Simulation des Kriechverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe

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

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

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

Einleitung

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

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

Kenntnisstand und Lösungsansatz

Qualitätsbestimmung von Wellpappe

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

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

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

Lösungsansatz

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

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



Abb. 1: Generalisiertes Maxwell-Modell (*Rust*, 2011) Fig. 1: Generalized Maxwell model (*Rust*, 2011)

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

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

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

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

Material und Messmethoden

Probenmaterial

Gegenstand der Untersuchungen war das Kriechverhalten und dessen Modellierung. Als Material wurden zwei doppelwellige Wellpappen (Wellenkombination BC) mit (Probe A) und ohne nassfeste Verklebung (Probe B) in Form von Bögen und Schachteln des Typs FEFCO 0201 eingesetzt. Die Bestimmung der Materialeigenschaften der Wellpappen erfolgte nach *DIN 55468-1* (2015) und die Bestimmung der Papiere nach *DIN 1SO 3039* (2011). Die *DIN 55468-1* (2015) umfasst Prüfungen der Berstfestigkeit, der Durchstoßarbeit und des Kantenstauchwiderstandes (ECT: Edge Crush Test). Der ECT wird in der Norm als der maximal wirkende Widerstand, den eine Probe mit senkrecht stehenden Wellen einer in diese Richtung wirkenden Kraft entgegensetzt, beschrieben. Hierbei wird die Probe einer Druckkraft ausgesetzt, bis diese versagt. Die Höchstbelastung wird mit Wegaufnehmern gemessen und daraufhin wird der Kantenstauchwiderstand in Kraft pro Längeneinheit errechnet (Einheit kN/m).

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

Geschwindigkeitsgesteuerte Kurzzeitversuche

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

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

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

Prüfvorrichtung Kriechen

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



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

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

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

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

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



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

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

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

Ergebnisse

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



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

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

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

Tab. 1: Aufbau der Wellpappen A und B Tab. 1: Structure of corrugated board A and B										
Wellpap	be A	Wellpappe B								
Flächengewicht in g/m ²	Papiersorte	Flächengewicht in g/m ²	Papiersorte							
280	Kraftliner	286	Kraftliner							
145	Wellenstoff	130	Wellenstoff							
166	Testliner 3	175	Testliner 2							
150	Wellenstoff	140	Wellenstoff							
290	Kraftliner	290	Testliner 1							

 Tab. 2: Untersuchung der Festigkeiten (ECT – Kantenstauchwiderstand, BS – Biegesteifigkeit, BCT – Stapelstauchwiderstand) im

 Feuchtklima (23 °C/ 90 % relative Luftfeuchtigkeit) im Vergleich zum Trockenklima (23 °C/ 50 % relative Luftfeuchtigkeit)

 Tab. 2: Strength investigation (ECT – edge crush test, BS – bending stiffness, BCT – box compression test) in humid climate (23 °C/ 90 % relative humidity)

 humidity) in comparison to dry climate (23 °C/ 50 % relative humidity)

Well- pappe	ECT in kN/m		Abwei- chung	BS in Nm		Abwei- chung	BCT in N		Abwei- chung
	23/50	23/90	in %	23/50	23/90	in %	23/50	23/90	in %
А	16,24	7,46	46	42,37	22,70	54	13225	8202	62
В	15,59	7,09	45	40,67	22,03	54	13166	8286	63



Abb. 5: Kantenstauchwiderstand bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten

Fig. 5: ECT at different testing speeds



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

Modellparameter

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

$$\boldsymbol{E}(t) = \boldsymbol{E}_0 + \sum_{i=1}^m \boldsymbol{E}_i \left(\boldsymbol{1} - \boldsymbol{e}^{-\frac{t}{\tau_i}} \right)$$
(1)

Darin sind:

- E(t) Zeitabhängiger E-Modul,
- $\mathbf{E}_0 \mathbf{E}$ -Modul zum Zeitpunkt 0,
- $E_i E$ -Modul des jeweiligen Elements,
- t-Zeitschritt und

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



Abb. 7: Ermitteltes Dämpfungsspektrum an Probenkörperzuschnitten zur ECT-Prüfung

Fig. 7: Determined damping spectrum on ECT specimens



Abb. 8: Beispielkurve eines zeitabhängigen E-Moduls berechnet mittels Prony-Analyse

Fig. 8: Time-dependent E-modulus calculated using Prony analysis

Vergleich der Berechnungen mit real ermittelten Kriechkurven

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

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

Darin ist:

• α_g – Feuchte-Shifter.

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

Berechnungen mittels Finite-Elemente-Methode

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



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

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



Abb. 10: Anwendung der Shifter-Funktion auf real gemessene Kurven

Fig. 10: Application of shifter function on measured creep curves



Abb. 11: Schematische Darstellung einer Finiten-Elemente-Simulation eines Box-Compression-Tests *Fig. 11: Schematic presentation of a finite elements simulation on BCT*

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

Fazit und Ausblick

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

Danksagung

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

Literatur

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

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

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

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

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

DIN ISO 3689 (1994) Papier und Pappe – Bestimmung der Berstfestigkeit nach dem Eintauchen in Wasser DIN 53121 (2014) Prüfung von Papier, Karton und Pappe – Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRACT

Simulation of the creep behaviour of corrugated board packaging

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

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

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

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

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

Autoren

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

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

Prof. Dr.-Ing. Bernd Sadlowsky studierte Chemietechnik und promovierte als Verfahrensingenieur auf dem Gebiet der Werkstoffe und Korrosion. Anschließend arbeitete er als Schadensanalytiker, Institutsleiter und Prokurist am Institut für Materialprüfung der TÜV Rheinland Group. Zurzeit ist er Leiter des Instituts für BFSV e. V. Hamburg und Geschäftsführer der BFSV Verpackungsinstitut Hamburg GmbH. Außerdem ist Sadlowsky Professor für Technische Mechanik, Werkstoff- und Verpackungstechnik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg). **Prof. Dr. Jörg B. Ressel** studierte Holzwirtschaft an der Universität Hamburg. Anschließend promovierte er und arbeitete unter anderem bei der Brunner Hildebrand GmbH in Hannover und war Professor an der Fachhochschule Rosenheim im Bereich Holztechnik. Zurzeit ist er Professor für Holzphysik und Mechanische Technologie des Holzes an der Universität Hamburg im Department Holzwirtschaft.

Projekt zur Bewertung der elektrostatischen Personenaufladung von Bodenbelägen gestartet

Unter der Kurzbezeichnung "E-StatWalk" nahmen mit Jahresbeginn das Institut für Holztechnologie Dresden (IHD) gemeinsam mit dem TFI – Deutsches Forschungsinstitut für Bodensysteme e. V. (TIF) und dem Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e. V. (PFI) die Arbeiten am Forschungsprojekt "Verfahren zur einheitlichen, schnellen und personenunabhängigen Bewertung der elektrostatischen Personenaufladung von Bodenbelägen mit langlebigen Referenzmaterialien" auf. Für 30 Monate werden die Institute gemeinsam mit einem Projektausschuss von über 20 Teilnehmern aus der Industrie die genannte Entwicklungsaufgabe bearbeiten.

Heute werden zur Überprüfung der elektrostatischen Eigenschaften im Wesentlichen zwei Normen angewandt: die EN 1815 (elastische und Laminatbodenbeläge) und ISO 6356 (textile Bodenbeläge). Diese wurden in den 1970er Jahren für die damaligen Produkte entwickelt, die sich deutlich von heute am Markt befindlichen Produkten unterscheiden. Ziel des Projektes ist auch deshalb die Entwicklung eines einheitlichen personenunabhängigen Prüfverfahrens zur Bestimmung der Personenaufladung für elastische, starre und textile Bodenbeläge sowie Schuhe. Dazu erfolgen im ersten Schritt eine Analyse zur Personenaufladung auf Bodenbelägen und die Spezifikation von Referenzmaterialien. Weiterhin werden Untersuchungen mit existierenden Messsystemen durchgeführt, die die Basis zur Konzeptionierung von Laborversuchseinrichtungen darstellen. Nach Ermittlung von Einflussgrößen auf die Personenaufladung und Optimierungsschritten soll das neue Verfahren mit den Industriepartnern getestet werden. Geplant ist der Entwurf eines Normvorschlags.

Ein einheitliches Verfahren, wie im Vorhaben angestrebt, bietet rechtliche Sicherheit für Bodenbelagshersteller, da es die Produktionsüberwachung der Antistatik erlaubt und somit die Risiken für Reklamationen senken kann.

Das IGF-Vorhaben 19770 BG der Forschungsvereinigung Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e. V. (TIHD), des Forschungskuratoriums Textil e. V. und des Prüf- und Forschungsinstituts Pirmasens (PFI) wird 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.

Kontakt:

Petra Schulz (IHD); +49 351 4662-316; petra.schulz@IHD-dresden.de Sophia Gelderblom (TFI); +49 241 9679-144; s.gelderblom@tfi-online.de Peter Schultheis (PFI); +49 6331 2490-921; peter.schultheis@pfi-germany.de