

# FEHLERANALYSE UND -VERMEIDUNG DURCH DATENANALYSE UND NUMERISCHE PROGNOSEMODELLE | **RILLEN VON WELLPAPPE | IGF 21804 BR**

VON BENJAMIN HILLER UND ANKE NIKOWSKI, **PAPIERTECHNISCHE  
STIFTUNG (PTS)**, ABTEILUNG METHODEN UND SIMULATION, HEIDENAU



## Einleitung

Das Forschungsvorhaben IGF 21804 BR der kooperierenden AiF-Forschungsvereinigungen PTS und HTWK 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.

Ziel des Gemeinschaftsforschungsprojekts der HTWK Leipzig und der PTS Heidenau war die Erarbeitung einer praxisrelevanten Wissensgrundlage zum Rillen von Wellpappe, welche die Zusammenhänge und Phänomene beim Verarbeitungsprozess näher beschreibt. Zentral beziehen sich die Erkenntnisse auf das Wirken der einzelnen Faktoren auf das Rillergebnis – ausgehend von den verwendeten Wellpappenrohwpapieren, der Wellpappensorte, der Rillwerkzeuge und Rillbedingungen. Nur durch genaue Kenntnisse über diese Zusammenhänge lassen sich Rillfehler bzw. Qualitätsprobleme vermeiden, da eine gezielte Einflussnahme auf die identifizierten Haupteinflussgrößen möglich ist. Für das Vorhaben wurden in enger Abstimmung mit den projektbegleitenden Unternehmen eine repräsentative Auswahl an Wellpappen unter Berücksichtigung von Markt- bzw. Produktionsanteilen in Deutschland, auftretenden Fehlern bzw. deren Fehleranfälligkeit beim Rillen und deren Materialverfügbarkeit ausgewählt. Zur Ermittlung relevanter Materialparameter wurde auf Standardprüfmethoden der Basischarakterisierung nach CEPI und für die Sorteneinstufung nach DIN zurückgegriffen. Gezielt wurde hierbei auf die Anwendung von Spezial- und Sonderprüftechnik verzichtet.

---

Die **PTS-Abteilung Methoden & Simulation** beschäftigt sich mit der Entwicklung und Validierung von Spezialmessverfahren für mechanische Werkstoffparameter sowie dem Einsatz der Finiten-Elemente-Methode zur Vorhersage des Umform- oder Gebrauchsverhaltens von Papierwerkstoffen und Produkten daraus.

Die Erarbeitung einer Bewertungsmethodik zur Erfassung und objektiven Bewertung (messtechnisch und optisch) der Rillergebnisse war innerhalb des Projektes zentrales Mittel, um Veränderungen im Rillprozess und am Rillergebnis selbst quantifizieren zu können. Das Formen der Rillung und das nachgelagerte Falten sind hierbei von entscheidender Bedeutung und müssen getrennt voneinander betrachtet werden. Im Verarbeitungsprozess können demnach Fehler bereits nach dem Formen der Rillung als auch erst nach dem Falten der hergestellten Rillung sichtbar werden. Abweichend zu Faltschachtelkarton erfolgt für Wellpappe der Stanz- und Rillvorgang auf der Innenseite. Aufgrund teils fehlender Mess- und Bewertungsstandards für Rillergebnisse für Wellpappe war im Rahmen des Forschungsvorhabens auch die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus dem Bereich Rillen von Faltschachtelkarton zu prüfen. Der im Vergleich zu Faltschachtelkarton sehr inhomogene Materialaufbau von Wellpappe führt zu einem abweichenden Materialverhalten. Während Rillungen von Faltschachtelkarton zu einer Delamination im Werkstoff führen, handelt es sich beim Rillen von Wellpappe um eine geometrische Verformung des Halbzeugs. Für die objektive Beschreibung der Rillergebnisse wurden insbesondere zwei Kriterien näher betrachtet: technische Qualität der Rillung (Faltfaktor) und Schädlichkeit der Rillung (Visuelles Fehlerbild).

### **Datenanalyse**

Der den Auswertungen zu Grunde liegende Datensatz aus den ermittelten Werkstoffparametern und den Qualitätskenngrößen hat gezeigt, dass eine abschließende Bewertung der wahrscheinlichen Rillqualitäten nur bedingt möglich ist. Hierbei ist jedoch klar zu unterscheiden zwischen objektiv und quantitativ messbaren (Faltfaktor) sowie subjektiv bewertbaren (visuelle Fehler) Qualitätskriterien. Insbesondere für den Bereich der visuellen Bewertung von Rillen in der Deckschicht, welche aufgrund des Rillens und Falzens auftreten, sind die derzeit verfügbaren Methoden zur Charakterisierung nicht ausreichend, um ein KNN-basiertes Modell gezielt darauf zu trainieren. Hier zeigt sich der Bedarf einer Weiterentwicklung dieser Methoden mit dem Fokus auf eine automatisierte und somit objektive Bewertung mittels bildgebender Methoden. Somit wäre es zukünftig möglich, das visuelle Erscheinungsbild nach dem Vorgang des Rillens zu bewerten und auf Basis der generierten Daten eine verbesserte Vorhersage zu erreichen. Dass dies realisierbar ist, bestätigt die Analyse und Vorhersage des Faltfaktors. Hier war es möglich, gezielt aus der Vielzahl an Parametern die Wichtigsten zu definieren und mit Hilfe dieser Eigenschaften ein vereinfachtes Prognosemodell zu erstellen. Es stellte sich heraus, dass die Abhängigkeiten, insbesondere zu den Rillparametern, gegeben waren. Einflüsse der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften konnten zwar nachgewiesen werden, fielen in Relation zu den Rillparametern jedoch kleiner aus. Dies führt zu einer Fokussierung

auf den Bereich der Weiterentwicklung der Prozesseigenschaften, da die Werkstoffkennwerte nur eine untergeordnete Rolle für die Erreichung einer hohen Rillgüte spielen.

### **Numerisches Prognosemodell auf Basis der Finiten-Elemente-Methode**

Für die Untersuchung geometrischer Einflussfaktoren wurde der Rillprozess unter Verwendung eines geeigneten Materialmodells für Papierwerkstoffe mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) modelliert. Die Modellerstellung beschränkte sich dabei auf das Stanzen einwelliger Wellpappen.

Aufgrund des bereits implementierten Materialmodells für Papier sowie der umfassenden Unterstützung verschiedener Elementtypen, insbesondere der notwendigen Schalenelemente, wurde LS-DYNA als Simulationsprogramm ausgewählt. Das verwendete Materialmodell für Papierwerkstoffe wird in LS-DYNA ausschließlich durch einen expliziten Solver unterstützt und kann bei Bedarf um ein Materialmodell zur Modellierung von Delamination ergänzt werden. Das implementierte Materialmodell ist eine Kombination aus den Materialmodellen von Xia et al. und Nygard et al. und ermöglicht es, die charakteristischen anisotropen Materialeigenschaften von Papier bei elastischen und plastischen Deformationen abzubilden. Dabei werden dem Papier die drei bekannten Hauptrichtungen zugeordnet: MD, die Maschinenrichtung, CD, die Querrichtung und ZD, welche senkrecht zu MD und CD, und damit senkrecht zur Blattebene steht. Die Erstellung der Geometrie, die Vernetzung sowie die Erstellung des Modells über sogenannte „Keywords“ wurde mit der Anwendung LS-PrePost durchgeführt.

Die Dicke der Liner und der Welle wurde über die Dicke der Schalenelemente entsprechend der jeweiligen Rohpapiere definiert. Das Rillmesser wurde durch einen Zylinder modelliert, die Gegenzurichtung als einfache Platte mit einem Kanal. Die Vernetzung der Geometrie erfolgte automatisiert durch LS-PrePost. Für die Rillwerkzeuge wurde ein grobes Netz aus hexaedrischen Volumenelementen verwendet. Die Geometrie der Wellpappe wurde gleichmäßig mit näherungsweise quadratischen Schalenelementen vernetzt, wobei die Liner feiner vernetzt wurden als die Welle. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Liner sich bei Kontakt mit den Rillwerkzeugen möglichst gut an deren Kanten und Radien anpassen sollen. Für die Modellierung der Wellpappe wurden zwei unterschiedliche Formulierungen für Schalenelemente verwendet. Bei den Rillungen parallel zur Welle kamen vollintegrierte Schalenelemente mit vier Integrationsachsen in der Ebene und drei Integrationspunkten durch die Dicke zum Einsatz. Für die Rillung quer zur Welle erwiesen sich die vollintegrierten Schalenelemente aufgrund der auftretenden Verformungen als instabil und es wurden die unterintegrierten Standardelemente mit drei Integrationspunkten durch die Dicke

verwendet. Für eine korrekte Abbildung des lokalen Materialkoordinatensystems des Papiers (MD, CD, ZD) auf den Schalenelementen, wurden die Normalenvektoren der Schalenelemente sowie deren Hauptrichtungen angepasst. Insbesondere bei kleinen Modellen mit vergleichsweise geringen Dehnreserven können die Randbedingungen großen Einfluss auf auftretende Kräfte und Dehnungen haben. Die Randbedingungen für das Modell wurden daher unter Berücksichtigung der verwendeten Rillwerkzeuge festgelegt. Um die Fixierung durch die Gummieniederhalter abzubilden, wurden Elementknoten an den in CD orientierten Rändern des vernetzten Wellpappenmodells der Parallelrillungen fest eingespannt und erhielten dementsprechend keinen Freiheitsgrad. Elementknoten an den in MD orientierten Rändern wurden an der Translation in CD gehindert und verfügten über keinen rotativen Freiheitsgrad. Für die Querrillung wurden die Elementknoten der CD-Ränder an der Translation in MD gehindert und verfügten über keinen rotativen Freiheitsgrad. Die Elementknoten der MD-Ränder erhielten einen translatorischen Freiheitsgrad in ZD bzw. vertikal zur Probe, da sich plastische Deformationen der Welle über einen größeren Bereich ausbreiten können und die Probe vergleichsweise kurz ist.

Zur Validierung des Modells kamen Laborrillungen zum Einsatz. Hierfür wurde die Geometrie der Wellpappenzuschnitte analog zum erstellten Modell gewählt. Diese wurden je nach gewünschter Rillposition in eine Laborstanze eingelegt, positioniert und gerillt. Die Vermessung der Rillproben erfolgte mittels eines Profilometers. Grundsätzlich zeigten die Modelle für die jeweiligen Rillpositionen der Parallelrillungen eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Laborproben. In Abbildung 1 werden unter Verwendung der Laborstanze erzeugte Rillproben beispielhaft für die Zwischenrillung den jeweiligen modellierten Proben nach der Deformation gegenübergestellt. Korrespondierende Merkmale, hier vorwiegend Knicke in der Welle, wurden mit den gleichen Nummern gekennzeichnet.

Es fällt auf, dass die Rückfederung der Modelle nach Rückbewegung des Rillmessers deutlich kleiner ausfällt als bei den Laborproben. Welle und oberer Liner des Modells zeigen überproportionale plastische Deformationen. In der Mitte der Wellenflanken traten bei den Laborproben Delaminationen im Wellenpapier auf, die im Modell nicht berücksichtigt wurden. Die Rillwulst der Talrillung war sowohl im Modell als auch in der Praxis deutlich stärker ausgeprägt als bei der Berg- und Talrillung. Die in der Praxis asymmetrische Rillwulst der Zwischenrillung ist im Modell lediglich angedeutet. Mit Blick auf die Optimierung des Verarbeitungsprozesses und des Materialeinsatzes wurden die beiden „Extremfälle“ der Berg- und Talrillung näher betrachtet. In Abbildung 2 sind die MD-Spannungen im oberen Liner einer Berg- und Talrillung einander am globalen Spannungsmaximum der Talrillung (ca. 1,28 mm Vorschub) gegenübergestellt.

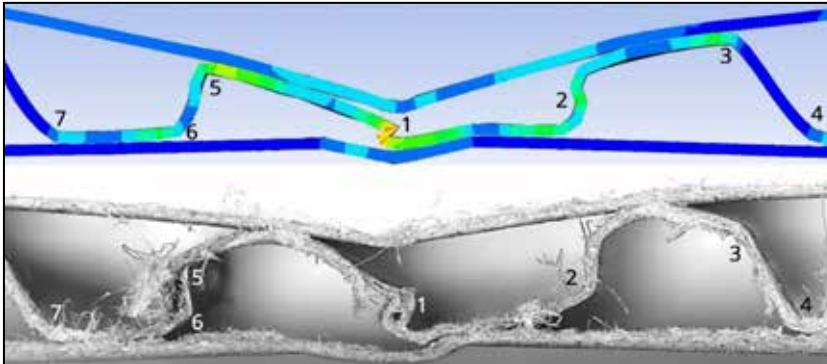


Abbildung 1: Vergleich der Deformationen in Probe und Modell einer Zwischenrillung inkl. effektiver plastischer Deformationen

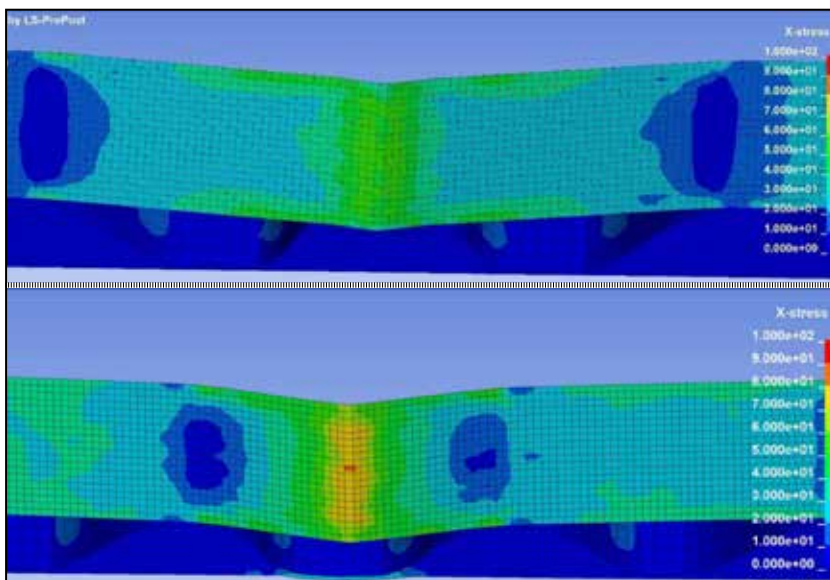


Abbildung 2: Modellerte MD-Spannungen (MPa) im oberen Liner einer Berggrillung (oben) und einer Talrillung (unten) bei 1,28 mm Rillmesservorschub

Für eine Optimierung der Verarbeitungsqualität und des Materialeinsatzes im Zusammenhang mit Rillprozessen empfiehlt es sich auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse, Parallelrillungen mittels konstanter Positionierung der Wellpappenbögen immer als Berggrillungen durchzuführen. Dadurch werden Beanspruchungen des oberen Liners minimiert und ein etwaiger zusätzlicher Faserstoffeinsatz zur Vermeidung von Deckenrissen könnte bei gleichzeitig konsistenten Rill- und Faltergebnissen eingespart werden. Zwischenrillungen sollten schon allein aufgrund ihrer asymmetrischen Ausbildung vermieden werden.

Generell eignet sich ein FEM-Modell sehr gut, um geometrische Parameter und deren relative Auswirkungen auf die Beanspruchungen der Wellpappe in der Verarbeitung zu überprüfen. Dabei kann es sich um die Geometrien der Rillwerkzeuge handeln, den Werkzeugvorschub, Form und Tiefe der Rillnut, falls vorhanden, oder allgemein die Geometrie der Wellpappe. Darüber hinaus können über das Modell lokale Schwachstellen im Werkstück identifiziert werden, die einer hohen Beanspruchung ausgesetzt sind. Auch relative Vergleiche für die Grenzbelastungen der Liner in die jeweiligen Hauptbeanspruchungsrichtungen können anhand der erstellten Modelle verhältnismäßig einfach umgesetzt werden.

### **Zusammenfassung**

Die Ergebnisse des IGF-Forschungsvorhabens gliedern sich in drei verschiedene Teilbereiche:

#### **1. Fokussierung auf die Rillgeometrie**

Die Datenanalysen haben gezeigt, dass die Korrelationen der Rillergebnisse, insbesondere zu den Rillparametern, stark ausgeprägt waren. Demnach sollten Rillmesser und, wenn eingesetzt, Gegenzurichtung immer dem Material angepasst werden. Da den Rillparametern ein messbarer Anteil an der Rillgüte zukommt, müssen Entwicklungen über das Projekt hinaus vorangebracht werden, die auch unterschiedliche Rillgeometrien betrachten und etwaige Verbesserungen in diesem Bereich auch durch Varianz der Messer- und Gegenzurichtungsgeometrien betrachten.

#### **2. Einfluss der Materialparameter auf das Rillergebnis**

Es ist möglich, eine Vielzahl an Materialparametern an Wellpappen und ihren Rohpapieren zu ermitteln. Die Datenanalyse hat gezeigt, dass diese Parameter durchaus hohe Korrelationskoeffizienten zu den Rillqualitäten aufzeigen. Generell war es jedoch so, dass kein Messverfahren hier explizit aus der großen Anzahl an verwendeten Verfahren heraussticht. Dies kann jedoch zukünftig auch als Vorteil gesehen werden, da die Weiterentwicklung des Prognosemodells somit nicht von einzelnen und eventuell auch schwer zu ermittelnden Parametern abhängt.

#### **3. Rillung auf dem Wellenberg**

Die messtechnischen Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass der Ort der Rillung einen Einfluss auf die Rillqualität hat. Mit Hilfe des FEM-Modells war es möglich zu definieren, dass Rillungen auf dem Wellenberg die für das Material schonendste Verarbeitungsform sind. Die hierbei entstehenden Beanspruchungen sind im Gegensatz zu Tal- oder Zwischenrillungen die geringsten und zeigen somit folglich die geringsten Fehler.

**Schlussfolgerung:** *Mit Abschluss des Forschungsvorhabens liegt ein datenbasiertes Prognosemodell zur Vorhersage des Faltfaktors für einwellige Wellpappen vor sowie ein vereinfachtes numerisches Modell zur Untersuchung der Einflussfaktoren beim Rillvorgang.*