$$

$$\sigma_{x,o} = \frac{Z}{A_{F,o}} \quad \text{Gl. 6-3}$$

mit:

- M_y einwirkendes Biegemoment um die Y-Achse
- e innerer Hebelarm, Abstand zwischen den Schwerachsen der Deckschichten
- A_F Querschnittsfläche eines Deckblechs

Der Vergleich der so ermittelten Spannungen mit den zurückgerechneten Spannungen aus den DMS ermöglichen eine Aussage über die Anwendbarkeit der stark vereinfachten "klassischen Sandwichtheorie".

Die Schubspannungen τ_{xz} werden in der angewendeten Sandwichtheorie über die gesamte Kernhöhe konstant angenommen und nach Gl. 6-4 berechnet. Den Deckschichten werden keine Schubspannungen zugeordnet.

$$\tau_{xz} = \frac{V_z}{d_c \cdot b_c} \quad \text{Gl. 6-4}$$

mit:

- V_z Auf das Sandwichelement einwirkende Querkraft
- d_c Dicke des Kernmaterials
- b_c Breite des Sandwichelements

Die an der Lasteinleitung und am Auflager einwirkende Druckspannung auf das Kernmaterial σ_{cc} wird mit Gl. 6-5 bestimmt, wobei vereinfacht angenommen wird, dass die Druckspannungen über die Fläche der Lastverteilplatten konstant sind.

$$\sigma_{Cc} = \frac{\Delta V_z}{A_{Last}} \quad \text{Gl. 6-5}$$

mit:

ΔV_z Querkraftänderung an der Stelle der Einwirkung

A_{Last} Fläche der Lastverteilplatte

Die Verformungen setzen sich im Allgemeinen aus einem Biegeverformungsanteil infolge von Dehnung der Deckschichten und aus einem Schubverformungsanteil infolge von Schubverzerrungen des Kerns zusammen (s. Gl. 6-6). Die beiden Anteile ergeben sich für den 4-Punkt-Biegeversuch nach Gl. 6-7 und Gl. 6-8 und für den 6-Punkt-Biegeversuch nach Gl. 6-9 und Gl. 6-10.

$$w_z = w_{z,B} + w_{z,V} \quad \text{Gl. 6-6}$$

Durchbiegungsanteile in Feldmitte unter 4-Punkt-Biegung:

$$w_{z,B} = \frac{P l_1}{48 B_S} (3 l_S^2 - 4 l_1^2) \quad \text{Gl. 6-7}$$

$$w_{z,V} = \frac{P l_1}{G_C A_{Cz,B}} \quad \text{Gl. 6-8}$$

mit:

$$B_S = \frac{E_{F,o} \cdot A_{F,o} \cdot E_{F,u} \cdot A_{F,u}}{E_{F,o} \cdot A_{F,o} + E_{F,u} \cdot A_{F,u}} e^2$$

l_S Stützweite

l_1 Länge gem. Abbildung 6-5

Durchbiegung in Feldmitte unter 6-Punkt-Biegung für den Versuchsaufbau gem. DIN EN 14509 mit $l_1 = l_S / 8$ und $l_1 = l_S / 4$:

$$w_{z,B} = \frac{P l_1^3}{74,98 B_S} \quad \text{Gl. 6-9}$$

$$w_{z,V} = \frac{P l_1}{8 G_C A_{Cz,B}} \quad \text{Gl. 6-10}$$

6.5 Versuchsergebnisse und Versuchsauswertung

Bei der Darstellung der Ergebnisse der Versuche an Sandwichprobekörpern stehen das Last-Verformungsverhalten, die Deckblechspannungen und das Versagenskriterium der jeweiligen Versuche im Fokus. Grundsätzlich wird nach den Elementtypen entsprechend der Definition in Abschnitt 2.3 unterschieden. Zunächst werden in den Abschnitten 6.5.1 bis 6.5.3 die Ergebnisse tabellarisch und graphisch dargestellt und erläutert.

In den Ergebnistabellen werden die folgenden Buchstaben zur Kennzeichnung der Versagensarten verwendet:

- a) Knittern
- b) Fließen
- c) Druckversagen an der Lasteinleitung
- d) Druckversagen am Auflager
- e) Scherversagen der Klebefugen zwischen den Pappen
- f) Delamination

Neben den gemessenen Werten der aufgetragenen Maximallast und der zugehörigen Durchbiegung werden weitere Kennzahlen ausgegeben. Da verschiedene Versuchsaufbauten und unterschiedliche Probekörpergeometrien untersucht wurden, ist es erforderlich die gemessenen Größen auf Kennzahlen umzurechnen, die diese Unterschiede berücksichtigen und somit eine Vergleichbarkeit der Versuche erlauben. Eine der wichtigsten Kennzahlen ist die maximale Deckblechspannung. Diese wird gemäß Gl. 6-2 und Gl. 6-3 mit den Schnittgrößen nach Abbildung 6-5 bestimmt. Bei einigen Versuchen wurden die Deckblechspannungen über Dehnmessstreifen auf den unteren Deckblechen gemessen.

Die einheitenlose Größe $\sigma_{x,max} / f_y$ gibt direkten Aufschluss über die Ausnutzung der elastischen Querschnittstragfähigkeit im jeweiligen Versuch.

Um die Versuche vor allem in der graphischen Darstellung besser vergleichen zu können, werden die Verformungen auch auf eine berechnete Durchbiegung bezogen, die alle probenspezifischen Eigenschaften erfasst. Für diese Bezugsgröße wird die Durchbiegung $w_{z,P_y,SWT}$ gewählt, bei der die Proben gemäß Sandwichtheorie (SWT) ihre Elastizitätsgrenze erreichen. Die zugehörige Einwirkung ist die rechnerisch bestimmte Kraft P_y , die Fließen der Deckschichten erzeugt.

6.5.1 Tragverhalten der Kernanordnung Typ 1

In Tabelle 6-6 sind die Ergebnisse der Biegeversuche von Elementtyp 1 zusammengefasst. In Abbildung 6-9 a) und b) sind die Verläufe der auf die Fließspannung bezogenen Deckblechspannungen in Abhängigkeit die bezogenen Durchbiegungen (s. Abschnitt 6.4) für die Biegeproben vom Typ 1 gegeben.

In Abbildung A.D-1 a) und b) in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Verläufe der Hydraulikzylinderkraft P in Abhängigkeit der Durchbiegung in Feldmitte w_z dargestellt. Diese sollen aber vornehmlich zur Vollständigkeit gegeben sein. Die Beschreibung und Interpretation der Versuchsergebnisse erfolgt fast ausschließlich an den Diagrammen mit bezogenen Größen.

Die Versagenslasten P_{max} und die zugehörigen Durchbiegungen in Feldmitte $w_{z,Pmax}$ bei Betrachtung aller Werte sehr stark (s. Tabelle 6-6), was in erste Linie auf drei unterschiedlichen Versuchsaufbauten und Probenabmessungen (s. Tabelle 6-2) zurückzuführen ist. Die größte Spannung im gedrückten Deckblech wurde zu 170 N/mm^2 bestimmt. Alle Versuche versagen vor dem Erreichen der elastischen Querschnittstragfähigkeit. In den meisten Fällen ist ein Knittern der gedrückten Deckschicht für das Versagen vor dem Fließbeginn verantwortlich. Die Betrachtung der Probengruppen mit gleichem Versuchsaufbau erfolgt im Weiteren separat.

Tabelle 6-6: Ergebnisse der Biegeversuche: Elementtyp 1

Table 6-6: Bending test results: Element type 1

Probe	P_{\max} in N	$w_{z,P_{\max}}$ in mm	$\sigma_{x,\max}$ in N/mm ²	$\frac{\sigma_{x,\max}}{f_y}$	$\frac{w_{z,P_{\max}}}{w_{z,P_y,SWT}}$	Versagensart
VR1-T1-1	2156	4,4	129	0,56	0,65	c)
VR1-T1-2	2397	5,0	142	0,62	0,73	e)
VR1-T1-3	2378	4,3	141	0,62	0,64	c)
VR1-T1-4	1192	19,3	170	0,74	0,87	a)
VR1-T1-5	1081	15,0	154	0,67	0,67	a)
VR1-T1-6	1122	15,8	160	0,69	0,71	a)
VR3-T1-1	3274	19,1	134	0,64	0,78	a)
VR3-T1-2	3116	17,2	124	0,60	0,70	a)
VR3-T1-3	3687	22,0	147	0,71	0,92	a)
VR3-T1-4	3298	19,1	135	0,66	0,81	a)

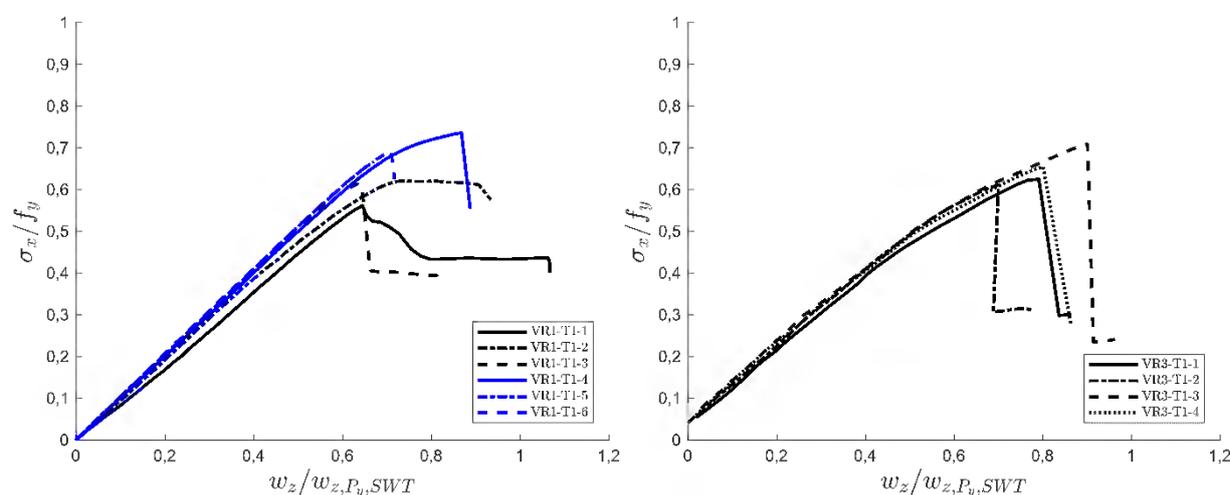


Abbildung 6-9: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 1

Figure 6-9: Diagrams of the bending test of type 1

6.5.1.1 VR1-T1

Die Proben des Typs 1 der Versuchsreihe 1 sind balkenförmige Probekörper, wobei bei einem Teil der Proben die Stützweite vergrößert wurde, um Biegeversagen zu provozieren. Im Folgenden werden die beiden Probentypen gleicher Soll-Abmessungen getrennt betrachtet.

Die Proben **VR1-T1-1** bis **VR1-T1-3** wurden mit Stützweiten von 900 mm getestet. Das Versagen dieser Proben war bei VR1-T1-1 und VR1-T1-3 ein Versagen an der Lasteinleitung. Das Foto in Abbildung 6-10 a) zeigt das Versagen beispielhaft für Probe VR1-T1-1. Das obere Deckblech wird am rechten Ende der Lastverteilplatte am rechten Lasteinleitungspunkt in den Kern hineingedrückt. Dieses lokale Druckversagen an der Lasteinleitung trat bei 56 % (VR1-T1-1) bzw. bei 62 % (VR1-T1-3) Ausnutzung der Fließspannung in den Deckschichten auf. Die nach Gl. 6-5 ermittelte Druckspannung unter der Lasteinleitungsplatte (100 mm x 100 mm) beträgt für die Bruchlasten 0,11 N/mm² bzw. 0,12 N/mm² und liegt damit etwa 30% über der in ausgewiesenen

Druckfestigkeit dieser Wellpappe (s. Tabelle 4-10). Dieses Phänomen wird auf ein Lastverteilung durch die obere Deckschicht verursacht.

Bei VR-T1-2 kam es beim gleichen Lastniveau zu einem Schubbruch des Kerns in der Klebefuge. In Abbildung 6-10 b) ist am Ende des Auflagerpunktes eine deutlicher Versatz im Kernmaterial zu erkennen. Der Versatz tritt in einer der Klebefugen zwischen zwei Linern - also in Klebefuge, die im Zuge der Probekörperherstellung verklebt wurde und nicht bereits durch den Wellpappenhersteller. Bestimmt man die zur Bruchkraft gehörende Schubspannung mit Gl. 6-4 erhält man $0,2 \text{ N/mm}^2$. Die in Tabelle 4-14 ausgewiesene Schubfestigkeit f_v für die Pappe der Versuchsreihe VR1 beträgt hingegen $0,42 \text{ N/mm}^2$. Diese geringe Schubbruchspannung wird auf eine unzureichende Verklebung im Zuge der Probekörperherstellung zurückgeführt.

Abbildung 6-9 a) zeigt, dass vor die Proben VR1-T1-1 und VR1-T1-2 im Vergleich zu den anderen Proben eine etwas geringere Steigungen und damit eine geringere Biegesteifigkeit aufweisen als die übrigen Proben. Es wurde keine Beobachtung gemacht, mit der diesen Sachverhalt erklären werden kann. Die möglichen Ursachen hierfür sind zahlreich. Die Schwankungen der Materialeigenschaften selbst sind groß und können für diese Abweichung verantwortlich sein. Ein um 10 % geringerer Schubmodul könnte die Abweichung von VR1-T1-1 beispielsweise verursachen.



a) Druckversagen des Kerns an der Lasteinleitung (Probe VR1-T1-1)

b) Schubversagen in der Klebefuge (Probe VR1-T1-2)

Abbildung 6-10: Versagensbilder der Typ 1-Versuche von VR1-T1-1 bis VR1-T1-3

Figure 6-10: Failure of the type 1 specimens of VR1-T1-1 to VR1-T1-3

In den Versuchen **VR1-T1-4** bis **VR1-T1-6** wurden die Probekörperlänge im Vergleich zu den ersten Versuchen fast verdoppelt, wodurch bei gleicher Schubspannung und lokalen Druckbeanspruchung des Kernmaterials eine größere Momenteneinwirkung erzielt wurde. Alle drei Proben versagten aufgrund von Knittern der gedrückten Deckschicht im Bereich des Momentenmaximums zwischen den Lasteinleitungspunkten. Aufgrund einer Probenlänge, die größer war als die Länge der zur Verfügung stehenden Wellpappenbögen in Maschinenquerrichtung (CD), musste das Kernmaterial in jeder Lage gestoßen werden. Die Stöße der einzelnen Wellpappenlagen wurden in jeder zweiten Lage an der gleichen Stelle in Längsrichtung des Balkens angeordnet. In allen drei Versuchen trat Knittern an der Stelle auf, an der der oberste Wellpappenbogen gestoßen wurde. Im Versagensbild in Abbildung 6-11 sind

die Stöße jeder zweiten Wellpappenlage genau unterhalb der Knitterfalte zu erkennen. Am Stoßpunkt ist die stützende Wirkung des Kernmaterials herab gesetzt, was gegenüber den ungestörten Bereichen zu einer reduzierten Knittertragfähigkeit führt. Die Schubsteifigkeit ist stark herabgesetzt, da die oberste Lage am Stoß stirnseitig nicht verklebt ist und somit Schub im Stoßquerschnitt nur über durchlaufende darunterliegende Wellpappenlagen übertragen werden kann. Auch die Zug- und Druckstützung der Deckschicht sind am Stoßpunkt schlechter. Anhand des Versagensbildes lässt sich erkennen, dass nicht die fehlende Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit des Kerns an der Stoßstelle sondern die reduzierte Zugsteifigkeit für das Knittern an dieser Stelle verantwortlich ist. Der Scheitelpunkt der Knitterfalte liegt genau oberhalb der Störstelle, wodurch an diesem Punkt keine Schubverzerrung sondern nur eine Dehnung des Kerns in vertikaler Richtung auftritt. Ohne Störstelle wären für Typ 1 Elemente wahrscheinlich höhere Knitterspannungen für die Wellpappe der Versuchsreihe ein möglich. Die maximale Knitterspannung von 170 N/mm^2 (VR1-T1-4) liegt allerdings bereits in der Größenordnung der Knitterspannungen von Sandwichelementen mit herkömmlichen Kernmaterialien.

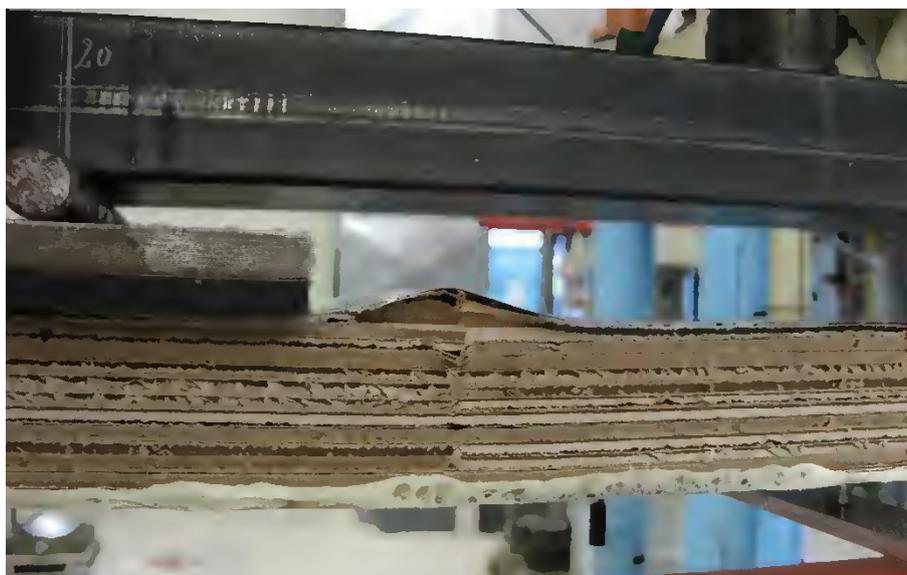


Abbildung 6-11: Versagen der Typ 1-Versuche von VR1-T1-4 bis VR1-T1-6 (hier Probe VR1-T1-6)

Figure 6-11: Failure of the type 1 specimens of VR1-T1-4 to VR1-T1-6

6.5.1.2 VR3-T1

Die Probekörper der Versuchsreihe VR 3 mit dem Elementtypen 1 sind Sandwichbauteile mit einem Kernaufbau aus vorgefertigten Lamellen. Für die Lamellen wurden in allen vier Versuchen nach dem Schema von Typ A gem. Abbildung 6-1 angeordnet. Alle Versuche versagten aufgrund von Knittern der gedrückten Deckschicht, wobei die größte Knitterspannung 147 N/mm^2 betrug.

Vor dem Knittern des Bauteils **VR3-T1-1** im Bereich des Momentenmaximums, konnte eine Beule im Deckblech beobachtet werden, die sich im Bereich zwischen Lasteinleitung und Auflager ausbildete. Die Beule ist in Abbildung 6-12 a) im Bereich des Stoßes der äußeren Lamelle sehr schwach zu erkennen. Sie hat eine sehr geringe Amplitude und war während des Versuchs erst kurz vor dem Versagen des Elements

zu erkennen. Es ist aber zu vermuten, dass sie sich bereits vorher ausbildete, da das Diagramm des Versuchs VR3-T1-1 in Bild Abbildung 6-9 b) bereits bei einem Abszissenwert von etwa 0,45 einen Knick, also einen Steifigkeitsabfall des Elements, erkennen lässt. Dieser Knick könnte die Beule zur Ursache haben.

Versagen des Elements stellte sich jedoch durch Knittern des oberen Deckblechs an einer anderen Stelle ein. In Abbildung 6-12 b) ist die Knitterfalte rechts neben dem linken Lasteinleitungspunkt zu erkennen. Aufsägen des Probekörpers mit einem Querschnitt an der Versagensstelle zeigte, dass die werkssseitig hergestellte Klebefuge zwischen der obersten Linerschicht und der obersten Wellenbahn auf Zug versagte. In Abbildung 6-13 sind die beiden Elementhälften nach dem Aufsägen zu sehen. Die obere Deckschicht wurde hier aufgebogen, um die Bruchstelle deutlich sichtbar zu machen.



Abbildung 6-12: VR3-T1-1: Beule am Stoß der äußeren Lamelle (a) und Knitterfalte im Bereich des Momentenmaximums (b)

Figure 6-12: VR3-T1-1: Local buckling half wave at the lamella joint (a) and wrinkling of the face sheet in the area of the maximum bending moment (b)



Abbildung 6-13: VR3-T1-1 - An Knitterfalte aufgeschnittener Probekörper, Zugversagen der Wellpappe

Figure 6-13: VR3-T1-1 – Cross section at the wrinkling, tensile failure of the corrugated cardboard

Die Knitterfalte von Probekörper **VR3-T1-2** trat links neben dem linken Lasteinleitungspunkt, also nicht im Bereich des größten Moments auf. In Abbildung 6-14 ist das Versagensbild gegeben. Ein Lamellenstoß befand sich bei diesem Probekörper nicht in der Nähe der Knitterfalte. Der Bruch erfolgte ähnlich wie bei VR3-T1-2 durch Zugversagen einer werkseitig hergestellten Klebfuge zwischen Wellenbahn und Liner. Hier versagte die Fuge zwischen der obersten Wellenlage und der darunterliegenden Linerschicht. Die Knitterspannung diese Probekörpers ist mit 124 N/mm^2 die geringste der Proben dieses Typs.



Abbildung 6-14: VR3-T1-2: Knittern zwischen Lasteinleitung und Auflager

Figure 6-14: VR3-T1-2: Wrinkling between load application point and support

Beim Probekörper **VR3-T1-3** hat mit 3687 N die größte Versagenslast in dieser Reihe. Die zugehörige nach Sandwichtheorie bestimmte Knitterspannung beträgt 147 N/mm^2 . Knittern der gedrückten Deckschicht trat rechtsseitig des rechten Lasteinleitungspunktes auf, also nicht im Bereich des Momentenmaximums. In unmittelbarer Nähe zur Knitterfalte liegt ein Stoß einer der beiden außenliegenden Lamellen. Die Knitterfalte entstand an dieser Stelle und breitete sich dann sehr schnell über die gesamte Elementbreite aus. Das Versagensbild ist sehr ähnlich zu dem von VR3-T1-2 und wird hier daher nicht abgebildet. Das Zugversagen des Kernmaterials trat zwischen dem obersten Liner und der obersten Wellenbahn auf.

Probekörper **VR3-T1-4** versagte auf Knittern der oberen Deckschicht zwischen den Lasteinleitungspunkten ähnlich wie Probekörper VR3-T1-1. Auch die Knitterspannung (135 N/mm^2) und die zugehörige Durchbiegung in Feldmitte ($19,1 \text{ mm}$) sind fast genau so groß, wie die von Probe VR3-T1-1.

6.5.2 Tragverhalten der Kernanordnung Typ 2

In Tabelle 6-7 sind die Ergebnisse der Biegeversuche von Elementtyp 2 zusammengefasst.

Wie bei Typ 1 wurden auch hier verschiedene statische Systeme mit unterschiedlichen Probeneigenschaften getestet. Der Vergleich und die Bewertung der Versuche werden auch hier erst über bezogene Spannungen und Verformungen möglich. Zur

Vollständigen Ergebnisdarstellung sind aber auch die absoluten Messwerte der Versuchsergebnisse in Tabelle 6-7 angegeben.

Tabelle 6-7: Ergebnisse der Biegeversuche: Elementtyp 2

Table 6-7: Bending test results: Element type 2

Probe	P_{\max} in N	$w_{z,P_{\max}}$ in mm	$\sigma_{x,\max}$ in N/mm ²	$\frac{\sigma_{x,\max}}{f_y}$	$\frac{w_{z,P_{\max}}}{w_{z,P_y,SWT}}$	Versagensart
VR1-T2-1	1961	2,0	112	0,49	0,58	f)
VR1-T2-2	4922	21,0	276	1,21	6,05	b)
VR1-T2-3	4646	22,1	278	1,21	6,27	b)
VR2-T2-1	1641	12,7	138	0,61	1,54	a)
VR2-T2-2	1795	21,2	150	0,67	2,56	a)
VR2-T2-3	1273	5,9	111	0,49	0,70	f)
VR2-T2-4	1504	9,0	130	0,58	1,07	a)
VR2-T2-5	1492	7,3	129	0,57	0,86	a)
VR3-T2-1	4980	40,5	196	0,98	2,16	f), b)
VR3-T2-2	6153	165,4	249	1,21	8,70	b)
VR3-T2-3	4200	93,6	164	1,07	6,53	f), b)
VR3-T2-4	6004	125,7	239	1,15	6,58	b)
VR4-T2-1	4331	104,1	159,0	0,44	0,42	a)
VR4-T2-2	10120	259,4	370,0	0,99	1,00	b)
VR4-T2-3	9876	256,8	363,0	0,99	1,02	b)

In den Versuchsreihen VR 1, VR 3 und VR 4 konnten die Fließspannungen der Deckschichten bei einigen Probekörpern ausgenutzt werden. In VR 2 ist Wellpappe aus Schrenz als Kernmaterial vorhanden. Hier trat das Versagen bei allen Proben schon deutlich unterhalb der elastischen Querschnittstragfähigkeit ein.

Bei allen Versuchsreihen außer bei VR 2 gab es Proben, die infolge von Verbundproblemen durch Delamination vorzeitig versagten. Dies ist in den meisten Fällen auf Ungenauigkeiten bei der manuellen Herstellung der Proben zurückzuführen. Die Versuchsreihen werden nachfolgend getrennt voneinander betrachtet.

6.5.2.1 VR1-T2

In Abbildung 6-15 a) sind die Verläufe der Hydraulikzylinderkraft P in Abhängigkeit der Durchbiegung in Feldmitte w_z für die Versuche vom Typ 2 dargestellt. In Abbildung 6-15 b) sind die Verläufe der auf die Fließspannung bezogenen Deckblechspannungen in Abhängigkeit der bezogenen Durchbiegungen (gem. Abschnitt 6.4) für die Biegeproben vom Typ 2 gegeben.

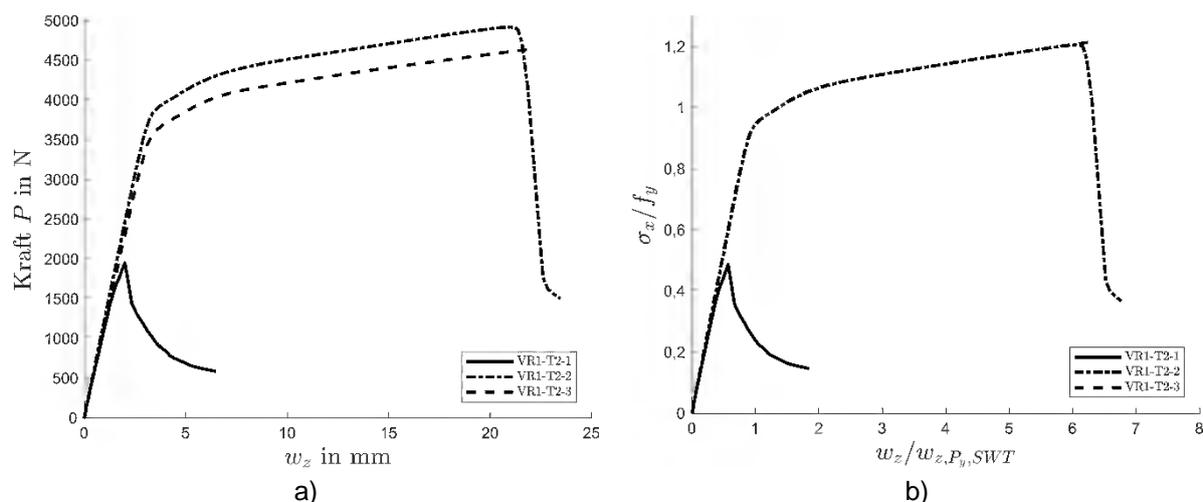


Abbildung 6-15: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 1, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b)

Figure 6-15: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 1, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b)

Der Probekörper **VR1-T2-1** versagte schon bei einer vergleichsweise geringen Deckblechspannung von 112 N/mm^2 durch Delamination des gedrückten Blechs. Dieses vorzeitige Versagen wird in einer mangelhaften Klebstoffapplikation bzw. in einer ungenügenden Oberflächenreinigung der Deckschicht begründet.

Die Proben **VR1-T2-2** und **VR1-T2-3** zeigen ein sehr ähnliches Tragverhalten. In der bezogenen Darstellung in Abbildung 6-15 b liegen ihre Kurven fast genau übereinander. Nach einem linearen Bereich bis zu einer Deckblechspannung, die knapp unter der Fließgrenze des Materials liegt, knicken die Kurven ab, da die Deckschichten beginnen zu fließen. Für beide Proben ist eine Materialverfestigung zu erkennen, die etwa 20 % höher als die Fließspannung f_y liegt. Die Durchbiegung der Proben in Feldmitte erreicht etwa das Sechsfache der Durchbiegung bei Fließbeginn. Anschließend tritt im gedrückten Deckblech eine Knitterfalte über die gesamte Balkenbreite im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten auf. Das Versagen der Proben wird als Fließen der Deckschichten klassifiziert, da die Knitterfalte sich erst nach großen plastischen Verformungen einstellt. Die Gebrauchstauglichkeit kann bei derart großen Verformungen (w_z ca. $1/40$ der Stützweite) nicht mehr gewährleistet werden. Die Knitterfalte ist die Folge großer Stauchungen in der gedrückten Deckschicht in Kombination mit einem großen Steifigkeitsverlust infolge der viel geringeren Materialsteifigkeit nach Erreichen der Fließgrenze. Zusätzlich zur Knitterfalte sind zahlreiche plastische Beulen mit kurzen Halbwellenlängen ($<5 \text{ mm}$) im oberen Deckblech zu erkennen, die sich erst mit zunehmender Stauchung infolge der Plastizierung der Deckschichten bildeten.



Abbildung 6-16: VR1-T2-2 – Knitterfalte und zahlreiche plastische Beulen in oberer Deckschicht
 Figure 6-16: VR1-T2-2 – Wrinkling and numerous plastic buckles in upper face sheet

6.5.2.2 VR2-T2

In Abbildung 6-17 a) sind die Verläufe der Hydraulikzylinderkraft P in Abhängigkeit der Durchbiegung in Feldmitte w_z für die Versuche vom Typ 2 dargestellt. In Abbildung 6-17 b) sind die Verläufe der auf die Fließspannung bezogenen Deckblechspannungen in Abhängigkeit der bezogenen Durchbiegungen (gem. Abschnitt 6.4) für die Biegeproben vom Typ 2 gegeben.

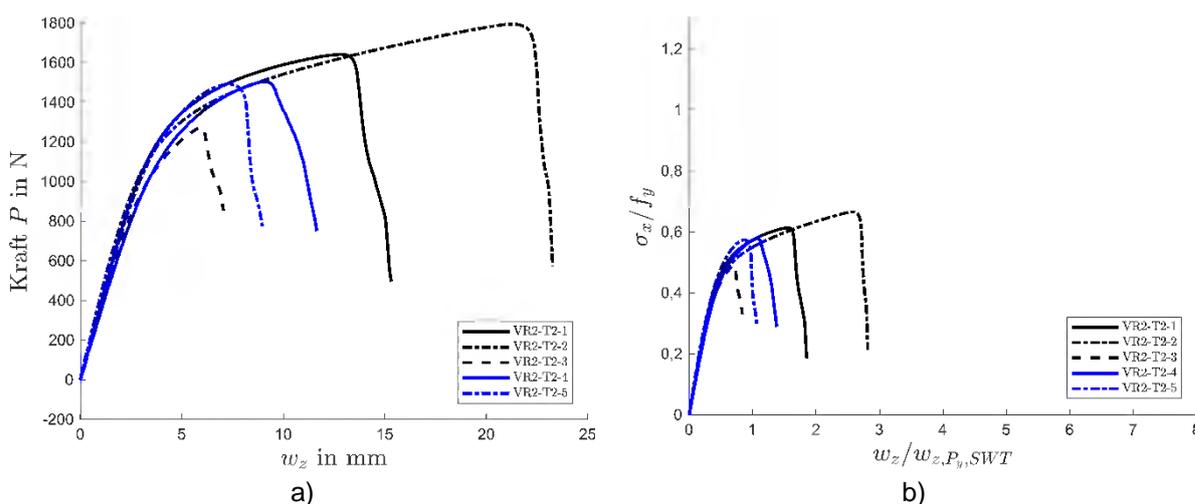


Abbildung 6-17: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 2, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b)

Figure 6-17: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 2, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b)

Die ermittelten Spannungen liegen klar unterhalb der Fließspannung der Deckschichten (s. Abbildung 6-17 b). Die Skalierung der Achsen des Diagramms wurde für

alle Versuchsreihen gleich gewählt. Der Vergleich zu den anderen Diagrammen mit bezogenen Größen wird so erleichtert. Bei allen Versuchen stellten sich zunächst deutlich sichtbare Beulen in den gedrückten Deckschichten ein. Teilweise zeigten die Proben klare überkritische Tragreserven und versagten erst nach größeren Verformungen und einem Lastanstieg nach dem Eintritt der ersten lokalen Instabilitäten. In Abbildung 6-18 ist exemplarisch Probekörper VR2-T2-1 während des Versuchs in zwei Stadien abgebildet. In Teilbild a) sind die Beulen im gedrückten Deckblech deutlich zu erkennen. Teilbild b) ist erst nach dem Versagen durch Ausbilden einer Knitterfalte aufgenommen worden. An der Stelle der Knitterfalte kann man in Teilbild a) an beiden Deckblechaußenkanten bereits Beulen erkennen.

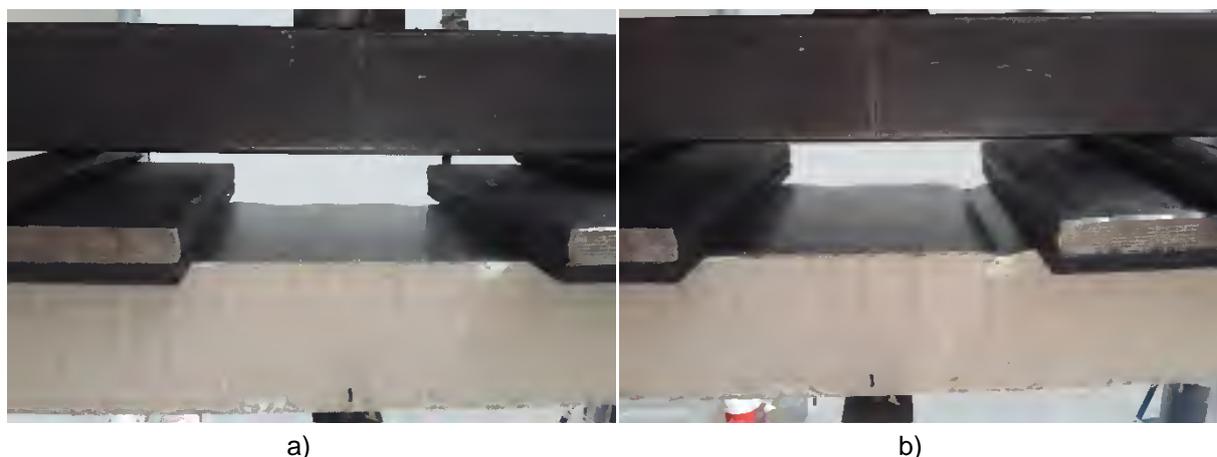


Abbildung 6-18: VR2-T2-1: Beulen im oberen Deckblech (a) und Knitterfalte (b)

Figure 6-18: VR2-T2-1: Buckles in upper face sheet (a) and wrinkling (b)

Bei allen Proben dringen die Knitterfalten in den Kern ein, da die Kernfestigkeit für Druckbeanspruchungen geringer ist als für Zugbeanspruchungen. Der Verbund zwischen Kern und Deckschicht versagt in keinem der Versuche.

Gemäß Abschnitt 4.5 wären auf der Grundlage der Materialparameter der Schrenz-Wellpappe für die Elemente vom Typ 2 deutliche höhere Knitterspannungen zu erwarten gewesen. Dieser Sachverhalt kann viele Gründe haben, jedoch auf Grundlage des kleinen Probenumfangs nicht eindeutig erkannt werden. Mögliche Gründe sind:

- Fehler bei der Klimatisierung
- Vorschädigung der Probekörper
- Materialparameter gem. Abschnitt 4.5.1 wurden falsch ermittelt.
- Bestimmung der Knitterspannung ist mit den Bestimmungsgleichungen nach Abschnitt 6.6.1 für dieses Material grundsätzlich nicht korrekt

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese Sorte nicht näher untersucht. Da schon bei der Herstellung der Probekörper Schädigungen des sehr empfindlichen Materials nicht ausblieben, wird diese Sorte für eine nicht maschinelle Fertigung für untauglich erachtet. Die Dichte der untersuchten Sorte ist mit ca. 70 kg vergleichsweise gering. Möglicherweise lassen sich mit schwereren Qualitäten auch in manueller Herstellung bessere Ergebnisse erzielen. Da Schrenz in der Regel nur zur Dämpfungszwecken im Inneren von Verpackungen und selten für Verpackungen selbst

eingesetzt wird, werden schwerere Schrenz-Qualitäten jedoch derzeit nicht kommerziell hergestellt. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass Wellpappe dieser geringsten verfügbaren Qualität, sich nicht grundsätzlich als Kernmaterial von Sandwichelementen einsetzen lässt.

6.5.2.3 VR3-T2

In Abbildung 6-19 a) sind die Verläufe der Hydraulikzylinderkraft P in Abhängigkeit der Durchbiegung in Feldmitte w_z für die Versuche vom Typ 2 dargestellt. In Abbildung 6-19 b) sind die Verläufe der auf die Fließspannung bezogenen Deckblechspannungen in Abhängigkeit der bezogenen Durchbiegungen (gem. Abschnitt 6.4) für die Biegeproben vom Typ 2 gegeben.

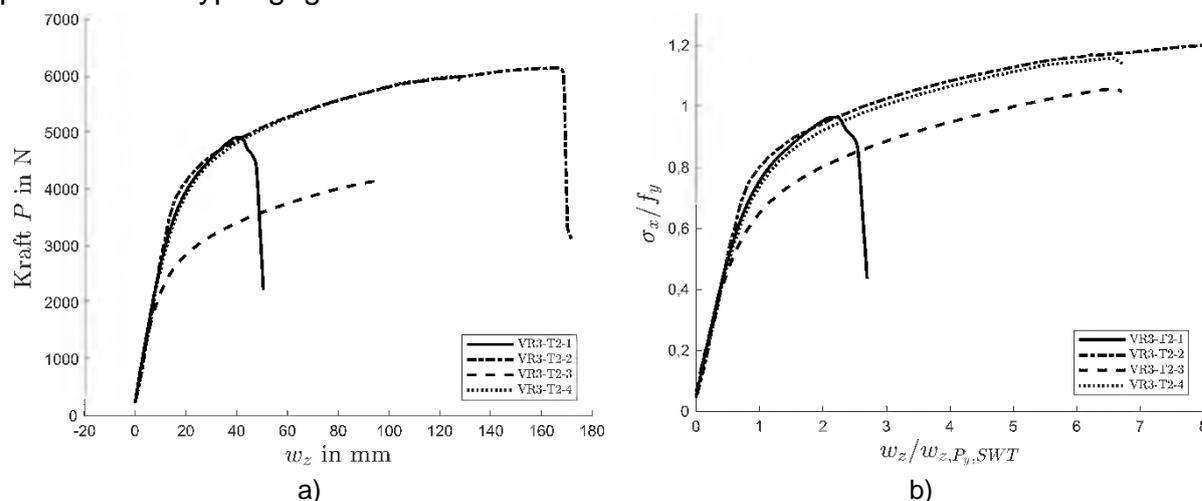


Abbildung 6-19: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 3, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b)

Figure 6-19: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 3, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b)

Die Probe **VR3-T2-1**, die einen Kernaufbau mit in Längsrichtung ungestoßenen Lamellen hat, erreicht unter der Annahme der über die Breite konstanten Spannungsverteilung 98 % der Streckgrenze f_y . Der Probekörper versagte aufgrund einer unzureichenden Verklebung der oberen Deckschicht an einer der beiden Elementkanten. Der Graph von VR3-T2-1 in Abbildung 6-19 b) zeigt bereits bei einem Ordinaten Wert von etwa 0,6 einen leichten Knick und einen flacheren Verlauf als die Proben mit den laufenden Nummern 2 und 4. Zu diesem Zeitpunkt war die Delamination mit bloßem Auge kaum zu erkennen. Mit steigender Last und Verformung wird erst eine nach oben gerichtete Beule immer größer und dann aufgrund des Abschälleffekts in Kombination mit einer überproportionalen Spannungszunahme in den intakten Bereichen des Deckblechs zur Ausbildung einer Knitterfalte über die gesamte Elementbreite. Aufgrund des maximalen Spannungsniveaus von 0,98 und der Annahme, dass der Bereich der Delamination stark reduzierte Spannungen aufweist, wird davon ausgegangen, dass die übrigen Bereiche der oberen Deckschicht ihre Fließspannungen erreichen. In Abbildung 6-20 a) ist die Stelle zu sehen, an der sich das obere Deckblech aufgrund der mangelhaften Verklebung in einer vergleichsweise

großen Halbwellen vom Kern abhebt. In Teilbild b) ist das Element im Versagenszustand mit vollständig ausgebildeter Knitterfalte zu sehen.



Abbildung 6-20: VR3-T2-1: Delamination mit Beule an einer der Elementkanten (a) und Knitterfalte über gesamte Elementbreite (b)

Figure 6-20: VR3-T2-1 Delamination with buckle at one side of the element (a) and wrinkling along the whole element width (b)

VR3-T2-2 und **VR3-T2-4** versagen infolge von Fließen der Deckschichten. Die Verläufe der Graphen Abbildung 6-19 liegen sowohl in der Darstellung mit absoluten Achsgrößen als auch mit bezogenen Größen nahezu übereinander. Nach dem Erreichen der Fließspannung folgt ein stark ausgeprägter Fließbereich mit geringer Steigung der Graphen. Hierbei ist die Materialverfestigung, die auch im Zugversuch (s. Abbildung 6-22) der Deckbleche zu erkennen ist, bis zu einem Wert von σ_x/f_y von 1,2, festzustellen. Da VR3-T2-2 keine Stöße der Kernlamellen in Längsrichtung hat, VR3-T2-4 hingegen einen Kern mit in Längsrichtung unterbrochenen Lamellen hat, liegt die Vermutung nahem, dass der Aufbau des Kerns aus Lamellen auf das grundsätzliche Tragverhalten keine bemessungsrelevanten Einflüsse hat. Die Duktilität ist bei beiden Proben sehr groß. Die Durchbiegung in Feldmitte beträgt das 8,7- bzw. das 6,6-fache der Verformung bei Fließbeginn. Ähnlich wie bei den Probekörper VR1-T2-2 und VR1-T2-3 tritt hier bei sehr großen Dehnungen der fließenden Bleche eine Knitterfalte im oberen Deckblech auf. Die Knitterfalten haben sehr kurze Halbwellenlängen (ca. 5 mm) und zusätzlich zu den durchgehenden Knitterfalten sind in den gedrückten Deckschichten zahlreiche plastische Beulen zu erkennen (s. Abbildung 6-23). Bereits vor Ausbildung der Knitterfalte können Beulen sehr kurzer Wellenlängen (< 5 mm) beobachtet werden. Diese führen jedoch nicht zum Verlust der Gesamtstabilität der Bauteile.

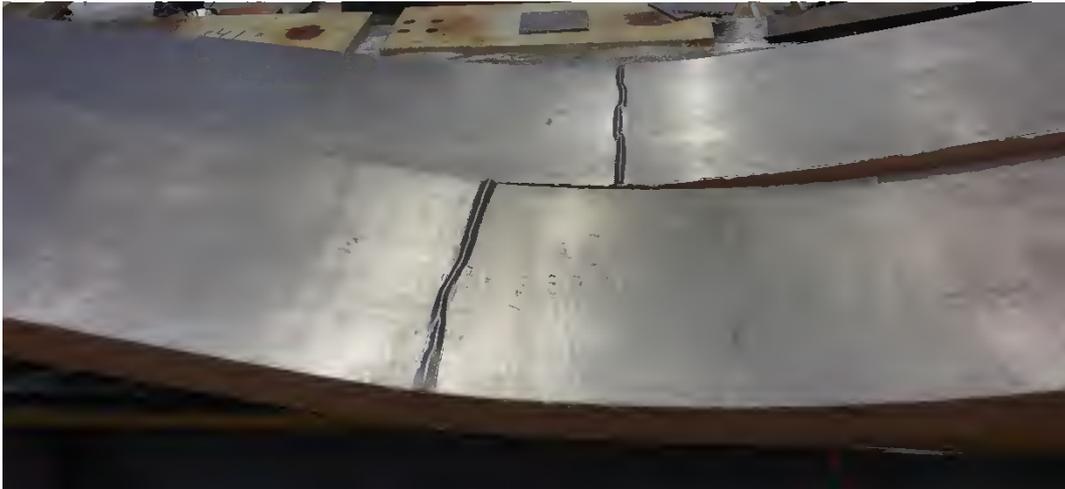


Abbildung 6-21: Proben VR3-T2-2 (Vordergrund) und VR3-T2-4 (Hintergrund) mit Knitterfalte und plastischen Beulen in oberem Deckblech

Figure 6-21: Specimens VR3-T2-2 (front) and VR3-T2-4 (back) with wrinkling and plastic buckling in upper face sheet

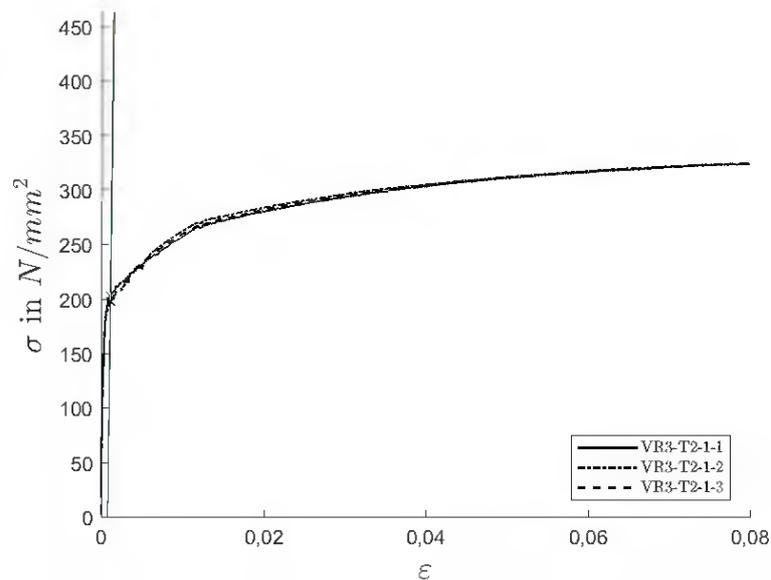


Abbildung 6-22: Stahlzugversuche: Drei Proben aus Bauteildeckblechen von Probekörper VR3-T2-1 (repräsentativ für Proben VR3-T2-2 und VR3-T2-4)

Figure 6-22: Steel tensile tests: three tensile coupons of face sheets of panel VR3-T2-1 (representative for specimens VR3-T2-2 and VR3-T2-4)

Bei VR1-T2-4 ist klar zu erkennen, dass die Knitterfalte sich genau oberhalb der Lamellenstöße einstellt. Bei diesem Probekörper wurde in Feldmitte jede zweite Lamelle gestoßen. In Abbildung 6-23 ist der Probekörper ohne das obere Deckblech (Teilbild a) und zusätzliche kurz vor (Teilbild b) und nach dem Versagen (Teilbild c) abgebildet. Hier zeigt sich also eine Folge des Kernaufbaus mit untereinander nicht verbundenen Lamellen. Die für die Bemessung relevanten Eigenschaften, Tragfähigkeit und Duktilität, werden für diese untersuchte Wellpappe, nicht signifikant durch den gestörten Kernaufbau beeinflusst.

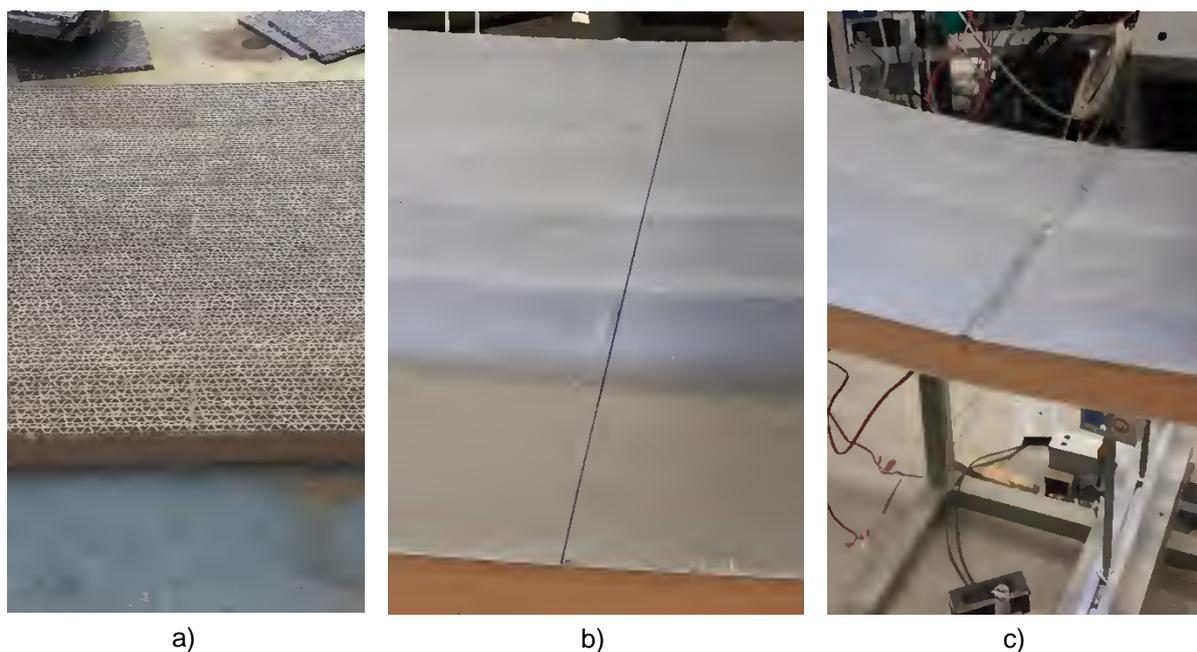


Abbildung 6-23: VR1-T2-4: Lamellenstöße jeder zwei Lamelle in Feldmitte; Probe ohne Deckblech (a), Beulen an Lamellenstößen kurz vor dem Versagen (b) und Knitterfalte durch Beulen (c)

Figure 6-23: VR1-T2-4: Lamella joints in every second lamella in midspan; specimen without face sheet (a), buckles at the lamella joint shortly before failure (b) and wrinkling through the buckles (c)

VR3-2-3 hat von den 4 Versuchen vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 3 mit Abstand die geringste Tragfähigkeit. Er stellt in zweierlei Hinsicht eine Besonderheit dar und kann daher schlecht mit den anderen Proben verglichen werden. Für diesen Probekörper wurde ein Blech einer anderen Charge verwendet, das mit 153 N/mm^2 ¹⁸ eine um über 20 % geringere Fließgrenze hat als die anderen drei Probekörper. In Abbildung 6-24 ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Deckblech-Zugversuche von Bauteil VR3-2-3 gegeben. Die viel geringere Tragfähigkeit des Bauteils VR3-2-3 (4200 N), die in Abbildung 6-19 und in Tabelle 6-7 im Vergleich zu den anderen drei Bauteilen dieser Serie auffällt, ist aber nicht nur auf die geringe Fließgrenze der Deckblechspannung zurückzuführen. Betrachtet man die bezogene Darstellung des Last-Verformungs-Diagramms in Abbildung 6-19 b) fällt auf, dass auch hier die Kurve von VR3-2-3 deutlich unterhalb der anderen drei Kurven verläuft und die Fließspannung nicht erreicht wird. Grund hierfür ist eine Delamination, der oberen Deckschicht, die sich im gedrückten Deckblech in der Mitte des Elementes einstellte und während des Versuchs bereits früh zu erkennen war. Ursache für die Delamination war eine unzureichende Entfettung der zu beklebenden Blechseiten. (Obwohl der Probekörper hier die laufende Nr. 3 trägt, wurde er als erster hergestellt).

¹⁸Die Stahlsorte aller Bleche der Bauteile von Versuchsreihe VR3 ist DC 01 mit einer 0,2 %-Dehngrenze von $140 - 320 \text{ N/mm}^2$

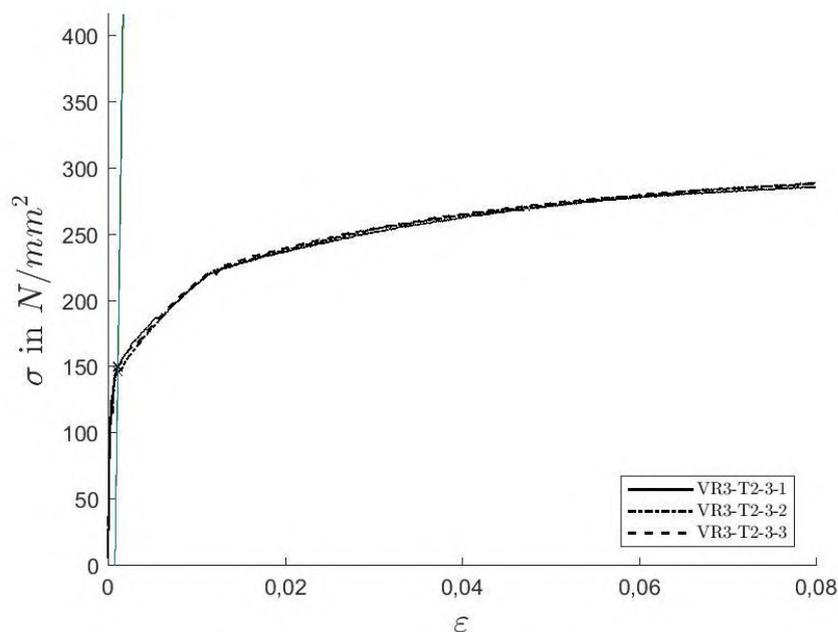


Abbildung 6-24: Stahlzugversuche: Drei Proben aus Deckblechen von Probekörper VR3-T2-3

Figure 6-24: Steel tensile tests: three tensile coupons of face sheets of panel VR3-T2-3

6.5.2.4 VR4-T2

In Abbildung 6-25 a) sind die Verläufe der Hydraulikzylinderkraft P in Abhängigkeit der Durchbiegung in Feldmitte w_z für die Versuche vom Typ 2 dargestellt. In Abbildung 6-25 b) sind die Verläufe der auf die Fließspannung bezogenen Deckblechspannungen in Abhängigkeit der bezogenen Durchbiegungen (gem. Abschnitt 6.4) für die Biegeproben der Versuchsreihe VR 4 gegeben.

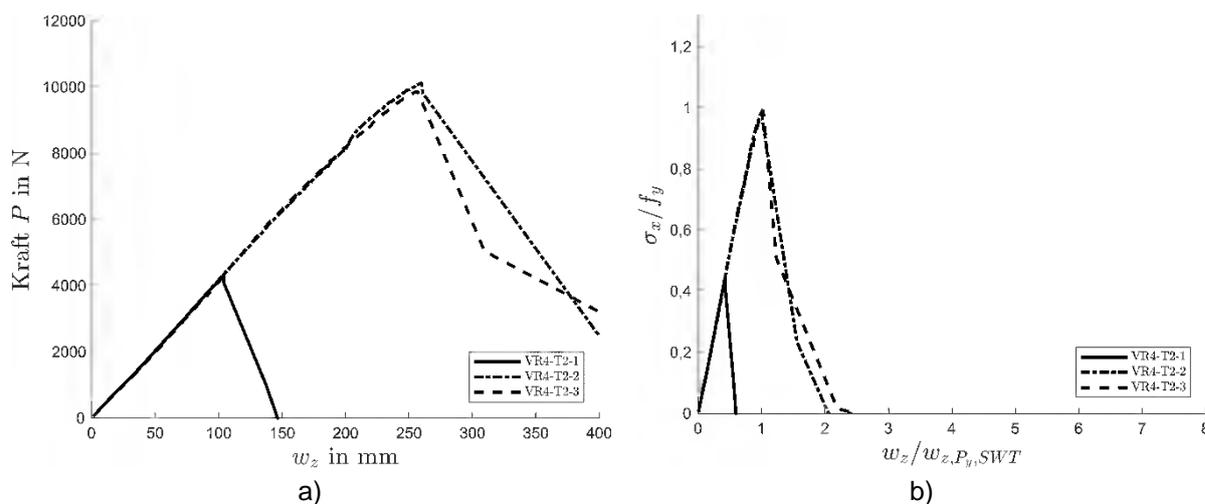


Abbildung 6-25: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 4, Kraft-Weg-Diagramm (a) und Darstellung mit bezogenen Größen (b)

Figure 6-25: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 4, load-deflection-diagram (a) and illustrated with relative variables (b)

Das Bauteil **VR 4-T2-1** hat in dieser Serie mit Abstand die geringste Tragfähigkeit. Das Versagen tritt hier bereits bei einer Last von 4,3 kN und einer Deckblechspannung in Feldmitte von 159 N/mm² ein. Bei diesem Probekörper konnte schon vor dem Versuch mit bloßem Auge eine gewisse Welligkeit der Deckschichten erkannt werden. Der Probekörper versagte aufgrund von Delamination der oberen Deckschicht im Bereich zwischen einem Auflager und dem benachbarten Lasteinleitungspunkt, wobei das Versagen schlagartig eintrat. Ein Versagensbild ist in Abbildung 6-26 gegeben. Das vollständige Abziehen der oberen Deckschicht nach dem Versuch zeigte, dass die Lamellen hier eine überdurchschnittlich große Schwankung in ihrer Dicke aufwiesen. Wenn zwei benachbarte Lamellen nicht die gleiche Dicke haben entsteht am Übergang zwischen der Deckschicht und der Lamelle mit der geringeren Dicke ein Spalt. Geringe Spaltgrößen (bis ca. 0,5 mm) können mit dem verwendeten Klebstoffsystem¹⁹ ausgeglichen werden. Hier waren die Tolleranzmaße nicht eingehalten.



Abbildung 6-26: VR4-T2-1: Versagen der oberen Deckschicht durch Delamination in Auflagernähe

Figure 6-26: VR4-T2-1: Failure of the upper face sheet due to delamination close to a support

¹⁹Die Bauteilproben von VR 4 wurden von einem Sandwichelementhersteller verklebt. Es handelt sich um ein Zweikomponenten-Polyurethan Klebstoff mit der Fähigkeit, kleine Unebenheiten durch aufschäumen auszugleichen. Eine genaue Auskunft über das Klebstoffsystem wurde aus Gründen des Produktschutzes nicht gegeben, da das System auch für kommerzielle Produkte eingesetzt wird.



Abbildung 6-27: VR4-T2-2: Fotografie während des Versuchs vor dem Versagen

Figure 6-27: VR4-T2-2: Photograph during test before failure



Abbildung 6-28: VR4-T2-2: Versagensbild

Figure 6-28: VR4-T2-2: Failure

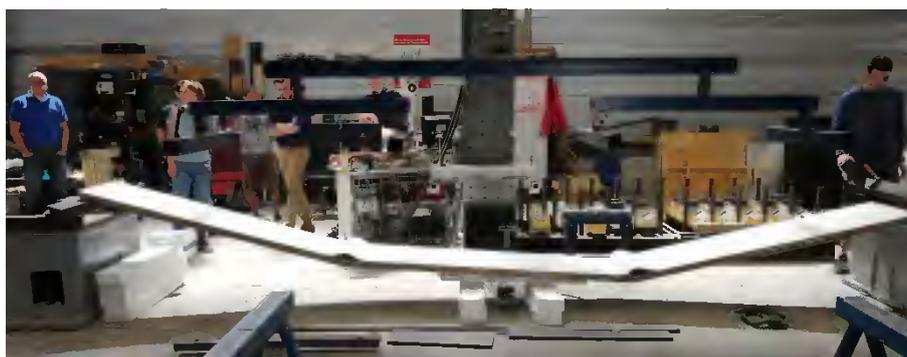


Abbildung 6-29: VR4-T2-3: Versagensbild

Figure 6-29: VR4-T2-3: Failure

Die Proben **VR4-T2-2** und **VR4-T2-3** zeigten ein sehr ähnliches Tragverhalten. Nach einem linearen Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurven (Abbildung 6-25) versagten beide bei einer maximalen Spannung in Höhe von 99 % von f_y . Die maximalen Durchbiegungen betragen mit ca. 260 mm etwa 1/23 der Stützweite. In Abbildung 6-27 ist exemplarisch eine Fotografie von Probe VR4-T2-3 kurz vor dem Versagen mit großer Biegeverformung gegeben. Das Versagen trat bei beiden Proben schlagartig in Verbindung mit Blechablösungen über die gesamte Elementbreite und einer Längenausdehnung von je ca. 20 cm bis 40 cm ein. An der Versagensstelle ist das Deckblech nicht in einer einfachen Halbwelle vom Kern abgelöst, wie es für ein reines Delaminationsversagen (wie z. B. bei Probekörper VR4-T2-1) üblich wäre, sondern weist zusätzlich starke Knicke auf. Diese Knicke liegen im Bereich der Lamellenstöße, die an diesen Stellen teilweise mit besonders großen Spalten zwischen den Lamellen hergestellt wurden. Die Knicke im Deckblech und die Spalten zwischen den Lamellen sind gut in Abbildung 6-30 bis Abbildung 6-32 zu erkennen. Bei Probekörper VR4-T2-2 sind die Spalte zwischen den Lamellen zwar viel schmaler (Spaltbreite ca. 2 mm) als bei Probekörper VR4-T2-3 (Spaltbreite > 10 mm), jedoch sind hier die Lamellen an den Stirnseiten offenbar eingedrückt. Die Stützung des Deckblechs gegen Ausweichen aus der Ebene durch den Kern ist also bei beiden Proben an den Lamellenstößen stark geschwächt.

Aufgrund der vorgenannten Beobachtungen wird das Versagen als Fließversagen klassifiziert. Beim Erreichen der Fließspannungen treten in den Bereichen der Lamellenstöße in Zusammenhang mit dem viel weicheren Materialverhalten nach Erreichen der Fließgrenze lokale Instabilitäten auf. Dieses Beulen haben sehr kurze Halbwellenlängen und erscheinen als Knicke in den gedrückten Deckschichten. In der weiteren Folge kommt es zu einem Abschälen der Deckschicht vom Kernmaterial und zum vollständigen Erlöschen der Tragfähigkeit.

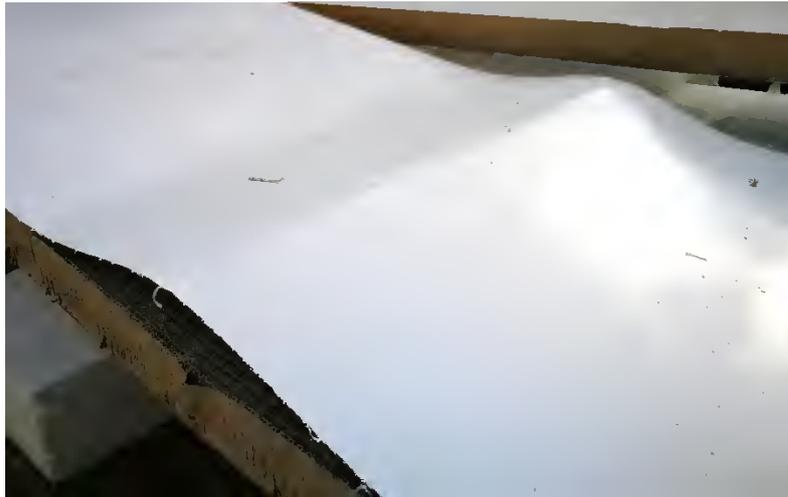


Abbildung 6-30: VR4-T2-2: Ablösung des oberen Deckblechs mit Knicken genau oberhalb der Lamellenstöße

Figure 6-30: VR4-T2-2: Delamination of the upper face sheet with kinks above the lamella joints



Abbildung 6-31: VR4-T2-2: Lamellenstöße unterhalb der Knicke im oberen Deckblech

Figure 6-31: VR4-T2-2: Lamella joint underneath the kinks in the upper face sheet



Abbildung 6-32: VR4-T2-3: Oberes Deckblech nach Versuch aufgebogen; Lamellenstöße und Knicke in oberem Deckblech

Figure 6-32: VR4-T2-3: Upper face sheet bent up after test; lamella joint and kinks in upper face sheet

In Abbildung 6-33 ist die ungewollte Schiefstellung des Lasteinleitungsträgers bei sehr großen Verformungen dargestellt. Bei großen Durchbiegungen rücken die Lasteinleitungspunkte nach innen. Diese Verschiebung soll durch Langlöcher aufgenommen werden, die in der Lasteinleitungstraverse angeordnet sind. Die Langlöcher sind bei der verwendeten Traverse für Sandwichelemente mit herkömmlichen Kernmaterialien ausgelegt. Bevor derart große Verformungen eintreten versagen diese Elemente in der Regel infolge von Knitterversagen der gedrückten Deckschicht. Für die Elemente dieser Serie kommt es zum Anliegen der Schrauben an der Innenseite der Langlöcher und die Einleitungsträger stellen sich schief. Diese Schiefstellung führt zu einer linienförmigen Lasteinleitung, die lokal sehr große Druckspannungen erzeugt. Es konnten jedoch keine Schädigungen an den Lasteinleitungspunkten beobachtet werden.



Abbildung 6-33: Schiefstellung des Lasteinleitungsträgers

Figure 6-33: Tilt of the load application beam

6.5.3 Tragverhalten der Kernanordnung Typ 3

Elemente vom Typ 3 wurden ausschließlich als balkenförmige Probekörper gem. Abbildung 6-5 a) bzw. Abbildung 6-6 a) getestet. Es wurden nur Versuche an der Wellpappe von Versuchsreihe 1 nach Tabelle 4-1 durchgeführt. Innerhalb der 10 Versuche von Typ 3 wurden die Blechdicken ($t = 0,39 \text{ mm}$ bis 1 mm) und die Streckgrenzen der Bleche ($f_y = 200 \text{ N/mm}^2$ bis 500 N/mm^2) variiert (s. auch Tabelle 6-2). In Tabelle 6-8 sind die Ergebnisse der Biegeversuche von Elementtyp 3 zusammengefasst.

Der Vergleich und die Bewertung der Versuche werden auch hier erst über bezogene Spannungen und Verformungen möglich. Zur Vollständigen Ergebnisdarstellung sind aber auch die absoluten Messwerte der Versuchsergebnisse in Tabelle 6-7 angegeben.

Tabelle 6-8: Ergebnisse der Biegeversuche: Elementtyp 2

Table 6-8: Bending test results: Element type 2

Probe	P_{\max} in N	$W_{z,P_{\max}}$ in mm	$\sigma_{x,\max}$ in N/mm ²	$\frac{\sigma_{x,\max}}{f_y}$	$\frac{W_{z,P_{\max}}}{W_{z,P_y,SWT}}$	Versagensart
VR1-T3-1	4197	14,1	252	1,09	3,93	b)
VR1-T3-2	4364	17,9	263	1,14	4,98	b)
VR1-T3-3	3760	6,0	225	0,97	1,68	f)
VR1-T3-4	6487	5,2	187	0,90	1,36	f)
VR1-T3-5	8167	16,2	233	1,12	4,29	b)
VR1-T3-6	9574	26,3	273	1,32	6,87	b)
VR1-T3-7	7246	7,9	523	1,07	1,09	b)
VR1-T3-8	7159	17,5	529	1,08	2,37	b)
VR1-T3-9	7024	7,7	504	1,03	1,07	b)
VR1-T3-10	6789	7,5	492	1,01	1,03	b)

Bei allen Probenkonfigurationen konnten die Fließspannungen der Deckschichten bei einigen Probekörpern ausgenutzt werden.

Bei zwei Proben kam es kurz vor dem Erreichen der Fließspannungen infolge von Verbundproblemen zu vorzeitigem Versagen durch Delamination, was auch hier auf Ungenauigkeiten bei der manuellen Herstellung der Proben zurückgeführt wird.

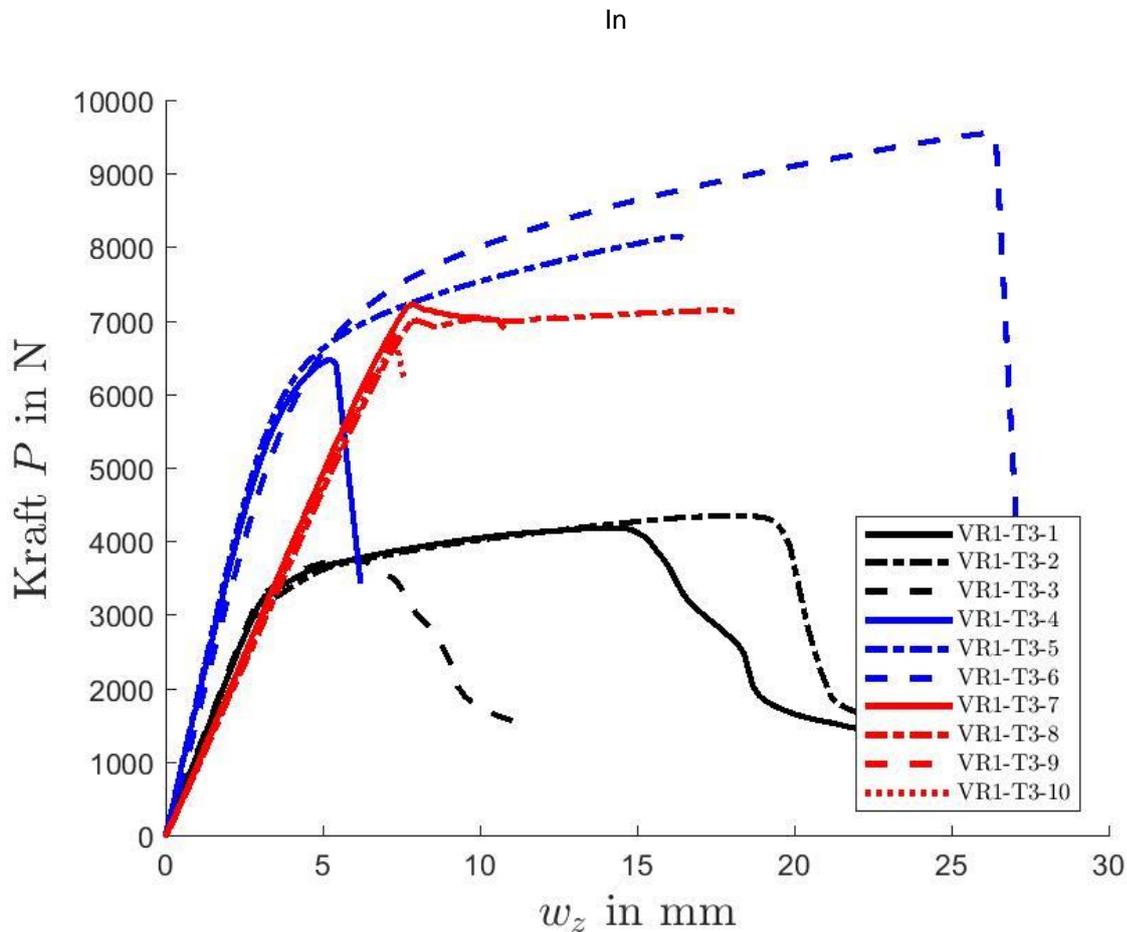


Abbildung 6-34 sind die Verläufe der Hydraulikzylinderkraft P in Abhängigkeit der Durchbiegung in Feldmitte w_z für die Versuche vom Typ 3 dargestellt. In Abbildung 6-35 sind die Verläufe der auf die Fließspannung bezogenen Deckblechspannungen in Abhängigkeit der bezogenen Durchbiegungen (gem. Abschnitt 6.4) für die Biegeproben vom Typ 3 gegeben.

Die Versuche mit den laufenden Nummern 1 bis 3, 4 bis 6 und 7 bis 10 werden nachfolgend getrennt voneinander betrachtet, da diese Serien sich in ihrem Aufbau (Blehdicken und Streckgrenzen)

grundsätzlich voneinander unterscheiden. In

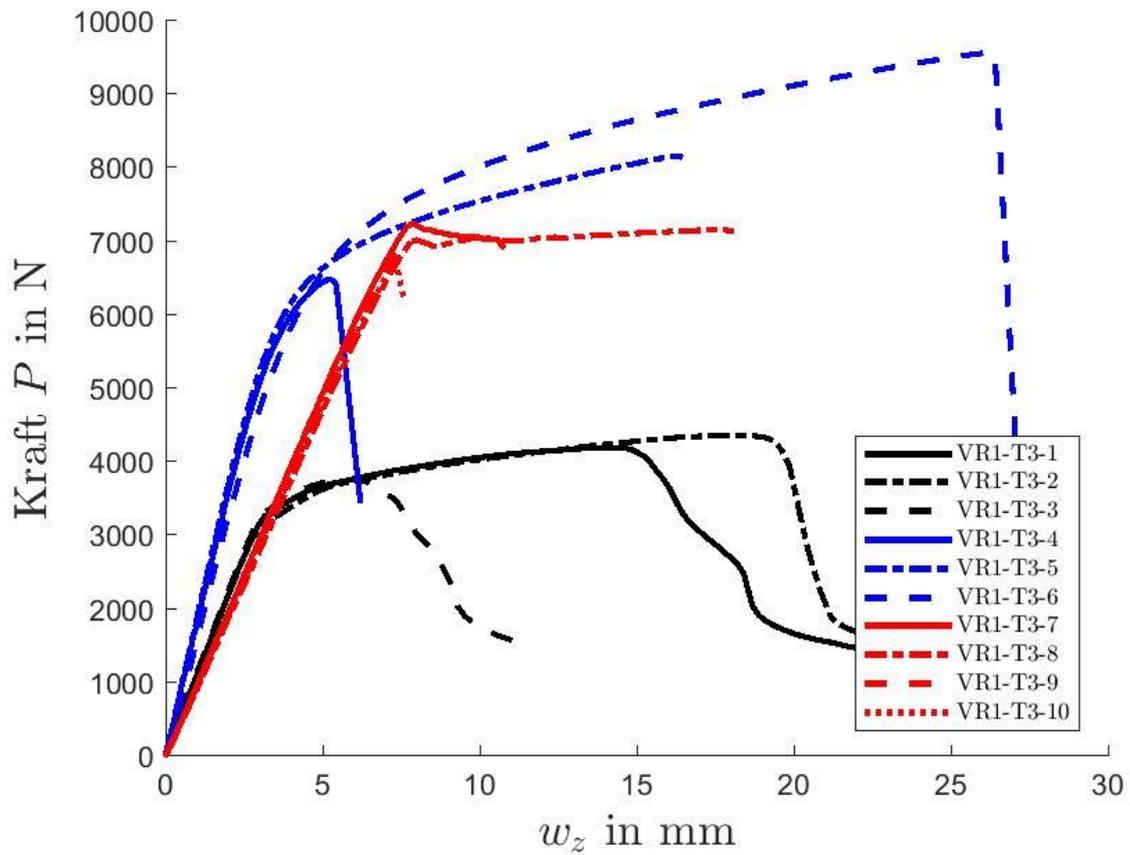


Abbildung 6-34 und Abbildung 6-35 sind diese Serien mit unterschiedlichen Farben voneinander abgesetzt.

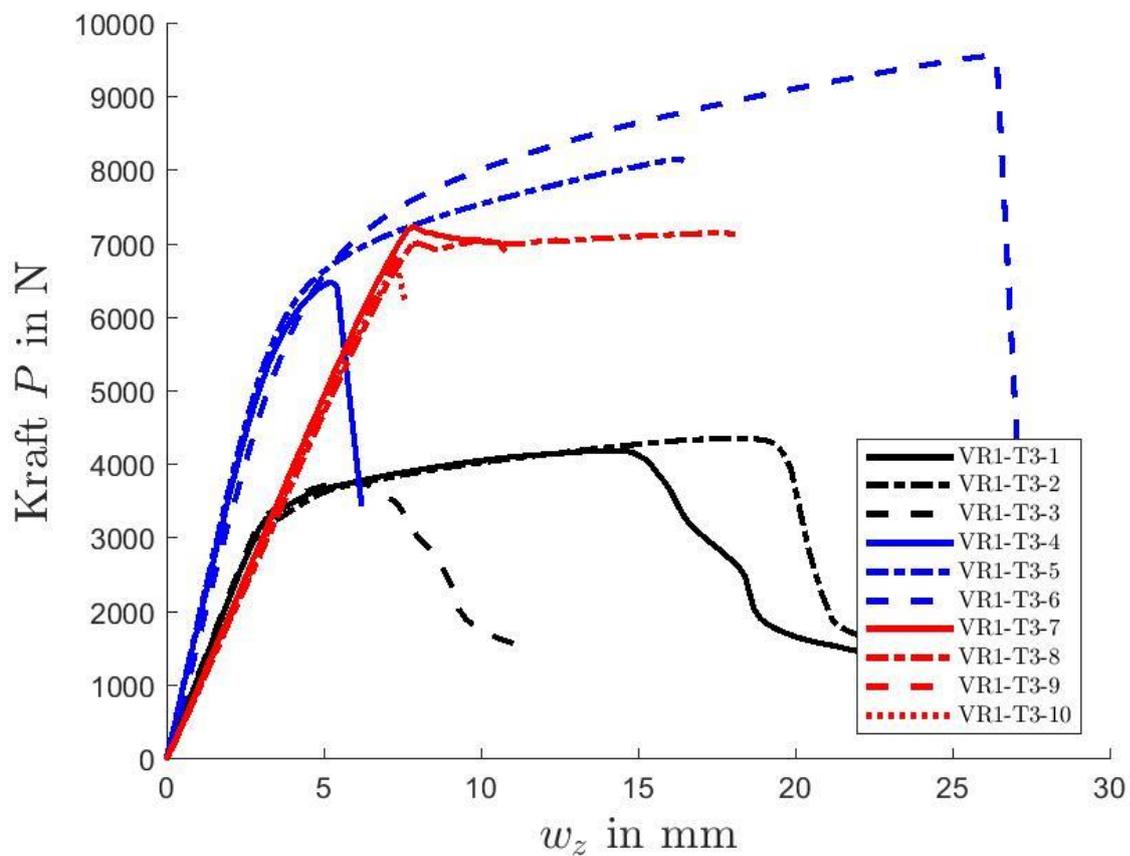


Abbildung 6-34: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 2 der Versuchsreihe VR 4, Kraft-Weg-Diagramm

Figure 6-34: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 4, load-deflection-diagram

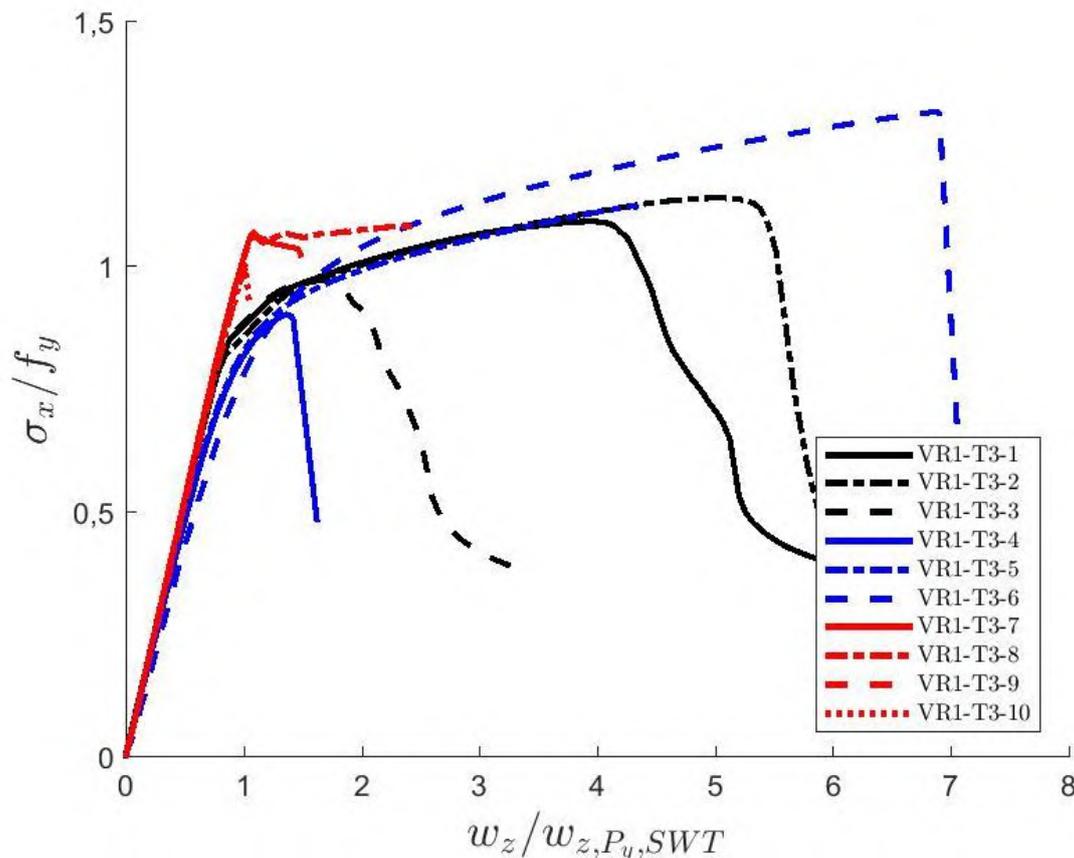


Abbildung 6-35: Diagramme der Biegeversuche vom Typ 3 der Versuchsreihe VR 1, Darstellung mit bezogenen Größen

Figure 6-35: Diagrams of the bending test of type 2 of test series VR 4, illustrated with relative variables

Die Proben VR1-T3-1 bis VR1-T3-3 haben mit Abstand die geringsten Traglasten. Die Bleche dieser Probekörper hatten eine Dicke von 0,5 mm und mit ca. 200 N/mm² die kleinsten Streckgrenzen der drei Serien. Probe VR1-T3-3 erreicht anders als die anderen beiden Proben dieser Serie nicht die Streckgrenze. Das obere Deckblech löst sich aufgrund einer mangelhaften Verklebung (s. Abbildung 6-36 b). Die Proben VR1-T3-1 und VR1-T3-2 können aufgrund von Materialverfestigung die Streckgrenze deutlich übertreffen ($\sigma_{x,max}/f_y = 1,14$ bei VR1-T3-2) bevor sich das Versagensbild gemäß Abbildung 6-36 a) ergibt. Nach dem Erreichen der Streckgrenze kommt es zu großen Durchbiegungen, die mit großen Deckblechdehnungen einhergehen. Die gedrückten Deckbleche werden so stark gestaucht, dass sich in Verbindung mit der reduzierten Steifigkeit nach dem Beginn des Fließens plastische Beulen ausbilden, die schließlich in einer über die Balkenbreite durchgehenden Knitterfalte resultieren. Die Knitterfalten der Proben mit den laufenden Nummern 1 und 2 sind zu Wellpappe gerichtet, was mit der geringeren Steifigkeit und Festigkeit für Druckbeanspruchungen des Kernmaterials in Achse 3 zu erklären ist.



Abbildung 6-36: Versagensbilder Typ 3 Serie VR1-T3-1 bis VR1-T3-3, a) Fließversagen mit anschließendem Knittern, b) Delamination von VR1-T3-3

Figure 6-36: Failure pictures of type 3 elements, series VR1-T3-1 to VR1-T3-3, a) yielding with subsequent wrinkling, b) delamination of VR1-T3-3

Die drei Proben der Serie mit den fortlaufenden Nummern 4 bis 6 wurden mit verzinkten Blechen mit einer für Sandwichelemente überdurchschnittlich hohen Blechdicken von 1 mm hergestellt. Aufgrund der großen resultierenden Stahlquerschnittsfläche wurden daher in dieser Serie die größten Traglasten der Typ 3 Proben erreicht. Bei Probe VR1-T3-4 trat eine Delamination vor dem Erreichen der Streckgrenze der Bleche ein. Um die Haftbedingungen zu verbessern wurden die Deckschichten der anderen beiden Proben dieser Serie vor der Verklebung gestrahlt. Die anderen Proben erreichten die Streckgrenze der Stahlbleche und zeigten überdies ein sehr duktileres Verhalten mit einer Bruchverformung, die das siebenfache der nach Sandwichtheorie berechnete Durchbiegung bei Fließbeginn betrug. Der Verlauf der Kurven in Abbildung 6-35 zeigt einen Anstieg der Spannungen nach Fließbeginn auf Werte die bis zu 32 % über der Fließspannung liegen. Dies ist mit der Fähigkeit dieser Bleche zur Verfestigung, die in Abbildung 6-37 a) (Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Stahlzugversuche) ebenfalls festzustellen ist.

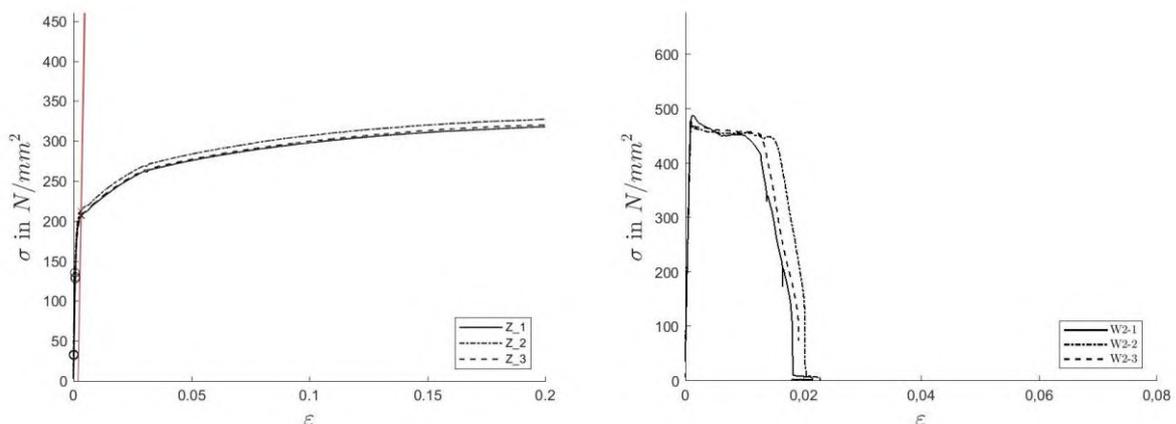


Abbildung 6-37: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Stahl-Zugversuch, a) VR1-T3-4 bis VR1-T3-6; b) VR1-T3-7 bis VR1-T3-10

Figure 6-37: Stress-strain-curves of the steel tensile test, a) VR1-T3-4 to VR1-T3-6; b) VR1-T3-7 to VR1-T3-10

Die Proben von VR1-T3-7 bis VR1-T3-10 erreichten alle die Streckgrenzen der Deckbleche, die mit 488 N/mm^2 besonders hoch liegen. Die Proben versagten schlagartig kurz nach dem Erreichen der Fließgrenze. Auch hier kommt es durch den Steifigkeitsverlust beim Eintritt des Kriechens zur Bildung von Instabilitäten. Das diese Blech aufgrund ihres Herstellungsprozesses (kaltverfestigt) keine Fähigkeit zur Spannungssteigerung über die Streckgrenze hinaus ermöglichen (s. Abbildung 6-37 b).

6.6 Zusammenfassung und Interpretation

6.6.1 Typ 1 Elemente

Biegeversuche vom Typ 1 haben in starker Abhängigkeit der verwendeten Wellpappe Knitterspannungen zwischen 124 N/mm^2 und 170 N/mm^2 erreicht. An den Stellen der Knitterfalten versagten stets der werkseitig produzierten Klebefugen zwischen Wellenbahnen und Linern auf Zug. Eine Verbesserung der Zugtragfähigkeit könnte zu einer gesteigerten Biegetragfähigkeit führen.

Allerdings sind Knitterspannungen von bis zu 170 N/mm^2 für ebene Deckschichten im Vergleich zu den Knitterspannungen von Sandwichelementen mit herkömmlichen Kernmaterialien als hoch zu bewerten. Übliche Fassadenkonstruktionen könnten mit Typ 1 Elementen realisiert werden.

Bei den Bauteilversuchen der Versuchsreihe 3 zeigte sich, dass ein Kernaufbau mit Lamellen, die untereinander nicht verbunden sind, zu tragfähigen Elementen führt. Allerdings zeigten die Probekörper an den Lammellenstößen an den Elementrändern eine größere Neigung zum Beulen. Die Schubspannungsverteilung auf benachbarte Lamellen ist hier stark eingeschränkt und das Deckblech hat am freien Rand bei den getesteten Probekörpern keinerlei Stützung. In einem kommerziell produzierten Element sind jedoch an den Längsrändern der Bleche stets Aufkantung oder Umkantungen vorhanden, die für eine Stützung des freien Randes sorgen. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss des Kernaufbaus mit Lamellen als vernachlässigbar zu bewerten ist.

6.6.2 Typ 2 Elemente

Die Elemente vom Typ 2 zeigten abgesehen von den Proben mit Schrenzpappe (VR 2) in allen Varianten die Fähigkeit, die Bleche bis zum Erreichen der Fließspannungen auszunutzen. Die Qualität der Verklebung zwischen Deckschicht und Kern stellt hierbei eine kontrollierende Größe dar. Da die Blechspannungen sehr groß werden sind auch die Abtriebskräfte an Imperfektionen und damit die Beanspruchung der Klebefuge besonders groß. Kleine Mängel, die z. B. aus einer mangelhaften Entfettung der Bleche resultieren, führen zur Delamination der gedrückten Deckschicht.

Der Kernaufbau mit Lamellen kann als grundsätzlich möglich bewertet werden. Zwar lag die Stelle des Versagens immer im Bereich von Lamellenstößen, jedoch trat das Versagen entweder erst nach sehr großen plastischen Verformungen ein (im Fall von VR 3) oder selbst wenn die Spalte zwischen 2 Lamellen ca. 10 mm betragen erst beim Erreichen der Streckgrenzen der Deckbleche. Typ 3 Elemente

6.6.3 Typ 3 Elemente

Da die Drucktragfähigkeit des Kerns bei diesem Elementtyp geringer ist als bei Typ 2 Elementen und gleichzeitig die Wärmedämmfähigkeit nicht besser ist als bei den Elementen vom Typ 2 wurden hier nur wenige Versuche durchgeführt und das Hauptaugenmerk auf Typ 2 Elemente gelegt.

Allerdings zeigten auch die Elemente vom Typ 3 die Fähigkeit die Deckschichten bis zu ihrer Streckgrenze auszunutzen. Dies gilt auch für Deckblechen mit Fließspannungen von nahezu 500 N/mm².

7 Zusammenfassung / Summary

Aufgrund der ausgezeichneten Kombination von raumabschließender, wärmedämmender und tragender Funktion werden Sandwichelemente als Dach- und Wandverkleidungen immer häufiger eingesetzt. Die üblicherweise verwendeten Elemente bestehen aus zwei Metalldeckschichten, die über ein wärmedämmendes Kernmaterial, meistens Polyurethanhartschaum (PUR) oder Mineralwolle (MW), schubsteif miteinander verbunden sind.

Die beiden am häufigsten eingesetzten Kernmaterialien PUR und Mineralwolle haben jedoch Nachteile im Hinblick auf ökologischen und gesundheitlichen Gesichtspunkte.

Um Sandwichelemente auch unter ökologischen Gesichtspunkten und in Fragen der Nachhaltigkeit interessanter zu machen, stellt sich daher die Frage nach einem alternativen Kernmaterial. In den vergangenen Jahren hat sich gezeigt, dass mit Produkten auf Zellstoffbasis in Form von Zelluloseflocken und Wellpappe geeignete Dämmstoffe hergestellt werden können. Diese Dämmstoffe zeichnen sich nicht nur dadurch aus, dass sie zu bis zu 100 % aus recyceltem Ausgangsmaterial bestehen und darüber hinaus wiederum zu 100 % recyclebar sind. Das Recycling von Papier benötigt zwar selbst auch große Energiemengen zur Produktion von Dampf und Wärme, jedoch haben deutsche Papierproduzenten bereits jetzt durch Eigenenergieproduktion sichergestellt, dass diese Energie aus erneuerbaren Quellen stammt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens IGF-Nr. 19886 N wurden die Eignung von Wellpappe als alternatives Kernmaterial für Sandwichelemente zur Verkleidung von Dach- und Wandflächen untersucht.

Hierzu wurden auf der Basis einer Literaturrecherche die wichtigsten Grundlagen zu Papier und Wellpappe einerseits und der Sandwichbauweise andererseits zusammengetragen.

Auf der Grundlage der Herleitung, dass das Material mit hinreichender Genauigkeit als orthotrop angenommen werden kann, konnten zu bestimmenden Parameter für ein elastisches Materialmodell festgelegt werden. Für die experimentelle Bestimmung der gesuchten Parameter mussten zunächst geeignete Versuchsaufbauten gefunden werden. Für die Ermittlung der Materialeigenschaften für Druckbeanspruchungen können in der Sandwichtechnik übliche Testverfahren angewendet werden. Für die Bestimmung der Zugeigenschaften und des Schubtragverhaltens wurden hierfür auf der Grundlage experimenteller und numerischer Voruntersuchungen andere Versuchsaufbauten vorgestellt, mit denen elastische Parameter und Festigkeiten von Wellpappe zuverlässig klassifiziert werden können.

An insgesamt 10 verschiedenen kommerziellen Wellpappensorten wurden Druck-, Zug- und Schubversuche in allen drei Hauptachsen des Materials zur Bestimmung der Festigkeiten, Elastizitätsmoduln sowie Schubmoduln durchgeführt. Hierbei wurden nicht nur Wellpappen unterschiedliche Aufbauten hinsichtlich Geometrie und Welligkeit sondern auch unterschiedliche Papierqualitäten getestet. Die Proben wurden manuell hergestellt, in dem zunächst größere Volumenkörper von vielen übereinander verklebten Wellpappebögen hergestellt und anschließend in die gewünschte Geometrie zugeschnitten wurden. Die Verklebung der Wellpappen untereinander

wurde in Weißleim (Dispersionsklebstoff) ein Klebstoff gefunden, der sich gut für die manuellen Probenherstellung eignet und höhere Festigkeiten liefert als die Klebungen, die bereits werksseitig zwischen den Wellenbahnen und den Deckbahnen hergestellt werden.

Die Versuche zur Bestimmung des elastischen Materialmodells konnten aufgrund der zu geringen Anzahl an Versuchen nicht statistisch ausgewertet werden. Trotz teilweise großer Streuungen ermöglichen die Versuchsergebnisse aber das Tragverhalten von Wellpappe grundsätzlich zu bewerten. Bei allen Wellpappen zeigte sich bei den Materialprüfungen, dass für Hauptachse 1 die geringsten Festigkeiten und Steifigkeiten vorliegen. Diese liegen bei Wellpappen, die aus Papieren hoher Qualität bestehen, in der Größenordnung der Parameter der herkömmlichen Kernmaterialien. Die Verwendung von Wellpappen mit Papieren, die durch zusammengesetzten aus mehreren Papierlagen hergestellt wurden, hat sich als ungünstig herausgestellt, da diese Art der Fügung zu geringen Zugtragfähigkeiten führt. In der Hauptachse 2 waren in den meisten Fällen die größten Druckfestigkeiten und Druck-E-Moduln festzustellen, da hier die ebenen Papiere und die gewellten Papiere am Lastabtrag beteiligt werden können. Obwohl in Hauptachse 3 nur die ebenen Papiere belastet werden können, zeigen sich hier die größten Zugfestigkeiten und Zug-E-Moduln. Der Grund für diesen Sachverhalt liegt darin, dass die Fasern in den Papieren der Wellpappen produktionsbedingt größtenteils in Richtung von Achse 3 ausgerichtet sind. In den Achsen 2 und 3 sind die Festigkeiten, E- und Schubmoduln für Testliner und Kraftpapiere ca. 5 bis 20 mal so groß wie die von herkömmlichen Materialien. Das Schubtragverhalten wurde hauptsächlich für zwei der drei Schubebenen analysiert, da in einem einachsigen spannenden Sandwichelement die Beanspruchung der mit Abstand schwächsten Schubebene der Hauptachsen 1 und 3 mit der Wahl der Kernausrichtung vermieden werden kann und daher von stark untergeordnetem Interesse ist.

Da Wellpappe hygroskopisch ist und die Steifigkeiten und Festigkeiten sehr stark von der Feuchtigkeit des Materials abhängen wurden alle Versuche mit zuvor klimatisierten Proben durchgeführt. Die Variation der Klimatisierung machte es möglich eine deutliche Verringerung der Steifigkeiten und Festigkeiten mit steigender Feuchte zu erkennen. Allerdings führte die Feuchtigkeit, die sich für ein vergleichsweise feuchtes Klima von 20 °C und 80 % relativer Feuchte, nur zu Einbuße der Steifigkeiten und Festigkeiten von ca. 25-30 % gegenüber der Feuchte, die sich für Normklima einstellt. Es zeigte sich aber auch, dass das Eindringen von Nässe zum vollständigen Tragfähigkeitsverlust führt und daher durch geeignete konstruktive Maßnahmen zu verhindern ist.

Die Querdehnzahlen wurden nicht ermittelt, da im Rahmen einer Studie mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode gezeigt, werden konnte, dass die Querdehnzahlen des Materials keine nennenswerte Auswirkung auf das Tragverhalten von Sandwichelementen mit Wellpappenkern haben.

In Biegeversuchen an Sandwichproben in Form von Balken und Bauteilen wurde das Verbundtragverhalten für vier ausgewählte Wellpappensorten untersucht. Auf der Grundlage theoretischer Überlegungen wurden hierfür nur drei der insgesamt sechs möglichen Kernausrichtungen getestet. Die Analyse verschiedener Produktionsabläufe führte zu der Erkenntnis, dass der Aufbau eines Sandwichelement-Kerns aus

Wellpappe aus vorgefertigten Lamellen eine leicht umsetzbare Herstellungsmöglichkeit bietet. Der Einfluss der Inhomogenität eines Kerns aus Lamellen, die nur mit den Deckschichten und nicht untereinander verklebt werden, konnte anhand der Experimente als für das Tragverhalten untergeordnet eingestuft werden, sofern gewisse Genauigkeiten im Hinblick auf die Lamellengeometrie und die Spaltmaße zwischen den Lamellen eingehalten werden. Für die Verklebung von Kern und Deckschichten wurden Polyurethanklebstoffe als besonders geeignet erkannt, da diese je nach Zusammensetzung mit der Fähigkeit ausgestattet werden können, vor dem Erhärten durch leichte Schaumbildung kleine Unebenheiten auszugleichen.

Die Biegeversuche vom Typ 1 führten bei Verwendung von hochwertigen Wellpappen aus Papieren mit hohen Frischfaseranteilen zu Trageigenschaften, die mit denen von Sandwichelementen mit herkömmlichen Kernmaterialien vergleichbar sind. Für die Elemente der Typen 2 und 3 stehen die ebenen Papiere jeweils in der XZ-Ebene der Sandwichelemente. Diese sorgen für eine derart gute Stützung der Deckschichten gegen Ausweichen aus ihrer Ebene heraus, dass auch hochfeste Stähle mit Streckgrenzen von nahezu 500 N/mm² bis zu Fließen beansprucht werden können. Auf die Verklebung ist hier jedoch besonderes Augenmerk zu legen, da schon kleine Fehlstellen zu vorzeitigem Versagen infolge von Delamination führen.

Das Langzeitverhalten der Sandwichelemente vom Typ 1 und Typ 2 wurde ebenfalls für verschiedene Klimate untersucht. Die Typ 1 Elemente zeigen ähnlich wie die herkömmlichen Materialien derart große Kriechzahlen, dass eine planmäßige andauernde Belastung von Elementen mit ebenen Deckschichten mit den Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit nicht vereinbar ist. Die Elemente vom Typ 2 zeigten hingegen so kleine zeitabhängige Verformungszuwächse, dass sich für diese Elemente möglicherweise weitere Einsatzgebiete mit planmäßiger Dauerlast erschließen lassen.

Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Pappen ergaben, dass in der Kernausrichtung von Typ 1 die besten Wärmedämmeigenschaften vorliegen. Die Dämmfähigkeit liegt nahe bei der von Mineralwollelementen. Bei Elementen von Typ 2 und Typ 3 ergaben die Messungen ähnliche Wärmeleitfähigkeiten. Diese sind allerdings so hoch, dass der Einsatz dieses Elementtyps für beheizte Wohngebäude baupraktisch kaum umsetzbar wäre. Für schwach beheizte Industriegebäude mit einem maximal zulässigen U-Wert von 0,35 W/(m²K) sind hier bereits Kerndicken von ca. 260 mm erforderlich.

Untersuchungen zum Feuchteschutz haben gezeigt, dass in einem abgeschlossenen Kern die Bildung von Kondensat nicht auftreten kann, da die Wasserabsorptionsfähigkeit von Wellpappe so groß ist, dass auch große Temperaturabfälle nur zu geringen Zunahmen der Kernfeuchte führen und damit keine relevante Auswirkung auf das Tragverhalten oder die Dämmfähigkeit haben. Langzeitexperimente an Bauteilen mit je einer Seitenkante, die nicht geschützt wurde und einer hohen Umgebungsfeuchte ausgesetzt wurden, haben gezeigt, dass Feuchtigkeit aus der Luft nur langsam in ein Element eindringt. Allerdings ist auch der davon auszugehen, dass der Vorgang erst endet, wenn sich die Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hat. Es wird daher empfohlen, keine gegenüber der Umgebung offenen Elementseiten vorzusehen.

Die Untersuchungen zum Brandverhalten konnten im Rahmen des Projekt nur in geringem Umfang durchgeführt werden. Die zwei durchgeführten SBI-Versuche und 18 Kleinbrennerversuche zeigten ein Brandverhalten, dass als schwer entflammbar, ohne brennendes Abtropfen mit mittlerer Rauchentwicklung zu klassifizieren ist.

Mit der erfolgreichen Herstellung von Musterbauteilen mit Längen von 6 m durch einen Produzenten von kommerziellen Sandwichelementen konnte die Möglichkeit zur industriellen Fertigung auf bestehenden Produktionsstraßen unter Beweis gestellt werden.

Die erzielten Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen die grundsätzliche Eignung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelmente.

8 Ausblick / Perspective

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden zahlreiche Optimierungsansätze gefunden, die eine Basis für weitere Forschungsarbeiten darstellen.

Hinsichtlich der Materialzusammensetzung gibt es für die unterschiedlichen Ausrichtungen des Kernmaterials im Element unterschiedliche Ansätze für weiter Untersuchungen.

Typ 1 Elemente führen zu einer Beanspruchung aller Papierbahnen des Kernmaterials. Kommerzielle Wellpappen, deren Zusammensetzung für die Verpackung von Waren optimiert ist, haben in der Regel stark unterschiedlichen Papierqualitäten in den einzelnen Papierlagen. Zudem werden solche Wellpappen nur in Sonderfällen mit großen Zugbeanspruchungen senkrecht zu den ebenen Papieren belastet. Demzufolge sind die Verklebungen der Papierlagen für geringe Beanspruchungen ausgelegt. Es wird großes Potenzial im Einsatz von Wellpappen, bei denen alle Liner und alle Wellenbahnen von hoher Qualität sind und bei denen gleichzeitig die Verklebung der Wellenbahnen und Liner besonders tragfähig ausgeführt wird, vermutet.

Typ 2 und Typ 3 Elemente zeigen derart große Steifigkeiten und Tragfähigkeiten, dass im Hinblick auf die eingesetzten Wellpappen größeres Augenmerk auf die Möglichkeit, Material einzusparen gelegt werden kann. Die Verwendung größerer Wellenteilungen und der Einsatz von mehrwelligen Wellpappen, um die Dopplung von Linerschichten in der Klebefuge von zwei Wellpappebögen zu reduzieren, gesehen. Die geringen Steifigkeiten und Festigkeiten der untersuchten Schrenzpappen (VR 2) und einer sehr leichten Testlinerqualität (VR 5) mit einer A-Wellenteilung haben aber gezeigt, dass die verwendeten Papiere entweder relativ hochwertig sein müssen oder die Wellenteilung nicht größer als die einer C-Welle sein sollte.

Ein großes Feld für weitere Forschungsarbeiten wird in der Kombination der guten Wärmedämmfähigkeit der Elemente vom Typ 1 mit den sehr guten Trageigenschaften der Elemente vom Typ 2 gesehen. IN Abbildung

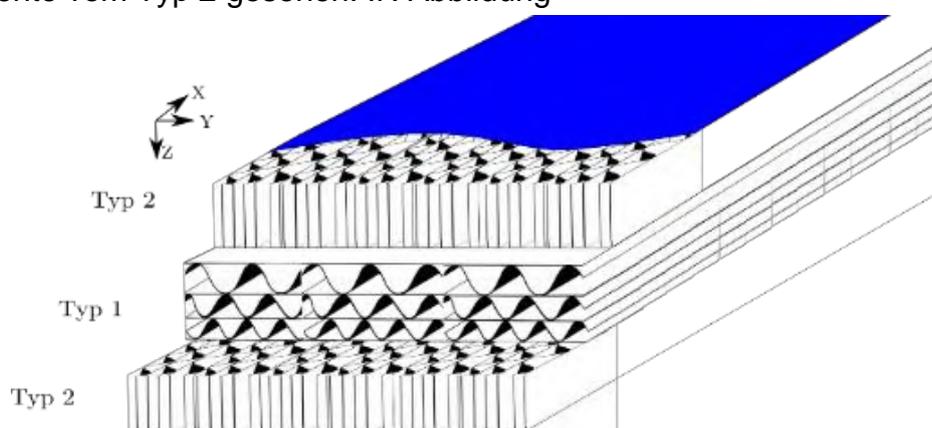


Abbildung 8-1: Kombination der Elementtypen 1 und 2 durch Variation der Kernausrichtung in Elementdickenrichtung

Figure 8-1: Combination of the element types 1 and 2 by variation of the core orientation along the thickness of the elements

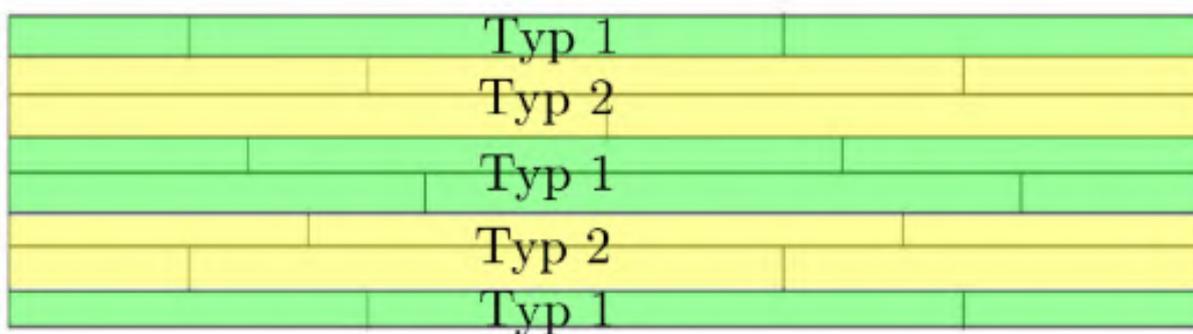


Abbildung 8-2: Kombination der Elementtypen 1 und 2 durch Variation der Kernausrichtung in Elementquerrichtung

Figure 8-2: Combination of the element type 1 and 2 by variation of the core orientation along the cross direction of the elements

Für die Ausbildung baukonstruktiver Details wurde davon ausgegangen, dass diese wie bei herkömmlichen Kernmaterialien ausgeführt werden können. Die Umsetzung von Längs- und Querfugen, Gebäudeecken und Abschlusskanten sowie die Anschlussausbildung an Öffnungen und Befestigungen muss jedoch noch untersucht werden. Der Schutz von freien Querschnittsflächen der Sandwichelemente vor dem Eindringen von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft wird empfohlen. Die Möglichkeiten zur Ausführung dieses Schutzes sind aber vielfältig und bedürfen weiterer Forschungsarbeiten.

Die Versuche zum Langzeitverhalten zeigen vor allem bei den Elementen vom Typ 2 einen sehr geringen Neigung zum Kriechen und damit das Potenzial zur Nutzung von solchen Elementen, die über die Verkleidung von Dach und Wandflächen hinausgehen. Mit begehbaren Zwischendecken oder Raum-in-Raum-Lösungen seien hier zwei Möglichkeiten genannt. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von weiteren Forschungsfragen. Neben dem Kriechverhalten unter anderen Temperaturen müsste dann auch das Schwingungsverhalten analysiert werden.

Im Hinblick auf die Versuchstechnik wäre es wünschenswert für die Achsen 2 und 3 der Wellpappe Versuchsaufbauten zu entwickeln, bei denen die Zugproben aus einem fertigen Element entnommen werden können. Die Geometrie der knochenförmigen Probekörper, die in dieser Arbeit eingesetzt wurden, lässt das nicht zu. Gleiches gilt für die Probekörper der Schubversuche von Schubebene 1-2. Anders als bei Schubebene 2-3, für die die Proben immer aus einem Element von Typ 2 herausgeschnitten werden können, ist es nicht einfach möglich, eine Schubprobe für die Ebene 1-2 aus einem Typ 1-Element zu entnehmen. Kompakte Versuchsaufbauten mit optischen Messverfahren können hierfür eine geeignete Möglichkeit darstellen.

Das Brandverhalten wurde nur oberflächlich untersucht und stellt weiteren Forschungsbedarf dar. Auch der Einsatz von flammhemmenden oder flammfesten Ausrüstungen der Wellpappen stellt eine interessante Fragestellung dar.

9 Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

- HEYDEN & LANGE (2016) Heyden, Aaron von der; Lange, Jörg (2016): Experimental assessment of the utilisation of corrugated cardboard as a core material for sandwich panels. In: Alphose Zingoni (Hg.): Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, 5-7 September 2016. Boca Raton: CRC Press, S. 918–923.
- HEYDEN ET AL. (2016) Heyden, Aaron von der; Lange, Jörg; Rädels, Felicitas (Hg.) (2016): Experimentelle Untersuchungen zur Eignung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente. DAST-Forschungskolloquium. Essen. DAST.
- HEYDEN & LANGE (2017) Heyden, Aaron von der; Lange, Jörg (2017): Assessment of the Utilisation of Corrugated Cardboard;
- LANGE ET AL. (2019) Lange, Jörg; Heyden, Aaron von der; Grimm, Sören (2019): Sandwich panels in buildings: Core, structure and design, The Seventh International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation. Cape Town, South Africa, September 2019

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung der Projektergebnisse in der Fachzeitschrift „Stahlbau“ (voraussichtlich Ausgabe 11/2020)
- von der Heyden, A.: Untersuchungen zur Eignung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente. Dissertation, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TU Darmstadt, Ende 2020.

10 Literaturverzeichnis

- ABAQUS Inc. (2018): ABAQUS. Version : Dassault Systemes.
- Ambartsumyan, S. A.; Khachatryan, A. A. (1966): On Multimodulus Elasticity Theory. Übersetzung ins Englische durch National Aeronautics and Space Administration (NASA) 1967. In: *Mekhanika Tverdogo Tela* (6), S. 64–67.
- Ansys Inc. (2018): ANSYS®. Mechanical. Version 18.1.
- Antonatus, Edith (2016): Brandschutz von Baukonstruktionen mit Kunststoffen. In: Nabil A. Fouad (Hg.): Bauphysik Kalender 2016. Brandschutz, 16. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn (Bauphysik-Kalender, 16.2016). Online verfügbar unter <http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN978-3-433-03128-5/>.
- Ayan, Özlem (2009): Cardboard in Architectural Technology and Structural Engineering: A Conceptual Approach to Cardboard Buildings in Architecture. Dissertation. Unter Mitarbeit von Andrea Deplazes und Mario Fontana: ETH Zurich.
- Ban, Shigeru; Bruderlein, Claude; Kimmelman, Michael; Kitayama, Kō; Pitt, Brad; Pollock, Naomi et al. (Hg.) (2014): Shigeru Ban - humanitarian architecture. On the occasion of the Exhibition "Shigeru Ban: Humanitarian Architecture", on view at the Aspen Art Museum August 9 - October 5, 2014. Aspen Art Museum; Exhibition "Shigeru Ban: Humanitarian Architecture". Aspen, Colo., New York, NY: Aspen Art Press; d.a.p. Distributed Art Publ.
- Bank, L. C.; Gerhardt, T. D. (2016): Paperboard tubes in structural and construction engineering. In: Bhavna Sharma und Kent Alexander Harries (Hg.): Nonconventional and vernacular construction materials. Characterisation, properties and applications. Cambridge, MA: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing series in civil and structural engineering, number 57), S. 453–480.
- Barth, Christian Dr.-Ing; Rustler, Walter Dipl.-Ing (2013): Finite Elemente in der Baustatik-Praxis. Mit vielen Anwendungsbeispielen. 2nd ed. Berlin: Beuth (Bauwerk). Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=2033124>.
- Baum, Gary A. (1984): The elastic properties of paper: a review. The Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin. In: *IPC Technical Paper Series* (145).
- Berner, Klaus (2009): Selbsttragende und aussteifende Sandwichbauteile - Möglichkeiten für kleinere und mittlere Gebäude. In: *Stahlbau* 78 (5), S. 298–307. DOI: 10.1002/stab.200910042.
- Berner, Klaus (2010): Gekrümmte Sandwichpaneele. In: *Stahlbau* 79 (5), S. 328–335. DOI: 10.1002/stab.201001325.
- Berner, Klaus; Kurpiela, Aneta; Pfaff, Ute (2007): SandFlat - Entwicklung und Erforschung von Sandwichelementen für Flachdacheindeckungen. Forschungsbericht.
- Berner, Klaus; Misiek, Thomas; Raabe, Oliver (2018): Sandwichbauteile mit vorgehängter Fassade - Bemessungskonzepte. In: *Stahlbau* 87 (5), S. 427–437. DOI: 10.1002/stab.201810595.

- Betz Dämmelemente GmbH (2018): Technisches Datenblatt FairWell ZVE 040. Hg. v. Lothar Betz.
- Betz Dämmelemente GmbH (2019): Internetauftritt der Firma. Online verfügbar unter <https://www.betz-daemmelemente.de/>, zuletzt geprüft am 09.04.2019.
- BG BAU (2018): Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft. Umgang mit Mineralwolle-Dämmstoffen. Online verfügbar unter https://www.bgbau-medien.de/bau/g_minwolle/2.htm, zuletzt geprüft am 15.11.2018.
- Blechs Schmidt, Jürgen (2013a): Einführung und historischer Abriss. In: Jürgen Blechs Schmidt (Hg.): Papierverarbeitungstechnik. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 17-21.
- Blechs Schmidt, Jürgen (2013b): Erzeugung von Papier, Karton und Pappe. Technologie der Papiererzeugung. In: Jürgen Blechs Schmidt (Hg.): Papierverarbeitungstechnik. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 30-41.
- Blechs Schmidt, Jürgen (Hg.) (2013c): Papierverarbeitungstechnik. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- Blechs Schmidt, Jürgen (Hg.) (2013d): Taschenbuch der Papiertechnik. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Bossel (1962): Festigkeit und Steifigkeit von Papierwaben bei Druck- und Schubbeanspruchung: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Cassie, A. B. D.; Baxter, S. (1944): Wettability of porous surfaces. In: *Transaction of the Faraday society* (40), S. 545–551.
- Catton, I.; Edwards, D. K. (1967): Effect of Side Walls on Natural Convection Between Horizontal Plates Heated From Below. In: *Journal of Heat Transfer* 89 (4), S. 295–299. DOI: 10.1115/1.3614388.
- Cripps, Andrew (2007): Building with Cardboard: The Reality. Buro Happold Consulting Engineers. Online verfügbar unter www.irbnet.de/daten/iconda/CIB2464.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Davies, J. M. (Hg.) (2008): Lightweight Sandwich Construction. New York, NY: John Wiley & Sons.
- DiBt (2016a): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-2022. Wärmedämmplatte aus Wellpappe "ZVE (Zellstoffverbundelement)".
- DiBt (2016b): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-280. Zellulosefaser-Dämmstoffe "isofloc".
- Diekmann, Susanne; Grochtmann, Thomas; Wiedemann, Peter (2016): Fachmodul Dämmen und Dämmstoffe. In: *Nachwachsende Rohstoffe*.
- DIN 18234 (2018): Baulicher Brandschutz großflächiger Dächer - Brandbeanspruchung von unten: Beuth Verlag.
- DIN 4102-1 (1998): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen -Teil 1 : Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen: Beuth Verlag (ICS 85.080.30).
- DIN 53121 (2014): Prüfung von Papier, Karton und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode: Beuth Verlag.

- DIN 53142-1 (2014): Prüfung von Pappe - Durchstoßprüfung - Teil 1: Prüfung mit dem Pendelschlagwerk: Beuth Verlag.
- DIN 55468-1 (2015): Packstoffe – Wellpappe – Teil 1: Anforderungen, Prüfung: Beuth Verlag (ICS 85.080.30).
- DIN EN 12667 (2001): Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät: Beuth Verlag.
- DIN EN 13501-2 (2016): Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2016: Beuth Verlag (ICS 13.220.50).
- DIN EN 13823 (2015): Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Deutsche Fassung EN 13823:2010+A1:2014: Beuth Verlag.
- DIN EN 14509 (2013): Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten - Werkmäßig hergestellte Produkte - Spezifikationen; Deutsche Fassung EN 14509:2013: Beuth Verlag (ICS 91.100.60).
- DIN EN 14509-2 (2017): Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten – Werkmäßig hergestellte Produkte. Teil 2: Tragende Anwendungen - Befestigungen und mögliche Nutzung zur Stabilisierung von einzelnen tragenden Bauteilen; Deutsche und Englische Fassung prEN 14509-2:2017: Beuth Verlag (ICS 91.100.60).
- DIN EN 789 (2004): Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen; Deutsche Fassung EN 789:2004: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 11925-2 (2011): Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung - Teil 2: Einzelflammentest (ISO 11925-2:2010); Deutsche Fassung EN ISO 11925-2:2010: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 2759 (2014): Pappe - Bestimmung der Berstfestigkeit; Deutsche Fassung EN ISO 2759:2014: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 3035 (2012): Wellpappe - Bestimmung des Flachstauchwiderstandes: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 3037 (2013): Wellpappe - Bestimmung des Kantenstauchwiderstandes (Verfahren für ungewachste Kanten); Deutsche Fassung EN ISO 3037:2013: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 3039 (2011): Wellpappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Lagen nach Trennung: Beuth Verlag.
- Dlupal Software GmbH (2018): RFEM. Version 5.18.
- Eekhout, Mick; Verheijen, Fons; Visser, Ronald (Hg.) (2008): Cardboard in architecture. Amsterdam: IOS Press (Research in architectural engineering series, v. 7).
- Ferry, John D. (1980): Viscoelastic properties of polymers. 3d ed. New York: Wiley.

- FMI (2018): Internetseite des FMI, Herstellung von Steinwolle. Fachverband Mineralwollindustrie e.V. Online verfügbar unter <https://www.fmi-mineralwolle.de/mineralwolle/steinwolle/>, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 10.10.2018.
- Forum Nachhaltiges Bauen (2016). Online verfügbar unter www.nachhaltiges-bauen.de, zuletzt geprüft am 10.08.2016.
- Gibson, Lorna J.; Ashby, Michael F. (1988): Cellular solids. Structure and properties. Oxford: Pergamon Press (International series on materials science and technology).
- Grimm, Sören; Lange, Jörg (2018): Potention of Shell Structures Made of Linear Manufactured Uniaxially Curved Sandwich Panels. 12th International Conference on Sandwich Structures ICCS-12. Lausanne, Schweiz, 2018.
- Gruber, E. (2011): Papier und Polymerchemie. Vorlesungsskriptum zum Lehrgang "Papiertechnik" an der Berufsakademie Karlsruhe.
- Gustafsson, Per-Johan; Niskanen, Kaarlo (2012): Paper as an engineering material. In: Kaarlo Niskanen (Hg.): Mechanics of paper products. 1st ed. Berlin, Boston: Walter de Gruyter, S. 5–28.
- Habenicht, Gerd (2006): Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 5., erw. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Haslach, Henry W., JR. (2000): The Moisture and Rate-Dependent Mechanical Properties of Paper: A Review. In: *Mechanics of Time-Dependent Materials* 4, S. 169–210.
- He, Xiao-ting; Zheng, Zhou-lian; Sun, Jun-yi; Li, Ying-min; Chen, Shan-lin (2009): Convergence analysis of a finite element method based on different moduli in tension and compression. In: *International Journal of Solids and Structures* 46 (20), S. 3734–3740. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.07.003.
- Heselius, Lars (2005): Wrinkling analysis of flat faced sandwich panels with respect to bonding strength and core properties with mineral wool as core material.
- Heyden, Aaron von der; Lange, Jörg (2016): Experimental assessment of the utilisation of corrugated cardboard as a core material for sandwich panels. In: Alphose Zingoni (Hg.): Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, 5-7 September 2016. Boca Raton: CRC Press, S. 918–923.
- Heyden, Aaron von der; Lange, Jörg (2017): Assessment of the utilisation of corrugated cardboard as a core material for sandwich panels. In: *ce/papers* 1 (2-3), S. 1716–1725. DOI: 10.1002/cepa.215.
- Heyden, Aaron von der; Lange, Jörg; Rädels, Felicitas (Hg.) (2016): Experimentelle Untersuchungen zur Eignung von Wellpappe als Kernmaterial für Sandwichelemente. DAST-Forschungskolloquium. Essen. DAST.
- Heyder, M.; Öchsner, A.; Ströhla, S. (2002): Bewertung von Spannungszuständen bei der experimentellen Bestimmung des Schubmoduls an zellularen Materialien. In: *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik* 33, S. 85–89.

- Hingerl, Kurt; Aschauer, Hans (1995): Transparente Wäremdämmung mit Papierwaben. In: *Bauphysik*, 1995 (17), S. 44–47.
- Holik, Herbert (2013a): Erzeugung von Papier, Karton und Pappe. Maschinen und Anlagen zur Papiererzeugung. In: Jürgen Blechschmidt (Hg.): *Papierverarbeitungstechnik*. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, S. 45–110.
- Holik, Herbert (Hg.) (2013b): *Handbook of paper and board*. 2nd, rev. and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH.
- IFBS (2004): Fachinformation 4.02 - Fugendichtheit im Stahlleichtbau.
- IFBS (2018): Brandschutz im Metalleichtbau (Fachregeln des Metalleichtbaus).
- IFBS (2019): Baulicher Brandschutz großflächiger Dächer nach DIN 18234 (Fachregeln des Metalleichtbaus).
- Jones, Robert M. (1976): Apparent Flexural Modulus and Strength of Multimodulus Materials. In: *Journal of Composite Materials* 10 (4), S. 342–354. DOI: 10.1177/002199837601000407.
- Jones, Robert M. (1977): Stress-strain relations for materials with different moduli in tension and compression. In: *AIAA Journal* 15 (1), S. 16–23. DOI: 10.2514/3.7297.
- Kalweit, Andreas; Paul, Christof; Peters, Sascha; Wallbaum, Reiner (Hg.) (2012): *Handbuch für Technisches Produktdesign. Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Klein, Bernd (2013): *Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg (Studium).
- Koşak Söz, Çağla; Trosien, Simon; Biesalski, Markus (2018): Superhydrophobic Hybrid Paper Sheets with Janus-Type Wettability. In: *ACS applied materials & interfaces* 10 (43), S. 37478–37488. DOI: 10.1021/acsami.8b12116.
- Koschade, Rolf (2011): *Sandwichbauweise. Konstruktion, Systembauteile, Ökologie*. München: Institut f. intern. Architektur-Dok.
- Kunkel, Christina (2017): *Untersuchungen zur Schubfeldwirkung von Sandwichelementen*. Dissertation: Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt.
- Kurpiela, Aneta (2013): *Optimierung von Sandwichwandbauteilen mit PUR-Kern und Stahldeckschicht*. Dissertation: Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt.
- Kurpiela, Aneta; Lange, Jörg (2013): Optimierung von Sandwichbauteilen. In: *Stahlbau* 82, S. 843–850. DOI: 10.1002/stab.201810595.
- Lange, Jörg; Berner, Klaus (2010): Sandwichelemente im Hochbau. In: Ulrike Kuhlmann (Hg.): *Stahlbau-Kalender 2010*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, S. 643–699.
- Lange, Jörg; Heyden, Aaron von der; Grimm, Sören (2019): *Sandwich panels in buildings: Core, structure and design*.

- Latka, Jerzy F. (2018): Paper structures. 165-266 Pages / A+BE | Architecture and the Built Environment, No 19 (2017): Paper in architecture. DOI: 10.7480/ABE.2017.19.3758.
- Leisewitz, André; Kruse, Hermann; Schramm, Engelbert (2000): Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel. Band I: Ergebnisse und zusammenfassende Übersicht. Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu). Unter Mitarbeit von Öko-Recherche. Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Frankfurt/M.
- Lübke, Julia; Wettlaufer, Marius; Kiziltoprak, Nihat; Drass, Michael; Schneider, Jens; Knaack, Ulrich (2018): Honeycomb-Paperboard Glass Composite Beams. In: *ce/papers* 2 (5-6), S. 57–69. DOI: 10.1002/cepa.910.
- Lüpke, T. (2015): Grundlagen mechanischen Verhaltens. In: Wolfgang Grellmann und Sabine Seidler (Hg.): *Kunststoffprüfung*. 3., aktualisierte Aufl. München: Hanser, S. 89–91.
- Maas, Anton (2017): Wärmeschutz. In: Wolfgang M. Willems (Hg.): *Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. Unter Mitarbeit von Peter Häupl, Martin Homann, Christian Kölzow, Olaf Riese, Anton Maas, Gerrit Höfker und Christian Nocke. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch), S. 3–154.
- Mark, Richard E.; Habeger, D. H.; Borch, J.; Lyne, M. B. (Hg.) (2002): *Handbook of physical testing of paper*. 2. ed., rev. and expanded. New York, NY: Dekker.
- Medri, Gianluca (1982): A Nonlinear Elastic Model for Isotropic Materials With Different Behaviour in Tension and Compression. In: *Journal of Engineering Materials and Technology* (104), S. 26–28.
- Meissner, J. (1985): Mechanisches Verhalten. In: Hans Batzer, H. Baur und H. Breuer (Hg.): *Polymere Werkstoffe*. Band 1 - Chemie und Physik, Bd. 1. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, S. 336–362.
- Mensing, Herrmann (2013): Wellpappe und Verpackungen aus Wellpappe. In: Jürgen Blechschmidt (Hg.): *Papierverarbeitungstechnik*. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, S. 311–335.
- Möller, Ralf (2014): Some basic conditions for the application of lightweight construction elements. Treviso (Advancements for Metal Buildings).
- Nau, Maximilian; Seelinger, David; Biesalski, Markus (2018): Functional surface coatings from tailor-made long-chain hydroxypropyl cellulose ester nanoparticles. In: *Cellulose* 25 (10), S. 5769–5780. DOI: 10.1007/s10570-018-1981-2.
- Nelke, Harald (2018): Tragfähigkeit von Sandwichelementen unter Biegung und Querdruck. Dissertation. Unter Mitarbeit von Jörg Lange und Dieter Ungermann. Darmstadt: Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt.
- Niskanen, Kaarlo (Hg.) (2012): *Mechanics of paper products*. 1st ed. Berlin, Boston: Walter de Gruyter.
- Ökologisch Bauen (2019): Onlineportal. Beitrag zum Zellstoffverbundelement. Online verfügbar unter www.oekologisch-bauen.info/baustoffe/naturdaemmstoffe/zellstoffverbundelemente-zvw.html, zuletzt geprüft am 09.04.2019.

- Onusseit, Hermann (2004): Klebstoffe der Natur. Anwendung und Perspektiven für die Technik. In: *Biologie in unserer Zeit* 34 (5), S. 307–314. DOI: 10.1002/biuz.200410259.
- Pflug, Jochen; Verpoest, Ignaas; Bratfisch, Philipp; Vandepitte, Dirk (1999): Kontinuierliche Herstellung von Kernmaterialien für Sandwichbauteile im Automobilbau. In: *VDI Berichte* (1595).
- Pflug, Jochen; Xinyu, Fan; Vangrimde, Bart; Verpoest, Ignaas; Bratfisch, Philipp; Vandepitte, Dirk (2002): Development of a sandwich material with polypropylene/natural fibre skins and paper honeycomb core. Proceedings of 10th European Conference on Composite Materials (ECCM-10). Brugge, Belgium, 2002.
- Plantema, F. J. (1966): Sandwich Construction. The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates, and Shells.
- Pohl, Almut (2009): Strengthened corrugated paper honeycomb for application in structural elements. Dissertation. Unter Mitarbeit von Andrea Deplazes und Mario Fontana: ETH Zurich.
- Rädel, Felicitas; Lange, Jörg (2018): Dichtigkeit von Sandwichelementkonstruktionen - Wasser- und Luftdichtigkeit in Längs- und Fensteranschlussfugen. In: *Stahlbau* 87 (7), S. 687–694. DOI: 10.1002/stab.201810626.
- Roth, Klaus (2006): Chemie kontra Papierzerfall. Papierkonservierung. In: *Chem. Unserer Zeit* 40 (1), S. 54–62. DOI: 10.1002/ciuz.200600376.
- Russ, Alber; Juraj, Schwartz; Boháček, Stefan; Lübke, Heinrich; Ihnat, Vladimír; Pažitný, Andrej (2013): Reuse of old Corrugated Cardboard in Constructional and Thermal Insulating Boards. In: *WOOD RESEARCH* 58 (3), S. 505–510.
- Sadeghian, Pedram; McCracken, Aidan (2017): Green Sandwich Composites Fabricated from Flax FRP Facings and Corrugated Cardboard Cores. 17th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (XVII NOCMAT 2017). Merida, Yucatan, Mexico, 2017.
- Sadeghian, Pedram; McCracken, Aidan (2018): Corrugated cardboard core sandwich beams with bio-based flax fiber composite skins. In: *Journal of Building Engineering* 20, S. 114–122. DOI: 10.1016/j.job.2018.07.009.
- Salmén, Lennart; Hagen, Roger (2002): Viscoelastic Properties. In: Richard E. Mark, D. H. Habeger, J. Borch und M. B. Lyne (Hg.): Handbook of physical testing of paper. 2. ed., rev. and expanded. New York, NY: Dekker.
- Sangl, Reinhard (2013): Streichen von Papier und Karton. In: Jürgen Blechschmidt (Hg.): Taschenbuch der Papiertechnik. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, S. 423–478.
- Schäfer, Stefan; Groche, Peter; Lange, Jörg (2018): Flächentragwerke aus gekrümmten Sandwichelementen. Ein interdisziplinäres Forschungsvorhaben der TU Darmstadt untersucht die Entwicklung und Herstellung von gekrümmten Sandwichpaneelen für frei geformte Dach- und Wandkonstruktionen. Unter Mitarbeit von Jakob Reising, Matthias Moneke und Sören Grimm. Hg. v. DETAIL-Zeitschrift für Architektur + Baudetail. Online verfügbar unter <https://www.detail.de/artikel/flaechentragwerke-aus-gekrueemnten-sandwichelementen-31749/>, zuletzt geprüft am 14.02.2019.

- Schaffrath, Heinz-Joachim; Tillmann, Otmar (2013): Paper and Board Grades and Their Properties. In: Herbert Holik (Hg.): Handbook of paper and board. 2nd, rev. and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH, S. 1035–1058.
- Schönwälder, Julia; Rots, Jan (2008): Mechanical Behaviour of Cardboard in Construction. In: Mick Eekhout, Fons Verheijen und Ronald Visser (Hg.): Cardboard in architecture. Amsterdam: IOS Press (Research in architectural engineering series, v. 7), S. 131–145.
- Schönwälder, Julia; Rots, Jan; Veer, F. A. (2004): Determination and modelling of the mechanical behaviour of cardboard as a building material. In: Joost Walraven, Johan Blaauwendraad und Tom Scarpas (Hg.): Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, Bd. 1. Delft, Niederlande, 16-19 Juni 2004, S. 413–421.
- Schumacher, Karl-Heinz; Fonseca, Gledison; Al-Hellani, Rabie (2011): Verwendung Synthetischer Klebstoffe für die Herstellung von Wellpappe. Angemeldet durch BHS Corrugated Maschinen-und Anlagenbau GmbH am 2011. Anmeldenr: 11712588.0. Veröffentlichungsnr: EP 2 555 917 B1. Prioritätsdaten: 2016.
- Shaw, Montgomery T.; MacKnight, William J. (2005): Introduction to Polymer Viscoelasticity. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Stamm, Klaus; Witte, Horst (1974): Sandwichkonstruktionen. Berechnung, Fertigung, Ausführung. Vienna: Springer Vienna (Ingenieurbauten, Theorie und Praxis, 3).
- Steadman, Rob (2002): Corrugated Board. In: Richard E. Mark, D. H. Habeger, J. Borch und M. B. Lyne (Hg.): Handbook of physical testing of paper, Bd. 11. 2. ed., rev. and expanded. New York, NY: Dekker, S. 563–660.
- Stroud, C. (1965): Experimental Verification of an Analytical Determination of Overall Thermal Conductivity of Honeycomb-Core Panels. In: *Technical Note D-2866*.
- Sun, Jun-yi; Zhu, Hai-qiao; Qin, Shi-hong; Yang, Da-lin; He, Xiao-ting (2010): A review on the research of mechanical problems with different moduli in tension and compression. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (9), S. 1845–1854. DOI: 10.1007/s12206-010-0601-3.
- Swann, R.; Pittmann, C. (1961): Analysis of Effective Thermal Conductivities of Honeycomb-Core and Corrugated-Core Sandwich Panels. In: *Technical Note D-714*.
- Uhlig, Konrad (2006): Polyurethan-Taschenbuch. Mit 34 Tabellen. 3. Aufl. München: Hanser.
- van Dooren, Elise; Verheijen, Fons (2008): Cardboard in Architecture; an Overview. In: Mick Eekhout, Fons Verheijen und Ronald Visser (Hg.): Cardboard in architecture. Amsterdam: IOS Press (Research in architectural engineering series, v. 7), S. 21–47.
- VDW (2008): Natürlich Wellpappe - Die Umwelt schonen und nachhaltig wirtschaften. Verband der Wellpappenindustrie e. V. Online verfügbar unter http://wellpappen-industrie.de/data/04_Verband/05_Publikationen/04_Broschueren/Umweltbroschuere.pdf, zuletzt aktualisiert am 10.08.2015.

- VDW (2018): Zahlen und Fakten - Daten für die Wellpappenindustrie. Ausgabe 2018. - Verband der Wellpappenindustrie e.V.
- VDW (2019): Internetseite - Wellpappe Wissen. Verband der Wellpappenindustrie e.V. Online verfügbar unter <https://www.wellpappe-wissen.de/>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.
- Wagner, Kai-Erhard (2002): Simulation und Optimierung des Wärmedämmvermögens von PUR-Hartschaum - Wärme- und Stofftransport sowie mechanisch Verformung. Dissertation.
- Wilken, Renke (2013): Verfahren der Papierverarbeitung. In: Jürgen Blechschmidt (Hg.): Papierverarbeitungstechnik. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, S. 130–241.
- Willems, Wolfgang M. (Hg.) (2017): Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. Unter Mitarbeit von Peter Häupl, Martin Homann, Christian Kölzow, Olaf Riese, Anton Maas, Gerrit Höfker und Christian Nocke. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Yao, Wen-Juan; Ye, Zhi-Ming (2004): Analytical solution of bending-compression column using different tension-compression modulus. In: *Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University* 25 (9), S. 983–993.

Anhang A – Materialversuche

Anhang B – Biegeversuche an Sandwichproben

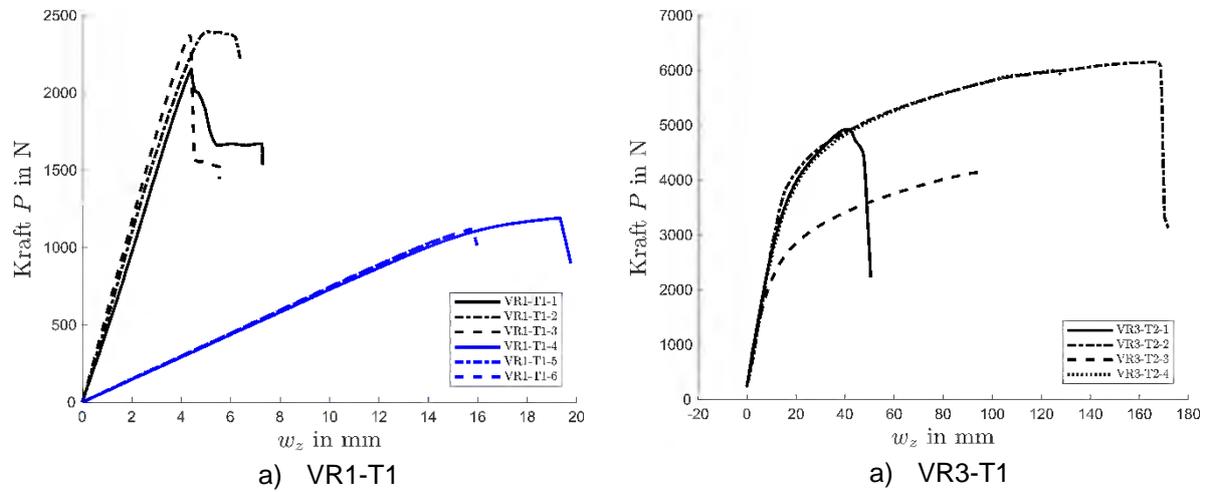


Abbildung A.D-1: Kraft-Weg-Diagramme der Biegeversuche vom Typ 1

Figure A.D-1: Load-deflection-curves of the bending test of type 1

Anhang C – Brandversuche

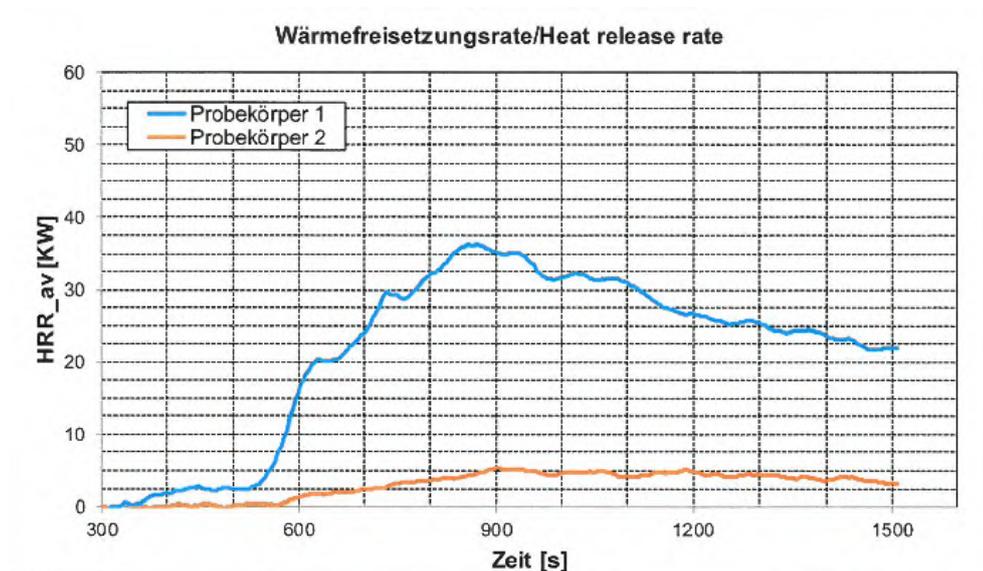


Abbildung A.B-1: Wärmefreisetzungsrate der SBI-Versuche (MPA-Braunschweig)
Figure A.B-1: Heat release rate of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)

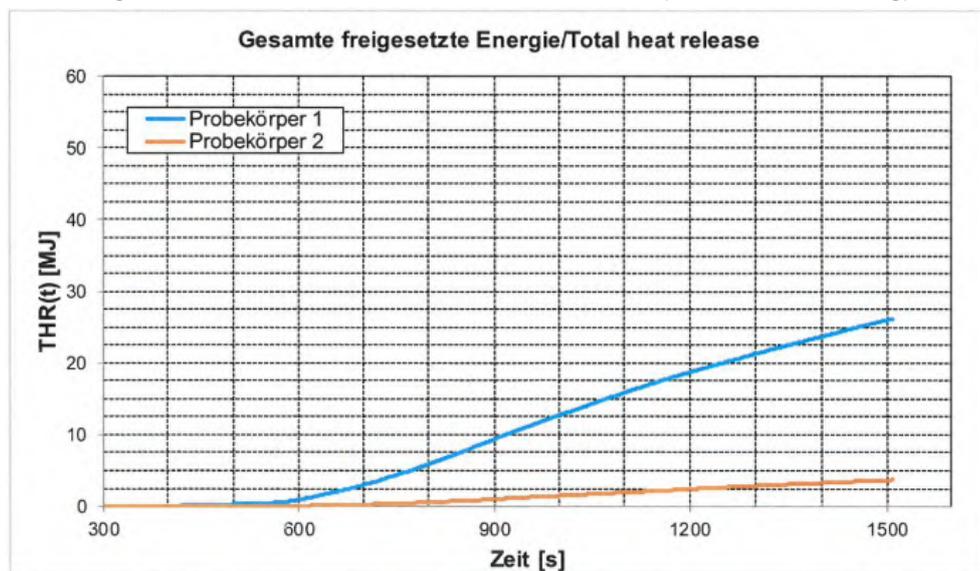


Abbildung A.B-2: Gesamte freigesetzte Energie der SBI-Versuche (MPA-Braunschweig)
Figure A.B-2: Total heat release of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)

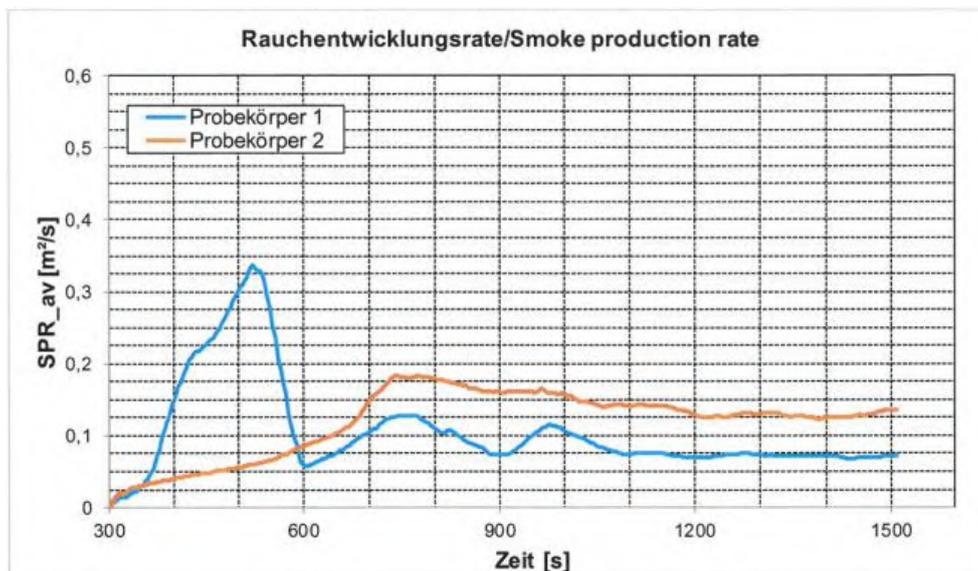


Abbildung A.B-3: Rauchentwicklungsrate der SBI-Versuche (MPA-Braunschweig)
Figure A.B-3: Smoke production rate of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)

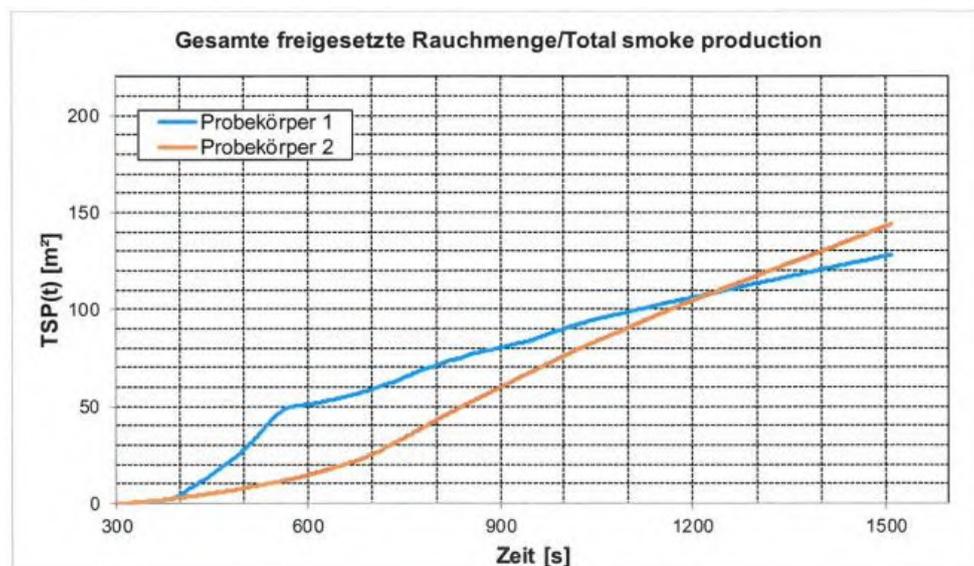


Abbildung A.B-4: Gesamte freigesetzte Rauchmenge der SBI-Versuche (MPA-Braunschweig)
Figure A.B-4: Total smoke production of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)

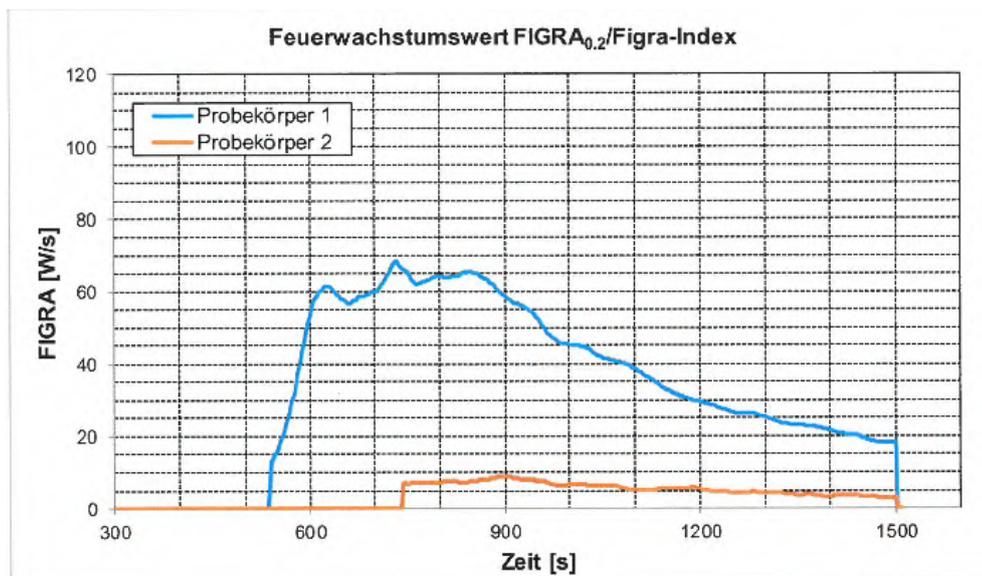


Abbildung A.B-5: Feuerwachstumswert $FIGRA_{0,2}$ der SBI-Versuche (MPA-Braunschweig)

Figure A.B-5: Fire growth rate $FIGRA_{0,2}$ of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)

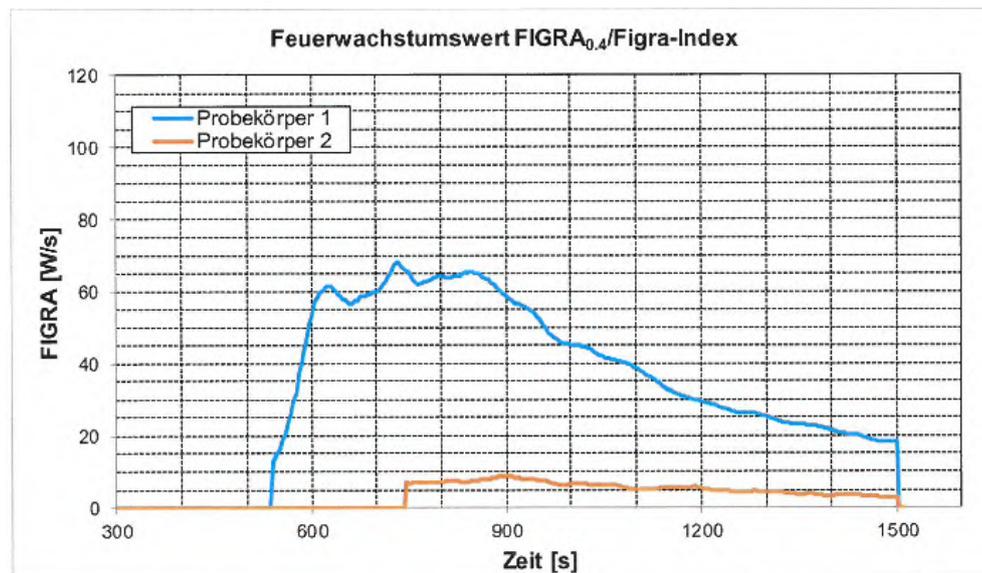


Abbildung A.B-6: Feuerwachstumswert $FIGRA_{0,4}$ der SBI-Versuche (MPA-Braunschweig)

Figure A.B-6: Fire growth rate $FIGRA_{0,4}$ of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)

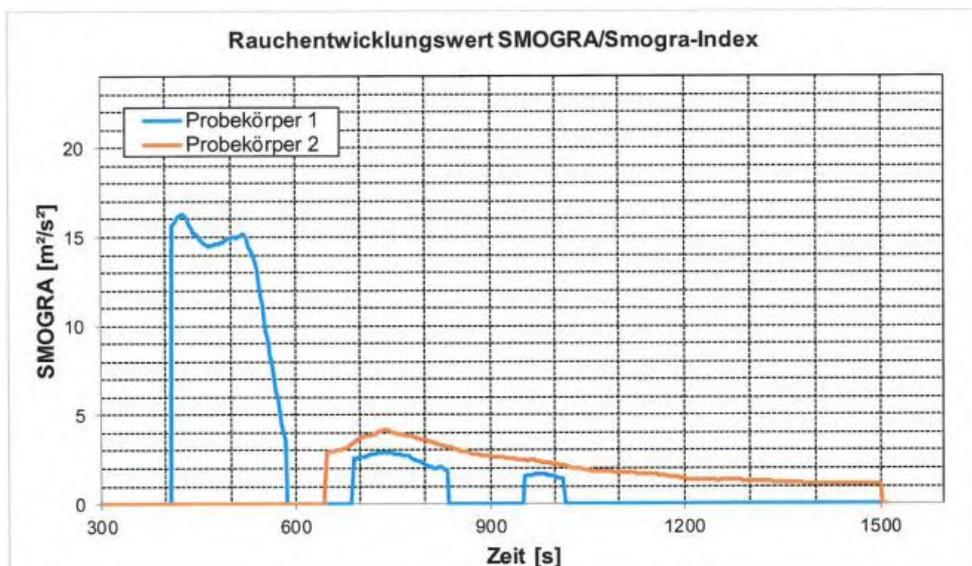


Abbildung A.B-7: Rauchentwicklungswert der SBI-Versuche (MPA-Braunschweig)

Figure A.B-7: Smoke growth rate of the SBI-tests (MPA-Braunschweig)