

Schlussbericht zum DLR-Forschungsvorhaben Nr. 01FS10018

***Erarbeiten von Prüfnormen für das Kriechverhalten von
Schwerwellpappe zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von
darauf gefertigten Schachteln.***

Forschungseinrichtung

Beratung-Forschungs-Systemplanung-Verpackung (BFSV) e.V., Hamburg,

Institut für BFSV an der HAW Hamburg,

Hamburg im Februar 2014

1. Förderhinweis

Das Forschungsvorhaben 01FS10018 der Forschungsvereinigung „Beratung-Forschungs-Systemplanung-Verpackung (BFSV) e.V.“ wurde über das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) im Rahmen des Programms zur Förderung „Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Wir bedanken uns für die gewährte Unterstützung.

2. Kurzfassung

Untersuchungsgegenstand des Forschungsvorhabens waren nassfeste Wellpappen verschiedener Hersteller von unbekannter Qualität. Es handelte sich sowohl um zwei- als auch um dreiwellige Wellpappen, die in Form von zwei verschiedenen Schachtelausführungen FEFCO 0201 und FEFCO 0310 getestet wurden.

Im ersten Schritt wurden Basisuntersuchungen am Packstoff selbst durchgeführt um die mechanischen Eigenschaften charakterisieren zu können. Dabei wurden beispielsweise die Berstfestigkeit, die Durchstoßarbeit und der Kantenstauchwiderstand gemessen. Die Untersuchung der Nass-Berstfestigkeit zeigt, dass die nassfesten Wellpappen nach einer 24 stündigen Lagerung im Wasser nur noch ca. 63 - 69 % der Berstfestigkeit besitzen. Die angeblich nassfesten Wellpappen eines Herstellers hingegen verloren hingegen ca. 85 % der Festigkeiten und bestanden im Gegensatz zu den anderen Wellpappen nicht die Untersuchung der nassfesten Verklebung. Aufgrund dessen handelt es sich bei den Wellpappen dieses Herstellers nach DIN 55468-1:2004-08 nicht um nassfeste Schwerwellpappen, sondern um Wellpappen für Lager- und Transportbeanspruchungen. Bei der Untersuchung des Einflusses einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 90 % auf die mechanischen Eigenschaften wurde festgestellt, dass sowohl die Biegesteifigkeiten als auch der ECT- und der BCT-Wert um die Hälfte abnehmen. Aufgrund der festigkeitssenkenden Wirkung von Feuchtigkeit ist es daher wichtig die Sorption von Wasserdampf durch die Wellpappe genauer zu verstehen. Daher werden die Standardversuche von der Sorptionsmessung flankiert. Die Untersuchungen der Sorption der Wellpappen veranschaulichen die starke Abhängigkeit zwischen der Materialfeuchte der Wellpappe, der Umgebungsfeuchte und somit den mechanischen Eigenschaften. Aus diesem Grund ist eine Vorklimatisierung von Wellpappen unverzichtbar um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherstellen zu können.

Nach den Basisuntersuchungen zur Charakterisierung der Packstoffe wurden die Packmittel auf ihre mechanischen Eigenschaften hin getestet. Es wurden sowohl Kurzzeit- als auch Langzeitversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der BCT-Kurzzeit-Untersuchungen veranschaulichen, dass die Standardprüfungen einen großen Einfluss auf die Festigkeit der gesamten Verpackung ausüben. Bedingt durch den besonders stabilen Aufbau der Ringe (FEFCO 0310) besitzen diese wesentlich höhere BCT-Werte als die Schachteln (FEFCO 0201). Aufbauend auf den mechanischen Eigenschaften der angelieferten Wellpappenqualitäten wurden Langzeituntersuchungen bei konstanter Last durchgeführt. Um den Tag-Nacht-Rhythmus der alternierenden Luftfechtigkeiten im weltweiten Containerversand simulieren zu können wurde ein 24 stündiges Wechselklima mit einer relativen Luft-

feuchtigkeit zwischen 50 % und 90 % bei 23 °C gewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Werte innerhalb der Wellpappen stark streuen. Grund dafür sind verschiedene Faktoren wie beispielsweise die Art der Verklebung oder die Papierzusammensetzung. Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigt sich weiterhin, dass die Standzeiten der Verpackungen umso höher sind, wenn die Kriechraten gering sind. Die Untersuchung der Ringe zeigt, dass eine Belastung von 25 % des BCT-Wertes der Ringe viel zu hoch ist und bedingt durch die geringe Standzeit keine Kriechraten ermittelt werden können. Bei einer Belastung der Ringe von 25 % des BCT-Wertes der Schachteln können länger Standzeiten und somit Kriechraten gemessen werden.

Um eine zuverlässige, zeitsparende und raumsparende Abschätzung des Zeitstandverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe zu ermöglichen wurde der Prototyp einer Zeitstandprüfanlage an ECT-Proben in Betrieb genommen. Dabei zeigte sich, dass die Planparallelität durch ungünstige Lagerung auf Bronzebuchsen keine belastbaren Versuchsergebnisse ermöglicht. Konstruktiv wurde daher eine neue Lagerung in Form von Kugelumlaufspindeln eingebaut. Die Konstruktion lässt eine hohe Planparallelität der Platten und daher eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu. So konnten an allen sechs Wellpappen Kriechraten ermittelt werden. Vor allem an drei Proben der dreiwelligen Wellpappe des Herstellers A konnten drei ähnliche Kriechraten und Standzeiten ermittelt werden. Die Abweichung der Werte beträgt bei der Kriechrate lediglich 0,0004 mm/h und bei der Standzeit 0,45 h. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse sind jedoch weitere Versuchsreihen unabdingbar.

Bei weiteren Versuchsreihen sollten zusätzliche Untersuchungen in Betracht gezogen werden. Hierbei handelt es sich vor allem um papieranalytische Verfahren zur Feststellung der genauen Zusammensetzung der Papiere. Die Kenntnis der Papiere könnte einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der mechanischen Eigenschaften der Wellpappe liefern.

Ab April 2014 werden in einem weiterführenden Forschungsvorhaben weitere Proben geprüft, um die Datenbasis zu erweitern und die Ergebnisse zu untermauern.

3. Aufgabenstellung

Das Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung von Prüf- und Liefernormen für das Kriechverhalten von Schwerwellpappe zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von daraus gefertigten Schachteln und Ringen. Das beantragte Forschungsvorhaben baute auf eigenen Forschungsergebnissen aus dem Mitte 2009 abgeschlossenen IGF-Forschungsvorhaben (Nr. 14836 N, AiF, BMWi) auf. Erstmals wurden in diesem Forschungsvorhaben Zeitstandprüfungen in einem repräsentativen Umfang im Wechselklima an 16 verschiedenen Schwerwellpappen in Form von Schachteln und Ringen größerer Abmessungen durchgeführt.

Im ersten Schritt sollten die Ausgangsmaterialien hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise Berstfestigkeit, Durchstoßarbeit und Kantenstauchwiderstand (ECT), untersucht werden.

Um das Kriechverhalten der Materialproben abschätzen zu können, wurde ein spezieller Versuchsaufbau in Form eines Zeitstandprüfgestelles entwickelt und in Betrieb genommen. Dabei wird das Kriechverhalten von ECT-Proben unter einer konstanten Belastung im Wechselklima ermittelt. Das Wechselklima sorgte hierbei für eine realitätsnahe Simulation des im Containerversand herrschenden Tag-Nacht-Rhythmus der wechselnden Temperaturen und Feuchten.

Neben den Versuchen zum Kriechverhalten der Materialproben wurde das Kriechverhalten der Schachteln mithilfe eines dafür speziell entwickelten Versuchsaufbaues ermittelt.

Die Ergebnisse aller Versuche, insbesondere der des Langzeit-Kantenstauchwiderstandes, sollten am Ende des Forschungsvorhabens eine neue Möglichkeit zur Vorhersage der Kriechvorgänge bzw. der Langzeitbelastbarkeit von Wellpappeschachteln liefern.

4. Wissenschaftlich-technischer Stand (Konstruktion, Verfahren; Fachliteratur)

Versandverpackungen aus Wellpappe sind vielseitig einsetzbare, leichtgewichtige und dennoch sehr belastbare Packmittel, die in nahezu allen Bereichen der Warendistribution Verwendung finden.

Die wichtigsten Abnehmerindustrien sind:

Nahrungs- und Genussmittel,
Chemische Industrie,
Elektroindustrie,
Papier- und Druckerzeugnisse,
Gummi- und Kunststoffherzeugnisse,
Metallverarbeitung,
Landwirtschaft,
Maschinen- und Anlagenbau.

Der Werkstoff (auch Packstoff) Wellpappe wird in erster Linie für Transportverpackungen aller Art verwendet. Er ist für Industrie, Handel und Gewerbe mit Abstand der bedeutendste Packstoff. Nahezu 75 % aller Transportverpackungen bestehen aus Wellpappe – Tendenz steigend. Transportverpackungen aus Wellpappe müssen dabei folgende Funktionen erfüllen, wobei Stabilität und Produktschutz die höchste Priorität haben:

Optimaler Schutz des Füllgutes (auch Packgut)
Verbesserung der Warendistribution (Rationalisierungsfunktion)
Information der Verbraucher und Marketing

Die Voraussetzung für die Erfüllung dieser Funktionen ist eine ausreichende Festigkeit der Wellpappe bzw. der daraus hergestellten Verpackungen gegenüber den auftretenden Transport-, Umschlag- und Lagerbelastungen (TUL-Belastungen). Die Kontrolle der Festigkeit mittels geeigneter Prüfverfahren ist dafür unverzichtbar. Hierzu wird ein Qualitäts-Standard für die Festigkeit von Wellpappe benötigt, mit dem es möglich ist, die Leistungsfähigkeit der daraus hergestellten Verpackung zu bestimmen. D. h. die Festigkeit der Verpackung soll aus den Kennwerten des Packstoffes Wellpappe (Festigkeitseigenschaften) abgeleitet werden. Dies wird bei den existierenden Standards nicht berücksichtigt.

Anforderungen an den Werkstoff Wellpappe

Für die Festigkeit von Verpackungen aus Wellpappe sind die Materialeigenschaften der Wellpappe von entscheidender Bedeutung. In Abhängigkeit von z. B. der Papierzusammensetzung, Papierqualität, Verklebung, Wellenaufbau etc. ergeben sich sehr unterschiedliche Festigkeitseigenschaften der Wellpappe, die mit standardisierten Prüfverfahren ermittelt werden.

Spezifikationen, Anforderungsnormen

Auf der Grundlage der Festigkeitswerte erfolgt zurzeit die Festlegung von Wellpappe-Qualitäten bzw. -sorten. Hierbei werden die Wellpappen durch einen oder mehrere Festigkeitswerte spezifiziert. Die in Deutschland und den Anrainerstaaten am häufigsten angewandte Norm ist die DIN 55468-1.

Eine direkte Zuordnung dieser Wellpappe-Qualitäten zu einer Gebrauchseignung (Leistungsfähigkeit) der daraus hergestellten Verpackungen ist bisher nicht möglich. Die DIN 55468-1 ist in erster Linie eine Liefernorm, um Qualitäten von Wellpappen miteinander vergleichbar zu machen und berücksichtigt die Funktionen, welche die Verpackungen bei der Warendistribution zu erfüllen (z. B. Schutzfunktion für das Packgut) haben nicht.

Eine europaweit anerkannte und genormte Spezifikation für die Auswahl von Wellpappe gemäß bestimmter Gebrauchseigenschaften bzw. einer vom Kunden gewünschter Leistungsfähigkeit gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht. Die Normung, sofern überhaupt vorhanden, ist in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich fortgeschritten. Eine internationale Vergleichbarkeit ist nicht möglich. Gerade dies ist aber durch den globalen Handel für die Anwender von Verpackungen aus Wellpappe notwendig, um sowohl Schäden, als auch Überverpackungen (Ressourcenschonung) sowie unnötigen Aufwand bei der Verpackungsentwicklung zu vermeiden.

Für den zuständigen Sektor der Versicherungswirtschaft gehört das Gebiet der Transportschäden zu den Warenschäden. Nur allein gegenüber den Versicherungsbeiträgen ergeben sich Schadensregulierungen in Höhe von 80 % und mehr dieser Beiträge. Eine Studie vom Verband der Wellpappen-Industrie e.V. (VDW) ergab bei den Transportverpackungen ein durchschnittliches Schadensaufkommen von mindestens 300 Millionen Euro. Experten aus Industrie und Handel schätzen das Schadenspotenzial auf über 500 Millionen bis zu 1 Milliarde Euro in der gesamten Lieferkette.

Unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten kommt einem verbesserten Standard für die Leistungsfähigkeit von Verpackungen aus Wellpappe eine enorme Bedeutung zu. Ein derartiger Standard wird die Basis für eine zielgerichtete Dimensionierung der Verpackungen und die Ausnutzung des Festigkeitspotenzials der eingesetzten Rohpapiere sein.

Aufgrund der Tatsache, dass die Materialkosten für die eingesetzten Papiere im Fall der Schwerwellpappen ca. 50% der Herstellungskosten betragen, ergibt sich ein hohes Einsparpotential. Die Optimierung des Materialeinsatzes kann durch die Kombination verschiedener Papiere, die Konstruktion des Packstoffs Wellpappe (Geometrie) und die konstruktive Gestaltung der Verpackung im Hinblick auf die Gewährleistung der Schutzfunktion bei den zu erwartenden Versandbelastungen erfolgen.

Nach Schätzungen der Industrie ergeben sich z. B. durch die Reduzierung der Festigkeit der Wellpappe um eine Sorte ca. 10 % geringere Materialkosten. Das Einsparpotenzial im mehrstufigen Entwicklungsprozess für Verpackungen, wird bei Reduzierung um eine Stufe auf ca. 5-10 % geschätzt.

Bisherige Arbeiten:

IGF-Vorhaben Nr. 14836 N (AiF, BMWi)

Das beantragte Forschungsvorhaben baut auf eigenen Forschungsergebnissen aus dem Mitte 2009 abgeschlossenen IGF-Vorhaben Forschungsvorhaben (Projektnummer AiF 14836 N) auf. Das IGF-Vorhaben 14836 N der Forschungsvereinigung „Deutscher Forschungsverbund Verpackungs-, Entsorgungs- und Umwelttechnik e.V. (DVEU) Hamburg“ wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Es wurde vom Antragsteller, Institut für BFSV an der HAW Hamburg, durchgeführt.

Erste Ansätze für einen Wellpappe-Standard, der auf den Anforderungen an die Verpackungen im Versandprozess basiert, sind vom Antragsteller Institut für BFSV für den Bereich der „Nicht-Schwerwellpappen“ erarbeitet worden.

Dieser europäische Standard wird zurzeit nur in einigen nordeuropäischen Ländern erprobt. Er wurde für Wellpappe-Verpackungen im Konsumgüter-Bereich entwickelt. Neben der Transportfunktion stehen die Funktionen als Um- und Verkaufsverpackung im Konsumgüter-Bereich im Vordergrund.

Für Schwerwellpappen ist dieser Standard nicht geeignet, da an Verpackungen aus Schwerwellpappe ganz andere Anforderungen gestellt werden. Diese Anforderungen resultieren z. B. aus deutlich längeren Transportwegen und -dauern, sehr langen Lagerzeiten, hohen statischen und dynamischen Versandbelastungen, häufig wechselnden Klimabedingungen sowie der komplexeren Struktur von Schwerwellpappen (zwei- drei- und vierwellige Ausführungen).

Schwerwellpappen werden zudem überwiegend zum Verpacken von Industriegütern mit größerem Volumen (auch Schüttgüter) eingesetzt. Beim Versand dieser Güter kann man prinzipiell zwei Transportarten zu unterscheiden:

Kontinentaler Transport innerhalb einer begrenzten Region (z.B. Europa),
Weltweiter Überseeversand.

Hauptmerkmal für die Leistungsfähigkeit einer Transportverpackung ist die Tragfähigkeit (Stapelbarkeit) der Wellpappe-Verpackungen, um das Packgut vor den auftretenden Transport- und Lagerbelastungen zu schützen.

Das in der Industrie am häufigsten verwendete Prüfverfahren zur Beurteilung und Überprüfung der maximalen Tragfähigkeit von Wellpappe-Verpackungen ist die Bestimmung des maximalen Stauchwiderstands (BCT-Wert, BCT = Box Compression Test). Diese Prüfung erfolgt gemäß DIN 55440-1 und DIN EN ISO 12048 unter Normalklima von 23 °C / 50 % relativer Luftfeuchte und dauert wenige Minuten (Kurzzeitprüfung)

Die bei Transport und Lagerung tatsächlich auftretenden Beanspruchungen von Verpackungen durch statische Lasten (Überstapeln) und wechselnde Klimabedingungen über einen langen Zeitraum sowie teilweise auch dynamische Lasten (z. B. Vibrationen auf der Ladefläche) werden mit dieser Kurzzeitprüfung nicht erfasst.

Für die beanspruchungsgerechte Prüfung und Bewertung der Leistungsfähigkeit von Transportverpackungen aus Schwerwellpappe ist die Kenntnis über das Zeitstandverhalten von Verpackungen (Dauerbelastung im linearen Verformungsbereich der Wellpappen, „Langzeitfestigkeit“) aber zwingend notwendig. Die bisherige Standardisierung von Schwerwellpappe berücksichtigt diese Zusammenhänge jedoch nicht einmal ansatzweise.

Die von der antragstellenden Forschungsstelle bereits abgeschlossenen Untersuchungen im o. g. Forschungsvorhaben bezüglich der Qualität von Wellpappe und der Leistungsfähigkeit von Verpackungen haben zu folgendem Ergebnis geführt:

Verpackungen aus Wellpappe unterschiedlicher Hersteller, deren Qualität des Packstoffes gemäß aktueller Normen gleich ist, zeigen deutlich unterschiedliche BCT-Werte der Verpackung (z. B. Schachtel)

Verpackungen mit gleichen BCT-Werten („Kurzzeitfestigkeit“) ergaben bei der Untersuchung des Zeitstandverhaltens unterschiedliche Langzeitfestigkeiten.

Daraus ergeben sich folgende Probleme und Fragestellungen:

Probleme:

Eine eindeutige Definition der Qualität bzw. Leistungsfähigkeit von Schwerwellpappe als Werkstoff ist bisher nicht möglich.

Die bisher verwendeten Kennwerte für die Wellpappen beziehen sich auf zerstörende Prüfungen mit maximalen Bruchfestigkeiten. Kenntnisse über das Verhalten im elastischen Verformungsbereich, die für die Erfüllung der Schutzfunktion von Transportverpackungen und damit für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit für die Praxis von entscheidender Bedeutung sind, existieren nicht. Eine direkte Vorhersage der Leistungsfähigkeit von Verpackungen, abgeleitet aus den Festigkeitswerten der Wellpappe, ist nicht möglich.

Kernfragen an die Normung und Standardisierung:

Nach welchen Kriterien soll ein Nutzer / Verwender von Transportverpackungen aus Schwerwellpappe bestellen?

Welche Festigkeitseigenschaften beschreiben die Qualität der Schwerwellpappe hinsichtlich der vom Verwender gewünschten Leistungsfähigkeit der daraus hergestellten Verpackungen praxisgerechter?

Notwendig ist die Einführung von Kennwerten, die den Werkstoff Schwerwellpappe hinsichtlich seiner physikalisch-technischen Eigenschaften unter dem Einfluss der realen Versandbelastungen eindeutiger definieren und dem Verwender damit eine Prognose der möglichen Leistungsfähigkeit seiner Verpackungen ermöglichen, wie dies in anderen technischen Bereichen gewährleistet ist.

Die Standardisierung der Schwerwellpappe muss eine eindeutige Qualitätsbestimmung der Wellpappen gewährleisten und auf der Funktion der Verpackung basieren. Zu berücksichtigen sind dabei:

Anforderungen der Transportlogistik,
 Unterschiedliche klimatische / mechanische Belastungen (Transportarten, Zielgebiete),
 Eigenschaften der eingesetzten Papiere (mehr Recyclinganteile, ökologische Aspekte, Entsorgung),
 Aufbau und Konstruktion der Wellpappen,
 Konstruktionsmerkmale der Verpackung,
 Eigenschaften des Füllgutes.

Diese o. g. Ergebnisse werden durch die nachfolgenden Bilder aus dem abgeschlossenen AiF Forschungsvorhaben verdeutlicht. Bild 1 zeigt gleiche Schachteln unterschiedlicher Hersteller, die gemäß DIN der gleichen Sorte entsprechen, z.B. Sorte 2.92. Wellpappe 5, Wellpappe 8, Wellpappe 9, Wellpappe 10. Es wird deutlich, dass die Zeitstandversuche zu unterschiedlichen Versagenszeiten führen. D. h. diese vier o. g. Wellpappen haben eine unterschiedliche Leistungsfähigkeit und können somit eigentlich nicht nach den heutigen Normen verglichen werden.

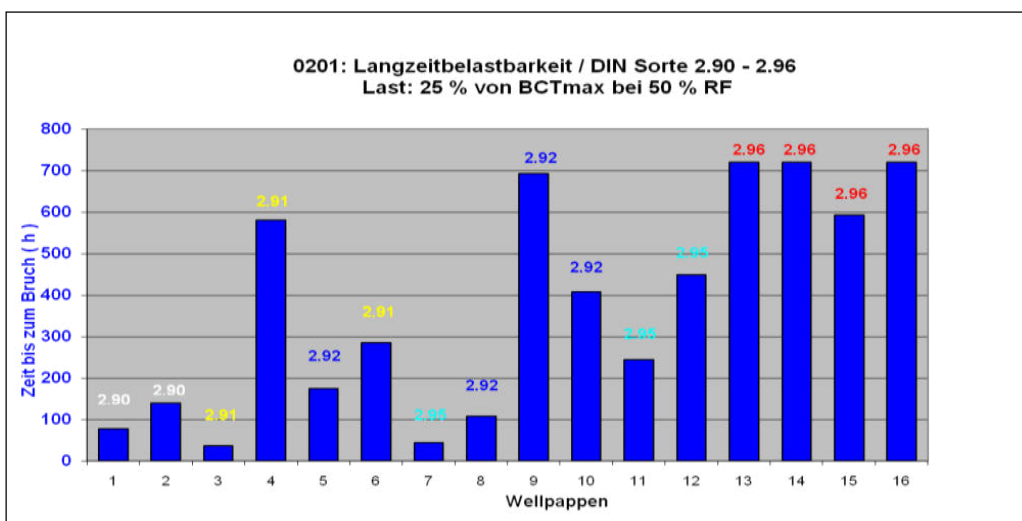


Bild 1: Langzeitbelastbarkeit DIN Sorte 2.90 – 2.96

Bild 2 zeigt die Ergebnisse des Versuches zur Ermittlung des Kurzzeitstauchwiderstands BCT (rot), der bisher einzig möglichen Vergleichbarkeit der Leistungsfähigkeit von gleichen Schachteln unterschiedlicher Wellpappen, im Vergleich zur Langzeitfestigkeit bei 25 % der aufgegebenen Zeitstandlast vom BCT-Wert (blau). Die Ergebnisse der Wellpappen 8, 9, 10 und 11 verdeutlichen, dass diese sich trotz nahezu identischer Kurzzeitfestigkeit hinsichtlich ihrer Langzeitfestigkeit deutlich unterscheiden.

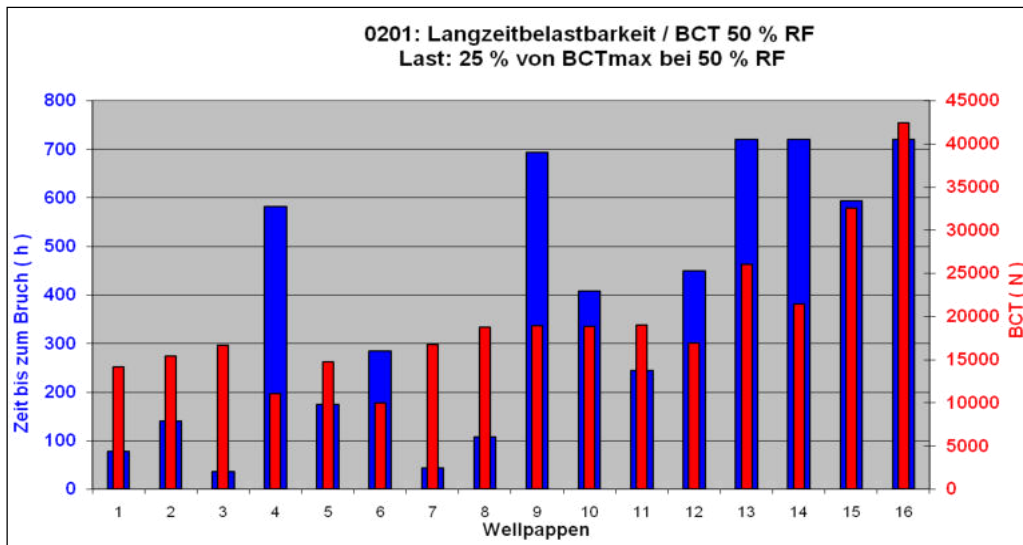


Bild 2: BCT-Wert vs. Langzeitfestigkeit

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen müssen nun auch in die vorhandene Norm eingebracht werden, so dass die Klassifizierung der Sorten verbessert wird. Nicht eingebracht werden können die aus diesen Ergebnissen noch nicht resultierenden Zusammenhänge zur Zeitstandfestigkeit der Wellpappe selbst. Hier müssten Reihenuntersuchungen an Hunderten von Schachteln durchgeführt werden, die nicht bezahlbar wären.

Eine gute Chance auf verwertbare Ergebnisse bietet, wie bei anderen Werkstoffen auch, die Zeitstandprüfung an kleinen Proben, wie sie das beantragte Vorhaben vorsieht. Die Durchführung dieser Untersuchungen soll mit den Proben zur Bestimmung des Kantenstauchwiderstands im Zeitstandversuch und unter Wechselklimabedingungen erfolgen. Erste veröffentlichte Voruntersuchungen zeigen, dass dieser Weg einzuschlagen ist.

Untersuchungen zum Kriechverhalten von Wellpappe von Prof. R. Eschke

Es wurde untersucht, ob statt der lang andauernden Belastung von 28 Tagen ganzer Schachteln auch der ECT-Wert der Wellpappe (Edge Crush Test – Bestimmung des Kantenstauchwiderstand) zur Vorhersage der Kriechvorgänge an Wellpappeproben möglich ist, ggf. in Verbindung mit der McKee-Formel. Mit entsprechenden Vorversuchen konnte diese Möglichkeit bei Änderung der Abmessungen der normalerweise standardisierten Abmessungen der ECT-Proben bereits probeweise festgestellt werden.

Nach McKee eignet sich der Kantenstauchwiderstand (ECT-Wert) von Wellpappe zur Vorhersage des Kurzzeit-Stauchwiderstands (BCT-Wert) bei Normalklima von 23°C und 50% rel. Feuchte der Schachteln aus Wellpappe bei gegebenen Schachtelabmessungen.

Nach McKee kann der BCT-Wert gemäß folgender Formel prognostiziert werden (damals nur für einwellige Wellpappen):

$$BCT = K \times ECT^{\beta} \times BS^{1-\beta} \times U^{2\beta-1}$$

BCT= Stauchwiderstand (BCT-Wert) der Verpackung in N

ECT = Kantenstauchwiderstand (ECT) in kN/m

BS = Biegesteifigkeit (geometrisches Mittel aus MD und CD) in Nmm

U = Umfang des Packmittels in mm

Der Antragsteller hat seit Ende der 1960er Jahre in Langzeit-Stauchversuchen (28 Tage – Zeitstandversuche) Wellpappeschachteln vieler Hersteller mit den Abmessungen 800 x 600 x 600 mm aus nassfester und nicht nassfester Wellpappe geprüft und diese Wellpappen als sog. „seemäßige Wellpappe“ mit den Herstellern in den Markt gebracht.

Die Ergebnisse aus Voruntersuchungen zum Kriechverhalten von Wellpappe, nämlich die sog. ECT- W_{Schmal} Werte (W steht für Wechselklima, schmal für die in der Höhe halbierte genormte ECT-Probe) von Prof. Richard Eschke (ehemaliger Leiter des Instituts für BFSV) sollen mit den geplanten Forschungsarbeiten, sofern erfolgreich, in eine Norm überführt werden.

Mit Hilfe einer angepassten McKee-Formel und der Biegesteifigkeit von Wellpappe soll anschließend auf das Langzeit-Stauchverhalten von Schachteln geschlossen werden. D. h. es soll die Vorhersage der Langzeitbelastbarkeit der Schachteln aus Wellpappe bei weltweitem Überseeversand besonders im Container und im Überseeversand getroffen werden.

Schachteln aus Wellpappe versagten im Überseeversand seit der Einführung des Containers Anfang der 1960er Jahre, insbesondere bei den langen Transporten im Container nach und von Fernost. Dies führte beim Antragsteller zu 28 Tage dauernden Zeitstanddruckversuchen, ähnlich wie bei anderen Werkstoffen, z.B. Beton.

Es sollte mit dieser Voruntersuchung der Nachweis erbracht werden, dass das Zeitstandverhalten von Wellpappeschachteln mit Hilfe von Untersuchungen an kleinen Proben abgeschätzt werden kann. Dieser Nachweis konnte durch die Bestimmung des Langzeit-Kantenstauchwiderstands – ECT- W_{Schmal} unter wechselnden klimatischen Belastungen (wie beim Containertransport) erbracht werden.

Das Ermitteln und Verknüpfen der beiden Festigkeitswerte „Langzeit-Kantenstauchwiderstand“ und „Biegesteifigkeit“ unter für den Packstoff ungünstigen Klimabedingungen in Verbindung mit dem Einbringen in die Normung sind die wesentlichen Ziele dieses Forschungsvorhabens. Dies soll mit Schachteln und Werkstoffproben unterschiedlicher Hersteller erfolgen

Im Ergebnis soll eine neue Kenngröße speziell für die hier zu betrachtenden Wellpappen (nach bisheriger Norm nassfesten) erarbeitet werden und dann in einer für den Käufer und Verkäufer von Wellpappe verbindlichen Norm zur Grundlage gemacht werden.

Kurzzeit-Stauchfestigkeitswerte der Schachteln lassen keine realen Vorhersagen für das Langzeitstauchverhalten zu. Bei den Schachteln spielt dabei auch die Biegesteifigkeit eine besondere Rolle, wie sie McKee u. A. bei der Berechnung des Stauchwiderstands aus dem Kurzzeitkantenstauchwiderstand von Schachteln eingeführt hat. Dies waren allerdings Schachteln kleinerer Art und überwiegend aus einwellige Wellpappe.

5. Ergebnisse

In der unten abgebildeten Tabelle sind die Ergebnisse der Standardmessungen in Form von Mittelwerten zu sehen. Zusätzlich zu den Standardprüfungen im Normklima sind auch die Ergebnisse der Untersuchungen bei einer Temperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 % abgebildet.

Die Hersteller werden anonymisiert und als Firma A, B und C dargestellt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 1: Ergebnisse der Standardprüfung in Form von Mittelwerten

Wellpappe		Fg	Dicke	Bf	NBf	nfVk	Ds	ECT		Bs		BCT			
Hersteller	Welle	[g/m ²]	[mm]	[kPa]	[kPa]	[%]	[J]	23/50	23/90	23/50	23/90	23/50		23/90	
								[kN/m]	[kN/m]	GM [Nm]	GM [Nm]	Schachtel	Ring	Schachtel	Ring
A	2 AA	1699	11,4	4116	1548	100,0	22,2	22,6	12,9	132,9	77,6	16188	27364	8788	16865
	3 AAA	1874	14,8	4997	1763	100,0	27,4	29,1	16,0	307,5	172,2	23628	38084	11628	22598
B	2 BA	1443	7,3	3454	524	53,3	18,1	20,4	10,0	72,1	39,6	15366	18876	6652	9943
	3 BAA	1496	12,5	3055	464	0,0	21,3	18,7	9,4	159,7	80,9	13354	22246	6480	11740
C	2 CA	1670	9,7	3711	1152	93,3	21,6	23,0	12,0	107,1	85,8	16246	25974	8628	13280
	3 ACA	2128	14,7	4870	1783	100,0	20,3	25,0	14,1	268,7	153,8	20850	35248	10058	17140

Die Ergebnisse der Untersuchung der Berstfestigkeit zeigen, dass die dreiwelligen Wellpappen der Hersteller A und C mit 4997 kPa und 4870 kPa die höchsten Berstfestigkeiten besitzen. Hingegen weisen die Wellpappen des Herstellers B die niedrigsten Berstfestigkeiten auf. Dabei ist vor allem interessant, dass die zweiwellige Wellpappe mit 3454 kPa eine höhere Berstfestigkeit als die dreiwellige Wellpappe (3055 kPa) besitzt. Vergleicht man die Ergebnisse der Berstfestigkeit mit denen der Nass-Berstfestigkeit (NBf) so zeigt sich, dass die Nass-Berstfestigkeit von nassfesten Wellpappen ca. 31 - 37 % der Berstfestigkeit entspricht. Weiterhin wird durch die Ergebnisse der Nass-Berstfestigkeit deutlich, dass es sich bei den Wellpappen des Herstellers B (Nass-Berstfestigkeiten von 15,2 % von der Berstfestigkeit) nicht um nassfeste Wellpappen handelt. Dieser Verdacht wird durch die Ergebnisse der Prüfung der nassfesten Verklebung (nfVk) bestätigt.

Die Ergebnisse der Messungen der Durchstoßarbeit (Ds) bekräftigen die hohen Festigkeitseigenschaften der dreiwelligen Wellpappen der Hersteller A und C (A_3W: 27,4 J; C_3W: 30,3 J). Hingegen besitzen die Wellpappen des Herstellers B die niedrigsten Durchstoßwerte (B_2W: 18,1 J; B_3W: 21,3 J).

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Biegesteifigkeit bekräftigen die bereits angenommenen Festigkeitstendenzen der einzelnen Wellpappen. Die dreiwelligen Wellpappen der Hersteller A und C besitzen mit Biegesteifigkeiten von 307,5 Nm und 268,7 Nm die höchsten Werte. Die zweiwellige Wellpappe des Herstellers B weist mit 72,1 Nm mit Abstand den niedrigsten Biegesteifigkeitswert auf.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Biegesteifigkeit aus den verschiedenen Klimabedingungen wird deutlich, wie stark die Festigkeitseigenschaften von Wellpappen von der Umgebungsfeuchte abhängen. Die Biegesteifigkeit nimmt bei einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 90 % um ca. die Hälfte ab (vgl. Tabelle 5).

Die Ergebnisse der Kantenstauchwiderstände zeigen, dass die dreiwellige Wellpappe des Herstellers A mit 29,1 kN/m die höchsten ECT-Werte besitzt. Den niedrigsten Wert weist mit 18,7 kN/m die dreiwellige Wellpappe des Herstellers B auf. Bei der Prüfung der Kantenstauchwiderstände bei einer erhöhten Luftfeuchtigkeit von 90 % zeigt sich der gleiche Effekt wie bei der Untersuchung der Biegesteifigkeit. Die Erhöhung der Umgebungsfeuchte führt zu einer erhöhten Materialfeuchtigkeit, wodurch die Kantenstauchwiderstände um ca. die Hälfte abnehmen (vgl. Tabelle 6).

Bereits durch die Betrachtung der Ergebnisse der ECT-Werte, der Biegesteifigkeiten, der Durchstoßarbeit und der Berstfestigkeiten stellten sich verschiedene Wellpappen als besonders stabil heraus. Die hohen Festigkeitswerte dieser Wellpappen beeinflussen die Stapelstauchwiderstände der Ringe und Schachteln prägnant. Aus diesem Grund besitzen die dreiwelligen Wellpappen der Hersteller A (23628 N) und C (20850 N) die höchsten ermittelten Stapelstauchwiderstände. Die Werte des Herstellers B hingegen sind mit 13354 N (B_2W) und 15366 (B_2W) die niedrigsten. Hierbei zeigt sich erneut, dass die dreiwellige Wellpappe des Herstellers B geringere Festigkeiten als die zweiwellige Wellpappe des Herstellers B besitzt. Die Ergebnisse der untersuchten Ringe bestätigen die allgemeine Tendenz der Festigkeiten der verschiedenen Wellpappen. Jedoch fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse auf, dass die Ringe erheblich höhere Stapelstauchwiderstände als die Schachteln besitzen (vgl. Tabelle 6). Grund dafür ist vor allem der spezielle Aufbau der Ringe. Die Kräfte, die bei der Prüfung der Stapelstauchwiderstände auf die Probenkörper aufgetragen werden, können bei den Ringen im Gegensatz zu den Schachteln direkt und symmetrisch aufgenommen und abgeleitet werden.

In der abschließenden Untersuchung des Einflusses einer erhöhten Luftfeuchtigkeit zeigen die Ergebnisse, dass sich sowohl die Stapelstauchwiderstände der Schachteln als auch der Ringe um ca. die Hälfte reduzieren, wenn die Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 90 % ansteigt (vgl. Tabelle 6).

BCT-Langzeituntersuchungen

Die Auswertung der Ergebnisse der BCT-Langzeituntersuchungen wird aufgrund der Menge an Daten beispielhaft anhand der dreiwelligen Wellpappe des Herstellers A erläutert. Dabei werden zuerst die Ergebnisse der Schachteln (FEFCO 0201) und im späteren Verlauf des Kapitels die Ergebnisse der Ringe (FEFCO 0310) besprochen.

Die Bild 3 zeigt den Verlauf der Messung des BCT-Langzeitwertes einer dreiwelligen Schachtel des Herstellers A über die gesamte Versuchsdauer. Die orange Linie stellt den 24 stündigen Klimazyklus und die blaue Linie die Größenveränderung der Proben über die Zeit dar. Mithilfe der grünen und der lila Linien ist es möglich die Grafik auszuwerten. Hierbei kann durch die grüne Linie die mittlere Kriechrate und durch die lila Linie die Zeit bis zum Versagen der Schachtel bestimmt werden (vgl. Abb. 40).

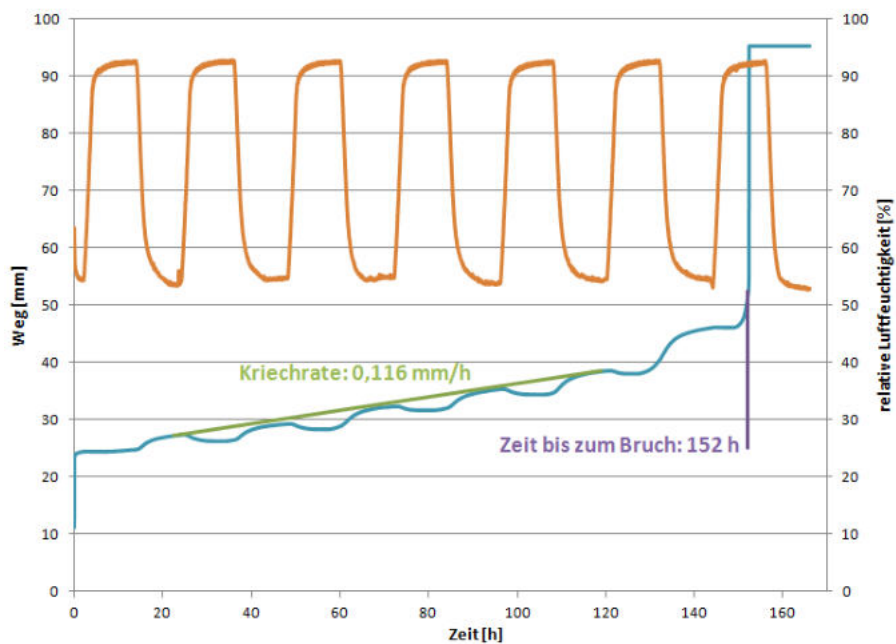


Bild 3: BCT-Langzeitmessung am Beispiel A_3W_01

Die Auswertungen der einzelnen Grafiken aller Wellpappen sind in der unten dargestellten Tabelle zusammengefasst. Dabei muss beachtet werden, dass die Ergebnisse eins und drei der zweiwelligen Wellpappe des Herstellers B vernachlässigt werden können, da die Standzeiten so gering waren, dass keine nachvollziehbaren Kriechkurven entstehen konnten. Grund dafür ist neben der Papierzusammensetzung vor allem das Fehlen der nassfesten Verklebung.

Tabelle 2: Ergebnisse der BCT-Langzeituntersuchungen der Schachteln (FEFCO 0201)

Wellpappe Schachteln	Welle	1.		2.		3.		Mittelwert	
		[mm/h]	[h]	[mm/h]	[h]	[mm/h]	[h]	[mm/h]	[h]
A	2	0,05	349,2	0,08	204,6	0,08	243,3	0,07	265,7
	3	0,12	152,1	0,15	108,2	0,12	128,8	0,13	129,7
B	2	0,20	37,5	0,52	58,4	0,28	37,6	0,52	58,4
	3	0,07	203,7	0,06	175,1	0,11	129,4	0,08	169,4
C	2	0,03	358,6	0,02	500,0	0,02	416,6	0,02	425,0
	3	0,02	500,0	0,05	500,0	0,001	500,0	0,02	500,0

Bei der Betrachtung der Tabelle 2 fällt auf, dass die Ergebnisse der einzelnen Standzeiten und Kriechraten innerhalb der Wellpappensorten stark schwanken. Dieser Effekt wurde bereits durch vorangegangene Untersuchungen im BFSV e.V. Hamburg festgestellt. Der genaue Auslöser für die Schwankungen der Werte konnte jedoch noch nicht herausgefunden werden. Jedoch spielen dabei Faktoren wie die Papierzusammensetzung, die Verklebung und Fertigungseinflüsse bei der Herstellung eine entscheidende Rolle. Weiterhin geht aus der Tabelle 2 hervor, dass die Wellpappen des

Herstellers C mit Abstand die längsten Standzeiten und die geringsten Kriechraten besitzen. Außerdem wird durch den Vergleich aller Ergebnisse deutlich, dass die Standzeiten der Verpackungen im hohen Maße von der Kriechrate abhängen. Dieser Zusammenhang kann auch aus der Abb. 2 entnommen werden. Hierbei können bei niedrigen Kriechraten höhere Standzeiten der Verpackung erreicht werden.

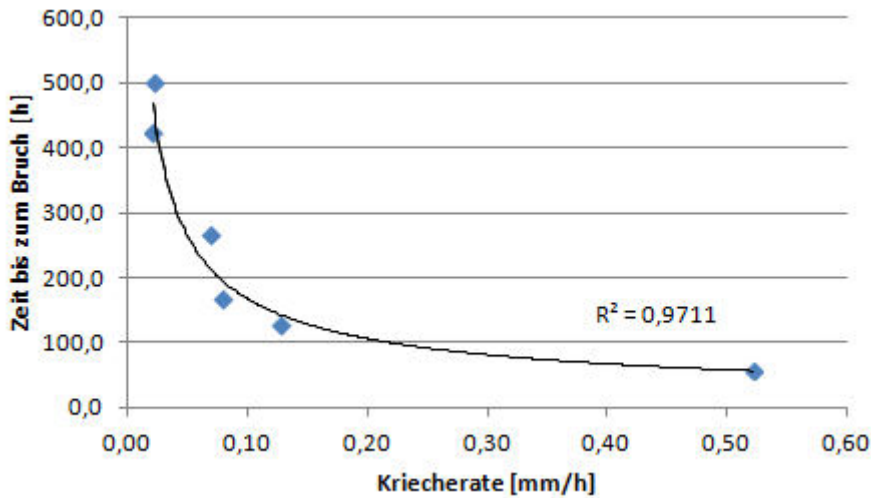


Bild 4: Kriechraten der Schachteln (FEFCO 0201) in Korrelation zur Standzeit

Die Ergebnisse der BCT-Langzeituntersuchungen der ersten Versuchsreihe der Ringe bestätigten die anfängliche Vermutung, dass durch die hohe Belastungsstufe fast alle Proben bereits schon nach wenigen Klimazyklen versagten (vgl. Abb.3). Aus diesem Grund konnten keine verlässlichen mittleren Kriechraten ermittelt werden. Lediglich drei von insgesamt 18 getesteten Ringen konnten ausgewertet werden.

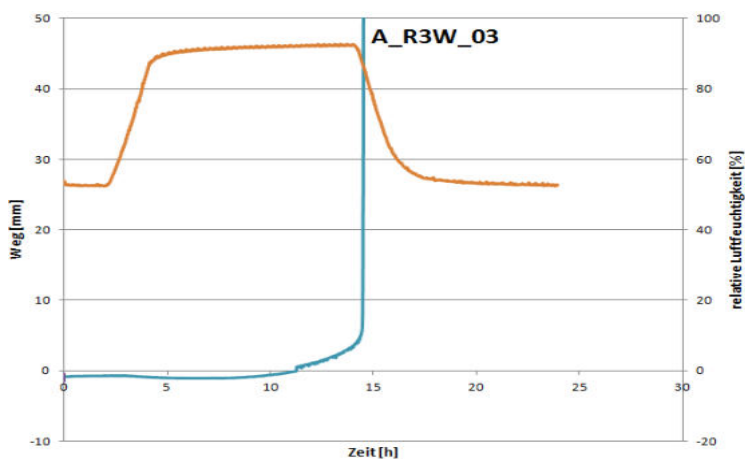


Bild 5: BCT-Langzeituntersuchung der Ringe (Versuchsreihe 1)

Aufgrund des geringen Ergebnisumfanges wurde eine zweite Versuchsreihe der Ringe gestartet, um statistisch gesicherte Ergebnisse zu erhalten. Bei dieser Versuchsreihe wurden die Ringe mit einer Belastung von 25 % des maximalen BCT-Wertes der Schachteln getestet. Hierdurch sollten auswertbare Kriechkurven ermittelt werden können. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der BCT-Langzeituntersuchungen der Ringe (FEFCO 0310)

Herst- ler	Welle	1.		2.	
		[mm/h]	[h]	[mm/h]	[h]
A	2	0,100	57,6	-	-
	3	0,078	105,5	-	-
B	2	0,190	53,2	-	-
	3	0,150	79,0	0,006	10,10
C	2	0,096	58,1	0,052	195,3
	3	-	-	-	-

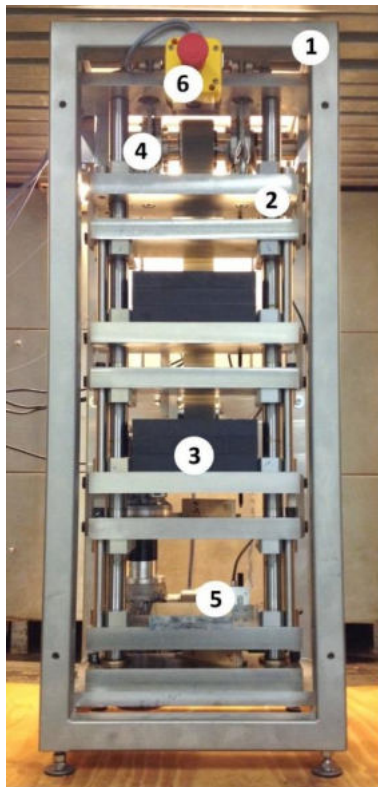
Bedingt durch den begrenzten Zeitraum konnten nur wenige Ergebnisse erlangt werden. Jedoch zeigt die Tabelle, dass durch die gesenkte Belastung höhere Standzeiten und somit Kriechkurven ermittelt werden können. Um statistisch gesicherte Aussagen treffen zu können, ist die Untersuchung von weiteren Verpackungen essenziell.

ECT-Langzeituntersuchungen

Vor Beginn der Versuche musste die neue Prüfeinrichtung in Betrieb genommen werden. Zu diesem Zweck wurden die Planparallelität der Prüfplatten und die Gewichte der Prüfetagen ermittelt.

Die Ergebnisse der Messung der Planparallelität der Platten zeigten, dass die Platten parallel sind, jedoch verhakten die Prüfetagen beim Hoch- und Herunterfahren, wodurch die Messung hätte negativ beeinflusst werden können. Aus diesem Grund wurde die Führung der Prüfeinheiten verbessert. Anstatt der Bronzebuchsen wurden Kugelumlaufspindeln eingebaut. Des Weiteren wurden Winkelanschläge zur Platzierung der Proben auf den Probenplatten angefertigt. Anschließend wurden die Gewichte der Platten und die Planparallelitäten der Platten neu bestimmt. Mit dem neuen ECT-Prüfgestell ist eine hinreichende Messung des ECT-Langzeitwertes möglich. Vergleichbare und reproduzierbare ECT-Werte können somit theoretisch ermittelt werden.

Der Aufbau der verbesserten ECT-Prüfeinrichtung ist in folgender Abbildung dargestellt.



- 1 Grundgestell
- 2 Prüfeinheit mit Kugelumlaufspindeln und Winkelanschlag
- 3 Gewichte (je ca. 3,34 kg)
- 4 Liftstation
- 5 Messtaster
- 6 NOT-AUS

Bild 6: Verbessertes ECT-Prüfgestell

Aufgrund von technischen Schwierigkeiten mit der Stromzuführung der Wegaufnehmer und einem Ventil zur Steuerung der Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer können nur wenige Ergebnisse zum ECT-Langzeitwert ermittelt werden. Die Auswertung der Messungen erfolgt, wie im vorherigen Abschnitt (BCT-Langzeituntersuchungen) beschrieben, anhand folgender Grafik.

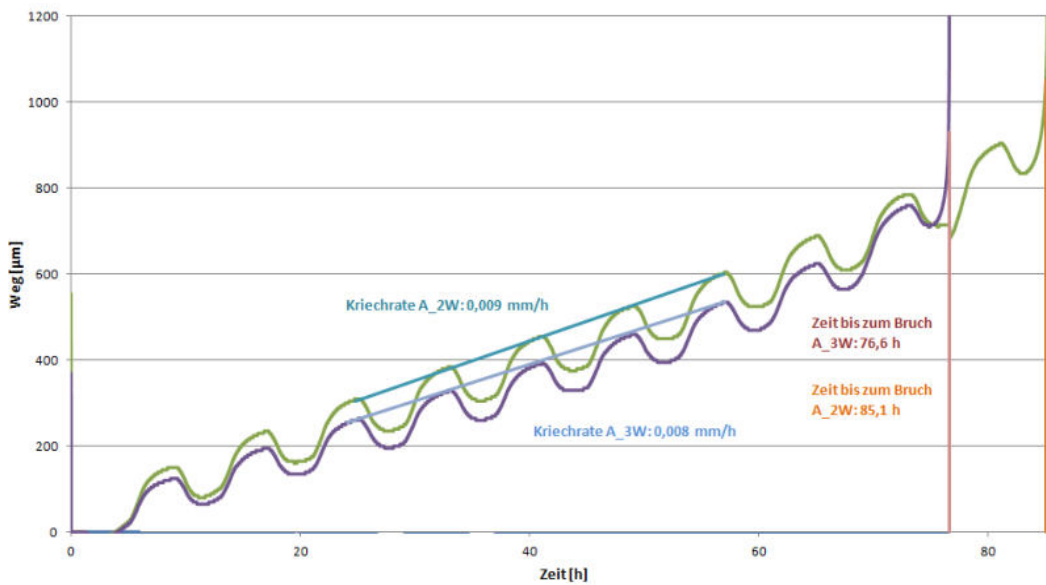


Bild 7: ECT-Langzeitmessung am Beispiel A_2W_01/ A_3W_01

Tabelle 4: Ergebnisse der ECT-Langzeitmessungen

Her- steller	Welle	1.		2.		3.		Mittelwert	
		[mm/h]	[h]	[mm/h]	[h]	[mm/h]	[h]	[mm/h]	[h]
A	2	0,009	85,1	0,011	68,9	-	-	-	-
	3	0,009	76,6	0,008	75,9	0,009	76,8	0,009	76,4
B	2	0,026	20,8	-	-	-	-	-	-
	3	0,047	12,4	-	-	-	-	-	-
C	2	0,027	28,5	-	-	-	-	-	-
	3	0,011	75,4	-	-	-	-	-	-

Die Ergebnisse aller Messungen sind in der Tabelle 4 dargestellt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird deutlich, dass aufgrund der statistischen Sicherheit zum jetzigen Zeitpunkt nur die Ergebnisse der dreiwelligen Wellpappe der Hersteller A verwendet werden können.

Aus dem Vergleich der Messergebnisse der dreiwelligen Wellpappe des Herstellers A wird deutlich, dass sich die Werte der Kriechraten und der Standzeiten stark ähneln (vgl. Tabelle 4). Die Standardabweichung der mittleren Kriechrate beträgt lediglich 0,0004 mm/h und die der Standzeiten 0,45 h. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Messung von ECT-Langzeitwerten mithilfe des neuen Prüfgestells möglich ist und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Trägt man die Zeit bis zum Bruch gegen die gemessenen Kriechraten auf, wird trotz des geringen Ergebnisumfangs deutlich, dass die Langzeitfestigkeit der ECT-Proben ebenso wie die Langzeitfestigkeit der BCT-Proben stark von der Kriechraten abhängen.

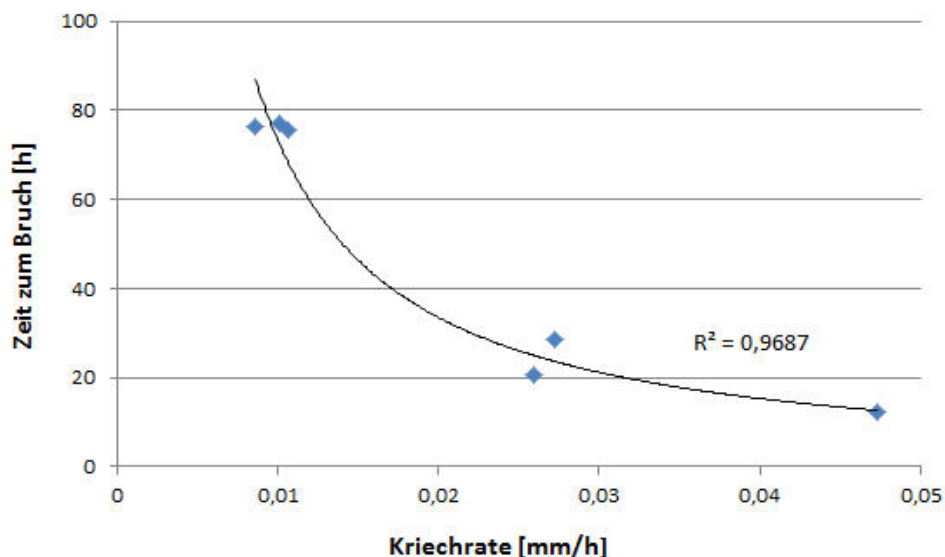


Bild 8: Kriechraten der ECT-Proben in Korrelation zur Standzeit

Um jedoch genaue Aussagen über die Korrelationsmöglichkeiten der ermittelten Werte mit denen der BCT-Langzeituntersuchungen oder den Standardprüfungen machen zu können, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Literatur:

- Anon. (1999): Einführung in die Prüfmethode der FEFCO für Wellpappebögen und -schachteln, FEFCO I.A. (European Federation of Corrugated Board Manufacturers), URL: http://www.fefco.org/fileadmin/fefco_files/Technical-Stats/import_allemand.pdf, Abruf am 04.05.2012
- Daimagüler, H. - S. (2012): Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Exportverpackungen aus Wellpappe; Bachelor Thesis; Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Science Biotechnologie, 6. Januar 2012
- Dimitrov, K.; Heydenrych, M. (2010): 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, 16th of July, 2010
- Gou, Y.; Fu, Y.; Zhang, W. (2008): Creep Properties and Recoverability of Double - wall Corrugated Paperboard, *Experimental Mechanics* 48:327-333
- Köstner, Viktoria (2012): Untersuchungen zum Zeitstandverhalten von Schachteln aus Wellpappe, Master Thesis, Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Department Biologie, Studiengang Holzwirtschaft, 28. Dezember 2012
- Kroeschell, W. O. (1992): The edge crush test, *TAPPI Journal*, January 1992, S. 79 - 82
- Läpple, V.; Drube, B.; Wittke, G.; Kammer, C. (2007): Werkstofftechnik Maschinenbau, Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen, Europa-Lehrmittel, Leinfelden-Echterdingen, 2007, S.66f / 642f
- Markström, H. (1991): Prüfmethode und -geräte für Wellpappe, Lorentzen & Wettre, Stockholm
- McKee, R. C.; Gander, J. W.; Wachuta, J. R. (1963): Failure of corrugated boxes under long term loading - summary of results as of June, 1963, Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin, Projekt 1108-30
- Niskanen, K. (2012): *Mechanics of Paper Products*, Berlin, Boston: de Gruyter
- Popil, R. E. (2012): Overview of recent studies at IPST on corrugated board edge compression strength: testing methods and effects of interflute buckling, *BioResources*, Mai 2012, Heft 7 (2)
- Popil, R. E.; Schaepe, M. (2005): Effects of Component Properties and Orientation on Corrugated Container Endurance, Institute of Paper Science and Technology, URL: http://ipst.gatech.edu/faculty/popil_roman/newsletters/newsletter_1104.pdf, Abruf am 18.04.2012

-
- Qazi Abdul, D. (2012): Optimierung der Zeitstandprüfeinrichtung des BFSV e.V., Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, Verfahrenstechnisches Schwerpunktprojekt, 29.10.2012
- Ranz, T.; Lion, A. (2006): Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz, Universität der Bundeswehr, Fakultät für Luft- & Raumfahrttechnik, Institut für Mechanik, München, Heft 2/07 der Reihe Beiträge zur Materialtheorie
- Reimers, W. (2009): Entwicklung eines Qualitäts-Standards für Schwerwellpappe unter Berücksichtigung mechanisch/ klimatischer Belastungen in internationalen Lieferketten, Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14836 N
- Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M. (2006): Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, B.G. Teubner Verlag/ GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006, 2.Auflage, S. 383 - 407
- Twede, D.; Selke, S. E. M. (2005): Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology, DEStech Publications, Inc., S. 227 - 487
- Waterhouse, J. F. (1984): The Ultimate Strength of Paper, Progress in Paper Physics - A Seminar, Design Criteria for Paper Performance, Stockholm, Sweden, 25-29.06.1984
- Weigert, J. (1999): Untersuchungen zur chemischen Modifizierung von Zellstoff zur Verminderung der Verhornungsneigung sowie zu den sich daraus ergebenden papiertechnologischen Eigenschaften, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Chemie, 23. Mai 1999
- Whitsitt, W. J.; Gander, J. W.; McKee, R. C. (1967): Stacking behavior of boxes and corrugated board - A summary Report of the Technical Division of the FKBI Inc., Project 1108-30, 12.04.1967
- Whitsitt, W. J.; Gander, J. W.; McKee, R. C. (1968): Effect of box dimensions and combined board creep life on box creep life - A summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., Project 2695-2, 15.11.1968
- Whitsitt, W. J.; McKee, R. C. (1972): Effect of relative humidity and temperature on stacking performance - A summary Report to the Technical Division of the FKBI Inc., Project 2695-9, 10.11.1972