

B. Hiller, V. Köstner:

Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klima-
abhängigen Kriechverhaltens von Wellpappe-Verpackungen
(Langzeittragfähigkeit von Verpackungen)
PTS-Forschungsbericht 06/18

Mai 2018

Papiertechnische Stiftung (PTS)
Pirnaer Straße 37
01809 Heidenau
www.ptspaper.de

Ansprechpartner:

Benjamin Hiller
Tel. (03529) 551-693
benjamin.hiller@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Institut für Zellstoff und Papier IZP
Pirnaer Straße 37
01809 Heidenau

Download-Information:

Diese Studie steht auf der Homepage der PTS
und des BFSV zum Download bereit:
www.ptspaper.de/forschungsdatenbank
www.bfsv.de/verpackungsforschung/wellpappe

M. Sc. Viktoria Köstner

koestner@bfsv.de

BFSV – Institut für Beratung, Forschung,
Systemplanung, Verpackungsentwicklung und
-prüfung
Ulmenliet 20
21033 Hamburg

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Das Forschungsvorhaben IGF 18876 BG der AiF-Forschungs-
vereinigung PTS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines
Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür sei an
dieser Stelle herzlich gedankt.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen für die Probenbe-
reitstellung und für die freundliche Unterstützung bei der Projekt-
durchführung.

IGF

Industrielle
Gemeinschaftsforschung

Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappe-Verpackungen

B. Hiller, V. Köstner

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Abstract	4
3	Einleitung	6
4	Auswahl von Musterverpackungen, Werkstoffen und repräsentativen mechanischen und klimatischen Belastungen	12
4.1	Auswahl von Musterverpackungen	12
4.2	Mechanische Belastungen	12
4.3	Klimatische Belastungen	13
5	Kurzzeitversuche zur Ermittlung viskoser Werkstoffkennwerte	15
5.1	Berechnung der Vorschubgeschwindigkeiten	15
5.2	Durchführung und Ergebnisse der geschwindigkeitsabhängigen Versuche	16
5.3	Aufnahme weiterer Werkstoffparameter	18
6	Erstellung eines viskoelastischen Materialmodells	19
6.1	Mathematische Beschreibungen der Viskoelastizität	20
6.2	Generalisiertes Maxwell-Modell	21
6.3	Auswertung der Versuche hinsichtlich des generalisierten Maxwell-Modells	23
6.4	Identifikation des plastischen Anteils	24
7	Kriechmodell und Berechnung für Werkstoffproben	26
7.1	Relaxationsmodell mittels Prony-Analyse	26
7.2	Anwendung an Werkstoffproben	27
8	Langzeitversuche an Werkstoffproben	28
8.1	Eingesetzte Prüfvorrichtungen	28
8.2	Bedingungen und Durchführung der Messreihen	30
8.3	Ergebnisse der ECT- und Biege-Langzeituntersuchungen an Werkstoffproben	31

9	Ermittlung des viskoplastischen Anteils nach Langzeitversuchen und Ermittlung des Feuchte-Shifts	34
9.1	Vergleich von Berechnungen und aufgenommenen Messungen	34
9.2	Definition und Berechnung der Shifter-Funktionen	35
10	Messung elasto-mechanischer Standard-Werkstoffkennwerte	38
10.1	Standard-Prüfverfahren zur Generierung elasto-mechanischer Werkstoffkennwerte	38
10.2	Messung und Berechnung weiterer benötigter Materialparameter	39
11	Numerisch-mechanische Simulation im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM)	42
11.1	Modellaufbau in LS-Dyna	42
11.2	Validierung des FE-Modells	44
11.3	Berechnung der Kriechkurve von Verpackungen aus Wellpappe	45
12	Langzeitversuche an Packmitteln	47
13	Auswertung Langzeitversuche vs. Ergebnisse Kurzzeitversuche	51
13.1	Vergleich der berechneten Kriechkurven aus den Werkstoffversuchen mit den Langzeitversuchen am Packmittel	51
13.2	Vergleich der FEM-Berechnungen mit den Langzeitversuchen am Packmittel	52
13.3	Einschätzung zur Güte der entwickelten Methode	54
14	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	55
	Literatur	57
	Anhang	60

1 Zusammenfassung

Zielstellung Das Vorhaben zielt auf die Entwicklung einer Methode, mit der durch spezielle Kurzzeitversuche an Wellpappenproben und einem kontinuumsmechanisch begründeten Materialmodell das last- und klimaabhängige Deformationsverhalten des Werkstoffs und daraus gefertigten Faltschachteln über einen Zeitbereich von mehreren Monaten bis hin zum Schachtelversagen berechnet werden kann.

Ergebnisse Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens gliedern sich in verschiedene Teilbereiche.

Im ersten Teilgebiet wurden zwei neue Prüfeinrichtungen zur Untersuchung von Kriechraten an Probenkörperzuschnitten zur Kantenstauch- und Biegeprüfung entwickelt und in Betrieb genommen. Die Prüfeinrichtungen wurden zusammen mit vom Institut für BFSV e. V. entwickelten Prüfeinrichtungen dazu genutzt Basisuntersuchungen über das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben durchzuführen.

Der zweite Teilbereich umfasste die Ermittlung der mechanisch-technologischen Standardwerkstoffkennwerte der vier zweiwelligen Wellpappen-Qualitäten und die geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche des Kantenstauchwiderstandes und der Biegeuntersuchung. Die Probenmaterialien entsprachen hauptsächlich der Wellpappensorte 2.90 nach DIN 55468-1:2015-06. Nur die Wellpappen-Probe 2.2 bestand aus Wellpappensorte 2.91. Die Ergebnisse der geschwindigkeitsabhängigen Versuche bestätigten, dass es sich bei Wellpappe um ein viskoelastische Material handelt. Die Festigkeits-/ Steifigkeitseigenschaften nehmen mit einer Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit zu.

Im dritten Teilbereich wurde mithilfe der Ergebnisse der geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche ein Vierfaches Maxwell-Modell erstellt und Dämpfungsspektren ermittelt. Diese wurden mithilfe der Prony-Analyse von einer frequenzabhängigen Betrachtung in eine Zeitabhängige umgeformt. Der anschließende Vergleich der gemessenen Kriechraten mit den berechneten Kriechraten offenbarte die Notwendigkeit von Shiftern zur definierten Anpassung des Kurvenverlaufs, um den Einfluss des plastischen Anteils der Verformung und der Umgebungsfeuchtigkeit mit einzubeziehen. Letztendlich war es erstmals möglich das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben zu berechnen.

Der letzte Teilbereich des Forschungsvorhabens bestand in der Materialsimulation mit Hilfe der Methode der finiten Elemente, insbesondere auf Grundlage des FE-Programms LS-Dyna. Dabei wurden alle ermittelten Werkstoffparameter und die ermittelten Erkenntnisse des Kriechverhaltens der Materialproben genutzt, um ein Simulationsmodell zu erstellen. Zur Evaluierung wurde das Modell mit den gemessenen Kriechverläufen an Wellpappen-Verpackungen verglichen. Somit war es möglich, das Kriechverhalten von Wellpappen-Verpackungen im Normklima zu berechnen.

Schlussfolgerung

Mithilfe der im Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen ist es möglich, über ein erstelltes viskoelastisches Materialmodell das Kriechverhalten von Wellpappen-Proben zu berechnen. Im Anschluss konnten alle ermittelten Ergebnisse dazu genutzt werden das Kriechverhalten einer Wellpappen-Verpackung mithilfe der Finite-Elemente-Methode im Normklima zu simulieren. Durch die neu entwickelten Prüfeinrichtungen war es möglich, die berechneten Kriechraten mit den gemessenen Kriechraten zu vergleichen und daraufhin anzupassen. Somit ist es erstmals möglich, das Langzeitverhalten von Wellpappen-Verpackungen sicher vorherzusagen ohne zeitintensive Langzeituntersuchungen durchzuführen und unnötig hohe Sicherheitsbeiwerte anzuwenden.

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

Die entwickelte Methode liefert einen wesentlichen Beitrag um vor allem KmUs die Möglichkeit zu geben, ohne kosten- und zeitintensive Untersuchungen Verpackungen bedarfsgerecht und rohstoffschonend auszulegen. Hierbei steht vor allem die Rohstoffeinsparung in Zeiten des immer stärker werdenden ökologischen Bewusstseins und der steigenden Altpapierpreise im Zentrum des Interesses. Durch die Materialsimulation werden zudem die Entwicklungszeiten der Verpackung verkürzt, wodurch die KmUs einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil erhalten. Die Sicherstellung von bedarfsgerechten Langzeitfestigkeiten von Wellpappen-Verpackungen reduziert außerdem Transportschäden und somit Imageschäden die bei KmUs entstehen könnten.

2 Abstract

Objective

The project aims to develop a method to calculate the load and climate dependent deformation behavior of the material using specific short-term tests based on the material model on corrugated board samples and the resulting manufactured folding boxes across a period of several months until box failure.

Results

The results of the research project are divided into various segments.

Two new test facilities were developed and commissioned to examine creep rates on test body blanks to carry out edge crush tests and bend tests in the first segment. The test facilities were used in combination with test facilities developed by the Institut für BFSV e. V. (Institute for Consultancy, Research, System Planning and Packaging) to carry out general examination on creep behavior on corrugated board samples.

The second segment included the determination of mechanical-technological standard material properties of four double-walled corrugated board qualities and the speed-controlled short term tests of edge crush resistance and the bend test. Sample materials corresponded mainly to corrugated board grade 2.90 as per DIN 55468-1:2015-06. Only the corrugated board sample 2.2 was of corrugated board grade 2.91. The results of the speed-controlled tests confirmed that the corrugated board is a viscoelastic material. The strength/rigidity properties rise with an increase of the test speed.

In the third segment a quadruple of the Maxwell model was created using the

results from the speed-controlled short term tests, and the attenuation spectra were determined. This was reformed from a frequency-dependent observation into a time-dependent one using the Prony analysis. The final comparison of the measured creep rates to the calculated creep rates showed the necessity of shifters for a defined adjustment of the curve progression in order to integrate the influence of the plastic portion of the deformation and the ambient humidity. Lastly, it has been for the first time possible to calculate creep behavior of corrugated board samples.

The last segment of the research project was a material simulation using the method of finite elements, specifically based on the FE-program LS-Dyna. For this, all determined material parameters and the findings about the creep behavior of the material samples were used to create a simulation model. For evaluation, the model with the measured creep progression was compared to corrugated board packaging. Thus, it was possible to calculate the creep behavior of corrugated board packaging in a normal climate.

Conclusion

Based on the completed examinations during the research project, it is possible to calculate the creep rate of corrugated board samples using a created viscoelastic material model. Following this, all determined results could be used to simulate the creep behavior of corrugated board packaging using the finite element method in a normal climate. Thanks to the newly developed test facility, it was possible to compare and accordingly adjust the calculated creep rates to the measured creep rates. Thus, it was possible for the first time to confidently predict the long term behavior of corrugated board packaging without the need for time intensive long term studies and without the need for unnecessarily high safety factors.

Benefit and economic meaning of the research topic for small and medium enterprises (SME)

The developed method provides an essential contribution to give SMEs in particular the opportunity to design packaging which is fit for purpose whilst conserving raw materials without the need for cost and time intensive studies. Conservation of raw materials is the primary interest in times when ecological awareness rises and waste paper costs increase. Furthermore, development times for packaging are shortened thanks to the material simulation which gives SMEs a decisive competitive edge. Safeguarding needs-based long term strengths of corrugated board packaging also reduces transport damage and thus protects the brand image damage of SMEs.

3 Einleitung

Aktuelle Zahlen zum Wellpappenmarkt

Wellpappe ist mit einem Anteil von 64,2 % die wichtigste Transportverpackung für den nationalen und internationalen Versand von Waren. Die Produktion von Papier, Karton und Pappe insgesamt nahm in den Monaten Januar bis August 2017 im Vergleich zum selben Zeitraum des Vorjahres um 0,9 % zu. Die Produktion von Papier, Pappe und Karton für Verpackungszwecke stieg sogar um 2,9 % an. In dem Zeitraum von Januar bis August 2017 wurden 7,850 Mio. t Papier, Pappe und Karton für Verpackungszwecke produziert [1]. 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 Wellpappenanlagen in Deutschland beträgt 104 mit insgesamt 19.200 Beschäftigten. Im Jahr 2016 konnte so ein Umsatz von ca. 5 Mrd. € erwirtschaftet werden [2]. Besonders hervorzuheben ist zudem, dass der Verbrauch von Altpapier um 0,7 % und die Altpapiereinsatzquote um 1,0 % im Vergleich zum Vorjahr gestiegen sind [1], [2]. Die Produktion von Wellpappe unterliegt durch die Industrie und den Handel einem hohen Kostendruck. 50 % der Gesamtkosten zur Herstellung von Wellpappe werden durch die Rohstoffkosten der Papiersorten bestimmt. In den letzten Jahren stiegen die Preise für Wellpappenerzeugnisse um ca. 3,1 %, die Preise für die Wellpappenrohstoffe jedoch um bis zu 20 %. Zusätzlich stiegen 2013 die Energiekosten, welche ca. 3 % der Wellpappenherstellungskosten ausmachen, um 4,3 % [3]. Trotz der hohen Rohstoffpreise werden Transportverpackungen aus Wellpappe einerseits zwar oft um ein Mehrfaches überdimensioniert, um vermeintlich auftretende Schäden am Transportgut zu vermeiden, andererseits könnten rund 70 % aller Transportschäden im Export – jährlich ca. 300 Millionen Euro - durch eine sachgemäße Verpackung vermieden werden [4]. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) schätzt die jährliche Warenschäden sogar auf bis zu 4 Milliarden Euro. Um im Zuge der Globalisierung dem Kostendruck des Marktes standhalten zu können, ist es unabdingbar, das Langzeitverhalten von Wellpappe genauer bestimmen zu können, um sowohl den Rohstoffeinsatz bei gleichbeliebender Festigkeit und somit die Herstellungskosten reduzieren, als auch Schäden verringern zu können.

Aktuelle Prüfverfahren zur Qualitätsbestimmung und deren Grenzen

Beim Einsatz von Wellpappe- und Schwerwellpappe-Verpackungen in europäischen und weltweiten Versandprozessen treten bei Transport, Umschlag und Lagerung sehr komplexe mechanische und klimatische Belastungen auf. Eine Qualitätsdefinition für Schwerwellpappen, die die dafür wesentlichen Anforderungen berücksichtigt, ist mit den bisher verwendeten Parametern zur Charakterisierung des Werkstoffs nicht möglich. Etabliert sind bisher vorrangig unter Normal-klima ausgeführte quasistatische Prüfverfahren zur Bestimmung der Berstfestigkeit, der Durchstoßarbeit, des Kantenstauchwiderstands (ECT), der Biegesteifigkeit, des Flachstauchwiderstands sowie der Prüfung der Verklebung. Auf der Grundlage dieser Möglichkeiten werden Verpackungen für den Versand größtenteils mehrfach überdimensioniert. Es fehlen die gezielte Erfassung und Auswertemöglichkeit viskoser Eigenschaften, die für das Kriechverhalten eines Werkstoffes maßgebend sind. Grundsätzlich wird ein Standard benötigt, der die Leistungsfähigkeit von Wellpappe bzw. Verpackungen insbesondere unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens erfasst.

Vorangegangene Untersuchungen der Forschungsstellen

Durch das am Institut für BFSV an der HAW Hamburg durchgeführte AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14836 N, „Entwicklung eines Qualitäts-Standards für Schwerwellpappe unter Berücksichtigung mechanisch/klimatischer Belastungen in internationalen Logistikketten“ (Schlussbericht 2009) [5], wurde ein bedeutender Teil der Vorarbeit geleistet, indem in umfangreichen Versuchsreihen zur Ermittlung der Langzeitbelastbarkeit (Zeit bis zum Versagen) verschiedene Zusammenhänge bzw. Korrelationen mit Werkstoffkenngrößen aus quasistatischen Standard-Prüfverfahren gesucht wurden. Damit stehen u. A. einige der benötigten Langzeitversuche an der am weitesten verbreiteten Packmittelkonstruktion für Wellpappenverpackungen FEFCO 0201 zur Verfügung, die zur Validierung der neu vorgeschlagenen Methode mit herangezogen werden können. Im angesprochenen Forschungsvorhaben wurden u. a. die tatsächlich in Versuchen erreichte Langzeitbelastbarkeit der Zuordnung zu den Wellpappe-Qualitäten gemäß DIN 55468-1 und den Maximallasten aus dem BCT (Box Compression Test) gegenübergestellt. Aus der Auswertung dieser Gegenüberstellungen wird das Defizit in der Werkstoffcharakterisierung durch die verfügbaren Normen bezüglich der Dauerbelastbarkeit deutlich, da sich aus diesen Prüfparametern die Deformationsraten bis hin zum Schachtelversagen nicht ableiten lassen. Darüber hinaus wurde der Zusammenhang von gemessenen Langzeitbelastbarkeiten zu geschwindigkeitsabhängigen Kantenstauchwiderständen ECT (Edge Compression Test) untersucht. Ein direkter Zusammenhang ist auch hier augenscheinlich nur schwer erkennbar.

Dennoch liefert genau dieser Schritt den wegweisenden Ansatz, über ein geeignetes kontinuumsmechanisches Materialmodell auf der Grundlage gezielt festgelegter Versuchsgeschwindigkeiten und der Verknüpfung mit den tatsächlichen Verpackungsgeometrien einen Zusammenhang zwischen viskoelastischen und langzeitlichen Materialeigenschaften herzustellen.

Notwendigkeit des Forschungsprojekts für KMU

Um eine Methode zu entwickeln, zu validieren und zu verifizieren, die das Kriechverhalten von Verpackungen vorhersagen kann, bedarf es u. a. der Durchführung und Gegenüberstellung der Kurzzeitversuche und Berechnungen aus dem theoretischen Ansatz mit den tatsächlich bei untersuchten Verpackungen auftretenden zeitlichen Deformationsverläufen in Dauerstandversuchen, was für einzelne Unternehmen / Verpackungslösungen durchgeführt unwirtschaftlich wäre.

Grundlagen Wellpappe

Wellpappe besteht aus einer oder mehreren Lagen gewellten Papiers (Fluting), welche zwischen mehrere ebene Lagen eines anderen Papiers oder Kartons (Liner) durch vorwiegend Klebstoffe auf Stärkebasis geklebt ist. Damit ergibt sich eine durch die Wellenform bedingte formstabile Leichtbaukonstruktion, (s. [6], [7]). Die gängigste Art ist einwellige Wellpappe, bestehend aus einer Außendeckbahn, einer Wellenbahn und einer Innendeckbahn, welche jedoch nur geringe Festigkeitswerte aufweist. Mehrwellige Pappen erzielen hingegen besonders hohe Festigkeitswerte und sind daher prädestiniert für den Einsatz als Langzeittransportverpackungen. Wellpappe gilt als bevorzugter Packstoff und macht 64,2 % der Transportverpackungen aus [2].

Schwerwellpappen werden überwiegend zum Verpacken von Industriegütern aus allen Bereichen (auch Schüttgüter) mit größerem Volumen eingesetzt. Dabei

überwiegt der weltweite Containerversand, dessen Umfang im stetigen Wachstum mit inbegriffen ist.

Nach DIN 55468-1:2015-06 (Packstoffe - Wellpappe - Teil 1: Anforderungen, Prüfung) werden nachfolgende Wellpappensorten unterschieden:

- überwiegend für Lagerbeanspruchung vorgesehen (Sortenbezeichnung 1.01 bis 1.05 und 2.02 bis 2.06)
- zusätzlich für Transportbeanspruchung vorgesehen (Sortenbezeichnung 1.10 bis 1.50 und 2.20 bis 2.70)
- Schwerwellpappen (Sortenbezeichnung 2.90 bis 2.96)

Die Zuordnung zur steigenden Sortennummer erfolgt durch die Erfüllung von ebenfalls steigenden Mindestanforderungen an Berstfestigkeit [kPa], Durchstoßarbeit [J] und Kantenstauchwiderstand [kN/m]. An der PTS werden mittels verschiedener Prüfungen die Charakterisierung und Bestimmung der Wellpappensorten vorgenommen, s. [8], [9], [10].

Bestimmung des Stauchmaximums nach DIN 55440-1:1991-11

Die Bestimmung des Stauchmaximums (BCT-Wert, BCT = Box Compression Test) nach DIN 55440-1:1991-11 und DIN EN ISO 12048:2000-12 beim Normal-klima 23 °C / 50 % RH ist das in der Industrie am häufigsten verwendete Prüfverfahren zur Beurteilung und Überprüfung der maximalen Tragfähigkeit von Wellpappe-Verpackungen. Bei dieser Kurzzeitprüfung wird auf die leere verschlossene Verpackung eine gleichmäßig über den Schachtelumfang verteilte Last unter quasistatischen Bedingungen bis zum Bruch der Verpackung aufgebracht, vgl. Abbildung 1. Der Stapelstauchwiderstand liefert Kenntnisse über die Tragfähigkeit von Wellpappenverpackungen unter festgelegten, labortechnischen Bedingungen.



Abbildung 1: Untersuchung des Stapelstauchwiderstands

Grenzen der standardisierten BCT-Messung

Die tatsächlich in der Praxis auftretenden Beanspruchungen bei Transport, Umschlag und Lagerung, die über einen langen Zeitraum ablaufen und bei möglicherweise wechselnden Klimabedingungen stattfinden, werden bei der Untersuchung des Stapelstauchwiderstands nicht erfasst. Aus diesem Grund werden in der Praxis sogenannte Sicherheitsfaktoren von 3 bis 5 bezogen auf den Stapelstauchwiderstand verwendet. Dies bedeutet, dass nur ca. 20-30 % des für

diese Verpackung getesteten maximalen BCT-Wertes als tatsächliche Festigkeit der Verpackung angesetzt werden, s. [11].

Das Fehlen einer Standardisierung zum Zeitstandverhalten von Wellpappenverpackungen, insbesondere im elastischen Verformungsbereich, erforderte Langzeituntersuchungen über den Stapelstauchwiderstand von im Überseeversand eingesetzten Wellpappenverpackungen, s. [5].

Einflussparameter auf den BCT

Seit den 1960er Jahren ist bekannt, dass der BCT-Wert von der Biegesteifigkeit und dem ECT-Wert der Wellpappe beeinflusst wird. Dieser Zusammenhang wurde durch Untersuchungen am Institute of Paper Chemistry in Appleton, Wisconsin (IPST) durch McKee, Gander und Wachuta festgestellt. Die Versuche wurden an einwelligen Wellpappen mit geringen Festigkeiten durchgeführt. Das Ergebnis der Forschungen lieferte eine abschätzende Formel (1), mit deren Hilfe von der Biegesteifigkeit und dem ECT-Wert auf den Stapelstauchwiderstand von fertigen Wellpappeschachteln geschlossen werden kann, s. [12]. Diese Formel (1) wird auch McKee-Formel genannt und besagt:

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

$BCT =$ Schachtelstauchwiderstand [N]

$ECT =$ Kantenstauchwiderstand [kN/m]

$Sb = \sqrt{Sb_{MD} \times Sb_{CD}} =$ geometrische Mittelwert der Biegesteifigkeit [Nm]

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

$Z =$ Umfang der Schachtel [mm]

Da die Biegesteifigkeit früher nur selten gemessen wurde, vereinfachte man die Form der McKee-Formel. Bei dieser modifizierten Version wird die Biegesteifigkeit durch die Dicke der Wellpappe ersetzt. Dies ist möglich, da vor allem die Entfernung der neutralen Biegeachse der Metallplatte zur Mitte der Oberflächenliner den BCT-Wert beeinflusst (2), s. [11].

$$BCT = k_2 \times ECT^\beta \times T^{1-\beta} \times Z^{2\beta-1} \quad (2).$$

$T =$ Dicke der Wellpappe [mm]

Des Weiteren vernachlässigt die vereinfachte Formel die effektive Biegesteifigkeit und sollte, v. a. für Vergleichszwecke, nur unter bestimmten Voraussetzungen verwendet werden, s. [11]. Bei der Anwendung der McKee-Formel muss vor allem beachtet werden, dass diese auf der Grundlage von Untersuchungen von einwelligen Wellpappen mit geringen Festigkeiten entwickelt worden ist. Um die Formel für zwei- und dreiwellige Wellpappen anwenden zu können, müssen die Konstanten β und k für jede Wellpappensorte einzeln bestimmt werden, s. [5].

Kriechen von Werkstoffen

Viskose Eigenschaften eines Werkstoffes sind maßgebend für sein Kriechverhalten. Durch sie werden zeit- und geschwindigkeitsabhängige Werkstoffeigenschaften beschrieben.

Im Rahmen einer kontinuumsmechanischen Einordnung nach grundlegenden Werkstoffmodellen kann Papier/Pappe ein viskoplastisches orthotropes Materialverhalten zugeordnet werden. Bei viskoplastischen Kriechen, d. h. bei Aufnahme einer Kriechdeformation (Dehnung) über die Zeit, können meist drei Phasen unterschieden werden:

- anfangs primäres Kriechen als transiente Phase, die z. B. bei tiefen Temperaturen und höheren Deformationsgeschwindigkeiten bei Polymeren stark nichtlinear ist,
- anschließend sekundäres Kriechen mit konstanten (linearen) Kriechraten,
- abschließend, vor dem Bruch, tertiäres Kriechen, wiederum nichtlinear, s. [13], [14], [15].

Für alle Phasen können durch die messtechnische Erfassung über einen längeren Zeitraum werkstoffspezifische Kriechverläufe bzw. Kriechgesetze mittels Exponentialfunktionen angegeben werden. Für die meisten Materialien steigt bei höheren Temperaturen die Kriechrate, wobei Temperaturänderung durch sogenanntes (Zeit)-Shiften im Kriechverlauf beschrieben wird.

Wird eine Schachtel aus Wellpappe zusätzlich zu einer Druckbelastung bei wechselnden Raumlufffeuchten gelagert, kommt es zum mechano-sorptiven Kriechen. Hierbei kommt es zu einer Überlagerung des Quellverhalten und des durch die Druckbelastung bewirkten Kriechens. Aus diesem Grund steigt die Kriechverformung in der Trocknungsphase an und sinkt in der Durchfeuchtungsphase, s. [16].

Kriechen von Verpackungen

Wellpappe neigt, wie alle Papierprodukte, bei einer erhöhten Luftfeuchtigkeit und einer aufgetragenen Last zum Kriechen. Besonders bei der Betrachtung der Langzeitfestigkeit von Wellpappe im weltweiten Containerversand muss der Effekt des Kriechens genauer untersucht werden, denn Schachteln aus Wellpappe verlieren durch Kriech- und Relaxationsvorgänge bei einer Luftfeuchtigkeit von 90 % und einer Lagerzeit von sechs Monaten unter einer Belastung ca. 60 % ihrer Druckfestigkeit, s. [7].

Versteht man die konstruktiv gegliederte Geometrie einer Schachtel als homogenisiertes Objekt, lassen sich die für Kontinua dargestellten Phasen des Kriechens im Kriechverlauf der Schachtel wiederfinden, vgl. Abbildung 2.

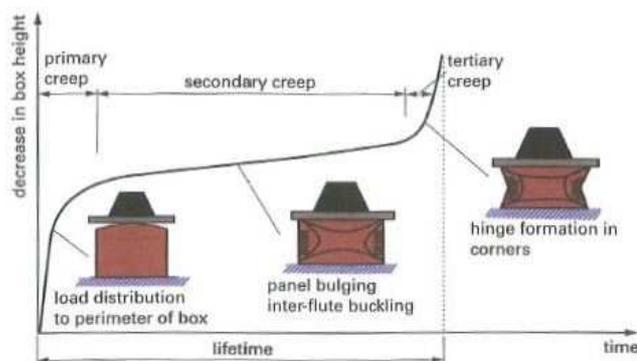


Abbildung 2: Phasen im Kriechverlauf einer Wellpappen-Verpackung [15]

Im Primärbereich erfolgt eine Umverteilung der Last auf den Schachtelumfang, wodurch die Kriechverformung steil ansteigt. Der Sekundärbereich beschreibt den längsten Verformungsprozess der Schachtel mit flach ansteigendem Verlauf. Die Schachtelseiten knicken ein und es entstehen Knicke zwischen den Wellen in den Ecken der Schachtel. Durch die Bildung eines Falzes wird das Versagen der Schachtel eingeleitet und die Kriechverformung steigt progressiv an (Tertiärbereich), s. [15]. Wird eine Schachtel aus Wellpappe zusätzlich zu einer Druckbelastung bei wechselnden Raumluftfeuchten gelagert, kommt es zum mechano-sorptiven Kriechen, vgl. Abbildung 3.

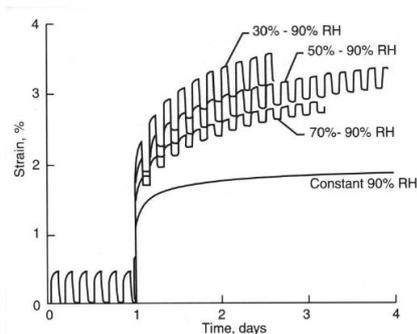


Abbildung 3: Mechano-sorptives Kriechen von Wellpappe [14]

Hierbei kommt es zu einer Überlagerung des Quellverhalten und des durch die Druckbelastung bewirkten Kriechens. Aus diesem Grund steigt die Kriechverformung in der Trocknungsphase an und sinkt in der Durchfeuchtungsphase, s. [16]. Weiterhin zeigt die Graphik, dass die Kriechrate im Vergleich zu einer konstanten Feuchte erhöht ist. Am stärksten ist der Effekt des mechano-sorptiven Kriechens von Wellpappen in den Tropen - aufgrund der tageszeitlichen Klimaschwankungen - zu beobachten, s. [14].

Beschreibung Viskoelastizität

Das viskoelastische Materialverhalten kann als Teil-Phänomen der Viskoplastizität verstanden werden, in dem wie bei allgemeiner Plastizität, auftretende Deformationen in reversible und irreversible zeit- und geschwindigkeitsabhängige Anteile zerlegt werden. Viskoelastizität lässt sich im Gegensatz zur Viskoplastizität durch die einmalige Ermittlung weniger werkstoffspezifischer Kennwerte sehr umfangreich - und vor allem über den Zeitbereich der Kennwertermittlung hinaus - thermomechanisch konsistent beschreiben, s. [17], [18].

Dieser Beschreibung liegen generell Feder-Dämpfer-Modelle zu Grunde. Im Rahmen eines generalisierten Maxwell-Modells sind z. B. für eine n-fache Parallelschaltung n Feder- und n Dämpferkonstanten für den Werkstoff zu ermitteln, s. [19]. Dabei werden Dämpfer mit gestaffelter Empfindlichkeit bezüglich der Geschwindigkeit und Federn mit gestaffelter Empfindlichkeit bezüglich der Kraft angeordnet. Die Dämpfer beeinflussen dann sowohl bei kurzzeitiger Belastung in der entsprechenden Geschwindigkeit die Deformationen (direkte Betrachtung) als auch bei länger währenden sich anpassenden Deformationen nach einmalig schnell aufgebrachter Last (inverse Betrachtung). Eine Berechnung des Relaxationsmodelles für die Behandlung letzterer Problemstellung nach diesem, der inversen Fourier-Transformation verwandten Vorgehen, erfolgt im Rahmen der Prony-Analyse.

4 Auswahl von Musterverpackungen, Werkstoffen und repräsentativen mechanischen und klimatischen Belastungen

4.1 Auswahl von Musterverpackungen

Probenmaterial und -geometrie auf Grundlage häufiger Nutzungswerte

Das Ausgangsmaterial umfasste zweiwellige Wellpappen von verschiedenen Herstellern. Die Wellpappen-Verpackung besaßen die Bauart FEFCO 0201 (vgl. Abbildung 4), da dies die weltweit meist genutzte Verpackungsform darstellt. Die Abmessungen der Verpackungen richteten sich nach den Maßen der EUR-Palette 800 x 1200 mm. Die Höhe wurde mit 400 mm frei gewählt. Hierbei wurde beachtet, dass die Höhe im Verhältnis zum Umfang der Verpackung in einem zur Anwendung der McKee-Formel angemessenen Verhältnis steht und um ein sehr frühes Ausbeulen der Verpackung zu verhindern.

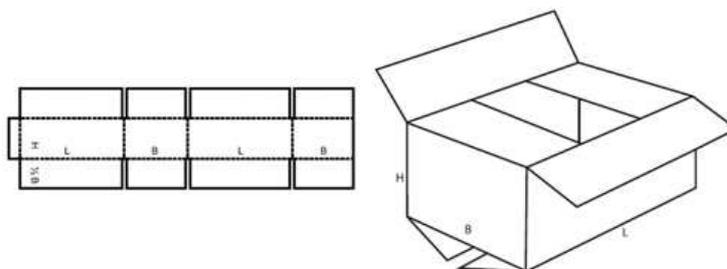


Abbildung 4: Wellpappen-Verpackung nach FEFCO 0201

Vor Beginn der Versuche wurden die Wellpappen-Proben im Normklima bei einer Temperatur von $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(50 \pm 2)\%$ klimatisiert (DIN EN 20187:1993).

4.2 Mechanische Belastungen

Analyse und Definition der auf eine Verpackung wirkenden Belastungswerte

Die Standardprüfungen für Wellpappe liefern Kenntnisse über die mechanisch-technologischen Festigkeitseigenschaften unter festgelegten, labortechnischen Bedingungen. Dabei werden die tatsächlich in der Praxis auftretenden Beanspruchungen bei Transport, Umschlag und Lagerung, die über einen langen Zeitraum ablaufen und bei möglicherweise wechselnden Klimabedingungen stattfinden, nicht erfasst. Aus diesem Grund werden in der Praxis sogenannte Sicherheitsfaktoren eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ca. 20-30 % des für diese Verpackung im Normklima ($23^\circ\text{C} / 50\% \text{ RH}$) getesteten maximalen BCT-Wertes. Dieser Wert wird als verlässlich bezeichnet, wenn es um die Berechnung der Tragfähigkeiten von Transportverpackungen unter Praxisbedingungen geht, s. [11]. Aufgrund dessen wurden die Langzeitversuche mit einer Belastung von 15 %, 25 % und 33 % des im Normklima gemessenen Maximalwertes der jeweiligen Standarduntersuchung (Kantenstauchwiderstand, Biegesteifigkeit, Stapelstauchwiderstand) durchgeführt.

4.3 Klimatische Belastungen

Allgemeine Definitionen und klimatischen Belastung der Werkstoffproben

Alle Langzeitversuche wurden im Normklima (23 °C / 50 % RH), im Feuchtklima (23 °C / 90 % RH) und im Wechselklima durchgeführt. So war es möglich, das Kriechverhalten zunächst im Normklima zu berechnen, dann dem Feuchtklima anzupassen und am Ende dem erhöhten Kriechen im Wechselklima gegenüber zu stellen.

Das Wechselklima der Wellpappenproben (Biege- und Druckuntersuchungen) entspricht dem abgebildeten achtstündigen Klimazyklus.

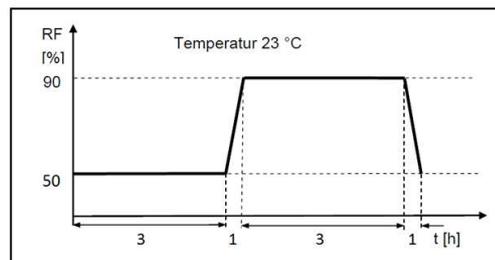


Abbildung 5: Wechselklima für Langzeituntersuchungen an Probenkörperzuschnitten der ECT- und Biegeprüfung

Das Wechselklima begann bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und wechselte nach einer dreistündigen konstanten Phase innerhalb einer Stunde auf eine relative Luftfeuchtigkeit von 90 %. Nach einer dreistündigen konstanten Phase wurde die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb einer Stunde auf 50 % reduziert und der Zyklus begann von neuem. Der gesamte Zyklus wurde mit einer konstanten Temperatur von 23 °C durchgeführt.

Wechselklima für Untersuchungen der Wellpappen-Verpackungen

Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt das 24-stündige Wechselklima für die Langzeitversuche an Wellpappen-Verpackungen.

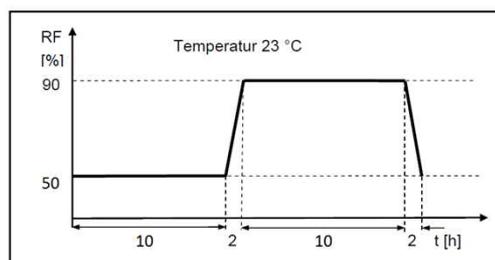


Abbildung 6: Wechselklima für Langzeituntersuchungen an Wellpappen-Verpackungen

Das Wechselklima der Wellpappen-Verpackungen begann bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und wechselte nach einer zehnstündigen konstanten Phase innerhalb von zwei Stunden auf eine relative Luftfeuchtigkeit von 90 %. Nach einer zehnstündigen konstanten Phase wurde die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb von zwei Stunden auf 50 % reduziert und der Zyklus begann von neuem. Der gesamte Zyklus wurde mit einer konstanten Temperatur von 23 °C durchgeführt.

**Einheitliche
Prüftemperatur
von 23 °C**

In allen Versuchen wurde lediglich der Wechsel der Umgebungsfeuchtigkeit als variable Größe angesehen. Dies hat mehrere Gründe: Zunächst ist Wellpappe als hygroskopisches Material hinsichtlich seiner Festigkeitswerte besonders von Schwankungen der Umgebungsfeuchtigkeit abhängig. Des Weiteren ist die Überlagerung von Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung im Rahmen eines einzelnen Projekts nicht umsetzbar. Hier läge potentieller weiterer Forschungsbedarf. Im ersten Schritt war es daher das Ziel, den Haupteinflussfaktor auf die Langzeittragfähigkeit zu untersuchen.

5 Kurzzeitversuche zur Ermittlung viskoser Werkstoffkennwerte

Analyse der im Werkstoff wirkenden Beanspruchungen

Zur Konzeptionierung der durchzuführenden Messungen musste das Belastungssystem eines Wellpappe-Packmittels hinsichtlich seiner mechanischen Gesichtspunkte analysiert werden. Grundlage hierfür war die Stapelung mehrerer Verpackungen für einen längeren Transport und die Formel nach McKee [12]. Das sich daraus ergebende Lastprofil ist auf folgender Abbildung 7 zu erkennen.

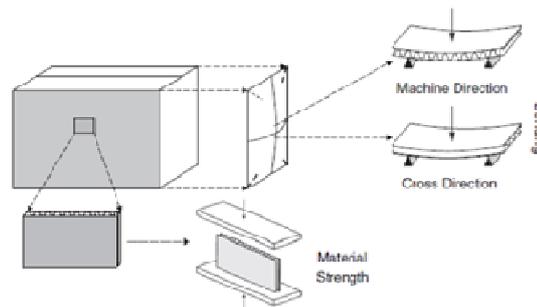


Abbildung 7: Lokale Beanspruchungen aufgrund flächig eingeleiteter Kraft auf den Deckel der Wellpappen-Verpackung [20]

Bedeutend für den Entwurf der Kurzzeitversuche waren, unter Berücksichtigung des dreidimensionalen Spannungszustandes in den Verpackungswänden, die Beanspruchungen, die zum einen in den Langzeit-Druckversuchen initiale geometrische Veränderungen aus der annähernd idealen Systemgeometrie heraus hervorrufen. Das sollte vor allem Druck (Stauchung) in der Ebene der Verpackungswand sein. Nach dem Ausweichen, welches lange vor dem Systemversagen stattfindet, sind zum anderen auftretende Biegebelastungen neben den Druckbelastungen die vorherrschenden lokalen Beanspruchungen.

Aus den erarbeiteten Grundlagen ergaben sich zwei lokale Hauptbelastungen, die im Folgenden untersucht wurden:

- Druck in der Verpackungswand → Messung gemäß ECT und
- analog Biegung → Messung gemäß Biegesteifigkeit (MD/CD).

Die Geschwindigkeiten mit denen die Prüfungen durchgeführt wurden, waren von den Vorschubgeschwindigkeiten der Universalprüfmaschinen an FS 1 und FS 2 abhängig. Um ein möglichst breites Spektrum der Werkstoffeigenschaften aufzunehmen, wurden diese Grenzen in beide Richtungen jedoch weitestgehend ausgenutzt.

5.1 Berechnung der Vorschubgeschwindigkeiten

Berechnung der Geschwindigkeiten für die ECT-Versuche

Die Geschwindigkeiten mit denen die Versuche durchgeführt wurden, mussten für jeden Anwendungsfall separat berechnet werden. Grundlage hierfür waren die folgenden Berechnungen. Die Geschwindigkeiten orientierten sich hier an den maximalen Vorschubgeschwindigkeiten der an den Forschungsstellen

verfügbaren Universalprüfmaschinen. Für die Versuche, angelehnt an den ECT, wurden folgende Geschwindigkeiten festgelegt, welche sich aus der konstanten Probekörperhöhe von 25 mm ergeben (vgl. Tabelle 1):

Tabelle 1: Vorschubgeschwindigkeiten für ECT-Versuche

Dehnrates in s ⁻¹	Vorschubgeschwindigkeit in mm/min
0,1	150
0,01	15
0,001	1,5
0,0001	0,15

Berechnung der Geschwindigkeiten für die Biegeversuche

Bei den Versuchen zur Messung der Biegesteifigkeit/-festigkeit mussten die definierten Dehnrates in den Decklagen des Werkstoffs erreicht werden. Aus diesem geometrischen Zusammenhang (siehe Anhang A1) ergab sich der Einfluss der Probendicke auf die Vorschubgeschwindigkeit, wie in folgender Formel (3) zu erkennen:

$$v = \frac{2}{3} \times \frac{\delta}{100} \times \frac{l_1}{d} \times \left(l_1 + \frac{3}{2} \times l_2 \right)$$

δ ... Dehnungsgeschwindigkeit der Probenoberseite in %/min

d ... Probekörperdicke in mm

l_1 ... Abstand von oberen und unteren Auflager in mm

l_2 ... Auflagerabstand unten in mm

(3).

Am Beispiel der Wellpappe des Herstellers 2 mit einer Dicke von 9,05 mm und den aus der Norm entnommenen geometrischen Festlegungen (Auflagerabstand unten 200 mm, Auflagerabstand oben 350 mm) ergaben sich die in Tabelle 2 genannten Vorschubgeschwindigkeiten. Die Dehnrates wurden aufgrund der begrenzten maximalen Vorschubgeschwindigkeiten der Universalprüfmaschinen angepasst (vgl. Tabelle 2):

Tabelle 2: Vorschubgeschwindigkeiten für Biegeversuche (Hersteller 2)

Dehnrates in s ⁻¹	Vorschubgeschwindigkeit in mm/min
0,00700	870,17
0,00467	580,52
0,00234	290,88
0,00001	1,24

5.2 Durchführung und Ergebnisse der geschwindigkeitsabhängigen Versuche

Ergebnisse der geschwindigkeitsdifferenzierten ECT-Versuche

Sowohl die Versuche an FS 1, wie auch an FS 2 ergaben die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften. Je höher die Belastungsgeschwindigkeit, desto größer Steifigkeit und Festigkeit der Wellpappen. Als Beispiel ist dies in folgender Abbildung für die nicht nassfeste Wellpappe des Herstellers 2

dargestellt (Probe 2.1) (siehe Abbildung 8):

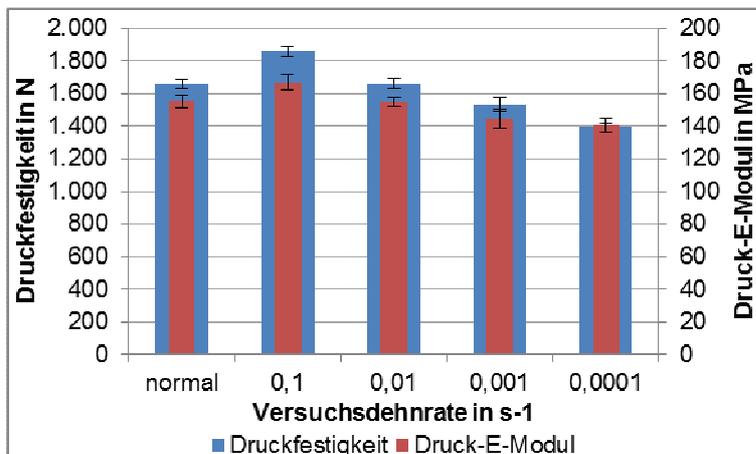


Abbildung 8: Absolute Druckfestigkeit und Druck-E-Modul bei geschwindigkeitsgesteuerten ECT-Versuchen (Probe 2.1)

Als Vergleich ist in Abbildung 8 zusätzlich die normgerechte Vorschubgeschwindigkeit für ECT-Versuche von 12,5 mm/min aufgezeigt, was einer Dehnrate von 0,00833 s⁻¹ im Werkstoff entspricht und somit nahezu identisch der dritten Dehnrate von 0,01 s⁻¹ ist.

Ergebnisse der geschwindigkeits gesteuerten 4-Punkt-Biegeversuche

Abbildung 9 zeigt die Biegesteifigkeit in Abhängigkeit von den generierten Geschwindigkeiten (V1: 1,5845 mm/min, V2: 15,845 mm/min, V3: 158,45 mm/min). Bei der Betrachtung von Abbildung 9 fällt auf, dass auch hier der erwartete Zusammenhang besteht: Je höher die Prüfgeschwindigkeit desto höher ist die gemessene Festigkeit bzw. Steifigkeit.

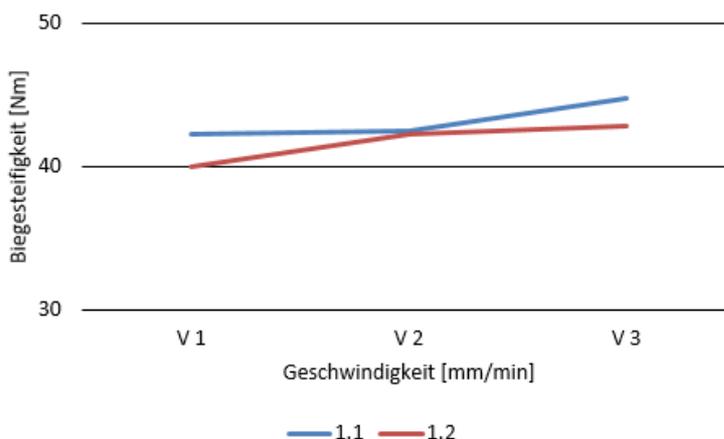


Abbildung 9: Ergebnisse der geschwindigkeitsgesteuerten Kurzzeitversuche (Hersteller 1: 1.1 nicht nassfest; 1.2 nassfest)

5.3 Aufnahme weiterer Werkstoffparameter

Messung der Zugbelastungen als Referenzgröße

Referenzmessungen für das Verhalten der Wellpappe bei Zugbelastung konnten nicht aufgenommen werden, da es beim Einspannen der Wellpappe zu erheblichen Schädigungen am Material kam und jegliche Messung zu einem Klemmriss führte, wie auf folgender Abbildung 10 einer bereits eingespannten und geprüften Wellpappe zu erkennen.



Abbildung 10: Schadensbild beim Zugversuch an Wellpappe

Versuche die Hohlräume in der Wellpappe mit verschiedenen Füllmaterialien zu schließen waren nicht erfolgreich. Da die Zugbelastung jedoch lediglich als Referenzmessung angedacht war und nur Druck- sowie Biegeversuche von Interesse sind, stellt dies keine Schwierigkeit zur Erarbeitung der Methode dar.

Ermittlung der Elastischen Grenzen der Werkstoffe

Um die elastischen Grenzen des Werkstoffs bestimmen zu können, wurden Hystereseversuche durchgeführt. Angelehnt an die Maximal ertragbare Kraft wurde der Werkstoff in definierten Stufen belastet und wieder entlastet. Die bleibende Verformung war irreversibel und das Material hat sich lokal begonnen zu plastifizieren (siehe Abbildung 11).

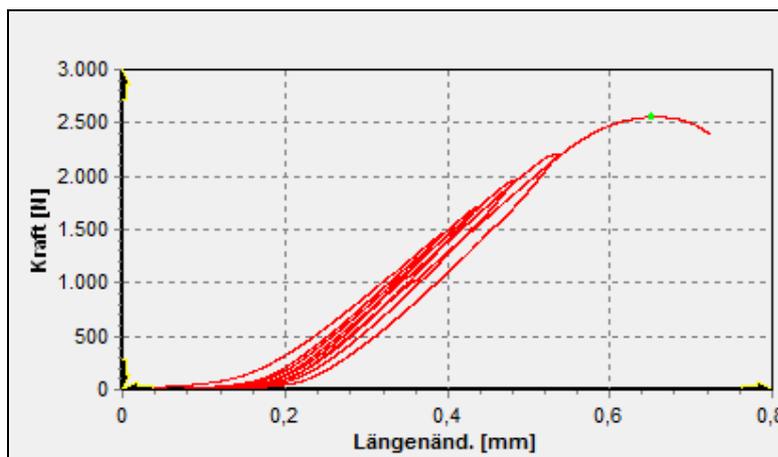


Abbildung 11: Kraft-Weg-Diagramm eines ECT-Hystereseversuchs

Dieser Effekt ist bei Wellpappe jedoch sehr gering, wie im Diagramm zu erkennen ist, und beginnt erst nahe am eigentlichen ertragbaren Kraftmaximum.

6 Erstellung eines viskoelastischen Materialmodells

Elastizität und Plastizität als grundlegende Werkstoffeigenschaften

Papierartige Werkstoffe weisen keine reinen elastischen oder plastischen Eigenschaften bei Verformungsvorgängen auf. Elastisches Verhalten definiert sich über keinerlei bleibende Deformation nach einem Belastungsanstieg (siehe Abbildung 12), rein plastisches Verhalten wiederum über eine irreversible Verformung (siehe Abbildung 13).

Linear elastisches Materialverhalten

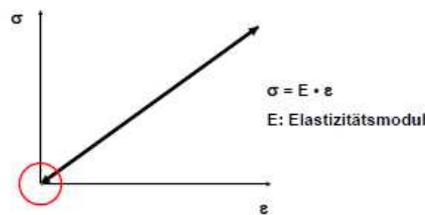


Abbildung 12: Rein Linear elastisches Materialverhalten

Plastisches Materialverhalten

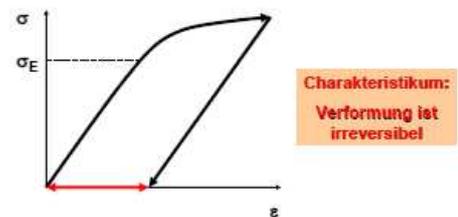


Abbildung 13: Rein Plastisches Materialverhalten

Viskoelastisches Materialverhalten von Papier und Wellpappe

Der Belastungspfad eines papierartigen Werkstoffs kann keinem dieser beiden Varianten zugesprochen werden. Wird eine Zugprobe eines Papiers oder Kartons definiert belastet und die Belastung konstant über einen definierten Prüfzeitraum belassen, so kommt es zu einem zeitabhängigen Verhalten des Werkstoffs und einer langsam voranschreitenden Verformung (vgl. Abbildung 14).

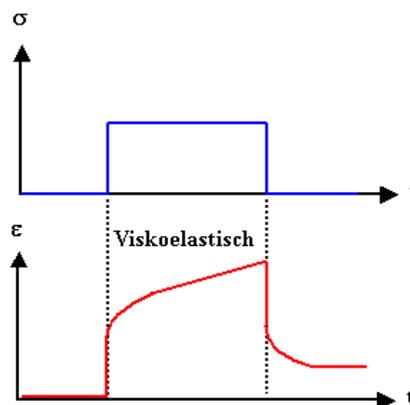


Abbildung 14: Materialverhalten von Papier bei einer aufgebracht und bleibenden Belastung (oben: Lastpfad, unten: Verformung des Materials)

Diese Verformung kann neben dem Einfluss einer längeren Einwirkdauer der Kraft auch von den klimatischen Umgebungsbedingungen und der Geschwindigkeit der aufgebracht Belastung abhängen. Das Material weist somit Eigenschaften der Viskoelastizität auf, was es ermöglicht, auf die mathematischen Beschreibungen dieses Materialverhaltens zurückgreifen zu können [17, 18].

6.1 Mathematische Beschreibungen der Viskoelastizität

Übersicht

Zur Beschreibung eines viskoelastischen Materialverhaltens gibt es Modelle, wie den Kelvin- oder den Maxwell-Körper. Diese Elemente beschreiben das skizzierte Verhalten, indem sie eine Schaltung aus Feder- und Dämpferelement bilden. Die Feder dient in diesem Aufbau zur Wiedergabe der spontanen Ausdehnung des Materials, der Dämpfer wirkt als zeitabhängiges Element, welches sich bei aufrechterhaltener Spannung einer zeitabhängigen und bleibenden Verformung unterzieht. Nach Wegfall der Spannung zieht sich die Feder in ihren Ursprungszustand zurück (elastisch), der Dämpfer verharrt jedoch in seinem verformten Zustand (plastisch).

Kelvin-Element

Das Kelvin-Element schaltet die Feder und den Dämpfer parallel (siehe Abbildung 15). Bei einer eintretenden Belastung wird die Verformung durch den Dämpfungszyylinder gebremst und durch die Feder im Gesamtausmaß begrenzt. Wird die aufgebrachte Spannung wieder abgenommen, verformt sich das Element aufgrund der Federspannung zurück in seinen Ausgangszustand. Die Verformung ist daher zeitabhängig, jedoch begrenzt und reversibel.

Maxwell-Element

Das Maxwell-Element schaltet die Feder und den Dämpfer im Gegensatz zum Kelvin-Element in Reihe (siehe Abbildung 16). Nach Anlegen einer Spannung verformt sich die Feder spontan und zeitabhängig tritt eine unbegrenzte viskose Verformung ein. Nach der Entlastung verformt sich die Feder in ihren Ursprungszustand, der Dämpfer verbleibt jedoch in seinem ausgelenkten Zustand. Somit entstehen sowohl eine zeitabhängige, unbegrenzte und irreversible Verformung, wie auch ein zeitunabhängiger und reversibler spontanelastischer Verformungsanteil.

Vergleich Anordnung von Feder und Dämpfer bei Kelvin- und Maxwell-Element

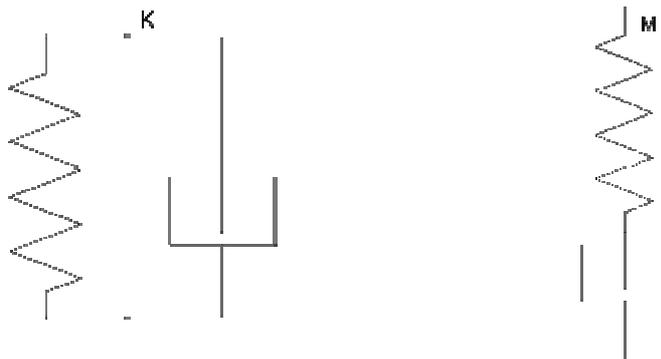


Abbildung 15: Kelvin-Element

Abbildung 16: Maxwell-Element

Weitere Modelle

Neben diesen einfach gehaltenen Modellen existieren komplexere Modelle des viskoelastischen Verhaltens wie Zener_m-, Zener_k-, Lethersich-, Jeffreys- und Burgers-Modell [21, 22].

Schlussfolgerung Das Materialverhalten papierbasierter Werkstoffe kann exemplarisch am besten mit dem Maxwell-Modell vereinbart werden. Dieses beschreibt das Antwortverhalten des Werkstoffs auf eine aufgebraute Belastung hinreichend gut, weshalb auf detaillierter ausgeführte Modelle verzichtet werden kann. Diese würden den Rechenaufwand stark erhöhen, ohne die Genauigkeit im gleichen Maß zu verbessern.

6.2 Generalisiertes Maxwell-Modell

Notwendigkeit einer Generalisierung des Maxwell-Elements Die Beschreibungen der Viskoelastizität im Maxwell-Element gehen immer von der Definition einer spontan aufgebrauten Belastung aus. Dies bedeutet, dass die Last sofort und ohne jeglichen zeitlichen Verzug an dem Werkstoff angelegt wird. In realen Lastfällen ist dies jedoch nicht in dieser Art umsetzbar. Die Belastung erfolgt in einem definierten Zeitfenster, somit einer definierten Geschwindigkeit bzw. Dehnrates.

Geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten Papierartige Werkstoffe zeigen zudem ein unterschiedliches Verhalten, je nachdem mit welcher Geschwindigkeit eine Belastung auf sie einwirkt (vgl. Abbildung 17).

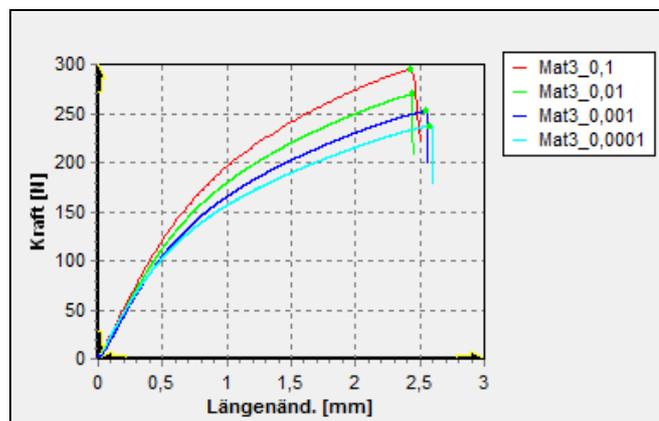


Abbildung 17: Geschwindigkeitsabhängigkeit im Kraft-Weg-Diagramm

Abbildung 17 zeigt einen Standard-Zugversuch an einem Faltschachtelkarton mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten. Diese können über verschiedene Dehnrates definiert werden. Eine Dehnrates von $0,1 \text{ s}^{-1}$ bedeutet, dass es zu einer Dehnung der Probe von 10 % je Sekunde kommt. Es ist zu erkennen, dass eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Werkstoffparameter (sowohl der Steifigkeit, der Festigkeit als auch der Bruchdehnung) vorliegt, wie bereits dargestellt.

Kombination von Geschwindigkeitsabhängigkeit und Viskoelastizität Um das geschwindigkeitsabhängige Materialverhalten papierartiger Werkstoffe mit dem Maxwell-Modell für viskoelastisches Materialverhalten zu kombinieren, musste das standardmäßige Maxwell-Element um eine Vielzahl parallel geschalteter Maxwell-Elemente erweitert werden. Diese Erweiterung wird als Generali-

siertes Maxwell-Modell bezeichnet (vgl. Abbildung 18).

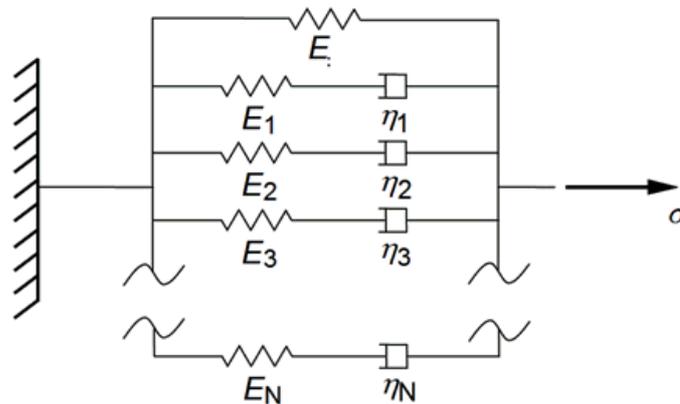


Abbildung 18: Schema eines Generalisierten Maxwell-Modells

In diesem Modell steht jedes einzelne Maxwell-Element für eine definierte Belastungsgeschwindigkeit. Die parallel angeordnete Feder dient lediglich zur maximalen Begrenzung des Verformungssystems. Ausgehend vom systematischen Aufbau des Modells konnte gesagt werden, dass die Erhöhung der Anzahl an Maxwell-Elementen eine Erhöhung der Genauigkeit des Systems nach sich zieht. Berechnungen aus Vorversuchen haben gezeigt, dass die Genauigkeit des Modells zur Abbildung des geschwindigkeitsabhängigen Werkstoffverhaltens ab einer Anzahl von vier Maxwell-Elementen hinreichend genau ist. Eine weiter steigende Zahl an parallelen Maxwell-Elementen würde sowohl die Anzahl benötigter Parameter, wie auch deren Berechnung, erhöhen ohne dabei die Genauigkeit des Modells nennenswert zu verbessern. Daher wurde für die Berechnungen eine Anzahl von vier Maxwell-Elementen gewählt [19].

Berechnung der Parameter für Feder und Dämpfer

Zur Definition der einzelnen Feder- und Dämpferelemente mussten Prüfungen in verschiedenen Dehnraten durchgeführt werden, die für jede Belastungsart, welche von Interesse ist, wiederholt werden mussten. Die Auswertung der Versuche findet im Folgenden lediglich in ihren linear elastischen Bereichen statt, was durch die Festlegung eines viskoelastischen Materialmodells vorgegeben und durch die ersten Ergebnisse des plastischen Anteils der Verformung gestützt wurde.

Schlussfolgerung

Nach der Berechnung der einzelnen Feder- und Dämpferelemente im generalisierten Maxwell-Modell lag ein Materialmodell vor, welches das Verformungsverhalten des Werkstoffs hinsichtlich unterschiedlich schnell aufgebrachtter Belastungen beschreibt. Hierfür wurden die durchgeführten Versuche in ihren linear elastischen Bereichen ausgewertet.

6.3 Auswertung der Versuche hinsichtlich des generalisierten Maxwell-Modells

Auswertung der geschwindigkeitsdifferenzierten Versuche und Berechnung entsprechender Parameter an einem Beispiel

Die Auswertung der aufgenommenen geschwindigkeitsdifferenzierten Werkstoffuntersuchungen fand lediglich im linear elastischen Anteil ihrer Belastungskurven statt. Folgende Formel (4) erlaubt die Berechnung einer anliegenden Spannung in Abhängigkeit der angelegten Dehnrates und der Werkstoffparameter für Dämpfung und Federung.

$$\sigma = \dot{\epsilon} \cdot \sum_{i=1}^4 \eta_i \left(1 - e^{-\frac{E_i t}{\eta_i}}\right)$$

$\dot{\epsilon}$... Dehnrates

η ... Dämpfungskonstante

E ... Federkonstante (E-Modul)

t ... Zeitschritt

(4).

Mithilfe einer schrittweisen Parameteruntersuchung, in welcher sowohl die einzelnen E-Modulen, wie auch die Dämpfungskonstanten systematisch geändert und ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis untersucht werden, war es möglich, die aufgenommenen Verlaufskurven durch diese mathematische Darstellung nachzustellen. Abbildung 19 zeigt dies exemplarisch für geschwindigkeitsdifferenzierte ECT-Versuche an einer Wellpappe des Herstellers 2.

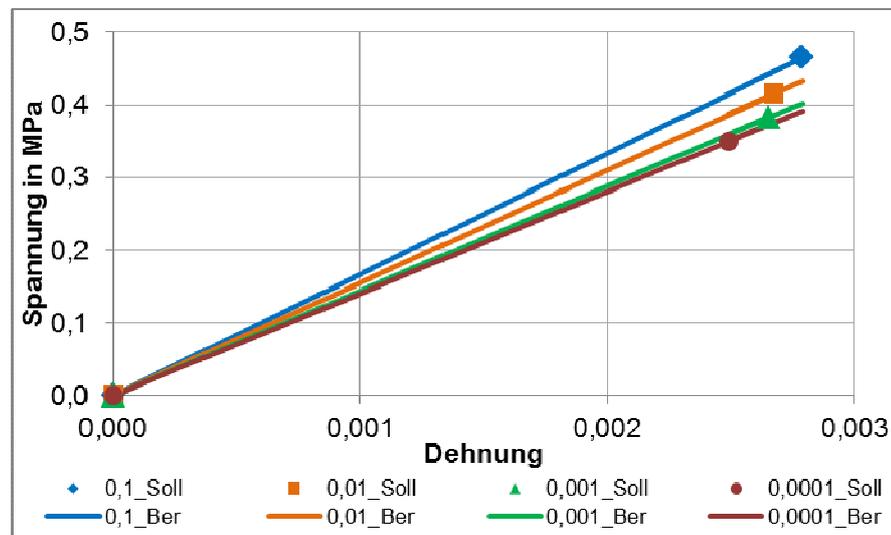


Abbildung 19: Gemessene (Soll, Darstellung als Einzelwert) und berechnete (Ber) Verläufe im linear elastischen Bereich der ECT-Versuche

Durch die Minimierung der Fehlerquadrate von Ausgangs- (gemessene) zu End- (berechnete) Werten konnten die gemessenen Kurven im linear elastischen Bereich eindeutig und ohne nennenswerten Fehler durch den oben gezeigten mathematischen Ansatz beschrieben werden. Zur besseren Darstellung wurden von den gemessenen Kurven lediglich die Endpunkte in der Abbildung aufgenommen, der Verlauf zum Ursprung des Koordinatensystems ist hier nahezu linear.

Darstellung der Ergebnisse in einem Dämpfungsspektrum

Die Ergebnisse der Parameterstudie konnten in einem sogenannten Dämpfungsspektrum dargestellt werden. Hier werden die Dämpfungskonstanten mit gestaffelter Empfindlichkeit bezüglich der Geschwindigkeit und die dazugehörigen Federkonstanten mit gestaffelter Empfindlichkeit bezüglich der Kraft dargestellt (vgl. Abbildung 20).

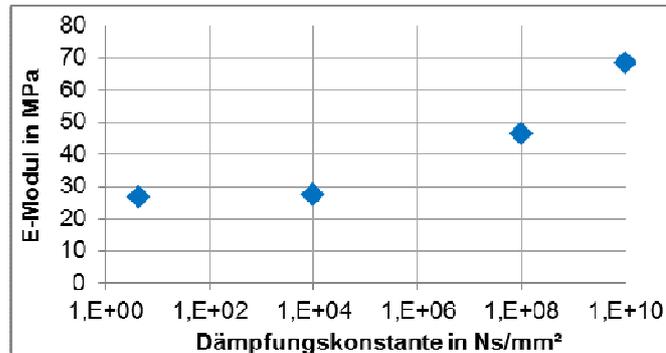


Abbildung 20: Berechnetes Dämpfungsspektrum eines geschwindigkeitsdifferenzierten ECT-Versuchs

Somit konnte der linear viskoelastische Bereich im gesamten gemessenen Geschwindigkeitsspektrum abgebildet werden. Durch diese Kennwerte ließ sich die Viskoelastizität als Teil der viskosen Eigenschaften der Werkstoffproben thermomechanisch konsistent beschreiben.

Analoge Berechnungen bei anderen Lastkollektiven

Die Berechnung zur Identifikation der Parameter für die Biegeversuche wurde analog durchgeführt. Lediglich die Berechnung zur vorherrschenden Spannung musste dem geänderten Belastungszustand angepasst werden.

6.4 Identifikation des plastischen Anteils

Berechnung der bleibenden Verformung am Beispiel eines ECT-Versuchs

Aus den Hysteresekurven (vgl. Abbildung 11) war bereits erkennbar, dass der bleibende Teil der Verformung bei einem ECT-Versuch relativ klein ist. Nach Entlastung entspannte sich der Probekörper wieder nahezu vollständig, dies selbst bei hohen Belastungen von 60 bis 80 % der Maximalbelastung. Eine bleibende plastische Verformung entstand erst nah an der Grenze zur Maximalspannung. Die Auswertung der bleibenden Verformung in Abhängigkeit von ihrer maximal ertragbaren Druckspannung ist auf folgender Abbildung 21 für die beiden Wellpappen des Herstellers 2 zu erkennen.

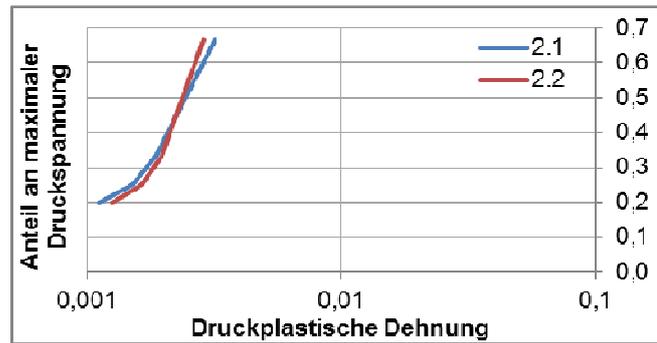


Abbildung 21: Plastische Dehnung in Abhängigkeit der maximal ertragbaren Last

Abbildung 21 zeigt, dass es auch bei hohen Belastungen (60-70 % der maximal ertragbaren Druckspannung) nur zu einer geringen plastischen Verformung im Werkstoff kam (ca. 0,5 %), sodass vermutet werden konnte, die viskoplastische Verformung sei der Viskoelastischen weit untergeordnet. Dies hat die verwendete Methode in ihrer Genauigkeit gestützt, musste jedoch zunächst durch die Langzeitversuche nachgewiesen werden.

7 Kriechmodell und Berechnung für Werkstoffproben

Hintergrund

Das berechnete Feder-Dämpfer-Spektrum gab Aufschluss über die Frequenzabhängigkeit des Werkstoffs. Es war somit möglich, das Verformungsverhalten des Materials gegen eine definierte Prüfgeschwindigkeit vorher zu sagen. Dieses frequenzabhängige Verhalten (direkte Betrachtung) gab jedoch keine Aussage zum Langzeitverhalten des Werkstoffs. Hierfür musste eine Transformation der Frequenz- in eine Zeitabhängigkeit durchgeführt werden (inverse Betrachtung).

7.1 Relaxationsmodell mittels Prony-Analyse

Grundlagen der Prony-Analyse

Eine Prony-Analyse stellt eine Reihenentwicklung mit einer Anzahl von Gliedern dar, die mit der Anzahl von Feder- und Dämpferkonstanten im gewählten Maxwell-Modell korrespondiert und liefert letztendlich in ihrer eindimensionalen Formulierung einen zeitlichen Verlauf z. B. eines Elastizitätsmoduls, also eine zeitabhängige Funktion für das Erweichen des Materials. Diese Funktionen, von denen für jede in den Kurzzeitversuchen angewendete Belastungsform eine eigene erstellt wurde, konnten unmittelbar für Proben, die in der jeweiligen Belastungsform durch eine konstante Last belastet werden, zur Berechnung der Kriechdehnung in Langzeitversuchen eingesetzt werden.

Anpassung und Anwendung der Prony-Analyse

Bezogen auf den vorliegenden Anwendungsfall entspricht die Prony-Analyse folgender mathematischer Beschreibung, vgl. Formel (5):

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

$E(t)$... Zeitabhängiger E-Modul

E_0 ... E-Modul zum Zeitpunkt 0

E_i ... E-Modul des jeweiligen Elements

t ... Zeitschritt

$\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$... Verhältnis von Dämpfungskonstante zu E-Modul

(5).

Der zeitabhängige E-Modul $E(t)$ berechnete sich aus dem Ausgangsmodul E_0 abzüglich einer Summe, welche sich aus der Anzahl der Reihenglieder ($i=1$ bis m) sowie den jeweiligen E-Modulen und Dämpfungsviskositäten ergab.

7.2 Anwendung an Werkstoffproben

Anwendung der Analyse nach Prony auf berechnete Dämpfungsspektren

Zur Berechnung des zeitabhängigen E-Modul wurden die aufgenommenen und ausgewerteten Werkstoffparameter (Feder- und Dämpferkonstanten) in die Prony-Analyse eingetragen. Es ergab sich hieraus ein eindimensionaler Verlauf des E-Moduls über die Zeit. Aufgrund des variierenden Moduls konnte eine zeitliche Dehnung/Stauchung aufgrund einer einmalig aufgetragenen konstanten Last berechnet werden. Im folgenden Beispiel ist dies für eine Wellpappe des Herstellers 2 unter Druckbelastung für drei verschiedene Belastungsstufen (15 %, 25 % und 33 % der im Normklima gemessenen Maximalbelastung) aufgezeigt (vgl. Abbildung 22).

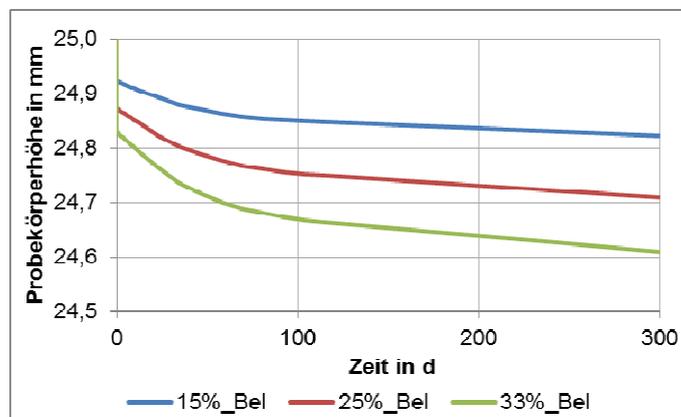


Abbildung 22: Berechneter zeitlicher Verlauf der Verringerung der Probenhöhe beim ECT mittels Prony-Analyse

Für jede Belastungsart konnten somit Kriechkurven aus den jeweiligen Dämpfungsspektren berechnet werden. Da die Dämpfungsspektren aus Versuchen im Normklima bestimmt wurden, entsprechen diese Kurven zunächst lediglich den Kriechkurven des Materials im Normklima. Zudem war der Einfluss einer viskoplastischen Verformung nicht berücksichtigt.

Hinweis

Um den Anforderungen insbesondere im Hinblick auf die Dreidimensionalität des Materialmodells gerecht zu werden, mussten diese Verläufe entweder in ein orthotropes viskoelastisches Materialmodell mit Zug/Druck-Differenzierung integriert werden können oder durch Vereinfachung für ein isotropes viskoelastisches Materialmodell, z. B. das im Rahmen der FE-Software LS-Dyna verwendete Relaxationsmodell nach [23], adaptiert werden.

8 Langzeitversuche an Werkstoffproben

Hintergrund Die mittels Prony-Analyse berechneten Kriechverläufe basieren auf rein mathematischen Grundlagen. Für eine Validierung der Methode fand ein Abgleich zwischen berechneten Kriechverläufen und dem realen Verhalten der Werkstoffe statt. Hierfür kamen sowohl an FS 2 vorhandene Messvorrichtungen, als auch speziell für diese Anforderung entwickelte Vorrichtungen an FS 1 zum Einsatz.

8.1 Eingesetzte Prüfvorrichtungen

Vorhandene Kaskaden- und Einzelprüfeinrichtung Das Grundgestell (1) der Kaskadenprüfeinrichtung (vgl. Abbildung 23) beinhaltet vier Prüfeinheiten (2-5) zur simultanen Untersuchung von vier ECT-Proben, vgl. Abbildung 23. Eine Prüfeinheit bestand aus einer Träger- (6) und einer Probenplatte (7). Im Prüfverlauf wurden auf den Probenplatten die Prüflinge (8) platziert. Die für die Prüfung benötigten Gewichte (9) wurden auf den Trägerplatten angeordnet. Zur Messung der Wegveränderung waren an jeder Prüfeinheit Digitalmesstaster (10) montiert. Mithilfe der Liftstation (11) und des Motors (12) wurden die Prüfeinheiten zusammen und auseinandergefahren.

Die Einzelprüfeinrichtung (vgl. Abbildung 24) bestand aus zwei präzisen, planparallelen Platten, die über vier Führungssäulen gegeneinander verschoben werden konnten. Aufgrund der vier, auf Kugelbuchsen gelagerten, Führungssäulen wurde eine steife und spielfreie Lagerung der Gewichte ermöglicht. Ebenso wurde die parallele Belastung der Probe garantiert. Zu Beginn des Versuches wurde die obere Platte, die sogenannte Trägerplatte (1), angehoben und über den entsprechenden Klemmhebel (6) fixiert. Im Prüfraum zwischen der Boden- (2) und der Trägerplatte wurde die ECT-Probe mittig platziert. Nach vorsichtigem Lösen der Klemmhebel wurde die Trägerplatte langsam auf die Probe abgesenkt. Auf der Adapterplatte (3) konnten die Gewichte über eine Säule (4) aufgenommen werden. Der spezielle Aufbau sorgte für eine sichere und stabile Platzierung der Gewichte. Um die Wegveränderungen der Probe während der Messung aufzuzeichnen waren an allen vier Seiten der Prüfeinrichtung Digitalmesstaster montiert (5). Zur Vermeidung von Korrosionserscheinungen waren sämtliche Teile der Einzelprüfeinrichtung aus Edelstahl gefertigt. Zur Handhabung der Vorrichtung gab es einen Bügelgriff (7), als Sicherheit gegen ein Zusammenfahren der Platten existierte ein Anschlagpuffer (8).

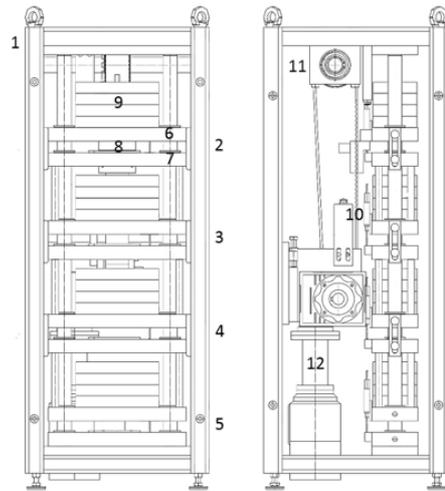


Abbildung 23: Kaskadenprüfeinrichtung

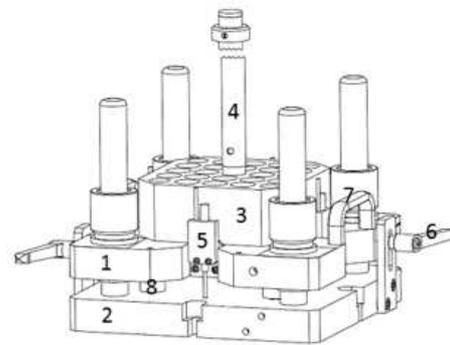


Abbildung 24: Einzelprüfeinrichtung

Neu entwickelte Zeitstandvorrichtungen für Druck- und Biegeversuche in Kooperation mit Hegewald & Peschke

Zur Messung des Langzeittragverhaltens von Wellpappenproben wurden darüber hinaus Prüfvorrichtungen in Kooperation mit der Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH entwickelt, welche nach einmaligem Aufbringen einer Last die kontinuierliche Verformung der Probe messen. Dies ist aufgrund der am Packmittel definierten Belastungen sowie der durchgeführten Messungen für Versuche angelehnt an die Messungen zum ECT und der Biegesteifigkeit durchgeführt worden (vgl. Abbildung 25).

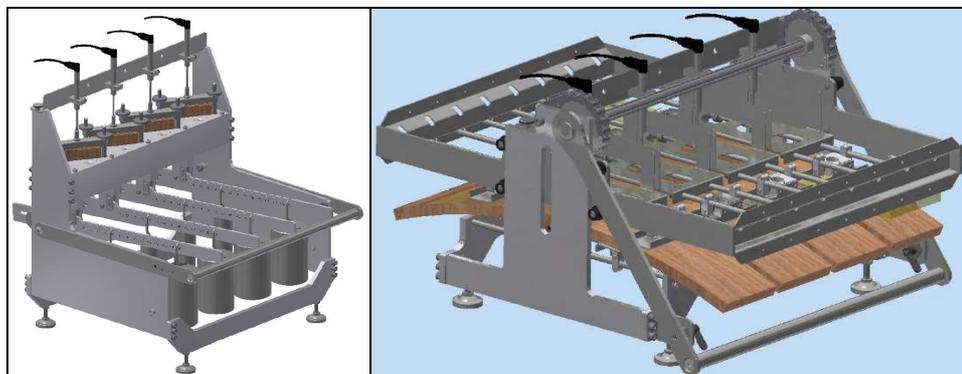


Abbildung 25: Zeitstandvorrichtungen für Druck- und Biegeversuche (Quelle: Hegewald & Peschke)

Die Vorrichtungen messen die Verformungen indirekt über dem Belastungsbügel (Druck) oder direkt an der Werkstoffprobe (Biegung). Mittels zusätzlicher Gewichte war es möglich einen großen Belastungsumfang zu generieren. Die Außenmaße der Vorrichtungen wurden auf ein Maß begrenzt, um den Einsatz im Klimaprüfschrank der FS 1 zu ermöglichen.

8.2 Bedingungen und Durchführung der Messreihen

Prüfbedingungen Die Langzeitversuche für Druck- und Biegebelastung wurden in verschiedenen Klimaten durchgeführt. Neben dem Normklima (23 °C/ 50 % RH) wurden die Proben sowohl in einem Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) wie auch in einem Wechselklima zwischen Norm- und Feuchtklima geprüft. Der zeitliche Verlauf des Wechselklimas war so aufgebaut, dass eine Klimastufe für drei Stunden gehalten wurde und der Übergang zur nächsten Stufe als Rampenfunktion innerhalb einer Stunde umgesetzt wurde. Mit dem gewählten Feuchtklima sollte sichergestellt werden, dass sich im Material eine möglichst hohe Ausgleichsfeuchte einstellt [24]. Als Prüfzeitraum waren mindestens vier bis sieben Tage angedacht. Zeitlich längere Prüfungen würden nur bei wesentlich längeren Prüfzeiträumen zusätzliche Erkenntnisse, besonders bzgl. des tertiären Kriechens, generieren. Diese werden jedoch mittels der gewählten Methode nicht berücksichtigt, weshalb von einer praktischen Untersuchung dieses Bereichs abgesehen wurde.

Prüfplan Als Ausgangspunkt für die Prüfungen wurden jeweils drei Belastungsstufen, ausgehend vom Maximalwert unter Normklima, für die Werkstoffe angenommen: 15 %, 25 % und 33 %. Es zeigte sich besonders bei den Versuchen im Feucht- und Wechselklima, dass diese Werte oftmals bereits zu hoch waren, folgend wurde dann auf Zwischenschritte wie z.B. 20 % zurückgegriffen, um eine belastbare Anzahl an auswertbaren Messungen zu haben. Bei den Untersuchungen zum ECT ergab sich der Prüfplan lediglich aus den oben definierten Belastungsstufen, bei den Untersuchungen zur Biegesteifigkeit/-festigkeit musste die Laufrichtung (MD/CD) sowie die geprüfte Seite (OS/US) beachtet werden. Hierbei konnte jedoch gesagt werden, dass ein nach außen beulen der Verpackung aufgrund des vorhandenen Inhalts die wesentlich wichtigere Richtung bzgl. der Prüfung auf Innen- und Außenseite war. Der Prüfplan der Biegeuntersuchungen war trotz dessen um ein Vielfaches umfangreicher als die Prüfung des ECT. Da die Druckbelastung jedoch die entscheidende Belastung ist, konnte und musste der Prüfplan zur Biegeuntersuchung an entsprechend sinnvollen Stellen gekürzt werden.

8.3 Ergebnisse der ECT- und Biege-Langzeituntersuchungen an Werkstoffproben

Druckversuche Als Ergebnisbeispiel sind in folgender Abbildung 26 die Absenkungen bei ECT-Versuchen an Wellpappen von Hersteller 2 dargestellt.

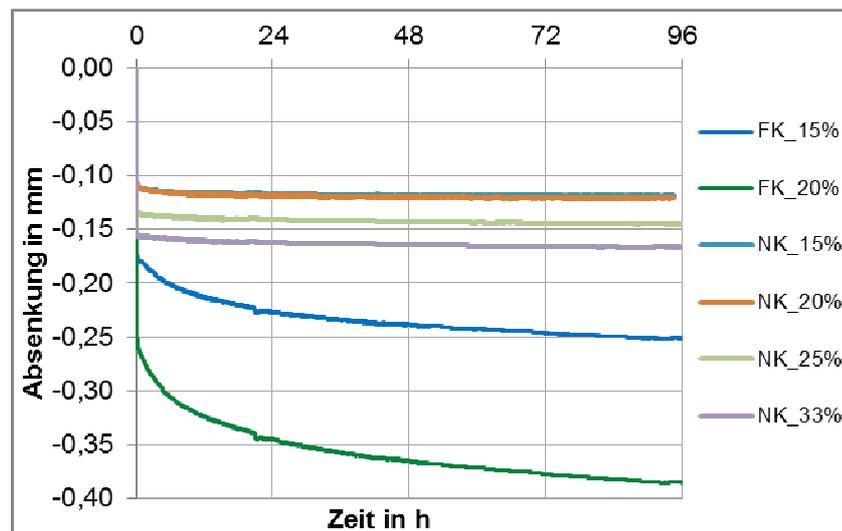


Abbildung 26: ECT-Probenstauchung bei Langzeitversuchen im Normklima (NK) und Feuchtklima (FK) bei verschiedenen Laststufen (15 %, 20 %, 25 %, 33 %) des maximalen ECT Wertes

Eine genaue Reproduzierbarkeit der Versuche war besonders im Normklima gegeben. Bei den Versuchen im Feuchtklima zeigten die Kurven bei steigenden Belastungen Unterschiede im Verlauf auf, was auf den immer größer werdenden Einfluss von lokalen Schwachstellen und materiellen Imperfektionen zurück zu führen war. Für die weiteren Berechnungen wurden daher bei den Langzeitversuchen Mittelwertkurven, wie auf Abbildung 26 dargestellt, genutzt. Zur Berechnung der Mittelwertkurven wurde jeweils mindestens eine Dreifachbestimmung durchgeführt.

Aufgrund der meist unzureichenden nassfesten Verklebung konnten vor allem bei den Untersuchungen im Feuchtklima bei Belastungen von 25 % sowie 33 % der Maximallast nur wenige bis gar keine Ergebnisse ermittelt werden. Die geringen Standzeiten von oftmals nur wenigen Stunden ermöglichten keine Bestimmung der Kriechraten der Wellpappen. Daher wurde von einer Untersuchung der Belastung von 33 % im weiteren Verlauf der Arbeit gänzlich abgesehen, wobei ersatzweise zusätzliche Untersuchungen bei 20 % der Maximalbelastung zur Validierung eingesetzt wurden.

Die Ergebnisse der Kriechuntersuchungen an den Probenkörperzuschnitten des Herstellers 2 zur ECT-Prüfung im Wechselklima bei konstanter Temperatur sind in nachfolgender Tabelle 3 beispielhaft dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen der Versuchsreihe 2

	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 %	-	4,12 ± 0,248	0,026 ± 0,006	21,47 ± 3,55

Biegeversuche

Die Ergebnisse der Biegeversuche sind exemplarisch in folgender Abbildung 27 an Wellpappen des Herstellers 2 dargestellt. Es erfolgt ein Vergleich des Biegeverhaltens zwischen MD- und CD-Richtung (jeweils gegen die OS) bei verschiedenen Laststufen, jeweils im Feuchtklima. Zur Darstellung der Reproduzierbarkeit der Versuche zeigt die Abbildung jeweils zwei (01/02) durchgeführte Versuche (bei den Versuchen mit 33 % Belastung wurde darauf verzichtet).

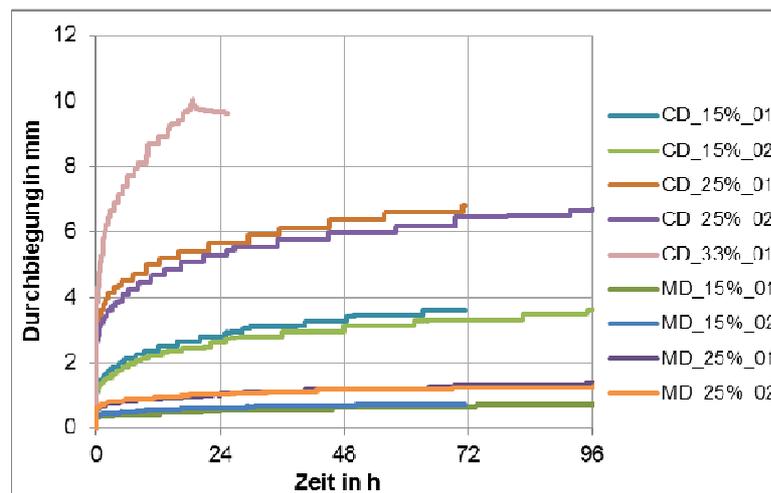
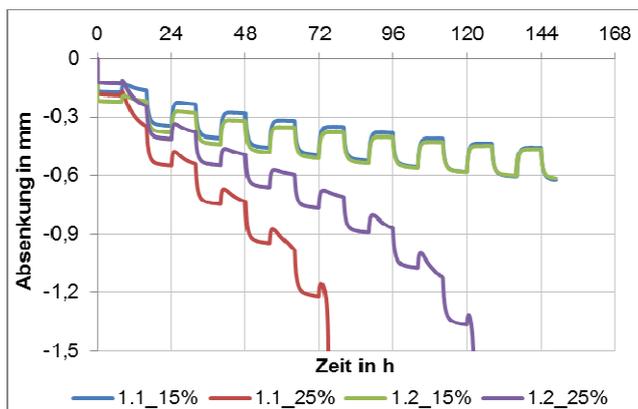


Abbildung 27: Langzeit-Biegeversuche im Feuchtklima

Wie bereits bei den Druckversuchen zeigte sich auch hier, dass die Laststufe von 33 % in den meisten Prüfungen bei Feuchtklima nicht durchgeführt werden konnte. Der gezackte Verlauf der Kurven ist dem Umstand geschuldet, dass der Messtaster bei diesem Versuch nicht aus seinem Gehäuse heraus gleitet (wie bei den Druckversuchen, Bewegungsrichtung nach unten), sondern in sein Gehäuse gehoben wurde. Hier kam es zu minimalen Reibkräften zwischen Taster und Gehäuse, die das Ergebnis der Messung jedoch nicht beeinflussten.

Versuche im Wechselklima am Beispiel eines Langzeit-ECT

Von besonderem Interesse waren die anwendungsnahen Versuche im Wechselklima. Diese berücksichtigten neben den verschiedenen Lastkollektiven zudem die Belastung im Material bei Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe. Durch die zusätzlich eingebrachte Belastung führten jedoch auch weitaus geringere Laststufen bereits zum Versagen der Proben, im Folgenden für Wellpappen von Hersteller 1 aufgezeigt (siehe Abbildung 28).



**Abbildung 28: Langzeitversuche (ECT) im Wechselklima, Zyklus:
23 °C / 50 % r.H. (Dauer 7 h) - lineare Umstellung in 1 h auf 23 °C / 90 % r.H. 7h
(Dauer 7 h) – Lineare Umstellung auf Ausgangsklima in 1 h**

Das Intervall für die oben dargestellte Prüfung wurde bzgl. der definierten Prüfklimata variiert (Zeiträume gleichbleibenden Klimas von 3 auf 7 Stunden vergrößert), um das Kriechverhalten in den homogenen Zeitabschnitten deutlicher aufzeigen zu können. Grundlegend ist jedoch zu erkennen, dass die Kriechverläufe deutlich stärker sind, als bei Untersuchungen im gleichmäßigen Klima. Beide Proben (nassfest und nicht nassfest) versagten bereits relativ schnell nach der Lastaufbringung von 25 %. Auch die Kriechraten der Belastung bei 15 % waren wesentlich größer als im reinen Feuchtklima.

9 Ermittlung des viskoplastischen Anteils nach Langzeitversuchen und Ermittlung des Feuchte-Shifts

Ausgangslage Eine Abweichung zwischen den Berechnungen und Messungen in nicht zu vernachlässigender Größenordnung war zu erwarten. Sie sollte jene Systematiken aufweisen, die deren Zuordnung zu den Eigenschaften von viskoplastischen Anteilen erlaubt, womit diese identifiziert und in ihrer unmittelbaren Auswirkung auf die Probendeformation bestimmt sind.

9.1 Vergleich von Berechnungen und aufgenommenen Messungen

Darstellung der auftretenden Abweichungen zwischen Berechnung und Messung

Bei den Versuchen kam es, wie beschrieben, zu einem unterschiedlichen Wert der Deformation bei den Berechnungen mittels generalisiertem Maxwell Modell / Prony Analyse und den während der Messung aufgenommenen Langzeit-Kriechverläufen, wie in folgender Abbildung 29 für die nicht nassfeste Wellpappe des Herstellers 2 dargestellt.

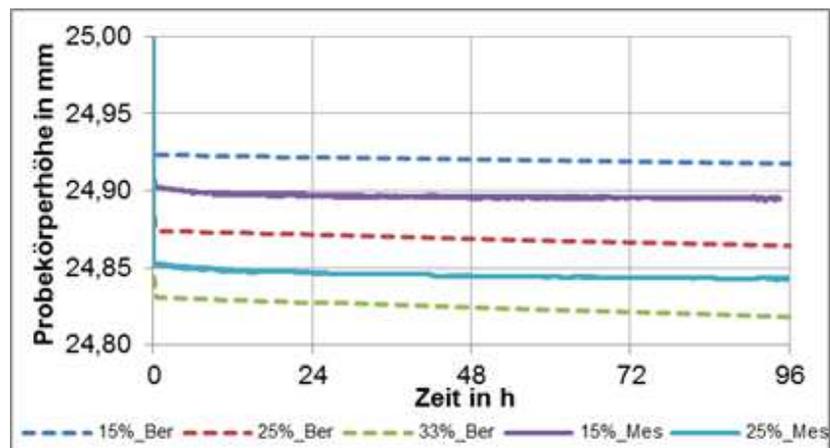


Abbildung 29: Vergleich von berechneten (Ber) und gemessenen (Mes) Kriechverläufen bei Langzeit-ECT-Belastung bei den Belastungsstufen von 15 %, 25 % und 33 % der maximalen ECT-Belastung

Die aufgenommenen Kriechverläufe zeigten jedoch lediglich einen nahezu vernachlässigbar kleinen Unterschied in den Anstiegen der Kriechkurven der jeweiligen Belastungspaare. Dieser minimale Anteil war auf die in den Berechnungen nicht beachtete viskoplastische Dehnung zurück zu führen. Der größere Unterschied der Kurven lag in der Anfangsauslenkung. Grund hierfür war die ideale Vorstellung der Belastungseinleitung bei der gewählten Berechnungsmethode. In der Praxis kann zwar eine hohe Genauigkeit der Prüfkörpergeometrie angestrebt werden, jedoch wird diese nie komplett exakt sein, was eine höhere anfängliche Auslenkung der Probe erklärt. Die Vergleiche bzgl. der Verläufe der Biegeversuche zeigten simultane Ergebnisse. Die Berechnungen für Belastungen von 33 % waren mittels der Methode theoretisch durchführbar, weil diese kein Versagenskriterium kennt. Dieses musste erst in weiteren Berechnungen eingeführt und definiert werden.

9.2 Definition und Berechnung der Shifter-Funktionen

Nutzung von Shifter-Funktionen

Das generalisierte Maxwell Modell beinhaltet wie dargestellt lediglich den viskoelastischen Anteil der Verformung einer Wellpappenprobe. Zudem war es, durch die Aufnahme der Werkstoffkennwerte bei Normklima, nur auf Kriechverläufe im Normklima anwendbar. Um sowohl den viskoplastischen Anteil der Verformung, die unterschiedliche Anfangsauslenkung, als auch Kriechverläufe bei unterschiedlichen Klimata zu berechnen, mussten sogenannte „Shifter“ angewendet werden.

Allgemeine Funktionsweise von Shifter-Elementen zur Kurvenanpassung

Der Einsatz von Shifter-Funktionen ermöglichte es, den Kurvenverlauf einer definierten Kriechkurve zu modifizieren. Diese Modifizierung erfolgte auf Grundlage der oben dargestellten Begründungen. Wichtig zur genauen Anpassung der Kurve waren Position und Betrag des verwendeten Shifters. Die erarbeitete Darstellung des zeitabhängigen E-Moduls mittels Prony Analyse (vgl. Formel 5) ist in folgender Formel (6) mit eingebrachtem Shifter-Element α_g dargestellt:

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^m E_i \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha_g \times \tau_i}}\right) \quad (6).$$

Dieses Shifter-Element erlaubte es, den Verlauf der Kurve sowohl in der Anfangsauslenkung als auch im folgenden Kriechverlauf den viskoplastischen und klimatischen Anteilen sowie die Anfangsauslenkung der Verformung anzupassen. Eine schematische Darstellung der Shifter-Funktion ist in folgender Abbildung 30 dargestellt.

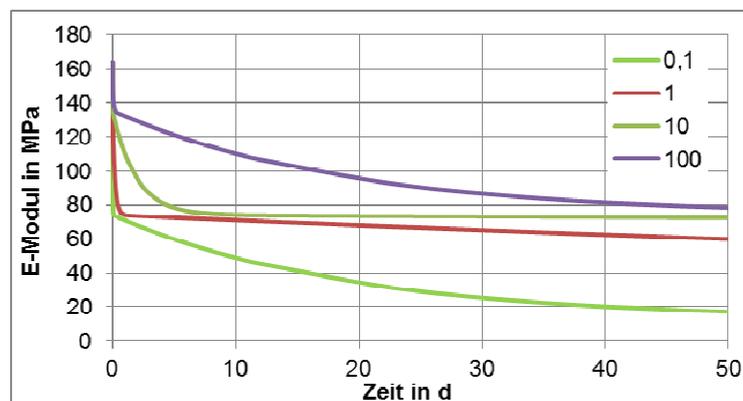


Abbildung 30: Schematisch dargestellter Einfluss eines Shifters aus Formel (6) $\alpha_g = 0,1 / 1 / 10 / 100$ zur Anpassung der Verlaufskurve eines zeitabhängigen E-Moduls

Der gewählte Shifter α_g beeinflusst die Ausgangskurve ($\alpha_g = 1$) sowohl in der Anfangsauslenkung, wie auch im Anstieg der Kurve und der sich annähernden Asymptote. Die Anpassung des Shifters hatte demnach zum Ziel, die Kriechrate zu lenken. Da die berechneten Kurven bereits nah an den reell gemessenen Werten lagen, wurden Anpassungen um mehrere Zehnerpotenzen, wie in Abbildung 30 dargestellt, nicht benötigt.

Berechnung eines absoluten Shifters aus den Versuchen im Normklima

Zur Berechnung der Shifter-Elemente wurden sowohl die Langzeitversuche im Normklima (viskoplastische Verformung, Anfangsauslenkung) als auch die Versuche im Feuchtklima (klimaabhängige Verformung) betrachtet. Bei den Versuchen zur Identifikation der viskoplastischen Verformung zeigte sich, dass diese von so geringem Ausmaß ist, dass sie für eine erste Näherung zu vernachlässigen ist. Lediglich ein Absolutfaktor musste eingebracht werden, um die unterschiedliche Anfangsauslenkung der beiden Kurven zu kompensieren. Diese entstand aufgrund der nicht durchführbaren idealen Probenbelastung bei den durchgeführten Messungen und beschreibt eher eine Unsicherheit in den Messungen, als in der Methode. Dieser Absolutfaktor ergab sich aus dem Abstand von Berechnung und Messung zu einem Zeitpunkt nahe am Versuchsanfang, bei dem definiert gesagt werden konnte, dass die Anfangsauslenkung der Probe vollzogen wurde und die Belastung des Werkstoffes in ein Kriechverhalten übergegangen war.

Berechnung eines Verlaufs-Shifters aus den Versuchen im Feuchtklima

Um eine berechnete Kriechkurve im Normklima einer gemessenen Kurve im Feuchtklima anzupassen, mussten beide Kurven einander gegenübergestellt werden. Im Folgenden wurden Fehlerquadrate aus den Werten für die Absenkung der Probenkörperhöhe zwischen beiden Kurven ermittelt. Diese Fehler werden zu einem Gesamtfehler aufaddiert, welcher mittels mathematischer Parameterstudien minimiert wurde. Zur Minimierung des Fehlers wurde der eingebrachte Shifter variabel gestaltet und so lange geändert, bis eine entsprechende Annäherung stattgefunden hat - Ähnlich den Kurvenanpassungen im linear elastischen Bereich.

Bemerkung: Zeigt ein Werkstoff größere viskoplastische Verformungen als die untersuchten Wellpappen, können diese ebenso mit einem zusätzlichen zweiten Faktor eingebracht werden. Der definierte Faktor α_9 kann somit aus mehreren einzelnen Anpassungs-Shiftern bestehen.

Beispiel einer Shifter-Berechnung

Für eine Wellpappe vom Hersteller 2 ist in folgender Abbildung 31 eine entsprechende Shifter-Berechnung durchgeführt worden.

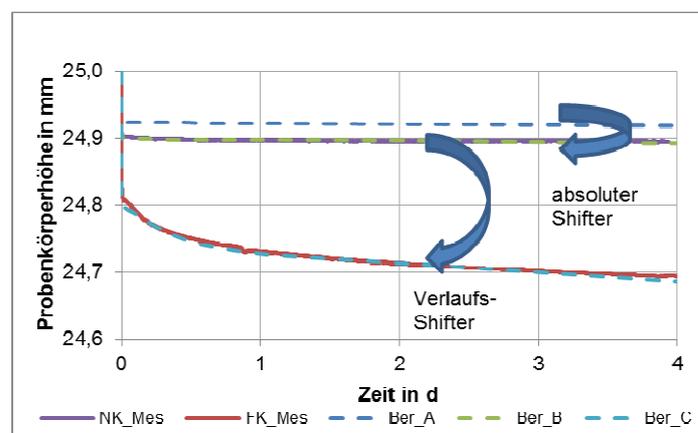


Abbildung 31: Beispiel einer dreistufigen (A = Ergebnis aus Prony-Analyse, B = Ergebnis nach absolutem Shifter und C = Ergebnis nach Verlaufs-Shifter) Shifter-Berechnung (Ber = Berechnung, Mes = Messung, NK = Normklima, FK = Feuchtklima)

Es handelt sich hierbei um Untersuchungen bei 15 % der Maximalbelastung beim ECT im Normklima. Die Darstellung zeigt sowohl die hohe Genauigkeit der Methode, als auch die Möglichkeit der Kurvenmodifizierung. Die Genauigkeit des Kurvenverlaufs mittels der aufgenommenen und ausgewerteten Werkstoffparameter ist aufgrund des großen viskoelastischen Verformungsbereichs der Wellpappe bereits sehr hoch (Ber_A). Lediglich die angesprochene Differenz in der Anfangsauslenkung ergab sich, jedoch aus einer Ungenauigkeit der Werkstoffuntersuchungen (Ber_B). Eine Anpassung für Kriechverläufe im Feuchtklima ist ebenso umsetzbar (Ber_C).

Schlussfolgerung Die aufgenommenen Shifter ermöglichten die Anpassung der Kurvenverläufe und waren auch in Materialmodellen bei z.B. LS-Dyna einsetzbar. Hier waren die definierten Feuchteshifter jedoch meist in Form von Temperaturshiftern in Materialmodellen für Kunststoffe implementiert.

Zudem wurde aufgezeigt, dass der viskoelastische Anteil der Verformung in den untersuchten Wellpappen gegenüber dem viskoplastischen Anteil sehr groß ist (vgl. ebenso Abbildung 21) und somit die Güte der verwendeten Methode nicht in Frage stellt.

Je nach Klima, welches im Anwendungsfall auftritt, mussten die Shifter definiert und in die Berechnungen integriert werden. Somit konnten auch Kurvenverläufe in wechselnden Klimata (vgl. Abbildung 28) berechnet werden.

10 Messung elasto-mechanischer Standard-Werkstoffkennwerte

Vorbemerkungen Zum Aufbau des numerischen Modells war neben der Kenntnis der viskoelastischen Dämpfungseigenschaften die Ermittlung aller übrigen elasto-mechanischen Kennwerte der Verpackungswände erforderlich. Hierfür war die makroskopische Betrachtungsebene, bei der die Schichten der Wellpappe (Decklagen und dazwischenliegende Wellen) homogenisiert und als orthotropes Wandkontinuum repräsentiert werden, ausreichend, d. h. die Werkstoffkennwerte wurden wiederum an Proben der Dimension, wie in den Kurzzeitversuchen ermittelt.

10.1 Standard-Prüfverfahren zur Generierung elasto-mechanischer Werkstoffkennwerte

Übersicht über aufgenommene und benötigte Standard-Werkstoffkennwerte zum Aufbau eines FE-Modells

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der mechanisch-technologischen Standard-Werkstoffkennwerte der Hersteller 1 und 2

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

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Standard-Werkstoffkennwerte der untersuchten Wellpappen. Dabei umfasste das Probenmaterial der ersten Versuchsreihe die Wellpappen des Herstellers 1. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Wellpappen des Herstellers 1 fällt auf, dass beide Wellpappen mit der Wellenkombination BC ähnliche Festigkeitswerte aufwiesen und nach DIN 55468-1:2015-06 beide der Sorte 2.90 zuzuordnen waren. Zudem fällt auf, dass entgegen der Angabe der Hersteller beide keine nassfeste Verklebung nach TAPPI T812 besaßen. Aufgrund der fehlenden nassfesten Verklebung war die Ermittlung von Kriechraten nicht möglich. Aus diesem Grund und zur Verallgemeinerung der Methode wurde eine komplette Versuchsreihe 2 mit dem Probenmaterial des Herstellers 2 durchgeführt. Beide Proben des Herstellers 2 mit der Wellenkombination AC entsprachen nach DIN 55468-1:2015-09 den Sorten 2.90 und 2.91 und wiesen eine nassfeste Verklebung nach TAPPI T812 auf, vgl. Tabelle 4. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchung sind in Tabelle 5 die Flächengewichte der einzelnen Wellpappen-Proben dargestellt.

Tabelle 5: Flächengewichte der untersuchten Wellpappen

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

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Flächengewichte der vier Wellpappen-Proben. Dabei wird deutlich, dass die Wellpappen des Herstellers zwei deutlich höhere Flächengewichte aufwiesen. Folglich besaßen diese Wellpappen auch höhere Festigkeitswerte. Die Zwischenlage der Wellpappe 2.1 konnte nicht bestimmt werden, da sich diese bei der 10-15-minütigen Lagerung im heißen Wasserbad aufgelöst hatte.

10.2 Messung und Berechnung weiterer benötigter Materialparameter

Druck in allen drei Raumrichtungen

Neben den durchgeführten Standardmessungen zu ECT und Flachstauchwiderstand (Flat-Crush-Test, kurz FCT) der Wellpappen musste ebenso eine Untersuchung der Druckfestigkeit in der dritten Raumrichtung durchgeführt werden. Hierfür wurden Probekörper genutzt, die die Maße eines ECT-Probekörpers haben, die Prüfung wurde jedoch nicht, wie bei einem ECT-Versuch, in CD-Richtung des Materials durchgeführt, sondern in MD-Richtung. Den Unterschied zwischen einem normalen ECT und einem modifizierten ECT zeigt folgende Abbildung 32.

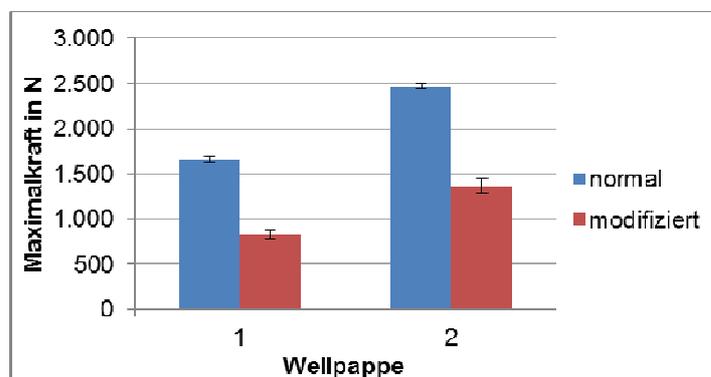


Abbildung 32: Vergleich von normalem (in CD) und modifiziertem (in MD) ECT des Herstellers 2

Durch das Wegfallen der tragenden Wellen in Belastungsrichtung sank die maximal ertragbare Last deutlich. Da dieser Lastfall jedoch nicht die Hauptlast

war, stellt dies kein Problem dar, musste jedoch bei den Berechnungen mittels FEM berücksichtigt werden.

Querkontraktionszahlen für alle drei Raumrichtungen mittels Optischer Dehnfeldanalyse

Zur Analyse der Querkontraktionszahlen des Materials kam eine spezielle, an der FS 1 vorhandene Prüfmethode zum Einsatz: Die optische Dehnfeldanalyse, kurz: ODA. Die ODA ist ein rein optisches Bewertungstool zur Detektion und Analyse von Verformungen eines Prüfkörpers in der Ebene. Hierfür wurden während der Druckversuche mit der Universalprüfmaschine Bildersequenzen in Graustufen mit einem Kamerasystem aufgenommen. Die Bestimmung der Verformung fand mit Hilfe eines Messgitters statt, welches computergestützt über die Bilder der Sequenz gelegt wurde und in seinem Gitterpunktabstand variabel war. Durch die Analyse und das Wiederfinden von Grauwertunterschieden in einem definierten Referenzfeld war es möglich, die Verschiebungen der definierten Messgitterpunkte von Einzelbild zu Einzelbild zu bestimmen und durch Korrelation zwischen Ihnen Dehnungen zu berechnen (vgl. Abbildung 33).

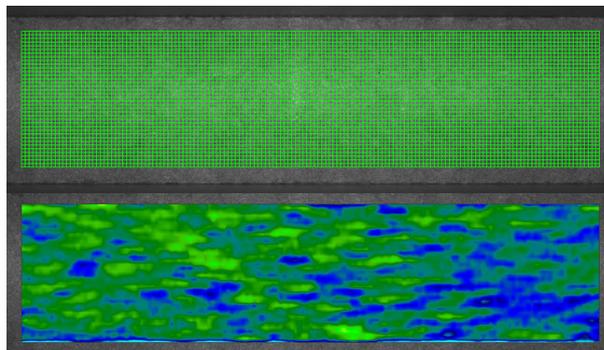


Abbildung 33: Schematische Auswertung einer Wellpappe während des (normalen) ECT mittels ODA (oben: Messgitter, unten: Lokal aufgelöstes Dehnfeld), grüne Bereiche unterliegen nahezu keiner Verformung wogegen blaue Bereiche eine starken Stauchung aufzeigen

Aus den berechneten Dehnungen konnte eine Querkontraktionszahl bestimmt werden. Es zeigte sich jedoch, dass nur Untersuchungen zur Querkontraktionszahl während des normalen ECT sinnvoll waren. Eine Querkontraktionszahl für die beiden anderen Raumrichtungen (FCT / modifizierter ECT) konnte nicht berechnet werden, da hier geometrische Verformungen einen Großteil der Materialverschiebung ausmachten und es beim modifizierten ECT schnell zu einem Ausknicken der Probe kam. Für die Simulationen mussten diese Werte in Anlehnung an die Querkontraktionszahl beim normalen ECT ausgelegt werden.

Berechnung der Querkontraktionszahl von Wellpappe beim normalen ECT

Aus der Optischen Dehnfeldanalyse wurde der zeitliche Verlauf der x- und y-Dehnungen in Summe über alle lokalen Verschiebungen berechnet (vgl. Abbildung 34).

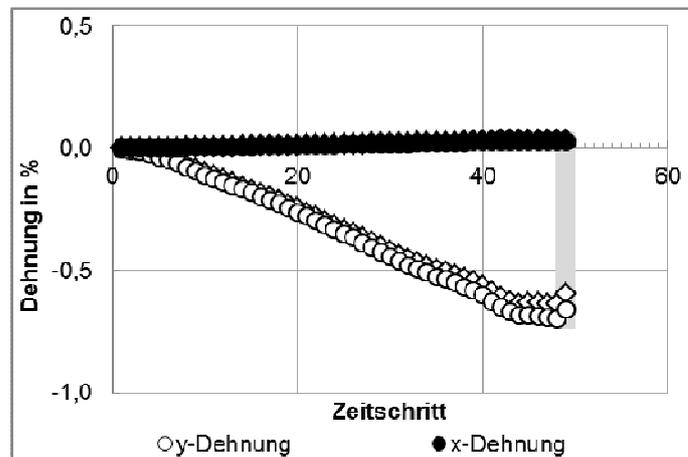


Abbildung 34: Dehnungen (x und y) einer Wellpappe beim (normalen) ECT

Wie auf Abbildung 34 zu erkennen ist, verformte sich die untersuchte Wellpappe während des Stauchvorgangs besonders in Lastrichtung y, die Verformung in x-Richtung ist jedoch minimal. Da sich die Querkontraktionszahl aus dem Verhältnis von Quer- zu Längsdehnung ergibt, ergab die Berechnung der Querdehnzahlen der untersuchten Wellpappen sehr geringe Werte. Diese lagen bei den untersuchten Sorten zwischen 0,05 und 0,08. Hier muss beachtet werden, dass manche Materialmodelle in LS-Dyna mit solch kleinen Querkontraktionszahlen Schwierigkeiten in der Berechnung haben.

Grenzen der Untersuchungen bei Zug und In-Plane-Schub

Wie bereits diskutiert, war die Aufnahme von Werkstoffparametern bzgl. Zugfestigkeiten von Wellpappe nur schwer darstellbar. Ebenso wie für die Schubeigenschaften des Werkstoffs in der Ebene werden im Folgenden Werte aus der Literatur entnommen bzw. auf Basis bisheriger Untersuchungen abgeschätzt. Da die Hauptbelastung in einer Verpackung jedoch dem normalen ECT am ehesten gleicht, war es von besonderem Interesse für diese Belastung alle Parameter genau zu bestimmen. Dies konnte sowohl für Druck als auch die Querkontraktionszahl durchgeführt werden.

11 Numerisch-mechanische Simulation im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM)

11.1 Modellaufbau in LS-Dyna

Theorie zum Modellaufbau in der kommerziell verfügbaren Software LS-DYNA

Zur Berechnung einer definierten Kriechkurve für eine Verpackung aus Wellpappe in einer FE-Software wie z.B. LS-Dyna mussten alle benötigten Parameter genau definiert werden. Hierbei spielten folgende Einflussfaktoren eine entscheidende Rolle (vgl. Tabelle 6):

Tabelle 6: Reale Einflussfaktoren und deren Umsetzung im FE-Modell

Praktischer Einflussfaktor	Umsetzung im FE-Modell
Verpackungsgeometrie (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.
Materialdicke des gesamten Schichtaufbaus	Definiert über die Dicke der gewählten Schalenelemente.
Lastfall der übereinander gestapelten Verpackungen.	Randbedingungen: Fixierung aller Knoten der Grundebene (Degrees of Freedom, 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) je nach Belastungsart beim Langzeitversuch.
Material	Siehe folgenden Abschnitt

Ansicht des FE-Modells im Ursprungszustand

Über eine Definition entsprechender *Keywords* in LS-DYNA konnten die realen Geometrie-, Last- und Randbedingungen in das Modell eingearbeitet werden. Der Aufbau des FE-Modells ist in folgender Abbildung 35 dargestellt.

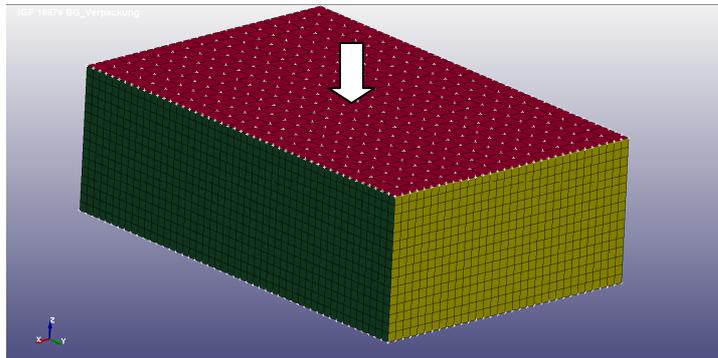


Abbildung 35: FE-Modell der Verpackung inkl. Randbedingungen (weiße Kreuze) und Lasteinleitung (weißer Pfeil)

Verfügbare Materialmodelle in LS-Dyna

LS-Dyna bietet vorprogrammiert eine große Auswahl an Materialmodellen. Zunächst musste eine Recherche erfolgen, welche Materialmodelle für die gestellte Aufgabe nutzbar sind. Aufgrund der Langzeitbelastung, welche auf das Material einwirkt, muss dem Materialmodell ein definiertes Kriechgesetz zugrunde liegen. Das *MAT_115 UNIFIED CREEP* erfüllte die hierfür gesetzten Anforderungen. Aufgrund der geschaffenen Voraussetzungen bei der Implementierung in LS-Dyna stand dieses Modell jedoch nur für isotrope Materialien ohne plastische Verformung zur Verfügung. Es musste daher in einem ersten Schritt die Validierung des FE-Modells bzgl. eines elastisch-isotropen Werkstoffmodells erfolgen.

Die Materialkennwerte zur Parametrisierung der verwendeten Materialmodelle wurden aus den durchgeführten Versuchen hinzugezogen. Zur Beschreibung eines isotrop-elastischen Verformungsmodells wurden z.B. der E-Modul, die Querkontraktionszahl sowie die Materialdichte benötigt. Hierbei war es in LS-Dyna wichtig, auf ein konsistentes Einheitensystem zu achten, um die Ergebnisse richtig interpretieren zu können. Ein Beispiel hierfür ist Masse in t, Länge in mm, Zeit in s, Kraft in N, Spannung in N/mm² sowie Energie in Nmm. Bei der Vereinfachung zu einem isotropen Modell wurden die Materialkennwerte für die Hauptbelastungsrichtung gewählt, d.h. es wurden E-Modul und Querkontraktionszahl für die CD-Richtung eingesetzt. Da diese auch bei Spannung und Verformung des Packstücks die relevanten Materialeigenschaften waren, konnte davon ausgegangen werden, dass solch ein Materialgesetz den Versuch ausreichend genau nachbilden kann.

LS-Dyna verfügte des Weiteren über einige viskoelastische Materialmodelle. Diese könnten ebenso zur Anwendung kommen, jedoch ist der Aufwand der Parameteridentifikation dort größer, als im gewählten *MAT_115*, da durch die Berechnung des zeitabhängigen E-Moduls bereits ein vollständiges Kriechmodell vorlag, welches lediglich der Vorlage des *MAT_115* angepasst werden musste.

11.2 Validierung des FE-Modells

Validierung des Modells für einen isotropen Werkstoff über Vergleich zum BCT-Versuch

Um die Bewertung eines isotrop-elastischen Materialgesetzes zur Anwendung im FE-Modell durchführen zu können, wurde die Simulation dahingehend angepasst, dass sie im ersten Schritt einen standardisierten BCT-Versuch nachstellte. Hierfür wurden die Berechnungen bzgl. der einzuleitenden Kraft angepasst sowie das Materialmodell *001_ELASTIC* gewählt. Das FE-Modell, kurz vor dem globalen Stabilitätsversagen, ist auf folgender Abbildung dargestellt (Vgl. Abbildung 35). Die Farbverläufe ergeben sich aus den Verschiebungen in der x-y-Ebene.

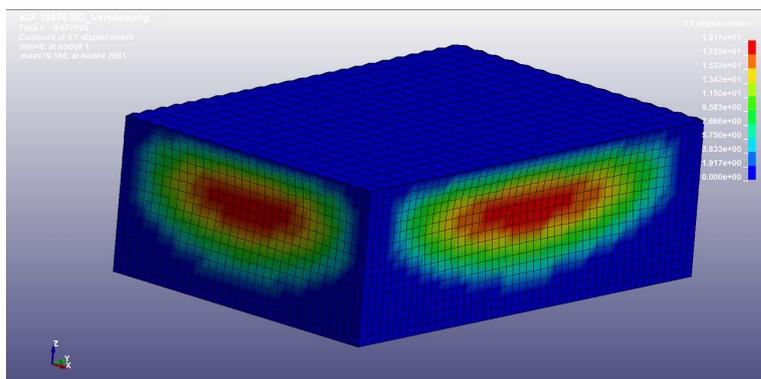


Abbildung 36: Verformung des isotropen FE-Modells in x-y-Ebene beim standardisierten BCT-Versuch

Sowohl das charakteristische Ausbeulen der Seitenflächen, wie ebenso die hauptsächliche Lastweiterleitung über die Verpackungskanten (siehe Anhang A2) ist zu erkennen. Eine Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe von FE-Modell und Praxisversuch liefert folgendes Ergebnis (vgl. Abbildung 37).

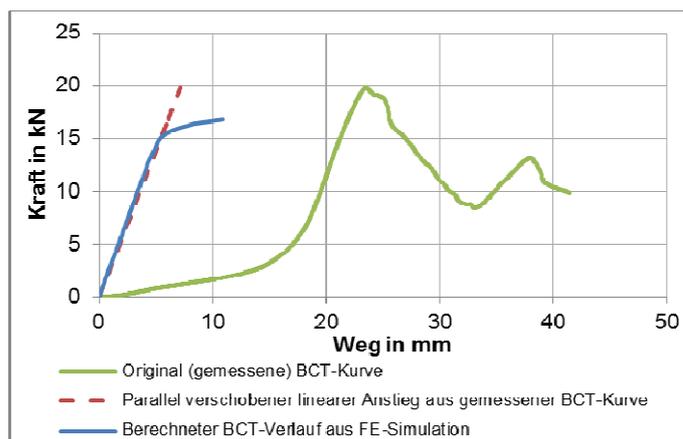


Abbildung 37: Vergleich von originaler BCT-Messung und Ergebnis des FE-Modells unter Berücksichtigung des reinen linearen Anstiegs der Messung

Schlussfolgerung Die Ergebnisse gaben zwei Rückschlüsse zur Bewertung des FE-Modells. Zum einen konnte im idealen Modell die Anfangskomprimierung der Verpackung, aufgrund geometrischer Ungenauigkeiten nicht wiedergegeben werden. Bei den

praktischen Versuchen ergab sich dieser Teilbereich der Kurve aus dem anfänglichen Komprimieren der „aufgedickten“ und unsymmetrischen Kartonprobe, einer Abweichung von der idealen Geometrie, und dem Umstand, dass die Belastung nicht sofort über den gesamten Verpackungsumfang aufgenommen wurde (siehe Anhang A3). Um diesen Bereich der Umverteilung der Last auf den Schachtelumfang aus dem Vergleich heraus zu rechnen, wurde lediglich der Anstieg der Kraft-Weg-Kurve mit dem FE-Modell verglichen. Hier zeigte sich eine sehr genaue Übereinstimmung von Modell und Praxis. Lediglich zum Ende des Belastungspfads weichen die beiden Kurven voneinander ab, was entweder mit dem Beginn der plastischen Verformung einher geht, was im gewählten Materialmodell nicht abgebildet werden kann, oder, und das ist wahrscheinlicher, wiederum auf die Inhomogenität im Material zurück zu führen war. Dieses weicht nicht gleichmäßig über den gesamten Umfang aus, sondern versteift sich punktuell. Zudem müsste die Steifigkeitserhöhung aufgrund der Verpackungsecken separat zum Ende des Belastungspfads untersucht werden. Da die Langzeitversuche jedoch nur im elastischen Bereich stattfinden sollten, kann gesagt werden, dass ein elastisch-isotropes Materialmodell ausreichend in seiner Genauigkeit ist.

11.3 Berechnung der Kriechkurve von Verpackungen aus Wellpappe

Parameterdefinition im MAT_115 UNIFIED CREEP

Das gewählte isotrop-elastische Materialmodell MAT_115 UNIFIED CREEP musste nach der Validierung parametrisiert werden. Hierfür mussten das in der Theorie zugrunde liegende Kriechgesetz nach Whirley und Henshell (1992, vgl. Formel 7) und dessen Parameter definiert werden.

$$\bar{\epsilon}^c = A \bar{\sigma}^n \bar{t}^m \quad (7).$$

Nachdem der grundlegende Zusammenhang zwischen Dehnung $\bar{\epsilon}^c$ und Spannung $\bar{\sigma}^n$ berechnet wurde, mussten für das Kriechgesetz in LS-Dyna lediglich die weiteren Parameter A, n und m berechnet werden (vgl. Abbildung 38). Dies erfolgte über eine Parameterstudie ähnlich vorheriger Berechnungen.

Ergebnis einer Parameterdiskussion für Wellpappen von Hersteller 2

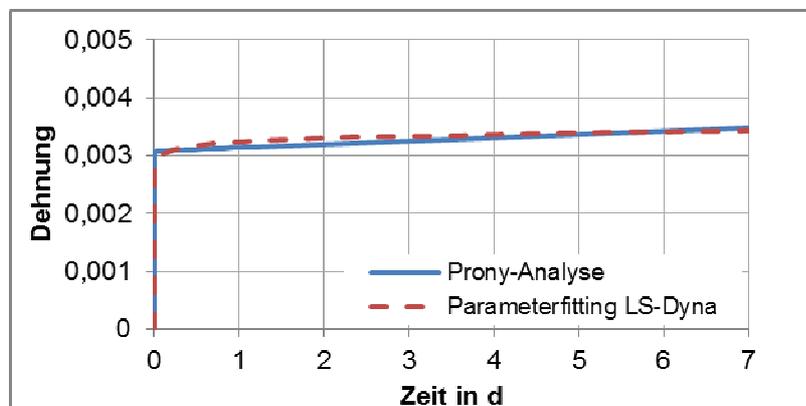


Abbildung 38: Parameterfitting für LS-DYNA MAT_115 UNIFIED CREEP

Implementierung der Ergebnisse des Parameterfittings und Ergebnisse der Kriechberechnungen

Die auf diese Weise berechneten Kriechparameter wurden über die Materialkarte in LS-DYNA implementiert (siehe Anhang A4). Nachdem sichergestellt wurde, dass das isotrope Modell eine genügende Näherung der Ergebnisse zeigt und das Kriechverhalten des Materials korrekt beschrieben war, konnte die erstellte Keyword-Datei über den LS-DYNA Solver berechnet und die Ergebnisse ausgegeben werden. Folgende Abbildung 39 zeigt einen systematischen Kriechverlauf für eine Verpackung aus Wellpappe des Herstellers 2. Auf der Verpackung wird die 15%-ige Maximallast aus dem BCT aufgebracht.

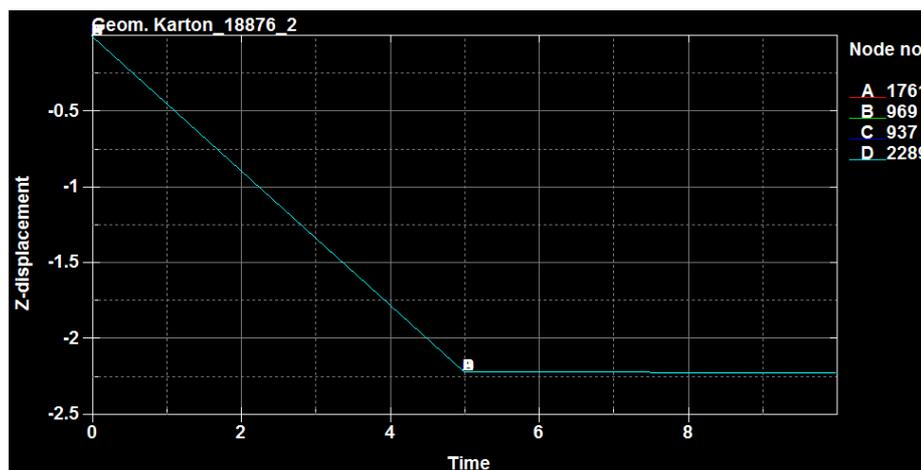


Abbildung 39: Schematischer Verlauf der anfänglichen Absenkung der oberen Fläche bei der FE-Analyse in LS-Dyna (A, B, C & D verlaufen parallel und sind Knoten an den oberen Verpackungsecken), Dimensionen: Time in s, Z-displacement in mm

Der Kriechverlauf zeigt deutlich den starken negativen Anfangsanstieg aufgrund der Erstbelastung auf die Verpackung. Zudem ist gut zu erkennen, wie sich nach einer definierten Zeit (hier: 5 s) der Kraftaufbringung ein gleichmäßiger Kriechverlauf einstellt. Das Versagen der Verpackung resultiert dann, wie auch beim normalen BCT, aus einem Stabilitätsversagen der Geometrie, weit vor den absoluten Festigkeiten des Werkstoffs selbst. Die von der Verpackung ertragbaren Knick- und Beullasten sind demnach geringer, als die maximal ertragbare Stauchlast des Materials selbst. Die so berechneten Kriechverläufe müssen in einem weiteren Schritt mit realen Messungen verglichen werden.

12 Langzeitversuche an Packmitteln

Durchführung der Langzeituntersuchungen Vor Beginn der Prüfung wurden die Wellpappen-Verpackungen vorbereitet, in dem die Seitenklappen eingeschnitten, die Verpackung aufgebaut und mithilfe von Klebeband stabilisiert wurden. Zeitgleich wurde das für die Prüfung benötigte Klima in der Klimakammer eingestellt. Dabei handelte sich hauptsächlich um das Normklima (23 °C/ 50 % RH), jedoch wurden auch zusätzlich Versuche im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) und im Wechselklima durchgeführt. Das Wechselklima begann mit einer zehnstündigen Phase bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und wechselte 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 % betrug die Zyklusdauer einen Tag. Anschließend wurden die Proben zwischen den Druckplatten zentriert (die durch den Hersteller verklebte Kante, die sog. Fabrikante, befindet sich hinten links), die Druckplatten heruntergefahren, der Wegaufnehmer befestigt und die Messung gestartet, vgl. Abbildung 40. Weiterhin wurde der benötigte Druck zur Aufbringung der 15 %, 25 % oder 33 % des maximalen BCT-Wertes (umgerechnet in bar) eingestellt. Die Messung wurde beendet, wenn die Wellpappen-Verpackung versagte. Im letzten Schritt wurde die Form der Ausbeulung notiert und die Messung (Verlauf der Kraft-Weg-Kurve, ermittelte Maximalkraft und Maximalweg) ausgewertet.



Abbildung 40: Versuchsaufbau zur BCT-Langzeituntersuchung von Packmitteln in einer Klimakammer mit durch Klebeband für alle Versuche standardisiert verschlossenen Öffnungen

Ergebnisse der Langzeituntersuchungen am Packmittel im Normklima

Im Normklima wurden Kriechversuche mit einer Belastung von 15 % und 25 % durchgeführt. Von Versuchen mit einer Belastung von 33 % wurde aufgrund des vorzeitigen Versagens in den Vorversuchen abgesehen. Die nachfolgende Abbildung 41 zeigt das Ergebnis einer Kriechuntersuchung der Wellpappen-Probe 2.1 im Normklima mit einer Belastung von 15 %.

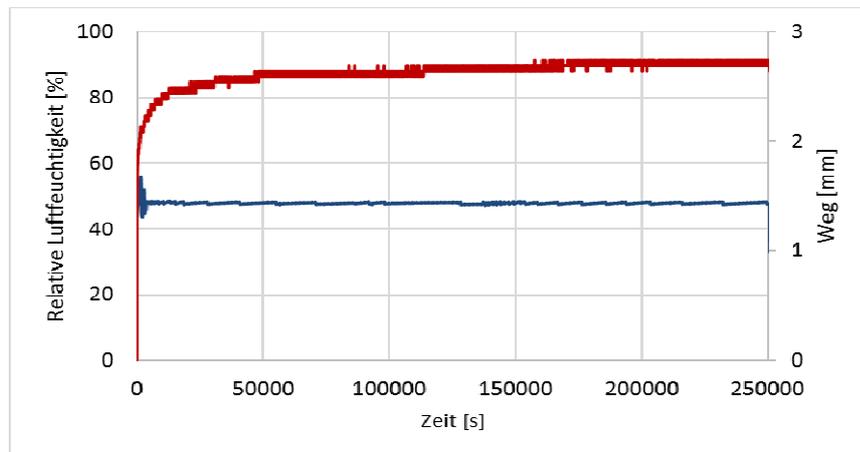


Abbildung 41: Ergebnis einer Kriechuntersuchung einer Wellpappen-Verpackung (Probe 2.1) im Normklima mit einer konstanten Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 15 % (blau = relative Luftfeuchtigkeit in %, rot = Wegveränderung der Probe in mm)

Abbildung 42 zeigt das Ergebnis einer Kriechuntersuchung der Probe 2.1 im Normklima mit einer Belastung von 25%.

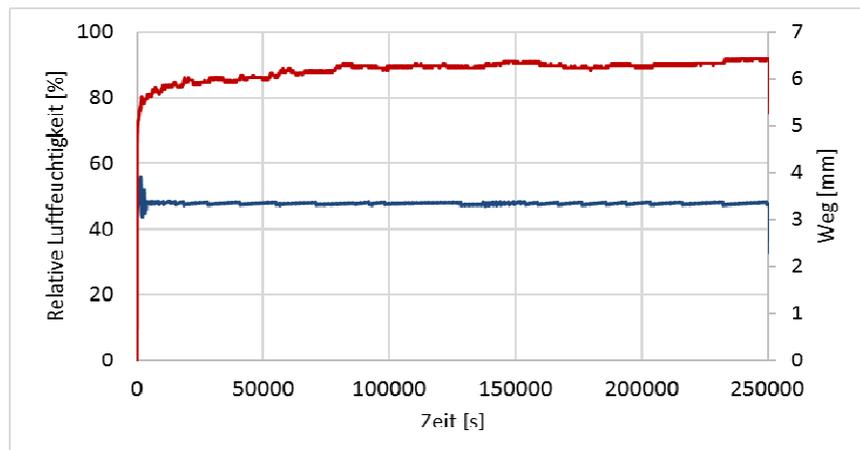


Abbildung 42: Ergebnis einer Kriechuntersuchung einer Wellpappen-Verpackung (Probe 2.1) im Normklima mit einer konstanten Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 25 % (blau = relative Luftfeuchtigkeit in %, rot = Wegveränderung der Probe in mm)

Bei dem Vergleich der Ergebnisse beider Belastungen wird deutlich, dass die Wegveränderung bei einer Belastung von 25 % doppelt so hoch ist, wie die der Belastung bei 15 %. Die Ausschläge in den Klimakurven ergeben sich aufgrund des Öffnens der Klimakammer zur Durchführung des Versuchsstarts.

Ergebnisse Wechselklima

Nachfolgende Abbildung 43 zeigt das Ergebnis der Kriechuntersuchung im Wechselklima der Probe 1.2 bei einer konstanten Temperatur von 23 °C mit 33 % Belastung. Dabei stellt die blaue Linie das Klima und die rote Linie die Wegveränderung der Probe dar. Bei der Betrachtung wird deutlich, dass auch

hier die Belastung von 33 % des im Normklima gemessenen BCT-Wertes zu hoch ist, da die Probe direkt nach der Anpassung an die 90 % relative Luftfeuchtigkeit nach 8,79 h (= 31.650 s) versagt.

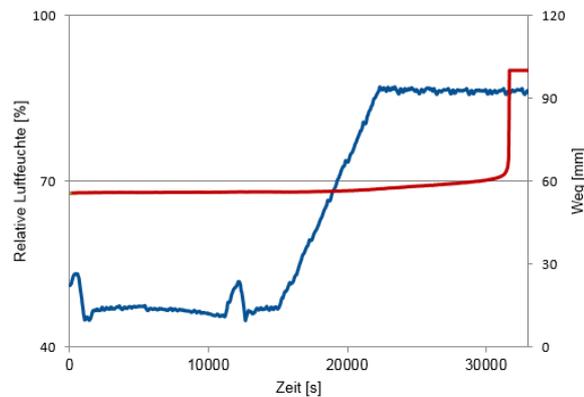


Abbildung 43: Ergebnis einer Kriechuntersuchung einer Wellpappen-Verpackung (Probe 1.2) im Wechselklima mit konstanter Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 33 %

Im Anschluss an die Versuche mit 33 % Belastung wurden Versuche mit 25 % Belastung im Wechselklima bei einer konstanten Temperatur von 23 °C durchgeführt. Auch die Belastung von 25 % war zu hoch um Kriechraten zu erzeugen. Nach einer Standzeit von 14,76 h (= 53.150 s) versagte die Wellpappen-Verpackung. Abbildung 44 zeigt das Ergebnis der Kriechuntersuchung im Wechselklima der Probe 1.2 bei einer konstanten Temperatur von 23 °C mit 15 % Belastung. Hierbei ist es möglich Kriechraten zu messen. Durch die Auswertung der Grafik ergeben sich eine Kriechrate von 0,066 mm/h und eine Zeit bis zum Versagen der Wellpappen-Verpackung von 159,23 h (= 573.230 s).

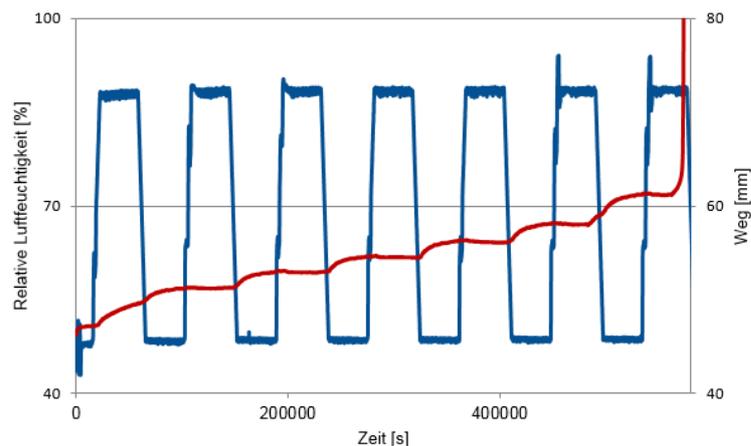


Abbildung 44: Ergebnis einer Kriechuntersuchung einer Wellpappen-Verpackung (Probe 1.2) im Wechselklima mit einer konstanten Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 15 %

Die Ergebnisse der Kriechuntersuchungen des Probenmaterials 1.1 wiesen ähnliche Verläufe auf (siehe Anhang A5). Aus diesem Grund wird nur auf die Ergebnisse mit einer Belastung von 15 % im Wechselklima bei konstanter

Temperatur von 23 °C eingegangen. In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse aller Kriechmessungen der Proben 1.1 und 1.2 im Wechselklima bei konstanter Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 15 % dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Kriechuntersuchungen an Wellpappen-Verpackungen der Proben 1.1 und 1.2 im Wechselklima bei konstanter Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 15 %

Probe	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3		Versuch 4		Mittelwert		Standardabweichung	
	Kriechrate [mm/h]	Standzeit [h]	Kriechrate [mm/h]	Standzeit [h]								
1.1	0,07	159,2	0,09	83,6	0,09	119,6	0,1	107,4	0,08	117,5	0,010	31,60
1.2	0,09	167,4	0,25	109,9	0,06	191,5	0,1	55,7	0,13	131,1	0,082	60,83

Bei der Betrachtung der Tabelle 7 fällt auf, dass die Ergebnisse beider Proben stark schwanken, das Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert, der sogenannte Variationskoeffizient (VK), beträgt für beide Proben $VK_{1,1} = 26,9 \%$ und $VK_{1,2} = 46,4 \%$. Die Abweichungen sind auf den starken Einfluss der Feuchtigkeit aufgrund der fehlenden nassfesten Verklebung beider Wellpappen zurückzuführen. Auch die Untersuchungen der weiteren Wellpappen zeigte, dass das Wechselklima schon bei geringen Belastungsstufen zum schnellen Versagen der Verpackung führt.

**Umbau eines
Langzeit-BCT-
Prüfstands für
kleinere
Packmittelmaße**

Kontrolluntersuchungen wurden parallel zu den Messungen an den Packmitteln der oben dargestellten Maße zusätzlich an kleineren Verpackungen (bis 45 cm x 45 cm x 80 cm möglich) durchgeführt. Hierfür wurde ein im Rahmen des Projekts modifizierter Langzeit-BCT-Versuchsstand an FS 1 genutzt (vgl. Abbildung 45).



Abbildung 45: Langzeit-BCT-Versuchsstand für Packmittel kleinerer Maße

Die Untersuchungen mit der in Abbildung 45 dargestellten Vorrichtung konnten jedoch lediglich im Normklima durchgeführt werden und dienen daher der zusätzlichen Validierung der Methode, da sie den Einfluss einer Geometrieänderung widerspiegeln können.

13 Auswertung Langzeitversuche vs. Ergebnisse Kurzzeitversuche

Allgemeines Dieses Kapitel dient zur Validierung der vorgelegten Methode zur Berechnung des Langzeittragverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe. Hierzu wurde zunächst ein Vergleich zwischen den ermittelten Kriechverläufen an Werkstoffproben und den Kriechverläufen am Gesamtpackmittel angestellt. Dies wurde anhand von Beispielen der Wellpappe vom Hersteller 2 folgend erläutert.

13.1 Vergleich der berechneten Kriechkurven aus den Werkstoffversuchen mit den Langzeitversuchen am Packmittel

Grundlagen des Vergleichs Da beim Lastfall des Langzeittransports von Verpackungen aus Wellpappe besonders die Festigkeit über die Höhe der Verpackung ausschlaggebend ist, wurde in einem ersten Schritt der Vergleich zwischen den Kriechkurven aus den Werkstoffuntersuchungen bzgl. des ECT und den Langzeituntersuchungen am fertigen Packmittel dargestellt.

Hierfür wurden die Kriechraten der Werkstoffproben beim ECT mit den Kriechraten der Packmittel verglichen. Als Beispiel dient hierfür die Belastung von 15 % der jeweils maximal ermittelten Last.

Gegenüberstellung der berechneten Werkstoffkriechkurven und den Langzeitversuchen

Die mittels der Berechnungen, basierend auf dem generalisierten Maxwell-Modell, der Analyse nach Prony und der Parameteranpassung, definierte Kriechrate für die Wellpappe 1 des Herstellers 2 lag bei 0,000106 mm/h (Belastung 15 % vom maximalen ECT, Normklima). Die Kriechrate der Verpackung aus demselben Material bei gleichen Randbedingungen lag bei 0,003743 mm/h. Wie zu erwarten war, gab es einen großen Unterschied zwischen den Kriechverläufen des Werkstoffs und der Verpackung. Gründe hierfür seien folgend genannt:

- Bei den reinen Werkstoffuntersuchungen (ECT) wurden die Kräfte ideal eingeleitet und es kam zu keiner geometrischen Veränderung.
- Bei den Werkstoffuntersuchungen wurde lediglich eine Belastung simuliert, es gab kein Lastkollektiv.
- Die Anpassung eines Werkstoffs zu einer geometrisch definierten Verpackung lies sowohl Schwachstellen als auch lokale Steifigkeitserhöhungen (z.B. die vier Ecken) entstehen, welche einen großen Einfluss auf das Kriechverhalten hatten.

Die Abschätzung des Kriechverhaltens sowie die Berechnung einer Lebensdauerwahrscheinlichkeit der Verpackung konnte daher nur mittels eines Vergleichs zwischen den FEM-Berechnungen und den Langzeitmessungen am Packmittel getroffen werden. Diese Systematik hatte sich bei allen geprüften Wellpappen gezeigt. Es konnte daher gesagt werden, dass die reine Auswertung der Werkstoffuntersuchungen, ohne eine genaue Betrachtung der Geometrie, nur einen Anhaltspunkt zur Lebensdauer der Verpackung geben kann und eher für einen Vergleich zwischen verschiedenen Wellpappen dient.

13.2 Vergleich der FEM-Berechnungen mit den Langzeitversuchen am Packmittel

Anpassung der aufgenommenen Kurven aus den Langzeitversuchen an den Verpackungen

Da die gewählten Belastungen im Normklima (23 °C, 50 % r.F.) teilweise erst nach sehr langer Zeit zu einem Versagen der Verpackungen geführt haben, konnten nur wenige Kurven bis zum Versagen mit den FE-Berechnungen verglichen werden. Zur Validierung der Kurven, bei denen es zu keinem Schaden an den Verpackungen kam, wurde der Versagenszeitpunkt der Verpackungen über eine Extrapolation der Kriechkurve in Kombination mit der Absenkung beim Versagen der Verpackung bei Versagenkurven berechnet. Dieses Vorgehen ist auf folgender Abbildung 46 beschrieben.

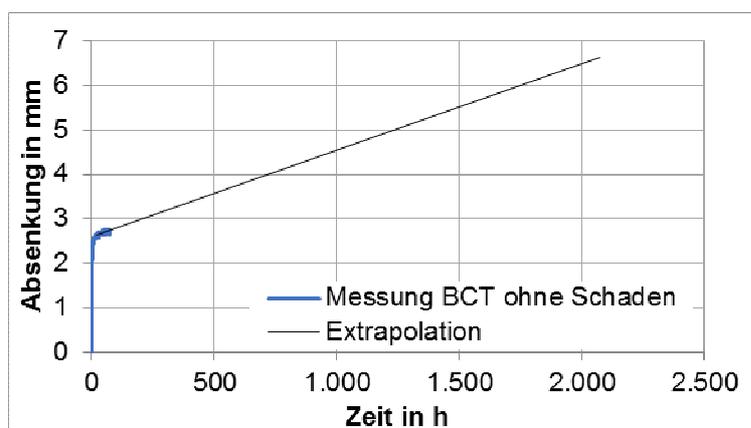


Abbildung 46: Absenkung einer Verpackung ohne Versagen inkl. Extrapolation des gemessenen BCT-Langzeitversuchs am Beispiel des Musters 2.1

Die mittels FE-Analyse berechneten Kriechkurven konnten somit sowohl mit den Kurven, bei denen ein zeitiges Versagen aufgetreten ist, wie auch mit Kurven mit einem sehr späten oder gar keinem Versagen validiert werden. Es waren daher eine ausreichend große Anzahl an Messkurven zur Validierung der Methode für mehrere Wellpappen geschaffen worden.

**Vergleich einer
mittels FEM
berechneten und
einer
gemessenen
Packmittel-
Kriechkurve**

Der Vergleich zwischen einer gemessenen und einer berechneten BCT-Absenkungskurve ist auf folgender Abbildung 47 dargestellt. Die Randbedingungen sind 15 % der Maximallast beim BCT und ein im Normklima durchgeführter Versuch.

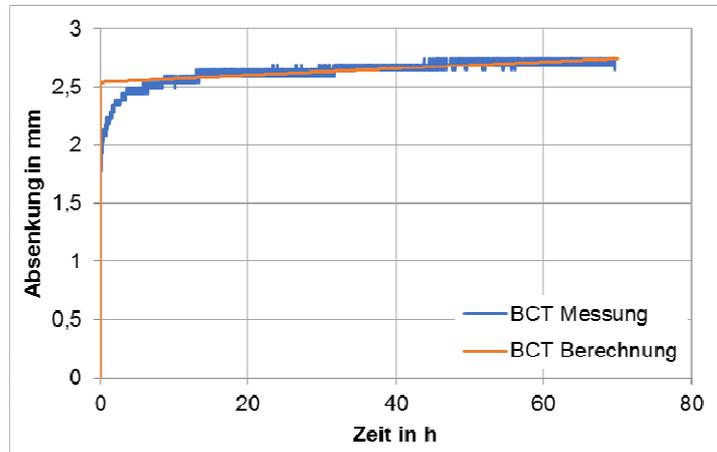


Abbildung 47: Vergleich zwischen BCT-Messung und FE-Berechnung

Wie bereits aus den Vergleichsuntersuchungen zum normalen BCT hervorgegangen ist, konnte die FE-Berechnung den anfänglichen Anstieg im elastischen Belastungsbereich sehr exakt nachstellen. Aufgrund der idealen Verformungssituation im Computermodell ist der anfängliche Bereich stärkeren Kriechens, das primäre Kriechen, nicht als abfallende Kurve, sondern als Knick im Kurvenverlauf ausgebildet. Im Weiterführenden war die Kriechrate der Berechnungen ausreichend genau bzgl. der gemessenen Kriechraten. Der Kriechprozess konnte somit in seinem anfänglichen Verhalten sehr genau nachgestellt werden. Hier sei zu berücksichtigen, dass der dargestellte Vergleich zwischen den Kurven erst nach der Kraftereinleitung stattfand, d.h. es ist ein Vergleich der reinen Kriechverläufe. Dies ist dem Umstand der Kurvenaufnahme an FS 2 geschuldet, welcher erst nach Lasteinleitung stattfinden konnte. Der Vorteil ist jedoch, dass die undefinierte Verformung zu Versuchsbeginn, ähnlich den BCT-Messungen (vgl. Abbildung 37), keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte.

Die Berechnung zur Lebensdauerwahrscheinlichkeit zeigte in den meisten Berechnungsfällen einen höheren Wert bei den Berechnungen als bei den Messungen. Dies war auf die im Modell fehlenden Inhomogenitäten im Material zurück zu führen, welche mit einer längeren Belastungszeit immer stärker zur Geltung kamen. Hierfür konnte die Funktion *PERTURBATION genutzt werden, welche eine Verteilung der Schalendicken über die gesamte Verpackungsfläche ermöglichte. Hierbei wurde eine vorgegebene Verteilung der Dicke von einzelnen Schalenecken an gemeinsamen Knoten beschrieben. Je nach Art und Größe der Verteilung ergab sich eine unterschiedliche und immer wechselnde Materialdicke über die gesamte Verpackung, die mit Hilfe einer Vielzahl von Dickenmessungen über eine große Prüffläche der Materialien definiert werden kann. Mit Nutzung dieser Funktion war es möglich, die Lebensdauer in der FE-Berechnung genauer an den Messwert anzugleichen. Hierfür müssten jedoch weitere Forschungen durchgeführt werden.

Ergebniseinschätzung und weiterer Forschungsbedarf

Die FE-Berechnungen zum Kriechvorgang einer Wellpappe-Verpackung bei einem idealen BCT-Langzeitversuch konnten die realen Messungen sehr genau wiedergeben. Bzgl. der Lebensdauerwahrscheinlichkeit müssen jedoch weitere Untersuchungen zur Definition des Keywords *PERTURBATION durchgeführt werden, um eine genauere Dickenverteilung des Materials und somit Inhomogenitäten in die Simulation einzubringen. Zudem behandelt die Methode in ihrer aktuellen Auslegung zunächst einen stoßfreien Lastfall. Die zusätzliche Belastungskomponente „Stoß“ müsste in zukünftigen Forschungsprojekten untersucht werden wie auch die Implementation der Shifter-Funktionen, welche im Rahmen des vorliegenden Projekts noch nicht vorgesehen waren. Ebenso wäre die Fragestellung der Temperaturänderung zu untersuchen und die sich daraus ergebende Kombination aus Feuchte- und Temperaturänderung. All diese Punkte würden die vorliegende Methode zur FE-Berechnung eines Kriechvorgangs von Verpackungen aus Wellpappe bei Normalklima praxisnaher gestalten können.

13.3 Einschätzung zur Güte der entwickelten Methode

Zusammenfassung

Mittels des Systems „Generalisiertes Maxwell-Modell“ war es möglich, das viskoelastische Materialverhalten von Wellpappe bzgl. verschiedener Belastungsgeschwindigkeiten abzubilden. Die Prony-Analyse ermöglichte es im Folgenden, dieses frequenzabhängige Verhalten in einen zeitabhängigen E-Modul und somit eine Kriechrate für das Material umzuwandeln. Diese Kriechrate musste bzgl. der Anfangsauslenkung, viskoplastischer Verformung und ggf. klimatischer Belastungen mit Hilfe von Shiftern angepasst werden. Die mittels dieser Methode berechneten Werkstoffparameter konnten das Kriechverhalten von Materialproben bzgl. einer einzelnen Belastung (Druck/ECT sowie Biegung) adäquat nachstellen. Sie konnten jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf das Verhalten der Gesamtverpackung geben, sondern eher einen Vergleich zwischen verschiedenen Wellpappen ermöglichen.

Die Berechnung der Kriechkurve der Verpackung war aufgrund zusätzlicher geometrischer Faktoren und einer Belastungsüberlagerung im Packmittel nur mittels zusätzlicher FE-Simulationen möglich. Diese konnten aufgrund der genauen Implementierung der Kriechparameter in Materialkarten sehr genaue Ergebnisse liefern.

Es konnte daher gesagt werden, dass die zugrunde liegende Methode zur Berechnung des Langzeittragverhaltens von Wellpappe validiert und als hinreichend genau beschrieben werden kann.

14 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Konkurrenzfähige Produkterzeugung

Existenz und Wachstumspotential von KMU sind vor allem von einer konkurrenzfähigen Produkterzeugung abhängig. KMU produzieren vielfach in Nischenmärkten mit hoher Anforderung an Produktqualität und Flexibilität und können im internationalen Wettbewerb nur durch kurze Innovationszyklen bestehen. Das geplante Projekt wird dazu beitragen, die Entwicklungszeit und Herstellung von neuen Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen so zu verkürzen, dass gerade diese Unternehmen besonders davon profitieren können. Durch Bereitstellung von Empfehlungen für eine qualitätsgerechte und kostengünstige Produkterzeugung trägt das Vorhaben zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten KMU bei.

Kostendruck beim Material

Besonders die Kostenreduzierung der Produkterzeugung liegt im Zentrum des Interesses von KMUs der Wellpappenindustrie, um im Preiskampf der Großkonzerne bestehen zu können. Die Produktion von Wellpappe unterliegt einem hohen Kostendruck durch die Industrie und den Handel. 50 % der Gesamtkosten zur Herstellung von Wellpappe werden durch die Rohstoffkosten der Papiersorten bestimmt. Die Preise für Wellpappenerzeugnisse stiegen in den letzten Jahren um ca. 3,1 %, die Preise für die Wellpappenrohstoffe jedoch um bis zu 20 %. Darüber hinaus stiegen 2013 die Energiekosten, welche ca. 3 % der Wellpappenherstellungskosten ausmachen, um 4,3 %. Um im Zuge der Globalisierung dem Kostendruck des Marktes standhalten zu können, ist es unabdingbar, das Langzeitverhalten von Wellpappe genauer bestimmen zu können, um sowohl den Rohstoffeinsatz bei gleichbleibender Festigkeit und somit die Herstellungskosten reduzieren.

Überdimensionierung

Um Schäden am Transportgut zu vermeiden werden Transportverpackungen aus Wellpappe trotz der hohen Rohstoffkosten oft um ein Mehrfaches überdimensioniert. Ein Großteil des Potentials der Verpackung wird dabei nicht ausgeschöpft (70-80 %), was mit einer buchstäblich ausgeprägten Verschwendung von Ressourcen einhergeht. Jedoch entstehen im Export jährlich Transportschäden in Höhe von 300 Millionen Euro, die durch eine sachgemäße Verpackung hätten vermieden werden können. Mithilfe der entwickelten Methode ist es möglich, die Festigkeit von Transportverpackungen aus Wellpappe besser an das zu transportierende Gut anzupassen, sodass Transportschäden vermieden und Rohstoffe eingespart werden können.

Kostenintensive Prüfung

Durch die angestrebten Forschungsergebnisse entfallen kostenintensive Prüfungen für die Verpackungsbranche, die sich KMU aus Kapazitätsgründen und dem starken Preisdruck hier nicht leisten können. Eine belastbare Prognose des Materialverhaltens wird neben der Kostenersparnis die maßgebende Basis für Lieferspezifikationen zwischen Kunden und Herstellern.

**Ökologisches
Bewusstsein**

Durch das immer stärker werdende ökologische Bewusstsein in der Bevölkerung werden besonders Produkte und Verpackungen aus nachwachsenden Rohstoffen zunehmend bevorzugt. Das Ziel von modernen Unternehmen, nach einer niedrigen Ökobilanz und einem negativen bis neutralen CO₂-Footprint zu streben, wird dadurch immer dringlicher. Die Verwendung von Wellpappe an Stelle von Kunststoffen kann erst bei optimiertem Materialeinsatz dazu einen Beitrag leisten.

**Qualitäts-
standard**

Ein Qualitätsstandard zur sicheren Abschätzung des Zeitstandverhaltens von Transportverpackungen aus Wellpappe existierte bislang noch nicht, wobei gerade KMU auf derartige Standards angewiesen sind, um sicher kosten- und nutzenoptimierte Wellpappen auswählen zu können. Mit der Entwicklung eines solchen Standards zur Simulation des Zeitstandverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe, können KMU sowohl Kosten- als auch Ressourcen schonen und zu entsorgende Packstoffe in großem Maßstab einsparen. Besonders bei den Materialkosten liegt ein hohes Einsparpotential, denn die Materialkosten bei z.B. Schwerwellpappen machen ca. 50 % der Herstellungskosten aus. Im scharfen Preiskampf der Verpackungsindustrie kann eine Senkung der anteiligen Materialkosten einen entscheidenden Vorteil schaffen.

**Charakterisie-
rung der
Materialkenn-
werte**

Die geplanten Entwicklungsarbeiten zur Formulierung, Realisierung, Validierung und Verifizierung der Prüfmethode waren komplex, kostenintensiv und zeitaufwändig und daher durch KMU allein nicht realisierbar. Die Arbeiten waren darauf gerichtet, die bestehenden technischen Risiken, z. B. hinsichtlich Fragen der Übertragbarkeit, abzubauen und zu beherrschen. Die damit verbundenen umfangreichen Tests konnten durch die im Projekt angestrebte Produktunabhängigkeit gut verallgemeinert werden. Für Faserstoff- und Papierhersteller sowie Hersteller von Faserformkörpern und Papierverbunden können sich zudem durch die bessere Charakterisierbarkeit der mechanischen Eigenschaften ihrer Produkte neue Absatzmärkte erschließen lassen.

Literatur

- [1] 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
- [2] 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
- [3] Verband der Wellpappen-Industrie e.V.: Jahresbericht – Mehrwert mit Wellpappe, URL: http://wellpappen-industrie.de/data/04_Verband/05_Publikationen/02_Jahresbericht/Jahresbericht-2013.pdf?PHPSESSID=046946aa4c7837523c586d76556791fe, Abgerufen am 15. September 2014
- [4] Strunz, A.M.; Meinel, G.; Manoiu, A.: Einsatz von Verstärkungsstoffen zur Sicherung der Festigkeit von Wellpapperohpapieren (IGF 14808 BR), Forschungsbericht, PTS Heidenau, 2008
- [5] Reimers, W.: Entwicklung eines Qualitäts-Standards für Schwerwellpappe unter Berücksichtigung mechanisch/klimatischer Belastungen in internationalen Logistikketten. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14836 N, Institut für BFSV an der HAW Hamburg, 2009
- [6] Göttching, I.; Katz, C.: Papier – Lexikon. Band 3, Deutscher Betriebswirte-Verlag, Gernsbach; 1999
- [7] Twede, D.; Selke, S. E. M.: Carton, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology, DEStech Publications, Inc., 2005, S. 227–487
- [8] Pollex, I.: Entspricht die Qualität den Anforderungen? Faltschachteln aus Karton Teil 1 und 2; Packaging Journal 04/2008 und 06/2008, S. 36/57
- [9] Pollex, I.; Dau, O.: Prozesskontrolle und Prüftechnik; Taschenbuch der Papiertechnik 2010, Hrsg. J. Blechschmidt, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010
- [10] Pollex, Irene: Altpapierspezifische Labor- und Prozessprüfungen; Fachbuch Altpapier 2011; Hrsg. J. Blechschmidt, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2011
- [11] Markström, H.: Prüfmethode und –geräte für Wellpappe, Lorentzen & Wettre, Stockholm, 1991
- [12] McKee, R.C.; Gander, J.W.; Wachuta, J.R.: Failure of corrugated boxes under long term loading – summary of results as of June 12, 1963, Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin, Project 1108-30
- [13] Ferry, J. D.: Viscoelastic Properties of Polymers. 3. Aufl., John-Wiley-Verl., New York, USA, 1980
- [14] Dimitrov, K.; Heydenrych, M.: Relationship between the ECT-strength of corrugated board and the compression strength of liner and fluting medium papers, Master of Engineering Thesis, University of Pretoria, Faculty of Engineering, Built, Environment and Information Technology, 16.7.2010

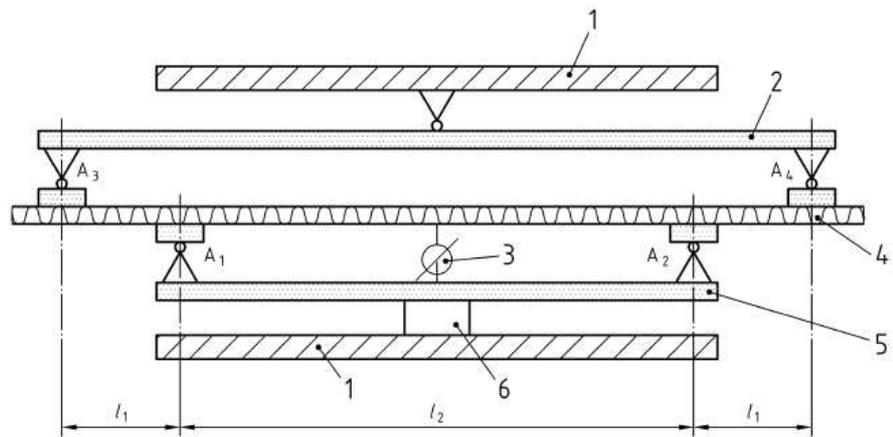
- [15] Niskanen, K.: Mechanics of Paper Products, Berlin, Boston, de Gruyter, 2012
- [16] Wagenführ, A.; Scholz, F.: Taschenbuch der Holztechnik, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 104-105
- [17] Koczyk, S.: Lineare Viskoelastizität in differentieller Darstellung. Technische Mechanik 17/2 (1997), S. 83-91
- [18] Altenbach, J.; Altenbach, H.; Zolochewsky, A.: Erweiterte Deformationsmodelle und Versagenskriterien der Werkstoffmechanik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 1995
- [19] Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: Werkstoffkunde Kunststoffe, 5. Aufl., Hanser-Verlag München, 2002
- [20] Frank, B.: Corrugated Box Compression - A Literature Survey, Packaging Technology and Science, Volume 27, Issue 2, 2014, S. 105-128
- [21] Lion, A.: Beiträge zur Materialtheorie - Einführung in die Lineare Viskoelastizität. Heft 4/07, Universität der Bundeswehr München, München, 2007.
- [22] Ranz, T.: Beiträge zur Materialtheorie - Elementare Materialmodelle der Linearen Viskoelastizität im Zeitbereich. Heft 5/07, Universität der Bundeswehr München, München, 2007.
- [23] Herrmann, L. R.; Peterson, F. E.: A Numerical Procedure for Viscoelastic Stress Analysis. 7. Meeting of ICRPG Mechanical Behavior W. G., Pub.-Nr. 177, Orlando, USA, 1968
- [24] Niskanen, K.: Paper Physics, Second Edition. Finnish Paper Engineers' Association, Jyväskylä, Finland, 2008

Glossar

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung
BCT	Box- Compression- Test - Stapelstauchwiderstand
Bf	Berstfestigkeit
Bs	Biegesteifigkeit
CD	Cross direction
D	Dicke
DOF	Degrees of Freedom (Freiheitsgrade)
Ds	Durchstoßwiderstand
ECT	Edge- Crush- Test - Kantenstauchwiderstand
FCT	Flat-Crush-Test
FEM	Finite-Elemente-Methode
Fg	Flächengewicht
FK	Feuchtklima
MD	Machine direction
NBf	Nass- Berstfestigkeit
NF	Nassfest
nfVk	Nassfeste Verklebung
NK	Normklima
NNF	Nicht nassfest
ODA	Optische Dehnfeldanalyse
OS	Oberseite
RH	Relative Humidity – Relative Luftfeuchtigkeit
US	Unterseite
VK	Variationskoeffizient
WK	Wechselklima

Anhang

A1



Legende

- 1 Fahrtraverse
- 2 Biegetisch 1
- 3 Wegaufnehmer
- 4 Wellpappe
- 5 Biegetisch 2
- 6 Kraftaufnehmer

Abbildung 48: Schema der Vorrichtung zur Untersuchung der Biegesteifigkeit

A2

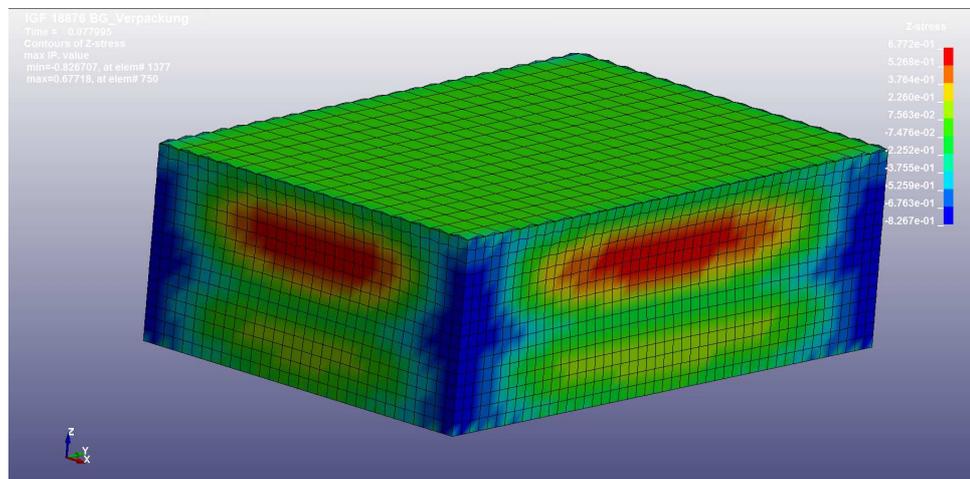


Abbildung 49: Spannung in z-Richtung des isotropen FE-Modells beim standardisierten BCT-Versuch

A3



Abbildung 50: Freie Ecke (weißer Pfeil) ohne Tragwirkung zu Beginn eines BCT-Versuchs

A4

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter (Subsys: 1 Karton_18876_2.k) Setting

*MAT_UNIFIED_CREEP_(TITLE) (115) (1)

TITLE
Unified_Creep

1	MID	RO	E	PR	A	N	M
	β	6.600e-010	155.42000	0.0600000	0.0016290	3.0735731	0.4844250

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 3 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Abbildung 51: Materialkarte in LS-DYNA für das Materialmodell 115_UNIFIED_CREEP

A5

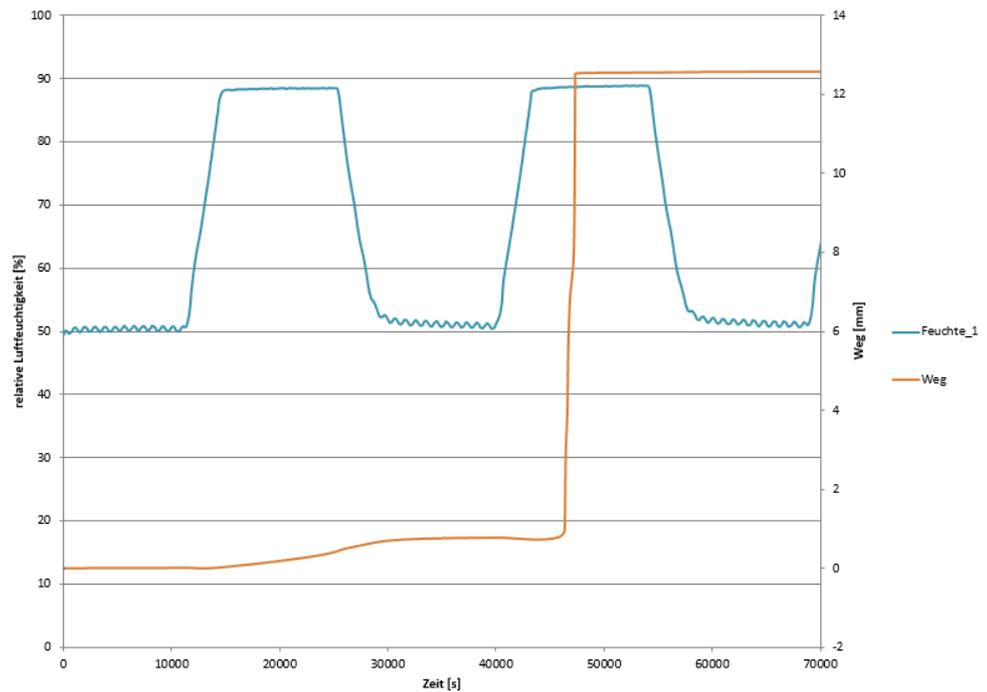


Abbildung 52: Ergebnis einer Kriechuntersuchung einer Wellpappen-Probe (Probe 1.1) im Wechselklima mit einer konstanten Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 25 %

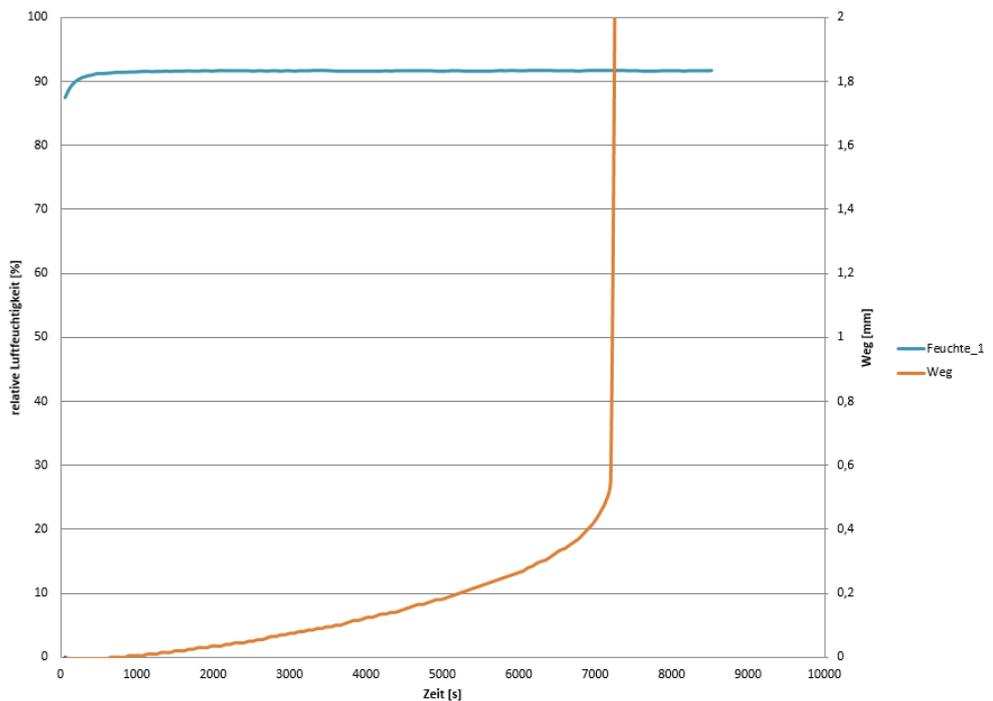


Abbildung 53: Ergebnis einer Kriechuntersuchung einer Wellpappen-Probe (Probe 1.1) im Feuchtklima (23 °C/ 90 % RH) mit einer konstanten Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 25 %

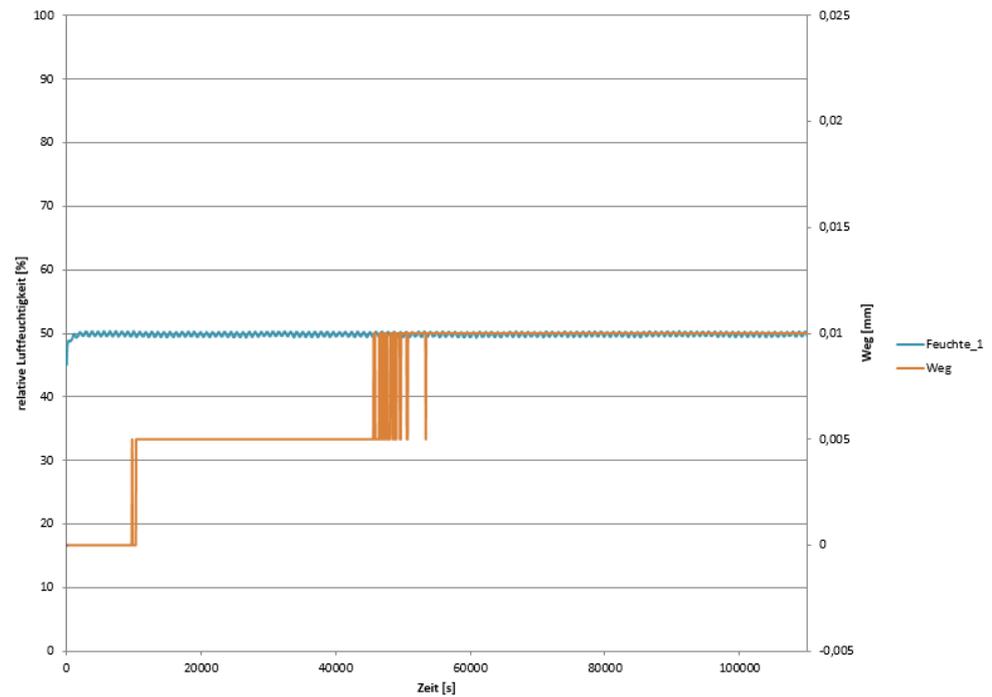


Abbildung 54: Ergebnis einer Kriechuntersuchung einer Wellpappen-Probe (Probe 1.1) im Normklima (23 °C/ 50 % RH) mit einer konstanten Temperatur von 23 °C mit einer Belastung von 25 %