


RILLEN VON WELLPAPPE FEHLERANALYSE UND -VERMEIDUNG UNTER VERWENDUNG GEZIELTER MATERIALUNTERSUCHUNGEN UND HERLEITUNG VON ZUSAMMENHÄNGEN ZU QUALITÄTSPARAMETERN | IGF 21804 BR

Autorinnen/Autoren: Anke Nikowski¹, Katharina Roeber², Benjamin Hiller¹,
Franziska Schlimpert² und Prof. Dr.-Ing. Eugen Herzau²

¹Papiertechnische Stiftung (PTS) in Heidenau 

²Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK) **HTWK**

Einleitung

Im Fokus des Forschungsvorhabens IGF 21804 BR steht die Erarbeitung einer praxisrelevanten Wissensgrundlage zu den mechanisch-physikalischen Zusammenhängen beim Vorgang des Rillens von Wellpappe. Vor dem Hintergrund des aktuellen Standes der Technik, Forschung und Entwicklung fehlt es an einer ganzheitlichen und systematischen Betrachtung der Wirkzusammenhänge und Phänomene, die beim Verarbeitungsschritt Rillen auftreten. Es gilt dabei den Einfluss der Eigenschaften der Wellpappenrohpa-piere, Wellpappensorte, Verarbeitungsbedingungen, Rillwerkzeuge und Rillparameter auf das Rillergebnis zu untersuchen. Das hierzu vorliegende Wissen zum Rillen von Wellpappe ist im Wesentlichen empirisch geprägt. Erfahrungen aus dem Bereich anderer Rillprozesse, wie sie zum Rillen von Faltschachtelkarton vorliegen, können nicht genutzt werden, da die Mechanismen zur Gestaltung einer Rillung gänzlich anders wirken.

In der Wellpappenbranche zeichnet sich seit längerer Zeit ein sehr deutlicher Bedarf ab, vorab Einschätzungen und Aussagen zur Rillbarkeit treffen sowie Ursachen von Rillfehlern auf Grundlage gesicherter Erkenntnisse identifizieren zu können. Basierend darauf wäre es möglich, gezielt Maßnahmen zur Ausführung qualitätsgerechter Rillungen abzuleiten. Wellpappe ist heute nicht mehr ausschließlich der Rohstoff für den „braunen Versandkarton“, sondern in zahlreichen Anwendungen (z. B. Trays, Displays, Bag-in-Box Verpackungen) ein Bedruckstoff mit einer Vielzahl an teils hohen Anforderungen. Hier sind gegenläufige Trends beobachtbar. In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Bedruckbarkeit von WP-Linern kontinuierlich gestiegen, während preisgetrieben die Festigkeitseigenschaften des Materials häufig abnehmen. Dies ist durch reduzierte Materialdicken bzw. flächenbezogene Massen und einem steigenden Anteil von Recyclingmaterial belegbar.

Im Ergebnis dieses Forschungsvorhabens werden verbesserte Kenntnisse zu den Wirkmechanismen beim diskontinuierlichen Hohlrillen und den Zusammenhängen zwischen Materialeigenschaften der Wellpappe (z. B. Sorte, flächenbezogene Masse, Art des Rohpapiers) und Prozessparametern bzgl. der Rillqualität sowie der Grenzen vorliegen. Aus diesen Ergebnissen lassen sich Maßnahmen ableiten, die die Qualität der hergestellten Verpackung und somit die Kundenzufriedenheit erhöhen sowie Reklamationen und Imageverlust vermeiden. Weiterhin werden der Einsatz von Ressourcen bei der Produktion, Werkzeugauslegung und Prozessoptimierung erheblich reduziert.

Fehlerbilder beim Rillen von Wellpappe

Die fehlerhafte Ausführung einer Rillung führt generell zu Qualitätsproblemen, die sich in unterschiedlichen Effekten (siehe Abbildung 1) äußern. Hierzu gehören u. a. die Schädigung der Deckenpapiere (äußerer und innerer Liner) durch Aufplatzen des Strich- oder Fasergefüges, eine ungenügende Reduzierung des Biege-widerstandes, die nicht exakt definierte Position der Biegestelle sowie die Zerstörung der Rillung aufgrund des zu großen Festigkeitsabfalls.

Die Fehlerbilder, die beim Rillen von Wellpappe auftreten können, haben wiederum unterschiedliche Bedeutungen für Hersteller von Aufstellautomaten, Produzenten von Wellpappverpackungen und deren Abnehmer. Dies betrifft z. B. die ästhetische Wirkung der Schachtel, Weiterverarbeitungsprobleme in Klebe- und Verpackungslinien, das Aufrichten und Maßabweichungen der Schachtel sowie verminderte Festigkeiten der Gesamtverpackung.

Aus dieser Problemstellung heraus ergibt sich die übergeordnete Zielsetzung für das laufende Forschungsprojekt. Darunter verbirgt sich einerseits die Modellierung und Validierung der Zusammenhänge zwischen Materialkennwerten und dem Rillergebnis, speziell für das Hohlrillen mit diskontinuierlichen Werkzeugen. Andererseits wird die Entwicklung einer Methode zur Messung bzw. Auswahl von Materialkennwerten (Wellpappenrohpa-piere und Wellpappen) angestrebt, die für die Prognose oder Bewertung der Rillbarkeit der eingesetzten Wellpappen genutzt werden kann. Im Endergebnis soll auf Grundlage definierter visueller und messtechnischer Bewertungskriterien eine Handlungsempfehlung zur Fehlervermeidung oder Ergebnisoptimierung entstehen, die nicht nur einen wichtigen Beitrag für die unmittelbaren Akteure der Wellpappenherstellung und -verarbeitung liefert, sondern auch die Arbeit von Fachgremien unterstützen kann.

Materialcharakterisierung an Wellpappen und Wellpappenrohpa-pieren

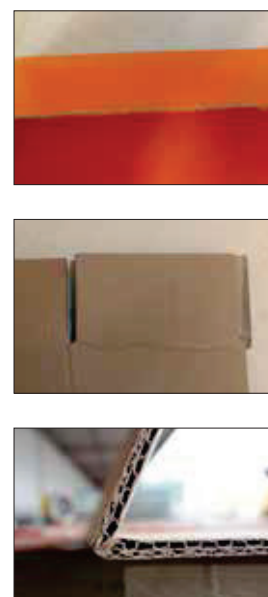
Ausgehend von der Materialauswahl erfolgte im ersten Projektteil zunächst die Grundcharakterisierung der Wellpappenrohpa-piere und Wellpappen. Dabei wurden an der PTS vorrangig die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Wellpappenrohpa-piere und an der HTWK vordergründig die der Wellpappen messtechnisch erfasst. Es wurden die in Tabelle 1 dargestellten Messverfahren an den jeweiligen Forschungsstellen durchgeführt. Um der Modellierung Daten zur feuchtigkeitsabhängigen Dynamik von Eigenschaftsänderungen zugrunde legen zu können, erfolgten die Untersuchungen an unterschiedlich klimatisierten Materialproben. Hierbei wurden neben dem Normklima (23 °C / 50 % r. F.) nach DIN EN 20187 [1] zusätzlich Daten für ein Feuchtklima (23 °C / 80 % r. F.) und ein Trockenklima (23 °C / 38 % r. F.) erfasst. Die Ergebnisse der Messungen im Trockenklima sind hierbei besonders relevant, da Erfahrungen aus der Praxis belegen, dass bei diesem Klima vermehrt Rillprobleme auftreten.

Tabelle 1: Prüfverfahren zur Materialcharakterisierung von Wellpappenrohpa-pieren und Wellpappen

	Prüfeigenschaft	Prüfnorm/-vorschrift
WELLPAPPEN-ROHPAPIER	Dicke	DIN EN ISO 534:2012-02
	Flächenbezogene Masse	DIN EN ISO 536:2020-05
	Streifenstauchwiderstand (SCT)	DIN 54518:2004-03
	Flachstauchwiderstand am labormäßig gewellten Papier (CMT)	DIN EN ISO 7263-2:2019-04 DIN EN ISO 7263-1:2019-04
	Wasseraufnahmevermögen (Cobb)	DIN EN ISO 535:2014-06
	Berstdruckfestigkeit	DIN EN ISO 2759:2014-10
WELLPAPPE	Dicke	DIN ISO 3034:2016-08
	Flächenbezogene Masse	DIN EN ISO 536:2020-05
	Kantenstauchwiderstand (ECT)	DIN EN ISO 3037:2013-12
	Flachstauchwiderstand (FCT)	DIN EN ISO 3035:2012-02
	4-Punkt-Biegesteifigkeit	DIN 53121:2014-08
	Berstdruckfestigkeit	DIN EN ISO 2759:2014-10
	Durchstoßarbeit	DIN 53142-1:2014-12
Knickwiderstand	DIN 54608:2017-08	
PIN-Adhäsion (Verklebungsfestigkeit)	FEFCO Methode Nr. 11	

Die ermittelten Daten dienen als Grundlage für das mathematisch statistische Modell sowie zur FEM-Modellierung.

Abbildung 1: Fehlerbilder beim Rillen von Wellpappe



Qualitätsparameter einer Rillung

Die Qualität einer Rillung bemisst sich zum einen an ihrer Funktionalität im Sinne einer angemessenen Reduktion des Biege widerstands sowie der Definition der Biegestellenposition. Die Materialverformung soll zu einem ausreichend hohen Scharniereffekt an der Biegestelle führen, der eine stopperfreie Verarbeitung des Zuschnitts und eine exakte Biegung um bis zu 180° mit gerader Kantenbildung entlang der Rilllinie ermöglicht. Für eine objektive Charakterisierung der Scharnierfunktion einer Rillung wird der Faltfaktor (f) herangezogen.

Der Faltfaktor setzt den messtechnisch zu ermittelnden Biege widerstand einer gerillten mit dem einer ungerillten Probe ins Verhältnis und wird in Prozent angegeben. Nach DIN 19304 [2] erfolgt die Messung mit 9 °/s um einen Winkel von 90°. Der Faltfaktor wird über die beim Biegen verrichtete Arbeit gemäß folgender Formel berechnet:

$$f = (W_g/W_u) \times 100\% \quad | \quad W_g = \text{Arbeit der gerillten Probe} \quad | \quad W_u = \text{Arbeit der ungerillten Probe}$$

Mit dieser Formel wird eine Aussage über den prozentualen Anteil des nach dem Rillen vorhandenen Biege widerstands bezogen auf den Biege widerstand einer ungerillten Probe (entspricht 100 % Biege widerstand) getroffen. Der Faltfaktor gibt an, auf welches Maß der Widerstand reduziert werden konnte, z. B. bei einem Verhältnis W_g/W_u von 1/3 auf 30 % oder bei einem Verhältnis W_g/W_u von 1/5 auf 20 % des ursprünglichen Wertes. Hinsichtlich der Charakterisierung der Scharnierfunktion deuten hier kleine Faltfaktorenwerte auf ein gutes Biegeverhalten hin, da der Biege widerstand gering ist. Hohe Faltfaktoren sind wiederum mit einer schlechter Scharnierfunktion der Rillung verbunden.

Die Berechnungsweise und Aussage des Faltfaktors nach [2] wird seitens der HTWK kritisch betrachtet, da sie nicht dem im Bereich Faltschachtelkarton bestehenden Verständnis entspricht. Sowohl in der Praxis [3] als auch in der DIN 55437-3 [4] wird der Faltfaktor wie folgt berechnet:

$$f = 100\% - (W_g/W_u) \times 100\% \quad | \quad W_g = \text{Arbeit der gerillten Probe} \quad | \quad W_u = \text{Arbeit der ungerillten Probe}$$

Mit dieser Formel gibt der Faltfaktor Auskunft über den Effekt der Rillung, d.h. um wieviel Prozent der Biege widerstand reduziert werden konnte (Skala: 0 % entspricht »ungerillte Probe«, 100 % entspricht »theoretisch „perfektes“ Scharnier«, das praktisch jedoch nicht erreichbar ist). Ein hoher Faltfaktor bedeutet demnach eine gute Scharnierfunktion, geringe Werte gehen mit wenig Widerstandsreduzierung einher und charakterisieren ein schlechtes Biegeverhalten. Um eine Unsicherheit aufgrund verschiedener Bedeutungen der Faltfaktorenangabe zu vermeiden, wird hier eine Abstimmung zwischen den Fachgremien beider DIN-Normen zur Vereinheitlichung der Berechnung angeregt. Im Forschungsprojekt wird die gängige Methode aus dem Bereich Faltschachtelkarton verwendet und für die Auswertung und Angabe von Faltfaktoren genutzt.

Alternativ wird zur Ermittlung des Faltfaktors über die verrichtete Arbeit mitunter auch das erste Kraftmaximum der Biege widerstandskurve herangezogen. Dies ist nicht zuletzt dem Einsatz selbstgebauteer, einfacher Kraftmesseinrichtungen zur Qualitätskontrolle in der Produktionspraxis geschuldet. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen beide Ansätze miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung für anwendungsrelevante Aussagen zur Rillbarkeit von Material geprüft werden.

Einen weiteren diskussionswürdigen Aspekt der Norm DIN 19304 [2] stellt die Prüfgeschwindigkeit von 9 °/s dar. Hier fehlt die Praxisrelevanz, da die Materialzuschnitte in den Verarbeitungsmaschinen mit deutlich höheren Geschwindigkeiten gebogen werden. Vorversuche an der HTWK zeigten, dass die Biegegeschwindigkeit einen Einfluss auf das Biegeverhalten und somit auf den ermittelten Faltfaktor hat. Die Anwendbarkeit der Daten aus der Norm ist für eine praxisnahe Modellierung daher unklar. Um den Effekt

der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Biegeverhaltens quantifizieren und seine Relevanz besser einschätzen zu können, werden im Forschungsprojekt vergleichende Untersuchungen mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt.

Zur Messung des Biegewiderstandes an der PTS wird eine Vorrichtung zum Einbau in eine Universalprüfmaschine eingesetzt. Bei der gemeinsamen Konzeptionierung mit dem Hersteller TIRA GmbH wurde darauf geachtet, dass die Prüfvorrichtung den Anforderungen gemäß [2] genügt und entsprechend einen Biegewinkel von mindestens 90° gewährleistet sowie eine radiale Biegung um die Drehachse ermöglicht. Abbildung 2 veranschaulicht die Messvorrichtung.

Der Faltfaktor ist der zentrale Parameter für die Qualitätsbeschreibung einer Rillung. Er allein genügt allerdings nicht für eine anforderungsgerechte Betrachtung. Mit Blick auf den Einsatz des Wellpappenzuschnittes als Verpackung, ist auch die Schadensfreiheit der Deckenpapiere als Kriterium zu berücksichtigen. Die Materialbeanspruchung durch das Rillwerkzeug, wie auch der spätere Biegevorgang dürfen keine Risse in den Deckenlagen in und neben der Rillung, sogenannte Aufplatzer, verursachen.

Aufplatzer auf der Außenseite verringern einerseits die Festigkeitseigenschaften der aus dem Zuschnitt gefertigten Schachtel. Hier kann ein hoher Faltfaktor sogar irreführend sein, wenn er durch Risse in den Deckenlagen begünstigt wird. Andererseits beeinträchtigen Aufplatzer die Optik des Druckbildes. Vor dem Hintergrund zunehmend aufwendig gestalteter Verpackungen aus Wellpappe, die für Unboxing-Erlebnisse auch innen bedruckt werden, spielen Aufplatzer nicht mehr nur auf der Außen-, sondern ebenso auf der Innenseite eine Rolle.

Die Rissbildung, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist, lässt sich einfach visuell prüfen. Die Abbildung zeigt Fehlerbilder, die innen nach dem Rillen bzw. außen nach dem Biegen um 180° auftreten können.

Eine anwendungsgerechte Beschreibung der Rillqualität umfasst somit den Faltfaktor als Maß für die Biege- widerstandsreduktion und die Unversehrtheit der Deckenpapiere. Anhand dieser Parameter lassen sich die materialspezifische Breite und Tiefe der einzubringenden Rille ermitteln und der optimale Rillbereich der untersuchten Wellpappen eingrenzen. Die Qualitätskontrolle von Rillungen erfordert somit messtechnische Untersuchungen wie auch die visuelle Begutachtung des Ergebnisses.

Abbildung 2: Vorrichtung zum Einbau in die Universalprüfmaschine zur Untersuchung des Biegeverhaltens von Wellpappe

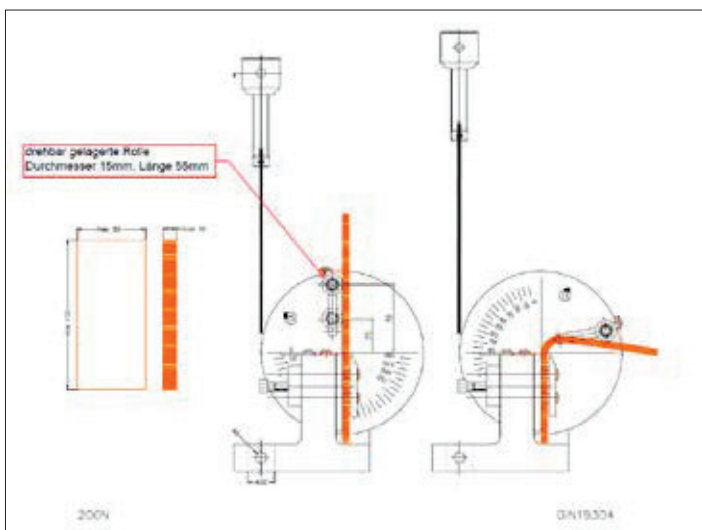
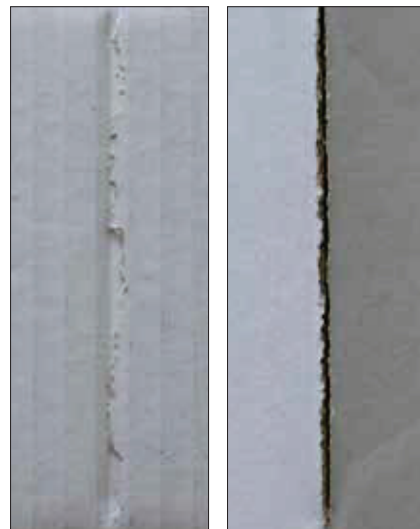


Abbildung 3: (Fehlerbilder) links: Aufplatzer in der Rille innen, rechts: Aufplatzer außen



Mathematisch statistisches Modell

Um den Gesamtumfang der notwendigen Versuche bzw. Materialcharakterisierungen für die exakte Ermittlung der Wirkzusammenhänge auf ein Minimum zu reduzieren, wird im Projekt statistische Versuchsplanung (DoE) angewendet. Die erhobenen Daten zu den Materialeigenschaften und Versuchsergebnissen aus den Rillversuchen an der HTWK bilden die Grundlage zur Aufstellung eines mathematisch statistischen Modells, welches als Hauptergebnis des Projekts anzusehen ist. Dieses liefert allgemeine Prognosen zur Rillbarkeit und unterstützt bei der Ursachenanalyse von Rillfehlern. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden zudem die Haupteinflussfaktoren identifiziert, die das Rillverhalten maßgeblich bestimmen. Die Umsetzung des Modells findet unter Nutzung von Tools auf Basis des automated machine learning statt. Die Ergebnisse sind gleichzeitig relevant für die Parametrisierung der materialseitigen Modellierung des im Projekt vorgesehenen FEM-Modells.

Modell zum Rillen und Falten auf Basis der Finiten-Elemente-Methode

Ein weiterer Kernaspekt des Forschungsvorhabens ist der Aufbau eines Simulationsmodells mittels Finite-Elemente-Methode, welches in der Lage ist, das Rillverhalten der Wellpappe abzubilden und auf Grundlage von individuellen Materialeigenschaften eine valide Vorhersage zur Rillbarkeit zu treffen. Es entstehen zwei Formen des Modells – der Rillvorgang selbst sowie das Biegen der Wellpappe. Basis beider Modelle sind die Daten, die über die grundlegende Materialcharakterisierung der Wellpappenrohapiere und Wellpappen generiert wurden. Zusätzliche Ergebnisse zum Rillvorgang fließen durch Realversuche zur Rillbarkeit an der HTWK in das erste Modell ein. Der sich dem Rillen anschließende Faltvorgang wird mithilfe der zuvor beschriebenen Prüfvorrichtung an der PTS realisiert. Die Ergebnisse fließen in das zweite FEM-Modell zum Faltvorgang ein. Zusätzlich zur messtechnischen soll eine bildanalytische Erfassung mittels Digital Image Correlation (DIC) erfolgen, um das Modell entsprechend zu validieren. In Abbildung 4 ist am Beispiel einer Wellpappe eine FCT-Messung abgebildet, die parallel bildanalytisch erfasst wurde. Das Simulationsmodell wird mithilfe der Software VEDDAC 7 der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH validiert.

Realversuche

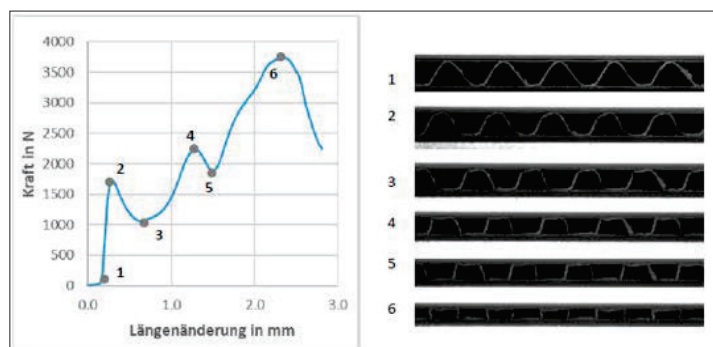
Neben den umfangreichen Messungen zur Materialcharakterisierung liefern reale Rillversuche an der HTWK die Datenbasis für das Modellvorhaben dieses Forschungsprojektes. Im Rahmen dieser Versuche werden verschiedene Wellpappen mit unterschiedlichen Werkzeuggeometrien gerillt und anschließend gebogen. Die Dokumentation der erzielten Rillqualität erfolgt anhand der Ausformung der Rille (Rillenbreite und -tiefe), der damit verbundenen Scharnierwirkung (Faltfaktor) und der Anzahl beschädigter Proben. So ergibt sich folgender schrittweiser Ablauf der Realversuche zur Rillbarkeit:

Tabelle 2: Ablauf der Rillversuche an der HTWK

Schritt | Beschreibung | Bewertungskriterien

- 1 | Stanzen und Rillen von Wellpappenproben
- 2 | Visuelle Begutachtung des Rillergebnisses | Anzahl Aufplatzer (innen)
- 3 | Vermessung der Rille | Rillenbreite, Rillentiefe
- 4 | Biegekraftmessung bei Biegen um 90° | Biegegegenstand
- 5 | Manuelles Biegen der Probe um 180°
- 6 | Visuelle Begutachtung des Biegeergebnisses | Anzahl Aufplatzer (außen)

Abbildung 4: FCT-Messung mit parallelablaufender bildanalytischer Erfassung



Die Werkzeugkonfiguration hinsichtlich Rillgeometrien und Ausstattung mit verschiedenen Profildummis orientiert sich an Erfahrungswerten und den Empfehlungen der Berechnungstools, die Stanzformenbauer für das Rillen von Wellpappe zur Verfügung stellen. Für das Forschungsprojekt kommen Werkzeuge der Firmen Karl Marbach GmbH & Co. KG und Franz Berger Laser-Bandstahlschnitte GmbH & Co. KG zum Einsatz. Die Vermessung der Rille erfolgt mit bildanalytischen Handmessgeräten des Herstellers Peret GmbH. Bei der visuellen Prüfung der Proben hinsichtlich Aufplatzern werden folgende Fehlerbilder differenziert: (1) Kein Riss, (2) Riss in der Rille (durchgehend oder teilweise), (3) Riss neben der Rille (durchgehend oder teilweise).

Anhand der Parametervariation hinsichtlich Materialien, Klimata und Rillgeometrien sowie der mehrstufigen Qualitätsbewertung der Proben nach dem Rillen und Biegen entsteht eine umfangreiche Datenbasis für die Modellierung. Im weiteren Verlauf übernimmt das Konzept des automated machine learning die Schlüsselfunktion bei der Ermittlung von Abhängigkeiten und Zusammenhängen zwischen den Prozessparametern mit dem Ziel, prinzipielle Mechanismen zu erkennen, denen das Rill- und Biegeverhalten von Wellpappe folgt.

Zusammenfassung

Die Erkenntnisse über die Vorhersagbarkeit der Rillbarkeit, die Haupteinflussfaktoren auf das Rillergebnis und die Bewertungskriterien der Rillqualität können sofort nach Projektende und Veröffentlichung des Abschlussberichts von Wellpappenrohpaperherstellern, Wellpappenherstellern sowie Verarbeitern genutzt und umgesetzt werden. Die Unternehmen werden ohne zusätzliche Investitionskosten in der Lage sein, Rillprobleme, die zu Reklamationen und Maschinenstillständen führen, zu vermeiden. Durch eine optimierte Materialauswahl bei der Konstruktion und Dimensionierung ihrer Packmittel können unmittelbar Kosten gespart werden. Auf Seiten der Wellpappenrohpaper- und Wellpappenhersteller erlauben vor allem die Erkenntnisse der materialseitigen Haupteinflussfaktoren die Anpassung ihrer Produkte hinsichtlich verbesserter Rillbarkeitseigenschaften.

Danksagungen

Das Forschungsvorhaben IGF 21804 BR der AiF-Forschungsvereinigung PTS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papier- und Zulieferindustrie (u. a. Packwell GmbH & Co. KG, Smurfit Kappa GmbH Wellpappenfabrik Delitzsch, Richter & Heß Verpackungs-Service GmbH, Knüppel Verpackung GmbH & Co. KG, Wilhelm Bahmüller Maschinenbau Präzisionswerkzeuge GmbH, Dunapack Spremberg GmbH & Co. KG, Verband der Wellpappen-Industrie e.V.) für die Unterstützung der Arbeiten.



Literatur:

[1] DIN EN 20187 (1993): Papier, Pappe und Zellstoff; Normalklima für die Vorbehandlung und Prüfung und Verfahren zur Überwachung des Klimas und der Probenvorbehandlung.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag

[2] DIN 19304 (2021): Prüfung von Wellpappe – Rillungen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag

[3] Fachverband Faltschachtel-Industrie e. V. (2018): Technische Richtlinie Gute Rillbarkeit. Frankfurt am Main.

[4] DIN 55437-3 (2021): Prüfung von Faltschachtelkarton – Rillungen – Teil 3: Bestimmung der technischen Qualität von Rillungen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag