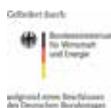


Innovative Prüfmethode zur mechanischen Bewertung von faserbasierten Materialien

»Optische Dehnfeldanalyse«

Ein Fachbeitrag von Dipl.-Ing. Benjamin Hiller, Papiertechnische Stiftung Heidenau, [benjamin.hiller@ptspaper.de]



Die Bewertung papierartiger Werkstoffe hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten findet in den meisten Fällen durch genormte Laborversuche statt. Zugversuche an Papier oder Druckversuche an Wellpappe (FCT, ECT) mit definierten Prüfgeschwindigkeiten und Probengeometrien im Normklima geben beispielsweise Aufschluss über Steifigkeiten (E-Modul) und Festigkeiten der Materialien. Daraus lässt sich auf eine Eignung des Materials z.B. als Verpackungskomponente einer bestimmten Festigkeitsklasse schließen. Für die meisten Anwendungsfälle sind diese erhaltenen Kennwerte hinlänglich und es bedarf keiner weiteren Forschung. Je nach Anwendungsfall sind jedoch solche »globalen« Werkstoffkennwerte nicht mehr ausreichend. Dies liegt darin begründet, dass sie gemittelte Materialkenngrößen über die Probenkörperbreite darstellen. Sie geben daher keine Information darüber, wie die Kenngrößen lokal verteilt sind: Gibt es Bereiche im Material die stärker gedehnt sind als andere? Wo genau tritt ein Riss/Schaden auf? Deutet sich dieser Riss bereits vor dem Versagen an? Und kann diesem Effekt konstruktiv oder durch Materialverstärkung entgegengewirkt werden?

Die lokale Verteilung von Verschiebungen bzw. Dehnungen im Material ist bei vielen Anwendungsfällen von großer Bedeutung und ermöglicht eine verbesserte grundlagenmechanische Bewertung von Materialparametern. Im Folgenden wird dies am Beispiel der Verformung der Wellen in einer Wellpappe bei Komprimierung in Dickenrichtung (Z-Richtung) sowie des Rillens von Karton diskutiert. Diese beiden Themen sind befürwortete bzw. aktuelle Forschungsprojekte an der Papiertechnischen Stiftung unter den Bezeichnungen »Messmethode Schädigung Wellpappe« [1] sowie »Wasserbasierte Beschichtungen / Fehlerfreies Rillen« [2]. Zur Darstellung der lokal verteilten Eigenschaften des Materials wird an der Papiertechnischen Stiftung die sogenannte Optische Dehnfeldanalyse (ODA) eingesetzt.



Abbildung 1: Beispiel eines Messaufbaus für optisch begleitete FCT-Messungen. Kamerasystem, Beleuchtung, FCT-Universalprüfmaschineneinbau (v.l.n.r.)

Diese ermittelt über eine Grauwertkorrelation die Verschiebung eines definierten zweidimensionalen Messgitters von einem zum nächsten aufgenommenen Bild einer Sequenz mit zunehmender Deformation. Das verwendete Kamerasystem ist daher mit der Universalprüfmaschine gekoppelt (siehe Abbildung 1). Somit ist es möglich, den aufgenommenen Kraft-Zeit-Verlauf der Prüfmaschine mit der erstellten Bildsequenz zu überlagern und eine genaue Zuordnung von Kraft und lokalem Weg zu ermöglichen. Je nach gewünschter Auflösung, Bildanzahl und Vergrößerung stehen verschiedene Kameras und Objektive zur Verfügung, die eine individuelle Untersuchung sehr vieler und komplexer Fragestellungen ermöglichen, wie im Folgenden exemplarisch dargestellt.

Vorkomprimierung von Wellpappe – »Messmethode Schädigung Wellpappe«

Bei Wellpappen ist der Zusammenhang bekannt, dass Materialkennwerte für Steifigkeiten und Festigkeiten nach einer Vorkomprimierung des Materials in Dickenrichtung sinken (siehe Abbildung 2). Die in der Praxis eintretenden Belastungen bei

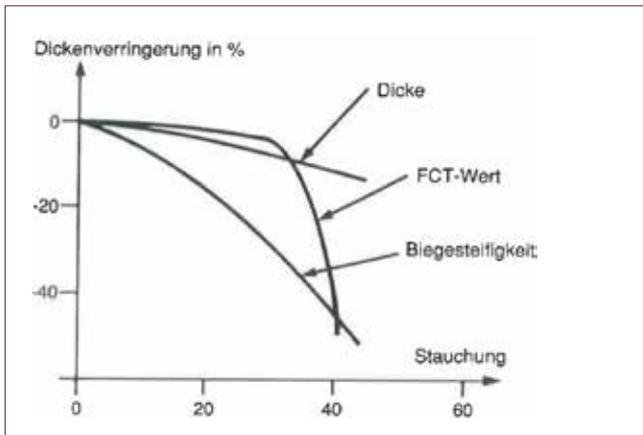


Abbildung 2: Materialkenngrößen von Wellpappe in Abhängigkeit der Dickenkomprimierung [3]

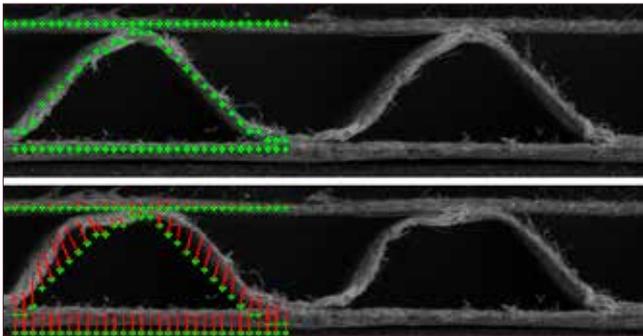


Abbildung 3: Vergleich zwischen unbeanspruchter Probe (oben) und deformierter, nichtidealer Wellenstruktur inkl. Verschiebungsvektoren (unten)

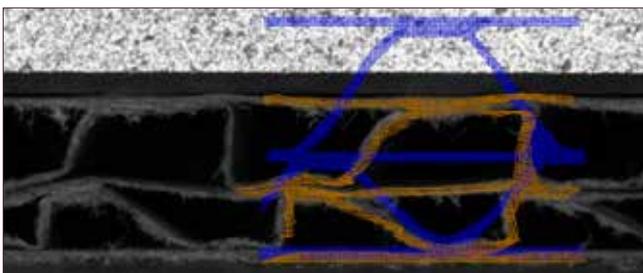


Abbildung 4: Komplexe Verformung einer BC-Welle kurz vor dem (nicht ausgeprägten) FCT-Maximum

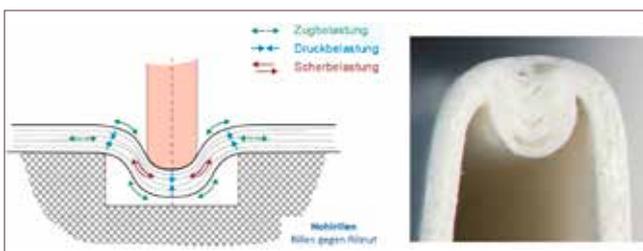


Abbildung 5: Schematischer Rillprozess mit relevanten Belastungen (li.) [4] und eine saubere einseitige Wulstbildung nach Rillen und Falten (re.) [5]

Herstellung und Verarbeitung (Direktdruck, Stanz- und Klebprozess) sowie infolge des Transport-, Umschlag- und Lagerungsprozesses (Versandbereitstellung, Klimaeinflüsse etc.) ziehen eine mehrfache Vorkomprimierung des Materials nach sich. Eine Verringerung der Werkstoffkennwerte ist demnach von der Herstellung bis zum Recycling der Wellpappe sehr wahrscheinlich und wird bei der Prüfung »idealer« Prüflinge ohne Vorschädigung i.d.R. nicht erfasst.

An der PTS werden daher Untersuchungen durchgeführt, welche das Verformungsverhalten der Wellen und die damit einhergehenden Änderungen in den Festigkeitseigenschaften näher beschreiben. Es wird untersucht, inwieweit sich Muster bei der Verformung von ein- und mehrwelligen Wellpappen herausbilden und wie diese methodisch beschrieben werden können. Der Einsatz der ODA ist hierfür von Vorteil, da sie die Möglichkeit gibt, den genauen Verformungsweg der Wellen qualitativ und quantitativ zu beschreiben (siehe Abbildung 3). Es ist hiermit möglich eine Begründung zu finden, warum es bei manchen FCT-Verläufen zu charakteristischen ausgeprägten Maxima kommt (z.B. bei Einfach-Grobwellen) und warum diese charakteristischen Verläufe bei anderen komplexeren, zunehmend in der Praxis eingesetzten, Wellenarten (z.B. BC-Welle) nicht vorkommen (siehe Abbildung 4).

Die Beschreibung der Deformation einfacher und komplexer Wellenarten gibt die Möglichkeit ein verbessertes Modell für eine vorbelastete Wellpappe zu erstellen und somit eine messtechnische Bewertung, eine Risikoanalyse sowie die Definition von Messunsicherheiten durchzuführen. Es sollen Handlungsoptionen entwickelt werden um das Handling der Wellpappe im heutigen Herstellungs- und Nutzungsprozess zu verbessern und dem Werkstoff neue Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen.

Zug- und Out-of-Plane-Schubbeanspruchung beim Rillen – »Wasserbasierte Beschichtungen / Fehlerfreies Rillen«

Das Rillen von Karton wird durchgeführt, um eine definierte Verringerung der Biegesteifigkeit des Materials durch Delaminierung zwischen den Schichten an einer gewünschten Stelle zu erzeugen, ohne dem Material weiteren Schaden zuzufügen. Während des Rillvorgangs kommt es im Material zu einer komplexen mechanischen Belastungssituation. Neben einer Komprimierung in Dickenrichtung kommt es besonders zu Zugbelastungen in den Deckschichten sowie einer Out-of-Plane-Schubbelastung über den Querschnitt des Materials (siehe Abbildung 5).

Typische Rillmesserbreiten liegen in einem Bereich von 0,7 bis 1,5 mm. Dies bedeutet, dass das Material in einem solchen Verarbeitungsprozess insbesondere lokal beansprucht wird und eine allgemeine Aussage über eine Probenbreite von 15 mm (beim Zugversuch) nicht ausreichend ist. Zudem lassen bereits die im Rillverfahren eingesetzten Geometrien durch einfache geometrische Zusammenhänge auf lokale Dehnungen weit über den globalen Werkstoffbruchdehnungen bei Zugbelastung von maximal 4 oder 5 % schließen. Es müsste daher bei nahezu allen Rillprozessen zu hohen lokalen Schädigungen bis hin zum Riss kommen. Untersuchungen eines Materials beim Zugversuch, gekoppelt mit der ODA, geben Aufschluss darüber, warum dies nicht geschieht und ermöglichen es die Rilleignung eines Materials zu definieren (siehe Abbildung 6).

Es ist zu erkennen, dass der untersuchte Karton die bekannte Inhomogenität von Papier aufweist. Die globale Dehnung auf dem abgebildeten Prüfstreifen beträgt ca. 2 %, mittels ODA ist jedoch ersichtlich, dass es große Unterschiede im lokalen Dehnungsbild gibt. Es entstehen Bereiche, die zu diesem Belastungsmoment noch keinerlei Verformung unterliegen (grün), wohingegen andere Bereiche (rot) bereits bei der Hälfte der Bruchdehnung lokale Dehnungen von > 5 % zeigen. Ein Karton kann somit hinsichtlich seiner lokalen Dehnungsfähigkeit und der Gleichmäßigkeit der Dehnungsverteilung für den Einsatz in einem Rillprozess bewertet werden.

Eine wesentlich schwieriger zu messende Kenngröße ist die sogenannte Out-of-Plane-Schubbeanspruchung, welche über den Querschnitt des Materials eintritt. Zur Ermittlung eines werkstoffseitigen Schubmoduls und der Schubfestigkeit wurde an der PTS eine Vorrichtung entwickelt, in welcher Materialien der Dicke 0,2 bis 2,2 mm geprüft werden können. Hierfür wird das Material zwischen zwei Adapterplatten mit Hilfe von Zweikomponentenklebstoff (Epoxidharz) fixiert. Die unterschiedlichen Materialdicken werden durch Zwischenplatten ausgeglichen, um eine genaue Positionierung in Zugrichtung sicher zu stellen. Die Prüfung erfolgt, indem eine der beiden Seiten durch die Traverse der Prüfmaschine verschoben wird und eine entsprechende Belastung im Material initiiert wird. Der Versuch endet mit der Zerstörung des Prüflings (siehe Abbildung 7).

Da die Auswertung des Schubmoduls bei einem solchen Versuch bei sehr geringen Verschiebungen stattfindet (ca. 10 – 15 μm) und kein Extensometer angesetzt werden kann, findet die Auswertung der Verschiebungen mittels der ODA statt. Die Kennwertermittlung mittels ODA ist bei diesem Messverfahren essentiell, da sie hochauflösend und direkt am Material durch-

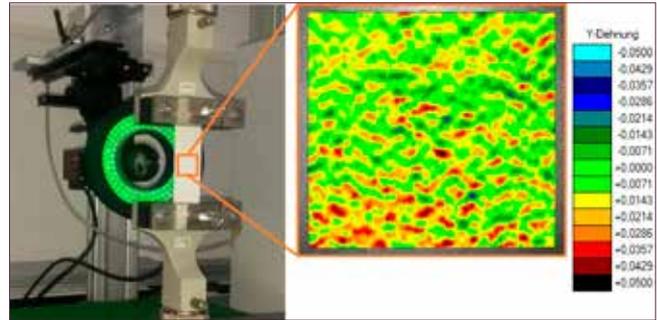


Abbildung 6: Messaufbau, Dehnfeldanalyse und Legende (v.l.n.r.) eines Zugversuchs an Karton (Breite 30 mm, y-Dehnung von -5 % bis +5 %) [6]

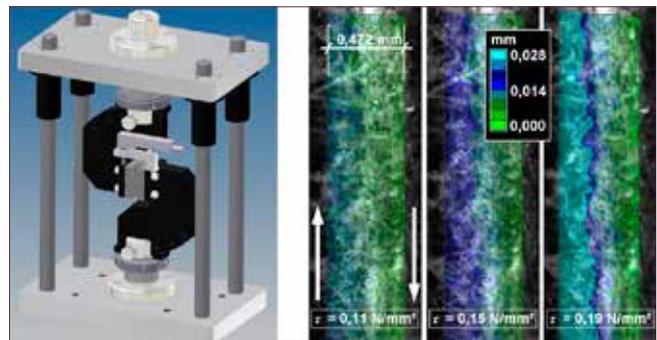


Abbildung 7: Vorrichtung zur Bestimmung der Out-of-Plane-Schubeigenschaften von Karton (Dicke 0,2 bis 2,2 mm, li.) und Auswertung mittels ODA (re.)

geführt wird. Verformungen des Klebstoffs oder geringstes Spiel im Messaufbau werden ausgeblendet und es findet eine Charakterisierung des Materials ohne störende Einflussgrößen statt.

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Optischen Dehnfeldanalyse kann nahezu jede, begleitend zu mechanischen Versuchen (an faserbasierten Werkstoffen und Verbunden) aufgenommene, Bildserie hinsichtlich der auftretenden Verschiebungen ausgewertet werden. Durch eine gezielte Verkopplung mit einer Universalprüfmaschine ist es möglich, die Verschiebungen auf den aufgenommenen Bildern mit einem Kraftverlauf zu kombinieren und eine Verteilung der Materialkennwerte über den gesamten Probenbereich zu ermitteln. Die Besonderheit hierbei ist, dass jegliche äußere Einflüsse auf das Messsystem, wie z.B. die Deformation des verwendeten Klebstoffs bei den Out-of-Plane-Schubversuchen, keinerlei Beachtung finden, da die Verformungen direkt und nur auf dem Prüfkörper gemessen werden. Für die Wellpappenindustrie ist diese Methode von Interesse, da sich die Verformungen der Wellenlage sehr detailliert sowohl qualitativ als auch quantitativ beschreiben lassen und so ein besseres Verständnis des Werkstoffs entwickelt werden kann.

Diese Anwendungsmöglichkeiten der optischen Dehnfeldanalyse wurden im Rahmen des PTS Wellpappe Symposiums, welches am 4. und 5. April 2017 in München stattfand, diskutiert. Zudem wurden weitere moderne Prüfmethode, wie die Untersuchung des Langzeittragverhaltens von Verpackungen aus Wellpappe (IGF 18876 BG), vorgestellt. Das nächste PTS Wellpappe Symposium ist für das 2. Quartal 2019 geplant.

Literatur

- [1] Verbesserung der Berechnungsmodelle und Verfügbarmachung von Kennwerten zur Bewertung der Schädigung von Wellpappe (im Herstellungs- und TUL-Prozess) anhand einer neuartigen Messmethode mittels optischer Dehnfeldanalyse. Kurz: Messmethode Belastung Wellpappe. PTS-Forschungsvorhaben.
- [2] IGF 19313 BG: Entwicklung eines umfassenden Konzepts für optimale Rillungen bei Verpackungskartons mit wasserbasierten Barrierebeschichtungen. Kurz: Wasserbasierte Beschichtungen / Fehlerfreies Rillen. Laufzeit 02/2017 – 01/2019
- [3] Markström, H.: Prüfmethode und -geräte für Wellpappe. L&W. 1991
- [4] Herzau, E.: Untersuchung zum Einfluss der Rillung auf das Faltverhalten von Karton und Wellpappe. 4. Symposium: Wellpappe- und Faltschachtelverpackungen – Herausforderungen in der Praxis. Bei Zwick in Ulm. 2016
- [5] Matheas, J.: Materialparameter für effiziente Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Mehrschichtmaterialien und den darauf aufbauenden Entwurf angepasster Produkte (Materialparameter). PTS-Forschungsbericht. 2015
- [6] T. Kuntzsch, K. Kühnöl: Bestimmung werkstoffmechanischer Kennwerte an faserbasierten Werkstoffen aus optisch ermittelten Dehnungsfeldern. Kurz: Optische Dehnfeldmessung. PTS-Forschungsbericht VF 130044. Juni 2017
-