

Untersuchungen zum Zeitstandverhalten von Schachteln aus Wellpappe

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissen-
schaften
Fachbereich Holzwirtschaft
der Universität Hamburg

Vorgelegt von

Viktoria Köstner

aus Wallenfels, Bayern

Hamburg, den 21. März 2018

Tag der Disputation: 18.05.2018

Folgende Gutachter empfehlen die Annahme der Dissertation:

Prof. Dr. J. B. Ressel

Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft

Arbeitsbereich Holzphysik und Technologie des Holzes

Leuschnerstraße 91

21031 Hamburg

Prof. Dr. Ing. B. Sadlowsky

BFSV e.V.

Verpackungsinstitut Hamburg

Ulmenliet 20

21033 Hamburg

INHALTSVERZEICHNIS

Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1. Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Zielsetzung	3
2. Wellpappe als Packstoff	5
2.1 Eigenschaften von Wellpappe.....	8
2.2 Einfluss von Feuchte auf Wellpappe	9
2.3 Kriechen von Wellpappe	12
3. Mechanisch-technologische Eigenschaften von Wellpappe	18
3.1 Kantenstauchwiderstand (DIN EN ISO 3037:2007-06)	18
3.2 Biegesteifigkeit (DIN 53121:2014-08)	19
3.3 Stapelstauchwiderstand (DIN 55440-1:2004-08)	20
3.4 Langzeituntersuchungen an Wellpappe.....	21
4. Simulation des Materialverhaltens	23
4.1 Rheologische Modelle	23
4.2 Kontinuumsmechanik.....	28
5. Eigene Untersuchungen	31
5.1 Materialuntersuchungen an Wellpappen	31
5.1.1 Ausgangsmaterial	31
5.1.2 Kantenstauchwiderstand (DIN EN ISO 3037:2007-06)	32
5.1.3 Biegesteifigkeit (DIN 53121:2014-08).....	33
5.1.4 Stapelstauchwiderstand (DIN 55440-1:2004-08)	34
5.2 Kriechversuche	35

5.2.1 Kriechverhalten von Wellpappen-Proben	35
5.2.2 Kriechverhalten von Wellpappen-Verpackungen.....	38
5.3 Simulation des Kriechverhaltens	39
5.3.1 Materialmodell	39
5.3.2 Simulation.....	42
6. Ergebnisse und Diskussion	45
6.1 Langzeituntersuchungen an Wellpappen-Proben.....	45
6.2 Simulation von Kriechvorgängen	49
7. Schlussfolgerung und Ausblick	67
8. Literaturverzeichnis.....	70
9. Anhang	80
9.1 Kurzfassung	81
9.2 Summary	82
9.3 Vorhersagbarkeit des Leistungsvermögens von Schachteln aus Wellpappe (Typ FEFCO 0201) mithilfe des ECT- Langzeitwertes	83
9.4 Individual Test Rig for Measuring the Creep Behaviour of Corrugated Board for Packaging	90
9.5 Measuring the Creep Behaviour of Corrugated Board by Cascade and Individual Test Rig.....	100
9.6 Simulation des Kriechverhaltens von Wellpappe.....	117

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Wellenarten (Niskanen 2012)	6
Abbildung 2: Abmessung der Wellen (DIN 55468-1:2015-06)	6
Abbildung 3: Veränderungen der Zellwand während der Trocknung (Scallan 1974, verändert nach Pönni <i>et al.</i> 2012)	11
Abbildung 4: Abhängigkeit der Kriechverformung von dem Belastungsniveau (a: Belastungsniveau, b: dazugehörige Durchbiegung) (Bodig <i>et al.</i> 1982)	13
Abbildung 5: Bereiche des Kriechvorgangs bei hohem Belastungsniveau (Bodig <i>et al.</i> 1982)	14
Abbildung 6: Typische Kriechantwort einer Wellpappen-Verpackung auf Druckbelastung (Niskanen 2012).....	15
Abbildung 7: Mechano-sorptives Kriechen von Papier bei Zugbelastung (Niskanen 2012).....	16
Abbildung 8: Kriechen von Wellpappen-Verpackungen unter konstanter Last bei wechselnden / konstanten Feuchten (Dimitrov 2010)	17
Abbildung 9: Messung des Kantenstauchwiderstandes (VdW 2004).....	19
Abbildung 10: Messung der Biegesteifigkeit (BFSV e.V. 2009)	19
Abbildung 11: Langzeituntersuchungen an Wellpappen-Verpackungen	21
Abbildung 12: Verhalten von rein elastischen Materialien (Hying 2003)	24
Abbildung 13: Verhalten von rein viskosen Materialien (Hying 2003).....	24
Abbildung 14: Maxwell-Element (E= Feder, η = Dämpfer) (Rust 2011)	25
Abbildung 15: Verhalten von viskoelastischen Materialien (Hying 2003).....	26
Abbildung 16: Generalisiertes Maxwell-Modell (E= Feder, η = Dämpfer) (Rust 2011)	27
Abbildung 17: Finite-Elemente-Methode (Knothe <i>et al.</i> 2017).....	29
Abbildung 18: Homogenisierte Darstellung von einwelliger Wellpappe (Niskanen 2012)	30
Abbildung 19: Konstruktion der Wellpappen-Verpackung gemäß FEFCO 0201 (www.fefco-code.de)	31
Abbildung 20: Messung des Kantenstauchwiderstandes.....	32
Abbildung 21: Messung der Biegesteifigkeit	33
Abbildung 22: Messung des Stapelstauchwiderstandes	34
Abbildung 23: Eingeschnittene Seitenklappen einer Wellpappen-Verpackung.....	34
Abbildung 24: Kaskadenprüfeinrichtung.....	35
Abbildung 25: Einzelprüfeinrichtung.....	36

Abbildung 26: Berechnung von Feder- und Dämpferkonstanten aus geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuchen	40
Abbildung 27: Beispiel eines Dämpfungsspektrums	41
Abbildung 28: Kriechmodell auf der Basis der Prony-Analyse	42
Abbildung 29: Ergebnis einer Kriechuntersuchung an Prüfkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C	46
Abbildung 30: Kriechraten der Probenkörperzuschnitte zur ECT-Prüfung in Korrelation zur Zeit bis zum Versagen (n= 26; in der Abbildung teilweise überlagert)	46
Abbildung 31: Einfluss der Alterung auf die Kriechrate von Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung (Kaskadenprüfeinrichtung) (n= 10).....	48
Abbildung 32: Biegesteifigkeit in Abhängigkeit zur Prüfgeschwindigkeit ($V_1 < V_4$) (n= 136).....	52
Abbildung 33: Kantenstauchwiderstand in Abhängigkeit zur Prüfgeschwindigkeit (n=80)	53
Abbildung 34: Berechnetes Dämpfungsspektrum eines ECT-Versuchs	54
Abbildung 35: Berechneter zeitlicher Verlauf der Verringerung der Probenhöhe (Probe 2.1) bei der ECT-Untersuchung im Normklima (23 °C/ 50 % RH).....	55
Abbildung 36: Kriechuntersuchung der Probe 1.2 im konstanten Normklima (23 °C/ 50 % RH) mit einer Belastung von 25 % des im Normklima gemessenen ECT-Wertes (Einzelprüfeinrichtung).....	56
Abbildung 37: Kriechuntersuchung der Probe 1.2 im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) mit einer Belastung von 25 % des im Normklima gemessenen ECT-Wertes (Einzelprüfeinrichtung) (Zeit bis zum Versagen: 2,66 h)	57
Abbildung 38: Kriechuntersuchung der Probe 1.2 im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 25 % des im Normklima gemessenen ECT-Wertes (Einzelprüfeinrichtung) (Kriechrate: 0,034 mm/h; Zeit bis zum Versagen: 22,2 h)	58
Abbildung 39: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C der Proben 1.2, 2.1 und 2.2 mit einer Belastung von 15 % und 25 %	60
Abbildung 40: Zusammenfassung aller Kriechergebnisse im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C	61
Abbildung 41: Vergleich der gemessenen und berechneten Kriechverläufe bei der ECT-Untersuchung im Normklima (23 °C/ 50 % RH).....	62
Abbildung 42: Shifter-Berechnung (Wellpappenprobe 2.1 mit 15 % Belastung).....	63
Abbildung 43: Dehnungen beim ECT Versuch (x: schwarz, y: weiß)	64

Abbildung 44: FE-Modell der Wellpappen-Verpackung inklusiver der Randbedingungen (weiße Kreuze) und der Lasteinleitung (weißer Pfeil)	64
Abbildung 45: Verformung des FE-Modells während des BCT-Versuchs.....	65
Abbildung 46: Vergleich von BCT gemessen und FE-Modell.....	65
Abbildung 47: Vergleich von gemessenen BCT und mittels FEM berechneten BCT bei einer Belastung von 15 % im Normklima (23 °C/ 50 % RH)	66

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Genormte Wellenprofile (DIN 55468-1:2015-06).....	7
Tabelle 2: Wellpappensorten mit Anforderungen (Sollwerte) (DIN 55468-1:2015-06 verändert nach Köstner 2017)	8
Tabelle 3: Reale Einflussfaktoren und deren Umsetzung im FE-Modell mittels LS-DYNA	43
Tabelle 4: Festigkeitswerte der untersuchten Wellpappe	45
Tabelle 5: Festigkeitsuntersuchungen der Wellpappen-Proben zur Simulation von Kriechvorgängen	49
Tabelle 6: Papierzusammensetzung des Probenmaterials (n=3)	50
Tabelle 7: Einfluss von geschnittenen Klappen auf den Stapelstauchwiderstand (n= 46)	50
Tabelle 8: Prüfgeschwindigkeiten der Biegeuntersuchungen	51
Tabelle 9: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen des Probenmaterials 1.2 im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C (n=22)	58
Tabelle 10: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen der Probe 2.1 im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C in Form von Mittelwerten (n=18)	59

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“, Köln
BCT	Stapelstauchwiderstand, Box-Compression-Test
Bf	Berstfestigkeit
BFSV	Institut für Beratung, Forschung, Systemplanung, Verpackungsentwicklung und Verpackungsprüfung e.V., Hamburg
B	Breite
Bs	Biegesteifigkeit
CD	Cross direction/ Querrichtung
D	Dicke
De	Deutsch
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
Ds	Durchstoßarbeit
ECT	Kantenstauchwiderstand, Edge-Crush-Test
EN	European Norm
Eng	Englisch
FCT	Flachstauchwiderstand, Flat-Crush-Test
FEFCO	European Federation of Corrugated Board, Brüssel
FEM	Finite-Elemente-Methode
Fg	Flächengewicht
FPL	Forest Product Laboratory, Madison (Wisconsin)
GM	Geometrisches Mittel
H	Höhe
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
ISO	International Organization for Standardization, Genf
IPST	Institute of Paper Chemistry, Appleton (Wisconsin)
L	Länge
MD	Machine direction/ Maschinen- oder Produktionsrichtung
NBF	Nass-Berstfestigkeit

nfVk	nassfeste Verklebung
RH	relative Luftfeuchtigkeit
T	Temperatur
TAPPI	Technical Association of Pulp and Paper Industry
VdP	Verband Deutscher Papierfabriken e.V., Bonn
VdW	Verband der Wellpappen-Industrie e.V., Darmstadt

1. EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSSITUATION

Wellpappe ist mit einem Anteil von 64,2 % die wichtigste Transportverpackung für den nationalen und internationalen Versand von Waren. In Europa wurden im Jahr 2015 51.693 Mio. m² Wellpappe abgesetzt - dabei allein in Deutschland 9.873 Mio. m². Im internationalen Vergleich liegt Europa dabei direkt hinter China mit 65.922 Mio. m² und vor den USA mit 34.279 Mio. m². Die Gesamtanzahl der Wellpappen-Anlagen in Deutschland beträgt 104 mit 19.200 Beschäftigten. Im Jahr 2016 konnte so ein Umsatz von ca. 5 Mrd. € erwirtschaftet werden (VdW 2017).

Die steigende Globalisierung und die Vernetzung der Warenströme haben zur Folge, dass Wellpappen-Verpackungen immer höheren Belastungen beim Transport und der Lagerung standhalten müssen. Es handelt sich nicht nur um statische Belastungen, die bei der Stapelung der Waren entstehen, sondern auch um dynamische Belastungen, die während des Transportes mit Bahn, Lastkraftwagen und Schiff auftreten. Hinzu kommt, dass im weltweiten Containertransport wechselnde Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten herrschen. Auch der Trend der immer geringer werdenden durchschnittlichen Gewichte der Wellpappen stellt eine große Herausforderung für dessen Verwender dar. Im Jahre 2011 betrug das durchschnittliche Gewicht noch 525 g/m², hingegen im Jahre 2016 noch lediglich 513 g/m² (VdW 2017). Zudem wird der Sicherheit der Packstoffauslegung und ihrer Dimensionierung eine immer größere Bedeutung zugemessen.

Derzeitige Standards zur Abschätzung des Zeitstandverhaltens berücksichtigen lediglich mechanische Eigenschaften des Packstoffes, wie beispielsweise den Kantenstauchwiderstand nach DIN EN ISO 3037:2007-06 und den Stapelstauchwiderstand des Packmittels nach DIN 55440-1:2004-08 im Normklima. Die real auftretenden Belastungen werden nur durch den Einsatz von sogenannten Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Dabei kommt es oft zu einer Überdimensionierung der Wellpappen-Verpackung und letztendlich zu einer Verschwendung von Ressourcen. Um Wellpappen-Verpackungen optimal anwendungsspezifisch auszulegen, Kosten und Rohstoffe einzusparen und Transportschäden zu vermeiden, werden in der Forschung vermehrt moderne Simulationsmethoden, wie die Finite-Elemente-Methode (FEM), eingesetzt (Michaeli *et al.* 2006). Dabei wird versucht, über die mechanisch-technologischen Festigkeitskennwerte das Materialverhalten von Wellpappen-Verpackungen bei bestimmten

Belastungssituationen zu simulieren. Die Simulationsmethoden sind meist noch nicht vollständig ausgereift und beinhalten bislang keine Möglichkeiten die viskosen Eigenschaften der Wellpappe miteinzubeziehen.

1.2 AUFGABENSTELLUNG

Aufgabe dieser Arbeit ist es, das Zeitstandverhalten von Schachteln aus Wellpappe detailliert zu untersuchen. Dabei nimmt die Informationsgewinnung über das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben und deren mögliche Verbindung zum Kriechverhalten von Wellpappen-Verpackungen eine zentrale Rolle ein.

Hierzu werden zwei Zeitstandprüfeinrichtungen zur Untersuchung des Kriechverhalten von Probenkörperzuschnitten zur Kantenstauch-Prüfung (ECT¹-Prüfung) neu entwickelt und in Betrieb genommen. Dabei wird das Kriechverhalten von Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung unter einer konstanten Belastung untersucht. Die Prüfeinrichtungen befinden sich in einer Klimakammer, in der unterschiedliche Klimata simuliert werden können. Zusätzlich dazu werden alle wesentlichen, die Messung beeinflussenden Faktoren eingehend untersucht.

Neben den Versuchen zum Kriechverhalten der Probenkörperzuschnitte zur ECT-Prüfung werden die Ausgangsmaterialien hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise die Berstfestigkeit, die Durchstoßarbeit und der ECT-Prüfung, getestet. Außerdem werden geschwindigkeitsgesteuerte Kurzzeitversuche an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung und Biegeprüfung durchgeführt, um Ergebnisse über das viskose Werkstoffverhalten von Wellpappe zu erhalten. Mithilfe dieser Ergebnisse und festgelegter Berechnungsmethoden (Maxwell-Modell/Prony-Analyse/FEM-Simulation) soll das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben und Wellpappen-Packmitteln berechnet werden. Zur Abgleichung der berechneten Ergebnisse mit der Realität werden Kriechversuche an Wellpappen-Proben und Wellpappen-Packmitteln in speziell entwickelten Versuchseinrichtungen durchgeführt.

¹ ECT: Edge-Crush-Test

Die Ergebnisse aller Versuche sollen am Ende der Arbeit eine neue Möglichkeit zur Vorhersage des Langzeitverhaltens von Wellpappe zulassen. Dadurch können, ohne zeit- und kostenintensive Langzeituntersuchungen am Packmittel, Verpackungen bedarfsgerecht und materialeffizient ausgelegt werden.

Die Arbeit ist Teil des im Oktober 2015 gestarteten IGF Forschungsprojektes 18876 BG „Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappe-Verpackungen“, welches als Gemeinschaftsforschungsvorhaben der Papiertechnischen Stiftung in Heidenau und des Instituts für BFSV an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) durchgeführt wurde. Das Projekt wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsförderung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

1.3 ZIELSETZUNG

Diese Arbeit befasst sich mit Untersuchungen zum Zeitstandverhalten von Schachteln aus Wellpappe. Mit Hilfe der Mitarbeiter und der Versuchseinrichtungen am Institut für BFSV e.V. können Versuche zur Charakterisierung der Wellpappen durchgeführt werden. Des Weiteren können durch zwei am Institut für BFSV e.V. neu entwickelte Prüfeinrichtungen tiefergehende Erkenntnisse über das Kriechverhalten von Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung erlangt werden.

Ziel der verschiedenen Versuche und der Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, mit der das klimaabhängige Kriechverhalten von Wellpappen-Proben und letztendlich das Kriechverhalten von Packmitteln aus Wellpappe genauer vorhergesagt werden kann. Dabei werden in Versuchen materialspezifische Kennwerte ermittelt, die über eine rechnergestützte Simulation das Langzeitverhalten von Wellpappen-Verpackungen berechnen können.

Dadurch soll in der Zukunft eine Abschätzung des Zeitstandverhaltens von Packmitteln aus Wellpappe ohne übermäßige Sicherheitszuschläge möglich werden. Der somit effizientere Materialeinsatz führt zu einer Senkung des Rohstoffverbrauchs, welcher eine Reduzierung der Umweltbelastung zur Folge hat. Weiterhin können durch den geringeren Rohstoffeinsatz die Herstellungskosten für Wellpappen-Verpackungen erheblich reduziert werden. Dadurch

könnten sich für die Anwendung von Wellpappen-Verpackungen weitere Märkte erschließen. Zudem werden durch die optimierte, bedarfsgerechte Anpassung der Wellpappen-Verpackungen Transportschäden im nationalen und internationalen Versand verhindert. Gleichzeitig führt dies zu einer Senkung der Folgekosten solcher Transportschäden, wie beispielsweise Entsorgungskosten der schadhaften Produkte oder Imageschäden der Wellpappenhersteller. Ein weiterer wichtiger Vorteil der besseren Abschätzbarkeit des Langzeitverhaltens von Wellpappe ist, dass aufgrund der Kenntnis der benötigten Festigkeiten die Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien zur Wellpappen-Herstellung, wie beispielsweise der Anteil der recycelten oder frischen Fasern, angepasst werden kann.

2. WELLPAPPE ALS PACKSTOFF

Der Siegeszug der Wellpappe begann mit der ersten Patentanmeldung im Jahre 1871 durch den Amerikaner Albert L. Jones (New York), der einseitige Wellpappe zum Schutz von Glasflaschen vor Bruch einsetzte (Jones 1871). Im Jahre 1874 entwickelte Oliver Long ein Patent über die erste und zweite Decklage (Long 1874). Bereits 1894 reichten Robert H. Thompson und Henry D. Norris ein Patent über Verpackungen aus Wellpappe ein. 1895 folgten die ersten Wellpappenanlagen und damit der Wunsch nach Standardisierung der Festigkeitseigenschaften, um Transportschäden zu vermeiden (Twede *et al.* 2005).

Zurzeit werden ca. 64,2 % aller Waren in Wellpappe verpackt (VdW 2017). Die Produktion von Papier, Karton und Pappe insgesamt nahm in den Monaten Januar bis August 2017 im Vergleich zum Vorjahr um 0,9 % zu. Die Produktion von Papier, Pappe und Karton für Verpackungszwecke stieg in diesem Zeitraum sogar um 2,9 % an. Von Januar bis August 2017 wurden 7,850 Mio. t Papier, Pappe und Karton für Verpackungszwecke produziert. Besonders ist noch hervorzuheben, dass der Einsatz von Altpapier um 0,9 % (2015: 16.754 Mio. t; 2016: 16.898 Mio. t) und die Altpapiereinsatzquote um 1,0 % (2015: 74 %; 2016: 75 %) im Vergleich zum Vorjahr gestiegen sind (VdP 2016). Zum besseren Verständnis des Packstoffes Wellpappe werden in den folgenden Abschnitten der Aufbau, die unterschiedlichen Ausführungen und die besonderen Eigenschaften von Wellpappe beschrieben.

Allgemein betrachtet besteht Wellpappe aus Faserstoff – gewonnen aus dem Aufschluss von Holz. Die einzelnen Bestandteile der Wellpappen, die Wellpappen-Rohpapiere, unterscheiden sich jedoch stark in der Zusammensetzung und der Herstellungsart des Zellstoffes. Bei den Wellpappenrohpapieren werden die Deckenpapiere, welche die Außen- und Innenseiten der Wellpappe darstellen, von den Wellenpapieren, welche die gewellte Zwischenlage zwischen den Decklagen bilden, unterschieden (Blechsmidt 2009). Der Packstoff Wellpappe kann je nach Verwendungszweck in den unterschiedlichsten Ausführungen hergestellt werden. Der allgemeine Aufbau von Wellpappen ist in Abbildung 1 dargestellt und gliedert sich in zwei Deckenlagen und eine dazwischenliegende, gewellte Mittelschicht. Der besondere Aufbau der Wellpappe nutzt das Prinzip des I-Trägers, um Druck- und Biegebelastungen aus verschiedenen Richtungen aufnehmen zu können (Twede *et al.* 2005).

Wellpappen werden je nach Anzahl der vorhandenen Wellenlagen in einwellige und mehrwellige unterteilt (vgl. Abb. 1). Einwellige Wellpappen bestehen aus einer Lage eines gewellten Papiers, welches zwischen zwei Lagen eines Kartons oder Papiers geklebt wird (DIN

2. Wellpappe als Packstoff

55468-1:2015-06). Ein Sonderfall der einwelligen Wellpappen ist die einseitige Wellpappe. Diese besondere Form der Wellpappe besitzt nur eine Deckenlage aus Papier oder Karton, die nur mit einer Lage eines gewellten Papiers beklebt wird.

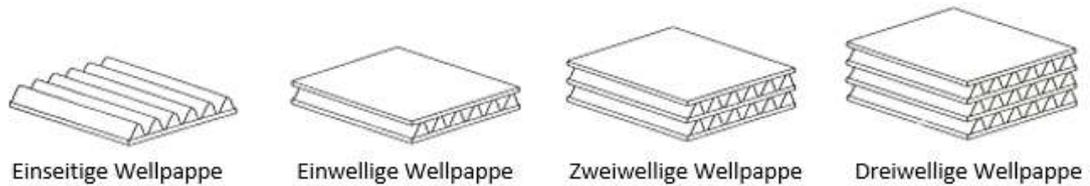


Abbildung 1: Wellenarten (Niskanen 2012)

Mehrwellige Wellpappen bestehen aus zwei oder mehr Lagen eines gewellten Papiers, die durch eine Lage Karton oder Papier miteinander verklebt sind und deren Außenflächen ebenfalls mit einer Lage Karton oder Papier verklebt sind (DIN 55468-1:2015-06). Dabei bestimmt der Aufbau der Wellpappen den Verwendungszweck. Einseitige Wellpappen werden vor allem als Umhüllungen zum Schutz von Gütern eingesetzt. Sie werden international am häufigsten genutzt und finden ihre Anwendung vor allem als Verpackungsmaterial von Konsumgütern. Um Schwerlasten verpacken und unbeschädigt transportieren zu können, werden zwei- und dreiwellige Wellpappen eingesetzt (Twede *et al.* 2005).

Außer der Einteilung nach ihrem Aufbau werden Wellpappen auch nach Art der Wellen differenziert. Die Einteilung richtet sich nach der jeweiligen Wellenhöhe (h) und der Wellenteilung (t) der Wellenpapiere (vgl. Abb. 2). Die Wellen werden nach ihren Abmessungen festgelegten Buchstabengruppen zugeordnet (vgl. Tab. 1) (DIN 55468-1:2015-06).

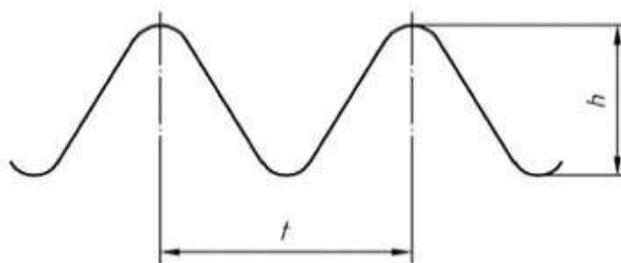


Abbildung 2: Abmessung der Wellen (DIN 55468-1:2015-06)

Tabelle 1: Genormte Wellenprofile (DIN 55468-1:2015-06)

Wellenart	Wellenhöhe h [mm]	Wellenteilung t [mm]
G	$< 0,6$	$\leq 1,8$
F	$\geq 0,6$ bis $< 1,0$	$> 1,8$ bis $\leq 2,6$
E	$\geq 1,0$ bis $< 1,9$	$> 2,6$ bis $\leq 3,5$
D	$\geq 1,9$ bis $< 2,2$	$> 3,5$ bis $\leq 4,8$
B	$\geq 2,2$ bis $< 3,1$	$> 4,8$ bis $\leq 6,5$
C	$\geq 3,1$ bis $< 4,0$	$> 6,5$ bis $\leq 7,9$
A	$\geq 4,0$ bis $< 5,0$	$> 7,9$ bis $\leq 10,0$
K	$\geq 5,0$	$> 10,0$

Der Verwendungszweck der Wellpappe bestimmt die Abmessungen der Wellen. Große Wellen, wie beispielsweise die A-Welle, werden nur dort eingesetzt, wo eine hohe Stapelfestigkeit und gute Druckfestigkeiten verlangt werden. Wird von der Wellpappe eine gute Bedruckbarkeit verlangt, werden hingegen kleine Wellen wie die G-Welle bevorzugt (Twede *et al.* 2005).

Auch Festigkeitseigenschaften, wie die Berstfestigkeit, die Durchstoßarbeit und der Kantenstauchwiderstand, werden zur Einteilung von Wellpappen genutzt (vgl. Tab. 2) (DIN 55468-1:2015-06). Daraus ergeben sich drei weitere Wellpappen-Sorten:

- [1] Wellpappen für Lagerbeanspruchungen,
- [2] Wellpappen für Transportbeanspruchungen,
- [3] Schwerwellpappen.

2. Wellpappe als Packstoff

Tabelle 2: Wellpappensorten mit Anforderungen (Sollwerte) (DIN 55468-1:2015-06 verändert nach Köstner 2017)

	Sorte	Berstfestigkeit [kPa]	Durchstoßarbeit ^a [J]	Kantenstauchwiderstand [kN/m]	Verwendungszweck	
Einwellig	1.01	-	2,5	3,5	[1]	
	1.02	-	3,0	4,0		
	1.03	-	3,5	4,5		
	1.04	-	4,0	5,5		
	1.05	-	4,5	6,5		
	Einwellig	1.10	540	2,5	3,5	[2]
		1.20	770	3,0	4,0	
		1.30	1.000	3,5	4,5	
		1.40	1.200	4,0	5,5	
		1.50	1.450	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		
	Mehrwellig	2.20	770	5,5	6,5	[2]
		2.30	1.000	6,0	7,0	
		2.40	1.200	6,5	8,0	
		2.50	1.450	7,5	8,5	
		2.60	1.650	8,5	9,0	
		2.70	2.000	9,5	9,5	
		Mehrwellig	2.80	-	11,0	
	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 D, E, F und G.						
^a Für einwellige Wellpappe in Wellenart B reduzieren sich die angegebenen Werte der Sorte um 10 %.						

2.1 EIGENSCHAFTEN VON WELLPAPPE

Wellpappe ist ein natürlicher, nachwachsender und vollständig recycelbarer Packstoff. Sie besteht zum größten Teil aus recyceltem Altpapier (weitere Anteile Primärfasern, Leim) und ist nach dem Gebrauch zu 100 % recycelbar. Zusätzlich speichert Wellpappe, wie alle Holzprodukte, CO₂. In einer Tonne Papier werden ca. 1,33 t CO₂ gebunden und somit der Atmosphäre entzogen (VdW 2012). Das Recycling von Altpapier trägt zur Herstellung von Wellpappe und somit zur Ressourcenschonung bei.

Durch die eingesetzten Rohstoffe und die spezielle Struktur erhält Wellpappe seine besonderen Eigenschaften. Wellpappe besitzt trotz eines geringen Flächengewichtes außergewöhnliche Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Vor allem die Druck- und Stoßbelastungen können gut absorbiert werden (Guo *et al.* 2008). Die guten Dämpfungseigenschaften, der flexible Einsatz und die Möglichkeit zur individuellen Anfertigung von Wellpappen ermöglichen einen wesentlichen Beitrag zum Produktschutz. Wellpappen-Verpackungen können verschiedene Formen aufweisen. Beispielsweise können sie je nach Papierart, Wellengröße und Verwendungszweck als Produktverpackung, Supermarkt-Display oder als Transportverpackung für schwere Maschinenteile eingesetzt werden. Das geringe Flächengewicht und die normierten Maße von Wellpappen-Verpackungen ermöglichen die optimale Ausnutzung von Transportfahrzeugen und Lagern, wodurch Fracht- und Lagerkosten gesenkt werden können. Auch die gute Bedruckbarkeit ist eine wichtige Eigenschaft von Wellpappe. Sie ermöglicht eine attraktive Gestaltung der Versandverpackung und leistet dadurch einen großen Beitrag zur Markenbildung (VdW 2012).

Wellpappe ist ein hygroskopischer Packstoff, das heißt, die Fasern nehmen Feuchtigkeit aus der Luft auf bzw. geben diese an die Luft ab und quellen und schwinden bei wechselnden Klimabedingungen. Dabei sind auch die Festigkeitseigenschaften von Wellpappen-Produkten stark von der Ausgleichsfeuchte abhängig, die sich bei gegebener Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte einstellt (Markström 1991). Damit ändern sich nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch die Struktur der einzelnen Papiere und die Lastaufnahmefähigkeit (Niskanen 2012). Deshalb wird im folgenden Abschnitt detailliert auf die Wechselwirkung zwischen dem Einwirken von Feuchtigkeit und der Struktur der Wellpappe eingegangen.

2.2 EINFLUSS VON FEUCHTE AUF WELLPAPPE

Den größten Einfluss auf die Festigkeit von Papierprodukten besitzt Feuchtigkeit. Bei hoher Luftfeuchtigkeit nehmen die Festigkeitseigenschaften stark ab. Steigt beispielsweise die Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 90 %, verringert sich der Stapelstauchwiderstand (Erklärung Seite 20) um 50 - 60 %. Der Kantenstauchwiderstand (Erklärung Seite 18) verringert sich um 55 - 60 % (Whitsitt *et al.* 1972). Grund für den starken Einfluss von Feuchtigkeit auf die Eigenschaften von Wellpappe ist das Sorptionsverhalten der hygroskopischen Holzfasern. Die Fasern passen sich durch Wasserdampfaufnahme (Adsorption) bzw. -abgabe (Desorption) dem

Umgebungsklima an (DIN EN ISO 12571:2000). Dabei quellen die Fasern bei Feuchtigkeitsaufnahme und schrumpfen bei Feuchtigkeitsabgabe (Waterhouse 1984). Bedingt durch die Anisotropie der Fasern ändern sich die Dimensionen dieser mehr radial und tangential (quer zur Faser) als longitudinal (parallel zur Faser) (Alava *et al.* 2005).

In der Literatur werden zwei verschiedenen Arten von Wasser in den auf Lignocellulosefasern basierenden Materialien beschrieben:

- Freies Wasser und
- Gebundenes, nicht gefrierendes Wasser (Engelund *et al.* 2012).

Das Auftreten von einem weiteren Typ von gebundenen Wassern, dem gefrierenden Wasser, wurde in der Literatur ausgiebig diskutiert (Nakamura *et al.* 1981, Berthold *et al.* 1995, Engelund *et al.* 2012). Nach neusten Erkenntnissen tritt dieses jedoch nur an nach einem bestimmten Verfahren erzeugten Cellulosefasern auf (Zelinka *et al.* 2012).

Bei der Wasserdampfaufnahme gelangt das freie Wasser in die Poren zwischen den Fasern und in die Lumen der Fasern. Das gebundene Wasser erstarrt in den Poren der Zellwände oder wird chemisch an die Hydroxyl- oder Carboxylsäuregruppen in den Fasern gebunden (Alava *et al.* 2005). Eine genaue Beschreibung, welche chemischen Gruppen Wassermoleküle aufnehmen liefert Berthold *et al.* 1995. Die Wasserdampfaufnahme findet an den amorphen Teilen der Cellulosen, des Polyosen-Lignin-Gels und in den Poren der Zellwände (Kappilarkondensation) statt (Weigert 1999). Von den kristallinen Bereichen der Cellulose wird kein Wasser aufgenommen (Engelund *et al.* 2012). Als Folge der Wasserdampfaufnahme kommt es zur Quellung der Zellwände und somit zur Schwächung der Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern, wodurch die Mikrofibrillen sich trennen. Die Faserflexibilität steigt und es kommt zum Erweichen des gesamten Fasernetzwerks (vgl. Abb. 3 A, B) (Alava *et al.* 2005, Dimitrov *et al.* 2010, Engelund *et al.* 2012, Navaranjan *et al.* 2012, Pönni *et al.* 2012, Weigert 1999).

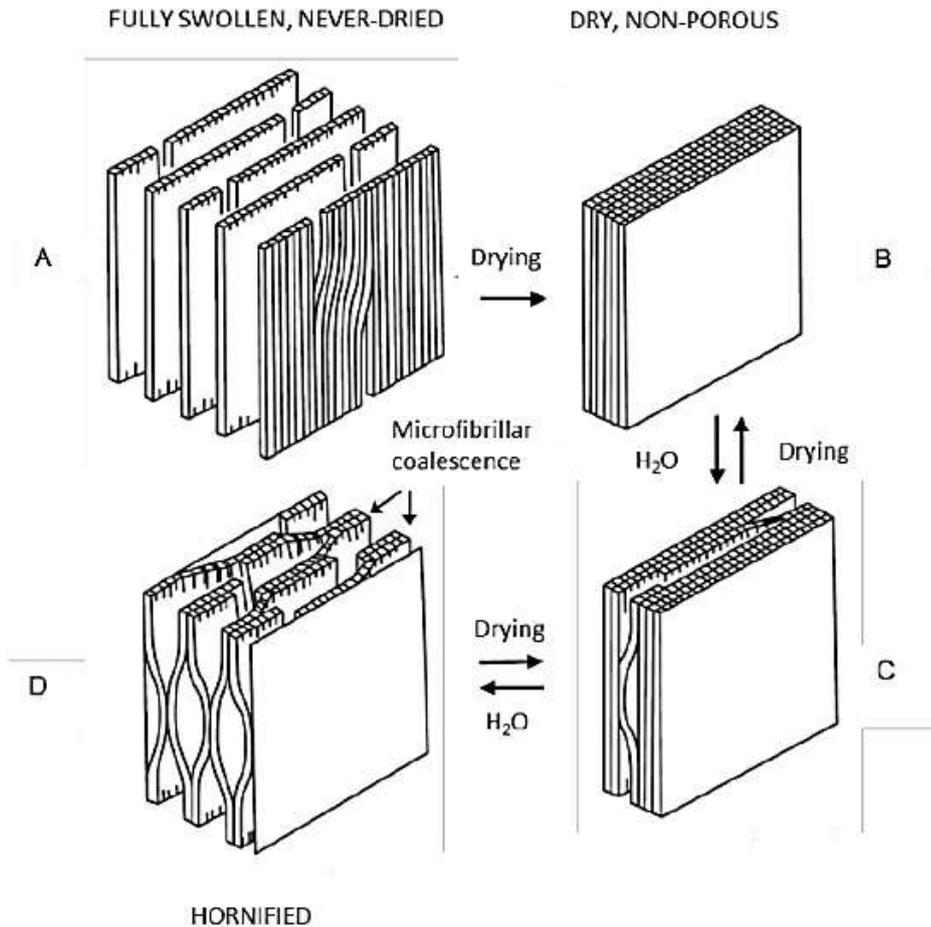


Abbildung 3: Veränderungen der Zellwand während der Trocknung (Scallan 1974, verändert nach Pönni *et al.* 2012)

Durch die Abgabe von Wasserdampf schwindet das Fasernetzwerk und die Bindungen innerhalb des Fasernetzwerkes werden wieder stärker (Waterhouse 1984). Bei jeder Trocknung kommt es zur sogenannten Verhornung (vgl. Abb. 3 C, D). Die Verhornung wird in der Literatur als eine strukturelle, irreversible Änderung der Fasern durch Trocknung beschrieben. Es gibt verschiedene mögliche Auslöser für eine Verhornung, die in Weigert 1999 detailliert dargestellt sind. Vorwiegend sollen der Verlust an Faser-Faser-Bindungen und die Ausbildung von irreversiblen Wasserstoffbrückenbindungen an der Faseroberfläche verantwortlich sein. Als Folge kommt es zu einer Änderung des Kapillargefüges und der Zugänglichkeit und Größe des Porenvolumens. Bei einem nachfolgenden Befeuchten können sich somit nicht alle Fasern, die vorher Wasser binden bzw. einlagern konnten, wieder öffnen um Wasser aufzunehmen und die Quellbarkeit und die Reaktivität der Fasern sinken. Die größte Veränderung des

Fasernetzwerkes tritt bereits nach der ersten Trocknung ein (Navaranjan *et al.* 2012, Pönni *et al.* 2012, Weigert 1999).

Im Fall von Recyclingfasern, wie sie in der Wellpappe eingesetzt werden, führt die Vorgesichte der Fasern durch mehrere Befeuchtungs- und Trocknungszyklen zu einer geringeren Wasseraufnahmefähigkeit im Vergleich zu Primärfasern. Zudem sind die Anschmiegsamkeit, die Fähigkeit zur Zwischenfaserbindung und die Quellbarkeit reduziert (Navaranjan *et al.* 2012).

2.3 KRIECHEN VON WELLPAPPE

Als hygroskopisches Produkt neigt Wellpappe bei einer erhöhten Luftfeuchtigkeit und konstanter Belastung zum Kriechen (Alava *et al.* 2006). Beispielsweise verlieren Verpackungen aus Wellpappe durch Kriech- und Relaxationsvorgänge bei einer Luftfeuchtigkeit von 90 % und einer Lagerzeit von sechs Monaten unter einer konstanten Last ca. 60 % ihrer Druckfestigkeit (Twede *et al.* 2005). Eine besondere Rolle spielt das Problem des Kriechens bei der Betrachtung des Langzeitverhaltens von Wellpappe im weltweiten Containerversand. Hierzu gibt Trost *et al.* 2016 einen detaillierten Überblick über die bisherigen Untersuchungen, die vorhandenen Prüfmethode und den sich daraus ergebenden Forschungsbedarf.

Der Begriff des Kriechens wird in der Literatur allgemein als kontinuierliche, zeitabhängige, plastische Verformung eines Werkstoffes unter konstanter Last beschrieben (Rösler *et al.* 2006). Dabei kann der Verformungsprozess je nach Belastungsniveau bis zum Bruch des Bauteils führen (Läpple *et al.* 2007). Die Abbildung 4 zeigt die Abhängigkeit der Kriechverformung von dem Belastungsniveau (P_a , P_b und P_c). Die Kriechverformung wächst mit der Zeit:

$t_0 \rightarrow \delta_0$ spontane Verformung bei Beginn der Belastung,

$t_1 \rightarrow \delta_1$, $t_2 \rightarrow \delta_2$ zeitabhängige Verformung durch Kriechvorgänge.

Je höher die Belastung, desto größer ist die Kriechverformung über die Zeit (δ_a , δ_b und δ_c). Im Falle der Belastung P_c führt dies letztendlich zum Bruch des Bauteils $\delta_c \rightarrow \delta_u$ (= *ultimate Belastung*) (vgl. Abb. 4) (Bodig *et al.* 1982).

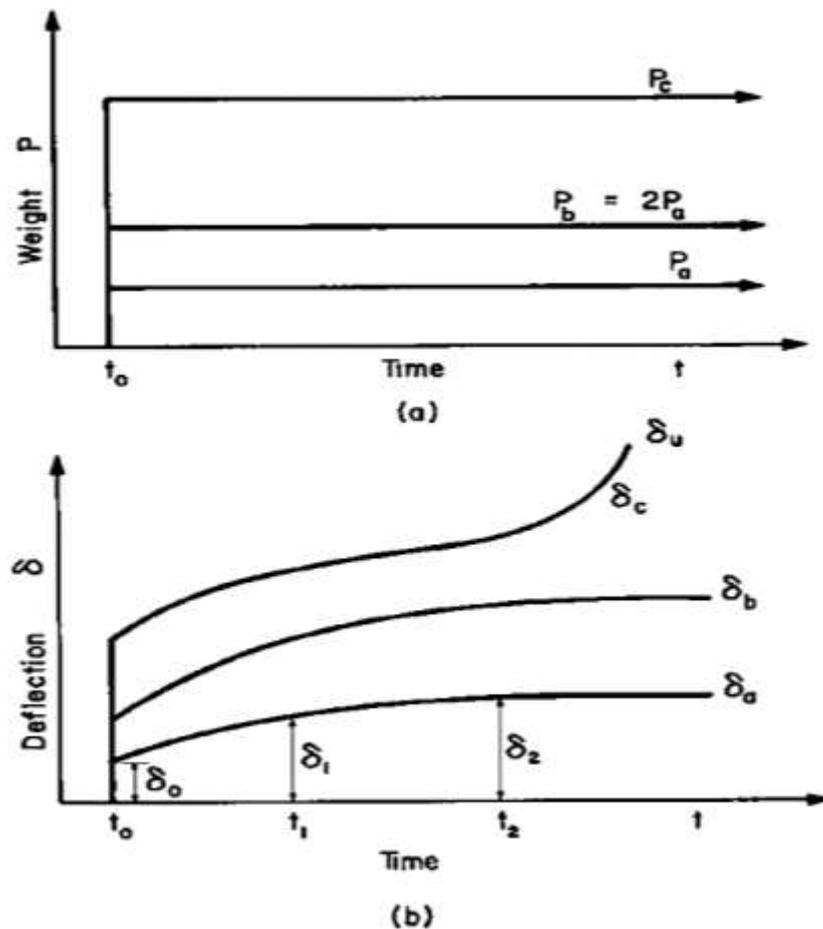


Abbildung 4: Abhängigkeit der Kriechverformung von dem Belastungsniveau (a: Belastungsniveau, b: dazugehörige Durchbiegung) (Bodig *et al.* 1982)

Wird davon ausgegangen, dass die konstante Belastung ab einem bestimmten Belastungsniveau bis zum Bruch des Bauteils führt, kann der Kriechvorgang allgemein in drei Etappen unterschieden werden: das Primär-, das Sekundär- und das Tertiärkriechen (vgl. Abb. 5). In der Primärphase, dem sogenannten Übergangskriechen, steigt die Kriechverformung stetig an, bis es zu einer Stabilisierung der Kriechverformung in der sogenannten Sekundärphase oder dem stationären Kriechen kommt. Bei einer weiteren Erhöhung der Spannung (bzw. Belastung) kommt es zum Tertiärkriechen, auch beschleunigtes Kriechen genannt, welches bei einem progressiven Anstieg der Kriechverformung zum Bruch des Bauteils führt (Bodig *et al.* 1982, Läßle *et al.* 2007, Wagenführ *et al.* 2008).

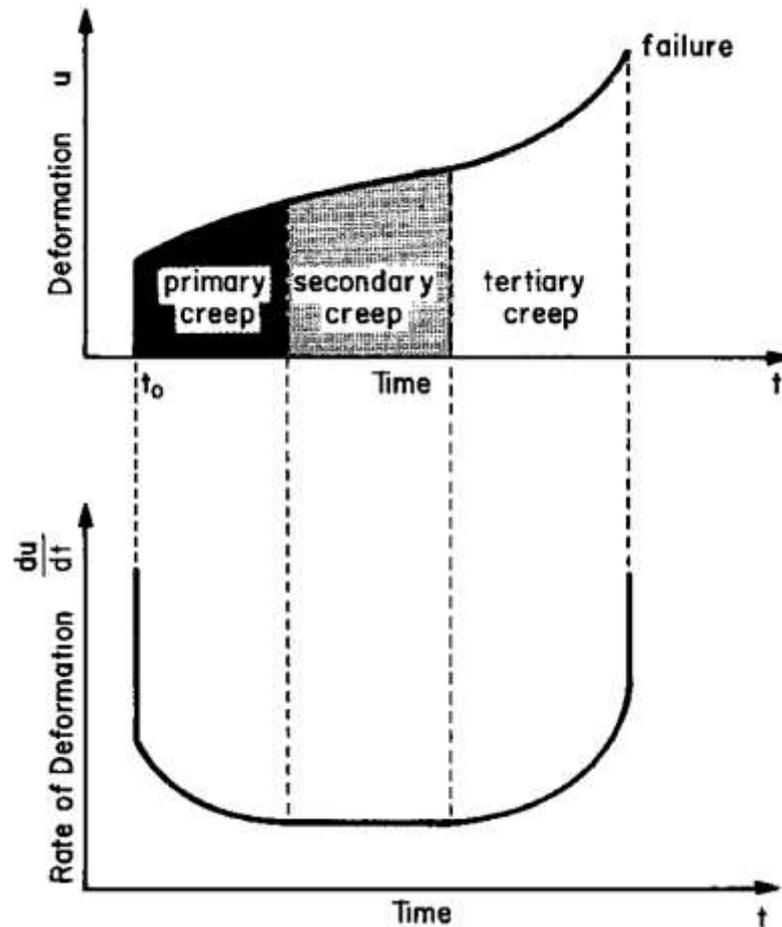


Abbildung 5: Bereiche des Kriechvorgangs bei hohem Belastungsniveau (Bodig *et al.* 1982)

Abhängig ist das Kriechen eines Werkstoffes von der Belastungsart (Zug, Druck, Biegung, Torsion), der Belastungshöhe, dem Umgebungsklima (Feuchtigkeit, Temperatur) und dem mehr oder weniger zyklischen Wechsel des Umgebungsklimas. Den größten Einfluss auf die Kriechrate $\frac{du}{dt}$ von Werkstoffen besitzt dabei das Wechselklima (Ranz 2007).

Wird die oben dargestellte Kriechkurve auf die Lebensdauer einer Wellpappen-Verpackung (aufgenommen im Wechselklima) übertragen, ergibt sich die Graphik in Abb. 6. Dabei wird die Verringerung der Wellpappen-Verpackungshöhe in Korrelation zur Versuchszeit abgebildet.

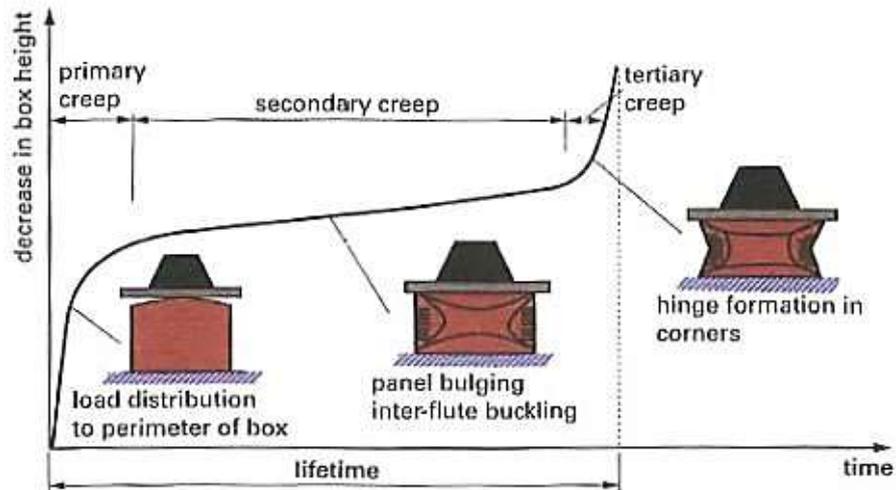


Abbildung 6: Typische Kriechantwort einer Wellpappen-Verpackung auf Druckbelastung (Niskanen 2012)

Zu Beginn des Verformungsvorgangs wird die konstant aufgebrachte Last auf den Umfang der Wellpappen-Verpackung verteilt, wodurch die Kriechverformung ansteigt. Dies stellt die Primärphase des Kriechvorgangs dar. Im anschließenden Sekundärbereich, dem längsten Verformungsprozess, knicken die Seiten der Verpackung ein und es entstehen Knicke zwischen den Wellen in den Ecken der Verpackung. Die Bildung eines Falzes leitet das Versagen der Verpackung ein, da die maximale Belastbarkeit reduziert wird. Bei diesem sogenannten Tertiärkriechen steigt die Kriechverformung progressiv an (vgl. Abb. 6) (Bronkhorst 1997).

Um das Kriechen des Fasernetzwerkes im Papier bzw. in der Wellpappe zu ermöglichen, müssen die kristallinen Cellulosebereiche (Fibrillen) als steife Körper aneinander vorbei gleiten können. Dies ist nur in Anwesenheit von einer erhöhten Feuchtigkeit möglich, da das Fasernetzwerk erweicht und die Faserflexibilität erhöht ist (wie bereits im Kapitel 2.2 Einfluss von Feuchte auf Wellpappe beschrieben) (Alava *et al.* 2005, Niskanen 2012).

Kommt es zusätzlich zu einer Druckbelastung und zu wechselnden Materialfeuchten aufgrund von Klimaschwankungen, verstärkt sich das Phänomen des Kriechens erheblich. Es entsteht das sogenannte mechano-sorptive Kriechen (vgl. Abb. 7) (Alava *et al.* 2005, Niskanen 2012, Whitsitt *et al.* 1972).

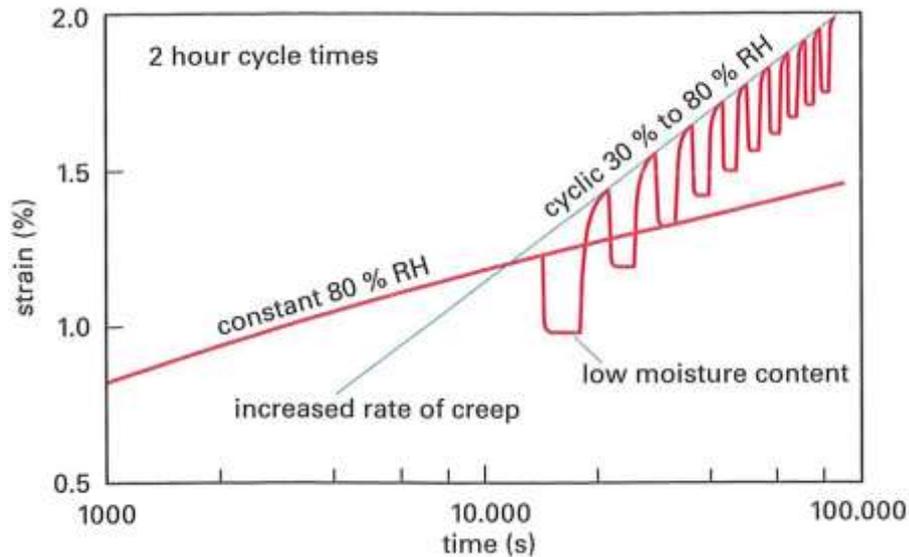


Abbildung 7: Mechano-sorptives Kriechen von Papier bei Zugbelastung (Niskanen 2012)

Die Abbildung 7 zeigt die Dehnung (= strain %) in Abhängigkeit von der Zeit bei konstanter und wechselnder relativer Luftfeuchtigkeit. Die Dehnung pro Zeiteinheit ist \pm konstant, im Wechselklima aber deutlich größer als im Konstantklima. Es wird deutlich, dass die Kriechrate² bei einer wechselnden relativen Luftfeuchtigkeit steigt. Dies führt zu einer Reduktion der Festigkeit und einer kürzeren Zeit bis zum Versagen der Probe (Dimitrov 2010, Niskanen 2012). Der Effekt des mechano-sorptiven Kriechens steigt mit zunehmender Amplitude der relativen Luftfeuchte (vgl. Abb. 8) (Dimitrov 2010).

² Kriechrate: die im Kriechversuch ermittelte Steigung des Verformungs-Zeitdiagramms im Bereich des sekundären Kriechens in [mm/h] oder [%-Dehnung/h]

2. Wellpappe als Packstoff

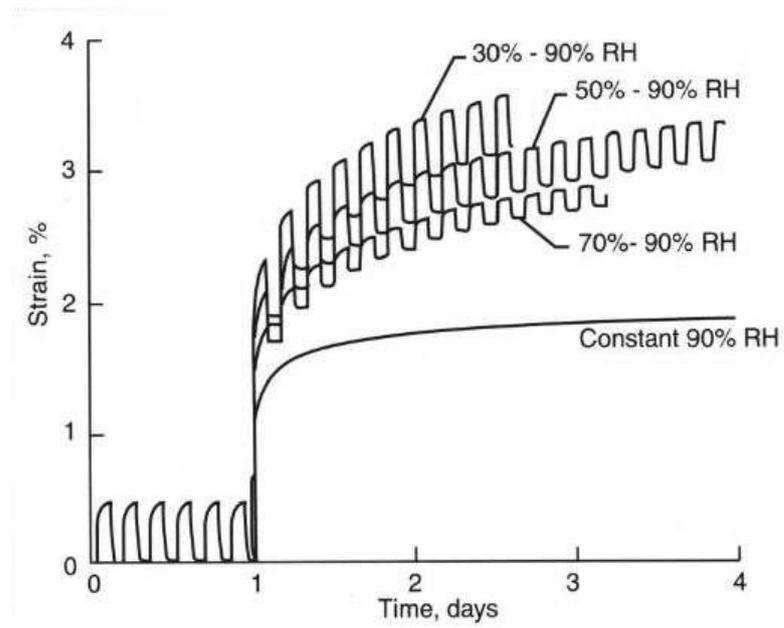


Abbildung 8: Kriechen von Wellpappen-Verpackungen unter konstanter Last bei wechselnden / konstanten Feuchten (Dimitrov 2010)

3. MECHANISCH-TECHNOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN VON WELLPAPPE

Aufgrund der stark streuenden Eigenschaften von Papierprodukten, je nach Faserart und Herstellungsprozess, sind die Verwender von Wellpappe auf Standardprüfungen angewiesen, um die Eigenschaften der zu verwendenden Wellpappe verlässlich charakterisieren zu können (Twede *et al.* 2005). Dazu werden genormte Prüfverfahren verwendet, welche die einheitliche Durchführung der Prüfungen, die Genauigkeit, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicherstellen. Durch den Einsatz in produzierenden Unternehmen sind die Standardprüfmethoden einfach und zeitschonend ausführbar (Markström 1991). Folgende Prüfmethoden für Wellpappen finden in der Praxis hauptsächlich Anwendung:

- Flächengewichte der Einzellagen [DIN ISO 3039:2011-06],
- Flächenbezogene Masse [DIN EN ISO 536:2012-11],
- Berstfestigkeit [DIN EN ISO 2759:2014-10],
- Berstfestigkeit nach dem Eintauchen in Wasser [DIN ISO 3689:1994-07],
- Kantenstauchwiderstand (ungewachste Kanten) [DIN EN ISO 3037:2007-06],
- Biegesteifigkeit (Balkenmethode) [DIN 53121:2014-08],
- Wasserbeständigkeit der Verklebung [DIN 53133:2015-12/ TAPPI T812],
- Durchstoßarbeit (Pendelschlagwerk) [DIN 53142-1:2014-12].

Zur mechanischen Charakterisierung von Wellpappen-Verpackungen wird die Bestimmung des Stapelstauchwiderstandes nach DIN 55440-1:2004-08 eingesetzt.

Die zentralen Prüfungen der vorliegenden Arbeit umfassen die Bestimmung des Kantenstauchwiderstandes, der Biegesteifigkeit und des Stapelstauchwiderstandes. Aus diesem Grund werden diese in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt.

3.1 KANTENSTAUCHWIDERSTAND (DIN EN ISO 3037:2007-06)

Der Kantenstauchwiderstand (ECT: Edge-Crush-Test) wird in der Norm als der maximal wirkende Widerstand, den eine Probe (Abmessungen $(25 \pm 0,5) \times (100 \pm 0,5)$ mm) mit senkrecht stehenden Wellen einer in diese Richtung wirkenden Kraft entgegengesetzt, beschrieben (vgl. Abb. 9) (DIN EN ISO 3037:2007-06). Es gibt verschiedene Möglichkeiten den ECT zu bestimmen. In Europa wird der ECT nach der FEFCO Nr. 8 Methode bestimmt (Dimitrov *et al.* 2010). Der ECT zählt zu den wichtigsten und aussagefähigsten Prüfungen der Wellpappenindustrie,

denn über diesen kann mittels der Biegesteifigkeit auf das Langzeitstandverhalten und die Stapelfestigkeit von Wellpappen-Verpackungen unter festgelegten Klimabedingungen geschlossen werden (VdW 2004, Popil 2012).

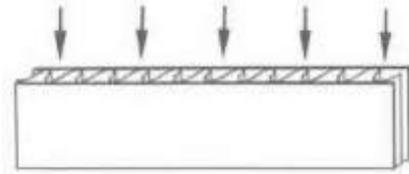


Abbildung 9: Messung des Kantenstauchwiderstandes (VdW 2004)

3.2 BIEGESTEIFIGKEIT (DIN 53121:2014-08)

Die Biegesteifigkeit ist der Widerstand, den eine Wellpappen-Probe aufwenden muss, um ein Biegen im elastischen Verformungsbereich zu verhindern (vgl. Abb. 10) (Reimers 2009). Zur Vermeidung von Verwindungs-, Welligkeits- und Wölbungseinflüssen wird ein Vierpunkt-Biegeverfahren eingesetzt (Markström 1991). Dabei wird die Wellpappen-Probe (Maschinenrichtung, Querrichtung) beidseitig an Auflager gelegt und durch zwei an den Enden symmetrisch wirkende Einzelkräfte beansprucht. Die Biegesteifigkeit zählt zu den wichtigsten Eigenschaften von Wellpappe, um eine hohe Leistungsfähigkeit der Wellpappen-Verpackungen erreichen zu können. Mithilfe der Biegesteifigkeit ist es möglich, einen Zusammenhang zwischen dem Stapelstauchwiderstand von fertigen Wellpappen-Verpackungen und den Eigenschaften der Wellpappe herzustellen. Die Biegesteifigkeit ist fast ausschließlich von der Dicke der Wellpappe abhängig (Markström 1991).

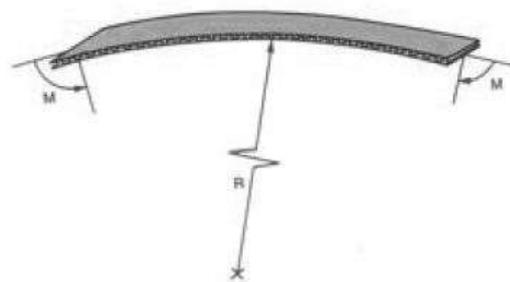


Abbildung 10: Messung der Biegesteifigkeit (BFSV e.V. 2009)

Bei der Berechnung der breitenbezogenen Biegesteifigkeit gilt:

$$S_b = E \times I \quad (1)$$

$S_b = \text{Breitenbezogene Biegesteifigkeit [Nmm]}$

$E = \text{Elastizitätsmodul [N/mm}^2]$

$I = \text{Flächenträgheitsmoment der Probe [mm}^4]$

3.3 STAPELSTAUCHWIDERSTAND (DIN 55440-1:2004-08)

Der Stapelstauchwiderstand (BCT: Box-Compression-Test) ist die maximale, senkrecht einwirkende Kraft, die eine ungefüllte, verschlossene Wellpappen-Verpackung mit bestimmten Abmessungen im ruhenden Zustand aushält, bis es zum Versagen kommt. Er ist der am häufigsten verwendete Kennwert, um die Stapelfähigkeit von Wellpappen-Verpackungen bei der Lagerung sowie das allgemeine Leistungsvermögen einer Wellpappen-Verpackung ermitteln zu können. Die Auslegung und die Planung von Wellpappen-Verpackungen erfolgen über den BCT-Wert (VdW 2004). Der BCT kann über die sogenannte McKee-Formel berechnet werden (2) (McKee *et al.* 1963).

$$BCT = k \times ECT^\beta \times S_b^{1-\beta} \times Z^{2\beta-1} \quad (2)$$

$BCT = \text{Schachtelstauchwiderstand [N]}$

$ECT = \text{Kantenstauchwiderstand [kN/m]}$

$S_b = \sqrt{S_{b_{MD}} \times S_{b_{CD}}} = \text{geometrischer Mittelwert der Biegesteifigkeit [Nm]}$

$k, \beta = \text{material – bzw. schachtelspezifische Konstanten}$

$Z = \text{Umfang der Schachtel (Breite, Länge)[mm]}$

Die McKee-Formel wurde an einwelligen Wellpappen mit geringen Festigkeiten ermittelt. Zur Verwendung der Formel für zwei- und dreiwellige Wellpappen müssen die Konstanten β und k für jede Wellpappen-Sorte einzeln empirisch bestimmt werden (Reimers 2009).

Der BCT liefert Erkenntnisse über die Tragfähigkeit von Wellpappen-Verpackungen unter festgelegten, labortechnischen Bedingungen. Um die im Versand tatsächlich auftretenden Beanspruchungen bei Transport, Umschlag und Lagerung erfassen zu können, werden in der Praxis Sicherheitsfaktoren von 3 bis 5 eingesetzt. Dabei erfolgt eine Abminderung der Festigkeit auf ca. 20 - 30 % des für diese Wellpappen-Verpackung ermittelten maximalen BCT-Wertes (Markström 1991, Reimers 2009).

3.4 LANGZEITUNTERSUCHUNGEN AN WELLPAPPE

Der Einsatz von Wellpappen-Verpackungen in europäischen und weltweiten Versandprozessen unterliegt sehr komplexen mechanischen und klimatischen Belastungen, die bei Transport, Umschlag und Lagerung auftreten. Es existieren keine Qualitätsstandards, die diese mechanischen und klimatischen Belastungen abbilden können, nur vorrangig unter Normklima durchgeführte quasistatische Standardprüfverfahren (Trost *et al.* 2016). Aufgrund des Fehlens von Prüfverfahren zur Erfassung und Auswertung rheologischer Werkstoffkennwerte wurden vom BFSV Prüfeinrichtungen entwickelt, die sich mit dem Kriechverhalten von Wellpappe beschäftigen.

Die Langzeituntersuchungen an Packmitteln haben zum Ziel, Erkenntnisse über die Langzeittragfähigkeit von Wellpappen-Verpackungen unter realen Versandbedingungen zu ermitteln. Im Verlauf der Prüfung werden Wellpappen-Verpackungen in speziellen Prüfeinrichtungen einer konstanten Last ausgesetzt. Bei dieser Last handelt es sich um 25 % des maximalen BCT-Wertes im Normklima. Während der Prüfung befindet sich die Prüfeinrichtung in einer Klimakammer, in der die beim Containerversand auftretenden wechselnden Klimabedingungen simuliert werden können (vgl. Abb. 11).



Abbildung 11: Langzeituntersuchungen an Wellpappen-Verpackungen

Die Kombination aus statischer Last und wechselnden Klimazyklen führt zum Kriechen der Wellpappen-Verpackung, bis diese langsam versagt. Analog zu der Prüfung des BCTs werden die Standzeit der Wellpappen-Verpackung und der maximale Stauchweg aufgezeichnet. Zudem kann die mittlere Kriechrate der Wellpappen-Verpackung über die Zeit ermittelt werden. Die Langzeituntersuchungen liefern Kennwerte zur tatsächlichen Gebrauchstauglichkeit der getesteten Wellpappen-Verpackung für den weltweiten Überseeversand. Allerdings ist die Prüfung sehr zeit- und kostenintensiv (Reimers 2009). Aus diesem Grund wurden vom BFSV e.V. Hamburg Untersuchungen zur Korrelation zwischen den Kriechraten von Wellpappen-Verpackungen und den Kriechraten von Wellpappen-Proben durchgeführt.

4. SIMULATION DES MATERIALVERHALTENS

4.1 RHEOLOGISCHE MODELLE

Der Begriff der Rheologie wird in der Fachliteratur als die Lehre vom zeitabhängigen Fließverhalten von Flüssigkeiten und der Deformation von Festkörpern definiert. Rheologische Modelle nutzen die mechanischen Grundelemente Feder, Dämpfer und Reibelement, um die bei einer Deformation auftretenden Materialeigenschaften Elastizität, Viskosität und Plastizität zu beschreiben. Dadurch ist es möglich, das Verhalten von Materialien auf eine äußere Belastung mithilfe einfacher mathematischer Gleichungen zu bestimmen (Altenbach 2015, Mezger 2010). Aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens von Wellpappe werden im Folgenden nur die Elastizität und die Viskosität thematisiert.

Reale Substanzen weisen einen elastischen und einen viskosen Verformungsanteil auf, sie verhalten sich somit viskoelastisch (Mezger 2010). Bei der Viskoelastizität ergeben sich die beiden Grenzfälle der frei fließenden (und elastischen) Flüssigkeit und des elastischen (nicht fließenden) Materials. Die freifließende Flüssigkeit kann durch das Newtonsche Gesetz, das elastische Material durch das Hookesche Gesetz beschrieben werden (Koltzenburg *et al.* 2014).

Das Hookesche Gesetz kann modellhaft durch eine ideale Feder beschreiben werden. Hierbei ist die Spannung σ proportional zur Dehnung ϵ , jedoch unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit. Der Proportionalitätsfaktor ist das Elastizitätsmodul E . Dieser ist sowohl materialabhängig als auch abhängig unter anderem von der Temperatur, der Materialfeuchte und der Belastungsgeschwindigkeit. In der folgenden Abbildung ist die ideale Feder und das Kriech- und Relaxationsverhalten von rein elastischen Materialien dargestellt (vgl. Abb. 12) (Hying 2003, Mezger 2010, Koltzenburg *et al.* 2014).

4. Simulation des Materialverhaltens

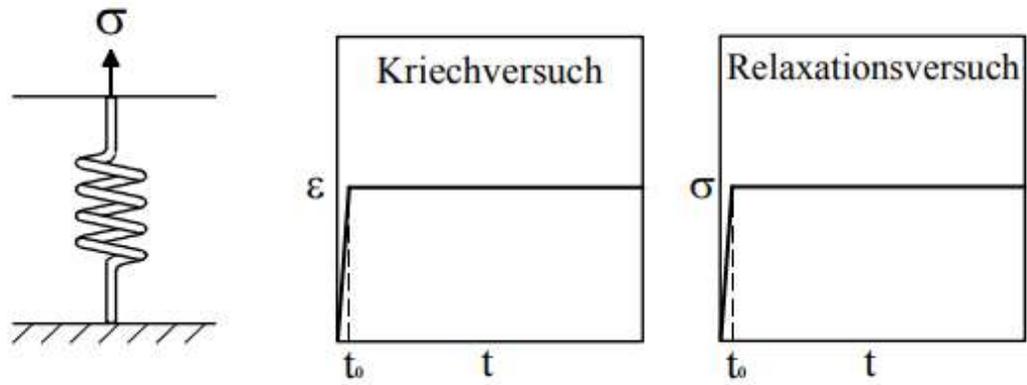


Abbildung 12: Verhalten von rein elastischen Materialien (Hying 2003)

Dabei gilt für ein elastisches Material nach Hooke (3):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

σ = Spannung

E = Elastizitätsmodell

ε = elastische Dehnung der Länge l um den Betrag x

Das Newtonsche Gesetz kann modellhaft durch ein Dämpfungselement abgebildet werden. Dabei ist die Spannung σ unabhängig von der Dehnung ε , jedoch proportional zur Dehnungsgeschwindigkeit. Der Proportionalitätsfaktor ist die materialabhängige Viskosität η . Die folgende Abbildung zeigt das Dämpfungselement und das Kriech- bzw. Relaxationsverhalten von ideal viskosen Materialien (vgl. Abb. 13) (Hying 2003, Mezger 2010, Koltzenburg *et al.* 2014).

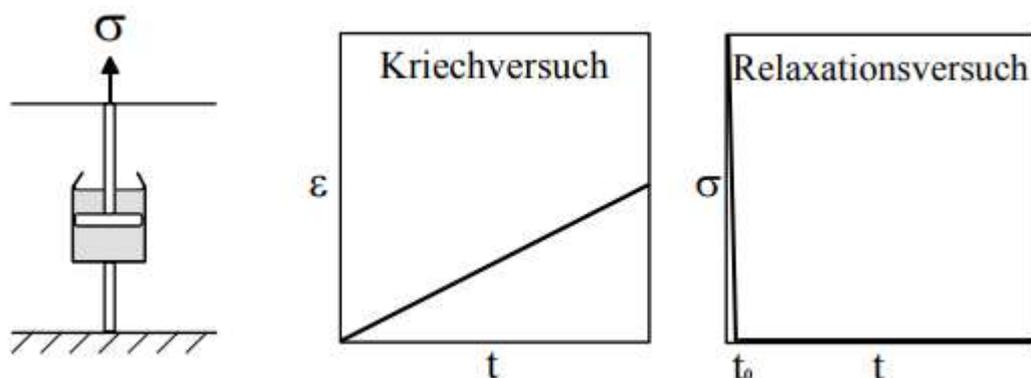


Abbildung 13: Verhalten von rein viskosen Materialien (Hying 2003)

Für die viskose, frei fließende Flüssigkeit gilt nach Newton (4):

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4)$$

$\eta = \text{Viskosität}$

$t = \text{Zeit}$

Diese beiden Modelle können das Verhalten von viskoelastischen Materialien nicht korrekt beschreiben. Eine genaue Darstellung des zeit- und geschwindigkeitsabhängigen Materialverhaltens (auch des Kriechverhaltens) ermöglichen nur Kombinationsmodelle (Hying 2003, Mezger 2010, Schneider *et al.* 2016, Koltzenburg *et al.* 2014).

Mithilfe von einfachen Feder-Dämpfer-Modellen, wie dem Maxwell- und dem Kelvin-Körper, kann das Verhalten von viskoelastischen Materialien realitätsnah beschrieben werden. Das spontane, elastische Verhalten wird von einem Federelement und das zeitabhängige, irreversible (plastische) Verhalten von einem Dämpferelement dargestellt. Dabei kann die Anordnung sowohl parallel als auch in Reihe geschaltet sein, wobei sich je nach Anordnung verschiedene Reaktionen gegenüber auftretenden Kräften ergeben. Neben den einfach gehaltenen Modellen existieren auch komplexere Modelle des viskoelastischen Verhaltens, wie das Zener_m-, Zener_k-, Lethersich-, Jeffreys- und Burgers-Modell. In der vorliegenden Arbeit wird das sogenannte Maxwell-Modell genutzt, da dieses das Materialverhalten von papierbasierten Werkstoffen auf eine aufgebrauchte Belastung hinreichend beschreiben kann (vgl. Abb. 14) (Ranz 2007, Hying 2003).



Abbildung 14: Maxwell-Element (E= Feder, η = Dämpfer) (Rust 2011)

Bei dem Maxwell-Modell werden die Feder- und Dämpferelemente in Reihe geschaltet. Nach dem Anlegen einer Belastung entsteht eine Spannung und die Feder verformt sich spontan. Es tritt eine zeitabhängig viskose Verformung ein. Die Entlastung führt dazu, dass die Feder in den Ursprungszustand zurückkehrt und der Dämpfer im ausgelenkten Zustand verweilt. Dadurch entstehen sowohl eine zeitabhängige und irreversible Verformung, als auch ein zeitunabhängiger und reversibler, spontanelastischer Verformungsanteil (vgl. Abb. 15) (Ranz 2007).

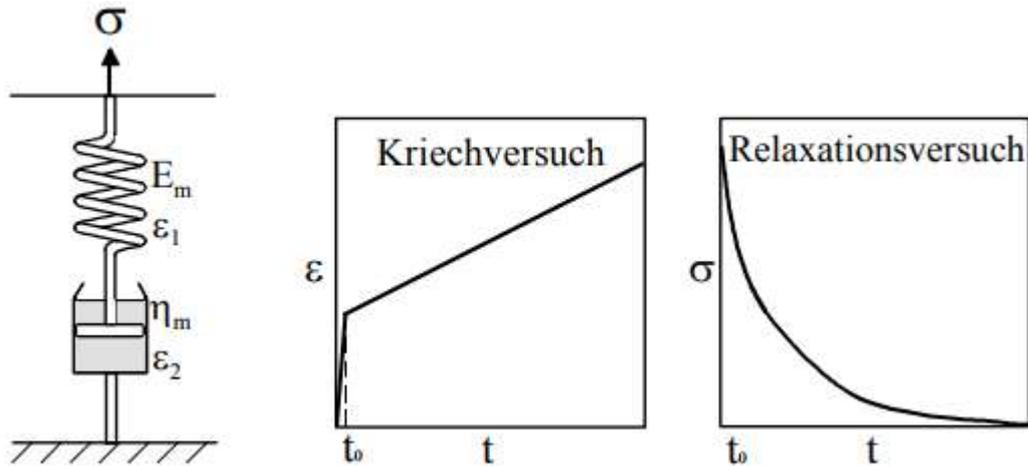


Abbildung 15: Verhalten von viskoelastischen Materialien (Hying 2003)

Dabei gilt nach dem Maxwell-Modell unter Berücksichtigung der Randbedingungen $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ und $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_m} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_m} \quad (5)$$

Für den Spannungsrelaxationsversuch mit konstanter Dehnung gilt:

$$\tau = \frac{\eta_m}{E_m} \quad (6)$$

$\tau = \text{Relaxationszeit}$

Nach der Integration ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (7)$$

$$E(t) = E_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (8)$$

Das Maxwell-Modell ermöglicht es, die anfängliche Auslenkung des Materials und den anschließenden Kriechprozess bei gleichbleibender Belastung zu simulieren. Zudem kann über das Maxwell-Modell das Verformungsverhalten eines Werkstoffes mit definiert aufgebrachtter Belastungsgeschwindigkeit beschrieben werden. Für die Wiedergabe des Materialverhaltens im gesamten Belastungsspektrum wird das Maxwell-Modell um mehrere Feder-Dämpfer-Kombinationen erweitert. Somit entsteht eine Parallelschaltung von Maxwell-Elementen mit einer begrenzenden, parallel geschalteten Feder, das sogenannte generalisierte Maxwell-Modell. Die parallel angeordnete Feder sorgt dabei lediglich für die maximale Begrenzung des Verformungssystems (vgl. Abb. 16) (Ranz 2007).

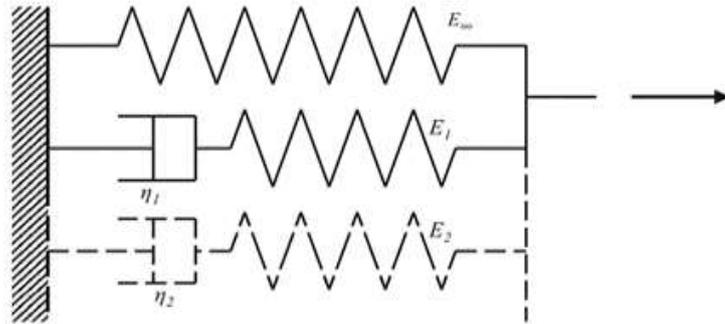


Abbildung 16: Generalisiertes Maxwell-Modell (E = Feder, η = Dämpfer) (Rust 2011)

Für die Anwendung zur Materialsimulation werden für eine n -fache Parallelschaltung ca. n Feder- und n Dämpferkonstanten für den Werkstoff ermittelt. Die Dämpfer werden mit gestaffelter Empfindlichkeit bezüglich der Geschwindigkeit und Federn mit gestaffelter Empfindlichkeit bezüglich der Kraft angeordnet. Somit beeinflussen die Dämpfer sowohl die Deformation in entsprechender Geschwindigkeit bei kurzzeitiger Belastung, als auch bei länger währenden, sich anpassenden Deformationen nach einmalig schnell aufgebrachtener Last (Menges *et al.* 2002). Die anschließende Berechnung des Relaxationsmodells für länger währende, sich anpassende Deformationen nach einmalig schnell aufgebrachtener Last erfolgt im Rahmen der Prony-Analyse. Die Prony-Analyse ist eine Reihenentwicklung von Gliedern, die der Anzahl der Feder- und Dämpferkonstanten im generalisierten Maxwell-Modell entspricht. Als Ergebnis liefert sie eine eindimensionale Formulierung des zeitlichen Verlaufs, beispielsweise von dem E-Modul (Kuntsche 2015, Popov 2009, Schneider *et al.* 2016). Auf das E-Modul angewendet, ergibt sich folgende mathematische Beschreibung (9):

$$E(t) = E_{\infty} - \sum_{i=1}^n E_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (9)$$

Mithilfe des generalisierten Maxwell-Modells und der Prony-Analyse konnte bereits das geschwindigkeitsabhängige Materialverhalten von Polymeren erfolgreich simuliert werden (Michaeli *et al.* 2006, Ranz 2007, Hying 2003). Über eine Materialsimulation von Wellpappe-Proben gibt es in der gängigen Literatur bislang keine Angaben.

4.2 KONTINUUMSMECHANIK

Die Kontinuumsmechanik wird in der Literatur als phänomenologische Feldtheorie beschrieben. Dabei werden mathematische Modelle aus beobachteten Phänomenen und experimentellen Erfahrungen erstellt, um das mechanische Verhalten von Materie unter äußeren Einwirkungen durch z.B. Kräfte und Momente, Erwärmung oder Befeuchtung zu beschreiben. Der makroskopische, atomare Aufbau der Materie wird vernachlässigt. Der Körper wird als zusammenhängende Menge von materiellen Punkten, dem sogenannten Kontinuum, abgebildet. Jedem materiellen Punkt sind bestimmte physikalische Größen (Spannungen, Temperaturen, Feuchte) zugewiesen. Die physikalischen Größen werden auch als Felder bezeichnet. Für die Berechnung der Bewegung eines Körpers unter bestimmten Randbedingungen sind Feldgleichungen (Beziehungen zwischen den einzelnen Feldern) festzulegen. Die Feldgleichungen ergeben zusammen ein System gekoppelter, nichtlinearer, partieller Differentialgleichungen, das numerisch z.B. mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) gelöst werden kann. Wird das System im Rahmen der FEM mit einer konkreten CAD-basierten Geometrie zu einem geschlossenen numerischen Modell verknüpft, ist es möglich, den zeitlichen Verlauf einer Deformation bis hin zum Stabilitätsversagen für beliebige mechanische Belastungssituationen zu simulieren. Zudem sind die inneren dreidimensionalen Spannungs- und Deformationszustände einsehbar (Altenbach 2015, Steinke 2012).

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist der am häufigsten verwendete Prozess um komplexe Konstruktionen zu berechnen. Dabei werden unter anderem Festigkeits-, Schwingungs- und Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt (Knothe *et al.* 2017).

Die Abbildung 17 stellt das Vorgehen bei der FEM dar. Informationen und Daten werden in eckigen Kästchen und Rechnungen und Tätigkeiten in Kästchen mit abgerundeten Ecken abgebildet.

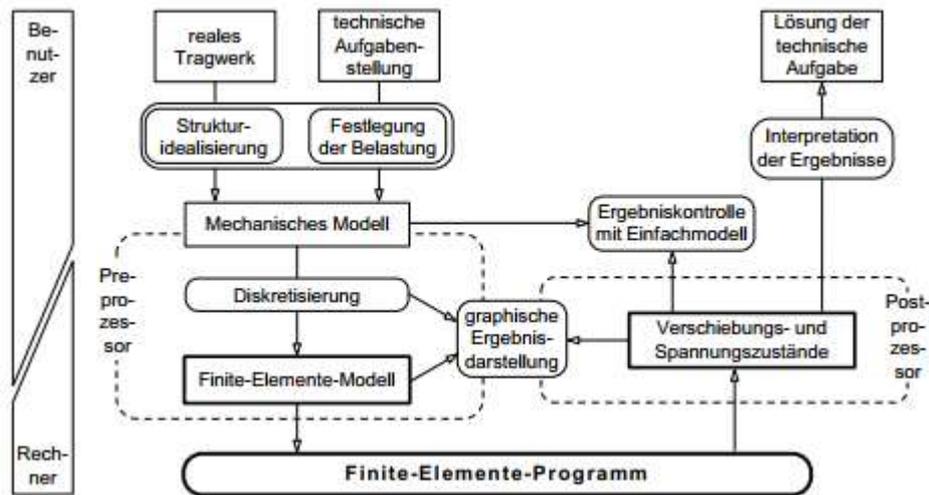


Abbildung 17: Finite-Elemente-Methode (Knothe *et al.* 2017)

Bevor ein reales Tragwerk unter einer technischen Aufgabenstellung mithilfe der FEM berechnet werden kann, muss die Struktur idealisiert werden. Dabei wird festgelegt, welche Details der Struktur unter der Berücksichtigung der Aufgabenstellung weggelassen werden können. Zudem muss die Belastung bestimmt werden.

Im ersten Schritt der FEM, dem sogenannten Pre-Prozessor oder Modellaufbereitung, wird das Bauteil in finite Elemente zerlegt (Diskretisierung). Die Anzahl der Elemente kann beliebig bestimmt werden, wird jedoch durch die Rechnerleistung begrenzt. Anschließend werden das Material des Bauteils und die Randbedingungen (z.B. äußere Belastungen) definiert, um die mechanischen Eigenschaften und somit die Reaktion des Bauteils auf äußere Kräfte festlegen zu können. Die gesamten Daten werden über den Solver gelöst (hier: Finite-Elemente-Programm). Dabei können je nach eingesetzten Solver sowohl mechanische als auch thermische oder magnetische Größen berechnet werden. Im letzten Schritt, dem sogenannten Post-Prozessor, werden die Berechnungsergebnisse aus dem Solver graphisch ausgewertet. Dabei werden Kräfte, Spannungs- und Verschiebungszustände angezeigt (Knothe *et al.* 2017, Wagner 2017).

Die Simulation von Wellpappen-Verpackungen mithilfe der FEM wurde in verschiedenen Formen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen an Wellpappen durchgeführt. Einen ausführlichen Überblick über die bisher durchgeführten Simulationen liefern Niskanen 2012, Pathare *et al.* 2014 und Sohrabpour *et al.* 2011. Dabei werden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen ersichtlich - homogenisierte und detaillierte Darstellungen. Bei homogenisierten Modellen wird die Wellpappe als zusammenhängende Lagenstruktur dargestellt (vgl. Abb. 18).

4. Simulation des Materialverhaltens

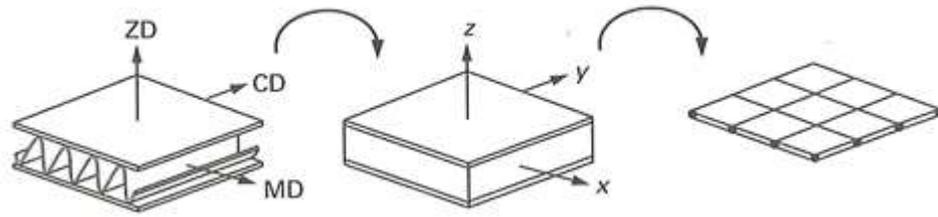


Abbildung 18: Homogenisierte Darstellung von einwelliger Wellpappe (Niskanen 2012)

Im detaillierten Modell wird jede einzelne Lage der Wellpappe simuliert. Die Verbindungen von Wellenmaterial und Liner werden über Knotenpunkte an den Wellenkämmen abgebildet. Mit beiden Modellen ist es möglich, das Verhalten hinreichend gut abzubilden. Jedoch kann mithilfe des homogenisierten Modells die Einflussnahme der Eigenschaften des Wellmaterials nicht untersucht werden (Niskanen 2012).

5. EIGENE UNTERSUCHUNGEN

Um die verwendeten Wellpappen vergleichen zu können werden die in Kapitel 3. Mechanisch-technologische Eigenschaften von Wellpappe aufgelisteten Standardprüfungen durchgeführt. Die Sorteneinteilung der Wellpappen erfolgt nach DIN 55468-1:2015-06. Im folgenden Abschnitt werden nur die Prüfungen genauer beschrieben, die in abgeänderter Form durchgeführt wurden. Zudem werden die Kriechversuche und die Systematik der Simulation des Kriechverhaltens erläutert.

5.1 MATERIALUNTERSUCHUNGEN AN WELLPAPPEN

Die Materialuntersuchungen an den Wellpappen gliedern sich in die Beschreibung des Ausgangsmaterials und die genauen Durchführungen der Prüfungen des Kantenstauchwiderstandes, der Biegesteifigkeit und des Stapelstauchwiderstandes.

5.1.1 AUSGANGSMATERIAL

Das Ausgangsmaterial umfasst fünf verschiedene zwei- und dreiwellige Wellpappen von drei Herstellern (anonymisiert). Die Wellpappen-Verpackungen besitzen die Bauart FEFCO 0201 (vgl. Abb. 19) und die Abmessungen 800 x 1200 x 400 mm (L x B x H).

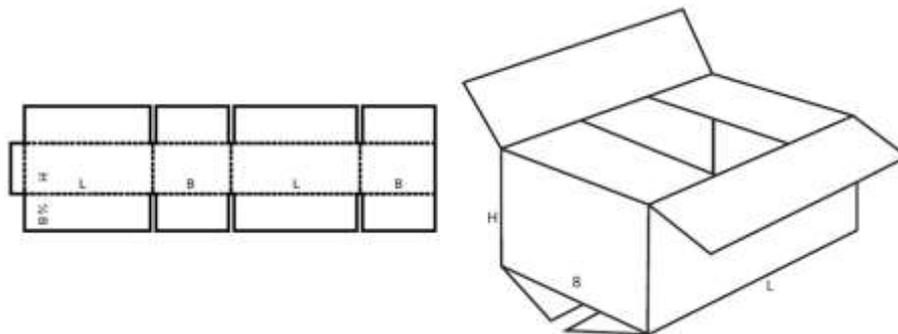


Abbildung 19: Konstruktion der Wellpappen-Verpackung gemäß FEFCO 0201 (www.fefco-code.de)

Vor Beginn der Versuche werden die Wellpappen-Proben im Normklima bei einer Temperatur von (23 ± 1) °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von (50 ± 2) % klimatisiert (DIN EN 20187:1993) – dies entspricht einer Ausgleichsfeuchte von 6 - 8 %. Dadurch wird der Erhalt von national und international vergleichbaren Ergebnissen gesichert (VdW 2004). Zusätzlich werden bei Versuchen des Kantenstauchwiderstandes, der Biegesteifigkeit und des Stapel-

stauchwiderstandes die Proben bei einer Temperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 % klimatisiert und getestet. Damit wird der Einfluss einer höheren Luftfeuchtigkeit auf die Festigkeitseigenschaften der Wellpappen-Proben untersucht.

5.1.2 KANTENSTAUCHWIDERSTAND (DIN EN ISO 3037:2007-06)

Die Untersuchung des Kantenstauchwiderstandes erfolgt nach DIN EN ISO 3037:2007-06. Zur Prüfung wird in dieser Arbeit ein vollautomatisches Messsystem der Firma Zwick Typ SMZ 020 verwendet (vgl. Abb. 20).

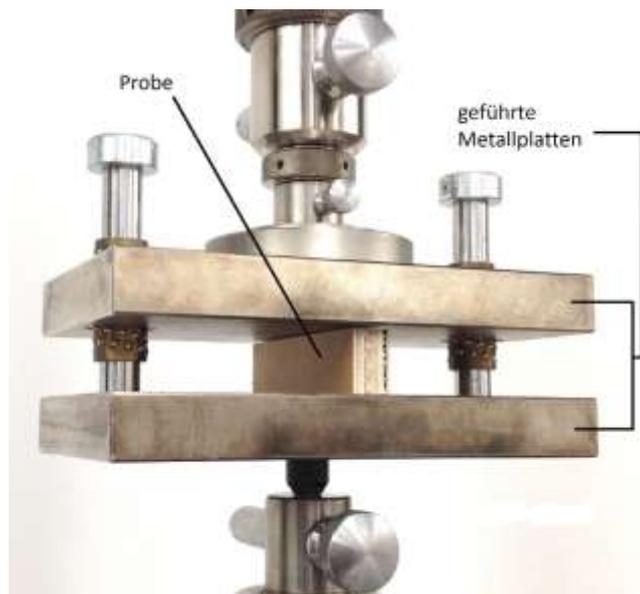


Abbildung 20: Messung des Kantenstauchwiderstandes

Bei der Prüfung werden zwölf Proben pro Wellpappen-Sorte mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 12,5 mm/min getestet. Zusätzlich dazu werden Untersuchungen mit fünf verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt. Diese entsprechen den Dehnraten $0,1 \text{ s}^{-1}$, $0,01 \text{ s}^{-1}$, $0,001 \text{ s}^{-1}$, $0,0001 \text{ s}^{-1}$ und $0,00001 \text{ s}^{-1}$. Die Messungen werden teilweise im Normklima und im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) durchgeführt.

Vor Beginn der Prüfung werden die Proben (Abmessungen $(25 \pm 0,5) \times (100 \pm 0,5) \text{ mm}$) mithilfe einer Kreissäge zugeschnitten. Dabei muss die Probenvorbereitung sorgsam durchgeführt werden. Es ist darauf zu achten, dass die belasteten, einander gegenüberliegenden Kanten der Proben möglichst parallel und frei von Mängeln, wie beispielsweise beschädigten Wellen, sind, um eine negative Beeinflussung der Ergebnisse zu vermeiden (Kroeschell 1992). Anschließend wird das Messsystem gestartet, ein neues Prüfprotokoll erstellt, eine Probe

zwischen den Druckplatten zentriert und die Messung gestartet. Während der Prüfung wird auf dem Bildschirm des mit dem Messsystem verbundenen Computers ein Kraft-Weg-Diagramm sichtbar. Abschließend wird der E-Modul aus den aufgezeichneten Graphen ermittelt und das Prüfprotokoll mit allen ECT-Werten, deren Mittelwerten und Standardabweichungen erstellt.

5.1.3 BIEGESTEIFIGKEIT (DIN 53121:2014-08)

Die Untersuchung der Biegesteifigkeit wird nach der Balkenmethode durch ein breitenbezogenes 4-Punkt-Verfahren nach DIN 53121:2014-08 an einer Prüfeinrichtung der Firma Zwick Typ SMZ 020 durchgeführt (vgl. Abb. 21).

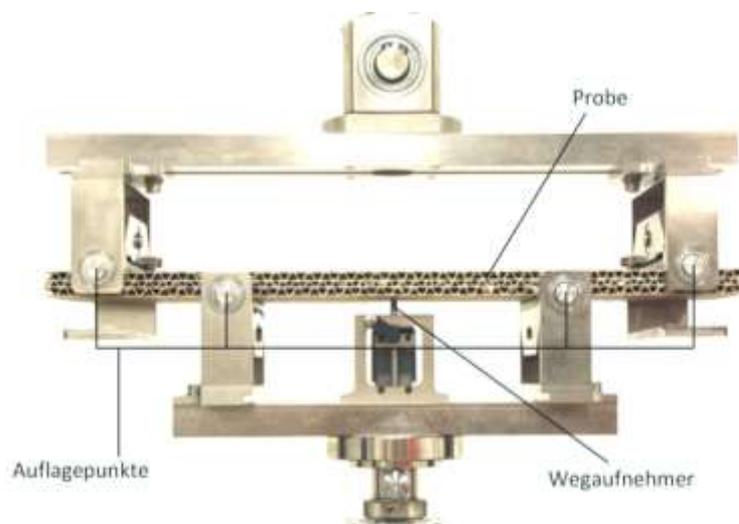


Abbildung 21: Messung der Biegesteifigkeit

Dabei werden 12 Proben - 6 Proben in Maschinenlaufrichtung und 6 Proben in Querrichtung - getestet. Darüber hinaus werden Untersuchungen mit fünf verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt, die den Dehnraten $0,1 \text{ s}^{-1}$, $0,01 \text{ s}^{-1}$, $0,001 \text{ s}^{-1}$, $0,0001 \text{ s}^{-1}$ und $0,00001 \text{ s}^{-1}$ entsprechen. Die Messung wird sowohl mit im Normklima gelagerten Proben als auch mit im Feuchtklima gelagerten Proben durchgeführt.

Im ersten Schritt werden die Proben auf einer Kreissäge auf $100 \times 400 \text{ mm}$ zugeschnitten. Die Proben sollen augenscheinlich frei von Mängeln sein. Anschließend wird die Probe in der Prüfeinrichtung zentriert und die vollautomatische Prüfung gestartet. Die Prüfung endet, wenn die Dehnung der Außenschichten der Probe $0,05 \%$ überschreitet. Nach der Prüfung können die Ergebnisse auf dem Bildschirm abgelesen und das Prüfprotokoll ausgedruckt werden.

5.1.4 STAPELSTAUCHWIDERSTAND (DIN 55440-1:2004-08)

Die Bestimmung des Stapelstauchwiderstandes erfolgt nach DIN 55440-1:2004-08. Zur Prüfung wird die Druckprüfmaschine der Firma Karl Frank GmbH Typ 18537 genutzt (vgl. Abb. 22). Bei der Prüfung werden sechs Proben pro Wellpappe untersucht, welche sowohl im Normklima als auch im Feuchtklima klimatisiert wurden.



Abbildung 22: Messung des Stapelstauchwiderstandes

Vor Beginn der Prüfung werden die Wellpappen-Verpackungen klimatisiert und aufgebaut. Die Seitenklappen der Querseiten werden so eingeschnitten, dass diese ein Zusammenbrechen der Schachteln nicht stören (vgl. rote Linien in Abb. 23).

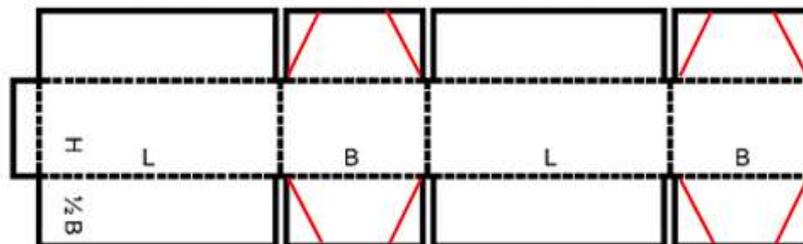


Abbildung 23: Eingeschnittene Seitenklappen einer Wellpappen-Verpackung

In einer kleineren Versuchsreihe wird der Einfluss von eingeschnittenen Kanten auf den Stapelstauchwiderstand im Norm- und Feuchtklima untersucht. Dazu wird ein Teil der Wellpappen-Verpackungen ohne eingeschnittene Seitenklappen geprüft. Die aufgebauten und leeren Verpackungen werden mit Klebeband verschlossen. Anschließend wird die Probe auf der

Druckplatte zentriert (Fabrikkante befindet sich hinten links) und die Messung wird gestartet. Die Ergebnisse können auf dem Display abgelesen werden.

5.2 KRIECHVERSUCHE

Bei den Kriechversuchen werden sowohl Wellpappen-Proben als auch Wellpappen-Verpackungen getestet. Dabei werden die Untersuchungen an Wellpappen-Proben mithilfe von zwei am Institut für BFSV e.V. neu entwickelten Prüfeinrichtungen, der Kaskaden- und der Einzelprüfeinrichtung durchgeführt (vgl. Anhang 9.3, Anhang 9.4).

5.2.1 KRIECHVERHALTEN VON WELLPAPPEN-PROBEN

Während der Arbeit wurden zwei Prüfeinrichtungen zur Untersuchung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung entwickelt und in Betrieb genommen (vgl. Abb. 24, Abb. 25). Bei der Inbetriebnahme wurde vor allem auf die Planparallelität der Prüfplatten und deren spielfreie Lagerung Wert gelegt, da diese die Messung erheblich negativ beeinflussen können. Nach Modifikationen der Prüfeinrichtungen war es möglich, reproduzierbare Kriechraten an Wellpappen-Proben zu erfassen (vgl. Anhang 9.3).

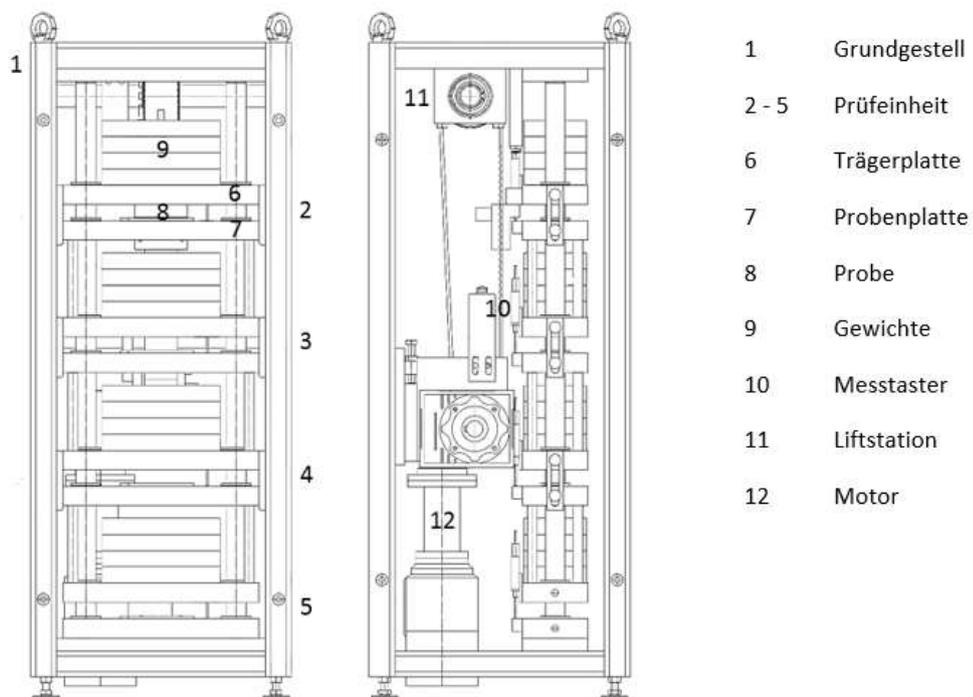


Abbildung 24: Kaskadenprüfeinrichtung

Das Grundgestell (1) der Kaskadenprüfeinrichtung beinhaltet vier Prüfeinheiten (2-5) zur simultanen Untersuchung von vier ECT-Proben, Abb. 24. Eine Prüfeinheit besteht aus einer Träger- (6) und einer Probenplatte (7). Im Prüfverlauf werden auf den Probenplatten die Prüflinge (8) platziert. Die für die Prüfung benötigten Gewichte (9) werden auf den Trägerplatten angeordnet. Zur Messung der Wegveränderung sind an jeder Prüfeinheit Digitalmesstaster (10) montiert. Mithilfe der Liftstation (11) und des Motors (12) werden die Prüfeinheiten zusammen- und auseinandergefahren (vgl. Anhang 9.3).

Bei der Handhabung der Kaskadenprüfeinrichtung wurden Vor- und Nachteile deutlich. Der kaskadenartige Aufbau der Prüfeinrichtung ermöglicht die Untersuchung von vier Proben zur selben Zeit. Durch die Aufsummierung der Gewichte der einzelnen Prüfeinheiten können die erste und die vierte Etage jedoch nur selten genutzt werden. Positiv ist das automatisierte Hoch- und Herunterfahren der Prüfetage zu sehen, da es die Bedienung der Einrichtung durch lediglich eine Person ermöglicht. Für das Versetzen der Prüfeinrichtung ist aufgrund des hohen Eigengewichts und der massiven Bauweise der Prüfeinrichtung ein Hubwagen notwendig. Bedingt durch den Aufbau und die Größe der Prüfeinheiten sind die Abmessungen der Prüfkörper räumlich begrenzt. Zudem können maximal zwei Wegaufnehmer pro Prüfetage angebracht werden. Auch die Einflussnahme eines Versagens der Probe und die Übertragung des damit verbundenen Stoßes auf die weiteren Proben sind nicht auszuschließen. Aus den oben genannten Gründen wurde die Einzelprüfeinrichtung zur Untersuchung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung entwickelt (vgl. Abb. 25) (vgl. Anhang 9.4).

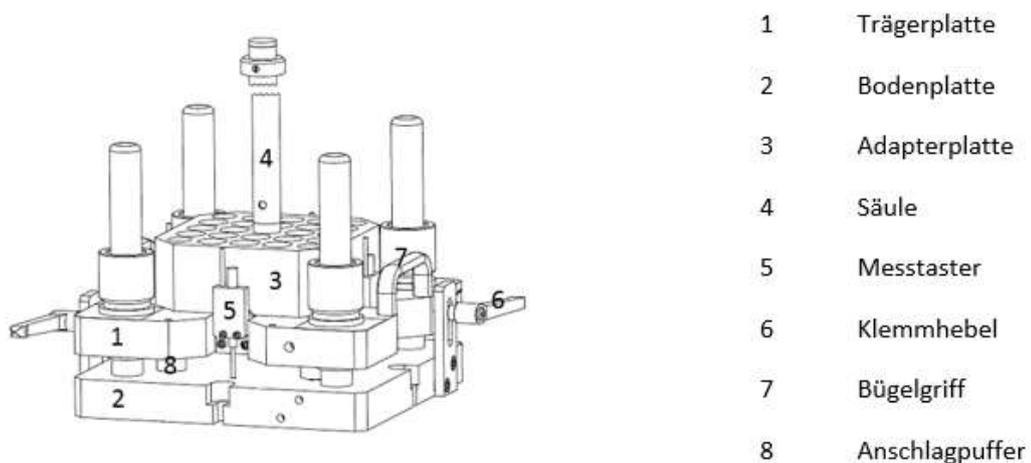


Abbildung 25: Einzelprüfeinrichtung

Die Einzelprüfeinrichtung besteht aus zwei präzisen, planparallelen Platten, die über vier Führungssäulen gegeneinander verschoben werden können. Aufgrund der vier auf Kugellagern gelagerten Führungssäulen wird eine steife und spielfreie Lagerung der Gewichte ermöglicht. Ebenso wird die parallele Belastung der Probe garantiert. Zu Beginn des Versuches wird die obere Platte, die sogenannte Trägerplatte, angehoben und über den entsprechenden Klemmhebel (6) fixiert. Im Prüfraum zwischen der Boden- und der Trägerplatte wird die ECT-Probe mittig platziert. Nach vorsichtigem Lösen der Klemmhebel wird die Trägerplatte langsam auf die Probe abgesenkt. Auf der Adapterplatte können die Gewichte über eine Säule aufgenommen werden. Der spezielle Aufbau sorgt für eine sichere und stabile Platzierung der Gewichte. Um die Wegveränderungen der Probe während der Messung aufzuzeichnen sind an allen vier Seiten der Prüfeinrichtung Digitalmesstaster montiert. Zur Vermeidung von Korrosionserscheinungen sind sämtliche Teile der Einzelprüfeinrichtung aus Edelstahl gefertigt (vgl. Anhang 9.4).

Vor der Nutzung der zwei Prüfeinrichtungen zur Durchführung von Kriechversuchen an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung werden beide in Betrieb genommen. Dabei werden die Planparallelitäten und die Eigengewichte der Prüfetagen ermittelt (vgl. Anhang 9.3, Anhang 9.4). Zusätzlich werden Vergleichsuntersuchungen der beiden Prüfeinrichtungen durchgeführt, um mit ihnen verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse erzielen zu können. Um die Einflussgrößen auf die Kriechuntersuchung ermitteln zu können, werden beeinflussbare und nicht beeinflussbare Faktoren bestimmt. Zu den nicht beeinflussbaren Faktoren zählen Produktionsparameter der Wellpappe, Umweltbedingungen der vorherigen Lagerung der Wellpappe und Materialeigenschaften, welche nicht durch eine eingehende Sichtprüfung der Proben erkannt werden können. Die beeinflussbaren Faktoren, wie beispielsweise Alterung des Probenmaterials, Feuchteverteilung in der Klimakammer und äußere mechanische Einwirkungen, werden in Untersuchungsreihen gesondert betrachtet (vgl. Anhang 9.5).

Zu Beginn des Versuches werden die beiden Prüfeinrichtungen in einer Klimakammer platziert und mit Hilfe einer Wasserwaage horizontal und vertikal ausgerichtet. In der Klimakammer wird entweder das Normklima (23 °C/ 50 % RH), das Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) oder das Wechselklima eingestellt. Das Wechselklima beginnt mit einer dreistündigen Phase bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und wechselt dann innerhalb von einer Stunde auf eine dreistündige Phase bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 %, bei einer konstanten Temperatur von 23 °C. Für die Entfeuchtung auf eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % wird nochmals eine Stunde benötigt. Somit dauert ein Klimazyklus acht Stunden. Anschließend

werden die Prüfetagen mit den Proben bestückt und mithilfe eines speziell dafür angefertigten Anschlagbleches zentriert. Weiterhin werden die zuvor berechneten Gewichte zur Erzeugung der 15 %, 25 % oder 33 % des maximalen ECT-Wertes (umgerechnet in kg) aufgebracht und die Messung gestartet. Die Dimensionsänderungen der Proben werden mithilfe von Wegaufnehmern über die gesamte Versuchsdauer hinweg aufgezeichnet. Die Messung endet, wenn die Wellpappen-Probe versagt. Im letzten Schritt wird die Messung mithilfe einer Excel-Tabelle ausgewertet.

5.2.2 KRIECHVERHALTEN VON WELLPAPPEN-VERPACKUNGEN

Die Untersuchung des Stapelstauchwiderstandes im Langzeitversuch, auch BCT-Langzeitwert genannt, ist nicht normiert und erfolgt anhand von Erfahrungen des BFSV e.V. Hamburg. Die Prüfung wird mit drei selbstkonstruierten Druckprüfeinrichtungen durchgeführt, die sich in einer Klimakammer befinden. Um den Einfluss von möglichen Ungenauigkeiten der einzelnen Prüfgestelle auf die Untersuchungsergebnisse zu vermindern, werden die Proben abwechselnd in allen Prüfstellen getestet.

Vor Beginn der Prüfung werden die Wellpappen-Verpackungen, wie bereits bei der Messung des Stapelstauchwiderstandes oben erklärt, vorbereitet und aufgebaut. Zeitgleich wird das für die Prüfung benötigte Klima in der Klimakammer eingestellt. Dabei handelt es sich entweder um das Normklima (23 °C/ 50 % RH), das Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) oder das Wechselklima. Das Wechselklima der Wellpappen-Verpackungen beginnt mit einer zehnstündigen Phase bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und wechselt anschließend innerhalb von zwei Stunden auf eine zehnstündige Phase bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 %, bei einer konstanten Temperatur von 23 °C. Mit der zweistündigen Entfeuchtungsphase auf eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % beträgt die Zyklusdauer einen Tag. Anschließend werden die Proben zwischen den Druckplatten zentriert (Fabrikkante befindet sich hinten links), die Druckplatten heruntergefahren, der Wegaufnehmer befestigt und die Messung gestartet. Weiterhin wird der benötigte Druck zur Aufbringung der 15 %, 25 % oder 33 % des maximalen BCT-Wertes (umgerechnet in bar) eingestellt. Die Messung endet, wenn die Wellpappen-Verpackung versagt. Im letzten Schritt wird die Form der Ausbeulung notiert und die Messung mithilfe einer Excel-Tabelle ausgewertet.

5.3 SIMULATION DES KRIECHVERHALTENS

Die Systematik zur Simulation des Kriechverhaltens wird in Anhang 9.6 detailliert beschrieben. Aus diesem Grund wird hier nur ein Überblick über die Methodik gegeben. Im ersten Schritt wird dabei das Materialmodell und im zweiten Schritt die Simulation thematisiert.

Die Erstellung des Materialmodells und die Simulation des Kriechverhaltens wurden in Kooperation mit der Papiertechnischen Stiftung in Heidenau (PTS) über das IGF Forschungsprojekt 18876 BG „Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappe-Verpackungen“ durchgeführt. Die PTS besitzt auf dem Gebiet der Simulation des Verhaltens von faserbasierten Werkstoffen tiefgreifendes Wissen durch langjährige Erfahrung.

5.3.1 MATERIALMODELL

Für die Berechnungen wird ein vierfaches, generalisiertes Maxwell-Modell genutzt. Dabei werden vier Maxwell-Elemente mit einer begrenzenden, parallel geschalteten Feder nebeneinander angeordnet. Berechnungen haben gezeigt, dass die Genauigkeit des Modells ab einer Anzahl von vier Maxwell-Elementen nicht mehr mit einer gleichzeitig steigenden Versuchszahl zur Bestimmung der Parameter einhergeht.

Im ersten Schritt werden die Ergebnisse der geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche in ihrem linear elastischen Bereich ausgewertet. Mithilfe der Formel (10) wird die Berechnung einer anliegenden Spannung in Abhängigkeit von der angelegten Dehnrates und der Werkstoffparameter für Federung und Dämpfung durchgeführt.

$$\sigma = \dot{\epsilon} \cdot \sum_{i=1}^n \eta_i \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} t}\right) \quad (10)$$

$\dot{\epsilon}$ = Dehnrates

n = Anzahl der Maxwell-Elemente

η = Dämpfungskonstante

E = Federkonstante (E-Modul)

t = Zeit

Durch eine schrittweise Parameteruntersuchung, in der sowohl die einzelnen E-Module als auch die Dämpfungskonstanten systematisch geändert und ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis untersucht werden, ist es möglich, die aufgenommenen Verlaufskurven durch diese mathematische Darstellung nachzubilden (vgl. Abb. 26 rote Linien).

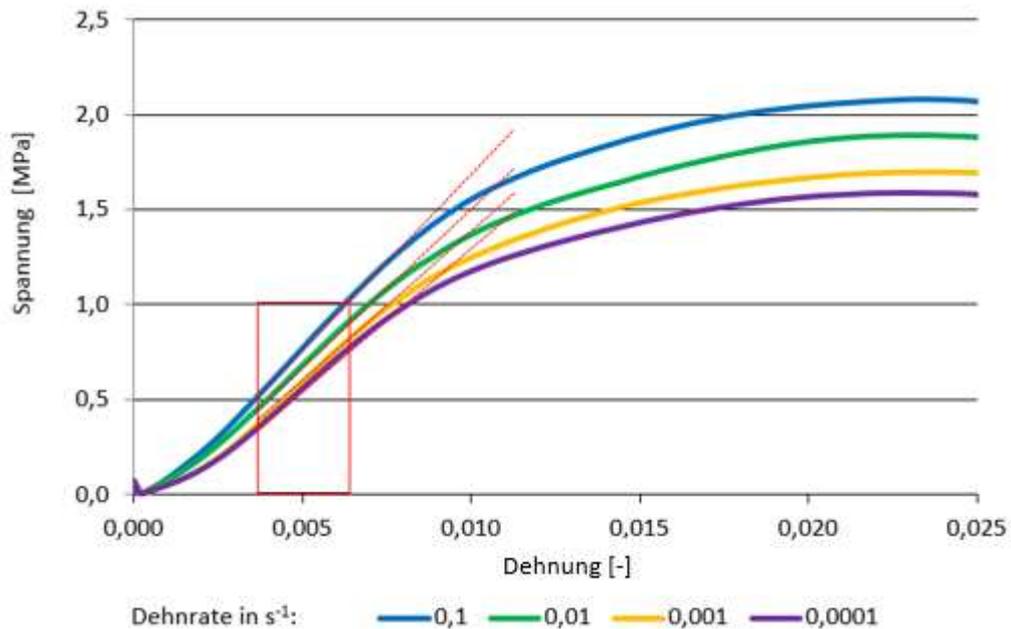


Abbildung 26: Berechnung von Feder- und Dämpferkonstanten aus geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuchen

Die geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche werden nur an ECT- und Biegeproben durchgeführt, da diese das Lastprofil für die Stapelung von mehreren Verpackungen bei einem längeren Transport am besten wiedergeben. Dabei steht die ECT-Probe für die Druckbelastung, die in der Verpackungswand durch die Stapelung verursacht wird. Die Biegeprobe stellt das Ausweichen der Verpackungswand auf den Druck durch die Stapelung dar.

Das Ergebnis der Parameteruntersuchung ist eine Schar von Dämpfungsspektren. Die Abbildung 27 zeigt beispielhaft ein Ergebnis.

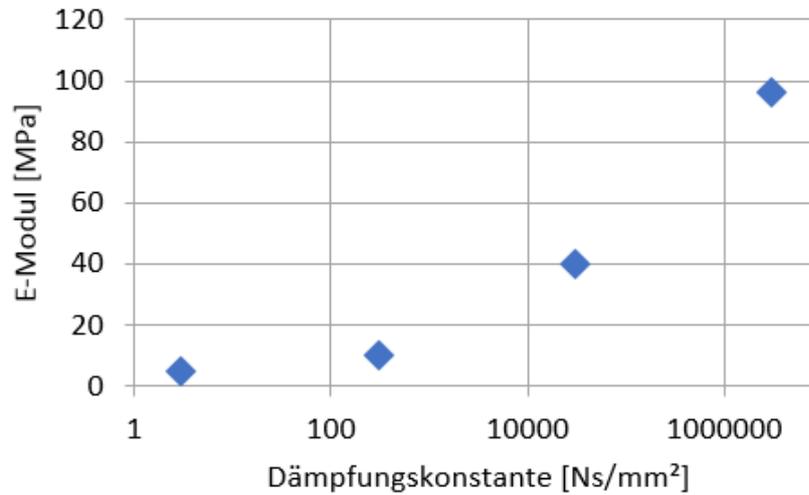


Abbildung 27: Beispiel eines Dämpfungsspektrums

Das Dämpfungsspektrum stellt die Frequenzabhängigkeit des Werkstoffes von der Geschwindigkeit dar. Um Aussagen über das Langzeitverhalten eines Werkstoffes zu ermöglichen, wird im Anschluss das frequenzabhängige Maxwell-Modell (Feder- und Dämpfungskonstanten) mithilfe der sogenannten Prony-Analyse in ein zeitabhängiges E-Modul umgewandelt (Kunt-sche 2015, Popov 2009, Schneider et al. 2016). Dabei gilt (11):

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^m E_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (11)$$

$$\text{mit } \tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$$

$\tau_i = \text{Relaxationszeit}$

Somit ist es möglich, dass Kriechverhalten einer Materialprobe bei einer konstanten Last vorherzusagen (vgl. Abb. 28).

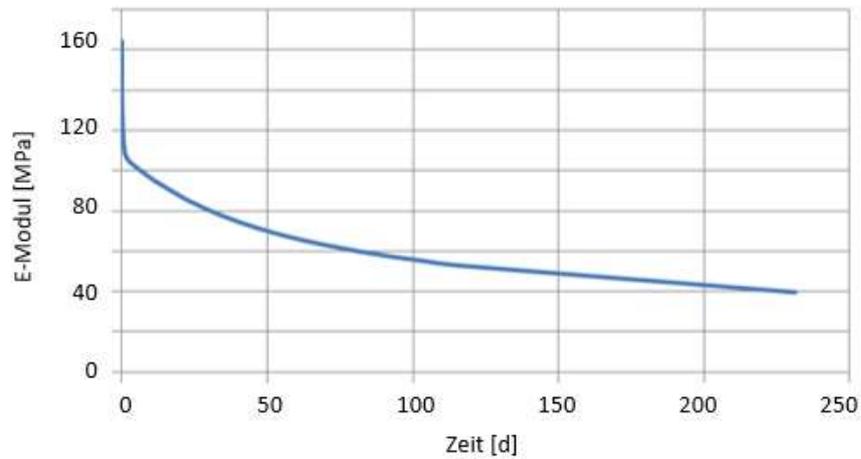


Abbildung 28: Kriechmodell auf der Basis der Prony-Analyse

Um die Ergebnisse verifizieren zu können, werden im Anschluss die berechneten Kriechraten mit den Ergebnissen der Langzeituntersuchungen verglichen. Daraus kann der Anteil des viskoplastischen Materialverhaltens abgeschätzt werden. Dabei gilt (12):

$$E(t, T) = E_0 \left(1 - \sum_{i=1}^m e_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i a_T}} \right) \right) \quad (12)$$

$$\text{mit } e_i = \frac{E_{i-1} - E_i}{E_0}.$$

$a_T = \text{Temperaturshifter}$

Bei der Parameteruntersuchung wird der Shifter gesucht, der die berechnete Kurve am genauesten auf die gemessene Kurve abbildet. Im Anschluss werden Versuche im Feucht- und Wechselklima durchgeführt, um den sogenannten Feuchteshifter in die Berechnungen mit einzubeziehen. Das Vorgehen für die Festlegung des Feuchteshifters ist dabei das gleiche wie bei dem Temperaturshifter.

5.3.2 SIMULATION

Neben der Kenntnis der viskoelastischen Dämpfungseigenschaften und der Materialkennwerte des Werkstoffes müssen weitere elasto-mechanische Kennwerte der Verpackungswände ermittelt werden, um das numerische Modell zu entwickeln.

Dazu wird die Druckfestigkeit in allen drei Raumrichtungen untersucht. Die Prüfung des ECTs und des Flachstauchwiderstandes (FCT: Flat-Crush-Test) in Anlehnung an DIN EN 23035:1994-09 bilden dabei zwei Raumrichtungen ab. In einem neuen Prüfaufbau wird eine

Probe des ECTs (Abmessungen 25 x 100 mm), abweichend von der Prüfung des ECTs in CD-Richtung, in MD-Richtung geprüft.

Weiterhin wird an den oben genannten Prüfungen eine optische Dehnfeldanalyse durchgeführt, um die Querkontraktionszahlen des Werkstoffes für alle drei Raumrichtungen zu bestimmen. Die optische Dehnfeldanalyse ist ein rein optisches Bewertungstool zur Detektion und Analyse von Verformungen eines Probenkörpers in der Ebene. Dabei werden die Prüfungen mit einem Kamerasystem aufgenommen. Die Bildsequenzen werden in Graustufen dargestellt. Mithilfe des computergestützten Systems wird ein Messgitter auf die Bilder der Sequenzen aufgelegt. Der Abstand der Gitterpunkte kann variabel gestaltet werden. Durch die Analyse und das Wiederfinden von Grauwertunterschieden in einem definierten Referenzfeld ist es möglich, die Verschiebungen der definierten Messgitterpunkte von Einzelbild zu Einzelbild zu bestimmen und durch Korrelation zwischen ihnen Dehnungen zu berechnen. Somit kann aus den berechneten Dehnungen je Raumrichtung eine Querkontraktionszahl bestimmt werden.

Die ermittelten Parameter werden mithilfe des FEM-Berechnungsprogramms LS-DYNA ausgewertet. Um eine definierte Kriechkurve berechnen zu können, müssen die in Tab. 3 aufgeführten Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Reale Einflussfaktoren und deren Umsetzung im FE-Modell mittels LS-DYNA

Praktischer Einflussfaktor	Umsetzung im FE-Modell
Geometrie der Verpackung (Länge x Breite x Höhe)	Schalenelemente, definiert über vier Eckknoten, mit den entsprechenden Abständen zueinander. Größe der Schalenelemente in den Seitenflächen geringer, da hier die relevanten Verformungen auftreten.
Dicke des Materials	Definiert über die Dicke der gewählten Schalenelemente.
Lastfall der übereinander gestapelten Verpackungen.	Randbedingungen: Fixierung aller Knoten der Grundebene (DOF=0), bis auf die Randknoten, welche eine Verdrehung erfahren dürfen (DOF=3).
	Lasteinleitung: Flächige Lasteinleitung über die obere Verpackungsebene.
	Lastkurve: Linearer Lastanstieg bis zur Maximalkraft (15 %, 25 %, 33 % der Maximalkraft vom BCT-Wert) je nach Belastungsart beim Langzeitversuch.
Material	E-Modul und Querkontraktionszahl in CD-Richtung

Im LS-DYNA wird das Kriechgesetz MAT_115 UNIFIED CREEP für isotrop-elastische Werkstoffe ohne plastische Verformung ausgewählt. Dieses kann genutzt werden, da über das generalisierte Maxwell-Modell und die Prony-Analyse bereits ein vollständiges Kriechmodell vorliegt, welches nur auf MAT_115 angepasst werden muss. Dazu wird das folgende Kriechgesetz nach Whirley und Henshall genutzt:

$$\bar{\varepsilon}^c = A \bar{\sigma}^n \bar{t}^m \quad (13)$$

Der Zusammenhang zwischen Kriechdehnung $\bar{\varepsilon}^c$ und Spannung $\bar{\sigma}^n$ wurde bereits im Kapitel 5.3.1 Materialmodell hergestellt. Somit müssen für das Kriechgesetz im LS-DYNA lediglich die Parameter A, n und m über eine Parameterstudie ermittelt werden. Die erhaltenen Kriechparameter werden über eine Materialkarte in LS-DYNA eingefügt. Dadurch ist es möglich, über den LS-DYNA Solver das Kriechverhalten von Wellpappen-Verpackungen zu berechnen.

6. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Untersuchungsergebnisse gliedern sich in zwei große Teilbereiche. Im ersten werden die Langzeituntersuchungen an Wellpappen-Proben behandelt und im zweiten die Simulation von Kriechvorgängen. Die Ergebnisse, die sich aus den Messungen ergeben, werden im folgenden Kapitel genauer erklärt und diskutiert. Teilbereich eins umfasst hauptsächlich die Standarduntersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Festigkeiten des Probenmaterials und die die Kriechmessungen beeinflussenden Faktoren, wie beispielsweise die Lagerung des Probenmaterials. Im Teilbereich zwei werden auch die Standarduntersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Festigkeiten des Probenmaterials thematisiert. Zudem werden die Ergebnisse der geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche, der Kriechuntersuchungen bei verschiedenen Klimata und die Berechnung der Kriechvorgänge behandelt.

6.1 LANGZEITUNTERSUCHUNGEN AN WELLPAPPEN-PROBEN

Das untersuchte Probenmaterial weist die aufgelisteten Festigkeiten auf und entspricht laut DIN 55468-1:2015-06 der Wellpappen-Sorte 2.96. Weiterhin handelt es um eine dreiwellige Wellpappe mit der Wellenkombination ABC in nassfester Ausführung (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4: Festigkeitswerte der untersuchten Wellpappe

Welle	D [mm]	Fg [g/m ²]	nfVk TAPPI	ECT [kN/m]	Ds [J]	Bf [kPa]	NBf [kPa]	Sorteneinteilung nach DIN 55468-1:2015-06
ABC	13,1	1789	Ja	24,52	30,6	4704	1415	2.96

Die Abbildung 29 zeigt das Ergebnis einer Kriechuntersuchung an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung, wobei die blaue Linie das verwendete Wechselklima und die rote Linie die Kriechverformung der Probe über die Zeit darstellt. Über die Auswertung der Grafik wurde die mittlere Kriechrate (im Bereich des Sekundärkriechens) und die Zeit bis zum Versagen der Probe ermittelt. Unter dem Versagen der Probe wird der Beginn der plastischen Verformung verstanden. In diesem Beispiel beträgt die Kriechrate 0,007 mm/h und die Zeit bis zum Versagen 94 h.

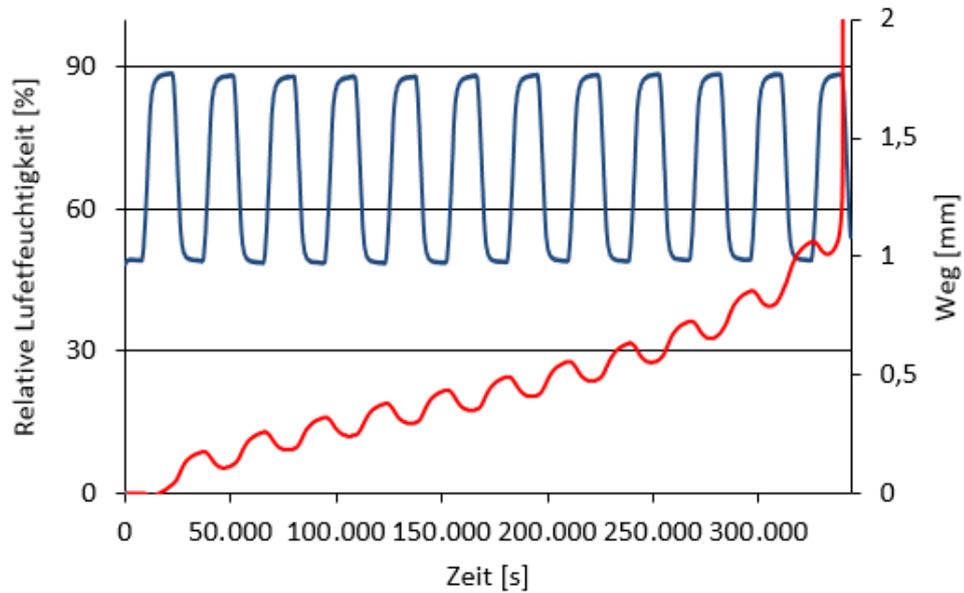


Abbildung 29: Ergebnis einer Kriechuntersuchung an Prüfkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C

Werden die Kriechraten (mit Streuung) aller Untersuchungen (n= 26) der oben beschriebenen Wellpappe in Abhängigkeit von der Zeit bis zum Versagen der Proben in einer Grafik dargestellt, ergibt sich folgender Zusammenhang (vgl. Abb. 30).

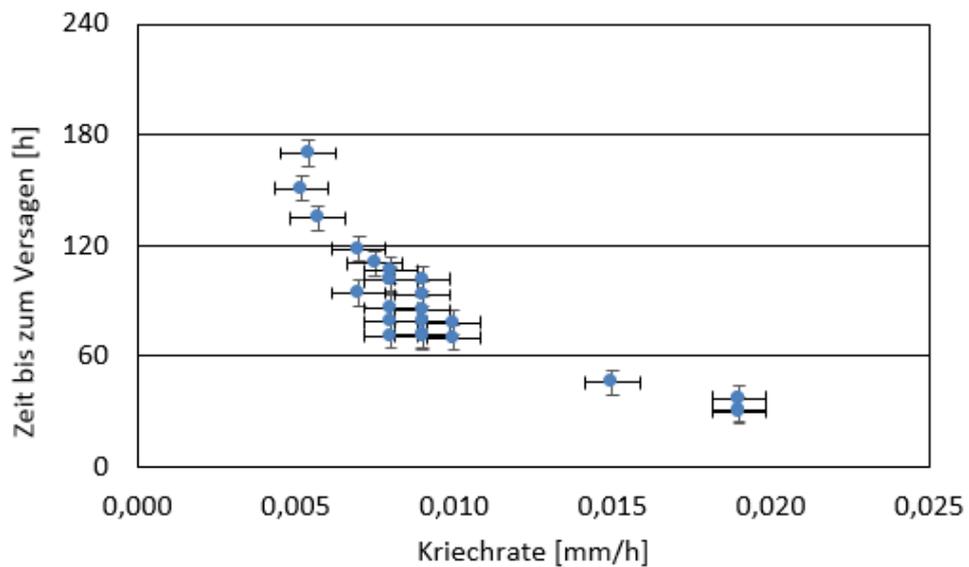


Abbildung 30: Kriechraten der Probenkörperzuschnitte zur ECT-Prüfung in Korrelation zur Zeit bis zum Versagen (n= 26; in der Abbildung teilweise überlagert)

Die Abbildung 30 zeigt die Korrelation zwischen der Zeit bis zum Versagen der Wellpappen-Probe und der Kriechrate. Je höher die Kriechrate, desto geringer ist die Zeit bis zum Versagen der Wellpappen-Probe. Der Effekt des Kriechens wird stärker, wenn die Wellpappen-Probe keine nassfeste Verklebung nach den gängigen Normen und Standards besitzt. Dieser Zusammenhang wurde bereits bei der Inbetriebnahme der Kaskadenprüfeinrichtung ersichtlich.

Durch Vergleichsuntersuchungen der beiden Prüfeinrichtungen wurden Unterschiede in den Ergebnissen deutlich. Bei ähnlichen Kriechraten, Kaskadenprüfeinrichtung ($0,008 \pm 0,001$ mm/h) und Einzelprüfeinrichtung ($0,0071 \pm 0,0014$ mm/h), wurden unterschiedliche Standzeiten, Kaskadenprüfeinrichtung ($89,5 \pm 17,04$ h) und Einzelprüfeinrichtung ($120,3 \pm 28,05$ h), ermittelt. Es ist ungewiss, ob der Unterschied der Ergebnisse im Messfehler der Prüfungen oder in den natürlichen Schankungen des Werkstoffes Wellpappe begründet ist. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen über mögliche, die Messung beeinflussende Faktoren durchgeführt. Fünf wesentliche Einflussfaktoren wurden als besonders relevant festgelegt: die Prüfdauer und Alterung, die Probenaufbereitung, die Installation der Prüfeinrichtung, die Feuchteverteilung und die Art der Klimakammer.

Nach Versuchen über die Lagerdauer wurde deutlich, dass diese einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Kriechuntersuchungen ausübt. Zu Versuchsbeginn wiesen die beiden Probenmaterialien ähnliche Kriechraten auf. Nach einer Lagerung von 24 Monaten im konstanten Normklima war die Kriechrate viermal so hoch wie zu Beginn der Messung, wobei sich die Standzeit mehr als halbiert hat. Bei einer Lagerdauer von neun Monaten waren kaum Unterschiede sichtbar (vgl. Abb. 31).

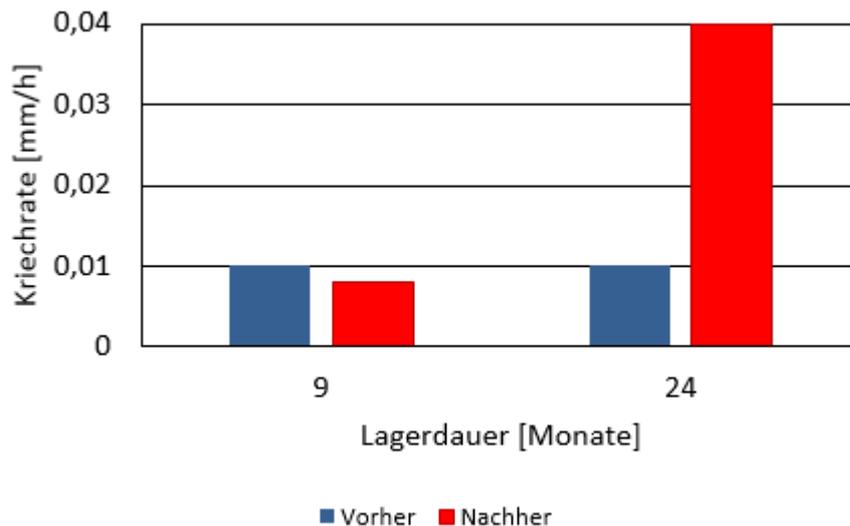


Abbildung 31: Einfluss der Alterung auf die Kriechrate von Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung (Kaskadenprüfeinrichtung) (n= 10)

Aufgrund der Ergebnisse kann eine Lagerung von bis zu neun Monaten erfolgen, ohne negative Effekte auf das Kriechverhalten zu haben. Eine Lagerung von zwei Jahren hat jedoch einen negativen Einfluss auf das Kriechverhalten und sollte somit vermieden werden. Folglich ist es für die Messung von reproduzierbaren Kriechraten unabdingbar, lange Lagerzeiten zu vermeiden, um den Einfluss von Alterungsprozessen so gering wie möglich zu halten.

Die Probenaufbereitung stellt einen zentralen Punkt in der Messung von reproduzierbaren Ergebnissen dar. Dabei ist bei der Untersuchung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten der ECT-Prüfung vor allem die Planparallelität der Proben wichtig, um exakte Ergebnisse zu erhalten. Die Überprüfung der Qualität der Probenkörperzuschnitte sollte anhand von Ringversuchen zur ECT-Prüfung erfolgen. Zur Sicherstellung der gleichen Feuchtigkeit des Probenmaterials müssen die Proben vor jeder Prüfung im Normklima gelagert werden. Die Probenaufbereitung sollte insgesamt immer gleich sein, um eine nahezu konstante Qualität der Proben sicherzustellen.

Feuchtigkeit besitzt, wie bereits im Kapitel 2.2 Einfluss von Feuchte auf Wellpappe beschrieben, einen gravierenden Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Wellpappe. Ergo ist es für die Erzeugung von reproduzierbaren Ergebnissen unerlässlich, die zur Prüfung eingesetzte Klimakammer auf ihre Regelgenauigkeit zu untersuchen. Die Ergebnisse der Versuche zeigten, dass die größte detektierte Abweichung der vier Messfühler maximal 1,1 % betrug. Gängige Normen und Standards legen die Feuchteschwankungen auf

maximal $\pm 5\%$ fest. Infolge dessen ist die Feuchteabweichung von maximal 1,1 % tolerierbar. Dennoch sollte die Klimakammer in regelmäßigen Abständen auf ihre Genauigkeit überprüft werden, um negative Einflüsse zu vermeiden.

6.2 SIMULATION VON KRIECHVORGÄNGEN

Das Probenmaterial, welches zur Simulation von Kriechvorgängen genutzt wird, weist die in Tab. 5 aufgelisteten Festigkeiten auf.

Tabelle 5: Festigkeitsuntersuchungen der Wellpappen-Proben zur Simulation von Kriechvorgängen

Hersteller	Welle	D [mm]	Fg [g/m ²]	nfVk TAPPI	ECT [kN/m]	Bs GM [Nm]	Ds [J]	Bf [kPa]	NBf [kPa]	BCT [N]	Sorteneinteilung nach DIN 55468-1:2015-06	
1	1.1	BC	7,1	1151	Nein	15,69	40,67	13,6	2172	405	13166	2.90
	1.2	BC	7,1	1165	Nein	16,24	42,37	14,1	2209	412	13225	2.90
2	2.1	AC	8,7	1066	Ja	16,35	68,5	13,2	2626	467	20216	2.90
	2.2	AC	9,1	1472	Ja	25,13	97,0	18,7	3415	1130	21820	2.91

Das Probenmaterial der ersten Versuchsreihe umfasst die Wellpappen des Herstellers eins. Bei der Betrachtung der Ergebnisse dieser Wellpappen fällt auf, dass beide Wellpappen mit der Wellenkombination BC ähnliche Festigkeitswerte aufweisen und nach DIN 55468-1:2015-06 beide der Sorte 2.90 zuzuordnen sind. Zudem zeigt sich, dass beide keine nassfeste Verklebung nach TAPPI T812 besitzen. Aufgrund der fehlenden nassfesten Verklebung ist die Ermittlung von Kriechraten diffizil. Dies wurde als Anlass genommen, eine weitere Versuchsreihe mit dem Probenmaterial des Herstellers zwei durchzuführen. Beide Proben des Herstellers zwei mit der Wellenkombination AC entsprechen nach DIN 55468-1:2015-09 den Sorten 2.90 und 2.91 und weisen eine nassfeste Verklebung nach TAPPI T812 auf. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchung sind in Tabelle 6 die Flächengewichte der vier Wellpappen-Proben dargestellt.

Tabelle 6: Papierzusammensetzung des Probenmaterials (n=3)

	Hersteller 1		Hersteller 2	
	1.1	1.2	2.1	2.2
	Flächengewicht [g/m ²]	Flächengewicht [g/m ²]	Flächengewicht [g/m ²]	Flächengewicht [g/m ²]
Decklage	280	285	272	448
Welle	144	130	140	183
Zwischenlage	166	173	X	122
Welle	149	139	142	144
Decklage	290	289	287	395
Gesamt	1165	1151	1066	1472

Bei der Betrachtung der Tabelle 6 wird deutlich, dass die Wellpappe 2.2 des Herstellers zwei deutlich höhere Flächengewichte aufweist. Folglich besitzen diese Wellpappen auch höhere Festigkeitswerte. Die Zwischenlage der Wellpappe 2.1 konnte nicht bestimmt werden, da sich diese aufgelöst hatte.

Um den Einfluss von geschnittenen Klappen auf die Ergebnisse des Stapelstauchwiderstandes ermittelt zu können, werden Vergleichsuntersuchungen von im Norm- und Feuchtklima konditionierten Wellpappen-Verpackungen durchgeführt. Es wird das Probenmaterial des Herstellers zwei untersucht. Die nachfolgende Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

Tabelle 7: Einfluss von geschnittenen Klappen auf den Stapelstauchwiderstand (n= 46)

Hersteller 2	Wellpappensorte	BCT		%Festigkeitsveränderung bei Feuchte
		23/50	20/90	
		[N]	[N]	
Ungeschnittene Klappen	2.1	20216	8978	-44
	2.2	21820	12085	-55
Geschnittene Klappen	2.1	13707	5490	-40
	2.1	15091	7658	-51

In der Tabelle 7 fällt auf, dass die Wellpappen-Verpackungen mit ungeschnittenen Klappen einen viel größeren Stapelstauchwiderstand als die geschnittenen Wellpappen-Verpackungen besitzen. Erklärbar ist dies durch die aussteifende Wirkung der Seitenklappen beim Stauchprozess. Bei der Prüfung von vorklimatisierten Proben im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) lässt dieser Effekt theoretisch nach, da die Seitenklappen bedingt durch die Feuchteaufnahme viel geringere Festigkeiten aufweisen. Die Ergebnisse zeigen jedoch deutlich, dass die

ungeschnittenen Wellpappen-Verpackungen auch im Feuchtklima viel höhere Stapelstauchwiderstände besitzen. Aus diesem Grund sollte von einem Einschneiden der Klappen bei der Stauchprüfung abgesehen werden.

Nach den Standarduntersuchungen der Wellpappen erfolgen die geschwindigkeitsabhängigen Kurzzeitversuche der Biegesteifigkeit und des Kantenstauchwiderstandes. Die Ergebnisse aller Untersuchungen der Biegesteifigkeit sind in Abbildung 32 mit den Prüfgeschwindigkeiten V1 - V4 dargestellt. Die Aufschlüsselung der Prüfgeschwindigkeiten ist in Tabelle 8 zu sehen.

Tabelle 8: Prüfgeschwindigkeiten der Biegeuntersuchungen

	1.1	1.2	2.1	2.2
V 1 [mm/min]	1,58	1,58	1,29	1,24
V 2 [mm/min]	15,84	15,84	302,59	290,88
V 3 [mm/min]	158,4	158,4	603,88	580,52
V 4 [mm/min]	X	X	905,17	870,17

Die Prüfgeschwindigkeiten erzeugen im Probenmaterial die geforderten Dehnraten, wie bereits im Kapitel 5.1.3 Biegesteifigkeit (DIN 53121:2014-08) beschrieben. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Bestimmung von vier Prüfgeschwindigkeiten im Messbereich der Prüfeinrichtung in der ersten Versuchsreihe konnte keine vierte Prüfgeschwindigkeit untersucht werden. Aus diesem Grund werden die Prüfgeschwindigkeiten der zweiten Versuchsreihe auf den Messbereich der Prüfeinrichtung angepasst.

Die Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der Biegeuntersuchungen in Abhängigkeit von den Prüfgeschwindigkeiten. Bei der Betrachtung der Abbildung 32 fällt auf, dass, bis auf die Ergebnisse der Proben 2.1 und 2.2 bei der Prüfgeschwindigkeit V 2, folgender Zusammenhang besteht: je höher die Prüfgeschwindigkeit, desto höher ist die gemessene Festigkeit bzw. Steifigkeit. Der höhere Festigkeitswert bei der Prüfgeschwindigkeit von 302,59 mm/min bzw. 290,88 mm/min der Proben 2.1 und 2.2 darf auf keinen Fall als Ausreißer gesehen werden, da er bei beiden Proben in ähnlicher Höhe auftritt. Die Gründe für diese höheren Festigkeitswerte sind noch nicht bekannt und müssen in weiteren Untersuchungsreihen thematisiert werden.

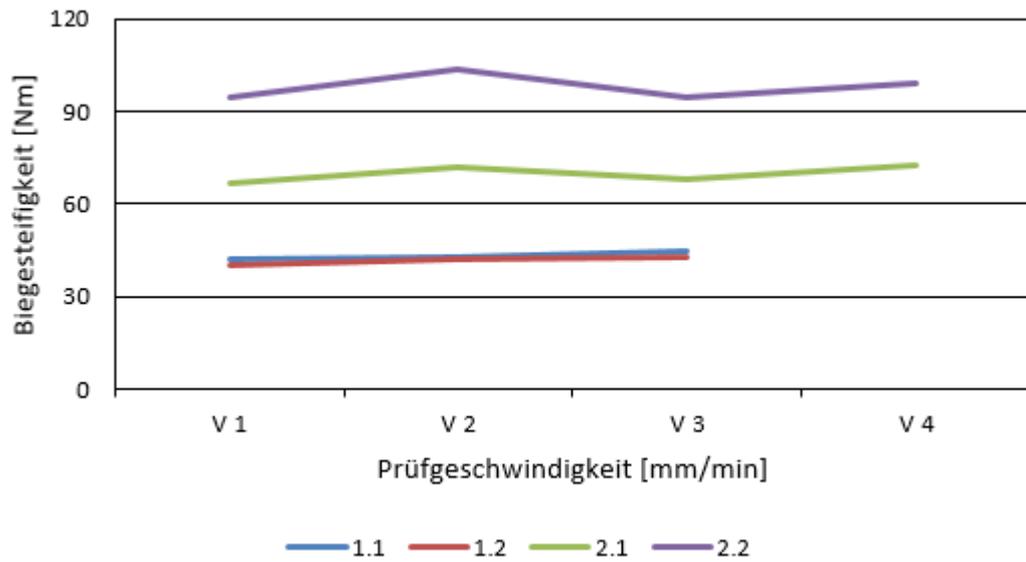


Abbildung 32: Biegesteifigkeit in Abhängigkeit zur Prüfgeschwindigkeit (V 1 < V 4) (n= 136)

Im Anschluss an die Biegeuntersuchungen werden die geschwindigkeitsabhängigen Kurzzeitversuche des Kantenstauchwiderstandes mit den Prüfgeschwindigkeiten 0,0025 mm/s, 0,025 mm/s, 0,25 mm/s und 2,5 mm/s durchgeführt.

Die Ergebnisse der geschwindigkeitsgesteuerten Kantenstauchuntersuchungen sind in Abbildung 33 dargestellt. Hierbei ist ein Zusammenhang zwischen der Prüfgeschwindigkeit und den ermittelten Festigkeitseigenschaften zu erkennen. Je höher die Prüfgeschwindigkeit, desto höher ist die Festigkeit bzw. Steifigkeit der Probe.

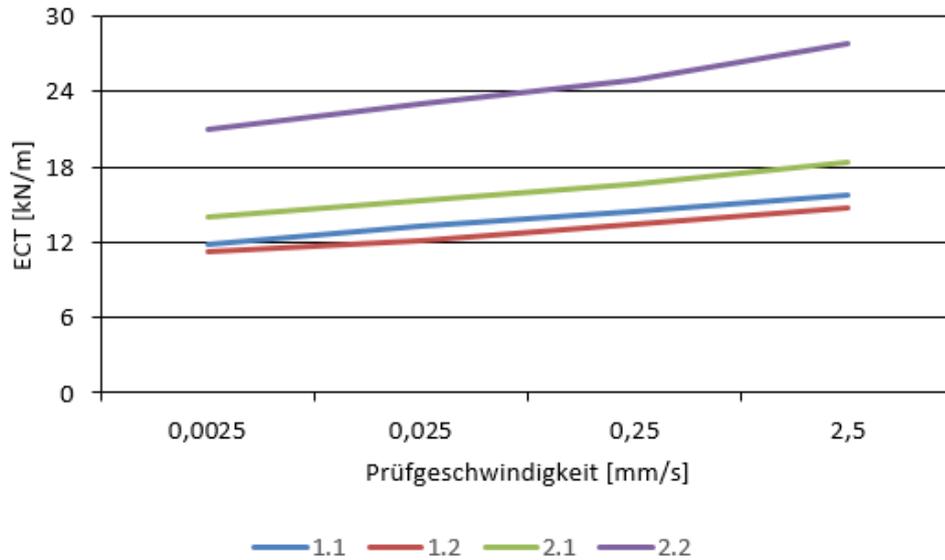


Abbildung 33: Kantenstauchwiderstand in Abhängigkeit zur Prüfgeschwindigkeit (n=80)

Der Zusammenhang zwischen der Prüfgeschwindigkeit und der Festigkeit bzw. Steifigkeit bestätigt die Annahme, dass es sich bei Wellpappe um ein viskoelastisches Material handelt. Somit ist es möglich, das Materialverhalten über ein generalisiertes Maxwell-Modell, wie in Kapitel 5.3 Simulation des Kriechverhaltens beschrieben, zu berechnen. Im nächsten Schritt werden die aufgenommenen, geschwindigkeitsabhängigen Untersuchungen in ihrem linear elastischen Bereich der Belastungskurven ausgewertet. Eine schrittweise Parameteruntersuchung, in welcher sowohl die einzelnen E-Module, als auch die Dämpfungskonstanten systematisch geändert und ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis untersucht werden, ermöglicht es, die gemessenen Verlaufskurven durch eine mathematische Funktion nachzuvollziehen. Die nachfolgende Abbildung 34 zeigt das ermittelte Dämpfungsspektrum. Dabei werden die Dämpfungskonstanten mit gestaffelter Empfindlichkeit bezüglich der Prüfgeschwindigkeit und die dazugehörigen Federkonstanten mit gestaffelter Empfindlichkeit gegenüber der Kraft abgebildet.

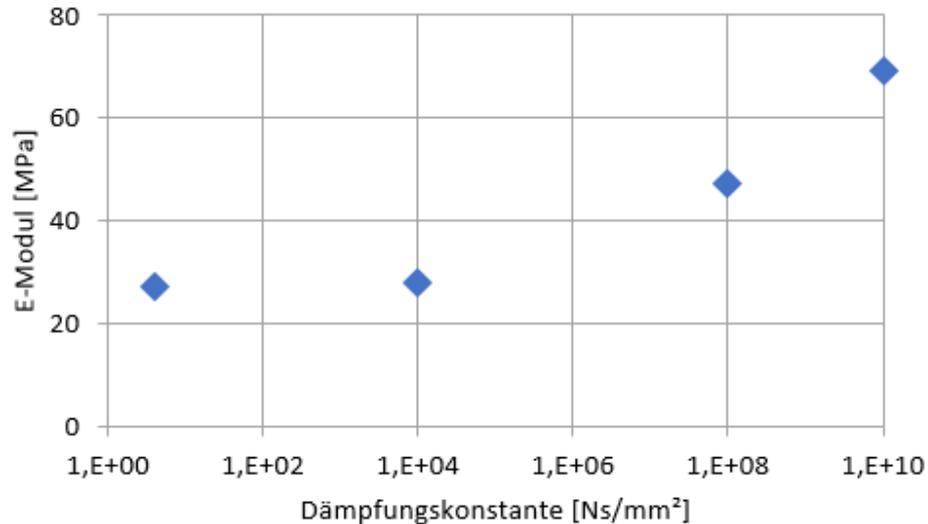


Abbildung 34: Berechnetes Dämpfungsspektrum eines ECT-Versuchs

Die Abbildung 34 verdeutlicht, dass der linear viskoelastische Bereich im gesamten gemessenen Geschwindigkeitsspektrum abgebildet werden kann. Dadurch ist es möglich, das Verformungsverhalten des Materials bei einer definierten Prüfgeschwindigkeit vorherzusagen.

Im nächsten Schritt wird der plastische Anteil an der Verformung bestimmt. Dazu werden Hystereseversuche durchgeführt, bei denen, angelehnt an die maximal ertragbare Kraft, der Werkstoff in definierten Stufen be- und entlastet wird. Die entstehende Verformung ist irreversibel. Die Auswertung der bleibenden Verformung in Abhängigkeit von der maximal ertragbaren Druckspannung zeigt, dass es bei hohen Belastungen nur zu einer geringen plastischen Verformung im Werkstoff Wellpappe kommt. Somit wird vermutet, dass die viskoplastische Verformung der viskoelastischen Verformung weit untergeordnet ist. Die Überprüfung dieser Vermutung erfolgt über die Langzeitversuche.

Um mithilfe des ermittelten frequenzabhängigen Feder-Dämpfer-Spektrums auf das Langzeitverhalten des Werkstoffes schließen zu können, muss dieses Spektrum über die Prony-Analyse in eine zeitabhängige Betrachtung überführt werden. Als Ergebnis ergibt sich ein ein-dimensionaler Verlauf des E-Moduls über die Zeit, aus dem eine zeitliche, veränderliche Stauchung, bedingt durch eine einmalig aufgebraachte konstante Last, berechnet werden kann. Die Abbildung 35 zeigt beispielhaft den berechneten zeitlichen Verlauf für die ECT-Proben der Wellpappe 2.1 bei verschiedenen Belastungen (blau: 15 % Belastung, rot: 25 % Belastung, grün: 33 % Belastung). Die jeweilige Belastung bezieht sich auf den im Normklima (23 °C/ 50 % RH) ermittelten Maximalwert des ECTs.

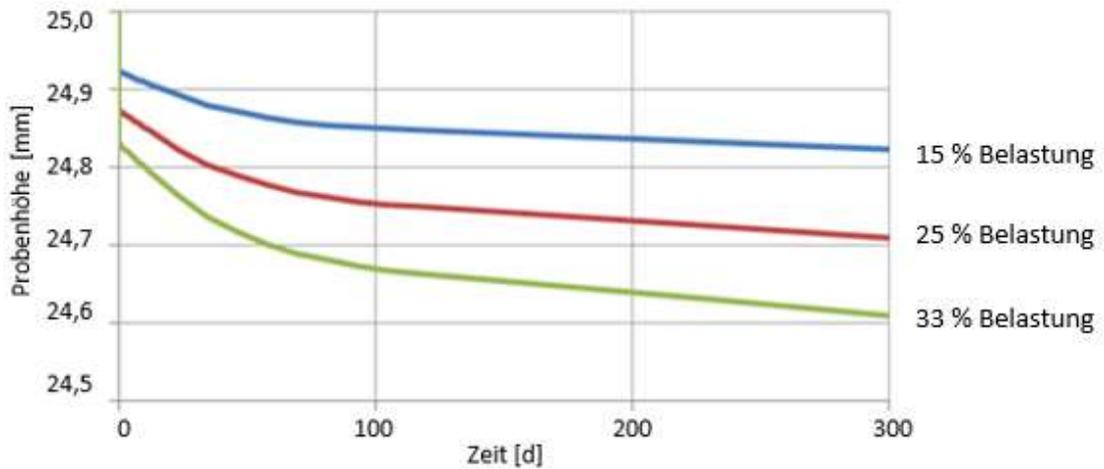


Abbildung 35: Berechneter zeitlicher Verlauf der Verringerung der Probenhöhe (Probe 2.1) bei der ECT-Untersuchung im Normklima (23 °C/ 50 % RH)

Die Abbildung 35 bestätigt, dass es möglich ist, Kriechkurven im Normklima (23 °C/ 50 % RH) für jede Belastungsart aus den jeweiligen Dämpfungsspektren berechnen zu können.

Um die berechneten Werte mit dem realen Verhalten von Wellpappe vergleichen zu können, werden Kriechuntersuchungen an den Proben 1.1 und 1.2 an den Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung und Wellpappen-Verpackungen im Normklima (23 °C/ 50 % RH), Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) und Wechselklima (50 % - 90 % RH) mit einer Belastung von 15 %, 25 % und 33 % des im Normklima gemessenen ECT-Wertes durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse wird exemplarisch anhand des Probenmaterials 1.2 der Probenkörperzuschnitte zur ECT-Prüfung in der Einzelprüfeinrichtung mit einer Belastung von 25 % erläutert.

Die Abbildung 36 zeigt das Ergebnis einer Kriechuntersuchung im Normklima (23 °C/ 50 % RH). Dabei stellt die blaue Linie das Normklima und die rote Linie die mit dem Wegaufnehmer aufgezeichnete Dimensionsveränderung der Probe dar. Insgesamt wurden sechs Proben untersucht.

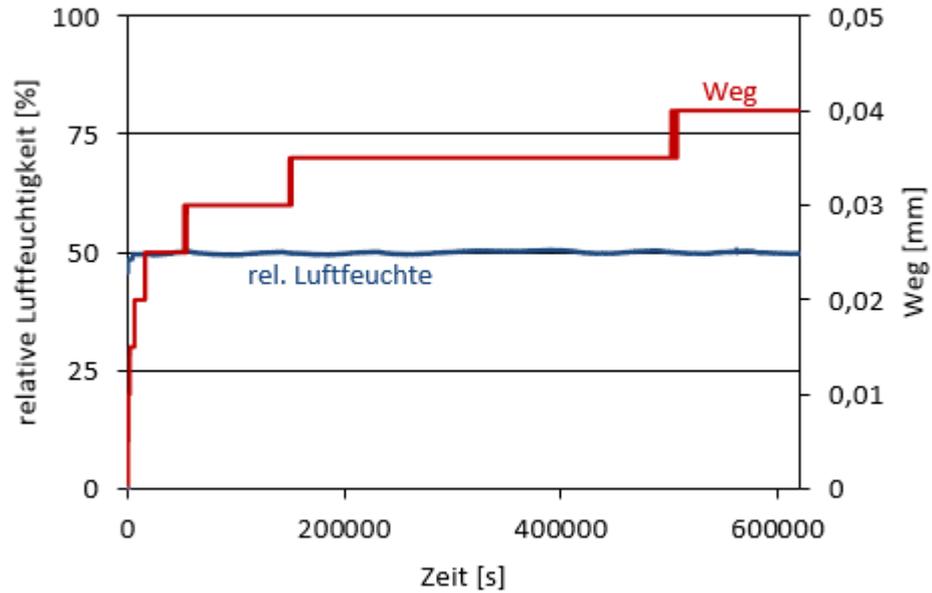


Abbildung 36: Kriechuntersuchung der Probe 1.2 im konstanten Normklima (23 °C/ 50 % RH) mit einer Belastung von 25 % des im Normklima gemessenen ECT-Wertes (Einzelprüfeinrichtung)

Im Normklima (23 °C/ 50 % RH) verändert sich die ECT-Probe unter einer konstanten Belastung von 25 % des gemessenen ECT-Wertes nur sehr gering. Aufgrund der Auflösung der Digitalmesstaster ist die Wegveränderung der Probe in Stufen dargestellt (vgl. Abb. 36).

In der Abbildung 37 ist das Ergebnis einer Kriechuntersuchung im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) abgebildet. Wie bereits in Abbildung 36 beschrieben, zeigt die blaue Linie das Klima und die rote Linie die Dimensionsveränderung der Probe.

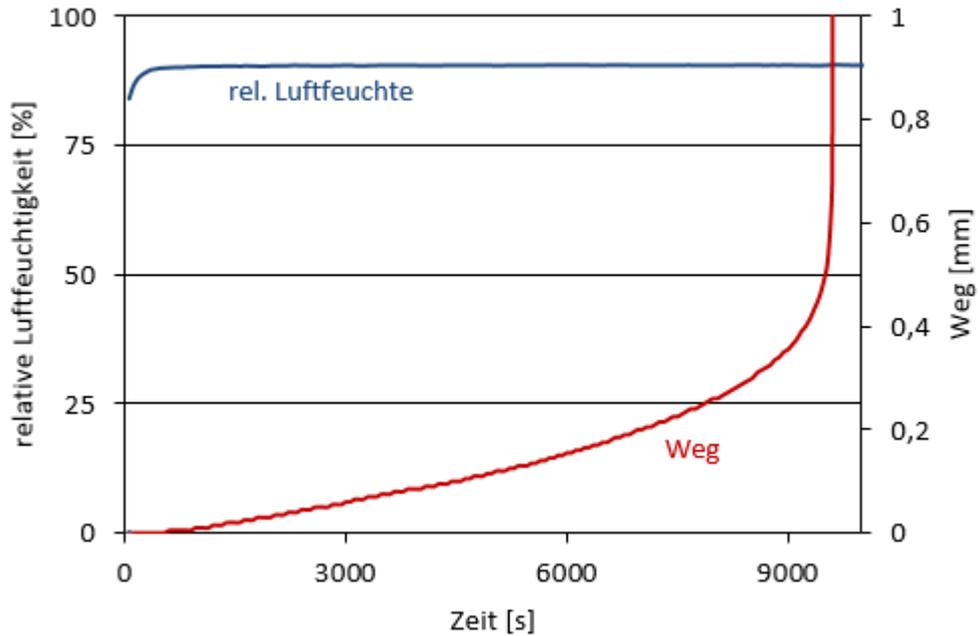


Abbildung 37: Kriechuntersuchung der Probe 1.2 im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) mit einer Belastung von 25 % des im Normklima gemessenen ECT-Wertes (Einzelprüfeinrichtung) (Zeit bis zum Versagen: 2,66 h)

Die stetige Anpassung der Probe an das in der Klimakammer herrschende Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) führt zum Kriechen der Probe, welches letztendlich ihr Versagen nach 2,66 h zur Folge hat. Der Untersuchungsumfang umfasst sechs Proben, wobei die Zeit bis zum Versagen $3,43 \text{ h} \pm 0,465 \text{ h}$ beträgt (vgl. Abb. 37).

Die Abbildung 38 stellt das Ergebnis einer Kriechuntersuchung im Wechselklima (50 % - 90 % RH) mit konstanter Temperatur von 23 °C dar. Hierbei zeigt die blaue Linie das achttündige Wechselklima und die rote Linie die Dimensionsveränderung (das Kriechen) der Probe. Durch die Auswertung der Grafik werden die Kriechrate von 0,034 mm/h und die Zeit bis zum Versagen von 22,2 h erhalten. Zusammengefasst beträgt der Untersuchungsumfang zwölf Proben, mit einer mittleren Kriechrate von $0,03 \text{ mm/h} \pm 0,0037 \text{ mm/h}$ und einer mittleren Zeit bis zum Versagen von $25,64 \text{ h} \pm 3,85 \text{ h}$.

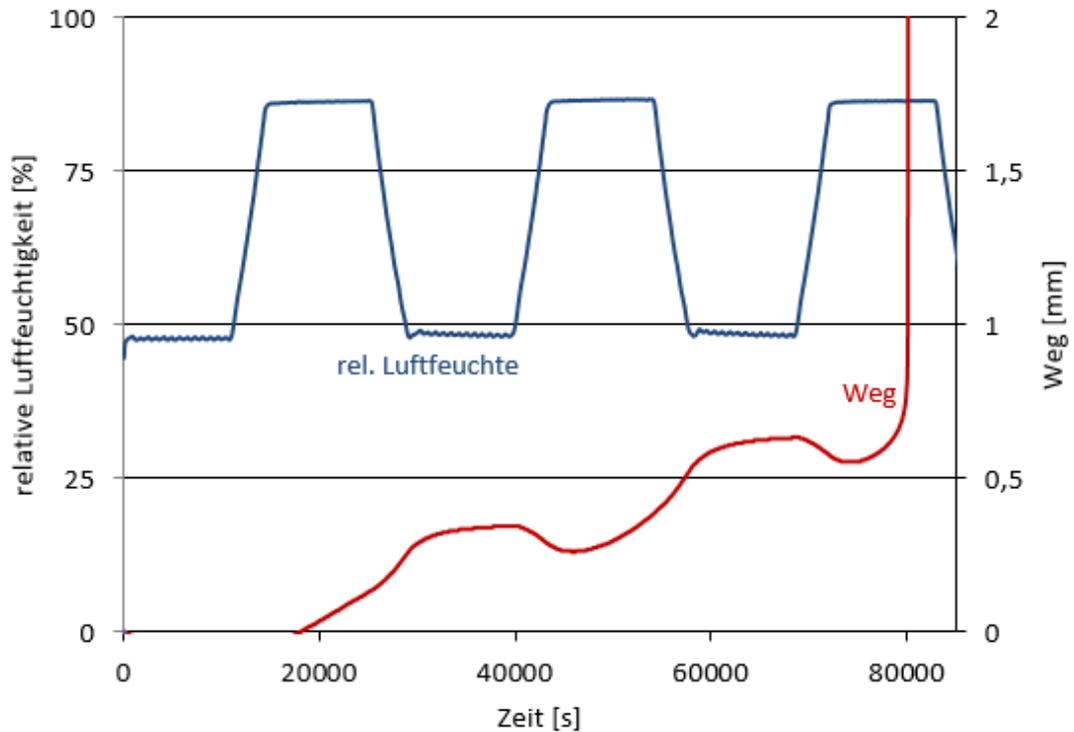


Abbildung 38: Kriechuntersuchung der Probe 1.2 im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 25 % des im Normklima gemessenen ECT-Wertes (Einzelprüfeinrichtung) (Kriechrate: 0,034 mm/h; Zeit bis zum Versagen: 22,2 h)

Die Tabelle 9 zeigt alle ermittelten Ergebnisse der Kriechuntersuchungen an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung und der Wellpappen-Verpackungen der Probe 1.2 im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei einer konstanten Temperatur von 23 °C.

Tabelle 9: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen des Probenmaterials 1.2 im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C (n=22)

Lastniveau	ECT-Probenkörperzuschnitt Probe 1.2		Wellpappen-Verpackung 1.2	
	Kriechrate [mm/h]	Standzeit [h]	Kriechrate [mm/h]	Standzeit [h]
15 %	0,0028 ± 0,0004	> 180,15	0,08 ± 0,01	117,5 ± 31,60
25 %	0,03 ± 0,003	25,64 ± 3,85	X	13,9 ± 1,22
33 %	X	X	X	8,4 ± 0,56

Aufgrund der fehlenden nassfesten Verklebung können vor allem bei der Untersuchung der Wellpappen-Verpackung, bedingt durch das vorzeitige Versagen der Proben, nur wenige Ergebnisse ermittelt werden (X). Die geringen Standzeiten bei den Belastungen, 33 % (8,4 h ± 0,56 h) und 25 % (13,9 h ± 1,22 h), ermöglichen keine Bestimmung der Kriechraten der Wellpappen-Verpackungen (X). Daher wird von einer Untersuchung der Belastung von 33 % im weiteren Verlauf der Arbeit abgesehen. Die Versuche mit einer Belastung von 15 % führen

zwar zu Ergebnissen bei den Wellpappen-Verpackungen, aber zu keinen Standzeiten bei den Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung, da die Belastung zu gering ist.

Bedingt durch die Schwierigkeiten bei der Ergebnisermittlung kann die Versuchsreihe eins nicht vollständig abgeschlossen werden. Es wird eine neue Versuchsreihe mit den nassfesten Wellpappen 2.1 und 2.2 gestartet. Dabei werden Versuche an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung und Wellpappen-Verpackungen im Normklima (23 °C/ 50 % RH), Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) und Wechselklima (23 °C/ 50 % - 90 % RH) mit 15 % und 25 % des im Normklima gemessenen Wertes durchgeführt. Von der Untersuchung einer Belastung von 33 % wird aufgrund der Erkenntnisse aus der Versuchsreihe eins abgesehen. Auf die Ergebnisse der Kriechuntersuchungen im Norm- und im Feuchtklima der Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung wird aufgrund der Ähnlichkeiten zu den in Versuchsreihe eins beschriebenen Abbildungen 36 und 37 nicht eingegangen. Die Ergebnisse der Kriechuntersuchungen an den Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung im Wechselklima bei konstanter Temperatur von 23 °C sind in nachfolgender Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen der Probe 2.1 im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C in Form von Mittelwerten (n=18)

Lastniveau	ECT-Probenkörperzuschnitt Probe 2.1		ECT-Probenkörperzuschnitt Probe 2.2	
	Kriechrate [mm/h]	Standzeit [h]	Kriechrate [mm/h]	Standzeit [h]
15 %	0,013 ± 0,002	61,46 ± 10,13	0,006 ± 0,001	139,65 ± 3,89
25 %	X	4,12 ± 0,248	0,026 ± 0,006	21,47 ± 3,55

Bei der Betrachtung der Tabelle 10 fällt auf, dass die Festigkeitsunterschiede der beiden Wellpappen möglicherweise einen Einfluss auf das Langzeitverhalten haben (vgl. Tab. 5). Hierbei scheint die Höhe der Nass-Berstfestigkeit wichtig zu sein. Denn bei der Wellpappe 2.1 mit einer Nass-Berstfestigkeit von 467 kPa können nur geringe Standzeiten erzielt werden, im Gegensatz zu der Wellpappe 2.2 mit einer Nass-Berstfestigkeit von 1130 kPa. Aus dem Vergleich der Kriechuntersuchungen der Proben 1.2 und 2.1 wird weiterhin ersichtlich, dass trotz der höheren Dicke, der höheren Biegesteifigkeit, des höheren Stapelstauchwiderstandes und der nassfesten Verklebung der Wellpappe 2.1 im Vergleich zur der Wellpappe 1.2 keine Kriechraten bei einer Belastung von 25 % ermittelt werden können. Weiterhin sind die Kriechraten der Probe 2.1 bei 15 % viel höher als die der Wellpappe 1.2. Die Ergebnisse zeigen, dass das Kriechverhalten von Wellpappe ein komplexer Vorgang ist, der in weiteren Versuchsreihen untersucht werden muss.

Werden die Ergebnisse aller Kriechuntersuchungen mit der Streuung in eine Grafik übertragen, ergibt sich folgende Abbildung 39.

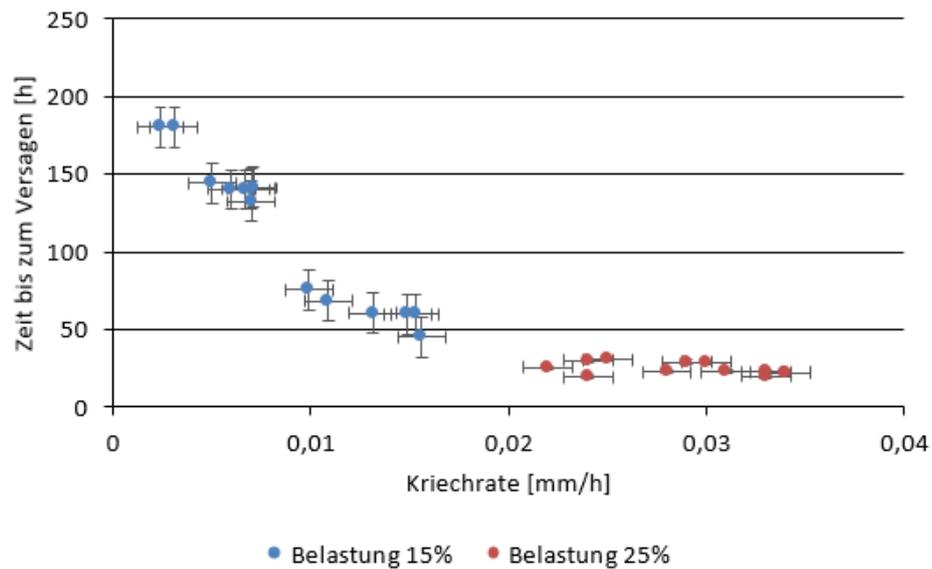


Abbildung 39: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C der Proben 1.2, 2.1 und 2.2 mit einer Belastung von 15 % und 25 %

Aus Abbildung 39 ist abzuleiten, dass die Proben bei der Belastung von 25 % viel höhere Kriechraten und somit kürzere Zeiten bis zum Versagen besitzen als die Proben mit einer Belastung von 15 %. Werden die Ergebnisse der Untersuchungen unabhängig von der Belastungshöhe und der Probenart zusammen dargestellt, ergibt sich die Abbildung 40.

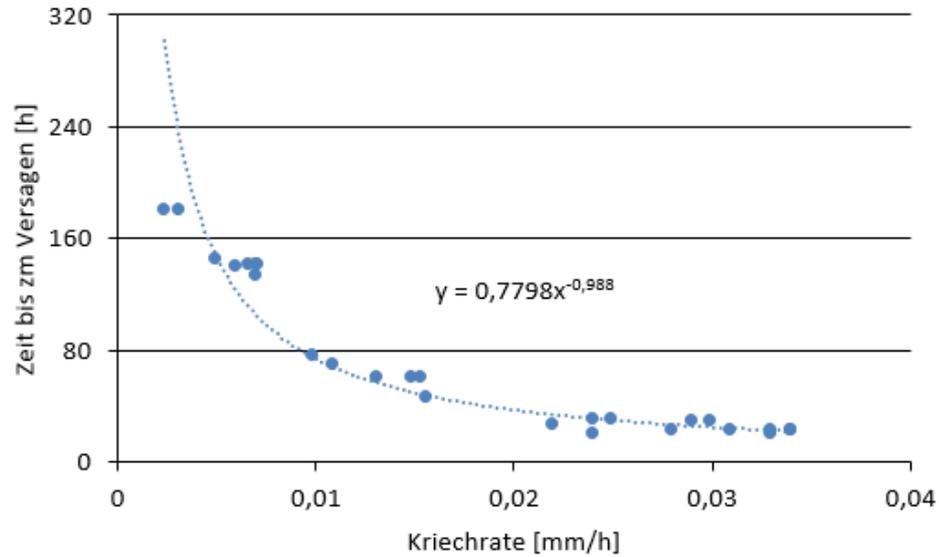


Abbildung 40: Zusammenfassung aller Kriechergebnisse im Wechselklima (50 % - 90 % RH) bei konstanter Temperatur von 23 °C

Die Abbildung 40 bestätigt die Annahme aus dem Ergebnisteil 6.1 Langzeituntersuchungen an Wellpappen-Proben, dass die Höhe der Kriechrate die Zeit bis zum Versagen bestimmt. Wird eine Trendlinie in die Grafik eingefügt, ergibt sich die statistische Regressionsgleichung mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9312. Aufgrund der Höhe des Bestimmtheitsmaßes kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelte Trendlinie den Zusammenhang passend wiedergibt, d.h. die Zeit bis zum Versagen = $f(\text{Kriechrate})$ wird dadurch zu 96 % erklärt (ergibt sich aus $100 \times \sqrt{R^2}$ [%]).

Aufgrund der Dauer der Kriechuntersuchungen und technischen Störungen bei der Nutzung der Klimazelle kann das Langzeitverhalten der Wellpappen-Verpackungen der Proben 2.1 und 2.2 nur ungenügend untersucht werden.

Im Anschluss an die Kriechuntersuchungen wird der viskoplastische Anteil genauer identifiziert, um die genauen Auswirkungen auf die Probendeformation ermitteln zu können. Die Abbildung 41 zeigt den Vergleich der gemessenen ($_Mes$) zu den mithilfe des Maxwell Modells und der Prony Analyse berechneten ($_Ber$) Kriechverläufen der Wellpappen-Probe 2.1.

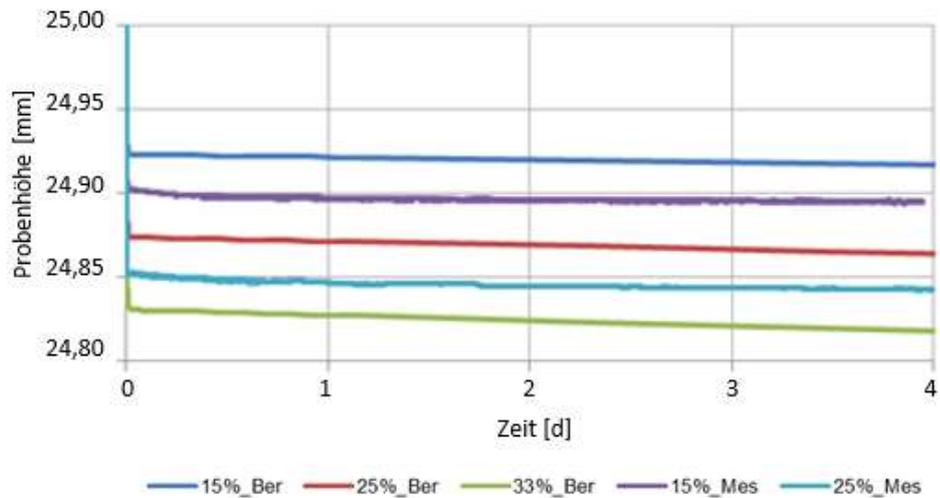


Abbildung 41: Vergleich der gemessenen und berechneten Kriechverläufe bei der ECT-Untersuchung im Normklima (23 °C/ 50 % RH)

Wird als Beispiel aus der Abbildung 41 die Kurve 15 %_Mes betrachtet, wird deutlich, dass sich diese nur minimal von der berechneten Kurve 15 %_Ber unterscheidet. Der geringe Unterschied ist auf den bisher in den Berechnungen vernachlässigten Teil der viskoplastischen Verformung zurückzuführen. Um den Anteil der viskoplastischen Verformung zu bestimmen und Kriechverläufe in unterschiedlichen Klimata zu berechnen, werden sogenannte „Shifter“ verwendet. Die Shifter-Funktion wird dabei direkt in die Prony-Analyse eingesetzt und ermöglicht es, den Kurvenverlauf in der Anfangsauslenkung sowie im weiteren Kriechverlauf bezüglich der Verformung anzupassen. Die nachfolgende Abbildung 42 zeigt anhand der Ergebnisse der Kriechversuche an der Wellpappenprobe 2.1 mit der Belastung von 15 % die Systematik der Shifter-Berechnung.

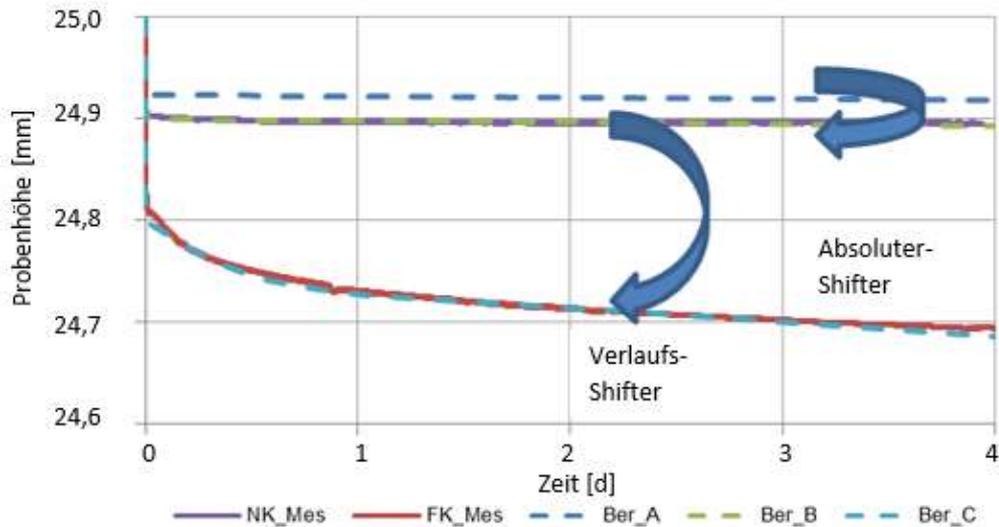


Abbildung 42: Shifter-Berechnung (Wellpappenprobe 2.1 mit 15 % Belastung)

Der Absolute-Shifter wird eingesetzt um die unterschiedliche Anfangsauslenkung der berechneten Kurve (blaue unterbrochene Linie Ber_A) an die im Normklima gemessene Kriechkurve (lila Linie NK_MES) anzugleichen. Daraus ergibt sich die angepasste, in der Abbildung 42 in grün dargestellte, unterbrochene Kurve Ber_B. Um den Kriechverlauf einer Probe im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) (rote Linie FK_Mes) nachzubilden wird ein sogenannter Verlaufs-Shifter angewendet, der ebenfalls in Abbildung 42 veranschaulicht ist. Dieser muss je nach gegebenem Klima definiert und in die Berechnung eingefügt werden. Somit können in Zukunft auch Kriechverläufe im Wechselklima berechnet werden.

Im letzten Schritt werden die für die Simulation gesammelten Ergebnisse vorgestellt. Die Untersuchung der Druckbelastung in allen drei Raumrichtungen ergibt, dass nur Querkontraktionszahlen während des normalen ECT-Versuchs sinnvoll sind. In den beiden weiteren Raumrichtungen können keine Querkontraktionszahlen ermittelt werden. Grund dafür ist, dass die geometrischen Verformungen einen Großteil der Materialverschiebungen ausmachen und es beim modifizierten ECT schnell zu einem Abknicken der Probe kommt. Folglich werden die Werte für die Simulation in Anlehnung an die Querkontraktionszahlen beim ECT Versuch ausgelegt.

Die anschließende Auswertung der optischen Dehnfeldanalyse ergibt den zeitlichen Verlauf der x- und y-Dehnung. Die folgende Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse der Dehnung eines ECT-Versuchs.

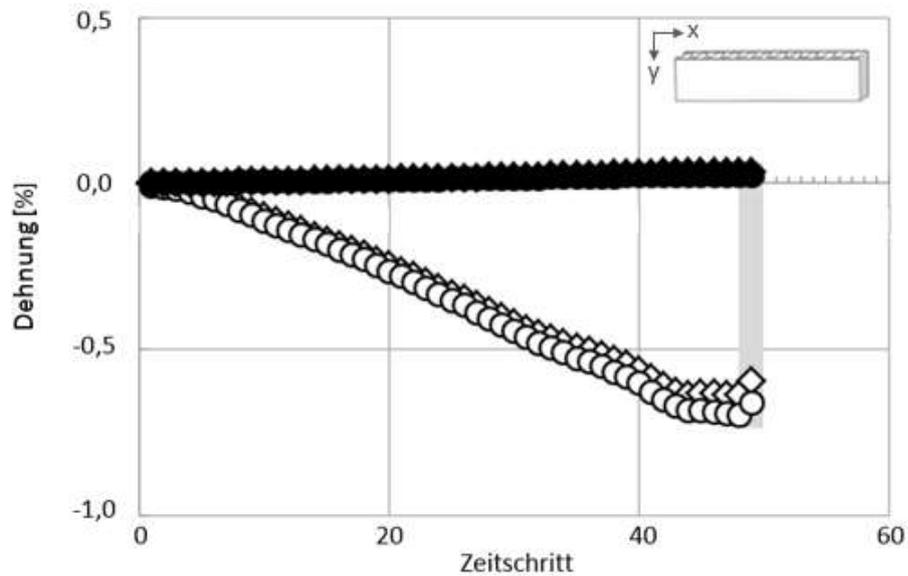


Abbildung 43: Dehnungen beim ECT Versuch (x: schwarz, y: weiß)

Während des ECT-Versuchs verformt sich die Wellpappen-Probe vor allem in y-Richtung. Hin- gegen ist die Verformung in x-Richtung nur minimal (vgl. Abb. 43). Die Querkontraktionszahl ergibt sich aus dem Verhältnis von Quer- zu Längsdehnung. Somit ergeben sich die geringen Werte der Querdehnzahlen zwischen 0,05 und 0,08 für die vier untersuchten Wellpappen.

Werden die ermittelten Materialkennwerte in das ausgewählte FE-Modell eingefügt, kann das Programm zunächst den Aufbau der Wellpappen-Verpackung abbilden (vgl. Abbildung 44).

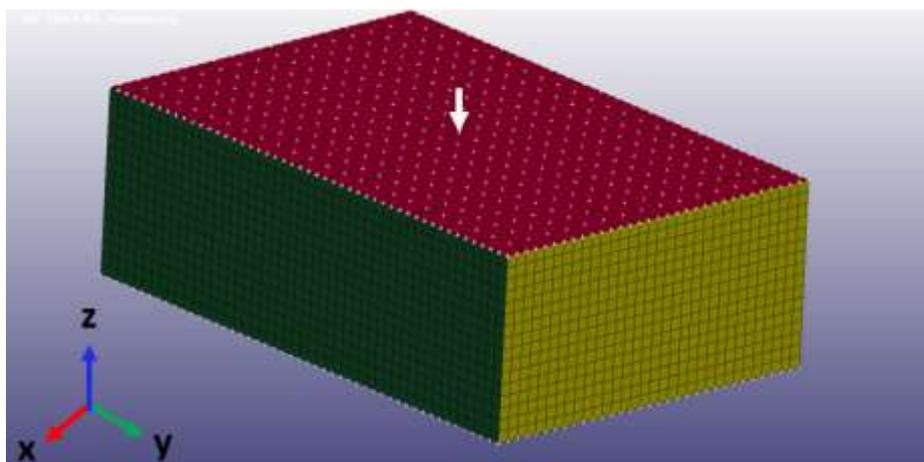


Abbildung 44: FE-Modell der Wellpappen-Verpackung inklusiver der Randbedingungen (weiße Kreuze) und der Lasteinleitung (weißer Pfeil)

Zur Bewertung der Genauigkeit des genutzten FE-Modells wird ein standardisierter BCT-Ver-
such simuliert. Für die Berechnungen wird das Materialmodell 001 ELASTIC gewählt (vgl. Ab-
bildung 45).

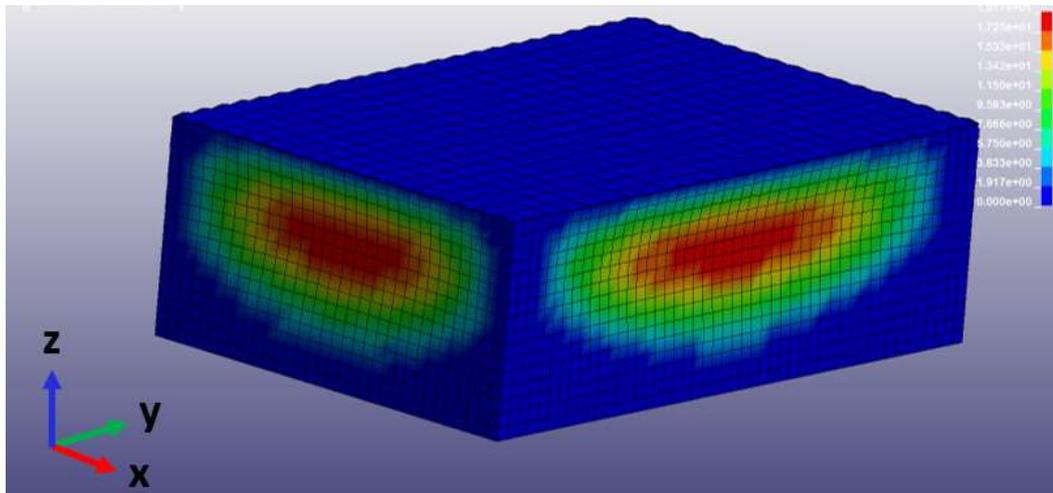


Abbildung 45: Verformung des FE-Modells während des BCT-Versuchs

Die Abbildung 45 stellt einen BCT-Versuch kurz vor dem Stabilitätsversagen der Wellpappen-
Verpackung dar. Dabei ist sowohl das charakteristische Ausbeulen der Seitenflächen als auch
die Lastweiterleitung über die Verpackungskanten zu erkennen. In der folgenden Abbildung
46 sind die Kraft-Weg-Verläufe des FE-Modells und des durchgeführten BCT-Versuches dar-
gestellt.

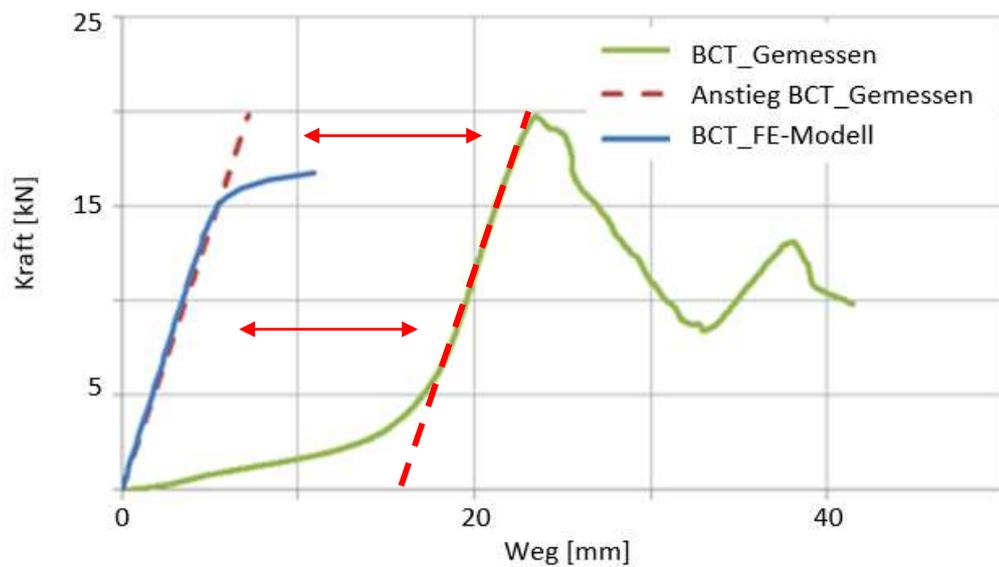


Abbildung 46: Vergleich von BCT gemessen und FE-Modell

Bei dem Vergleich der beiden Kurven BCT_Gemessen und BCT_FE-Modell wird deutlich, dass sich diese stark unterscheiden. Grund dafür ist, dass die Anfangskomprimierung der Wellpappen-Verpackung aufgrund von geometrischen Ungenauigkeiten im FE-Modell nicht berücksichtigt wird. Dadurch kann die Belastung nicht direkt über den gesamten Verpackungsumfang aufgenommen werden. Werden nur die Anstiege der beiden Kurven verglichen (rote unterbrochene Linie mit blauer Kurve), so zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Das Ende der beiden Kurven stimmt aufgrund von plastischen Verformungseffekten nicht überein, da diese im gewählten Materialmodell von LS-DYNA nicht berücksichtigt werden. In Anbetracht dessen, dass die Langzeitversuche nur im elastischen Verformungsbereich stattfinden sollen, ist dies tolerierbar.

Im nächsten Schritt wird das angepasste Kriechgesetz auf eine Wellpappen-Verpackung mit einer konstanten Belastung von 15 % im Normklima (23 °C/ 50 % RH) übertragen (vgl. Abb. 47).

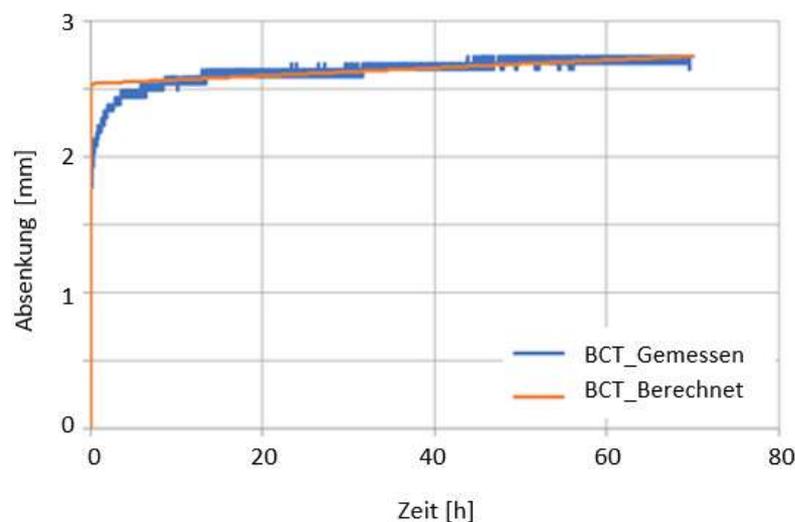


Abbildung 47: Vergleich von gemessenen BCT und mittels FEM berechneten BCT bei einer Belastung von 15 % im Normklima (23 °C/ 50 % RH)

Die Abbildung 47 veranschaulicht, dass es mithilfe des ermittelten FE-Modells möglich ist das Kriechverhalten von Wellpappen-Verpackungen zu berechnen. Lediglich die Anfangskompression der Wellpappen-Verpackung kann, wie bereits beschrieben, nicht exakt dargestellt werden. Der weitere Bereich der Kriechverformung kann jedoch ausreichend genau berechnet werden.

7. SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die Untersuchungen dieser Arbeit gliedern sich in zwei Teilbereiche. Im ersten Teilbereich wurden zwei Prüfeinrichtungen entwickelt und in Betrieb genommen, sowie die auf die Messung einwirkenden Faktoren untersucht. Der zweite Teilbereich umfasste Untersuchungen zur Simulation des Kriechverhaltens von Wellpappen-Proben und Wellpappen-Verpackungen. Untersuchungsgegenstand waren insgesamt fünf nassfeste Wellpappen von unbekannter Qualität. Dabei handelte es sich sowohl um zwei- als auch um dreiwellige Wellpappen, die teilweise in Form der Schachtelausführungen FEFCO 0201 getestet wurden.

Zu Beginn der Untersuchungen des Teilbereichs eins wurde das Probenmaterial hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften nach den geltenden Normen geprüft. Hierbei wurden beispielsweise die Berstfestigkeit, die Durchstoßarbeit und der Kantenstauchwiderstand ermittelt. Das Probenmaterial entsprach der nassfesten Wellpappen-Sorte 2.96. Im Anschluss wurden Vergleichsuntersuchungen der beiden neu entwickelten Prüfeinrichtungen (Kaskadenprüfeinrichtung und Einzelprüfeinrichtung) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass beide zwar ähnliche Kriechraten liefern, die ermittelten Standzeiten sich jedoch stark unterscheiden. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen über mögliche, die Messung beeinflussende Faktoren, wie die Prüfdauer und Alterung, die Probenaufbereitung, die Installation der Prüfeinrichtung, die Feuchteverteilung und die Art der Klimakammer, durchgeführt. Bei der Untersuchung der zwei verschiedenen Lagerdauern von neun und 24 Monaten wurde deutlich, dass eine Lagerdauer von bis zu neun Monaten akzeptiert werden kann, ohne sich negativ auf das Kriechverhalten ausübende Effekte. Eine Lagerdauer von 24 Monaten ist hingegen aufgrund der negativen Einflüsse auf die Wellpappe nicht zu empfehlen. Die Probenaufbereitung sollte zur Sicherstellung einer konstanten Qualität sorgsam durchgeführt werden, wobei vor allem auf die Planparallelität der ECT-Proben und deren Klimatisierung Wert gelegt werden muss. Zudem ist es vor Beginn von Kriechuntersuchungen unerlässlich, die Prüfeinrichtungen vertikal und horizontal genau auszurichten und die Regelgenauigkeit der verwendeten Klimakammer zu prüfen. Werden die genannten Einflussfaktoren nicht berücksichtigt, ist es kaum möglich, reproduzierbare Ergebnisse zu erlangen.

Auch bei den Untersuchungen des Teilbereichs zwei wurde das Probenmaterial hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften getestet. Die Wellpappen des Herstellers eins entsprachen der Wellpappen-Qualität 2.90, allerdings besaßen diese keine nassfeste Verklebung. Das Probenmaterial des Herstellers zwei bestand aus zwei nassfesten Wellpap-

pen der Qualitäten 2.90 und 2.91. Im Anschluss an die Basisuntersuchungen wurden Versuche zur Ermittlung des Kantenstauchwiderstandes und Biegeuntersuchungen mit verschiedenen Dehnraten bzw. Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt. Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass Wellpappe ein viskoelastisches Material ist. Somit war es möglich, das zeitabhängige Materialverhalten von Wellpappe über ein generalisiertes Maxwell-Modell abzubilden. Nach der Bestimmung geeigneter Dämpfungsparameter und ihrer Umformung mithilfe der Prony-Analyse konnte das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben im Normklima berechnet werden.

Um die berechneten Ergebnisse mit realen Kriechverläufen vergleichen zu können, wurden aufbauend auf den mechanischen Eigenschaften der angelieferten Wellpappenqualitäten Langzeituntersuchungen bei konstanter Last (15 %, 25 % und 33 % des im Normklima gemessenen Wertes) in verschiedenen Klimata (Norm-, Feucht- und Wechselklima) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass aufgrund der fehlenden nassfesten Verklebung des Herstellers nur wenige Kriechraten ermittelt werden konnten. Vor allem die Ergebnisse der Wellpappen-Verpackungen verdeutlichen, dass die Belastungen 25 % und 33 % aufgrund der geringen mechanischen Festigkeit und der fehlenden nassfesten Verklebung zu hoch sind und daher keine Kriechraten ermittelt werden konnten. Infolge dessen wurde von der Untersuchung des Probenmaterials des Herstellers zwei bei einem Belastungsniveau von 33 % abgesehen. Die Untersuchung einer Belastung von 15 % lieferte längere Standzeiten und somit auch Kriechraten. Bei der Auswertung zeigte sich weiterhin, dass die Zeit bis zum Versagen der Probe umso länger ausfällt, je geringer die Kriechrate ist.

Im Anschluss an die Kriechuntersuchung wurden die Ergebnisse mit den berechneten Kriechraten verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass mithilfe der gewählten Berechnungsmethode Kriechverläufe im Norm- und Feuchtklima vorausberechnet werden können. In weiteren Untersuchungen wird angestrebt, auch für das Wechselklima Kriechraten vorhersagen zu können.

Im letzten Schritt der Untersuchungen wurde versucht, das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben im Normklima mithilfe des FE-Modells LS-DYNA zu berechnen. Die Ergebnisse lieferten berechnete Kriechraten, die die gemessenen Kriechraten im Normklima ausreichend genau abbildeten. Bei der Simulation ist jedoch darauf zu achten, dass diese Inhomogenitäten im Material und in Wellpappen-Verpackung nicht mitberücksichtigt und somit zu einer höheren berechneten Standzeit als der tatsächlichen führen könnten.

Zum jetzigen Zeitpunkt lassen die bisher durchgeführten, mechanisch-technologischen Untersuchungen an den Wellpappen-Proben und Wellpappen-Verpackungen keine belastbaren Aussagen zur Abschätzung des Zeitstandverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe zu. Jedoch ist es möglich, das Kriechverhalten mithilfe des generalisierten Maxwell-Modells, der Prony Analyse und des FE-Modells abzuschätzen und durch die neuen Prüfmöglichkeiten mit realen Kriechraten zu vergleichen und anzupassen.

Dies ist ein erster Schritt, um das Zeitstandverhalten genau zu untersuchen und vorherzusagen. In einem weiterführenden Forschungsvorhaben soll die entwickelte Methode auch für verschiedene Wellpappen-Sorten, Verpackungsgeometrien und Klimabedingungen angepasst werden. Somit wäre es möglich, das Zeitstandverhalten von Wellpappe genau abzuschätzen und letztendlich den Packstoff effizient und bedarfsgerecht einzusetzen.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- Aboure, Z.; Talbi, N.; Allaoui, S.; Benzeggagh, M. (2004): Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modelling. *Composite Structures*, Vol. 63, No. 1, pp. 53-62.
- Alava, M.; Niskanen, K. (2005): The physics of paper. Institute of Physics Publishing, Reports on Progress in Physics (Rep. Prog. Phys.) 69, 2006, pp. 669-723
- Altenbach, H. (2015): *Kontinuumsmechanik – Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. Springer Vieweg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage.
- Batelka, J. J.; Smith, C. N. (1993): Package Compression Modell, Package compression model. Project 3746, final report to the Containerboard and Kraft Paper Group of the American Forest and Paper Association, Institute of Paper Science and Technology, Atlanta.
- Berthold, J.; Rinaudo, M.; Salmeñ, L. (1995): Association of water to polar groups; estimations by an adsorption model for lingo-cellulosic materials. *Elsevier, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 112 (1996), pp. 117-129.
- Biancolini, M. E.; Brutti, C.; Porziani, S. (2010): Corrugated board containers design method. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 3(2), pp. 143-163.
- Blechsmidt, J. (Hrsg.) (2010): *Taschenbuch der Papiertechnik*, München: Carl Hanser Verlag, S. 30ff.
- Bodig, J.; Jayne, B. A. (1982): *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold Comp., London.
- Böröcz, P. (2015): Measurement and Analysis of Deformation Shapes on Corrugated Cardboard Logistical Boxes under Static and Dynamic Compression. *Acta Technica Jaurinensis*, (8)4, pp. 320-329.
- Böröcz, P.; Singh, S. P.; Singh, J. (2015): Evaluation of Distribution Environment in LTL Shipment between Central Europe and South Africa. *Journal of Applied Packaging Research*, 7(2), Article 2.

- Bronkhorst, C. A.; Riedemann, J. R. (1994): The creep deformation behavior of corrugated containers in a cyclic moisture environment. In: Fellers C, Laufenberg TL, editors. Proceedings of the Moisture-Induced Creep Behavior of Paper and Board. Stockholm 1994. pp. 249–73.
- Bronkhorst, C. A. (1997): Towards a More Mechanistic Understanding of Corrugated Container Creep Deformation Behaviour. *Journal of Pulp and Paper Science*, 23, pp. 174-181.
- Byrd, V. L.; Koning, J. W. (1978): Edgewise compression creep in cyclic relative humidity environments. *Tappi Journal*, Vol. 6, No. 6, pp. 35–37.
- Dimitrov, K. (2010): Relationship between the ECT-strength of corrugated board and the compression strength of linier and fluting medium papers, M. Eng. Thesis (Chemical Engineering), University of Pretoria, Faculty of Engineering, Built, Environment and Information Technology, 16th of July 2010.
- Engelund, E. T.; Garbrecht Thygesen, L.; Svensson, S.; Hill, C. A. S. (2012): A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Wood Science Technology*, 47 (2013), pp. 141-161.
- Eurostat (2013): European Statistical Database 2013: Development of the share of main packaging material. http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Development_of_the_share_of_main_packaging_materials,_EU-27,_2005-13.png, abgerufen am 11.01.2017.
- Gibson, E. J. (1965): Creep of wood: role of water and effect of a changing moisture content. *Nature*; Vol. 206, No. 4980, pp. 213–215.
- Gou, Y.; Fu, Y.; Zhang, W. (2008): Creep Properties and Recoverability of Double - wall Corrugated Paperboard, *Experimental Mechanics* 48, pp. 327-333.
- Habeger, C. C.; Coffin, D. W.; Hojjatie, B. (2001): Influence of humidity cycling parameters on the moisture-accelerated creep of polymeric fibers. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*; Vol. 39, No. 17, pp. 2048–2062.

- Hiller, B. (2016): Predicting the long-term mechanical behaviour of corrugated cardboard packaging based on speed rate controlled short term tests. Proceedings of Progress in Paper Physics Seminar Conference, pp. 65-70, Darmstadt.
- Hussain, S.; Coffin, D.; Todoroki, C. (2017): Investigating Creep in Corrugated Packaging. Packaging Technology and Science, Early View.
- Hying, K. (2003): Analyse der viskoelastischen Eigenschaften von Poly (tetrafluorethylen) im Bereich des β -Übergangs. Dissertation, Rheinisch- Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften.
- Jones, A. L. (1871): Improvement in Paper for Packing. Patentnummer US 122023 A.
- Knothe, K.; Wessel, H. (2017): Finite Elemente: Eine Einführung für Ingenieure. Springer Vieweg, Springer Verlag, 5. Auflage, Berlin.
- Köstner, V.; Ressel, J. B.; Sadlowsky, B.; Böröcz, P. (2017): Development of an Individual Test Rig for Measuring the Creep Behavior of Corrugated Board, Acta Technica Jaurinensis, Vol. 10, No. 2, pp. 148-156.
- Koltzenburg, S.; Maskos, M.; Nuyken, O. (2014): Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendung. Springer Spektrum, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Koning, J. W.; Jr. Stern, R. K. (1977): Long-term creep in corrugated fiberboard containers. Tappi Journal; Vol. 60, No. 12, pp. 128–131.
- Kroeschell, W. O. (1992): The edge crush test, TAPPI Journal, January 1992, S. 79 – 82.
- Kuntsche J. K. (2015): Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung. Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen. Springer Vieweg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kuntzsch, T., Kühnöl, K. (2017): Bestimmung werkstoffmechanischer Kennwerte an faserbasierten Werkstoffen aus optisch ermittelten Dehnungsfeldern (Optische Dehnungsfeldmessung). PTS-Forschungsbericht VF 130044.

- Läpple, V.; Drube, B.; Wittke, G.; Kammer, C. (2007): *Werkstofftechnik Maschinenbau, Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen, Europa-Lehrmittel, Leinfelden-Echterdingen*, 2007, S.66f / 642f.
- Leake, C. H.; Wojcik, R. (1993): Humidity cycling rates: how they influence container life spans. *Tappi Journal (Focus on Corrugated Containers)*. Vol. 76, No. 10, pp. 26–30.
- Long, O. (1874): Improvement in Packing for Bottles, & c. Patentnummer US 283407 A.
- Marcondes, J. A (1992): Effect of load history on the performance of corrugated fibreboard boxes. *Packaging technology and science*, Vol. 5, No. 4, pp. 179-187.
- Markström, H. (1999): Testing methods and instruments for corrugated board. Lorentzen & Wettre, Stockholm, pp. 75-77.
- Matheas, J. (2015): Materialparameter für effiziente Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Mehrschichtmaterialien und den darauf aufbauenden Entwurf angepasster Produkte (Materialparameter). PTS-Forschungsbericht 10/15.
- McKee, R. C.; Gander, J. W.; Wachuta, J. R. (1963): Failure of corrugated boxes under long term loading - summary of results as of June 1963, Insitute of Paper Chemistry, Appelton, Wisconsin, Projekt 1108-30.
- Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E. (2002): *Werkstoffkunde Kunststoffe*. Hanser-Verlag München, 5. Auflage.
- Mezger, T. G. (2010): *Das Rheologische Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. Vincentz Network, Hannover, 3. Auflage.
- Michaeli, E. H. W., Brandt M., Brinkmann M., Schmachtelberger E. (2006): Simulation des nicht-linearen viskoelastischen Werkstoffverhaltens von Kunststoffen mit dem 3D-Deformationsmodell. *Zeitschrift Kunststofftechnik (Journal of Plastics Technology)* 2, 5, Carl Hansa Verlag, München.
- Mojzes, Á.; Böröcz, P. (2015): Decision Support Model to Select Cushioning Material for Dynamics Hazards During Transportation. *Acta Technica Jaurinensis*, 8(2), pp. 188-200.

- Morgan, D. G. (2005): Analysis of creep failure of corrugated board in changing or cyclic humidity regimes. 59th Appita Annual Conference and Exhibition, incorporating the 13th ISWFPC: International Symposium on Wood, Fibre and Pulping Chemistry, Auckland.
- Nakamura, K.; Hatakeyama, T.; Hatakeyama, H. (1981): Studies on Bound Water of Cellulose by Differential Scanning Calorimetry. Textile Research Institute, pp. 607-613.
- Navaranjan, N.; Dickson, A.; Paltakari, J.; Ilmonen, K. (2012): Humidity effect on compressive deformation and failure of recycled and virgin layered corrugated paper-board structures. Elsevier, Composites: Part B, 45 (2013), pp. 965-971.
- Niskanen, K. (2012): Mechanics of Paper Products, Berlin, Boston: de Gruyter.
- Olsson, A. M.; Salmén, L. (2014): Mechano-sorptive creep in pulp fibers and paper. Wood Science and Technology 2014; Vol. 48, No. 3, pp. 569–580.
- Pathare, P. B.; Opara, U. L. (2014): Structural design of corrugated boxes for horticultural produce: A review. Biosystems Engineering, Volume 125, September 2015, pp. 128-140.
- Pönni, R.; Vuorinen, T.; Kontturi, E. (2012): Proposed nano-scale coalescence of cellulose in chemical pulp fibers during technical treatments. Microfibrillar aggregation: Review. BioResources, 7 (4), 6077 – 6108.
- Popil, R. E. (2012): Overview of recent studies at IPST on corrugated board edge compression strength: testing methods and effects of interflute buckling, BioResources, Mai 2012, Heft 7 (2).
- Popil, R. E.; Hojjatie, B. (2010): Effects of component properties and orientation on corrugated container endurance, Packaging Technology and Science, Vol. 23, No. 4.
- Popil, R. E.; Schaepe, M. K. (2005): Comparative evaluation of the potential for wax-alternative packaging coatings, Tappi Journal, Vol. 4, No.8, pp. 25–31.
- Popov, V. L. (2009): Kontaktmechanik und Reibung: Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanobiologie bis zur numerischen Simulation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Ranz, T.; Lion, A. (2006): Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz, Universität der Bundeswehr, Fakultät für Luft- & Raumfahrttechnik, Institut für Mechanik, München, Heft 2/07 der Reihe Beiträge zur Materialtheorie.
- Ranz, T. (2007): Elementare Materialmodell der Linearen Viskoelastizität im Zeitbereich. Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Mechanik (LRT 4), Beiträge zur Materialtheorie, 5/07, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. A. Lion.
- Reimers, W. (2009): Entwicklung eines Qualitäts-Standards für Schwerwellpappe unter Berücksichtigung mechanisch/ klimatischer Belastungen in internationalen Lieferketten, Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14836 N.
- Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M. (2006): Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, B.G. Teubner Verlag/ GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006, 2.Auflage, S. 383 – 407.
- Rust, W. (2011): Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen – Kontakte, Geometrie, Material. Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Sadlowsky, B.; Ressel J. B.; Reimers W., Köstner V. (2014): Vorhersagbarkeit des Leistungsvermögens von Schachteln aus Wellpappe (FEFCO 0201) mithilfe des ECT-Langzeitwertes. Holztechnologie, Nr.55, S. 30-35.
- Scallan, A. M. (1974): The structure of the cell wall of wood: A consequence of anisotropic inter-microfibrillar bonding? Wood Science, 6 (3), 266-271.
- Schneider, J.; Kuntsche, J.; Schuls, S.; Schneider, F.; Wörner, J.-D. (2016): Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion. Springer Vieweg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001, 2. Auflage.
- Sek, M. A.; Kirkpatrick, J. (1997): Prediction of the cushioning properties of corrugated fibre-board from static and quasi-dynamic compression data. Packaging Technology and Science, Vol. 10, No. 2, pp. 87-94.
- Selway, J. W.; Kirkpatrick, J. (1992): The assessment of high humidity corrugated box performance. In Proceedings of the Cyclic Humidity Effects on Paperboard Packaging, Laufenberg TL, Leake CH (eds.). FPL: Madison, WI, Sep. 14–15, pp. 31–47.

- Sohrabpour, V.; Hellström, D. (2011): Models and Software for Corrugated Board and Box Design, International Conference on Engineering Design, ICED 11, Technical University of Denmark, 15-18 August 2011.
- Steinke, P. (2012): Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung. Springer Vieweg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, 4. Auflage.
- Talbi, N.; Batti, A.; Ayad, R.; Guo, Y. (2009): An analytical homogenization model for finite element modelling of corrugated cardboard. *Composite Structures* 2009, 88(2), pp. 280-289.
- Trost, T.; Alfthan, J. (2016): Standards for optimizing corrugated board packaging for exporting industry – A feasibility study. Innventia Report No.: 730.
- Twede, D.; Selke, S. E. M. (2005): Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology, DEStech Publications, Inc., S. 227 – 487.
- Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP) (2016): VDP Statistiken, Statistische Kurzinformation deutscher Zellstoff- und Papierfabriken, URL: https://www.vdp-online.de/fileadmin/Datensammlungen/Statistik/2017/08_2017_Kurzinfo_Allg.pdf; Abgerufen am 11. Oktober 2017.
- Verband der Wellpappen-Industrie e.V. (2004): Basiswissen Wellpappe - Vom Rohstoff bis zur Verpackung, Verband der Wellpappen - Industrie, Darmstadt.
- Verband der Wellpappen-Industrie e.V. (VdW) (2012): Wellpappen Report, Ausgabe 2/2012, 19. Jahrgang, 27. Juni 2012.
- Verband der Wellpappen-Industrie e.V. (VdW) (2017): Zahlen und Fakten - Die wichtigsten Zahlen für die Wellpappenindustrie, URL: https://www.wellpappen-industrie.de/data/04_Verband/05_Publikationen/03_ZahlenFakten/ZahlenFakten-2017.pdf, Abgerufen am 23. August 2017.
- Wagenführ, A.; Scholz, F. (2008): Taschenbuch der Holztechnik, Carl Hanser Verlag, München, S. 104f.
- Wagner, M. (2017): Lineare und nicht lineare FEM: Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®. Springer Vieweg, Wiesbaden.

Waterhouse, J. F. (1984): The Ultimate Strength of Paper, Progress in Paper Physics - A Seminar, Design Criteria for Paper Performance, Stockholm, Sweden, 25-29.06.1984.

Weigert, J. (1999): Untersuchungen zur chemischen Modifizierung von Zellstoff zur Verminderung der Verhornungsneigung sowie zu den sich daraus ergebenden papier-technologischen Eigenschaften, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Chemie, 23. Mai 1999.

Whitsitt, W. J.; Gander, J. W.; McKee, R. C. (1967): Stacking behavior of boxes and corrugated board - A summary Report of the Technical Division of the FKBI Inc., Project 1108-30, 12.04.1967.

Whitsitt, W. J.; Gander, J. W.; McKee, R. C. (1968): Effect of box dimensions and combined board creep life on box creep life - A summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., Project 2695-2, 15.11.1968.

Whitsitt, W. J.; McKee, R. C. (1972): Effect of relative humidity and temperature on stacking performance - A summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., Project 2695-9, 10.11.1972.

World Packaging Organization (WPO) (2008): Market Statistics and Future Trends in Global Packaging.

Zelinka, S. L.; Lambrecht, M. J.; Glass, S. V.; Wiedenhoef A. C.; Yelle, D. J. (2012): Examination of water phase transitions in Loblolly pine and cell wall components by differential scanning calorimetry. Elsevier, *Termochimica Acta*, 533, pp. 39-45.

NORMEN UND RICHTLINIEN

ASTM D642 – 00: Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components, and Unit Loads, 2010.

ASTM D 4332-14: Standard Practice for Conditioning Containers, Packages, or Packaging Components for Testing. American Society for Testing Materials.

DIN 53121: 2014-08 Prüfung von Papier, Karton und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode.

- DIN 53133: 2015-12 Prüfung von Papier und Pappe - Bestimmung der Wasserbeständigkeit der Verklebung von Wellpappe.
- DIN 53142-1: 2014-12 Prüfung von Pappe - Durchstoßprüfung - Teil 1: Prüfung mit dem Pendelschlagwerk.
- DIN 55440-1: 1991-11 Packmittelprüfung; Stauchprüfung; Prüfung mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit.
- DIN 55468-1: 2015-06 Packstoffe - Wellpappe - Teil 1: Anforderungen, Prüfung.
- DIN EN 20187: 1993-11 Papier, Pappe und Zellstoff; Normalklima für die Vorbehandlung und Prüfung und Verfahren zur Überwachung des Klimas und der Probenvorbehandlung (ISO 187:1990).
- DIN EN 23035:1994-09 Einseitige und einwellige Wellpappe - Bestimmung des Flachstauchwiderstandes.
- DIN EN ISO 204:2009-10 Metallische Werkstoffe - Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung - Prüfverfahren (ISO 204-2009).
- DIN EN ISO 536: 2012-11 Papier und Pappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse (ISO 536:1995).
- DIN EN ISO 2759: 2014-10 Papier - Bestimmung der Berstfestigkeit (ISO 2758:2014).
- DIN EN ISO 3037: 2013-12 Wellpappe - Bestimmung des Kantenstauchwiderstandes (Verfahren für ungewachste Kanten) (ISO 3037:2013).
- DIN EN ISO 12048:2001-04: Verpackung - Versandfertige Packstücke - Kompressions- und Stapelprüfung unter Verwendung einer Kompressionsprüfmaschine
- DIN EN ISO 12571:2000 Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.
- DIN ISO 3039: 2011-06 Wellpappe - Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Lagen nach Trennung (ISO 3039:2010).
- DIN ISO 3689: 1994-07 Papier und Pappe; Bestimmung der Berstfestigkeit nach dem Eintauchen in Wasser; Identisch mit ISO 3689:1983.

EN ISO 2233: 2001 Packaging – Complete, filled transport packages and unit loads – Conditioning for testing, International Organization for Standardization.

FEFCO TM 50, FEFCO Testing Method Determination of the Compression Resistance of corrugated fiberboard containers, 1997.

ISO 187: 1990 Paper, board and pulps; standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples, International Organization for Standardization.

ISO 12048: 1994 Complete, filled transport packages – Compression and stacking tests using a compression tester.

ISTA 2A: Series Partial Simulation Performance Test Procedure, Packaged Products 150 lb (68 kg) or Less, International Safe Transport Association, ISTA Resource Book, 2016.

TAPPI T804 (om-12): Compression test of fiberboard shipping containers, 2012.

TAPPI T 812 (om-13): Ply separation of solid and corrugated fiberboard (wet), 2013.

SOFTWARE

LS-DYNA

9. ANHANG

9.1 Kurzfassung

9.2 Summary

9.3 Vorhersagbarkeit des Leistungsvermögens von Schachteln aus Wellpappe (Typ FEFCO 0201) mithilfe des ECT-Langzeitwertes

9.4 Individual test rig for measuring the creep behaviour of corrugated board for packaging

9.5 Measuring the creep behaviour of corrugated board by cascade and individual test rig

9.6 Simulation des Kriechverhaltens von Wellpappe

9.1 KURZFASSUNG

Wellpappe ist das wichtigste und beliebteste Verpackungsmaterial für den internationalen Warentransport. Bedingt durch seine Ausgangsstoffe neigt Wellpappe unter einer erhöhten Luftfeuchtigkeit zum Kriechen, welches zum Verlust der Festigkeiten führen kann. Der Verlust der Festigkeiten kann Schäden an den zu transportierenden Produkten zur Folge haben. Das Kriechverhalten bzw. die Langzeittragfähigkeit von Wellpappe kann zurzeit nur anhand von Kurzzeitversuchen oder langwierigen Langzeituntersuchungen des Packmittels mit Zuhilfenahme von Sicherheitsfaktoren abgeschätzt werden. Um eine zuverlässige, zeitsparende und raumsparende Abschätzung des Zeitstandverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe zu ermöglichen, wurden am Institut für BFSV zwei Zeitstandprüfanlagen für Probenkörperzuschnitte zur ECT-Proben entwickelt und in Betrieb genommen. Mithilfe der Prüfanlagen ist es erstmals möglich, reproduzierbare Kriechraten an Wellpappen-Proben aufzunehmen. Zusätzlich wurde im Oktober 2015 ein Gemeinschaftsforschungsvorhaben mit der Papiertechnischen Stiftung Heidenau und des Instituts für BFSV an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg begonnen. Ziel des Projektes war es, eine kontinuumsmechanisch begründete Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappen-Verpackungen zu entwickeln. Mit Hilfe von geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuchen an Wellpappen-Proben, des generalisierten Maxwell-Modells und der Prony-Analyse ist es möglich, das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben im Normklima zu berechnen. Durch den Vergleich von gemessenen und berechneten Kriechverläufen konnte dieses Vorgehen bestätigt werden. Am Ende des Forschungsvorhabens war es möglich, mittels der Ergebnisse und der Finite-Elemente-Methode eine Simulation des Verhaltens von Wellpappen-Verpackungen über einen bestimmten Zeitraum bis hin zu ihrem Versagen darzustellen.

9.2 SUMMARY

Corrugated cardboard is one of the most important and popular packaging materials for the transport of goods. Due to its raw materials, corrugated cardboard tends to creep at an increased humidity, which can ultimately lead to a loss of strength. This loss of strength of the packaging can result in damages to the transported goods. Currently, the creep behavior and the long-term sustainability of corrugated cardboard can only be estimated based on so-called short-term tests or on protracted long-term studies of the packages, aided by security factors. To enable a reliable, time-saving and space-saving assessment of the creep behavior of corrugated cardboard, two test rigs of ECT-specimens were developed and started up at the Institute of BFSV. Additionally, in October 2015, a research project was launched by the Papiertechnische Stiftung Heidenau and the Institute for BFSV at the University of Applied Sciences Hamburg. The aim of the project was the development of a method for the calculation of the climate-dependent creep behavior of corrugated board packaging, based on continuum mechanics. Using velocity-controlled short-term tests on corrugated cardboard samples, the generalized Maxwell-model and the Prony-analysis, it is possible to calculate the creep behavior of corrugated cardboard samples in standard climate. By comparing the measured and calculated creep rates, it was possible to confirm this procedure. At the end of the research project, it was possible to use the results and the finite element method to present a simulation of the behavior of corrugated packaging over a certain period of time, up to its failure.

9.3 VORHERSAGBARKEIT DES LEISTUNGSVERMÖGENS VON SCHACHTELN AUS WELL-
PAPPE (TYP FEFCO 0201) MITHILFE DES ECT- LANGZEITWERTES

Stellungnahme zur Anfertigung des Manuskriptes „Vorhersagbarkeit des Leistungs-
vermögens von Schachteln aus Wellpappe (Typ FEFCO 0201) mithilfe des ECT-
Langzeitwertes“ veröffentlicht in der Fachzeitschrift Holztechnologie Nr. 55 (2014). Autoren
Prof. Dr.-Ing. B. Sadlowsky, Prof. Dr. J. B. Ressel, Dipl.-Ing. W. Reimers und M. Sc. Viktoria
Köstner.

Die Planung des Projektes wurde hauptsächlich von V. Köstner übernommen, wobei dies in
Abstimmung mit B. Sadlowsky und J. B. Ressel erfolgte. Die Ausführung der Versuche war
Aufgabe von V. Köstner. Sie wurde dabei von Mitarbeitern der BFSV Verpackungsinstitut
Hamburg GmbH unterstützt. Besonders die Langzeitversuche in den Klimakammern
erforderten ein hohes technisches Knowhow im Umgang und mit der Programmierung der
Klimakammern. Auch die Bestückung der Klimakammern mit den Versuchseinrichtungen
mithilfe eines Gabelstaplers erfolgte durch Mitarbeiter der BFSV Verpackungsinstitut
Hamburg GmbH. Zudem wurde die Probenanfertigung mittels der Wellpappensäge durch
den Mitarbeiter G. Borzi der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH durchgeführt. Die
Auswertung der Daten der Standprüfungen und der Langzeituntersuchungen war allein die
Aufgabe von V. Köstner. Dabei lieferte W. Reimers entscheidende Anmerkungen zur
übersichtlicheren und anschaulicheren Darstellung der Ergebnisse. Das Manuskript wurde
von V. Köstner erstellt und von B. Sadlowsky und J. B. Ressel kommentiert.

Unterschrift Betreuer 1

(Ort, Datum)

Unterschrift Betreuer 2

(Ort, Datum)

Vorhersagbarkeit des Leistungsvermögens von Schachteln aus Wellpappe (Typ FEFCO 0201) mithilfe des ECT-Langzeitwertes

Bernd Sadlowsky, Jörg B. Ressel, Wolfgang Reimers, Viktoria Köstner

Wellpappe zählt zu den wichtigsten und beliebtesten Verpackungsmaterialien für den Transport von Waren. Aufgrund seiner Ausgangsstoffe neigt Wellpappe unter einer erhöhten Luftfeuchtigkeit zum Kriechen, welches zum Verlust der Festigkeiten führen kann. Der Verlust der Festigkeiten kann Schäden an den zu transportierenden Produkten zur Folge haben. Das Kriechverhalten bzw. die Langzeittragfähigkeit von Wellpappe kann zurzeit nur anhand der sogenannten Kurzzeitversuche oder langwierigen Langzeituntersuchungen des Packmittels mit Zuhilfenahme von Sicherheitsfaktoren abgeschätzt werden. Um eine zuverlässige, zeit- und raumsparende Abschätzung des Zeitstandverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe zu ermöglichen, wurde am Institut für BFSV an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg der Prototyp einer Zeitstandprüfanlage an ECT-Proben in Betrieb genommen und optimiert. Mithilfe der Prüfanlage konnten an Wellpappenproben reproduzierbare Kriechraten ermittelt werden. Um die ermittelten Kriechraten des Packstoffes mit denen des Packmittels in sichere Verbindung bringen zu können, sind jedoch weitere Untersuchungen unabdingbar.

Schlüsselwörter: Wellpappe, Kriechverhalten, Zeitstandprüfanlage

Einleitung

Bedingt durch die steigende Globalisierung und die Vernetzung der Warenströme müssen Transportverpackungen immer höheren Belastungen bei dem Transport und der Lagerung standhalten. Es handelt sich nicht nur um statische Belastungen, die bei der Stapelung der Waren entstehen, sondern auch um dynamische Belastungen, die während des Transportes mit Schiff, Bahn und Lastkraftwagen anfallen. Zusätzlich treten klimatische Versandbelastungen auf, die durch das Durchfahren von mehreren Klimazonen entstehen. Dabei sind vor allem die wechselnden Luftfeuchtigkeiten zu erwähnen. Selbst bei diesen extremen Belastungen dürfen Transportverpackungen nicht versagen und müssen das zu transportierende Gut sicher und unbeschädigt an das Bestimmungsziel bringen.

Das Leistungsvermögen von Transportverpackungen aus Wellpappe kann lediglich anhand der mechanischen Eigenschaften des Packstoffes (z. B. Berstfestigkeit nach *DIN EN ISO 2759*, 2003) und des Stapelstauchwiderstandes des Packmittels (*DIN 55440-1*, 1991) abgeschätzt werden. Der Einfluss von Transport-, Umschlag-, Lager- und Klimabelastungen wird über sogenannten Sicherheitsfaktoren kompensiert.

In der Praxis werden daher ca. 20-30 % des für die jeweilige Verpackung gemessenen maximalen Stapelstauchwiderstandes für die Bemessung der Verpackung verwendet. Das Fehlen einer konkreten Standardisierung des Zeitstandverhaltens von Wellpappeverpackungen führte zu Langzeituntersuchungen über den Stapelstauchwiderstand von im Überseeversand eingesetzten Wellpappeverpackungen. Diese Möglichkeit, das Zeitstandverhalten von Verpackungen abschätzen zu können, ist jedoch sehr zeit- und kostenaufwendig.

Ziel der Untersuchungen ist es, mithilfe eines neu entwickelten Prüfgestells Kriechraten von Kleinstproben (25 mm x 100 mm) zu ermitteln, um von diesen auf das Zeitstandverhalten der Verpackung schließen zu können.

Grundlagen

Der Stapelstauchwiderstand, auch Box-Compression-Test genannt (BCT-Wert), ist der in der Praxis am häufigsten verwendete Kennwert, um die Stapelfähigkeit von Wellpappeverpackungen bei der Lagerung und das allgemeine Leis-

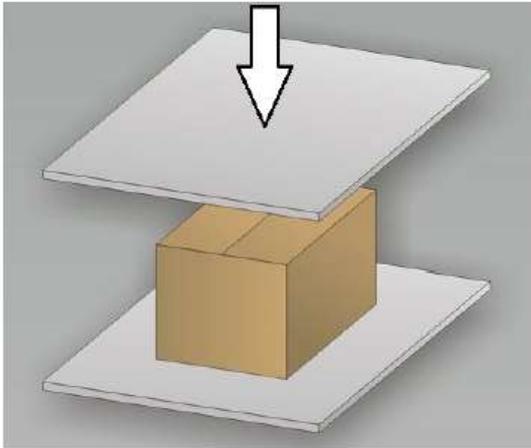


Abb. 1: Stapelstauchwiderstand (BCT)

Fig. 1: Box compression test (BCT)

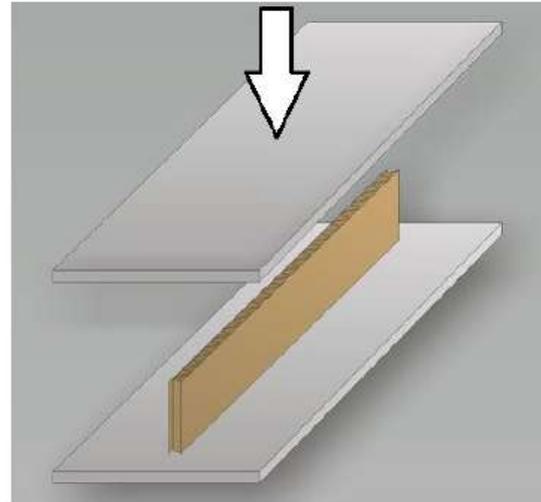


Abb. 2: Kantenstauchwiderstand (ECT)

Fig. 2: Edge crush test (ECT)

tungsvermögen einer Wellpappeverpackung ermitteln und beurteilen zu können (DIN 55440-1, 1991). Er wird definiert als die maximal senkrecht einwirkende Kraft, den eine ungefüllte, verschlossene Wellpappeverpackung mit bestimmten Abmessungen im ruhenden Zustand aushält, bis es zum Versagen kommt (vgl. Abb. 1) (VdW, 2004). Seit den 1960er Jahren ist bekannt, dass der Stapelstauchwiderstand von der Biegesteifigkeit und dem Kantenstauchwiderstand (ECT-Wert) der Wellpappe beeinflusst wird (vgl. Abb. 2). Dieser Zusammenhang wurde durch Untersuchungen am Institute of Paper Chemistry (IPST) in Appleton, Wisconsin, USA, durch *McKee et al.* (1963) festgestellt. Das Ergebnis der Forschungen lieferte eine Faustformel (Gl. 1), mit deren Hilfe von der Biegesteifigkeit und dem Kantenstauchwiderstand auf den Stapelstauchwiderstand von fertigen Schachteln aus Wellpappe geschlossen werden kann (*McKee et al.*, 1963). Diese Gleichung wird auch McKee-Formel genannt und besagt:

$$BCT = k_1 \cdot ECT^\beta \cdot Sb^{(1-\beta)} \cdot Z^{(2\beta-1)} \quad (1)$$

$$Sb = \sqrt{Sb_{MD} \cdot Sb_{CD}} \quad (2)$$

Dabei sind

BCT – Stapelstauchwiderstand in N,

ECT – Kantenstauchwiderstand in kN/m,

Sb – Geometrischer Mittelwert der Biegefestigkeit in Nm,

k, β – Material- bzw. schachtelspezifische Konstanten,

Z – Umfang der Schachtel in mm.

Die Entwicklung der McKee-Formel wurde auf der Grundlage von Untersuchungen von einwelligen Wellpappen mit geringen Festigkeiten entwickelt. Um die Formel für zwei- und dreiwellige Wellpappen anwenden zu können, müssen die ma-

terial- und schachtelspezifischen Konstanten β und k für jede Wellpappensorte einzeln bestimmt werden (*Reimers*, 2010). Feuchtigkeit ist der Hauptfaktor, der die Festigkeiten von Papierprodukten negativ beeinflusst. Besonders bei hoher Luftfeuchtigkeit nehmen die Festigkeitseigenschaften stark ab. Steigt die Luftfeuchtigkeit beispielsweise von 50 % auf 90 % an, verringert sich der Stapelstauchwiderstand um 50-60%. Auch der Kantenstauchwiderstand verringert sich um 55-60 % (*Whitsitt et al.*, 1972). Werden Papierprodukte zusätzlich zu einer hohen relativen Luftfeuchte einer Last ausgesetzt, kommt es durch die Elastizität und die Viskoelastizität zum Kriechen des Materials (*Twede et al.*, 2005).

Allgemein wird der Begriff des Kriechens in der Literatur als kontinuierliche, zeitabhängige, plastische Verformung eines Werkstoffes unter konstanter Last beschrieben. Der Kriechvorgang wird dabei als viskoplastisch definiert (*Rösler et al.*, 2006). Der Verformungsprozess kann bis zum Bruch des Bauteils führen (*Läpple et al.*, 2007). Bei einem Kriechvorgang können allgemein drei Etappen des Kriechens unterschieden werden: das Primär-, das Sekundär- und das Tertiärkriechen. Abhängig ist das Kriechen eines jeden Werkstoffes von der Belastungsart, der Belastungshöhe, der Materialfeuchtigkeit, der Materialtemperatur und dem Wechselklima. Wobei vor allem das Wechselklima, besonders bei hygroskopischen Materialien, den größten Einfluss auf die Kriechrate von Werkstoffen ausübt (*Ranz*, 2007).

Experimente und Methoden

Gegenstand der durchgeführten Untersuchung waren drei nassfeste Wellpappen von drei unterschiedlichen Herstellern. Dabei handelte es sich sowohl um zwei- als auch um dreiwellige Wellpappen. Die Qualität der Wellpappen war nicht näher bekannt. In den BCT-Versuchen wurde der weltweit am

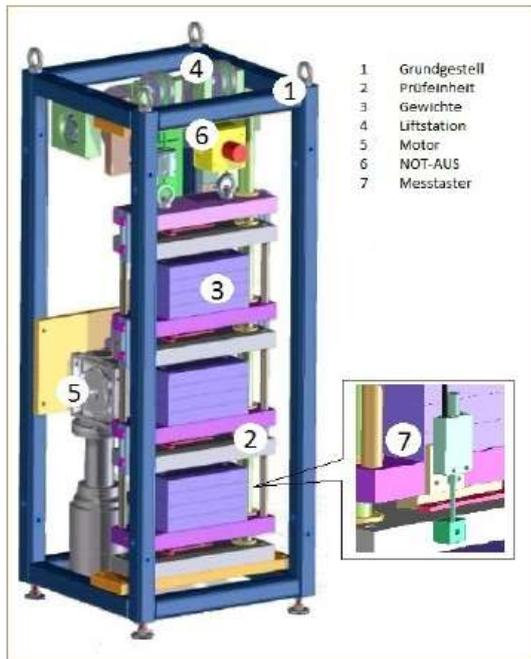


Abb. 3: ECT-Prüfgestell
Fig. 3: ECT-test apparatus

meisten verbreitete Schachteltyp FEFCO 0201 untersucht. Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Proben wurden Standarduntersuchungen am Packstoff selbst durchgeführt. Gemessen wurden beispielsweise die Berstfestigkeit, die Durchstoßarbeit und der Kantenstauchwiderstand.

Prüfung der BCT-Langzeitwerte

Die Prüfung der BCT-Langzeitwerte erfolgt in speziellen Druckgestellen bei einer konstanten statischen Last von 25 % des maximal gemessenen BCT-Wertes. Dieser Wert richtet sich nach dem in der Praxis eingesetzten Sicherheitsbeiwert zur Bemessung der Zeitstandfestigkeit von Transportverpackungen. Das Druckgestell befindet sich in einer Klimakammer, in der die beim Containerversand auftretenden Klimabedingungen simuliert werden. Es handelt sich um ein definiertes Wechselklima bei 23 °C (zeitlicher Fehler +/- 0,2 K) und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und 90 % (+/- 1%). Die statische Last und die wechselnden Klimazyklen sollen zum Kriechen der Transportverpackung führen, bis diese versagt. Ein Versagen der Transportverpackung liegt vor, wenn sich die Seitenwände in einem so hohen Maß plastisch verformen, dass die Verpackung weder transportierbar noch überstaubar ist. Diese Form der Prüfung ist ein erster Schritt, um die realen Transportbedingungen im Überseeversand simulieren und die Langzeittragfähigkeit der Verpackungen bestimmen zu können. Sie ist jedoch sehr zeit- und kostenaufwendig und kann nur in einer speziellen Prüfeinrichtung durchgeführt werden (Reimers, 2010).

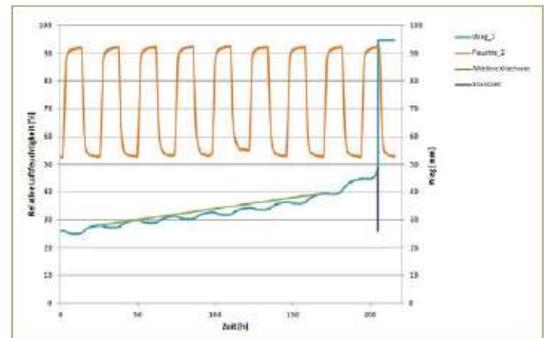


Abb. 4: BCT-Langzeitmessung
Fig. 4: BCT-long-term measurement

Korrelationsmöglichkeiten von BCT- und ECT-Langzeitwert

Angelehnt an die Untersuchungen von McKee et al. (1963) wurden in den letzten Jahren vom Institut für BFSV an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Untersuchungen über die Möglichkeit der Korrelation eines ECT-Langzeitwertes mit dem BCT-Langzeitwert durchgeführt. Bei den Untersuchungen handelte es sich um ECT-Langzeitversuche im Wechselklima mit einer statischen Belastung von 25 % des maximalen ECT-Wertes. Als Ergebnis konnte ein Hinweis auf eine Verbindung des ECT-Langzeitwertes mit dem BCT-Langzeitwert festgestellt werden.

Neue ECT-Prüfvorrichtung

Aufgrund der Möglichkeit einer Korrelation der beiden Werte wurde ein neuartiges ECT-Langzeitprüfgestell entwickelt. Die Idee des Aufbaues des Prüfgestells wurde aus der Zeitstandprüfung von metallischen Werkstoffen übernommen. In der Prüfung werden die Werkstoffe bei einer konstanten Belastung und einer erhöhten Temperatur getestet. Die Belastung kann durch Zug, Druck, Innendruck, Biegung und Torsion aufgebracht werden. Während des Versuches wird die Verformung der Probe (Kriechen) beispielsweise mittels Wegaufnehmern aufgezeichnet. Am Ende des Versuches können Kriechkurven erstellt werden, aus denen das Zeitstandverhalten des jeweiligen Materials abgelesen werden kann. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass das Material bei einer bestimmten Betriebstemperatur nicht während der Betriebszeit durch einen Kriechbruch versagt. Um Kosten zu sparen, kann auch ein Vielprobengestell verwendet werden (Läpple et al., 2007; DIN EN ISO 204, 2009). Im Falle der neu entwickelten ECT-Prüfvorrichtung handelt es sich um eine automatisierte Zeitstandprüfeinrichtung, in der die ECT-Langzeitwerte von vier Proben gleichzeitig ermittelt werden können. Die Werkstoffproben haben die gleiche Form und Abmessung wie die Proben für die ECT-Kurzzeitprüfung (25 mm x 100 mm). In der Prüfung werden diese – angelehnt an die BCT-Langzeitmessung – mit einer konstanten statischen Last von 25 % des gemessenen ECT-Wertes belastet. Um die Klimaschwankungen im weltweiten

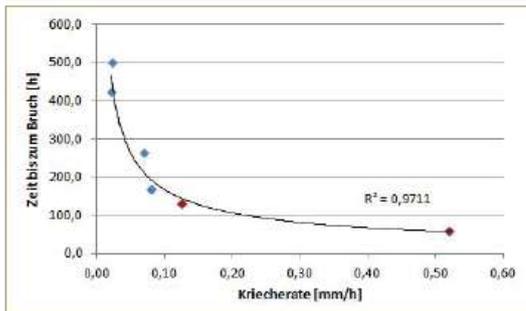


Abb. 5: Kriechraten der Schachteln (Typ FEFCO 0201) in Korrelation zur Standzeit

Fig. 5: Creep rates of the boxes (FEFCO 0201) in correlation to their lifetime

Containertransport simulieren zu können, befindet sich das Prüfgestell in einer Klimakammer. Bei dem Prüfklima handelt es sich um eine verkürzte Version des BCT-Langzeitklimas bei einer Temperatur von 23 °C (zeitlicher Fehler +/- 0,2 K) und einer wechselnden relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und 90 % (+/- 1 %).

Die neue Prüfvorrichtung

Der Aufbau der Prüfvorrichtung gliedert sich in folgende Einheiten:

- Grundgestell,
- Prüfeinheit,
- Liftstation,
- Grenzaster.

Die Prüfeinheit des Gerätes besteht aus den Probenplatten und den Trägerplatten. Auf den Probenplatten werden in der späteren Prüfung die Proben und auf den Trägerplatten die für die Prüfung benötigten Gewichte platziert. Seitlich an den Träger- und den Probenplatte sind Laschen angebracht, um diese aneinander zu koppeln (Qazi Abdul, 2012).

Die vier Prüfeinheiten, die Deckplatte und die Bodenplatte werden durch eine doppelte Säulenführung miteinander verbunden. Die einzelnen Prüfeinheiten sind zusätzlich mithilfe von Abstandswellen aneinander gekoppelt (vgl. Abb. 3, links). Der kaskadenartige Aufbau führt dazu, dass sich die Gewichte der einzelnen Prüfetagen nach unten hin aufaddieren.

Die Prüfeinheit wird von einem stabilen Grundgestell umgeben. Das Grundgestell besteht aus einer Schweißkonstruktion aus korrosionsfreien Hohlprofilen (Stahltyp 1.4301). Die Neigung der Klimakammer kann durch einschraubbare Maschinenfüße an der Unterseite der Konstruktion ausgeglichen werden. Innerhalb des Grundgestells befindet sich ein symmetrischer Seilzug. Dieser besteht aus einer Seiltrommel, einer Umlenkrolle, einem Zahnriemen und einer Antriebswelle. Angetrieben wird der Seilzug mit einem Getriebemotor mit Planetenvorschub. Durch das Anbringen der seitlichen Laschen können die einzelnen Prüfetagen mithilfe der Liftstation auseinander und zusammen gefahren werden (vgl. Abb. 3, links).

Die Verformung der Proben während des gesamten Versuches

wird über die, an jeder Prüfetage montierten, Digitalmesstaster ermittelt (vgl. Abb. 3, rechts).

Insgesamt ergeben sich folgende Grunddaten des Gestells (Qazi Abdul, 2012):

- Maße: 1060 mm x 400 mm x 400 mm,
- Leergewicht: 185 kg.

Um vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse erhalten zu können, wurde das Prüfgestell vor Beginn der Messungen in Betrieb genommen. Die Parallelität der Druckplatten ist eine wichtige Voraussetzung für die Genauigkeit der Messung von Kantenstauchwiderständen. Aufgrund dessen war es unerlässlich, die Planparallelitäten der vier Prüfetagen zu untersuchen.

Ergebnisse und Diskussion

Zu Beginn der Versuche wurden die mechanischen Eigenschaften der Packstoffe mithilfe von Basisuntersuchungen festgestellt. Zu den Basisuntersuchungen zählen beispielsweise die Biegesteifigkeit, die Berstfestigkeit, die Prüfung der nassfesten Verklebung und der Kantenstauchwiderstand (ECT-Wert).

Aufbauend auf den mechanischen Eigenschaften der angelieferten Wellpappenqualitäten wurden Langzeituntersuchungen an BCT- und ECT-Proben bei konstanter Last durchgeführt. Um den Tag-Nacht-Rhythmus der alternierenden Luftfeuchtigkeiten im weltweiten Containerversand simulieren zu können, wurde ein Wechselklima mit einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 50 % und 90 % gewählt. Aufgrund des geringen Einflusses der Temperatur auf das Kriechverhalten von Wellpappe wird diese konstant bei 23 °C gehalten.

In der Abb. 4 ist der Verlauf einer BCT-Langzeitmessung zu sehen. Die orange Linie zeigt das eingestellte Wechselklima und die blaue Linie die von den Wegaufnehmern aufgezeichnete Veränderung der Dimension des Packmittels. Mithilfe des Aufzeichnungsprogrammes werden die mittlere Kriechrate (vgl. Abb. 4, grüne Gerade) und die Standzeit des Packmittels (vgl. Abb. 4, lila Gerade) erfasst. Die mittlere Kriechrate wird nur im Bereich des sekundären Kriechens bestimmt, da in diesem Bereich die Kriechgeschwindigkeit nahezu als konstant anzusehen ist (Rösler et al., 2006).

Trägt man alle gemessenen Standzeiten der Packmittel gegen die gemessenen mittleren Kriechraten auf, ergibt sich der in der Abb. 5 dargestellte Zusammenhang.

Die Standzeiten der Verpackungen sind abhängig von den Kriechraten. Je höher die Kriechrate desto geringer ist die Zeit bis zum Bruch. Es zeigte sich, dass die gemessenen Werte innerhalb der Wellpappen stark streuen. Grund dafür sind verschiedene Faktoren wie beispielsweise die Art der Verklebung oder die Papierzusammensetzung der Wellpappenrohapiere. Auch der negative Einfluss einer nassfesten Verklebung auf die Standzeit der Verpackung kann aus der Grafik abgelesen werden. Die zwei in rot dargestellten Punkte in der Grafik stellen die zwei Wellpappensorten ohne eine nassfeste Verklebung dar.

Messungen mit der neuen Prüfvorrichtung

Nach der Modifizierung und Inbetriebnahme des neuen ECT-Gestells konnten erste Versuche durchgeführt werden. Be-

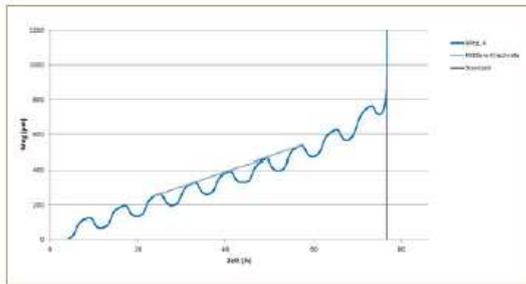


Abb. 6: ECT-Langzeitmessung

Fig. 6: ECT-long-term measurement

trachtet man den Verlauf der ECT-Langzeitmessung, so wird deutlich, dass das Kriechverhalten des Packstoffes dem des Packmittels stark ähnelt. Die Standzeiten und die mittleren Kriechraten sind aus Abb. 6 ersichtlich. Sie wurden mit dem Aufzeichnungsprogramm ermittelt.

Wird die mittlere Kriechrate gegen die Standzeit der Probe aufgetragen, zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang wie bei der Untersuchung des Packmittels. Eine hohe mittlere Kriechrate führt zu einer geringen Standzeit der Probe. Auch die Tendenz des negativen Einflusses der fehlenden nassfesten Verklebung ist in der abgebildeten Grafik zu erkennen (vgl. Abb. 7, rot dargestellte Punkte). Diese Befunde müssen durch einen erhöhten Untersuchungsumfang abschließend validiert werden.

Bis dato kann kein belastbarer, statistisch sicherer Zusammenhang zwischen den Kriechraten des BCT-Wertes und denen des ECT-Wertes hergestellt werden. Tendenziell jedoch scheint es einen Zusammenhang zwischen dem Zeitstandverhalten der ECT-Proben und dem der BCT-Proben zu geben.

Schlussfolgerung

Eine neue Versuchseinrichtung zur Ermittlung von ECT-Langzeitwerten wurde entwickelt und in Betrieb genommen. Die Versuchseinrichtung weist eine hohe Planparallelität der Prüfplatten auf, welches eine unabdingbare Voraussetzung für eine genaue Messung von Kantenstauchwiderständen ist. Durch die kompakte und modulare Bauweise können in einem kurzen Zeitraum mehrere Proben bei geringem Platzaufwand getestet werden. Aufgrund der messtechnischen Genauigkeit ist es möglich, reproduzierbare Kriechraten an ECT-Proben zu ermitteln. Werden die Standzeit der Probe und die mittlere Kriechrate des Packstoffes gegeneinander aufgetragen, ergibt sich ein ähnlicher Zusammenhang wie bei der Prüfung des Packmittels. Eine hohe mittlere Kriechrate führt zu einer geringen Standzeit. Weiterhin bestätigt sich auch der negative Einfluss einer fehlenden nassfesten Verklebung auf die Standzeiten der Proben. Die Ergebnisse verdeutlichen die Vermutung, dass es möglich ist, mithilfe des Kriechverhaltens des Packstoffes auf das Kriechverhalten des Packmittels schließen zu können. In weiteren Versuchen muss diese Vermutung durch einen erhöhten Untersuchungsumfang abschließend validiert werden. Neben den ECT-Langzeituntersuchungen

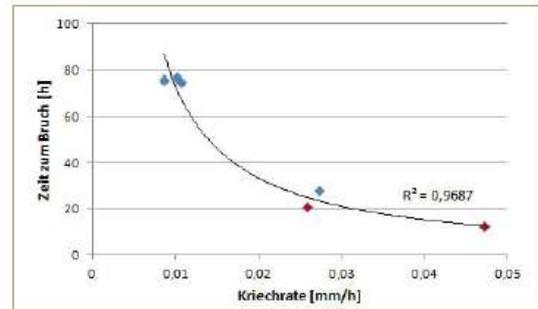


Abb. 7: Kriechraten der ECT-Proben in Korrelation zur Standzeit

Fig. 7: Creep rates of the ECT-specimens in correlation to their lifetime

im Wechselklima könnten auch papieranalytische Verfahren zur Feststellung der genauen Zusammensetzung der Papiere und deren Festigkeitswerten hilfreich sein. Die Kenntnis der Papiere könnte einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der mechanischen Eigenschaften der Wellpappe liefern.

Literatur

DIN EN ISO 204 (2009) Metallische Werkstoffe – Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung – Prüfverfahren

ABSTRACT

Predictability of the performance of corrugated boxes (FEFCO 0201) by using the long-term ECT-value

Corrugated cardboard as packaging material is one of the most important and popular packaging materials for the transport of goods. Due to its raw materials corrugated cardboard tends to creep at an increased humidity, which can ultimately lead to loss of strength. The loss of strength of the packaging can result damages to the goods being transported. The creep behaviour and the long-term sustainability of corrugated cardboard can currently only be estimated based on the so-called short-term tests or protracted long-term studies of the packages with the aid of security factors. To enable a reliable, time-saving and space-saving assessment of the creep behaviour of corrugated cardboard, the prototype of a creep rupture test apparatus on ECT-specimens was started up and optimized at Institut für BFSV of Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. To bring the measured creep rates of the specimens in a secure connection with the creep rates of the packages further investigations are necessary.

Keywords: Corrugated cardboard, long-term sustainability, creep rupture test apparatus

DIN EN ISO 12571 (2000) Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften

Läpple V, Drube B, Wittke G, Kammer C (2007) Werkstofftechnik Maschinenbau – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. Europa-Lehrmittel, Leinfelden-Echterdingen, S.66f und 642f

McKee RC, Gander JW, Wachuta JR (1963) Failure of corrugated boxes under long term loading – Summary of results as of June. Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin, USA, Project 1108-30

Qazi Abdul D (2012) Optimierung der Zeitstandprüfeinrichtung des BFSV e. V. Verfahrenstechnisches Schwerpunktprojekt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Ranz T, Lion A (2006) Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz. Heft 2/07 der Reihe Beiträge zur Materialtheorie, Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München

Reimers W (2009) Entwicklung eines Qualitätsstandards für Schwerkwellpappe unter Berücksichtigung mechanisch/klimatischer Belastungen in internationalen Lieferketten. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14836 N, Hamburg

Rösler J, Harders H, Bäker M (2006) Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. B. G. Teubner Verlag und GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2. Auflage, S. 383-407

Twede D, Selke SEM (2005) Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology. PA 17602-4967, DEStech Publications Inc., Lancaster, USA, pp. 227-487

Verband der Wellpappenindustrie e. V. (2004) Basiswissen Wellpappe – Vom Rohstoff bis zur Verpackung. Verband der Wellpappen-Industrie, Darmstadt

Wagenführ A, Scholz F (2008) Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag im Carl Hanser Verlag, Leipzig, München, S. 104f

Whitsitt WJ, McKee RC (1972) Effect of relative humidity and temperature on stacking performance. Project 2695-9, Summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Bernd Sadlowsky studierte Chemietechnik und promovierte als Verfahreningenieur auf dem Gebiet der Werkstoffe und Korrosion. Anschließend arbeitete er als Schadensanalytiker, Institutsleiter und Prokurist am Institut für Materialprüfung der TÜV Rheinland Group. Zurzeit ist er Leiter des Institutes für BFSV an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg und Geschäftsführer der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH, Lohbrügger Kirchstr. 65, 21033 Hamburg, sowie Professor für Technische Mechanik, Werkstoff- und Verpackungstechnik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg.

Prof. Dr. Jörg B. Ressel studierte Holzwirtschaft an der Universität Hamburg. Anschließend promovierte er und arbeitete unter anderem bei der Brunner Hildebrand GmbH in Hannover und war Professor an der Fachhochschule Rosenheim im Bereich Holztechnik. Zurzeit ist er Professor für Holzphysik und Mechanische Technologie des Holzes an der Universität Hamburg im Department Holzwirtschaft, Leuschnerstraße 91c, 21031 Hamburg.

Dipl.-Ing. Wolfgang Reimers studierte Produktionstechnik an der Fachhochschule Hamburg und arbeitet seitdem als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für BFSV an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.

M.Sc. Viktoria Köstner studierte Holzwirtschaft an der Universität Hamburg und ist nun externe Doktorandin der Universität Hamburg am Institut für BFSV an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.

9.4 INDIVIDUAL TEST RIG FOR MEASURING THE CREEP BEHAVIOUR OF CORRUGATED BOARD FOR PACKAGING

Stellungnahme zur Anfertigung des Manuskriptes „Individual Test Rig for Measuring the Creep Behaviour of Corrugated Board for Packaging“ veröffentlicht in der Fachzeitschrift Acta Technica Jaurinensis Vol. 10 No. 2 (2017). Autoren M. Sc. Viktoria Köstner, Prof. Dr. J. B. Ressel, Prof. Dr.-Ing. B. Sadlowsky und Prof. Dr. P. Böröcz.

Die Planung des Projektes wurde hauptsächlich von V. Köstner übernommen, wobei dies in Abstimmung mit B. Sadlowsky und J. B. Ressel erfolgte. Dabei wurde die Konstruktion der Prüfeinrichtung in einem Scientific Project eines Studenten der Verfahrenstechnik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg für die BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH durchgeführt. Die Beschaffung, der Aufbau und die Inbetriebnahme der Prüfeinrichtung, sowie die Ausführung der Versuche war Aufgabe von V. Köstner. Sie wurde dabei von Mitarbeitern der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH unterstützt. Besonders die Langzeitversuche in den Klimakammern erforderten ein hohes technisches Knowhow im Umgang und mit der Programmierung der Klimakammern. Auch die Bestückung der Klimakammern mit den Versuchseinrichtungen wurde durch Mitarbeiter der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH umgesetzt. Zudem wurde die Probenanfertigung mittels der Wellpappensäge durch den Mitarbeiter G. Borzi der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH durchgeführt. Die Auswertung der Daten der Standprüfungen und der Langzeituntersuchungen war allein die Aufgabe von V. Köstner. Dabei lieferte P. Böröcz entscheidende Anmerkungen um die Darstellung der Ergebnisse übersichtlicher und verständlicher zu gestalten. Das Verfassen der ersten Version des Manuskriptes fand durch V. Köstner statt. Bei der Überarbeitung half vor allem P. Böröcz. Seine Anmerkungen und Überarbeitungen der Literatur lieferten einen großen Beitrag. Die Übersetzung der Veröffentlichung erfolgte im Auftrag des Instituts für BFSV e.V. durch einen native speaker.

Unterschrift Betreuer 1

(Ort/ Datum)

Unterschrift Betreuer 2

(Ort/ Datum)

Individual Test Rig for Measuring the Creep Behaviour of Corrugated Board for Packaging

V. Köstner¹, JB. Ressel², B. Sadlowsky¹, P. Böröcz³

¹Institute for BFSV
Ulmenliet 20, 21033 Hamburg, Germany
Phone: +49 40 42875-6046

²University of Hamburg, Department of Wood Science
Mittelweg 177, 20148 Hamburg, Germany
Phone: +49 40 42838-0

³Széchenyi István University, Department of Logistics and Forwarding
Egyetem tér 1, 9026 Győr, Hungary
Phone: +36 96 503-400
e-mail: boroczp@sze.hu

Abstract: Corrugated board is one of the most important and most popular packaging materials worldwide for transporting goods. Due to its hygroscopic behavior, it has a tendency to creep when subjected to stress under a constant load, which can ultimately result in loss of strength, with possible damage to products. The creep behavior of corrugated board is still a largely under-researched area. This paper attempts to examine the long-term behavior of corrugated board during use more precisely than before, and presents the first step and results of the research process. For the measurement, a compact and high-precision individual test rig was developed and used, in order to reduce the side effect of coupled systems, that is, to avoid their mutual influence. This paper successfully presents results reproducible with the described test rig apparatus for determining the creep behavior of corrugated board. It will be continued to publish further results of the research in the near future.

Keywords: *corrugated board, creep behaviour, packaging material*

1. Introduction

For the EU-28, in 2013, 40 % of main packaging materials were paper-based packaging, including corrugated board as the most popular and well-known transport packaging [1]. Thanks to the special construction of corrugated board relatively high strength features can be achieved, coupled with low weight. The only Achilles tendon or disadvantage of corrugated board is its hygroscopic behavior. If corrugated board packaging encounter with high relative humidity (RH), it loses up to 50 % of its strength [2-5].

Various international standards (FEFCO, ISO, ASTM, TAPPI) use testing practices to measure the mechanical characteristics of paperboard, but these are mostly limited to short-term measurements aimed at assessing compression strength [6-9]. Historically, the corrugated board industry has established the nature and scope of compression strength measurements. Experts and researchers believe that measurement results derived from box compression test (BCT) allow them to evaluate the compressive behavior of boxes. However, it needs to be noted here that compression strength measurements were developed primarily for quality control purposes. Furthermore, large production volumes do not allow any of the test methods to be applied for a relatively long duration.

The current standards and guidelines do not include a quality standard that would take this type of long-term load into account. Furthermore, it is difficult to give an appropriate estimate of the ability of corrugated board to cope with in-transit stress. In practice, therefore, safety factors are used to take stresses such as high RH and transport loads into account. This can lead to significant overpacking, and consequently a waste of resources. However, if the product-package system is under designed, that can result in packaging failure with a possible risk of product damage [10-11]. T. Trost and J. Alfthan published in 2016 the current state of the scientific knowledge about the standards for optimizing corrugated board packaging for exporting industry. There they illustrate the lack of information in the areas of the effects of creep and varying climate conditions [12].

Although previous studies have been done on the mechanical behaviors of these packaging structures under static compression [13-16], they mainly focused on the mechanical behaviors of a corrugated board box itself. Other papers presented results and brief reviews of designing and modeling the stackability of cardboard boxes using a finite element method (FEM) [17-18]. The results of these tests can be applied as input data for decision support models and processes aimed at selecting the right protective packaging system [19]. However, it is well known that the long-term distribution environment and storage can affect the real strength of packaging, especially in the case of corrugated paper packaging [20].

The aim of this paper is to develop a new test rig for the examination of creep behavior of corrugated board on edge crush test (ECT) specimens for laboratory use to better exploit the material's potential. The long-term strategy of the experimental research is to create a guideline for packaging producers and engineers of corrugated board, firstly to prevent overdesigning and secondly to avoid product damage due to failure of the paperboard packaging.

2. Background and Methods

In 1963, McKee established a connection between the ECT value, bending stiffness (BS) and BCT value of corrugated board [21]. The result of this research led to the McKee formula. Recently, this formula is widely used to calculate the BCT value of packaging made of single-walled corrugated board from its ECT value and BS [21-23]. Based on the assumptions of McKee, research into a possible correlation between long-term ECT and long-term BCT values was carried out at the Institute for BFSV at the Hamburg University of Applied Sciences.

As a result of the research project, called "Development of Test Standards relating to the creep Behavior of heavy-duty Corrugated Board for determining the Performance of Boxes manufactured therefrom" (DLR project no. 01FS10018), a creep test rig was designed to determine creep rates in specimens for edge crush resistance (ECT specimen: 25x100 mm). Figure 1 shows the schematic representation of the creep test rig with dimensions of 1060x400x400 mm.

To observe the edge crush resistance and creep behavior of corrugated board the test rig was designed with full consideration of the requirements of ISO standards such as ISO 3037:2013 and ISO 204:2009. These standards specify methods for uninterrupted and interrupted creep tests of metallic materials and the unwaxed edge method for determining the edgewise crush resistance of corrugated board. The basic frame 1 includes four test units 2-5, for simultaneously testing four ECT specimens; this can be seen in Figure 1. The test unit consists of a mounting plate 6 and a specimen plate 7. The test specimens 8 sit on the specimen plates during testing. The weights 9 required for the test are arranged on the mounting plates. Digital measuring sensors 10 are mounted on each test unit for measuring displacement. The lift station 11 and the motor 12 move the test units up and down.

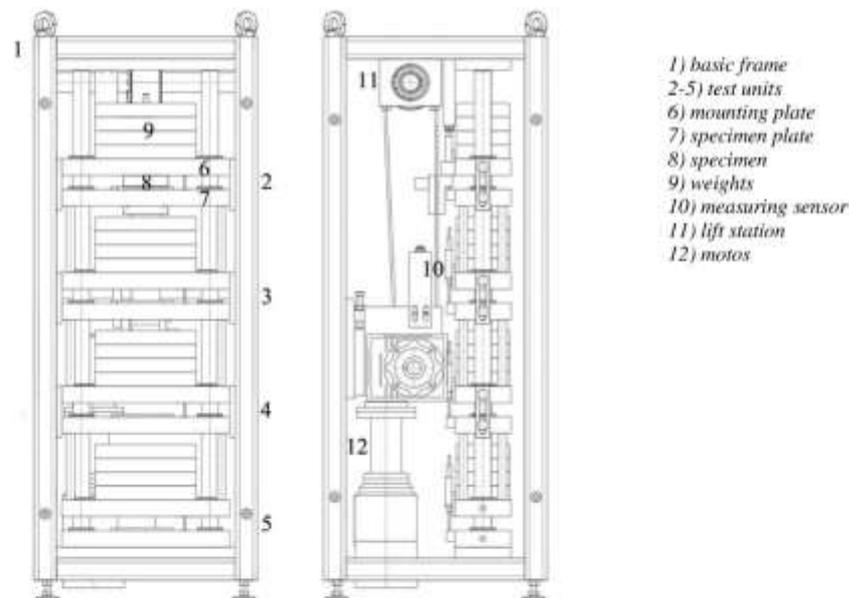


Figure 1. Stacked test rig

Advantages and disadvantages became clear when using the test rig. The cascade-like construction of the test rig makes it possible to test four specimens at a time. However, due to the combined weights of individual test units it is seldom possible to use the first and fourth level. The construction and size of the test unit severely restrict the dimension

of test specimen. In addition, no more than two displacement transducers can be attached per test level. It is also impossible to rule out an influence exerted by the failure of a specimen and transmission of any vibrations associated with this to the other specimens.

3. Requirements of a new test rig

When developing the individual test rig for laboratory use, two areas should be concentrated on: the construction of the test rig and its operating principle. The aim of this research is to ensure the accuracy and reproducibility of the test. The individual test rig has been designed for laboratory use. Small dimensions and a low net weight are essential for ensuring that the rig can be handled manually by one person. At the same time, it is necessary to adhere to the required load range: the minimum load on the specimen is 10 kg, and the maximum is 120 kg. The individual test rig must enable highly accurate measurements. Due to its construction and the high positioning accuracy required the test rig must be designed in such a way that the specimen is loaded in parallel. It is essential that the weights be mounted on the individual test rig rigidly and without any play to prevent uneven loading.

3.1. Individual test rig

Figure 2 illustrates the schematic representation of the individual test rig, without additional weights. The weight and dimensions of the individual test rig are 40 kg and 315x315x680 mm. The test setup essentially consists of two plates precisely parallel in their planes, which can be moved toward each other by means of four guide columns. The four guide columns, which are supported on linear ball bushing bearings, allow the weights to be mounted rigidly and without play. They also ensure the parallel loading of the specimen.

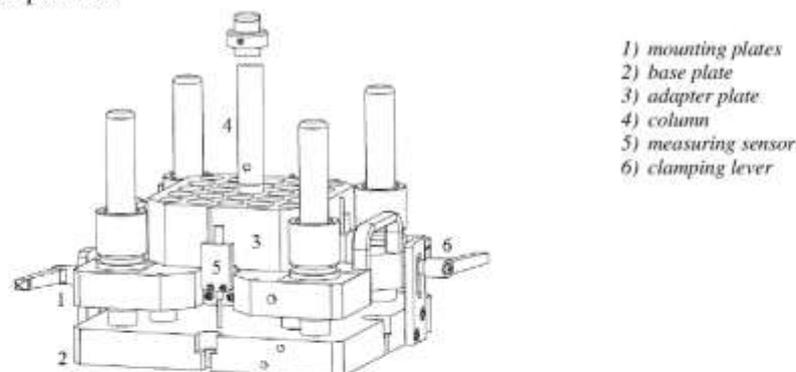


Figure 2. Individual test rig

When starting the test, the upper plates, known as the mounting plates 1, are raised and fixed in place by means of the corresponding clamping lever 6. The ECT specimen is placed centrally in the test chamber between the base plate 2 and the mounting plate. After carefully releasing the clamping lever, the mounting plate is slowly lowered onto the specimen. The weights can be mounted on the adapter plate 3 via a column 4. The special setup ensures the safe and stable placement of the weights. Digital measuring

sensors 5 are mounted on all four sides of the test rig to record the changes in distance during the measurement. All parts of the individual test rig are made of stainless steel to prevent corrosion.

3.2. Commissioning

Commissioning of the individual test rig involves the following three areas:

- Measurement of parallelism,
- Determination of the dead load,
- Comparative tests.

The parallelism of the test plates is of extreme importance for accurately measuring creep rates in ECT specimens. It is essential to check parallelism, especially when the aim is to develop a new test method for generating comparable and reproducible creep rates in ECT specimens. Gauge blocks were used to determine the parallelism of the test plates at eight measuring points. The results of the parallelism measurement showed that the displacement on all points is 20.01 millimeters. Thus, there is no difference in the parallelism of the test plates.

Determining the dead load of the specimen is essential for designing the test loads correctly. In this case, a previously calibrated load cell was placed between the two test plates. The load cell then recorded the arising load. The result of the measurement revealed that the dead load of the specimen was 20 kg; twice the required minimum load of 10 kg.

4. Tests and results

Comparative tests were conducted to assess the accuracy of the test rig. Creep tests were performed on ECT specimens using both test rigs. The subject of the observation was wet-strength, triple-wall corrugated board (DIN 55468-1:2015-06 2.96 heavy-duty board). The examinations were carried out in a climate chamber, simulating an eight-hour cyclical climate with a constant temperature of 23 ± 2 °C and RH rise and fall cycle stages to 50 ± 5 and 90 ± 5 % every three hours (Figure 3 blue graph). Figure 3 illustrates the result of a creep measurement of the individual test rig. The long-term ECT values diagrammed as a function of time and the creep deformation rate.

The red graph forms the creep deformation of the sample. Due to the superposition of the swelling behavior and the creep caused by the pressure load, creep deformation increases in the drying phase and decreases in the penetration phase [24]. The mean creep rate (0.006 mm/h) represents creep deformation (height reduction) as a function of time in the secondary phase of the creep process. At the time of its failure (134 h), the specimen suffered a significant loss of strength and practically collapsed. The criterion for specimen failure was a height reduction of more than 0.5 mm in 30 seconds. The experimental results of all measurements are shown in Figure 4.

V. Köstner et al. – *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 10, No. 2, pp. 148-156, 2017

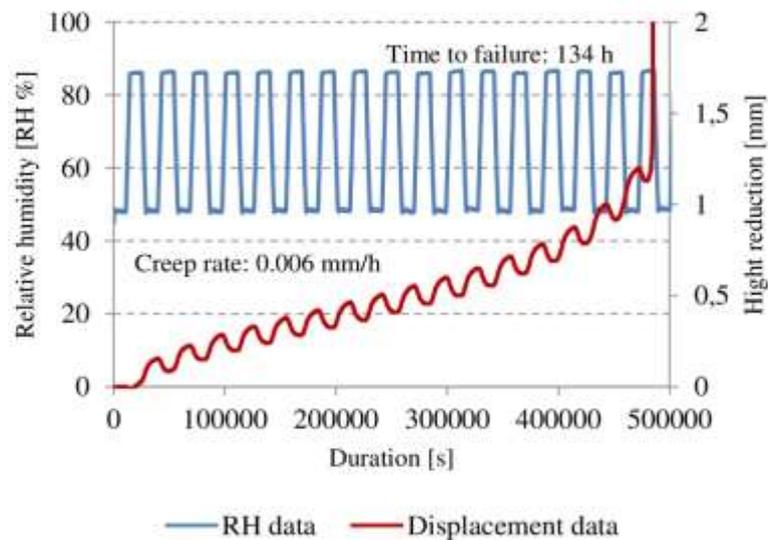


Figure 3. ECT long-term measurement tested with the individual frame

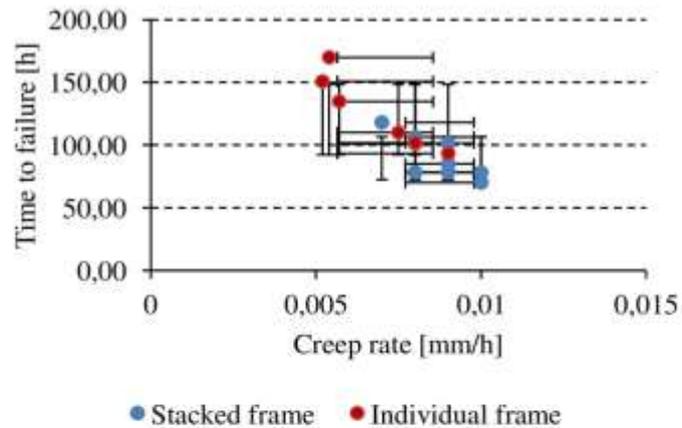


Figure 4. Results of the comparative measurements

Observing the results, it is noticeable that the creep rates and lifetimes generated by the two test rigs differ, considering the variances of the results. Although the average creep rates of both test rigs - stacked frame 0.0088 ± 0.001 mm/h; individual frame 0.0071 ± 0.0014 - seem to be similar, the deviation between the time to failure results of both test rigs - stacked frame 89.5 ± 17.04 h; individual frame 120.3 ± 28.05 h - is significant high. To what extent the deviation can follow from the natural fluctuation of the properties of

corrugated board is currently unknown. Additionally, due to the novelty of the measurement it is not possible to assess measurement errors based on the new type of measurement method for creep rates on ECT specimens. Further tests are intended to examine the extent to which external factors influence the values measured.

Considering the results of both test rigs together despite the deviation a linear relationship between the creep rate and the time to failure can be established (Figure 5). The coefficient of determination confirms the assumption. The higher the creep rate, the lower the time to failure.

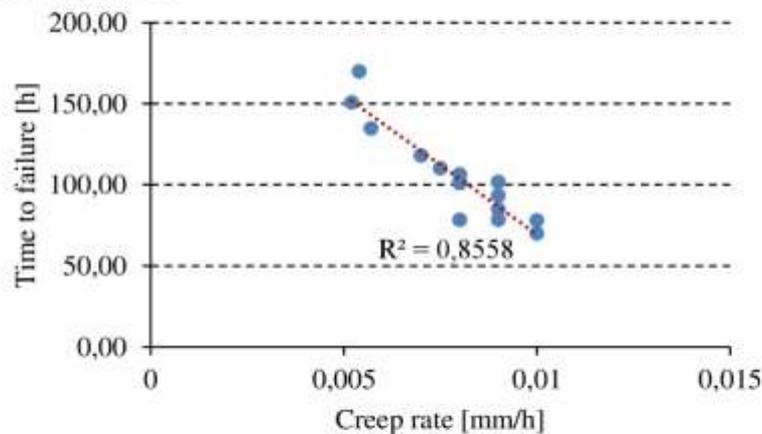


Figure 5. Results of both test rigs

5. Limitations

The individual test rig enables the examination of creep rates in ECT specimens in laboratories and can be controlled by one person due to its compact design and simple handling and operation. The special setup enables the examination of specimens of different heights and geometries. A disadvantage, however, is that due to the superstructures the minimum load on the specimen is 20 kg. Also, only one specimen can be tested at a time. The digital measuring sensor enables the recording of measured values up to 5 μm . The creep rate was unknown when the test rig was designed. While a creep rate of 8 μm can be mapped with the digital measuring sensor, it is not possible to assess the measurement error which may arise thus. In further tests, it will be necessary to examine the measurement error and the possible impact of external factors on the result. Readers of this paper, therefore, are advised to exercise caution when making direct comparisons with results from other research.

6. Conclusion and outlook

Based on the results of this study the following conclusions can be drawn. Using the newly developed, high-precision individual test rig reproducible results can be obtained. Comparison with the stacked test rig gave different creep rates and lifetimes, considering

the variances of the results. This variance should be investigated in more detail during further tests. In addition, as a next step, our research will focus on those factors, which can directly influence the measurement.

A new research project deals with the calculation of climate-dependent creep behavior with speed-dependent short-term tests. Thereby, various long-term tests concerning the BCT, BS and ECT will be performed. The results will be transmitted to a computer-aided calculation model under finite elements method (FEM). Subsequently the results of the FEM will be verified by short- and long-term test. Finally, it should become possible to use time- and money-saving short-term tests to estimate the long-term behavior of corrugated board. Hence, in the future, we might be able to utilize the potential of this packaging material better, prevent transport damage and protect the environment.

References

- [1] EUROSTAT, European Statistical Database 2013, Development of the share of main packaging material, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Development_of_the_share_of_main_packaging_materials_EU-27_2005-13.png [accessed 11 Jan 2017]
- [2] Dimitrov K, Heydenrych M. Relationship between the ECT-strength of corrugated board and the compression strength of liner and fluting medium papers, *Southern Forests* 2009; 71 (3): 227-233. DOI:10.2989/SF.2009.71.3.7.919
- [3] Niskanen K. *Mechanics of Paper Products*. Berlin/Boston, Walter De Gruyter, 2012.
- [4] Twede D, Selke S. *Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology*, DEStech Publications, Inc., 2005.
- [5] Whitsitt WJ, McKee RC. Effect of relative humidity and temperature on stacking performance. Project 2695-9, Summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., 1972.
- [6] Test Method TAPPI T804 (om-12): Compression test of fiberboard shipping containers, 2012.
- [7] ASTM D642 – 00: Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components, and Unit Loads, 2010.
- [8] FEFCO TM 50, FEFCO Testing Method Determination of the Compression Resistance of corrugated fibreboard containers, 1997.
- [9] ISO 12048 - Complete, filled transport packages – Compression and stacking tests using a compression tester, 1994.
- [10] Hiller B. Predicting the long-term mechanical behaviour of corrugated cardboard packaging based on speed rate controlled short term tests. *Proceedings of Progress in Paper Physics Seminar Conference*, pp. 65-70. Darmstadt, 2016.
- [11] Sadlowsky B., Ressel J. B., Reimers W., Köstner V.: Vorhersagbarkeit des Leistungsvermögens von Schachteln aus Wellpappe (FEFCO 0201) mithilfe des ECT-Langzeitwertes. *Holztechnologie* (in English: Predictability of the Performance of Corrugated Boxes (FEFCO 0201) by using the long-term ECT-Value), Nr.55, S. 30-35, 2014.
- [12] Trost T., Alfthan J.: Standards for optimizing corrugated board packaging for exporting industry – A feasibility study. *Innventia Report No.: 730*, January 2016.

- [13] Aboure, Z, Talbi N, Allaoui S, and Benzeggagh M: Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modelling. *Composite Structures*, Vol. 63, No. 1, pp. 53-62, 2004. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00131-4
- [14] Sek, M. A, Kirkpatrick J: Prediction of the cushioning properties of corrugated fibreboard from static and quasi-dynamic compression data. *Packaging Technology and Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 87-94, 1997. DOI: 10.102/(SICI)1099-1522(199703/04)10:2<87::AID-PTS389>3.0.CO;2-L
- [15] Marcondes J. A: Effect of load history on the performance of corrugated fibreboard boxes. *Packaging technology and science*, Vol. 5, No. 4, pp. 179-187, 1992. DOI: 10.1002/pts.2770050403
- [16] Böröcz P. Measurement and Analysis of Deformation Shapes on Corrugated Cardboard Logistical Boxes under Static and Dynamic Compression, *Acta Technica Jaurinensis* 2015, (8)4, 320-329. DOI:10.14513/actatechjaur.v8.n4.389
- [17] Talbi N, Batti A, Ayad R, Guo Y. An analytical homogenization model for finite element modelling of corrugated cardboard. *Composite Structures* 2009, 88(2), 280-289, 2009. DOI:10.1016/j.compstruct.2008.04.008
- [18] Biancolini ME, Brutti C, Porziani S. Corrugated board containers design method. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering* 2010, 3(2), 143-163, 2010. DOI: 10.1155/2014/654012
- [19] Mojzes Á, Böröcz P. Decision Support Model to Select Cushioning Material for Dynamics Hazards During Transportation. *Acta Technica Jaurinensis* 2015, 8(2), 188-200. DOI:10.14513/actatechjaur.v8.n2.369
- [20] Böröcz P. Analysing the functions and expenses of logistics packaging systems. *Proceedings of FIKUSZ 2009: Symposium for young researchers*. Budapest, Hungary, 2009, Budapest Tech, 2009. pp. 29-39.
- [21] McKee R.C., Gander J.W., Wachuta J.R.: Compression strength formula for corrugated boxes. *Paperboard Packaging* 1963, 48 (8), 149-159.
- [22] Whitsitt, W. J.; Gander, J. W.; McKee, R. C.: Stacking behavior of boxes and corrugated board - A Summary Report of the Technical Division of the FKBI Inc., Project 1108-30, 12.04.1967
- [23] Whitsitt, W. J.; Gander, J. W.; McKee, R. C.: Effect of box dimensions and combined board creep life on box creep life - A Summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., Project 2695-2, 15.11.1968
- [24] Wagenführ A, Scholz F. *Taschenbuch der Holztechnik* (in English: Paperback of wood technology), Carl Hanser Verlag, München, 2008.

9.5 MEASURING THE CREEP BEHAVIOUR OF CORRUGATED BOARD BY CASACDE AND INDIVIDUAL TEST RIG

Stellungnahme zur Anfertigung des Manuskriptes „Influencing factors on the creep rupture behaviour of corrugated board“ zur Veröffentlichung angenommen durch die Fachzeitschrift Journal of Applied Packaging Research (2018) (eingereicht am 28.08.2017). Autoren M. Sc. Viktoria Köstner, Prof. Dr. J. B. Ressel, Prof. Dr.-Ing. B. Sadlowsky und Prof. Dr. P. Böröcz.

Die Planung des Projektes wurde hauptsächlich von V. Köstner übernommen, wobei dies in Abstimmung mit B. Sadlowsky und J. B. Ressel erfolgte. Die Ausführung der Versuche war Aufgabe von V. Köstner. Sie wurde dabei von Mitarbeitern der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH unterstützt. Besonders die Langzeitversuche in den Klimakammern erforderten ein hohes technisches Knowhow im Umgang und mit der Programmierung der Klimakammern. Auch die Bestückung der Klimakammern mit den Versuchseinrichtungen wurde durch Mitarbeiter der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH umgesetzt. Zudem wurde die Probenanfertigung mittels der Wellpappensäge durch den Mitarbeiter G. Borzi der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH durchgeführt. Die Auswertung der Daten der Standprüfungen und der Langzeituntersuchungen war allein die Aufgabe von V. Köstner. P. Böröcz gab entscheidende Anmerkungen zur übersichtlicheren und verständlicheren Darstellung der Ergebnisse. Das Manuskript wurde von V. Köstner erstellt. Bei der Überarbeitung halfen P. Böröcz, J. B. Ressel und B. Sadlowsky. Die Übersetzung des Manuskriptes erfolgte im Auftrag des Instituts für BFSV e.V. durch einen native speaker.

Unterschrift Betreuer 1

(Ort/ Datum)

Unterschrift Betreuer 2

(Ort/ Datum)

Measuring the Creep Behaviour of Corrugated Board by Cascade and Individual Test Rig

***Viktoria Köstner**
University of Hamburg

Jörg Ressel
University of Hamburg

Bernd Sadlowsky
Institute for BFSV

Péter Böröcz
Széchenyi István Universtiy

ABSTRACT

In this paper static and quasi-static test are conducted to determine the creep behaviour of corrugated board. This study shows a possible way to take the real loads occurring in container shipping into account. The aim of the measurements is to develop a new test option, which is in keeping with the loads occurring. Two test rigs have been developed and constructed for this purpose. These make it possible to measure the creep of corrugated board extremely precisely over a longer period in the aspect of climate chamber size and relative humidity (RH) distribution in the chamber. To increase the accuracy of measurement the analysis also covers those external and internal factors, which can influence the measurement of creep rates. The results show that these influences the accuracy of creep rate measurements to a significant extent, and considerable measuring errors can occur if these are disregarded. The final aim of this study in the future is to present a climate-dependent creep behaviour model for corrugated board using speed-dependent and relatively shorter tests by cascade and individual test rigs.

KEY WORDS

Corrugated board, creep behaviour, packaging, packaging material

***Viktoria Köstner**
Corresponding Author
koestner@bfsv.de

1.0 INTRODUCTION

Corrugated packaging and boxes are used as a well-known packaging to store, protect and transport goods such as raw materials, semi-finished products and finished products, respectively. According to a latest report on corrugated packaging by Smithers Pira the corrugated board consumption value will expand to 269 billion USD dollar in 2021 that means a consume of 160 million tonnes of board in that year [1]. Of course, the largest share of global packaging is accounted for paper and board packaging equating to about 40% of total market, growing at an annual rate of around 4% [2].

Corrugated boxes made from board are usually placed in a stack during circumstances such as transport and storage, causing constant compressive loads for long time. These static compressive loads can cause significant and different type of deformation on boxes [3]. The reason of why this creep deformation is important is it can cause box failure at any applied load. This time can range from less than one hour to decades, with lower applied loads resulting in slower deformation and longer box lifetimes (time to failure from initial loading) [4]. Therefore, investigating and better understanding of corrugated board packaging performance for packaging engineers during real conditions such as long-term storage and transportation are necessary.

In the latest decades, dynamic tests (with standard atmospheric conditions) are usually used to determine the performance of corrugated boxes. Many packaging standard such as ASTM, ISTA and ISO uses these methods. In this case, the loads during shipping are compensated by using safety factors

[5] and logically are not suitable to determine the creep behaviour. The absence of international standards and guidelines is leading to an ever-increasing drive to investigate the long-term behaviour of corrugated board that occurs in supply chain. The aim of this study is to present new test rigs and perform tests showing better accuracy as former researches showed. These two test rigs (one for ECT and one for BCT test) were developed and constructed for this purpose by BFSV (Beratung- Forschung- Systemplanung- Verpackung BFSV e.V.) (Fig. 1).

2.0 GENERAL INFORMATION

2.1 Corrugated board and humidity

As a result of its unusual structure, corrugated board possesses high strength at low weight [6]. Due to the hygroscopic behaviour of the fibres, humidity has a serious effect on these strength properties [7] [8]. If the relative humidity (RH) increases from 50% to 90%, the BCT strength (BCT: box compression test) decreases by up to 60%. Other strengths, such as the ECT strength (ECT: edge crush test), also lose 55-60% of their strength [9] [10] [11] [12] [13]. Here has to be mentioned that probable BCT creep response for a series of samples can be inferred from ECT creep measurements [14]. In international shipping, there is also a further load on corrugated board due to stacking packaging boxes that are made from it. With high relative humidity and an additional load over a longer period of exposure, the corrugated board starts to creep [15] [16]. Due to the relatively few research project in the topic of creep behaviour of corrugated board

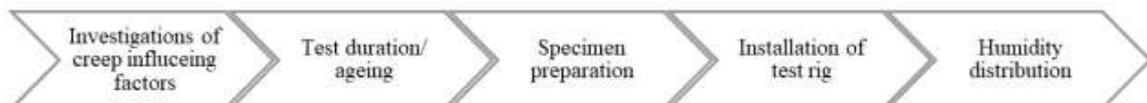


Fig. 1: Overview of the conducted investigations

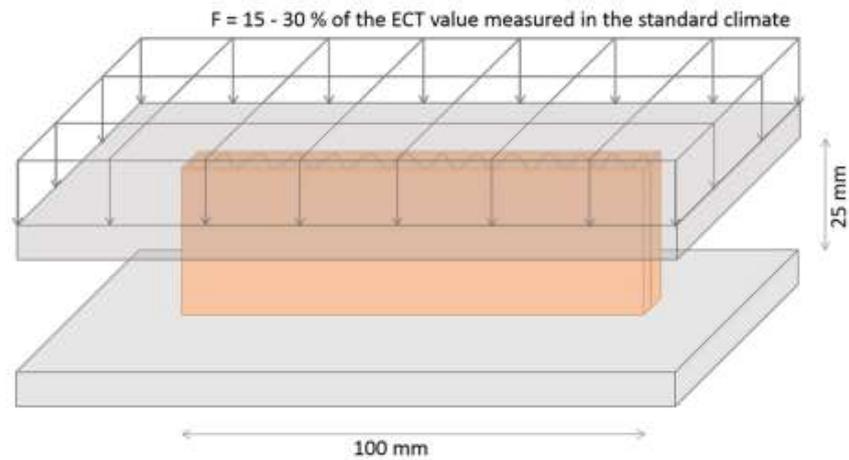


Fig. 2: ECT creep rupture test (with 30% of ECT value measured in standard climate)

[17] that is why BFSV has developed and commissioned two new test rigs that can be used to investigate the creep behaviour of corrugated board.

2.2 ECT test rigs

Both new test rigs were modelled on test facilities designed for creep rupture tests on the creep behaviour of metallic materials and the test rig for measuring the ECT strength of corrugated board specimens [18]. When testing the ECT strength, a standard 25x100 mm specimen was loaded perpendicular to the corrugations of the corrugated board (Fig. 2).

Both test rigs, the cascade test rig (Fig. 3,4 left, described by Sadlowsky et al. [19]) and also the individual test rig (Fig. 3,4 right, described by Köstner et al. [20]), test according to the same principle. In this case, the specimen is loaded perpendicular to the corrugations with a constant load of 25% of the maximum ECT value, as this corresponds to the safety factor most commonly used in practice. During the test, the test apparatus is located in a climate chamber with a defined eight-hour climate cycle (test starts at 50% RH for approx. 1.5 hours

until the change to 90% RH, temperature constant at 23 °C). The only difference between the two test rigs is that four specimens can be tested simultaneously with the cascade test rig whereas the individual test rig was developed for examining one specimen in the laboratory environment [19] [20].

2.3 Long-term measurement

Fig. 5 below shows the course of a long-term measurement by ECT specimens where the blue line represents the climate prevailing in the climate chamber. The climate alternates between a relative humidity of 50% and 88% at a constant temperature of 23 °C. The red line reflects the deformation behaviour of the ECT specimen over the test period. Superposition of the swelling behaviour and the creep caused by the compressive load leads to the creep deformation increasing in the drying phase and decreasing in the moisture penetration phase. At the end of a test, the lifetime [h] or the time to failure of the specimen and the mean creep rate [mm/h] are noted. The mean creep rate represents the increase in creep deformation per unit of time



Fig. 3: Test rigs for measuring the creep behaviour of corrugated board specimens (left: cascade test rig; right: individual test rig)

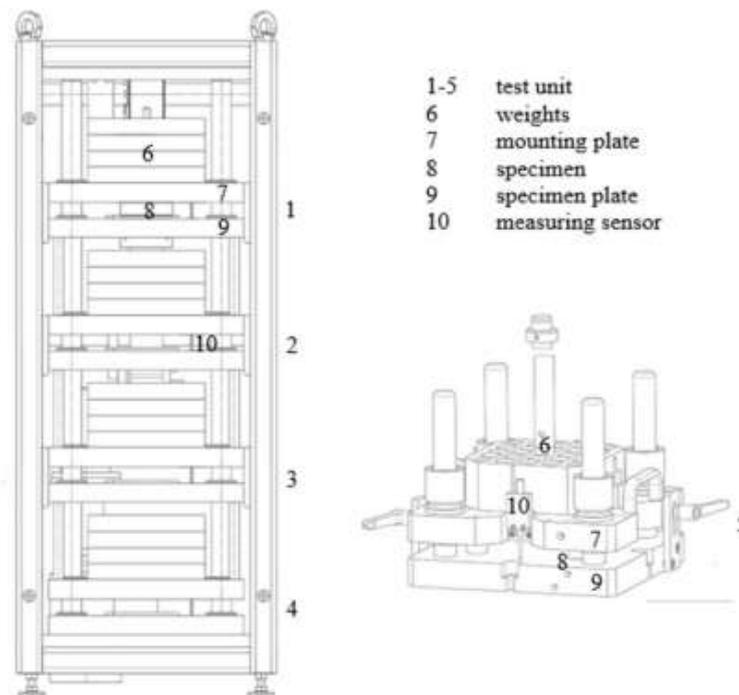


Fig. 4: Schematic representation of both test rigs (left: cascade test rig; right: individual test rig)

in the secondary phase of the creep process. The lifetime indicates the time from the start of the test to failure of the specimen. The specimen loses strength significantly at the time of failure (Fig. 6). The mean creep rate and the lifetime serve as comparative values for assessment of the specimen.

3.0 FACTORS ON CREEP

Examining a possible influence that disruptive factors can have on the investigation results of measuring the ECT strength in the long-term test (ECT long-term measurement) plays a decisive role in the development of the new test methods. It is necessary in this case to differentiate between factors that can and cannot be influenced.

3.1 Cannot be influenced factors

Factors that cannot be influenced, such as production parameters, environmental conditions and material parameters, cannot be identified by an in-depth visual inspection of the specimens before the test begins. They are unavoidable but have a strong influence on the test results [21].

Production parameters, which vary from one corrugated board machine to the next, have a serious influence on the strength properties of the corrugated board [8] [14]. The ECT and BCT in particular are affected. Production influences, for example, are fishtailing (crooked edge gluing), gaps (areas without glue) and localised crushing [22] [23].

The climate, particularly the relative humidity in this case, is one of the main environmental conditions. The fibres in the corrugated board papers are hydrophilic and adapt to the particular environmental humidity with the mechanical strengths decreasing at high humidity [24] [25]. In humidifying and dehumidifying phases, the superposition of irreversible swelling and shrinkage effects leads to structural transformations in the fibre network which strongly influence the strength properties of corrugated board [26] [27].

Material parameters, for example, are ageing of the material, local differences in fibre density and fibre strengths. Above all, fluctuations in the fibre strengths and the strength of the fibre-fibre bonds have a serious influence on the creep behaviour of the corrugated board and the behaviour of the material in the alternating climate. The behaviour of the material is also highly dependent on the proportion of recycled fibres. If the proportion of recycled fibres increases, then the fatigue strength of packages made of corrugated board decreases.

3.2 Can be influenced factors

Detailed investigations of the test sequence and test setup can determine and thus prevent factors that can be influenced. Factors that can be influenced include the following points: specimen preparation, the test setup or test rig, humidity distribution, and the effect of external mechanical loads.

Specimen preparation has a serious effect on the creep behaviour. First of all, cutting of the loaded edges of ECT specimens must be exactly parallel so as not to adversely affect the results. In this case, the condition of the saw blade and the number of specimens already sawn with the saw blade play a significant role. A further important point is conditioning of the specimen material in standard climate conditions (23°C/50% RH) before starting the test [28].

Both test rigs for observing the ECT long-term value are developments by the BFSV. It is imperative to examine the test rigs in detail when commissioning in order to generate reproducible and comparable results. When the test rigs were started up, it was found that reproducible results could only be achieved after several series of tests and conversion measures [19] [20]. The plane parallelism of the test plates, for example, was measured precisely since this has a significant influence on the measurement results.

Creep tests are carried out in climate chambers in which a standard, humid or alternating climate can be adjusted. There may be variations in the distribution of

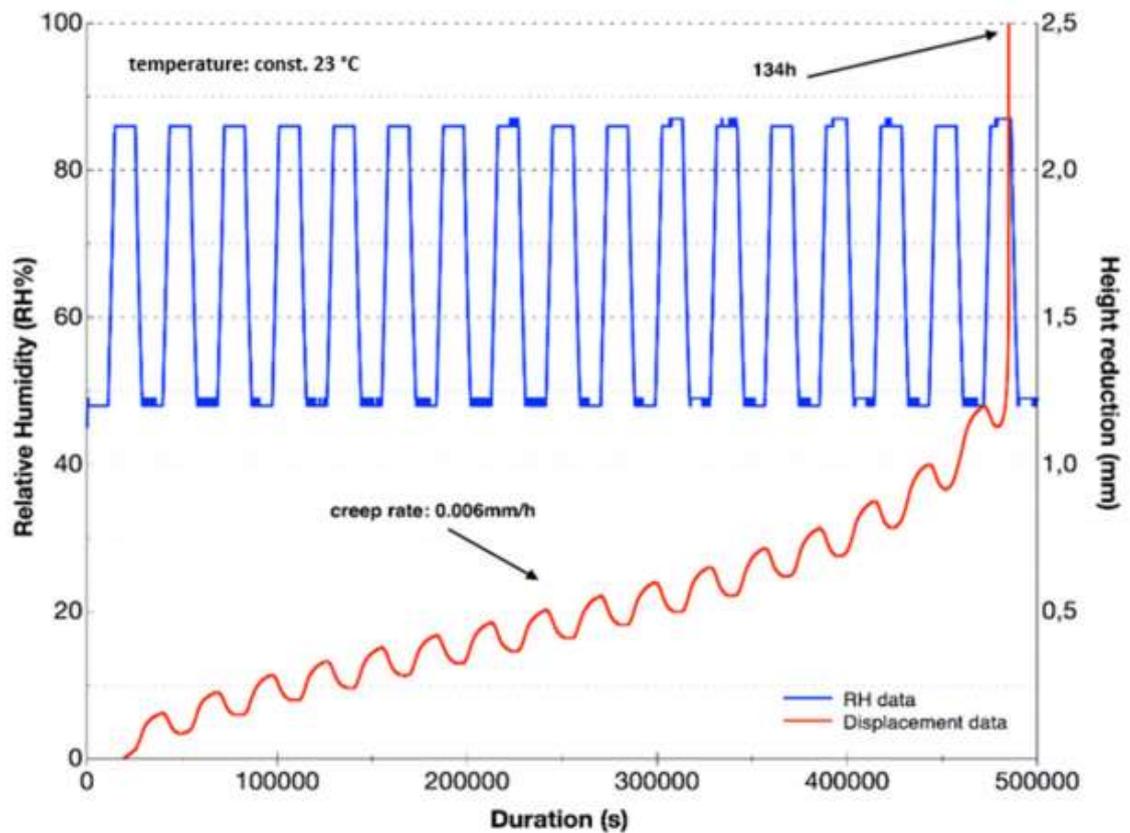


Fig. 5: Creep behaviour of a corrugated board specimen in alternating climate at constant temperature 23 °C

humidity and temperature due to using different types of climate chambers and chamber sizes. In addition, the geometry of the test rigs and their arrangement inside the climate chambers can also exert an influence of the measurement of creep rates.

External mechanical impacts are another factor that can be influenced. Vibrations and oscillations due to other power units running in the vicinity can act on the chamber and thus on the test rigs via the floor and have an adverse effect on the test.

4.0 RESULTS

After a detailed investigation of possible influencing factors on the measurement of creep processes in ECT specimens, four factors have proved to be particularly important: the test duration and thus ageing, sample preparation, installation of the two test rigs and investigation of the humidity distribution in the climate chamber.

4.1 Test duration and ageing

Specimens of two different wet-strength corrugated boards are examined at intervals of nine months (Fig. 7 - Test 1) and 24 months (Fig. 7 - Test



Fig. 6: Corrugated board specimen after creep test in altering climate at constant temperature 23 °C

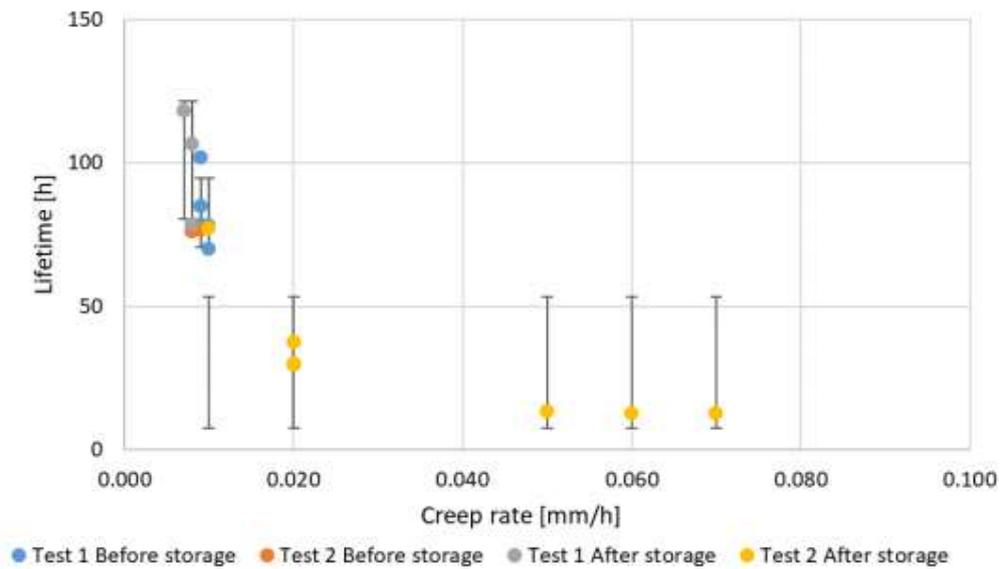


Fig. 7: Ageing influences on the long-term behaviour of ECT specimens (cascade test rig)

2), the specimens being stored in normal climate conditions for corrugated board 23 °C/50% RH for the entire storage period. The storage period and storage conditions of the corrugated board at the manufacturer's premises before delivery to the BFSV laboratory are not known. All other test conditions are kept constant. The results of the tests are illustrated in Fig. 7.

Fig. 8 shows that the storage period and the unknown climatic conditions during this period between manufacture of the corrugated board and testing have an effect on the creep behaviour of ECT specimens. At the beginning of both tests, the corrugated boards have similar creep rates but after 24 months' storage the creep rate is four times as high as before storage, while the lifetime has more than halved (Fig. 8).

When looking at the standard deviations in Fig. 7, it becomes clear that the values spread widely above all after 24 months of storage. The standard deviation of the lifetime in Test 2 is 0.4 hours before the storage period and 22.9 hours after the storage period. If the standard deviation of the

nine-month test is considered, it becomes clear that the measured value can also be due to the natural variability of the corrugated board. Thus, storage of up to nine months could take place without exerting any adverse effects on the creep behaviour. Storage beyond this time would need to be investigated further but it is clear that storage of two years has an adverse effect on the creep behaviour. The extent of this adverse effect would have to be substantiated by investigating further corrugated boards. All in all, it is important when determining creep rates to avoid preceding long storage times of the material to be investigated.

4.2 Specimen preparation

Consistent specimen preparation is very important to ensure virtually constant quality of the specimens. All specimens are conditioned at 23 °C/50% RH before starting the test. Cutting of the specimens is carried out by only one person on the same circular saw with the same saw blade. In addition, all specimens are accurately measured before the test and the corrugations are examined for integrity.

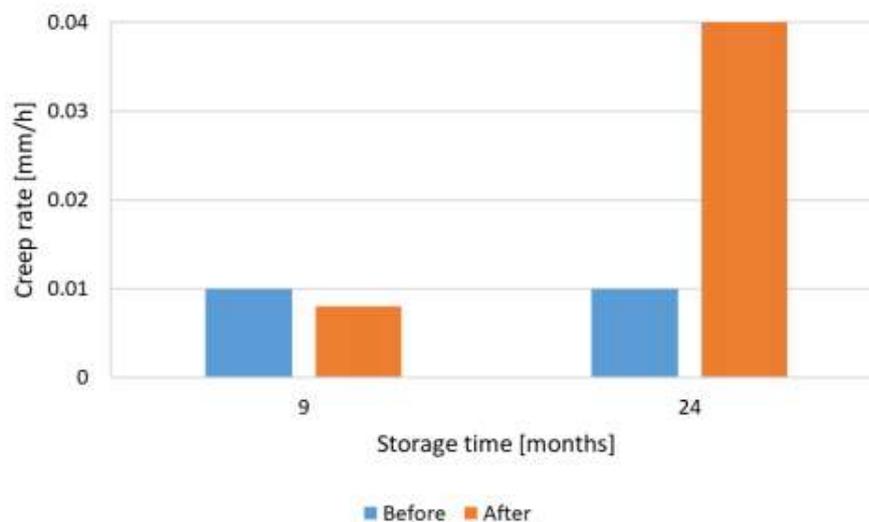


Fig. 8: Ageing influence on the creep rate of ECT specimens (cascade test rig) ($n = 10$)

Thus, any influence exerted by specimen preparation on the result of the investigation is marginal. The specifications of corrugated board specimens to the tests are the follows:

- Flute combination A-B-C
- Thickness 13.1 mm
- Basis weight 1789 g/m²
- Edge-Crush-Test 24.52 kN/m
- Puncture resistance 30.6 J
- Bursting strength 4704 kPa
- Wet bursting strength 1415 kPa
- Water resistance: no separation of layers after 24 h in water

4.3 Installation of the test rig

Before starting the test, a spirit level is used to align the test rigs horizontally and vertically. The plane parallelism of the test plates in particular has a serious effect on the ECT value. For this reason, the plane parallelism of both test rigs has been investigated in several studies that have already

been published. Any adverse effect due to the plane parallelism of the test plates of both test facilities on the investigation results was classified as low.

Thus, in theory the influence of the test setup and the test rig (cascade or individual test rig) can be regarded as low. Several test series will be carried out to support this statement. In this case, both test fixtures will be arranged next to each other in the 1 m³ chamber of the BFSV in such a way that the test level of the individual test rig is located at almost the same height as the specimen to be tested in the cascade test rig. A wet-strength, triple wall corrugated board will be tested in an eight-hour alternating climate. Fig. 9 shows the results of one test series.

Fig. 9 shows that in some cases measured values of the individual test rig are higher than those of the cascade test rig. The mean creep rate in the individual test rig's results is 0.008 mm/h while that in the cascade test rig is 0.010 mm/h. The standard deviations of the measured values are similar for all results and are therefore considered

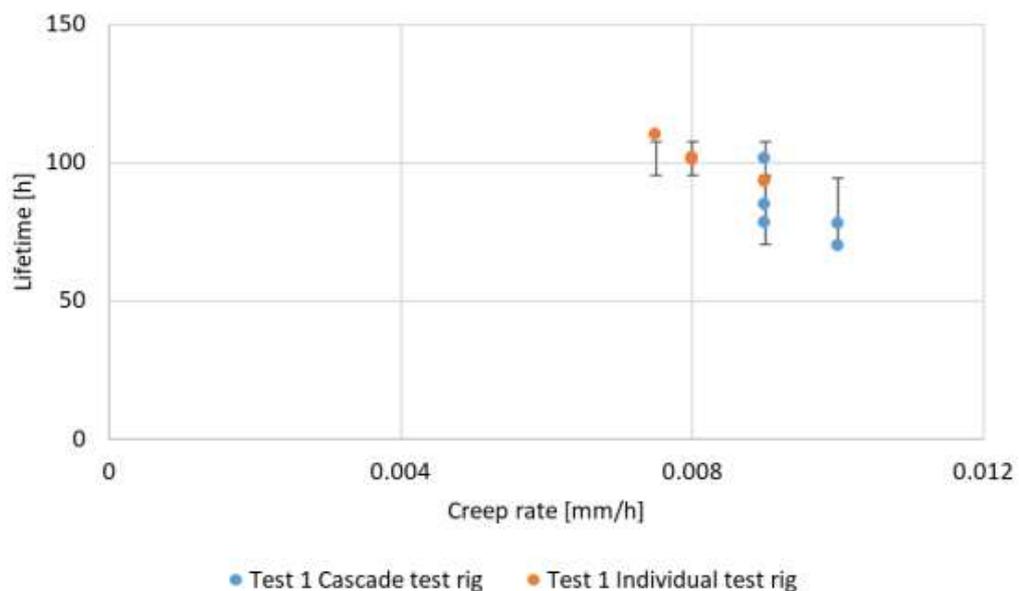


Fig. 9: Comparison of the ECT long-term test rigs

to be fluctuations due to the raw material. Better mounting of the test plates may be one reason for the higher lifetimes in the individual test rig. The four-column setup enables precise guidance of the test plate, allowing it to be set down evenly on the specimen. The test plates of the cascade test fixture are guided via two columns, which may result in the plate being set down on the specimen slightly crookedly, which is not visible to the naked eye. As a result the weight is set down on the specimen unevenly. This can lead to the specimen being damaged and consequently have an effect on the measured values. The difference between the measurements of both test rigs will be investigated in further test series to rule out the corrugated board's natural variability as the reason for this difference.

4.4. Humidity distribution

The ECT long-term measurement is carried out in a 1 m³ climate chamber of the BFSV (manufactured by Noske-Kaeser, Germany). The chamber is maintained at regular intervals, and temperature and humidity monitoring is carried out using an aspiration psychrometer according to Assmann. Various tests are performed using climate sensors in order to exclude the influence of the test apparatus' geometry and positioning of the measuring instruments on the distribution of humidity in the chamber. The aim of these tests is to make it possible to check the humidity distribution in the climate chamber. In six tests, four humidity sensors (F1 - F4) are placed in different locations on the two test rigs in the climate chamber. Positioning on the individual test rig also varies in height. Table 1

Table 1: Test setup for humidity monitoring (F1 - F4 = humidity sensor position, xxxx = position of individual test rig)

		Location					
		1st	2nd	3rd	Table	4th	Base
Test 1	Height (HI)				xxxx		
	Cascade (C)	F2		F3	F1/F4		
	Individual (I)						
Test 2	HI				xxxx		
	C	F2		F3	F1/F4		
	I						
Test 3	HI					xxxx	
	C	F2		F3		F1/F4	
	I						
Test 4	HI						xxxx
	C	F2		F3		F4	F1
	I						
Test 5	HI			xxxx			
	C	F2		F3		F4	
	I			F1			
Test 6	HI		xxxx				
	C	F2	F3				
	I		F1				

shows the arrangement of the test setups. To illustrate the test setup, the first test is described below by way of example. (Table 1 - Test 1). If the climate chamber is viewed from the front, the cascade test rig (C) is on the left and the individual test rig (I) is on the right. A laboratory table is used to bring the individual test rig to a height (HI) between the third and fourth level of the cascade test fixture. The humidity sensors are located at the height of the first and third test levels of the cascade test fixture and on the front and rear of the individual test rig.

Before the measurement begins, all humidity sensors are calibrated to ensure the accuracy of the results. Fig. 10 shows the recording of a climate investigation by way of example. Here the abbreviation "F" stands for humidity sensor and "T" for temperature sensor. The eight-hour alternating climate is mapped by the humidity sensors F1 - F4. The relative humidity is kept constant at 50% RH

until it increases to 90% RH in a one-hour transition phase. This is followed by a three-hour phase at 90% RH. The next step is a one-hour transition phase to 50% RH and the cycle begins again. The temperature sensors T1 - T4 show the temperature held constant at 23 °C.

Fig. 11 shows a detailed view for better illustration of the humidity sensor recordings. It is clear from this that the sensor recordings differ by no more than 1% RH (Fig. 11 gap between relative humidity % F1 to F4).

The results of all the tests can be taken from Table 2. The mean deviation represents the standard deviation of the calculated mean value for the measured values of the four sensors. Consequently, the maximum deviation indicates the largest measured difference between the recordings of the four sensors. When looking at the results, it becomes clear that the maximum deviation of the measured values is 1.1% RH in Test 4.

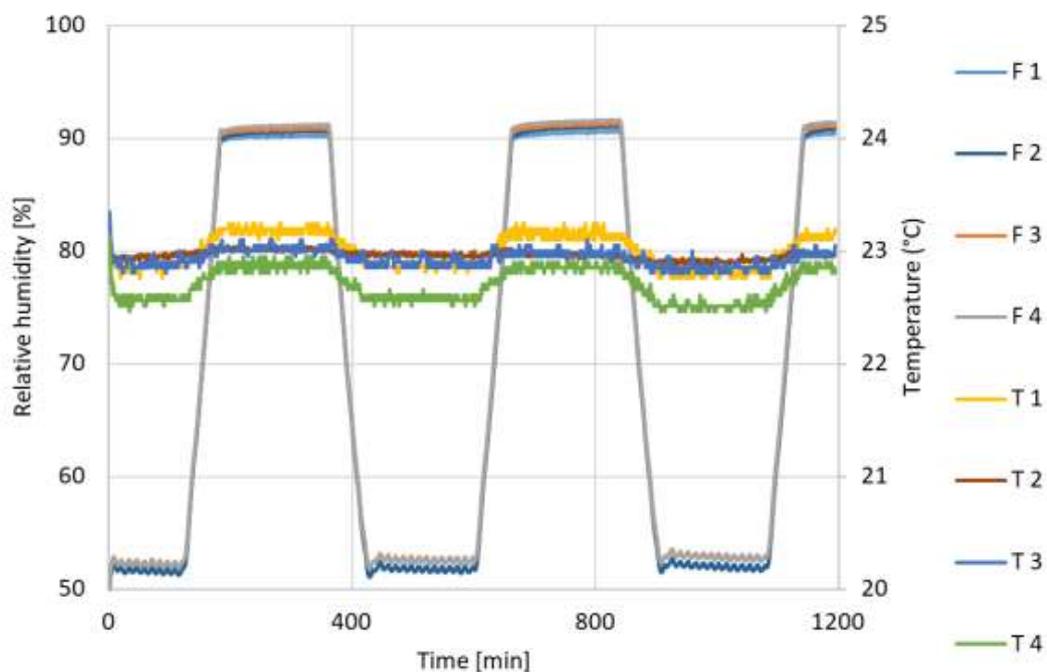


Fig. 10: Recording the humidity distribution in the 1 m³ climate chamber (F1 – F4)

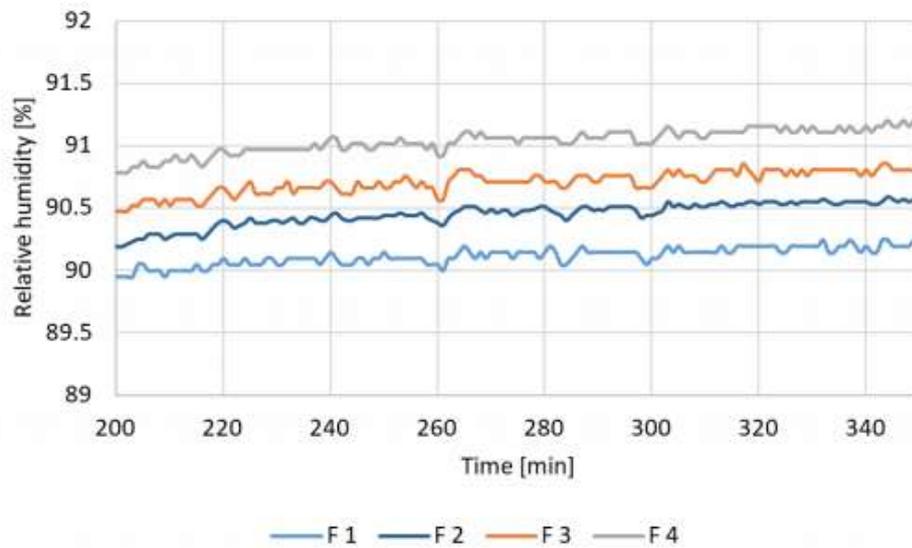


Fig. 11: Detailed view of the humidity sensor recordings

To evaluate the results shown in Table 2, it is necessary to include the deviations in relative humidity permissible according to the current standards such as ISO 2233:2001-11, ISTA Series (e.g. ISTA 2A) and ASTM D4332-01:2006-11 [29] [30] [31]. All these standards specify the permissible deviation in relative humidity as $\pm 5\%$. Thus, the maximum deviation of 1.1% is within the scope of the limit value required by the standard. As the deviation is so small, further investigations into the humidity distribution in the 1 m³ climate chamber will be abandoned.

In summary, the influence of the humidity distribution in the 1 m³ climate chamber on the test results is considered to be low. The dehumidifying

condenser has to work hard due to the alternating humid and dry phases in the eight-hour alternating climate. The process of switching the compressor on and off can cause vibrations inside the chamber. Comparative tests were carried out in a further chamber to examine this external mechanical influence on the measurement results. The chamber has a volume of 8 m³. External vibrations can only reach the interior of the chamber to a small extent owing to the chamber's construction. However, difficulties may arise during execution of the eight-hour alternating climate due to the size and mode of operation. The setup and arrangement of the two test rigs and the material of the specimens remain unchanged. The results are presented in Fig. 12 below.

Table 2: Results of measuring the relative humidity in the 1 m³ climate chamber

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
Mean deviation [% RH]	± 0.41	± 0.50	± 0.69	± 0.65	± 0.57	± 0.56
Maximum deviation [% RH]	0.52	0.79	0.95	1.1	0.75	0.79

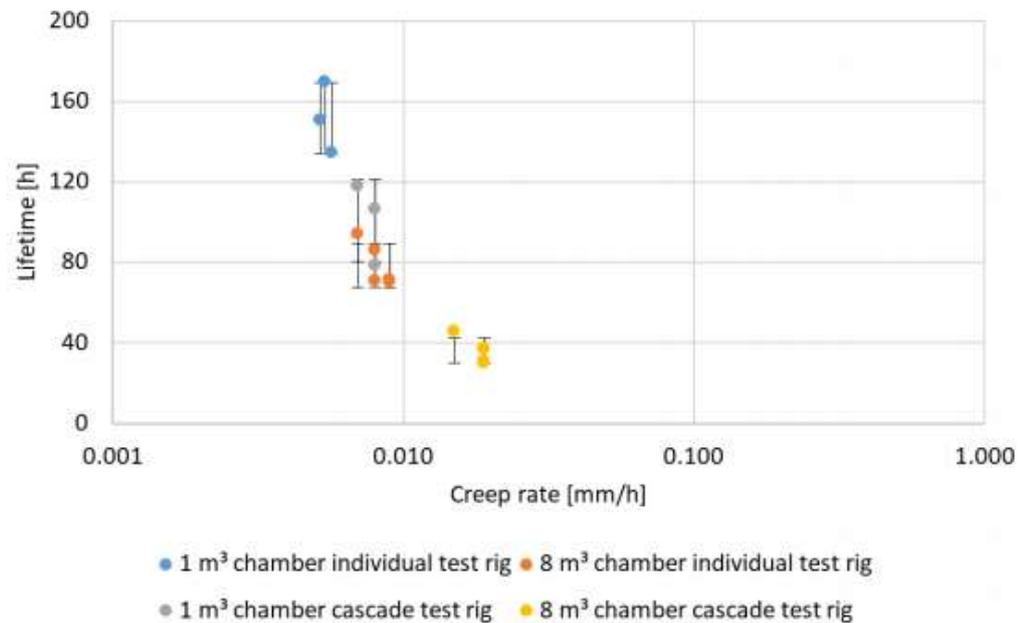


Fig. 12: Comparative tests in different climate chambers

It becomes clear from Fig. 12 that the measurement results of the 1 m³ chamber are almost twice as high as those of the 8 m³ chamber. Based on the example of the creep rates from the individual test rig, this means that a creep rate of 0.005 mm/h was measured in the 1 m³ chamber and a creep rate of 0.008 mm/h in the 8 m³ chamber. The difference becomes even more obvious when looking at the lifetimes. A lifetime of 151 hours was achieved in the 1 m³ chamber, whereas the lifetime in the 8 m³ chamber was 78 hours. The reason for the deviations might be due to how the 8 m³ chamber implements the alternating climate. Maintaining the humid phase for longer results in a shorter lifetime and thus in an increased creep rate.

5.0 SUMMARY REMARKS

The test rigs developed by the BFSV show reproducible creep rates of corrugated board specimens. Due to the sensitivity of the measurement, it is imperative to examine all the factors influencing the measurements in detail before starting the test because external factors can have a major effect on measurement of the creep rates. Owing to the inhomogeneity of the corrugated board packaging material, care must be taken when carrying out the test to introduce as many constant factors as possible. The first step should be to ensure that the storage times of the corrugated board samples from production up to testing are kept relatively short. Preparation of the specimens should take place according to a defined plan and should be carried out and supervised by a trained tester. The quality of specimen preparation can additionally be verified by means of round robin tests. It is also indispensable to keep the test setup constant,

for example the arrangement of the test rigs in the climate chamber or the type of climate chamber, to maintain the chambers regularly and to calibrate the climate measuring equipment carefully.

6.0 CONCLUSION

In this research project, launched in October 2015, attempts are being made to calculate the climate-dependent creep behaviour of corrugated board using speed-dependent and relatively shorter tests by cascade and individual test rigs. As a result, it should become possible to use time- and money-saving short-term tests to estimate the long-term behaviour of corrugated board. Thus, in future, it may be possible to better utilise the potential of the packaging material, prevent transport damage and protect the environment.

REFERENCES

- [1] SmithersPira. The Future of Global Corrugated Packaging in 2021, Market report, 2016
- [2] World Packaging Organization (WPO). Market Statistics and Future Trends in Global Packaging, 2008
- [3] Böröcz, P. Measurement and Analysis of Deformation Shapes on Corrugated Cardboard Logistical Boxes Under Static and Dynamic Compression, Acta Technica Jaurinensis, Vol. 8, No. 4, 2015. DOI: 10.14513/actatechjaur.v8.n4.389
- [4] Hussain S, Coffin D, Todoroki C. Investigating Creep in Corrugated Packaging, Packaging Technology and Science, Early View, 2017, DOI: 10.1002/pts.2323
- [5] Markström, H. Testing Methods and Instruments for Corrugated Boards, 5th edition, Lorentzen & Wettre, Ostervalva, 1999
- [6] Olsson AM, Salmén L. Mechano-sorptive creep in pulp fibres and paper. Wood Science and Technology 2014; Vol. 48, No. 3, pp. 569–580. DOI: 10.1007/s00226-014-0624-5
- [7] Koning JW, Jr, Stern RK. Long-term creep in corrugated fiberboard containers. Tappi Journal, Vol. 60, No. 12, pp. 128–131, 1977
- [8] Popil RE, Schaepe MK. Comparative evaluation of the potential for wax-alternative packaging coatings, Tappi Journal, Vol. 4, No.8, pp. 25–31, 2005

- [9] Whitsitt WJ, Gander JW, McKee RC. Stacking behavior of boxes and corrugated board - A Summary Report of the Technical Division of the FKBI Inc., Project 1108-30, 12.04.1967.
- [10] Whitsitt WJ, Gander JW, McKee RC. Effect of box dimensions and combined board creep life on box creep life - A Summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., Project 2695-2, 15.11.1968.
- [11] Whitsitt WJ, McKee RC. Effect of relative humidity and temperature on stacking performance, Project 2695-9, Summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., 1972
- [12] Byrd VL, Koning JW. Edgewise compression creep in cyclic relative humidity environments. *Tappi Journal*, Vol. 6, No. 6, pp. 35–37, 1978
- [13] Selway JW, Kirpatrick J. The assessment of high humidity corrugated box performance. In *Proceedings of the Cyclic Humidity Effects on Paperboard Packaging*, Laufenberg TL, Leake CH (eds.). FPL: Madison, WI, Sep. 14–15, pp. 31–47, 1992
- [14] Popil RE, Hojjatie B. Effects of component properties and orientation on corrugated container endurance, *Packaging Technology and Science*, Vol. 23, No. 4, 2010, pp. 189-202. DOI: 10.1002/pts.889
- [15] Bronkhorst CA, Riedemann JR. The creep deformation behavior of corrugated containers in a cyclic moisture environment. In: Fellers C, Laufenberg TL, editors. *Proceedings of the Moisture-Induced Creep Behavior of Paper and Board*. Stockholm 1994. pp. 249–73.
- [16] Twede D, Selke S. *Cartons, Crates and Corrugated Board*. Handbook of Paper and Wood Packaging Technology, DEStech Publications, 2005.
- [17] Trost T, Alfthan J. *Standards for Optimizing Corrugated Board Packaging for Exporting Industry – A Feasibility Study*. Innventia Report No.: 730, 2016.
- [18] Läßle V, Drube B, Wittke G, Kammer C. *Material technology in mechanical engineering, theory-based principles and practical applications*, European teaching materials, Leinfelden-Echterdingen, p. 66f/642f.
- [19] Sadlowsky B., Ressel JB., Reimers W., Köstner V. of the Performance of Corrugated Boxes (FEFCO 0201) by using the long-term ECT-Value), no. 55, pP. 30-35, 2014
- [20] Köstner V, Ressel JB, Sadlowsky B, Böröcz P. Development of an Individual Test Rig for Measuring the Creep Behavior of Corrugated Board, *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 10, No. 2, pp. 148-156, 2017, DOI 10.14513/actatechjaur.vX.nY.445
- [21] Sohrabpour V, Hellström D. (2011): *Models and Software for Corrugated Board and Box Design*, International Conference on Engineering Design, ICED 11, Technical University of Denmark, 15-18 August 2011.
- [22] Batelka JJ, Smith CN. *Package Compression Modell*, Package compression model. Project 3746, final report to the Containerboard and Kraft Paper Group of the American Forest and Paper Association, Institute of Paper Science and Technology, Atlanta, 1993

- [23] Dimitrov K, Heydenrych M. Relationship between the ECT-strength of corrugated board and the compression strength of liner and fluting medium papers, *Southern Forests*, 71 (3), 227-233, 2009, DOI: 10.2989/SF.2009.71.3.7.919
- [24] Gibson EJ. Creep of wood: role of water and effect of a changing moisture content. *Nature*; Vol. 206, No. 4980, pp. 213–215, 1965
- [25] Morgan DG. Analysis of creep failure of corrugated board in changing or cyclic humidity regimes. 59th Appita Annual Conference and Exhibition, incorporating the 13th ISWFPC: International Symposium on Wood, Fibre and Pulping Chemistry. Auckland 2005. p. 393–400, DOI: 10.1038/206213a0
- [26] Leake CH, Wojcik R. Humidity cycling rates: how they influence container life spans. *Tappi Journal (Focus on Corrugated Containers)*. Vol. 76, No. 10, pp. 26–30, 1993
- [27] Habeger CC, Coffin DW, Hojjatie B. Influence of humidity cycling parameters on the moisture-accelerated creep of polymeric fibers. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*; Vol. 39, No. 17, pp. 2048–2062, 2001, DOI: 10.1002/polb.1180
- [28] ISO 187: 1990: Paper, board and pulps; standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples, International Organization for Standardization, 1990
- [29] EN ISO 2233: 2001: Packaging – Complete, filled transport packages and unit loads – Conditioning for testing, International Organization for Standardization, 1990
- [30] ASTM D 4332-14: Standard Practice for Conditioning Containers, Packages, or Packaging Components for Testing. American Society for Testing Materials, 2014
- [31] ISTA 2A: Series Partial Simulation Performance Test Procedure, Packaged Products 150 lb (68 kg) or Less, International Safe Transport Association, ISTA Resource Book, 2016

9.6 SIMULATION DES KRIECHVERHALTENS VON WELLPAPPE

Stellungnahme zur Anfertigung des Manuskriptes „Simulation des Kriechverhaltens von Wellpappe“ zur Veröffentlichung angenommen durch die Fachzeitschrift Holztechnologie (eingereicht am 01.11.2017) und wird voraussichtlich in der Ausgabe 3/2018 veröffentlicht. Autoren M. Sc. Viktoria Köstner, Dipl. Ing. B. Hiller, Prof. Dr. J. B. Ressel und Prof. Dr.-Ing. B. Sadlowsky.

Die Arbeit entstand als Teil des gemeinsam mit der Papiertechnischen Stiftung (PTS) Heidenau durchgeführten IGF-Gemeinschaftsforschungsvorhabens AIF Nr. 18876 BG „Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappe-Verpackungen.“ Die Planung des Projektes wurde von V. Köstner und B. Hiller übernommen. Die Ausführung der Versuche war Aufgabe von V. Köstner und B. Hiller. Dabei wurden sie von Mitarbeitern der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH und Mitarbeitern der PTS Heidenau unterstützt. Besonders die Langzeitversuche in den Klimakammern erforderten ein hohes technisches Knowhow im Umgang und mit der Programmierung der Klimakammern. Auch die Bestückung der Klimakammern mit den Versuchseinrichtungen wurde durch Mitarbeiter der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH umgesetzt. Zudem wurde die Probenanfertigung mittels der Wellpappensäge durch den Mitarbeiter G. Borzi der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH durchgeführt. Die Auswertung der Daten der Standprüfungen und der Langzeituntersuchungen war die Aufgabe von V. Köstner. Die Durchführung und Auswertung der geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche wurde von V. Köstner in Zusammenarbeit mit B. Hiller durchgeführt. Die mathematische Berechnung der Dämpfungswerte und die Simulation des Kriechverhaltens erfolgten durch B. Hiller. Das Verfassen der ersten Version des Manuskriptes fand durch V. Köstner statt. Bei der Überarbeitung halfen B. Hiller und J. B. Ressel.

Unterschrift Betreuer 1

(Ort/ Datum)

Unterschrift Betreuer 2

(Ort/ Datum)

Simulation des Kriechverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe

Viktoria Köstner, Benjamin Hiller, Jörg B. Ressel, Bernd Sadlowsky

Die Ergebnisse dieses Beitrags sind Bestandteil eines im Oktober 2015 gestarteten Gemeinschaftsforschungsvorhabens der Papiertechnischen Stiftung Heidenau/Sa. und des Instituts für BFSV an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg. Ziel des Projektes war die Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappeverpackungen. Mit Hilfe von geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuchen an Wellpappenproben, des generalisierten Maxwell-Modells und der Prony-Analyse ist es möglich, das Kriechverhalten von Wellpappenproben im Normklima zu berechnen. Durch Vergleich der gemessenen und berechneten Kriechverläufe konnte diese Annahme bestätigt werden. In weiteren Versuchsreihen steht das Kriechverhalten im Feucht- und Wechselklima im Zentrum der Untersuchungen. Am Ende des Forschungsvorhabens sollte es möglich werden, mittels der Ergebnisse und der Finite-Elemente-Methode eine Simulation des Verhaltens von Wellpappenverpackungen über einen bestimmten Zeitraum bis hin zum Versagen darstellen zu können.

Schlüsselwörter: Wellpappe, Kriechverhalten, Packmittel, Packstoffe, Finite-Elemente-Simulation

Einleitung

Derzeit bestehen 64,2% aller Transportverpackungen aus dem Packstoff Wellpappe (VdW, 2017). Der Sicherheit der Packstoffauslegung und ihrer Dimensionierung kommt hierbei eine große Bedeutung zu. Besonders die immer kürzer werdenden Entwicklungszeiträume und die stärker werdenden Anforderungen an den Packstoff (z. B. weitere Transportwege, klimatische Belastungen) erfordern ein hohes Know-how. Aufgrund dessen werden in der Industrie vermehrt moderne Simulationsmethoden wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt (Michaeli et al., 2006). Für faserbasierte Materialien wie Papier, welches als Rohstoff für die Wellpappe dient, sind in der FEM besondere Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Neben den orthotropen Materialeigenschaften (d. h. zwei Hauptrichtungen) seien hier bezüglich Langzeitbelastungen im Transportfall besonders das Kriechverhalten und die Klimaabhängigkeit genannt. Einige dieser Eigenschaften unterscheiden sich von isotropen Materialien und es bedarf einer detaillierten Bestimmung mithilfe neuer Prüftechniken und einer Implementierung in der Finite-Elemente-Software (Sادلowsky et al., 2014; Köstner et al., 2017).

Im Oktober 2015 wurde ein IGF-Forschungsprojekte mit Titel „Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappeverpackungen“ als Gemeinschaftsforschungsvorhaben der Papiertechnischen Stiftung in Heidenau/Sa. und des Instituts für BFSV an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg gestartet. Ziel des Projektes war es, mithilfe von geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuchen das Langzeitverhalten von Wellpappe zu ermitteln und durch Zuhilfenahme der FEM Standzeiten der Verpackungen zu simulieren. Dadurch wurde es möglich, ohne zeit- und kostenintensive Langzeituntersuchungen am Packmittel Verpackungen bedarfsgerecht auszulagen.

Kenntnisstand und Lösungsansatz

Qualitätsbestimmung von Wellpappe

Wellpappe wird als ein starrer Werkstoff in der Prüftechnik angesehen, da die etablierten Prüfverfahren quasistatisch arbeiten. Es handelt sich jedoch um einen viskoelastischen

Packstoff, d. h. er zeigt sowohl viskoses als auch elastisches Materialverhalten (Koltzenburg *et al.*, 2009). Heute angewandte, quasistatische Prüfverfahren berücksichtigen die viskosen Eigenschaften des Werkstoffes nicht. Aus materialwissenschaftlicher Sicht ist es jedoch dringend erforderlich, diese Eigenschaftsanteile einer Messung und Bewertung zugänglich zu machen, um das Materialverhalten, insbesondere auch das Versagensverhalten, umfassend charakterisieren zu können. Es fehlen zurzeit Möglichkeiten zur Erfassung und Auswertung dieser Eigenschaften. Um das Leistungsvermögen von Verpackungen aus Wellpappe zu bestimmen, werden heute standardmäßig folgende Prüfverfahren angewendet:

- Berstfestigkeit nach *DIN EN ISO 2759* (2014)
- Kantenstauchwiderstand (ECT: Edge-Crush-Test) nach *DIN EN ISO 3037* (2007)
- Durchstoß nach *DIN 53142-1* (2014)
- Biegesteifigkeit nach *DIN 53121* (2014)
- Nass-Berstfestigkeit nach *DIN ISO 3689* (1994)
- Nassfeste Verklebung nach *TAPPI T 812* (2018) und *DIN 53133* (2015)
- Stapelstauchwiderstand (BCT: Box-Compression-Test) nach *DIN 55440-1* (2004) und *DIN EN ISO 12048* (2001)

Die Untersuchungen finden im Normklima für Papierprodukte nach *DIN EN 20187* (1993) statt (23 °C/ 50 % relative Luftfeuchtigkeit). Um die im Transport, beim Umschlag und bei der Lagerung auftretenden Belastungen kompensieren zu können, werden lediglich in der Praxis empirisch ermittelte Sicherheitsfaktoren eingesetzt (Reimers, 2009; Trost und Alftan, 2016).

Lösungsansatz

Mithilfe von Feder-Dämpfer-Modellen ist es möglich, das viskoelastische Materialverhalten beschreiben zu können. Dabei wird das elastische Verhalten von einem Feder-element (HOOKE-Modellelement) und das irreversible viskose Verhalten von einem Dämpferelement (NEWTON-Modellelement) dargestellt. Die Anordnung dieser beiden Elemente kann in verschiedenen Ausführungen stattfinden, sowohl parallel als auch in Reihe geschaltet. Je nach Anordnung ergeben sich verschiedene Reaktionen gegenüber auftretenden Kräften. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde das Maxwell-Element genutzt, welches diese beiden Elemente in Reihe schaltet. Somit kann die anfängliche Auslenkung des Materials und der anschließende Kriechprozess bei gleichbleibender Belastung nachgestellt werden (Ranz, 2007).

Ein solches Maxwell-Element beschreibt das Verformungsverhalten eines Werkstoffes auf eine definiert aufgebrachte Belastungsgeschwindigkeit. Um das Materialverhalten im gesamten möglichen Belastungsspektrum realistisch beschreiben zu können, reicht eine einzelne Reihenschaltung von Feder und Dämpfer nicht aus, weshalb das einzelne Maxwell-Element um mehrere Feder- und Dämpferelemente erweitert wird. Es entsteht eine Parallelschaltung von Maxwell-Elementen mit einer begrenzenden, parallel angeordneten Federn. Durch diese Erweiterung zu einem generalisierten Maxwell-Modell ist es möglich, dass geschwindigkeitsabhängige Materialverhalten realitätsnah mathematisch zu beschreiben.

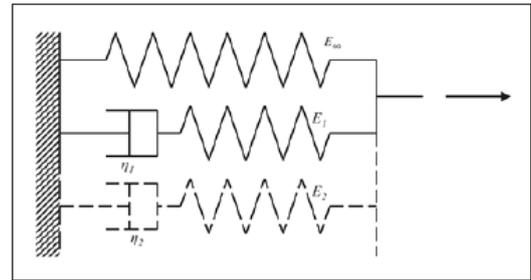


Abb. 1: Generalisiertes Maxwell-Modell (Rust, 2011)

Fig. 1: Generalized Maxwell model (Rust, 2011)

Das wurde bereits im Falle von Polymeren als erfolgversprechender Ansatz demonstriert (Abb. 1) (Michaeli *et al.*, 2006; Ranz, 2007; Hying, 2003).

Um die Modellparameter ermitteln zu können, werden Versuche mit verschiedenen Dehnraten durchgeführt. Im Anschluss daran wird mithilfe der sogenannten Prony-Analyse das frequenzabhängige Maxwell-Modell in einen zeitabhängigen E-Modul überführt. Die Ergebnisse ermöglichen es, dass Kriechverhalten einer Materialprobe bei einer konstanten Last vorherzusagen.

Abschließend können die berechneten Kriechraten mit den Ergebnissen der Langzeituntersuchungen verglichen werden, um den Anteil des plastischen Materialverhaltens abschätzen zu können. Da Papier ein feuchtereaktiver Werkstoff ist, reicht die Prüfung im Normklima nicht aus, praxisgerechte Vorhersagen zum Materialverhalten und Versagen, insbesondere unter Langzeitbedingungen und Wechselklimata, zu treffen. Deshalb ist es notwendig, mit Hilfe von Untersuchungen im Feuchtklima zusätzlich den Einfluss geänderter Klimabedingungen zu untersuchen. Die so ermittelten höheren Kriechraten können als „Feuchte-Shift“ in die Berechnungen integriert werden.

Mit den ermittelten Material- und Modellparametern ist es im letzten Schritt möglich, über die Betrachtung der Verpackungsgeometrie, das Kriechverhalten und die Standzeit eines Packmittels aus Wellpappe mit Hilfe der FEM zu berechnen.

Material und Messmethoden

Probenmaterial

Gegenstand der Untersuchungen war das Kriechverhalten und dessen Modellierung. Als Material wurden zwei doppelwellige Wellpappen (Wellenkombination BC) mit (Probe A) und ohne nassfeste Verklebung (Probe B) in Form von Bögen und Schachteln des Typs FEFCO 0201 eingesetzt. Die Bestimmung der Materialeigenschaften der Wellpappen erfolgte nach *DIN 55468-1* (2015) und die Bestimmung der Papiere nach *DIN ISO 3039* (2011). Die *DIN 55468-1* (2015) umfasst Prüfungen der Berstfestigkeit, der Durchstoßarbeit und des Kantenstauchwiderstandes (ECT: Edge Crush Test). Der ECT wird in der Norm als der maximal wirkende Widerstand, den

eine Probe mit senkrecht stehenden Wellen einer in diese Richtung wirkenden Kraft entgegengesetzt, beschrieben. Hierbei wird die Probe einer Druckkraft ausgesetzt, bis diese versagt. Die Höchstbelastung wird mit Wegaufnehmern gemessen und daraufhin wird der Kantenstauchwiderstand in Kraft pro Längeneinheit errechnet (Einheit kN/m).

Bei der Bestimmung der Papiere werden die Lagen der Wellpappen getrennt, das Gewicht und die Bersfestigkeiten der einzelnen Papiere ermittelt. Zusätzlich zu den Standarduntersuchungen wurde der Einfluss des Feuchtklimas (23 °C/ 90 % relative Luftfeuchtigkeit (RH)) auf die Festigkeitsparameter ECT, Biegesteifigkeit (BS) und Stapelstauchwiderstand (BCT: Box Compression Test) untersucht. Die Biegesteifigkeit wird als der Widerstand beschrieben, den eine Wellpappeprobe aufwenden muss, um ein Biegen im elastischen Verformungsbereich zu verhindern. Die Biegesteifigkeit wird im Vierpunktbiegefahren gemessen und als breitenbezogene Biegesteifigkeit angegeben (Einheit Nm/Nmm).

Geschwindigkeitsgesteuerte Kurzzeitversuche

Zur Untersuchung der viskoelastischen Werkstoffeigenschaften der beiden Wellpappen wurden Kurzzeitversuche an Kantenstauchprobenkörpern (Abmessungen 25 mm x 100 mm) und Biegesteifigkeitsprobenkörpern (Abmessungen 400 mm x 100 mm) mit vier Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt. Diese beiden Belastungen ergeben sich aus dem Belastungsprofil einer Packmittelstapelung. Als Hauptbelastung in der Verpackung sei hier der Druck senkrecht zur Aufstellenebene zu nennen, was in den Messungen durch den ECT beschrieben wird. Durch höhere bzw. längere Belastungen kommt es dann zu initialen Auslenkungen in den Seitenwänden, was eine Biegebelastung in Längs- sowie Querrichtung hervorruft.

Die Prüfungen erfolgten angelehnt an die Standardprüfungen nur mit variierten Prüfgeschwindigkeiten, in denen die maximal ertragbare Last ermittelt wurde. Die eingesetzten Prüfgeschwindigkeiten erzeugten vier Dehnraten ($0,1 \text{ s}^{-1}$ bis $0,0001 \text{ s}^{-1}$) in der jeweilig geprüften Probe. Bei der Prüfung des Kantenstauchwiderstandes ergaben sich die Prüfgeschwindigkeiten von $0,0025 \text{ mm/s}$ bis $2,5 \text{ mm/s}$ und bei der Biegeuntersuchung die Prüfgeschwindigkeiten von $1,58 \text{ mm/min}$ bis $158,50 \text{ mm/min}$.

Die Festlegung auf ein 4-faches generalisiertes Maxwell-Modell bei beiden Belastungsrichtungen (ECT, BS) fand aufgrund von vorangegangenen Berechnungen statt, die zeigten, dass durch die Messung von vier verschiedenen Geschwindigkeiten eine hohe Genauigkeit erreicht werden kann, ohne den Prüfaufwand zu sehr auszudehnen.

Prüfvorrichtung Kriechen

Zur Untersuchung des Langzeitverhaltens wurden vom Institut für BFSV Hamburg zwei Prüfvorrichtungen zur Untersuchung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung entwickelt, die Kaskaden- und die Einzelprüfeinrichtung. Bei der Prüfung werden ECT-Proben einer konstanten Last in einem Wechselklima ausgesetzt. Dabei kommt es zum Kriechen der Probe und letztendlich zum Bruch. Als Ergebnis werden eine Kriechrate und die Zeit bis zum Bruch erhalten. Beide Entwicklungen wurden bereits in mehreren



Abb. 2: Prüfeinrichtungen zur Messung des Kriechverhaltens an Prüfkörperzuschnitten zur ECT-Messung (links: Kaskadenprüfeinrichtung; rechts: Einzelprüfeinrichtung)

Fig. 2: Test equipment for measuring creep rates on ECT specimens (left: stacked test rig, right: individual test rig)

wissenschaftlichen Publikationen vorgestellt (Sadowsky et al., 2014; Köstner et al., 2017) (Abb. 2).

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes konnten, in Kooperation mit der Papiertechnischen Stiftung in Heidenau/Sa., zwei weitere Prüfvorrichtungen zur Untersuchung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung und an Probenkörperzuschnitten zur Prüfung der Biegesteifigkeit entwickelt und in Betrieb genommen werden. Die Abb. 3 und 4 zeigen die beiden Prüfeinrichtungen. Mithilfe der Prüfvorrichtungen für Biege- und ECT-Versuche ist es möglich, in paralleler Anordnung Kriechraten an vier Werkstoffproben aufzunehmen. Die Kraftaufbringung kann bei der Biegeprüfung 10 N bis 165 N je Probe und bei der ECT-Prüfung 20 N bis 600 N je Probe betragen. Bei der Biegeprüfung erfolgt die Wegmessung induktiv und ermöglicht es, die Kriechverformung direkt über den Werkstoffproben zu messen. Die Ermittlung der Wegveränderung bei der ECT-Prüfung erfolgt über Sensoren auf den Druckbügeln.

Um die neu entwickelten Prüfeinrichtungen in Betrieb zu nehmen und reproduzierbare Ergebnisse ermitteln zu können, werden Vergleichsuntersuchungen in allen Prüfeinrichtungen durchgeführt. Zudem können durch den Einsatz aller Prüfeinrichtungen möglichst viele Ergebnisse in kurzer Zeit ermittelt werden. Bei allen Kriechversuchen wurden die Proben einer



Abb. 3: Prüfvorrichtung zur Ermittlung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten zur Prüfung der Biegesteifigkeit (Fa. Hegewald & Peschke)

Fig. 3: New test equipment for measuring creep rates on bending specimens (company Hegewald & Peschke)



Abb. 4: Prüfvorrichtung zur Ermittlung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung (Fa. Hegewald & Peschke)

Fig. 4: New test equipment for measuring creep rates on ECT specimens (company Hegewald & Peschke)

konstanten Last von 15 %, 25 % und 33 % des im Normklima (23 °C / 50 % relative Luftfeuchtigkeit) gemessenen Wertes ausgesetzt. Die Werkstoffproben der Kriechversuche des Kantenstauchwiderstandes wurden dabei senkrecht zu den Wellen belastet. Die Prüfungen fanden in einer Klimazelle (BFSV: Fa. Noske-Kaeser; PTS: Fa. Vötsch) statt, in der entweder das Normklima, ein Feuchtklima (23 °C / 90 % relative Luftfeuchtigkeit) oder ein definiertes achtstündiges Wechselklima herrschte.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Qualitätsbestimmung der Wellpappen A und B nach *DIN 55468-1* (2015) zeigten, dass beide der Sorte 2.90 entsprachen, jedoch entgegen der Spezifikationsaussage des Herstellers keine nassfeste Verklebung nach *TAPPI T 812* (2018) aufwiesen. Die Ergebnisse der Untersuchung der Flächengewichte der Einzellagen nach *DIN ISO 3039* (2011) sind in Tab. 1 dargestellt. Tab. 2 verdeutlicht die erwartete starke Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von Wellpappe gegenüber Feuchtigkeit. Dabei zeigten beide Wellpappen trotz unterschiedlicher Papierzusammensetzungen nahezu das gleiche Verhalten (Tab. 1). Der größte Festigkeitsverlust war beim BCT mit 62,5% zu verzeichnen, die Biegesteifigkeit lag bei 54 % und der ECT-Wert war mit 45,5 % am geringsten. Abb. 5 bildet exemplarisch das Ergebnis der Messung des

Kantenstauchwiderstandes der Wellpappenproben A und B bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten ab. Es zeigt sich der Zusammenhang, je höher die Prüfgeschwindigkeit desto höher ist erwartungsgemäß die ermittelte Steifigkeit und Festigkeit. Die Versuche wurden auch bei Probenkörperzuschnitten der Biegesteifigkeit durchgeführt. Hierbei besteht der gleiche Zusammenhang, wie bei der Untersuchung des Kantenstauchwiderstandes.

Tab. 1: Aufbau der Wellpappen A und B
Tab. 1: Structure of corrugated board A and B

Wellpappe A		Wellpappe B	
Flächengewicht in g/m ²	Papiersorte	Flächengewicht in g/m ²	Papiersorte
280	Kraftliner	286	Kraftliner
145	Wellenstoff	130	Wellenstoff
166	Testliner 3	175	Testliner 2
150	Wellenstoff	140	Wellenstoff
290	Kraftliner	290	Testliner 1

Tab. 2: Untersuchung der Festigkeiten (ECT – Kantenstauchwiderstand, BS – Biegesteifigkeit, BCT – Stapelstauchwiderstand) im Feuchtklima (23 °C/ 90 % relative Luftfeuchtigkeit) im Vergleich zum Trockenklima (23 °C/ 50 % relative Luftfeuchtigkeit)
Tab. 2: Strength investigation (ECT – edge crush test, BS – bending stiffness, BCT – box compression test) in humid climate (23 °C/ 90 % relative humidity) in comparison to dry climate (23 °C/ 50 % relative humidity)

Wellpappe	ECT in kN/m		Abweichung in %	BS in Nm		Abweichung in %	BCT in N		Abweichung in %
	23/50	23/90		23/50	23/90		23/50	23/90	
A	16,24	7,46	46	42,37	22,70	54	13225	8202	62
B	15,59	7,09	45	40,67	22,03	54	13166	8286	63

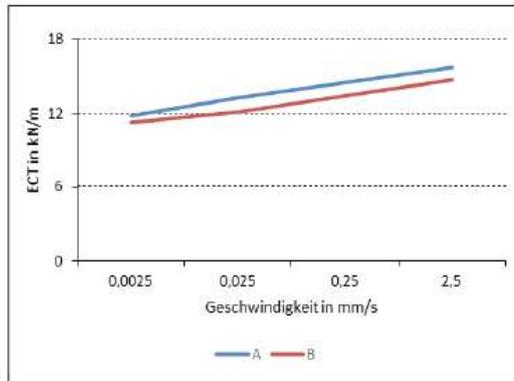


Abb. 5: Kantenstachwiderstand bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten
 Fig. 5: ECT at different testing speeds

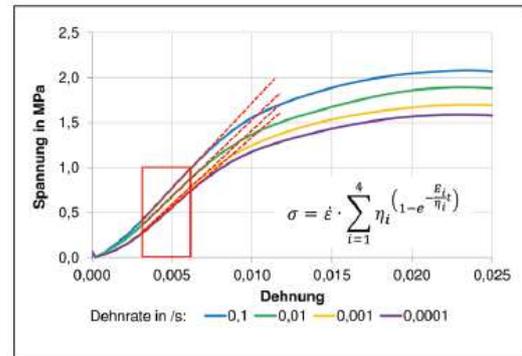


Abb. 6: Berechnung der Feder- und Dämpferkonstanten aus den geschwindigkeitsgesteuerten Kantenstachwiderstandsversuchen
 Fig. 6: Calculation of spring and damper constants from speed controlled ECT

Modellparameter

Die Ergebnisse der geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche wurden in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm übertragen (Abb. 6). Aus den rein elastischen Bereichen der Messkurven ist es möglich, die Feder- und Dämpferkonstantenwerte des generalisierten Maxwell-Modells zu berechnen. Hierfür werden die Anstiege der einzelnen Kurven mithilfe der in Abb. 6 dargestellten Formel mathematisch beschrieben. In die Berechnung gehen für jede einzelne Prüfgeschwindigkeit ($\dot{\epsilon}$) der jeweilige E-Modul (E_i) und die Dämpfungsviskosität (τ_i) ein. Über eine iterative computergestützte Berechnung wird diejenige Kombination aus Feder- und Dämpferkonstanten gesucht, welche die vier verschiedenen Kurvenanstiege im elastischen Bereich am genauesten abbildet. Mithilfe der Definition aller Modellparameter (E_i, τ_i) ist es nun möglich, das Materialverhalten für jegliche Belastungsgeschwindigkeit vorherzusagen, da lediglich die Belastungsgeschwindigkeit ($\dot{\epsilon}$) je nach Anwendungsfall geändert werden muss. Abb. 7 zeigt ein Ergebnis der berechneten Modellparameter in Form eines sogenannten Dämpfungsspektrums. Dieses zeigt die berechneten E-Modul-Werte über den dazugehörigen Dämpfungskonstanten. Die Berechnungen zeigen einen Anstieg der Messpunkte, was auch in den Berechnungen auf ein steiferes Materialverhalten bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten schließen lässt. Demnach weisen die Berechnungen ein gleiches Grundlagenverhalten wie die Messungen auf. Das ermittelte Dämpfungsspektrum wurde an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung ermittelt. Das Dämpfungsspektrum eines Werkstoffs gibt an diesem Punkt die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Werkstoffs wieder. Für die Berechnung eines Kriechverlaufs werden jedoch zeitabhängige Werkstoffkennwerte benötigt. Um von einem geschwindigkeitsabhängigen generalisierten Maxwell-Modell auf eine zeitabhängige Materialkenngröße zu schließen, wird die sogenannte Analyse nach Prony eingesetzt (Gl. 1).

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^m E_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (1)$$

Darin sind:

- $E(t)$ – Zeitabhängiger E-Modul,
 - E_0 – E-Modul zum Zeitpunkt 0,
 - E_i – E-Modul des jeweiligen Elements,
 - t – Zeitschritt und
 - τ_i – Verhältnis von Dämpfungskonstanten η_i zu E-Modul E_i .
- Mit der Prony-Analyse können die berechneten E-Module und Dämpfungsviskositäten (hier in Form von $\tau_i = \eta_i / E_i$) in einen zeitabhängigen E-Modul umgerechnet werden. Die so berechnete abklingende Verlaufskurve des E-Moduls (Abb. 8) wird mit einer definierten Last kombiniert und ergibt eine definierte Verformung des Werkstoffs über der Zeit.

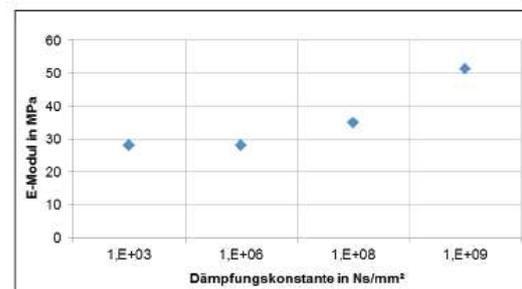


Abb. 7: Ermitteltes Dämpfungsspektrum an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung
 Fig. 7: Determined damping spectrum on ECT specimens

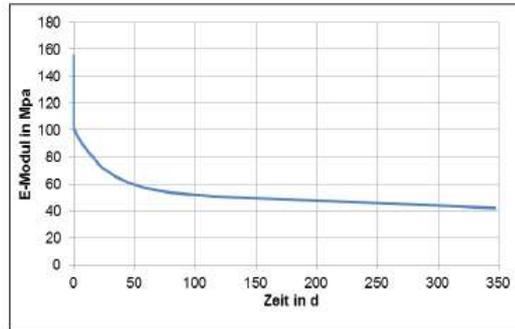


Abb. 8: Beispielkurve eines zeitabhängigen E-Moduls berechnet mittels Prony-Analyse
 Fig. 8: Time-dependent E-modulus calculated using Prony analysis

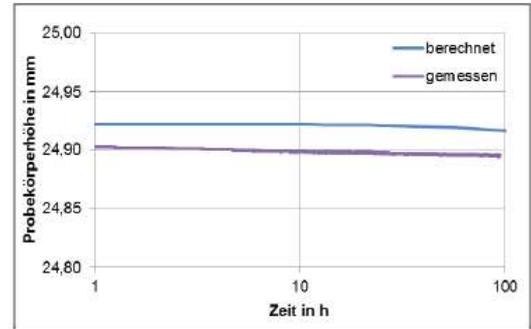


Abb. 9: Vergleich von gemessenen und berechneten Kriechverläufen von Probekörperzuschnitten zur ECT-Prüfung im Normklima
 Fig. 9: Comparison of the measured and calculated creep rates on ECT specimens (23 °C/ 50 % relative humidity)

Vergleich der Berechnungen mit real ermittelten Kriechkurven

Mithilfe des Dämpfungsspektrums und der Prony-Analyse war es möglich, das Kriechverhalten von Wellpappen vorherzusagen. Abb. 9 zeigt den Vergleich von den gemessenen Kriechraten an Probekörperzuschnitten zur ECT-Prüfung zu dem mittels des Maxwell-Modells und der Prony-Analyse berechneten Kriechverlauf. Dabei stellt der Abstand der beiden Graphen wahrscheinlich den Anteil der viskoplastischen Verformung dar. Dies muss jedoch in weiteren Untersuchungsreihen abgeklärt werden. Nach der Definition des viskoplastischen Anteils folgt die Auswertung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Kriechrate des Werkstoffs. Die hierfür durchgeführten Messungen im Feuchtklima (23 °C / 90 % relative Luftfeuchtigkeit) zeigen wesentlich höhere Kriechraten als die Versuche im Normklima. Diese Vergrößerung kann in die Berechnungen mittels Prony-Analyse als „Feuchte-Shift“ eingearbeitet werden. Hierfür wird eine zusätzliche Variable α_g in die Gl. 1 eingefügt, welche den Anstieg wesentlich beeinflusst (Gl. 2). Die Berechnung dieser Variablen erfolgt wiederum über ein iteratives und computergestütztes Verfahren.

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^m E_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha_g \cdot \tau_i}} \right) \quad (2)$$

Darin ist:

■ α_g – Feuchte-Shift.

Durch diese Festlegung und die Anwendung eines weiteren Shifters zur Kompensation des geringen viskoplastischen Anteils ist es dann möglich, den Einfluss des Feuchtklimas auf das Kriechverhalten auch rechnerisch darzustellen (Abb. 10).

Berechnungen mittels Finite-Elemente-Methode

Die ermittelten Modellparameter fließen mit dem Feuchte-Shift und zusätzlichen elastomechanischen Standardwerkstoffkennwerten in ein Finite-Elemente-Modell, basierend auf der Software LS-DYNA, ein. Dies bietet sich besonders

bei zeitabhängigen Berechnungen an und ermöglicht es, die Modellparameter und Werkstoffkennwerte über vorgefertigte Materialkarten einzugeben. Die Berechnungen gehen von der vereinfachten Annahme aus, dass die Wellpappe als homogener Werkstoff angesehen wird, was aufgrund der Eigenschaftsmessungen am Gesamtmaterial umsetzbar ist. Somit soll der Rechenaufwand verringert aber die Genauigkeit über die eingegebenen Daten weiterhin sehr hoch gehalten werden. Ein solches Berechnungsmodell (Abb. 11) gibt die Möglichkeit, durch Zuordnung eines Versagenskriteriums die Standzeit einer Verpackung zu berechnen. Bei der Integration der Werkstoffparameter muss auf die möglichen Materialkennwerte der Software Rücksicht genommen werden. Es gibt aktuell kein Materialmodell, welches alle Eigenschaften von Papier vereint, ohne dabei einen enorm hohen Prüfaufwand nach sich zu ziehen. Daher werden neben den Vereinfachungen des Aufbaus der Wellpappe auch Vereinfachungen im Material und den geometrischen Einflüssen vorgenommen, die die Genauigkeit der Berechnungen jedoch nicht zu sehr beein-

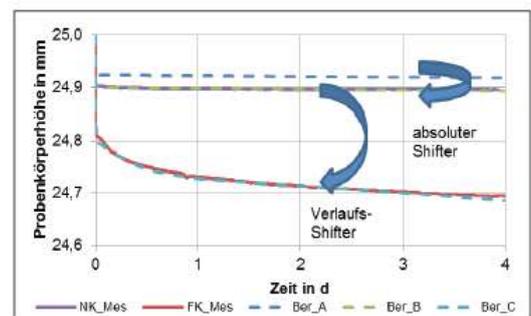


Abb. 10: Anwendung der Shifter-Funktion auf real gemessene Kurven
 Fig. 10: Application of shifter function on measured creep curves

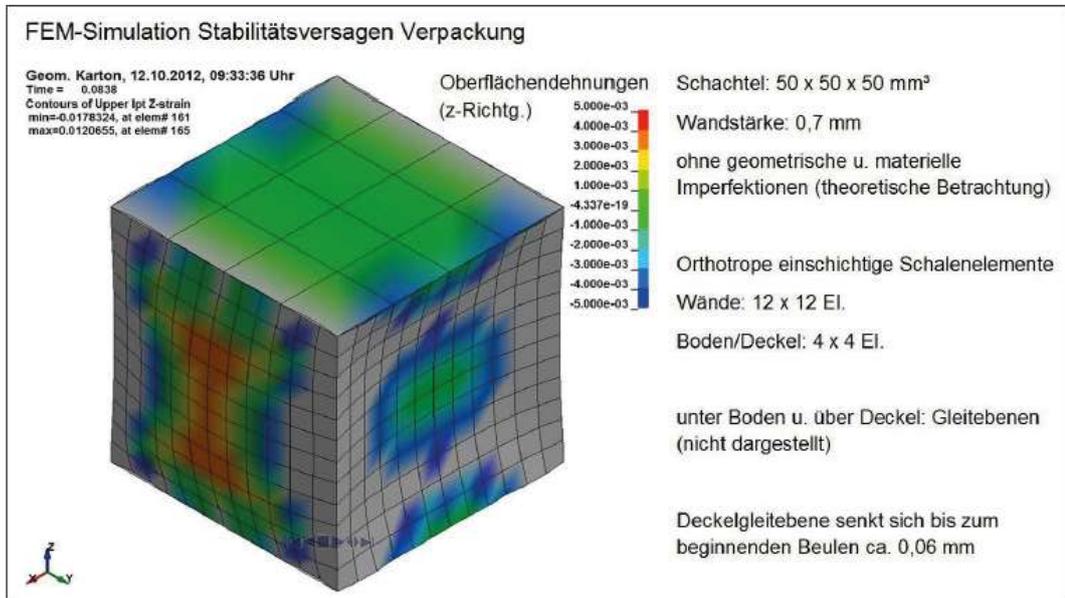


Abb. 11: Schematische Darstellung einer Finite-Elemente-Simulation eines Box-Compression-Tests

Fig. 11: Schematic presentation of a finite elements simulation on BCT

trächtigen. Im letzten Schritt, der Validierung der Ergebnisse, werden die simulierten Standzeiten mit real durchgeführten Versuchen verglichen.

Fazit und Ausblick

Wellpappe zeigt ein viskoelastisches Materialverhalten (Mathias, 2015; Kuntsch et al., 2017). Dabei führte eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit zu einer steiferen Materialantwort. Dadurch ermöglichten die geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche mithilfe des Maxwell-Modells und der Prony-Analyse eine Berechnung des Kriechverlaufs von Wellpappenproben im Normklima. Hierbei muss in weiteren Untersuchungsreihen der plastische Anteil des Materialverhaltens abgeklärt werden. Um Vergleiche zwischen nassfesten und nicht nassfesten Wellpappen zu erhalten, sollen in einer weiteren Prüfsérie zwei Wellpappen mit nassfester Verklebung untersucht werden. Im Anschluss soll mittels der Ergebnisse aller Untersuchungen und der Finite-Elemente-Methode eine Simulation des Verhaltens des gesamten Packmittels über einen bestimmten Zeitraum bis hin zum Versagen möglich werden. Somit könnten Packmittel bedarfsgerechter in Bezug auf das Langzeitverhalten unter realen Bedingungen ausgelegt werden und durch die Materialeinsparung Kosten gesenkt und die Umwelt geschont werden.

Danksagung

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben „Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur

Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappeverpackungen“ wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsförderung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 18876 BG gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

DIN EN ISO 2759 (2014) *Pappe – Bestimmung der Berstfestigkeit*

DIN EN ISO 3037 (2013) *Wellpappe – Bestimmung des Kantentauchwiderstandes (Verfahren für ungewachste Kanten)*

DIN EN ISO 12048 (2001) *Verpackung – Versandfertige Packstücke – Kompressions- und Stapelprüfung unter Verwendung einer Kompressionsprüfmaschine*

DIN EN 20187 (1993) *Papier, Pappe und Zellstoff – Normalklima für die Vorbehandlung und Prüfung und Verfahren zur Überwachung des Klimas und der Probenvorbehandlung*

DIN ISO 3039 (2011) *Wellpappe – Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Lagen nach Trennung*

DIN ISO 3689 (1994) *Papier und Pappe – Bestimmung der Berstfestigkeit nach dem Eintauchen in Wasser*

DIN 53121 (2014) Prüfung von Papier, Karton und Pappe – Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode

DIN 53133 (2015) Prüfung von Pappe – Bestimmung der Wasserbeständigkeit der Verklebung von Wellpappe

DIN 53142-1 (2014) Prüfung von Pappe – Durchstoßprüfung – Teil 1: Prüfung mit dem Pendelschlagwerk

DIN 55440-1 (2004) Packmittelprüfung – Stauchprüfung – Teil 1: Prüfung mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit

DIN 55468-1 (2015) Packstoffe – Wellpappe – Teil 1: Anforderungen, Prüfung

Hying K (2003) Analyse der viskoelastischen Eigenschaften von Poly(tetrafluorethylen) im Bereich des β -Übergangs. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Koltzenburg S, Maskos M, Nuyken O (2014) Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendung. Springer Spektrum, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg

Köstner V, Ressel JB, Sadlowsky B, Böroc P (2017) Individual Test Rig for Measuring the Creep Behaviour of Corrugated Board for Packaging. Acta Technica Jaurinensis 10 (2): 148-156

Kuntzsch T, Kühnöl K (2017) Bestimmung werkstoffmechanischer Kennwerte an faserbasierten Werkstoffen aus optisch ermittelten Dehnungsfeldern (Optische Dehnfeldmessung). Forschungsbericht VF 130044, Papiertechnische Stiftung (PTS)

Matheas J (2015) Materialparameter für effiziente Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Mehrschichtmaterialien und den darauf aufbauenden Entwurf angepasster Produkte (Materialparameter). Forschungsbericht, Papiertechnische Stiftung (PTS)

Michaeli EHW, Brandt M, Brinkmann M, Schmachtelberger E (2006) Simulation des nicht-linearen viskoelastischen Werkstoffverhaltens von Kunststoffen mit dem 3D-Deformationsmodell. Zeitschrift Kunststofftechnik (Journal of Plastics Technology) 2 (5): 1-24

Ranz T (2007) Elementare Materialmodell der Linearen Viskoelastizität im Zeitbereich. In: Lion A (Hrsg.) Beiträge zur Materialtheorie, 5/07, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Mechanik (LRT 4)

Reimers W (2009) Entwicklung eines Qualitäts-Standards für Schwerwellpappe unter Berücksichtigung mechanisch/klimatischer Belastungen in internationalen Lieferketten. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14836 N, Hamburg

Rust W (2011) Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen – Kontakte, Geometrie, Material. Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Sadlowsky B, Ressel JB, Reimers W, Köstner V (2014) Vorhersag-

ABSTRACT

Simulation of the creep behaviour of corrugated board packaging

The results of this paper are part of a research project launched in October 2015 by the Papiertechnische Stiftung Heidenau/Sa. and the Institute for BFSV at the University of Applied Sciences Hamburg. The aim of the project was the development of a method based on continuum mechanics for the calculation of the climate-dependent creep behaviour of corrugated board packaging. Using velocity-controlled short-term tests on corrugated cardboard samples, the generalized Maxwell model and the Prony analysis, it is possible to calculate the creep behaviour of corrugated cardboard samples under standard climate. By comparing the measured and calculated creep rates this assumption could be confirmed. In further series of tests, the creep behaviour in wet and alternating climate was the focus of the investigations. At the end of the research project, it should have been possible to use the results and the finite element method to present a simulation of the behaviour of corrugated packaging over a certain period of time up to failure.

Keywords: Corrugated board, creep behaviour, packaging materials, finite elements simulation

barkeit des Leistungsvermögens von Schachteln aus Wellpappe (FEFCO 0201) mithilfe des ECT-Longzeitwertes. holztechnologie 55 (2): 38-43

TAPPI T 812 (2018) Ply separation of solid and corrugated fiberboard (wet). <https://ipstesting.com/find-a-test/tappi-test-methods/tappi-t-812-ply-separation/> Abgerufen am 10.01.2018

Trost T, Alfthan J (2016) Standards for Optimizing Corrugated Board Packaging for Exporting Industry – A Feasibility Study. Innventia Report No.: 730, Verband der Wellpappen-Industrie (VdW) e. V., Zahlen und Fakten-Daten für die Wellpappenindustrie. Ausgabe 2017, https://www.wellpappen-industrie.de/data/04_Verband/05_Publikationen/03_ZahlenFakten/ZahlenFakten-2017.pdf Abgerufen am 07.08.2017

Autoren

M.Sc. Viktoria Köstner studierte Holzwirtschaft an der Universität Hamburg und ist externe Doktorandin der Universität Hamburg am Institut für BFSV, Ulmenliet 20, 21033 Hamburg, und fungiert als Projektleiterin des IGF-Forschungsprojekts 18876 BG.

Dipl.-Ing. Benjamin Hiller studierte Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Leichtbau am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden und fungiert als Projektleiter des IGF-Forschungsprojekts 18876 BG an der Papiertechnischen Stiftung (PTS) in Heidenau/Sa.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Sadlowsky studierte Chemietechnik und promovierte als Verfahreningenieur auf dem Gebiet der Werkstoffe und Korrosion. Anschließend arbeitete er als Schadensanalytiker,

Institutsleiter und Prokurist am Institut für Materialprüfung der TÜV Rheinland Group. Zurzeit ist er Leiter des Instituts für BFSV e. V. Hamburg und Geschäftsführer der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH. Außerdem ist Sadlowsky Professor für Technische Mechanik, Werkstoff- und Verpackungstechnik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg).

Prof. Dr. Jörg B. Ressel studierte Holzwirtschaft an der Universität Hamburg. Anschließend promovierte er und arbeitete unter anderem bei der Brunner Hildebrand GmbH in Hannover und war Professor an der Fachhochschule Rosenheim im Bereich Holztechnik. Zurzeit ist er Professor für Holzphysik und Mechanische Technologie des Holzes an der Universität Hamburg im Department Holzwirtschaft.